



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculté de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE D'HYDRAULIQUE & DE GENIE CIVIL

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Hydraulique

Présenté par :

1- BOUGHEZALA MEHAMMED MOHAMMED

Intitulé :

**Approche Hydro climatologique calculant les paramètres du
bilan hydrique dans les zones hyperarides (Cas d'el-oued)**

Soutenue le : ...14.../...06... /2026

Devant le jury composé de :

Dr : Zair Nadjat

Président

Dr : Ezzair Issam

Examineur

Dr : KHECHANA Salim

Encadreur

Année académique : 2025/2026

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadreur, Dr. Khachana Selim, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses orientations scientifiques pertinentes et ses précieux conseils tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Mes sincères remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants et du personnel du Département d'Hydraulique et de Génie Civil, pour la qualité de la formation dispensée et pour les connaissances acquises durant mon parcours universitaire.

Je tiens à adresser ma profonde reconnaissance aux responsables et aux travailleurs de l'Entreprise Nationale de Forage Hydraulique (FORAQUA) pour leur soutien, leur confiance et les facilités accordées tout au long de mon parcours professionnel et académique.

Mes remerciements les plus distingués vont à Monsieur Bouhnik Fouzi, Président-Directeur Général, à Mademoiselle Lazraoui Ghania, ainsi qu'à mon collègue Monsieur Abderrazak Kadouri, pour leur disponibilité, leur compréhension, leurs encouragements et leur soutien constant. Malgré les contraintes et les exigences professionnelles, ils m'ont toujours accordé les facilités nécessaires pour poursuivre mes études et mener à terme ce travail dans les meilleures conditions.

J'adresse également mes remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, et à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, leurs conseils ou leurs encouragements.

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude, de mon respect et de ma sincère reconnaissance.

Dédicace

À mes très chers parents,

Aucune dédicace ne saurait exprimer pleinement ma reconnaissance, mon respect et mon affection pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis afin de m'offrir les meilleures conditions de réussite. Que Dieu les préserve, leur accorde santé, bonheur et longue vie.

À mon épouse,

Pour son amour, sa patience, sa compréhension et son soutien indéfectible tout au long de ce parcours. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et de mon estime.

À mes chers enfants :

Ali, Abdeldjabbar, Safouane et Lokmane

Qui illuminent ma vie par leur présence, constituent ma plus grande fierté et demeurent une source permanente de motivation et d'espérance.

À mes frères et sœurs,

À toute ma famille,

À mes amis,

Et à toutes les personnes qui m'ont accompagné, soutenu et encouragé de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.

Je dédie ce modeste mémoire avec un profond sentiment de reconnaissance, d'affection et de respect.

Mohammed Boughezala Mehammed

Résumé

La région d'El Oued, située au Sud-Est de l'Algérie, est caractérisée par un climat hyperaride marqué par des températures élevées, une faible pluviométrie, une forte insolation et une demande croissante en eau, notamment dans le secteur agricole. Sur le plan géologique, elle appartient au bassin saharien nord-oriental et se distingue par la présence d'importantes ressources en eaux souterraines, principalement les aquifères du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire, qui constituent la principale source d'alimentation en eau de la région. Dans ce contexte, cette étude vise à évaluer les paramètres du bilan hydrique à travers l'analyse des données hydroclimatiques de la région. Pour ce faire, plusieurs méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ont été appliquées, notamment celles de Penman-Monteith (FAO), Blaney-Criddle, Turc, Thornthwaite et la relation de l'ANRH. La comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées a montré que la méthode de Penman-Monteith fournit les estimations les plus représentatives des conditions climatiques locales. L'étude a également porté sur l'estimation de la Réserve Utile (RU) et de la Réserve Facilement Utilisable (RFU), dont les résultats ont mis en évidence une faible disponibilité de l'eau dans le sol ainsi qu'un déficit hydrique important lié à la faiblesse des précipitations et à l'intensité de l'évapotranspiration. Les résultats obtenus confirment la vulnérabilité hydrique de la région d'El Oued et soulignent l'intérêt de poursuivre les recherches visant à développer ou à ajuster des équations et des modèles mieux adaptés aux conditions hyperarides locales afin d'améliorer la précision de l'estimation de l'évapotranspiration et des réserves en eau du sol.

Mots-clés: Bilan hydrique ; El Oued ; Zone hyperaride ; Évapotranspiration réelle , Thornthwaite ; RFU ; Déficit hydrique .

Summary:

The El Oued region, located in southeastern Algeria, is characterized by a hyper-arid climate marked by high temperatures, low rainfall, intense sunshine, and increasing water demand, particularly in the agricultural sector. Geologically, the region belongs to the northeastern Saharan Basin and is distinguished by significant groundwater resources, mainly the Terminal Complex and Continental Intercalaire aquifers, which constitute the principal source of water supply. In this context, the present study aims to evaluate the main parameters of the water balance through the analysis of regional hydroclimatic data. Several methods were applied to estimate potential evapotranspiration (PET), including the Penman-Monteith (FAO), Blaney-Criddle, Turc, Thornthwaite, and ANRH methods. A comparison between calculated and measured values showed that the Penman-Monteith method provides the most representative estimates under local climatic conditions. The study also included the estimation of Available Water Capacity (RU) and Readily Available Water Capacity (RFU), highlighting low soil water availability and a significant water deficit resulting from scarce precipitation and high evapotranspiration rates. The obtained results confirm the water vulnerability of the El Oued region and emphasize the need for further research to develop or adapt empirical relationships and models better suited to local hyper-arid conditions, thereby improving the accuracy of evapotranspiration and soil water reserve estimations.

Keywords: Water balance; El Oued; Hyper-arid zone; Potential evapotranspiration; Thornthwaite ; Available Water Capacity ; Readily Available Water Capacity (RFU); Water deficit.

الملخص:

تقع منطقة وادي سوف في الجنوب الشرقي للجزائر، وتتميز بمناخ فائق الجفاف يتسم بارتفاع درجات الحرارة، وضعف التساقطات المطرية، وطول مدة السطوع الشمسي، إضافة إلى تزايد الطلب على المياه، خاصة في المجال الفلاحي. كما تنتمي جيولوجيًا إلى الحوض الصحراوي الشمالي الشرقي، وتتميز هيدروجيولوجيًا بوجود خزانات مائية جوفية هامة، أهمها خزان المركب النهائي وخزان القاري المتداخل، اللذان يمثلان المصدر الرئيسي للموارد المائية بالمنطقة. وفي هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم معاملات الميزان المائي من خلال تحليل المعطيات الهيدرو-مناخية لمنطقة الدراسة. ولتحقيق ذلك، تم تطبيق عدة طرق لتقدير التبخر النتحي المحتمل، من بينها طريقة بنمان-مونتيث المعتمدة من طرف منظمة الأغذية والزراعة (FAO) طريقة بلايني-كريدل، وتورك، وثورنثوايت، وعلاقة الوكالة الوطنية للموارد المائية ANRH. وقد أظهرت المقارنة بين القيم المحسوبة والقيم المقاسة أن طريقة بنمان-مونتيث تقدم تقديرات أكثر تمثيلًا للظروف المناخية المحلية. كما شملت الدراسة تقدير الاحتياطي المائي النافع (RU) والاحتياطي المائي سهل الاستعمال (RFU)، حيث أبرزت النتائج ضعف توفر المياه المخزنة في التربة ووجود عجز مائي معتبر ناتج عن قلة التساقطات وارتفاع معدلات التبخر النتحي. وتؤكد النتائج المتحصل عليها هشاشة الوضع المائي بمنطقة وادي سوف، كما تبرز أهمية مواصلة الدراسات والأبحاث الرامية إلى تطوير أو تكييف علاقات ونماذج أكثر ملاءمة للظروف المحلية للمناطق فائقة الجفاف، بما يسمح بتحسين دقة تقدير التبخر النتحي واحتياطات المياه في التربة والحصول على نتائج أكثر تقاربًا مع الواقع الهيدرو-مناخي للمنطقة المدروسة.

الكلمات المفتاحية: الميزان المائي، وادي سوف، المناطق فائقة الجفاف، التبخر النتحي، ثورنثوايت، الاحتياطي المائي النافع، الاحتياطي المائي سهل الاستعمال (RFU)، العجز المائي.

Table des matières

Remerciements.....	
Dédicace	
résumé.....	
table des matières	
List de Figures	
List de Tableaux	
Introduction générale.....	I

Chapitre I: Concept de cycle de l'eau et bilan hydrique

Introduction:.....	4
I.1. Le cycle hydrologique	4
I.2. Le bilan hydrique: définition et composantes.....	6
I.2.1. Introduction au bilan hydrique.....	6
I.2.2. Principe et équation du bilan hydrique	6
I.2.3. Les composantes du bilan hydrique	7
I.2.2. Les pertes d'eau (flux sortants).....	8
I.3. La variation du stock d'eau dans le sol.....	9
I.4. Importance du bilan hydrique dans les études hydrologiques	9
I.5. les principales propriétés hydriques du sol:.....	10
I.5.1. L'humidité du sol.....	10
I.5.2. La réserve utile RU d'un sol.....	10
I.5.3. La réserve facilement utilisable	12
I.5.4. La capacité au champ.....	12
I.5.5. Le point de flétrissement.....	13
I.5.6. La densité apparente	13
Conclusion:	13

Chapitre II: Présentation de la Zone d'étude

Introduction.....	15
II.1 Situation Géographique.....	15
II.2 Ressources Hydriques	17
II.3 Situation Climatologique	17
II.3.1 La Température.....	17
II.3.2 La Précipitation.....	18
II.3.3. L'évaporation	19

II.3.4. L'humidité :	20
II.3.5. La durée d'insolation	21
II.3.6. Le Vent	22
II.4. Détermination des périodes sèches et de l'étage bioclimatique de la région d'El-Oued	23
II.4.1. Diagramme d'Emberger :	24
II.4.2. L'indice d'aridité de De Martonne (1926)	25
II.5. Contexte Géologique :	26
II.6. Contexte Hydrogéologique :	27
II.7. Problématiques majeures :	29
Conclusion:	29

Chapitre III: ESTIMATION DE L'évapotranspiration

Introduction	31
III.1 Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration	33
III.1.1 Méthodes directes (techniques de mesure)	33
III.1.2 Méthodes indirectes (formules empiriques)	35
Conclusion	44

Chapitre IV: Estimation de la Réserve Facilement Utilisable

Introduction:	47
IV.1. Estimation De La Réserve Facilement Utilisable :	47
IV.1.1. Estimation par la formule de Rawls :	47
IV.1.2. Méthode empirique :	48
IV.1.3. Estimation par la formule de Hallaire :	49
IV.2. Estimation par les teneurs volumiques en eau :	58
IV.2.1. Fonctions de pédotransfert :	59
IV.2.2. Méthode des coefficients de texture :	60
Conclusion :	64

Chapitre V : Comparaison de l'évaporation mesurée avec celle des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration

Introduction	67
V.1 Evolutions mensuelles de l'évaporation mesurée et les ETP estimées par les Formules empiriques	67
V.2 Discussion des résultats	68
V.2.1 Comparaison des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration	68
V.3. Calcul du bilan hydrique	76
V.3.1 Facteurs influençant le bilan hydrique	76
Conclusion	78

Conclusion générale	79
Référence.....	82
Annexes	84

List de Figures

Figure I.1. Représentation du cycle de l'eau.....	5
Figure I.2 Schemat d'un bilan hydrique.....	10
Figure I.3: Illustration des limites haute et basse de la réserve utile (GCHP2E, 2016)	12
Figure II.1: Situation géographique de la wilaya d'El-oued	16
Figure II.2: Situation géographique de la zone d'étude	17
Figure II.3: Température moyenne mensuelle à la station de Guemmar au cours la période 1996 - 2020.....	18
Figure II.4: Précipitations moyenne mensuelles enregistrées à la station de Guemmar au cours la période 1996 – 2020	19
Figure II.5: Evaporation moyenne mensuelle pour la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)	20
Figure II.6 : L'humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).....	21
Figure II.7: Durée d'insolation moyenne, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)	22
Figure II.8. la rose des vents (Source :www.pinterest.com)	23
Figure II.9: Diagramme ombrothermique de « GAUSSEN» pour la région d'El oued.....	24
Figure II.10: Diagramme d'Emberger de la station d'El-Oued (1996-2020).....	25
Figure III.1: bac «classe A».....	34
Figure III.2 : Le bac de colorado	34
Figure III.3 : Evaporomètre Piche	35
Figure III.4: Estimation de l'ETP avec la formule de Turc.....	37
Figure III.5: Estimation de l'ETP avec la formule de Blaney & Criddle.....	39
Figure III.6: Estimation de l'ETP avec la formule de Thornthwaite.....	40
Figure III.7: Estimation de l'ETP avec la formule de l'ANRH	42
Figure III.8: Estimation de l'ETP avec la formule de Penman-Monteith	44
Fig. IV.1 : Différents types d'eau dans le sol (CTA, 1976).	53
Fig. IV.2 : Relation potentiel - humidité pour trois types de sol (CTA, 1976).	55
Fig. IV.3 : Relation potentiel - humidité (effet d'hystérésis), (CTA, 1976).	56
Fig. IV.4 : Diagrammes de classification des textures (Jamagne, 1967).....	61
Figure V.1 : Régression linéaire entre les valeurs de l'ETP mesurées et l'ETP calculées par les cinq formules	71
Figure V.2 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & $ETP_{Bl/Cr}$	74
Figure V.3 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{ANRH}	74
Figure V.4 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{Thornt}	74
Figure V.5 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{Turc}	74
Figure V.6 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{Penman}	74
Figure V.7 : Evolutions moyennes mensuelle des ETP estimées et de l'évaporation de Piche, pour la région d'Oued Souf au cours de la période (1996 - 2020).	75

List de Tableaux

Tableau II.1 Répartition mensuelle de la température (1996-2020).....	18
Tableau II.2 Précipitations mensuelles, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).	19
Tableau II.3 : Evaporation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).....	20
Tableau II.4 : Humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).....	21
Tableau II.5 : Insolation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).....	22
Tab.II.6: Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued	28
Tab.II.7 : Etendue et volume des ressources en eaux souterraines.	29
Tableau III.1 : calcul de l'ETP par la formule de Turc	37
Tableau III.2: calcul de l'ETP par la formule de Blaney-Criddle.....	38
Tableau III.3: coefficient de correction $f(h)$ pour une latitude de 33.5° N (voir Annexe1)	39
Tableau III.4 : calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite	40
Tableau III.5 : calcul de l'ETP par la formule de l'ANRH	41
Tableau III.6 : calcul de l'ETP par la formule de Penman - Monteith (FAO).....	44
Tab. IV. 1 : Caractères morphologiques essentiels des sols.....	50
Tab. IV. 2 : Tableau des coefficients de texture (Jamagne et al., 1977)	61
Fig. IV.5 : Triangle de coefficient des textures Jamagne et Bétrémieux (1992).....	63
Fig. IV.6 : Résultat virtuel de la superposition des strates composant le sol	64
Tableau V.1: Les valeurs de l'ETP des six modèles	67
Tableau V.2 Statistiques descriptives	68
Tableau V.3 Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée.....	69
Tableau V.4 : Équation linéaire entre l'ETP mesurée et celle de différentes formules	70
Tableau V.5 Résultats du T.test pour la différence entre les moyennes.....	72
Tableau V.6: Les valeurs de l'erreur relatif des cinq modèles.....	73
Tableau V.7 Calcul de bilan hydrique.	77

Introduction générale

L'eau représente l'une des ressources naturelles les plus essentielles à la vie et au développement des sociétés humaines. Elle constitue un élément fondamental du fonctionnement des écosystèmes et intervient dans la majorité des activités économiques, en particulier dans le domaine agricole où elle demeure un facteur déterminant de la production. Toutefois, malgré son importance capitale, les ressources en eau douce exploitables restent limitées et leur répartition spatiale et temporelle demeure très inégale. Cette situation pose avec acuité la problématique de la gestion et de l'utilisation rationnelle de l'eau, notamment dans les régions caractérisées par des conditions climatiques contraignantes. FAO(2012)

Les régions arides et hyperarides figurent parmi les milieux les plus sensibles face à la rareté de l'eau. Ces zones se distinguent généralement par une pluviométrie très faible et irrégulière, des températures élevées, ainsi qu'une forte insolation qui favorise une évaporation intense tout au long de l'année. Dans ces conditions climatiques sévères, les apports naturels en eau demeurent très limités et souvent insuffisants pour répondre aux besoins des écosystèmes naturels et des activités humaines. Cette situation engendre un déficit hydrique presque permanent qui constitue l'une des principales contraintes au développement agricole et à la gestion durable des ressources naturelles.

Dans ce contexte, l'étude des interactions entre les facteurs climatiques et hydrologiques revêt une importance particulière pour mieux comprendre la dynamique de l'eau dans ces milieux fragiles. Parmi les approches scientifiques permettant d'analyser cette dynamique, le bilan hydrique occupe une place centrale. Il s'agit d'un outil d'analyse qui permet d'établir l'équilibre entre les différentes entrées et sorties d'eau au sein d'un système donné, en tenant compte principalement des précipitations, de l'évapotranspiration, de l'infiltration et du ruissellement. L'évaluation de ces différentes composantes offre une vision globale du fonctionnement hydrologique d'un territoire et permet d'apprécier les conditions de disponibilité de l'eau.

L'intérêt du calcul du bilan hydrique apparaît particulièrement dans le domaine agricole, où la connaissance des besoins en eau des cultures constitue un élément déterminant pour une gestion rationnelle de l'irrigation. En effet, l'estimation des déficits hydriques et la détermination des quantités d'eau nécessaires permettent d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles et de mieux adapter les pratiques agricoles aux conditions climatiques locales. Dans les régions sahariennes, où les ressources hydriques

sont limitées et fortement sollicitées, l'étude du bilan hydrique constitue ainsi un outil indispensable pour la planification et la gestion durable de l'eau.

La région d'El Oued, située dans le sud-est de l'Algérie, s'inscrit pleinement dans ce contexte environnemental. Elle se caractérise par un climat désertique très sec, marqué par la rareté des précipitations, l'intensité de l'ensoleillement et des températures élevées durant une grande partie de l'année. Malgré ces contraintes climatiques, cette région connaît une activité agricole importante, ce qui rend la maîtrise et l'évaluation des ressources en eau particulièrement nécessaires.

Dans ce cadre, nous étudions dans cette mémoire intitulée :

« Approche hydro climatologique calculant les paramètres du bilan hydrique dans les zones hyperarides : cas d'El Oued »

Nous avons divisé notre mémoire en cinq chapitres détaillés comme suit:

-le premier chapitre présente les notions fondamentales relatives au cycle hydrologique ainsi qu'aux principales propriétés hydriques du sol intervenant dans la disponibilité de l'eau pour les cultures.

-Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude. Il porte sur sa situation géographique ; ses caractéristiques climatiques ainsi que son contexte géologique et hydrogéologique ; en mettant en évidence les principales ressources en eaux souterraines et les contraintes qui leur sont associées.

-Le troisième chapitre est consacré au calcul de l'évapotranspiration avec les différentes formules empiriques évoquées ci-dessus.

-le quatrième chapitre est consacré à l'estimation de la Réserve Utile (RU) et de la Réserve Facilement Utilisable (RFU) du sol. Il présente la méthodologie de calcul adoptée ainsi qu'une analyse des résultats obtenus, afin d'évaluer la disponibilité de l'eau pour les cultures et son influence sur le bilan hydrique dans la région d'El Oued.

-Le cinquième chapitre est consacré à une étude comparative de différentes formules empiriques et la sélection de la formule optimale et la plus adaptée à utiliser dans la zone d'étude, ainsi que des zones climatiquement similaires, et à la fin nous avons calculé le bilan hydrique de la région, s'appuyant sur les producteurs de pommes de terre et de palmiers en tant que produits distincts pour la région.



Chapitre I

Concept de cycle de l'eau et bilan hydrique



Introduction:

Dans ce chapitre, nous étudions le cycle hydrologique ainsi que le bilan hydrique, en mettant en évidence ses différentes composantes et son importance. Nous abordons également les principales propriétés hydriques du sol, notamment l'humidité du sol, la capacité au champ, le point de flétrissement, la densité apparente, la réserve utile et la réserve facilement utilisable.

I.1. Le cycle hydrologique

L'eau est la source principale et originelle de toute vie et elle se retrouve dans l'atmosphère terrestre sous trois états :

- Solide : neige et glace.
- Liquide : eau chimiquement pure ou chargée en solutés.
- Gazeux : à différents degrés de pression et de saturation.

La température, la pression et le degré de pollution de l'atmosphère sont essentiellement les facteurs principes qui ont un effet sur le changement de la phase de l'eau.

Les eaux sont en constante circulation sur la terre et subissent des changements d'état, on soulignera que l'eau est le seul et unique élément qui existe sous ces trois états dans les conditions que l'on rencontre à la surface de la Terre. L'importance de ces modifications fait de l'eau le principal agent de transport d'éléments physiques, chimiques et biologiques. L'ensemble des processus de transformation et de transfert de l'eau forme le cycle hydrologique.

Le cycle hydrologique est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre. Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi concomitants.

Le terme "Cycle de l'eau" nécessite la permanence des échanges entre l'eau de surface et l'eau atmosphérique, par un jeu qui combine l'évaporation et les précipitations, alors que l'évaporation qui causée par le réchauffement de la surface des océans sous l'effet du rayonnement solaire, entraîne la libération de vapeur d'eau dans l'atmosphère (fig. I.1). Cette vapeur se déplace ensuite au gré des mouvements des masses d'air par des phénomènes de convection et d'advection. D'autre part par, soumise à des conditions favorables, la vapeur d'eau se condense pour former les nuages qui se déplacent vers les continents et se

transforment partiellement en précipitation. Que ces précipitations prennent la forme de neige ou de pluie, la majorité d'entre elles retournent aux océans, qui occupent environ 70% de la surface de la terre. (Anctil, 2005)

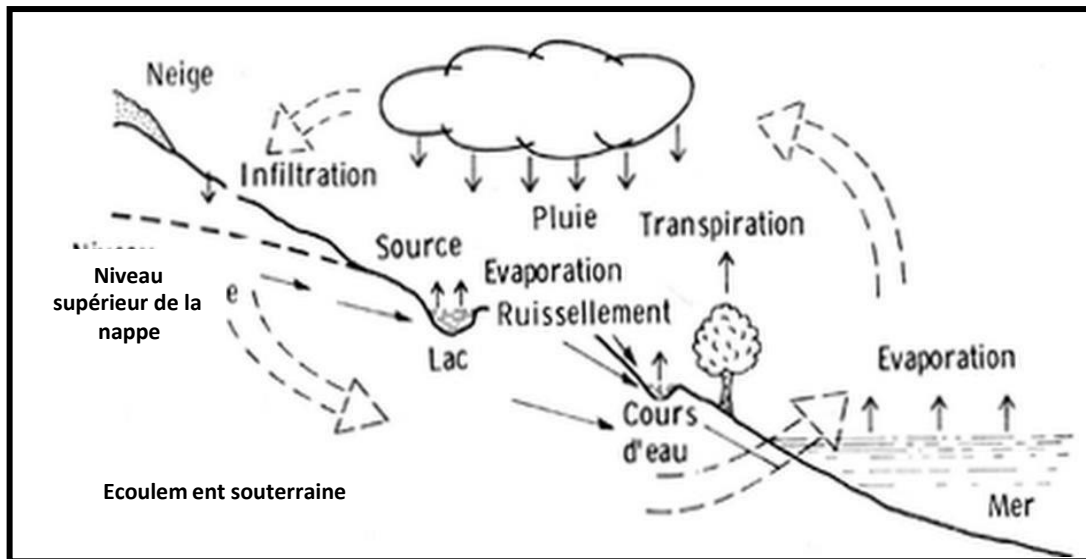


Figure I.1. Représentation du cycle de l'eau

- La précipitation, sous forme de pluie ou de neige, est la source d'apport en eau. Elle dépend principalement des conditions climatiques.
- L'évapotranspiration correspond à l'eau qui est transpirée par les plantes et évaporée au niveau du sol. Elle dépend de la température, du type de végétation et des propriétés physiques du sol et aussi du taux d'humidité dans l'air.
- Le ruissellement de surface (ou écoulement de surface) survient lors d'un événement de précipitation durant lequel la capacité d'infiltration du sol est atteinte de sorte que l'eau ne peut plus le pénétrer et s'écoule en surface. Il dépend entre autres, du climat, de la pente, du type de sol et ses propriétés physiques, et de l'utilisation du sol.
- L'infiltration (qui devient l'écoulement de l'eau souterraine) se divise en deux parties:
 - ✓ Le ruissellement hypodermique s'effectue près de la surface et est constitué de l'eau qui s'infiltré dans le sol et qui circule horizontalement dans les couches supérieures jusqu'à ce qu'elle fasse résurgence à la surface, par la pente du terrain ou dans un cours d'eau, ou bien jusqu'à ce qu'elle s'infiltré plus bas vers l'aquifère.

✓ La recharge correspond à l'eau qui atteint l'aquifère. Le partage entre le ruissellement hypodermique et la recharge dépend surtout des propriétés hydrogéologiques et des formations géologiques.

Le cycle de l'eau est donc sujet à des processus complexes et variés parmi lesquels nous citerons les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des végétaux), l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains qui constituent les principaux éléments du cycle hydrologique. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur qui est le "soleil" un organe vital du cycle hydrologique. Le cycle hydrologique est donc un cycle fermé et répétitif.

I.2. Le bilan hydrique: définition et composantes

I.2.1. Introduction au bilan hydrique

Le bilan hydrique constitue l'un des concepts fondamentaux de l'hydrologie et de l'agro-hydrologie. Il permet d'analyser les échanges d'eau entre l'atmosphère, le sol, la végétation et les nappes souterraines dans un système donné. Le principe du bilan hydrique repose sur la loi de conservation de la masse, selon laquelle la quantité totale d'eau entrant dans un système hydrologique doit être égale à la somme des quantités d'eau qui en sortent, augmentée ou diminuée de la variation du stock d'eau dans ce système pendant une période donnée.

Le bilan hydrique correspond ainsi à une opération comptable qui consiste à comparer les flux d'eau entrants et sortants d'un milieu naturel, qu'il s'agisse d'un sol, d'une parcelle agricole ou d'un bassin versant. L'objectif principal est de déterminer l'évolution des réserves en eau du sol et d'évaluer la disponibilité de l'eau pour la végétation et les activités humaines.

Dans les études hydrologiques, le bilan hydrique est souvent calculé sur une période donnée (journalière, mensuelle ou annuelle) et exprimé en millimètres d'eau (mm), ce qui correspond à un volume d'eau par unité de surface. Cette approche permet de comparer facilement les différentes composantes du cycle de l'eau dans une région donnée.

I.2.2. Principe et équation du bilan hydrique

Le bilan hydrique est basé sur l'équation fondamentale de conservation de l'eau. Dans sa forme la plus générale, il peut s'exprimer comme suit :

où : $P = ETR + R + I + \Delta S$

P : précipitations (apports d'eau)

ETR : évapotranspiration réelle

R : ruissellement

I : infiltration profonde

ΔS : variation du stock d'eau dans le sol

Cette équation indique que toute l'eau reçue par un système hydrologique se répartit entre plusieurs processus hydrologiques, notamment l'évaporation, la transpiration, l'écoulement et l'infiltration dans le sol.

Dans certains cas, l'équation peut être simplifiée sous la forme suivante :

où Q représente les écoulements (ruissellement et infiltration profonde) et ΔR la variation des réserves en eau du sol et du sous-sol.

I.2.3. Les composantes du bilan hydrique

Le bilan hydrique est constitué de plusieurs flux hydrologiques qui représentent les entrées et les sorties d'eau dans un système.

I.2.3.1 Les apports d'eau (flux entrants)

Les flux entrants correspondent aux apports d'eau dans le système hydrologique. Le principal apport est constitué par les précipitations, mais d'autres sources peuvent également contribuer à l'alimentation du système.

. Les précipitations (P)

Les précipitations représentent la principale source d'eau dans le bilan hydrique. Elles comprennent toutes les formes d'eau provenant de l'atmosphère, notamment :

la pluie

la neige

la grêle

la rosée et la condensation

Les précipitations jouent un rôle essentiel dans le renouvellement des ressources en eau. Elles alimentent les sols, les nappes souterraines et les cours d'eau, et constituent donc le point de départ du cycle hydrologique.

. Les remontées capillaires

Dans certaines conditions, l'eau peut remonter depuis les nappes souterraines vers la surface du sol grâce au phénomène de capillarité. Ce processus est particulièrement important dans les régions arides où la nappe phréatique est relativement proche de la surface.

. Les apports latéraux

Les flux latéraux peuvent également contribuer aux entrées d'eau dans un système hydrologique. Il s'agit notamment :

des écoulements provenant des zones amont

des infiltrations latérales provenant d'autres parcelles ou bassins voisins

Ces flux sont particulièrement importants dans les études à l'échelle du bassin versant.

I.2.2. Les pertes d'eau (flux sortants)

Les pertes d'eau correspondent aux processus par lesquels l'eau quitte le système hydrologique.

L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est l'une des composantes les plus importantes du bilan hydrique. Elle correspond à la combinaison de deux processus :

L'évaporation

L'évaporation est le processus par lequel l'eau liquide se transforme en vapeur d'eau et retourne dans l'atmosphère. Elle se produit à partir :

des surfaces d'eau libres (lacs, rivières)

du sol humide

de la végétation mouillée

La transpiration

La transpiration correspond à la perte d'eau par les plantes à travers leurs stomates. L'eau absorbée par les racines est transportée vers les feuilles, où elle est libérée sous forme de vapeur dans l'atmosphère.

L'ensemble de ces deux processus constitue l'évapotranspiration, qui représente souvent la plus grande perte d'eau dans le bilan hydrique, en particulier dans les régions chaudes et arides.

Le ruissellement

Le ruissellement correspond à l'écoulement de l'eau à la surface du sol lorsque les précipitations dépassent la capacité d'infiltration du sol.

Ce phénomène dépend de plusieurs facteurs :

l'intensité des précipitations

la pente du terrain

la nature du sol

la couverture végétale

Le ruissellement constitue une source importante d'alimentation des cours d'eau et des lacs.

L'infiltration

L'infiltration correspond au processus par lequel l'eau pénètre dans le sol et se déplace vers les couches profondes.

Ce phénomène joue un rôle essentiel dans la recharge des nappes phréatiques et dans l'alimentation des aquifères souterrains. La vitesse d'infiltration dépend principalement de la texture et de la structure du sol.

I.3. La variation du stock d'eau dans le sol

La variation du stock d'eau représente la quantité d'eau stockée ou perdue dans le sol au cours d'une période donnée.

Ce stock correspond généralement à la réserve utile du sol, c'est-à-dire la quantité d'eau que le sol peut retenir et mettre à la disposition des plantes. Lorsque les précipitations sont supérieures aux pertes par évapotranspiration et ruissellement, la réserve en eau du sol augmente. À l'inverse, lorsque les pertes dépassent les apports, le stock d'eau diminue et peut entraîner un déficit hydrique pour la végétation.

I.4. Importance du bilan hydrique dans les études hydrologiques

Le bilan hydrique est un outil essentiel pour l'étude et la gestion des ressources en eau. Il permet notamment :

d'évaluer la disponibilité de l'eau dans le sol

de déterminer les besoins en irrigation des cultures

d'analyser les périodes de déficit ou d'excédent hydrique

de comprendre le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant

Dans le domaine de l'agriculture, le bilan hydrique est largement utilisé pour optimiser l'irrigation et améliorer la gestion de l'eau dans les systèmes agricoles.

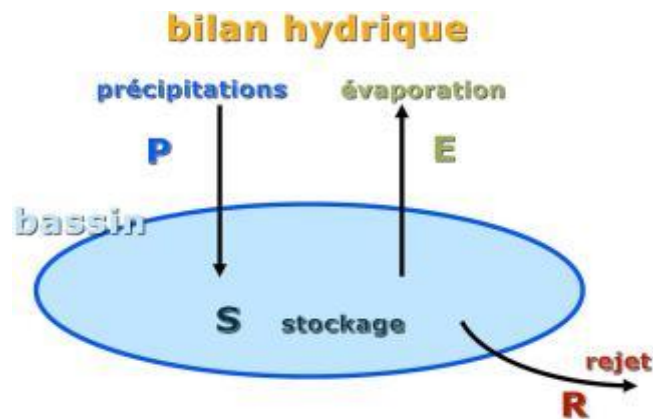


Figure I.2 Schemat d'un bilan hydrique.

I.5. les principales propriétés hydriques du sol:

I.5.1. L'humidité du sol

L'humidité du sol joue un rôle important dans le maintien de la vie sur la terre, sa première utilisation est de permettre la croissance de la végétation.

Elle est déterminée essentiellement par la valeur de la capacité au champ (volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir) et de la valeur du point de flétrissement (volume minimal d'eau dans le sol pour qu'une plante ne meure pas).

I.5.2. La réserve utile RU d'un sol

La Réserve Utile (RU) d'un sol correspond à la quantité d'eau comprise entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement. La capacité au champ est le volume maximal d'eau retenu par les forces de capillarité d'un sol (plus la quantité d'eau dans ce dernier est faible, plus les forces de capillarité ne sont élevées). Le point de flétrissement correspond à la teneur en eau d'un sol en dessous de laquelle la plante ne peut plus vaincre la tension exercée par les forces de capillarité et satisfaire ses besoins en eau. La réserve utile

dépend de la profondeur d'enracinement de la plante, de la densité apparente, de la texture du sol ainsi que de la teneur en éléments grossiers. Elle est mesurée horizon par horizon, dans la tranche du profil prospectée par les racines. La RU (en mm) se calcule par l'équation suivante (J.Beauchamp, 2006) :

$$RU = (W_{cc} - W_{pfp}) * h * Da / 100$$

W_{cc} : humidité à la capacité au champ (mm),

W_{pfp} : humidité au point de flétrissement (mm),

Da : densité apparente & h : épaisseur du sol (mm).

La RU peut être calculée par la formule de F.Rawls comme suit:

$$RU = (W_{330} - W_{15000}) * Da * Z$$

Où:

W₃₃₀ : la teneur en eau du sol à -330 hPa (mm/m), c'est-à-dire la capacité au champ.

W₁₅₀₀₀ : la teneur en eau à -15000 hPa (mm/m), c'est-à-dire le point de flétrissement .

Ar : la teneur en argile (%) ;

Sa : la teneur en sable (%) ;

MO : la teneur en matière organique (%) ;

Z : l'enracinement (m).

La réserve utile est composée de deux fractions : la RFU (Réserve Facilement Utilisable) et la RS (Réserve de Survie). Au-delà de cette dernière, le point de flétrissement permanent est atteint.

Le rapport RFU/RU est variable de 1/3 à 2/3 (P.Duchaufour, 2000). En climat tempéré, la RU s'épuise progressivement pendant la période végétative et se reconstruit en hiver. Les variations de stock de la RU dépendent donc des précipitations et de l'évapotranspiration :

- Lorsque les précipitations sont supérieures à l'Evapotranspiration Réelle (ETR), la RU se remplit,
- Lorsque les précipitations sont inférieures à l'ETR, la RU ne peut se remplir.
- Quand la capacité maximale de la RU est dépassée, une partie de l'eau descend vers la nappe.

I.5.3. La réserve facilement utilisable

La RFU représente l'eau facilement mobilisable par les cultures, elle dépend de la profondeur du sol et de l'enracinement de la végétation. C'est " celle que les plantes peuvent facilement utiliser par leur tension osmotique sans avoir à freiner l'ETR " (Salim Kh 2016).

Bouchet et Hallaire (1964), examinant la notion de réserve facilement utilisable (RFU), ont conclu que les variations du rapport de la RFU à la réserve utile (RU) pouvaient s'expliquer par le niveau d'évapotranspiration potentielle instantané précité et par les caractéristiques de diffusion de l'eau du sol vers les racines et à travers la plante ;

ces auteurs envisageaient la possibilité, pour ce rapport RFU/RU, de pouvoir varier entre 0 et 1. (Salim Kh 2016).

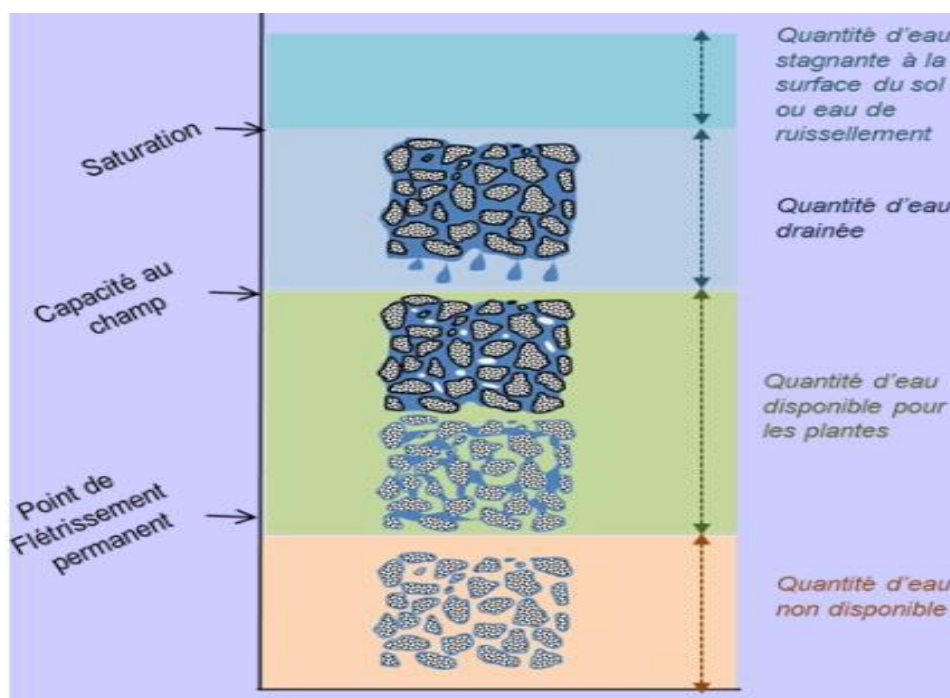


Figure I.3: Illustration des limites haute et basse de la réserve utile (GCHP2E, 2016)

I.5.4. La capacité au champ

La capacité au champ c'est le volume maximal d'eau que peut retenir le sol dans les microporosités, les macroporosités étant drainées. On parle aussi de capacité de rétention en eau du sol. La capacité de rétention de l'eau par un sol varie selon sa texture et sa compaction. Pour connaître la capacité au champ du sol, il faut attendre deux à trois jours de ressuyage après saturation du sol par les pluies et faire la mesure avec un appareil de mesure de l'humidité. Il semble que ce point de flétrissement puisse varier de 1,5 à 2,5 selon les types de sol et le climat.

I.5.5. Le point de flétrissement

Elle correspond à l'humidité pour laquelle la force de succion du sol équilibre la force de succion des cellules des racines ; le débit d'eau du sol à la plante s'annule. C'est également une notion variable selon la nature de la plante. On convient en général de la définir comme correspondant à une pression de succion dans le sol de 15 atmosphères, bien que certaines plantes soient capables d'extraire par leurs racines de l'eau à des tensions bien supérieures. L'humidité au point de flétrissement correspond approximativement au pF 4.2, cette humidité est plus délicate à mesurer. En l'absence des données précis on admettra qu'elle vaut la moitié de l'humidité à la capacité de rétention : $H_{pf} = 1/2 H_{cc}$.

I.5.6. La densité apparente

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Elle est, en effet, liée à la nature et à l'organisation des constituants du sol. Elle permet en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines, la cohésion des horizons et la réserve en eau du sol (Khechana.S et al, 2016).

conclusion : En conclusion, dans ce chapitre, nous avons présenté le cycle hydrologique et le bilan hydrique, en mettant en évidence ses composantes et son importance. Nous avons également abordé les principales propriétés hydriques du sol, telles que l'humidité du sol, la capacité au champ, le point de flétrissement, la densité apparente, la réserve utile et la réserve facilement utilisable

Conclusion:

Le bilan hydrique constitue un outil fondamental pour l'analyse du cycle de l'eau et la gestion des ressources hydriques. Il repose sur le principe de conservation de la masse et permet de quantifier les flux d'eau entrants et sortants d'un système hydrologique. L'étude détaillée de ses composantes (précipitations, évapotranspiration, ruissellement, infiltration et variation du stock d'eau) permet de mieux comprendre la dynamique de l'eau dans les milieux naturels et agricoles.

Chapitre II

**Présentation de la Zone
d'étude**



Introduction

Dans ce chapitre, nous traiterons des généralités sur la zone d'étude, les caractéristiques les plus importantes de cette région, en termes de géographie, climat, la géologie et hydrogéologie.

Présentation de La zone d'étude**II.1 Situation Géographique**

La wilaya d'Oued Souf est située dans le Sahara est d'Algérie, wilaya depuis 1984, couvert une superficie totale de 37652 Km², et une population de 700905 habitants, se trouver à environ 700Km ou Sud -Est d'Alger (figure I.1), et 350 Km à l'Oust de Gabes (Tunisie). Après le nouveau découpage administratif publié dans le dernier numéro du Journal Officiel du 18 décembre 2019, n°78, l'arrêté présidentiel précisant les noms, le siège et la numérotation des Etats nouvellement créés, et ce après avoir été signé par le Président de la République, Monsieur Abdelmadjid Tebboune, Elle est limitée par :

- Les Wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa au nord,
- La Tunisie à l'est,
- Les Wilayas d' El Meghair et Touggourt à l'ouest,
- La Wilaya d' Ouargla au Sud.

Notre zone d'étude présente la vallée d'Oued Souf, à 7° E et 33.5° N. Cette dernier se n'est pas un bassin versant mais une unité de ressources en eau qui est délimité par :

- Le grand Erg orientale au sud,
- Une série de chotts au nord et à l'est,
- Oued Righ et ligne de palmeraie de Biskra à Touggourt à l'ouest.

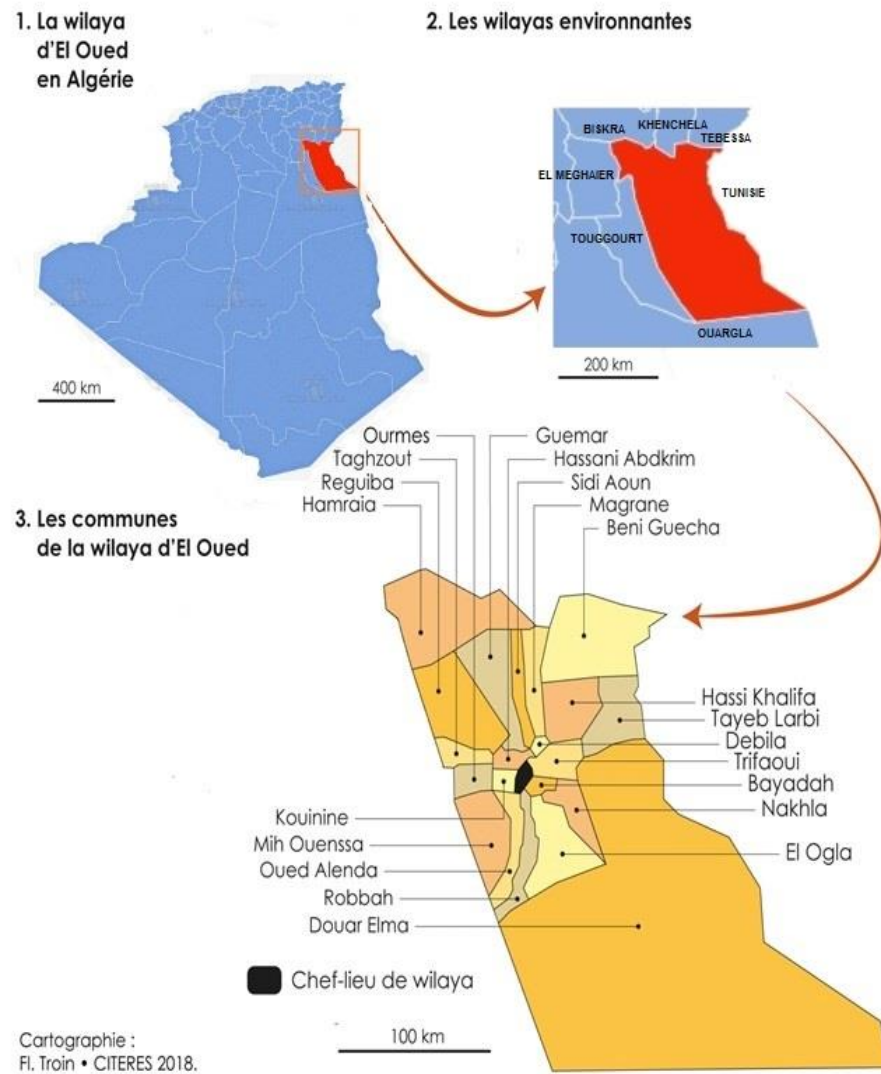


Figure II.1: Situation géographique de la wilaya d'El-oued

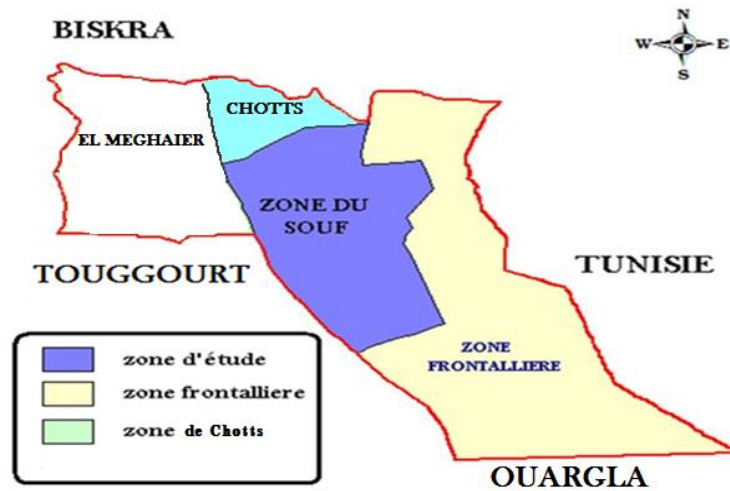


Figure II.2: Situation géographique de la zone d'étude

II.2 Ressources Hydriques

Dans la région d'étude, la rareté des précipitations et l'augmentation de la demande sur l'eau, pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et pour l'industrie, nécessite le recours des ressources en eau souterraines, les prélèvements des eaux de complexe terminal et de continentale intercalaire augmentent chaque année.

II.3 Situation Climatologique

Le climat de la région est considéré comme un climat désertique et se caractérise par un été chaud et sec. La température atteint parfois 54°C , et un hiver froid et sec où la température atteint un peu temps jusqu'à 3°C . Nous avons obtenus toutes les données liées au climat (pluie, température, humidité, etc.) de la station conditions météorologiques à l'aéroport de Guemmar pour la période allant de 1996 à 2020. Il se résume comme suit:

II.3.1 La Température

En raison de la nature de la région, la chaleur est très importante, car c'est l'un des facteurs les plus importants qui jouent un rôle précisent l'activité agricole de la zone.

D'après ce qui est montré dans le tableau I.2 représentatif des variations mensuelles de température et la figure I.4, on note que la valeur maximale a été enregistrée au mois de Juillet à $43,90^{\circ}\text{C}$ et la valeur la plus basse a été enregistrée au mois de janvier à $5,6^{\circ}\text{C}$.

Autrement dit, une différence de température de plus de 35°C , ce qui est une grande différence qui a un effet direct sur les cultures.

La température annuelle moyenne pour la période (1996-2020) est estimée à 23,3 ° C.

Tableau II.1 Répartition mensuelle de la température (1996-2020).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Max	17,9	20,9	25,6	30,1	35,5	41,3	43,9	37,5	38,0	30,1	23,8	19,4
Min	5,6	6,7	10,9	14,9	19,5	24,3	27,5	27,3	23,3	17,6	10,9	6,5
Moy	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13,0

Source:ONM2021

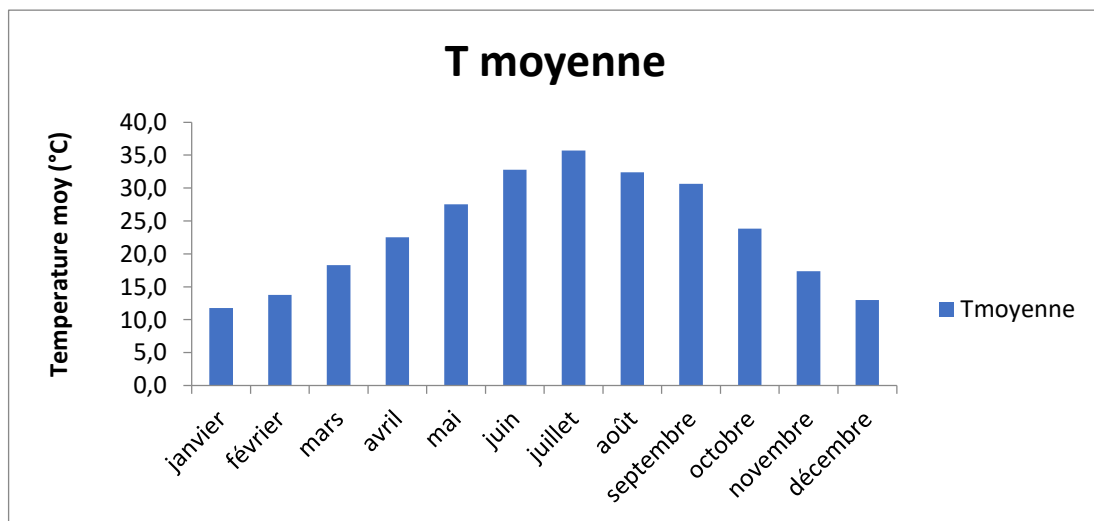


Figure II.3: Température moyenne mensuelle à la station de Guemmar au cours la période 1996 - 2020

II.3.2 La Précipitation

La région d'Oued Souf est caractérisée par des faibles précipitations en général, elle enregistre la plus grande valeur en hiver et la plus faible en été.

La précipitation annuelle moyenne est estimée (0.4 :16.4) mm, ce qui est une valeur faible dans une zone dans laquelle elle est située la valeur d'évaporation est très élevée car la valeur d'évaporation maximale a été enregistrée en juillet, en plus de la spécificité sols sableux à haute perméabilité.

La pluviométrie est définie comme une fluctuation observée d'année à autre et de mois à autre, avec des périodes exceptionnelles là où la pluie tombe, provoquant la perte de grandes surfaces agricoles.

Tableau II.2 Précipitations mensuelles, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
p(mm)	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2

Source: ONM 2021

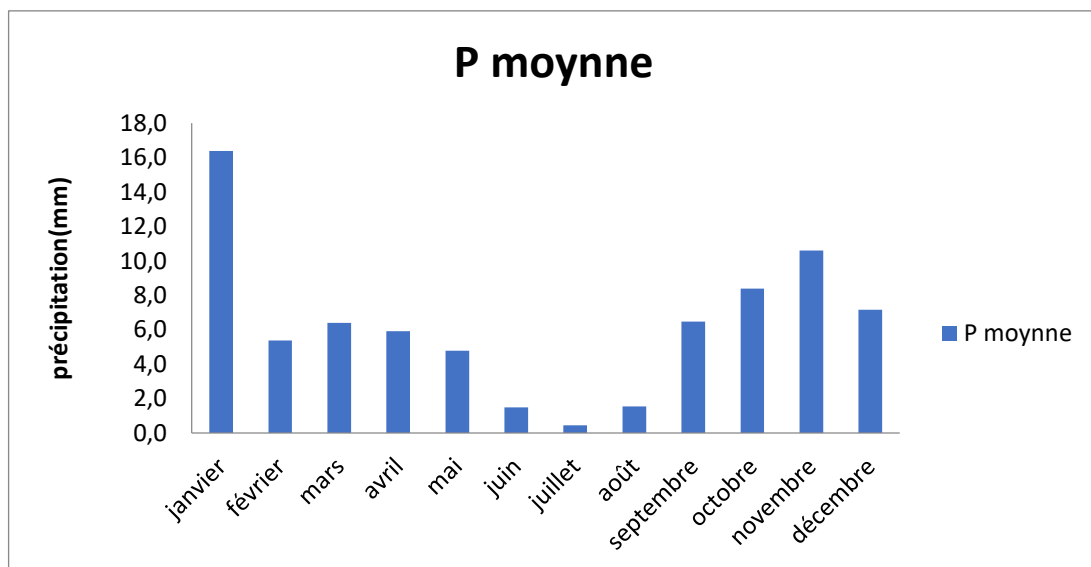


Figure II.4: Précipitations moyenne mensuelles enregistrées à la station de Guemmar au cours la période 1996 – 2020

II.3.3. L'évaporation

Le facteur d'évaporation a enregistré des valeurs importantes ces dernières années entre (84,7–339,4) mm. Son interprétation est la suivante: l'intensité de la chaleur et des précipitations, car ces deux facteurs ont connu une augmentation significative sans oublier l'effet celle sur le couvert végétal représente les changements relatifs d'évaporation pour la période (1996-2020).

Tableau II.3 : Evaporation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Evapor (mm)	99,4	157,5	157,5	204,2	270,7	301,3	339,4	300,2	193,9	147,3	103,2	84,7

Source: ONM2021

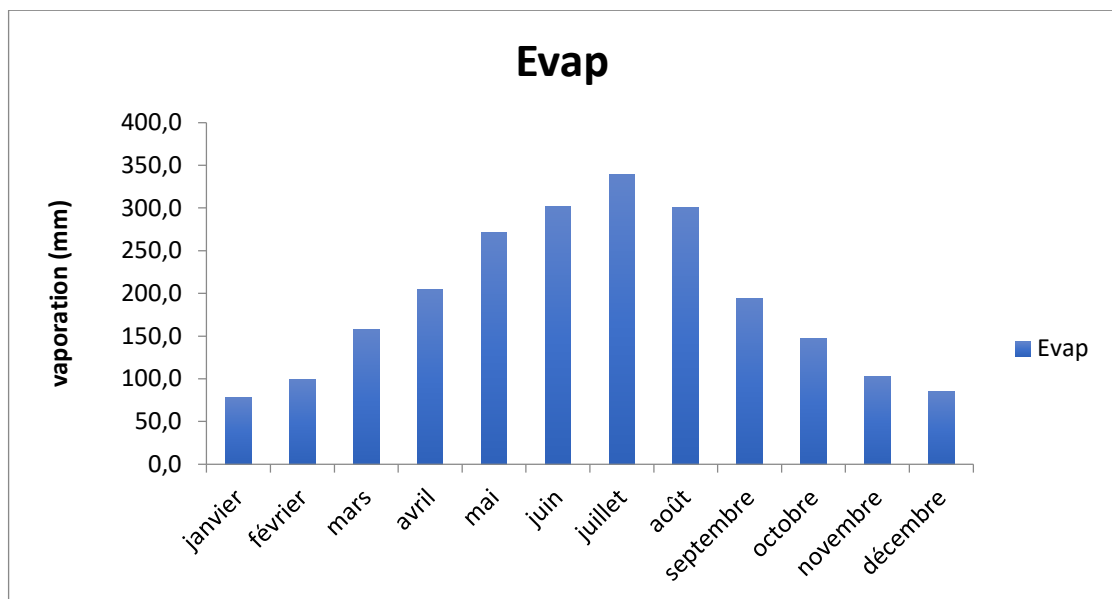


Figure II.5: Evaporation moyenne mensuelle pour la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

II.3.4. L'humidité :

L'humidité est liée à la température et à la présence de plans d'eau, et elle varie selon les saisons. La zone où l'on peut dire que la wilaya d'El-Oued connaîtra Cinq mois humides d'octobre à le mois de février où le taux d'humidité dépasse 50%, le maximum du mois de décembre est de 63.5%.

Tableau II.4 : Humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Humidité%	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46,0	50,8	58,9	63,5

Source:ONM2021

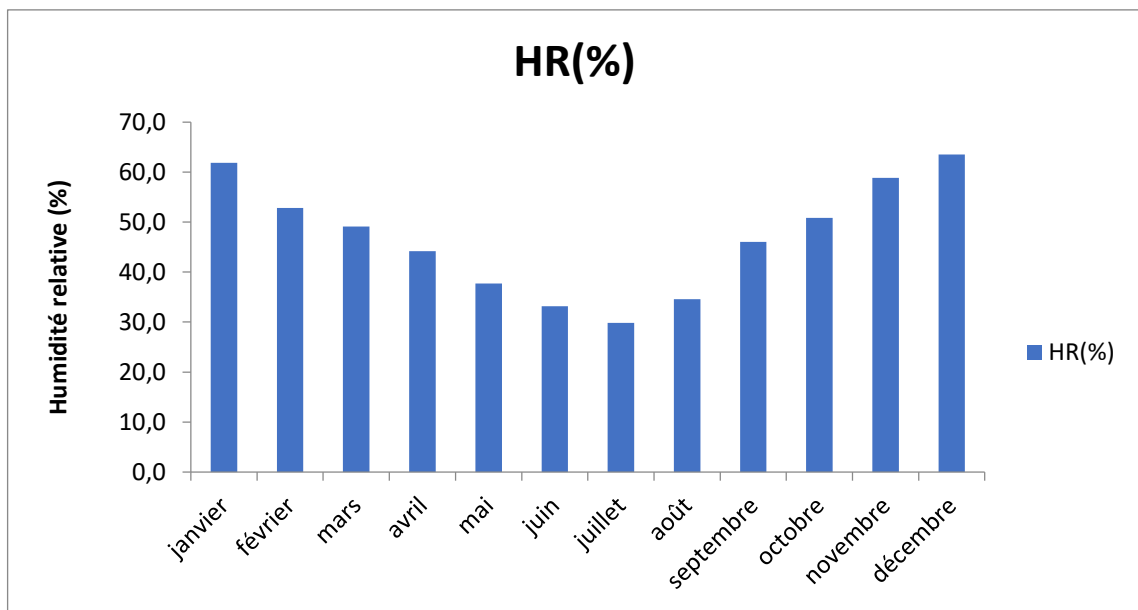


Figure II.6 : L'humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

II.3.5. La durée d'insolation

L'insolation est la durée d'apparition du Soleil, elle est exprimée en heures. Elle varie en fonction de latitude et le taux de couverture nuageux. La région d'El-Oued reçoit une quantité d'insolation relativement très forte. On note que le mois de juillet est le plus ensoleillé d'une durée mensuelle de 356,2 heures et que le mois de décembre est le mois le moins ensoleillé d'une durée de 232 heures. Voir Tableau I.6 et figure I.10.

Tableau II.5 : Insolation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ensol (Heur)	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232

Source:ONM2021

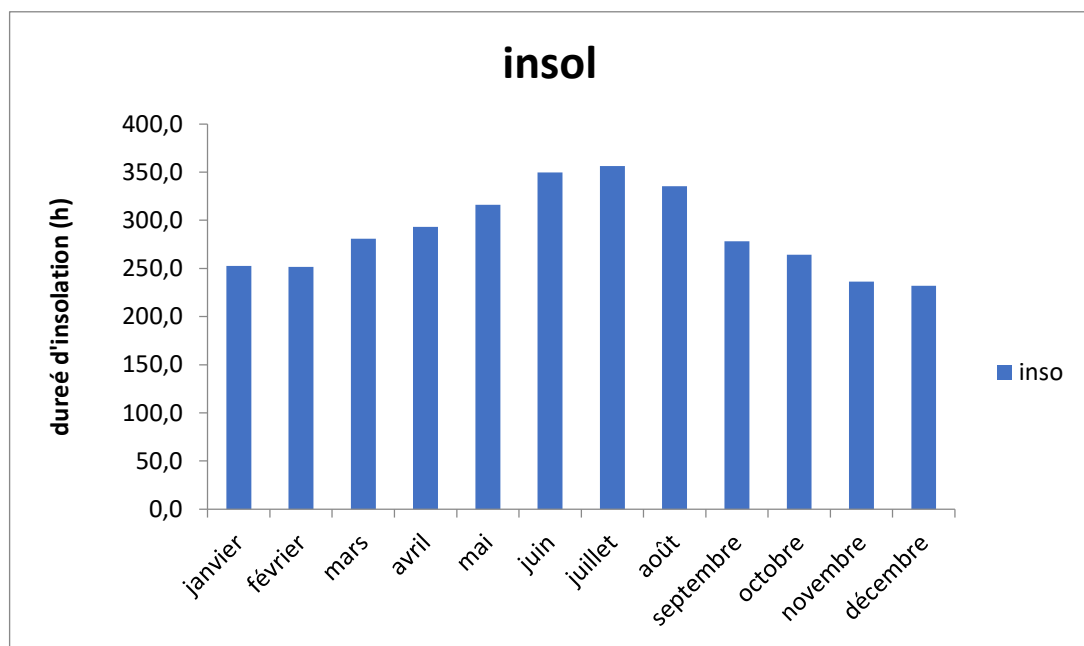


Figure II.7: Durée d'insolation moyenne, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

II.3.6. Le Vent

Selon la rose des vents, figure I.11 observée pour les vents dans une direction est-nord-est, Il est le dominant suivi des vents du sud-ouest et se caractérise par sa température élevée et est connu localement sous le nom de al-shehili.

Dans la zone d'étude, les vents jouent un rôle important en raison de leur surface lorsqu'ils travaillent pour former des dunes Sablonneux. Dans la région, on distingue trois types de vents:

a. Al-Shehili

Il souffle en été du côté sud, et il est chargé d'air chaud, donc il fonctionne pour se soulever de la température, qui affecte négativement les cultures car elle accélère les processus d'évaporation et de transpiration, et ses plages de vitesse entre 10-17 km / h.

b. Al Dhahrawi

Sa vitesse varie entre 13-16 km / h, car il a des vitesses élevées, qui souffle au printemps dans la direction du nord-ouest est qu'il paralyse la circulation et travaille à enterrer les Ghitans avec du sable.

c. El-bahri

Ce sont des vents qui soufflent à l'automne, qui sont chargés d'un degré d'humidité considérable, avec une direction Est - Ouest, la vitesse varie entre 10 et 11 km / h.

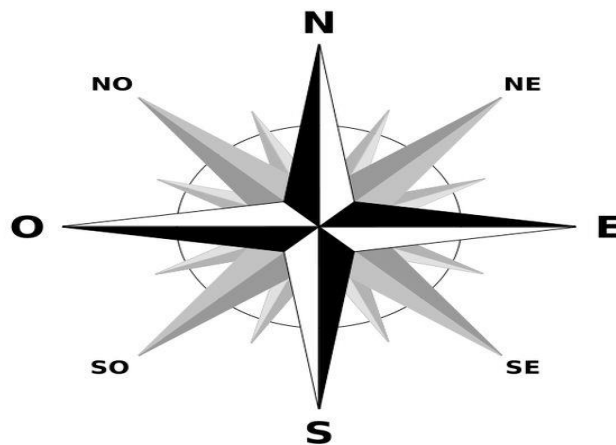


Figure II.8. la rose des vents (Source :www.pinterest.com)

II.4. Détermination des périodes sèches et de l'étage bioclimatique de la région d'El-Oued

Le diagramme d'ombrothermique de GAUSSEN permet déterminer les périodes sèches et humides d'une région quelconque à partir des séries de précipitation et de température (paramètres en valeurs moyennes mensuelles). Le principe de calcul est selon l'équation suivante (Saad Allah, 2018) :

$$P = 2T$$

P: Précipitation moyenne mensuelle (mm)

T: température moyenne mensuelle (°C)

Si la courbe des précipitations est au-dessus de la courbe de la température la période est humide si non elle est sèche. On constate, d'après figure I.6 suivant, que la région d'El-Oued est totalement sèche tout au long de l'année, aucune période humide n'était observée. Ceci confirme l'aspect saharien de la région.

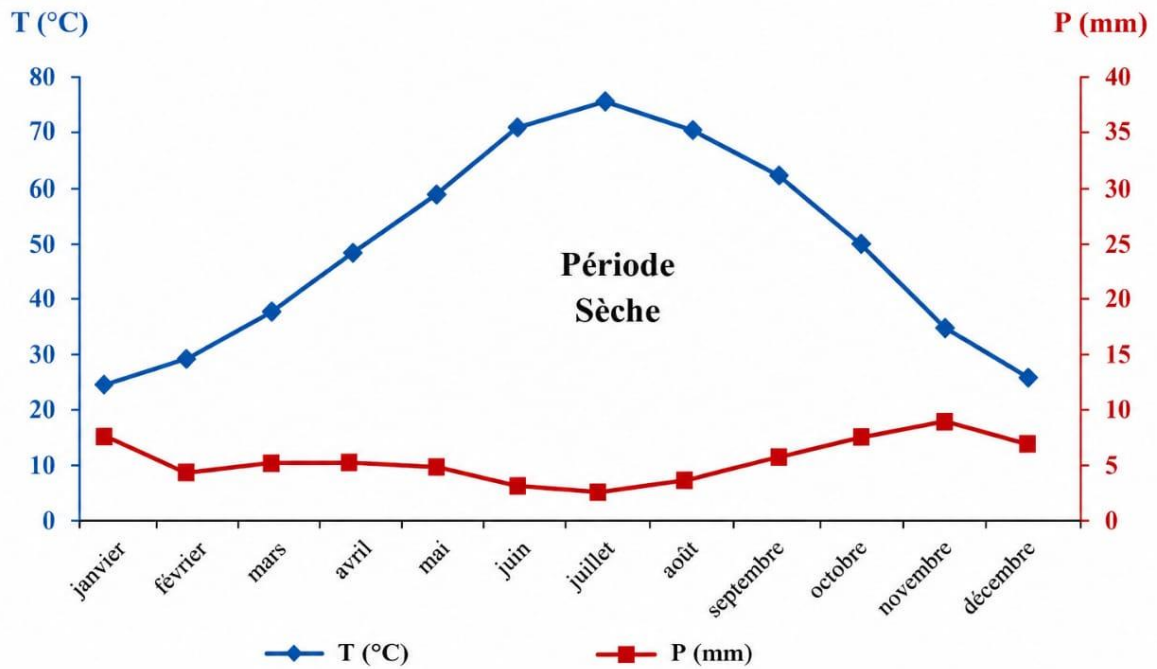


Figure II.9: Diagramme ombrothermique de « GAUSSEN » pour la région d'El oued.

II.4.1. Diagramme d'Emberger :

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, L. Emberger (1955) a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q_2 (figure.I-5). Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures min et max, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds (Bouselsal, 2016).

$$Q_2 = 3.43 \cdot \frac{P}{M - m}$$

Q_2 : facteur des précipitations d'Emberger

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

M : moyenne des max du mois le plus chaud (°C).

m : moyenne des min du mois le plus froid (°C).

Pour le cas de la station de El-Oued au cours la période 1996 - 2020, on trouve pour $Q_2 = \frac{3.43 \times 75}{35.7 - 11.8} = 10.76 \text{ mm} / ^\circ\text{C}$

$t(m)=11.8 ^\circ\text{C}$ que la région se trouve dans l'étage bioclimatique « saharienne très chaud », voir figure I.7.

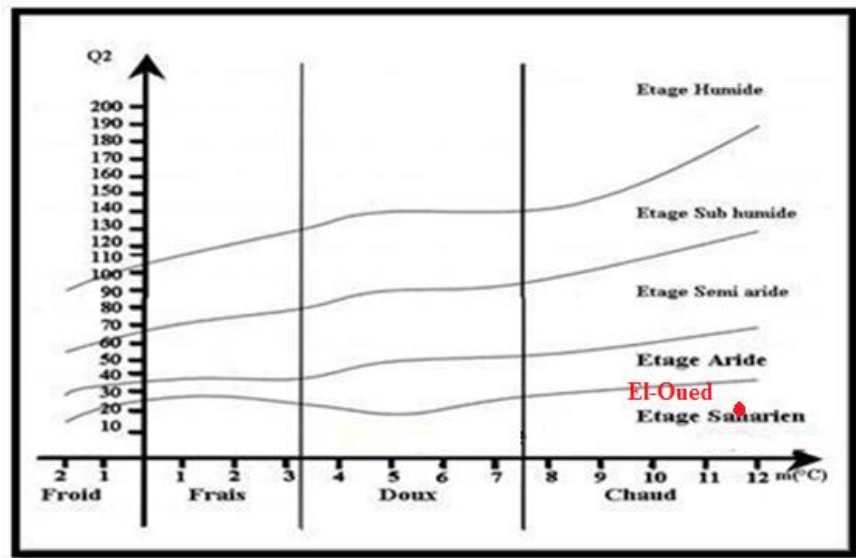


Figure II.10: Diagramme d'Emberger de la station d'El-Oued (1996-2020)

II.4.2.L'indice d'aridité de De Martonne (1926)

L'indice d'aridité de De Martonne (mm/°C) est un indicateur utile pour caractériser le phénomène d'aridité en exprimant le caractère restrictif pour certaines formations végétales (Koussa, 2017):

$$IDM = P/(T + 10), \text{ où}$$

P est la quantité annuelle de précipitations,

T est la température moyenne annuelle de l'air.

De Martonne a proposé six grands types de climats selon les valeurs de cet indice.

- $IDM < 5$ Aridité absolue désert sans culture,
- 5 à 10 désert (aride) désert et steppe ; aucune culture sans irrigation,
- 10 à 20 semi-aride formations herbacées, steppes ou savanes. Irrigation nécessaire pour les cultures exigeant de l'humidité,

- 20 à 30 semi-humide prairie naturelle ; irrigation généralement non nécessaire,
- 30 à 40 humide les arbres jouent un rôle de plus en plus grand dans le paysage,
- IDM > 40 humide la forêt est partout la formation climatique. Les cultures de céréales tendent à être remplacées par les herbages.

Cet indice ne doit être utilisé que pour un découpage en grandes zones climatiques. Pour notre cas nous avons calculé cet indice comme suit:

$$\text{IDM} = p / T + 10 = 75 / 23.30 + 10 = 2.25 < 5 \text{ (climat hyper aride).}$$

II.5. Contexte Géologique :

L'histoire géologique de la région d'Oued Souf, située dans le Bas-Sahara algérien, est marquée par une longue série de transgressions et régressions marines liées aux mouvements tectoniques. La région repose sur un socle précambrien enfoui à plus de 4000 mètres de profondeur, recouvert par d'épaisses formations sédimentaires méso-cénozoïques .

· Ère Primaire (Paléozoïque) : La région était recouverte par une mer peu profonde, déposant d'épaisses séries de calcaires et de grès. À la fin de cette ère, l'orogénèse hercynienne a plissé ces sédiments et transformé la région en terre ferme, soumise à l'érosion .

· Ère Secondaire (Mésozoïque) : Une nouvelle transgression marine majeure a envahi la plateforme saharienne, déposant d'épaisses couches sédimentaires (calcaires, dolomies, évaporites, argiles) qui constituent aujourd'hui les réservoirs aquifères profonds .

· Ère Tertiaire (Cénozoïque) : Le retrait définitif de la mer s'est opéré, façonnant les grands traits du paysage actuel sous l'effet de mouvements tectoniques et de l'érosion .

· Ère Quaternaire : C'est la période clé pour la morphologie actuelle. Elle est caractérisée par d'importantes fluctuations climatiques. Pendant les périodes humides (pluviales), coïncidant avec les glaciations européennes, la région a reçu d'abondantes précipitations, alimentant les nappes phréatiques et créant un réseau hydrographique aujourd'hui fossile. C'est durant cette période que se sont mis en place les immenses ergs de sable, dont les dunes (appelées localement ghouts) qui font la particularité de la région . La région d'Oued Souf se présente comme un vaste synclinorium (bassin sédimentaire) rempli de dépôts détritiques, carbonatés et évaporitiques.

II.6. Contexte Hydrogéologique :

Oued Souf repose sur l'un des plus grands systèmes aquifères du monde : le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS). Les ressources en eau de la région sont exclusivement souterraines, emmagasinées dans trois grandes nappes superposées.

1. La Nappe Phréatique (Superficielle) : C'est la nappe la plus proche de la surface, contenue dans les sables du Quaternaire. Historiquement exploitée pour l'agriculture (notamment pour la technique des ghouts), elle est aujourd'hui fortement dégradée. Sa qualité est médiocre en raison d'une minéralisation excessive et d'une pollution organique et chimique croissante. Elle est également confrontée à un phénomène de remontée des eaux problématique pour les infrastructures urbaines.

2. La Nappe du Complexe Terminal (CT) : C'est l'aquifère le plus sollicité actuellement pour l'eau potable et l'irrigation. Ses réserves sont contenues dans les formations gréseuses et carbonatées du Crétacé supérieur et de l'Éocène. Elle se situe à des profondeurs variables (généralement entre 100 et 500 m) et est captive. Ses eaux sont de type chloruré-sulfaté calcique et magnésien (Ca-Mg-Cl-SO₄). La qualité de cette eau est variable : elle est souvent impropre à la consommation sans traitement (selon l'Indice de Qualité de l'Eau - WQI) en raison d'une salinité élevée, et son usage pour l'irrigation varie de passable à médiocre. La minéralisation est contrôlée par la dissolution des minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite) et carbonatés présents dans la roche réservoir.

3. La Nappe du Continental Intercalaire (CI) : C'est la nappe la plus profonde et la plus vaste. Ses eaux sont fossiles, c'est-à-dire non renouvelables, et sont souvent thermales. Elles sont également sollicitées par des forages profonds pour faire face à la demande croissante.

Tab.II.6: Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued

Nature hydrogéologique		Nature lithologique	Etage		Ere
Nappe phréatique		Sables	Quaternaire		
Niveau imperméable		Argiles			
1 ^{ere} nappe des sables	Complexe Terminal	Sables	Pliocène		Tertiaire
Semi-perméable		Argiles gypseuses			
2 ^{eme} nappe des sables		Sables grossiers, graviers	Pontien	Miocène	
Niveau imperméable		Argiles lagunaires, marnes	Moyen	Eocène	
Nappe des calcaires (perméables)		Calcaire fissuré	Inférieur		
			Sénonien carbonaté	Crétacé	Secondaire
Semi-perméable		Evaporites, argiles	Sénonien lagunaire		
Niveau imperméable	Argiles, marne	Cénomanién			
Nappe de Continental Intercalaire		Sables et Grés	Albien		

Tab.II.7 : Etendue et volume des ressources en eaux souterraines.

La nappe souterraine	La superficie (l'étendue)	Le volume	Le temps de renouvellement
La nappe phréatique	250 000 km ²	/	6000 ans
La nappe du complexe terminal	350 000 km ²	/	/
La nappe du continental intercalaire	600 000 km ²	60 000. 10 ⁹ m ³	70 000 ans

Source : ANRH 2005

II.7.Problématiques majeures :

- Qualité de l'eau : Les eaux du CT et du CI présentent une minéralisation totale élevée, une dureté importante et des concentrations en fluor parfois supérieures aux normes de l'OMS.

Gestion de la ressource : La forte pression démographique et le développement agricole entraînent un pompage intensif. Les eaux d'irrigation pompées en profondeur, une fois utilisées, rejoignent la nappe phréatique, aggravant le phénomène de sa remontée et sa pollution.

Conclusion:

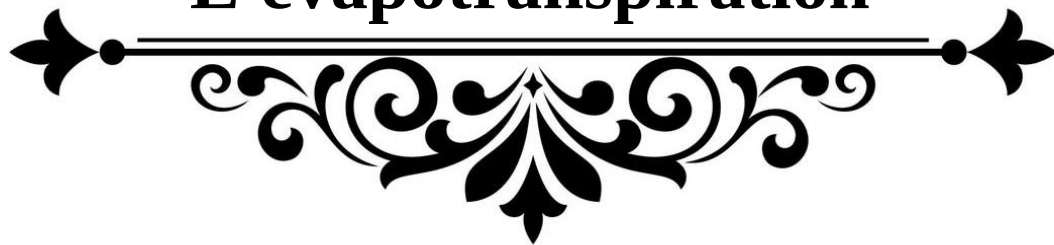
En conclusion, la région d'El Oued, située au Sud-Est de l'Algérie, se distingue par un climat désertique hyperaride caractérisé par des températures élevées, une faible pluviométrie, une forte évaporation et l'influence de vents chauds dominants. L'étude géologique a mis en évidence une succession de formations sédimentaires s'étendant du Crétacé au Quaternaire, composées essentiellement de sables, graviers, argiles, marnes, calcaires et évaporites. Cette diversité lithologique a favorisé la mise en place d'importants systèmes aquifères, notamment le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire, qui constituent les principales ressources en eaux souterraines de la région. Toutefois, malgré l'importance de ce potentiel hydrique, les ressources en eau sont confrontées à plusieurs contraintes liées à la dégradation de leur qualité, à la forte minéralisation, aux teneurs élevées en fluor ainsi qu'au phénomène de remontée de la nappe phréatique. L'ensemble de ces caractéristiques climatiques, géologiques et hydrogéologiques constitue un cadre de référence indispensable pour l'analyse et l'évaluation des paramètres du bilan hydrique de la région d'étude.



Chapitre III

ESTIMATION DE

L'évapotranspiration



Introduction

L'évapotranspiration occupe une place essentielle dans le bilan hydrique. L'exactitude de son évaluation demeure indispensable ; car les besoins hydriques des cultures ainsi que les programmes d'irrigation nécessaires à leur développement dépendent directement de cette évapotranspiration. Dans ce chapitre ; nous présenterons les différentes techniques de mesure ainsi que les principales méthodes utilisées pour l'estimation de l'évapotranspiration.

Définition de l'Évapotranspiration:

L'évapotranspiration (ET) désigne tous les processus par lesquels l'eau en phase liquide ou solide à la surface de la Terre devient de la vapeur d'eau. Elle combine évaporation et transpiration.

L'évaporation implique le transfert d'eau vers l'atmosphère à partir de surfaces telles que les eaux libres, les sols nus, la neige (glace) et la végétation. La transpiration découle de la circulation de l'eau à l'intérieur des plantes et la perte subséquente d'eau sous forme de vapeur à travers les stomates de leurs feuilles. Le terme ET est généralement utilisé parce que l'évaporation et la transpiration se produisent simultanément et qu'il n'y a pas de moyen facile de les distinguer. Par exemple, lorsqu'une plante est petite et que la superficie végétale est faible par rapport à la surface du sol, c'est l'évaporation qui domine (Hajji, 2020).

Évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence (ET_0) est un concept utilisé dans différentes méthodes d'estimation. C'est une valeur pour une végétation choisie, dans des conditions hydriques réelles, permettant ensuite de déduire l'évapotranspiration pour d'autres couverts végétaux. Cet usage pratique d'une culture de référence est lié à la faible variation de l'évapotranspiration potentielle selon les différents végétaux, dans de généralement pour les besoins de l'agriculture.

Évapotranspiration maximale

L'évapotranspiration maximale d'une culture est la quantité maximale d'eau qu'elle est susceptible d'évaporer lorsqu'elle est placée dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et pour un sol proche de la capacité au champ. Elle dépend de la couverture du sol par la culture et de son état physiologique. Elle fait alors intervenir les coefficients culturaux (k_c) qui retranscrivent les particularités de chaque type de plante à un stade développement

donné. Prise en compte par l'évapotranspiration référence (ET_0). Elles sont présentées dans l'équation :

$$ET_0 = (K_{cb} + K_e) \cdot ET_0 \text{ (I.02)}$$

K_{cb} - : Coefficient cultural de base ;

K_e - : Coefficient d'évaporation du sol

Évapotranspiration potentielle ETP

L'évapotranspiration potentielle peut se définir comme l'évapotranspiration qui se produirait d'une surface maintenue humide sous des conditions d'absorption de rayonnement régional, de transfert de vapeur et de chaleur, dont l'aire est assez petite pour que les transferts de chaleur et de vapeur d'eau de la surface n'aient pas d'influence significative sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère (Audin, 2004).

L'estimation de l'ETP est relativement simple et nécessite au plus quatre paramètres atmosphériques mesurables : la température de l'air, la vitesse du vent, le rayonnement net et l'humidité relative de l'air. De nombreux modèles d'estimation de l'ETP ont été développés (Hajji, 2020).

Évapotranspiration réelle ETR

L'évapotranspiration réelle est la quantité totale d'eau qui s'évapore du sol/substrat et des plantes lorsque le sol est à son taux d'humidité naturel. L'évapotranspiration réelle explique l'échange d'eau et d'énergie entre le sol, la surface terrestre et l'atmosphère.

En 1956, Penman définit l'Évapotranspiration potentielle comme : l'évaporation d'une pelouse rase suffisamment étendue, en bon état et convenablement alimentée en eau (Audin, 2004). Selon les auteurs et les méthodes, différents paramètres météorologiques, physiques ou biologiques sont inclus ou non dans la définition de l'Évapotranspiration potentielle : par exemple l'espèce végétale, la constance des flux d'énergies, l'ouverture des stomates, la constance de l'humidité relative.

Ces deux notions ETR et ETP sont utiles et nécessaires pour étudier les bilans de circulation de l'eau et notamment pour déterminer les besoins en eau des cultures ou calculer l'effet oasis d'une zone où l'évapotranspiration est plus importante (qui peut être une zone urbaine). Les plantes de milieux arides peuvent fortement réduire leur évapotranspiration quand elles manquent d'eau. Les plantes des zones tropico- équatoriales pluvieuses ne le peuvent généralement pas.

Elles sont présentées dans l'équation suivante:

$$ETR = ksETM = kskcET0$$

Où :

KC- : coefficient cultural ;

KS- : coefficient de stress ;

-ET0 : évapotranspiration de référence ;

-ETM: évapotranspiration maximal.

III.1 Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration

Plusieurs approches permettent de déterminer cette composante fondamentale du bilan hydrique ; notamment dans les domaines d'irrigation dans la gestion des ressources en eau .Dans le cadre de cette étude l'intérêt est porté sur l'estimation de l'évapotranspiration climatique.

Par ailleurs ; ces approches peuvent être réparties en deux grandes catégories :

- Les méthodes directes basées sur les instruments et dispositifs de mesures.
- Les méthodes indirectes reposant sur l'emploi des relations et formules empiriques.

III.1.1 Méthodes directes (techniques de mesure)

III.1.1.1 Bac d'évaporation « classe A »

L'Office National de la Météorologie (ONM) a adopté un dispositif permettant d'estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP).Cet évaporomètre conforme aux normes internationales ; se présente sous une forme cylindrique de diamètre 121,9 cm et une profondeur 25,4 cm. Afin de pallier les problèmes liés aux débris végétaux et autres impuretés, les climatologues ont établi que le niveau dl'eau doit être située entre 5,1 à 7,6 cm du rebord. Pour permettre à l'air de circuler librement Sous le bac, le niveau de l'eau du bac dernier se trouve placé à 15,2 cm au-dessus du sol. Est mesuré à l'aide d'une jauge à crocher. La différence entre les deux mesures ou prélèvements représente la quantité d'eau perdue par évaporation, en tenant compte des quantités d'eau ajoutées par les intensités de pluie et par les recharges effectuées pour maintenir le niveau de l'eau dans le bac (Charles. R, 1975).

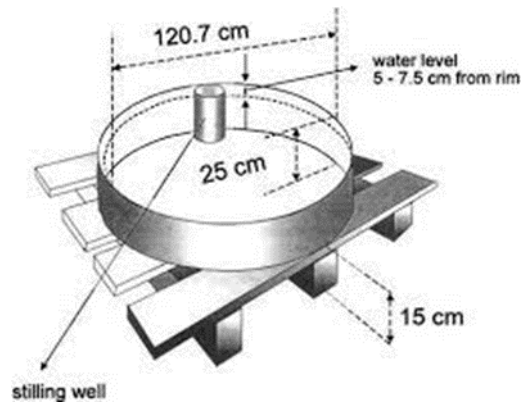


Figure III.1: bac «classe A»

III.1.1.2 Le bac Colorado

Le dispositif Colorado se présente sous une forme carré ; mesurant 91.4cm de côté, avec une hauteur variant entre 46 et 91cm. Il est installé dans le sol de sorte que sa bordure supérieure dépasse de 10cm par rapport au niveau du terrain. Ainsi ; il restitue plus fidèlement l'inertie thermique du milieu. Plusieurs dérivés de cet appareil existent ; parmi lesquels la version conçue par l'ORSTOM.

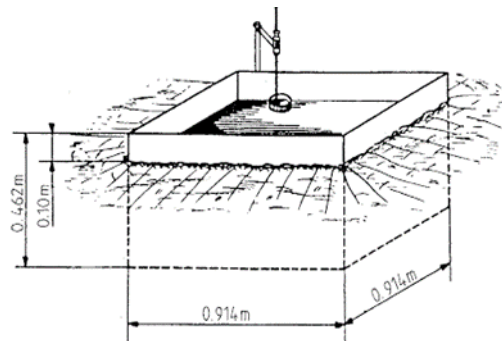


Figure III.2 : Le bac de colorado

III.1.1.3 Evaporomètre de Piche

Cet instrument se compose d'un tube cylindrique en verre ; long de 25 cm de long et doté d'un diamètre de 1,5 cm. Ce tube gradué est fermé à son ouverture inférieure est obstruée par un disque circulaire en papier filtre normalisé ; ayant un diamètre de 30mm et une épaisseur de 0,5 mm ; fixé par capillarité et maintenu en place par un ressort.

L'appareil ayant été rempli d'eau distillée, celle-ci est évaporée progressivement par la feuille de papier filtre ; la diminution du niveau de l'eau dans le tube permet de calculer le taux

d'évaporation. Cet appareil est installé sous abri ; aussi la mesure dépend-elle beaucoup des conditions d'aération.



Figure III.3 : Evaporomètre Piche

III .1.2 Méthodes indirectes (formules empiriques)

En raison de la multiplicité des méthodes d'estimation des quantités d'évaporation / transpiration, certaines nécessitent un équipement spécial ou les calculs sont très complexes, nous nous bornons à clarifier les équations les plus courantes que nous pouvons appliquer dans les zones aride.

Nombreuse formules ont été établies pour calculer l'ETP à partir de quatre éléments climatiques fondamentaux: température, humidité relative, insolation et vitesse du vent.

Pour notre cas on utilise les formules de Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman modifiée par FAO plus la formule de l'ANRH. Les données climatiques utilisées sont celles de la station (ONM) de Guemar sur une période de (25) ans (1996-2020).

III.1.2.1Formule de TURC

Turc rechercha à partir de 1945 une expression algébrique représentant au mieux l'évaporation mensuelle et même décadaire observée sur les cases lysimétrique de Versailles, Rothamsted, Groningen et d'autres stations situées en Ecosse, en Afrique du Nord et aux Indes. Il aboutit ainsi, vers 1953, à une formule complexe donnant l'évapotranspiration potentielle en fonction de l'insolation et de la température.

En 1962, Turc a proposé les formules simplifiées suivantes:

Lorsque l'humidité relative mensuelle est supérieure à 50%, on peut évaluer avec une approximation suffisante l'évapotranspiration potentielle mensuelle d'un périmètre irrigué par la formule suivante :

$$ETP = 0.40. (IG + 50). \frac{t}{t + 15}. C$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

Ig : Radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale (quelques calories/cm²/jour).

t : Température moyenne mensuelle du mois considéré (C°).

Le coefficient 0.40 est le résultat du produit 0.013 j Donc :

Pour le mois de 31 jours on a : 0.013 x 31 = 0.40

Pour le mois de 30 jours on a : 0.013 x 30 = 0.39

Pour le mois de février le coefficient est 0.37

La radiation solaire globale n'est mesurée qu'en un petit nombre de stations, on devra souvent l'évaluer à partir de la radiation maximale théorique Iga, calculée d'après les données astronomiques et d'après le rapport h/H de la durée d'insolation effective (mesurée par un héliographe) à la durée du jour astronomique (en heures).

On emploie souvent la formule suivante dérivée de celle d'Angström :

$$IG = IGA \left(0.10 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$$

Avec :

h : Durée d'insolation réelle (heures).

H : Durée astronomique du jour (heures).

Iga et H ne dépendent que de la latitude.

Si l'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est inférieure à 50%, on multiplie l'ETP calculée par le facteur correctif (c) suivant:

$$C = \left(1 + \frac{50 - H_r}{70} \right)$$

Hr: est l'humidité relative moyenne de l'air pendant le mois considéré (%). En pratique, le terme correctif ci-dessus n'intervient que dans le cas des climats désertiques ou subdésertiques.

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau III.1

Tableau III.1 : calcul de l'ETP par la formule de Turc

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13
Es	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232
Vv	3	3,2	4,1	4,6	4,6	4,5	4,2	3,8	3,7	2,9	2,9	3,1
P	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2
H	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46	50,8	58,9	63,5
h	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232
H	337,3	233,3	357,4	502,2	425,5	255,6	276,5	453,2	490,4	325,8	234,7	369,3
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
IgA	670,5	447,6	749,0	1017,0	755,7	448,6	663,9	1003,3	838,7	474,8	584,9	965,3
Ig	431,8	379,9	499,6	551,1	484,1	461,3	649,8	641,0	445,9	324,2	470,3	549,7
K	1	1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,2	1,1	1	1	1
ETPTurc	70,6	79,1	122,4	156,2	162,5	174,0	254,0	230,5	140,9	90,8	97,5	89,9
ETP Anne (mm)	1668,37											

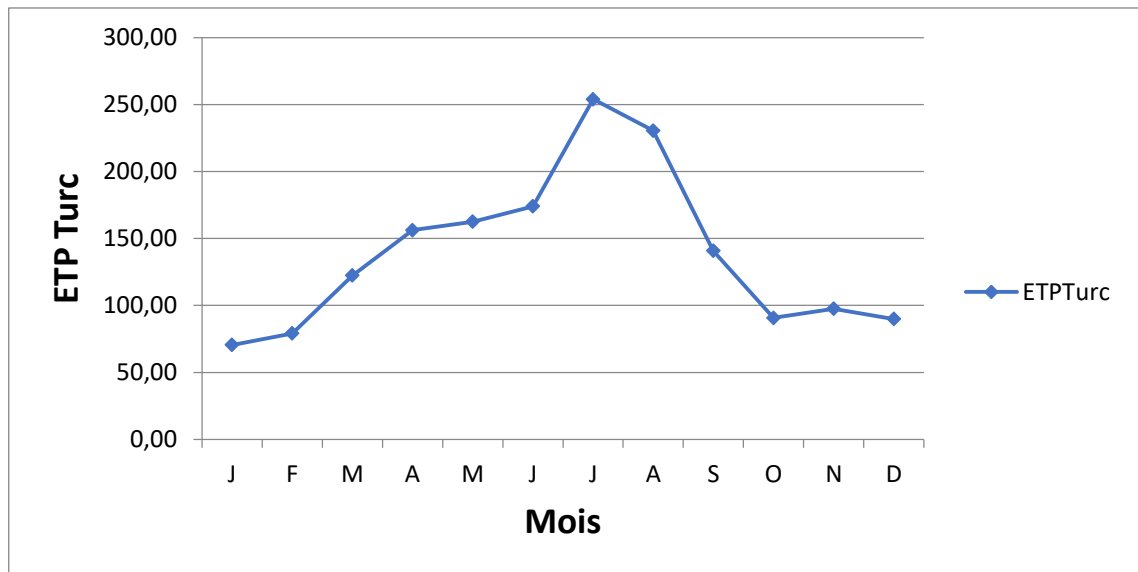


Figure III.4: Estimation de l'ETP avec la formule de Turc

III.1.2.2 Formule de Blaney et Criddle

A la suite de nombreuses expérimentations, Blaney - Criddle ont développé leur équation empirique liant évaporation et transpiration et moyenne de la température et la quantité de lumière du jour ont été largement utilisées et ont donné des résultats positifs dans le sud de la France et dans le Sahara égyptienne.

La formule est la suivante:

$$ETP = K (0,46t + 8,13) P$$

Où:

ETP : Evapotranspiration potentielle en mm.

t: température moyenne (en degré Celsius) durant la période considérée (généralement le mois).

P : pourcentage de la durée moyenne du jour pendant la même période, par rapport à la durée moyenne du jour pour l'année.

K : Coefficient dépendant du stade végétatif de la culture et de la température moyenne (de la zone climatique).

On peut résumer les résultats de calcul de l'ETP dans le tableau III.2:

Tableau III.2: calcul de l'ETP par la formule de Blaney-Criddle

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13,0
Es	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,5	278,1	264,3	236,2	232,0
Vv	3,0	3,2	4,1	4,6	4,6	4,5	4,2	3,8	3,7	2,9	2,9	3,1
P	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2
H	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46,0	50,8	58,9	63,5
p	7,1	7,0	8,4	8,8	9,7	9,7	9,8	9,3	8,4	7,9	7,1	7,0
Kc (palmier)	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Kc (p-terre)	0,8	0,5	0,5	0,7	0,9	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9
ETP B/c	106,3	110,8	152,1	173,1	215,2	246,6	267,8	237,8	206,4	167,9	125,4	107,9
ETP anne(mm)	2117,2											

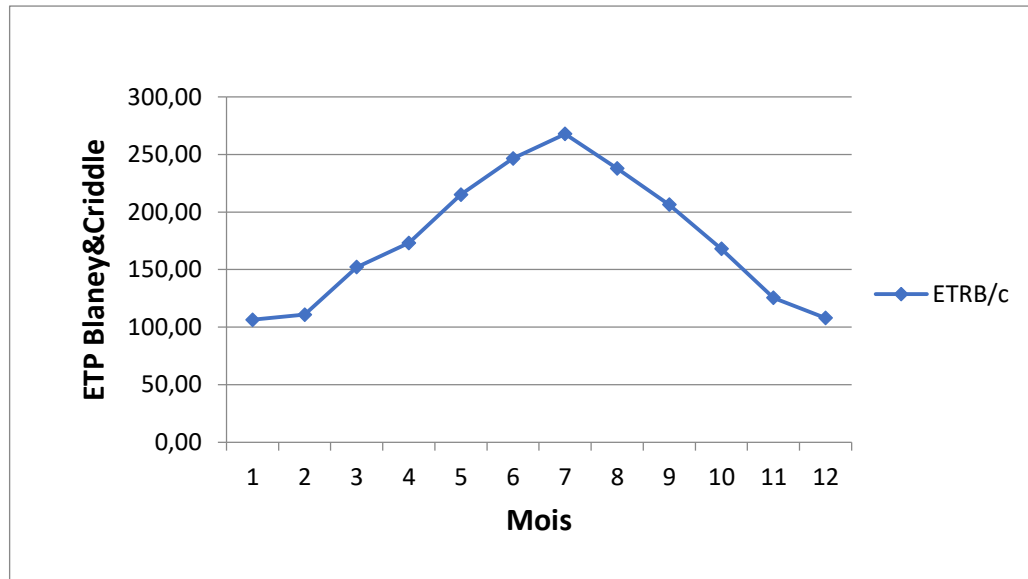


Figure III.5: Estimation de l'ETP avec la formule de Blaney & Criddle

III .1.2.3 Formule de Thornthwaite (1944)

La formule de Thornthwaite a été la première équation publiée pour estimer l'évapotranspiration de la transpiration, elle a été développée à partir de mesures sur des cases slysmétriques dans l'est des États-Unis et est exprimée par la formule suivante :

$$ETP = 16 \times \left(\frac{10t}{I} \right)^a \cdot K$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm)

I : indice thermique annule, c'est la somme de douze indices mensuels

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad , \quad i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

t: température moyenne mensuelle °C.

K : terme correctif qui tiens compte de la latitude de lieu

a: fonction complexe de l'indice I

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5$$

Tableau III.3: coefficient de correction f(h) pour une latitude de 33.5° N (voir Annexe1)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
K	1.03	0.97	0.88	0.86	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.2	1.22	1.15

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau III.4:

Tableau III.4 : calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13
Es	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,4 5	278,1	264,3	236,2	232
Vv	3	3,2	4,1	4,6	4,6	4,5	4,2	3,8	3,7	2,9	2,9	3,1
P	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2
H	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46	50,8	58,9	63,5
i	129,5 7	129,5 7	129,5 7	129,5 7	129,5 7	129,5 7	129,5 7	129,5 7	129,5 7	129,5 7	129,5 7	129,5 7
a	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
ETPnc	12,66	18,92	39,06	66,41	111,2	174,8	217,4	169,4 3	147,5	76,72	34,32	16,2
K	0,88	0,855	1,03	1,09	1,195	1,2	1,22	1,155	1,03	0,97	0,875	0,86
ETPcThor	11,14	16,18	40,23	72,39	132,9	209,8	265,2	195,6 9	151,9	74,41	30,03	14
ETP anne(mm)	1213,83											

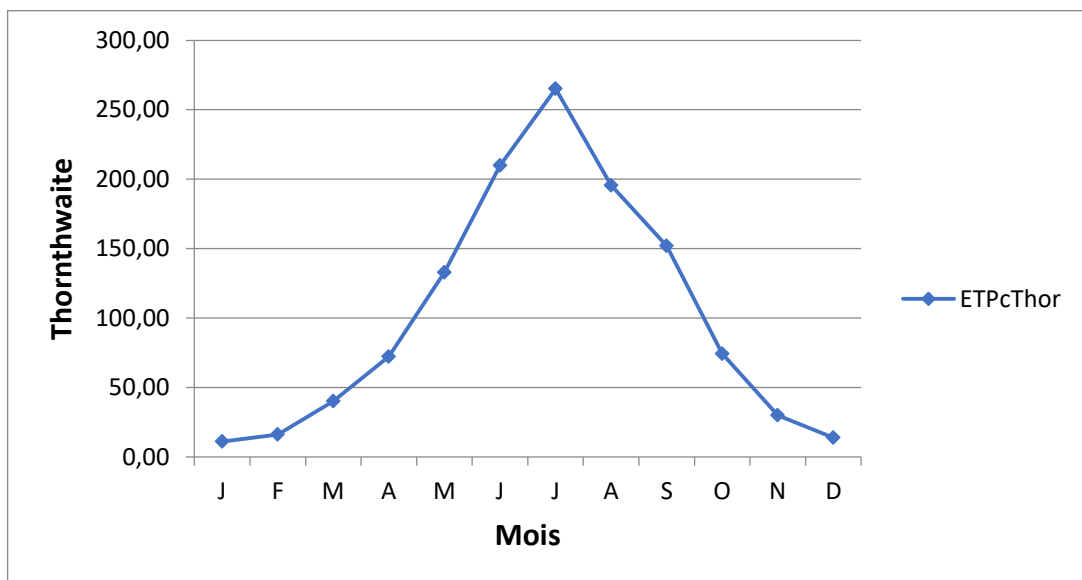


Figure III.6: Estimation de l'ETP avec la formule de Thornthwaite

III.1.2.4 Formule dite de l'ANRH

La formule qui permet d'estimer l'ETP mensuelle est la suivante (voir méthodes d'estimation indirectes à la première partie) (Boudjerada ,2015) .

$$ETP_{ANRH} = Kr \times Km (H - 187) (0.032 t + 0.077)$$

L'application de cette formule a permis d'obtenir les résultats qui ont été consignés dans le tableau III.5 et reportées dans le Figure III.7.

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm).

t : Température moyenne mensuelle (C°).

H : urée théorique mensuelle d'insolation (h/mois) et elle exprime en fonction de Y.

Km : Coefficient mensuel dont ses valeurs sont données (Annexe 1).

Kr : Coefficient régional qu'on peut lire sur (Annexe 2).

On résume les résultats obtenus dans le tableau III.5:

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13
Es	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232
Vv	3	3,2	4,1	4,6	4,6	4,5	4,2	3,8	3,7	2,9	2,9	3,1
P	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2
H	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46	50,8	58,9	63,5
a	-0,02	-0,01	-0,001	0,01	0,02	0,025	0,02	0,014	0,003	-0,01	-0,02	-0,03
b	315	307	371	389	429	429	436	414	370	351	311	308
H	309,4	343,8	456,4	519,3	605,8	624,2	614,4	565,02	469,9	405,7	315,5	290
Kr	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Km	0,96	1,22	1,11	1,17	1,02	1	0,97	0,97	0,98	0,9	0,9	0,86
ETPANRH	61,44	114,1	227,8	356,3	470,1	566,4	581,4	469,67	337,7	189,8	84,31	50,1
ETP anne(mm)	3509,20											

Tableau III.5 : calcul de l'ETP par la formule de l'ANRH

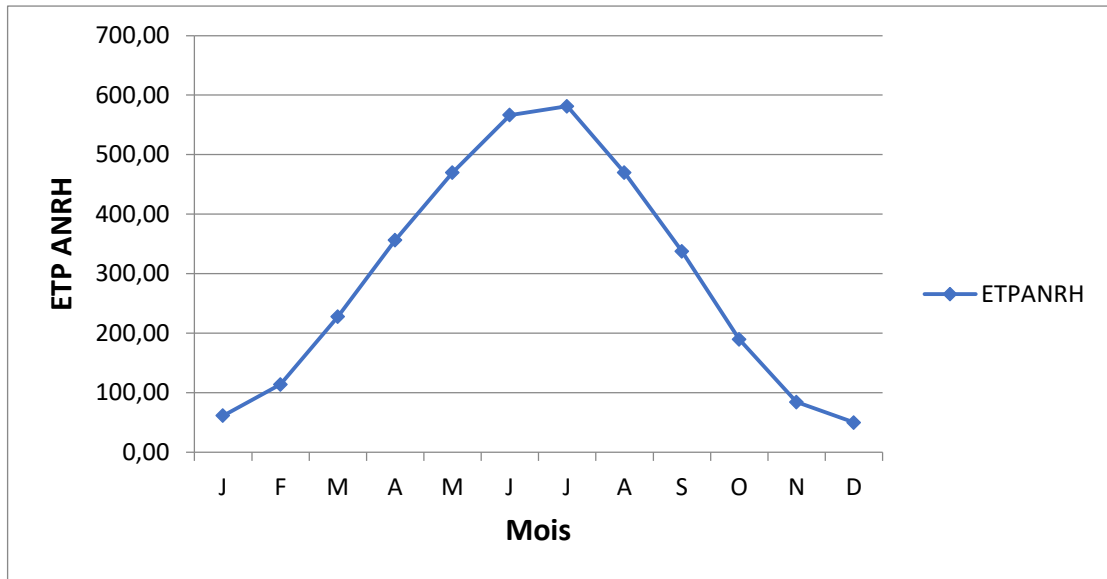


Figure III.7: Estimation de l'ETP avec la formule de l'ANRH

III.1.2.5 Formule de Penman- Monteith (FAO)

La formule de Penman – Monteith (FAO) est une combinaison du bilan énergétique et de la méthode de transfert de masse. Parmi les différentes méthodes de calcul des ETP, elle est recommandée par la FAO. Cette formule brute se présente comme suit (Boudjerada ,2015) :

$$ET_0 = C[W \times R_n + (1 - W) \times f(u) \times (e_a - e_d)]$$

Où :

W x Rn : Paramètre de rayonnement.

(1-W) x f (u) x (ea – ed) : Paramètre d'aérodynamique.

ET0 (mm/jour) : représente l'évapotranspiration de la culture de référence.

W: facteur de pondération lié à la température.

Rn (mm/jour) : représente le rayonnement net en évaporation équivalente.

(ea – ed) : c'est la différence entre la tension de vapeur réelle moyenne, les deux étant exprimées en millibars.

f (u) : c'est la fonction liée au vent.

C : c'est le facteur de correction pour compenser les conditions météorologiques diurnes et nocturnes.

Rnl = **f (u) x f(ed) x f (n/N)** : Rayonnement de grande longueur d'ordre en **mm/jour**.

f(ed) = **0,34 – 0,044 ed**: Correction rendant compte de l'effet de la tension de vapeur sur le rayonnement de grande longueur d'onde.

f (u) = **0,27 (1+u/100)** : Valeur de la fonction du vent, d'après le parcours du vent (**Km/jour**) à une hauteur de **2 m**.

f (n/N) = **0,1 + 0,9 n/N** : Correction rendant compte du rapport entre les heures réelles et astronomiques sur le rayonnement de grande longueur d'onde.

ed = **ea HR** : Tension de vapeur en millibars.

Rn = **Rns – Rnl**: Rayonnement net en mm/jour.

Ra : Rayonnement extra- terrestre exprimé en évaporation équivalente en mm/jour.

Dans notre étude , la détermination de l'ET0 a été réalisée au moyen du est effectué à logiciels CROPWAT8.0 publié par le FAO.

Pour l'utilisation de ce logiciel, nous avons saisi les données mensuelles fournies par la station météorologique de l'ONM, l'approche retenue s'appuie sur des données cohérentes et fiables ; a savoir:

-Température : Les températures moyennes mensuelles (min et max) sont données en degré Celsius.

-Humidité de l'air : l'humidité relative de l'air exprime en pourcentage %.

-Insolation journalière : L'insolation journalière donnée en heures d'insolation.

-Vitesse de vent : La vitesse du vent peut être introduite en m/s.

Le premier utilise par l'ONM, nous permet de calculer seulement l'évapotranspiration de référence. Les résultats de calcul par ce logiciel sont représentées dans le tableau III.6 se dessous:

Tableau III.6 : calcul de l'ETP par la formule de Penman - Monteith (FAO)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T min	5,6	6,7	10,9	14,9	19,5	24,3	27,5	27,3	23,3	17,6	10,9	6,5
T max	17,9	20,9	25,6	30,1	35,5	41,3	43,9	37,5	38	30,1	23,8	19,4
Vv(m/s)	3	3,2	4,1	4,6	4,6	4,5	4,2	3,8	3,7	2,9	2,9	3,1
H	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46	50,8	58,9	63,5
Es(h/mois)	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232
Es(h/j)	8,14	8,91	9,06	9,77	10,2	11,66	11,49	10,82	9,27	8,53	7,87	7,48
ET0 (mm)	74,44	96,55	161,8	214,6	281,6	331,7	359,7	292,5	233,6	155,3	98,37	76,9
ETP anne(mm)	2376,94											

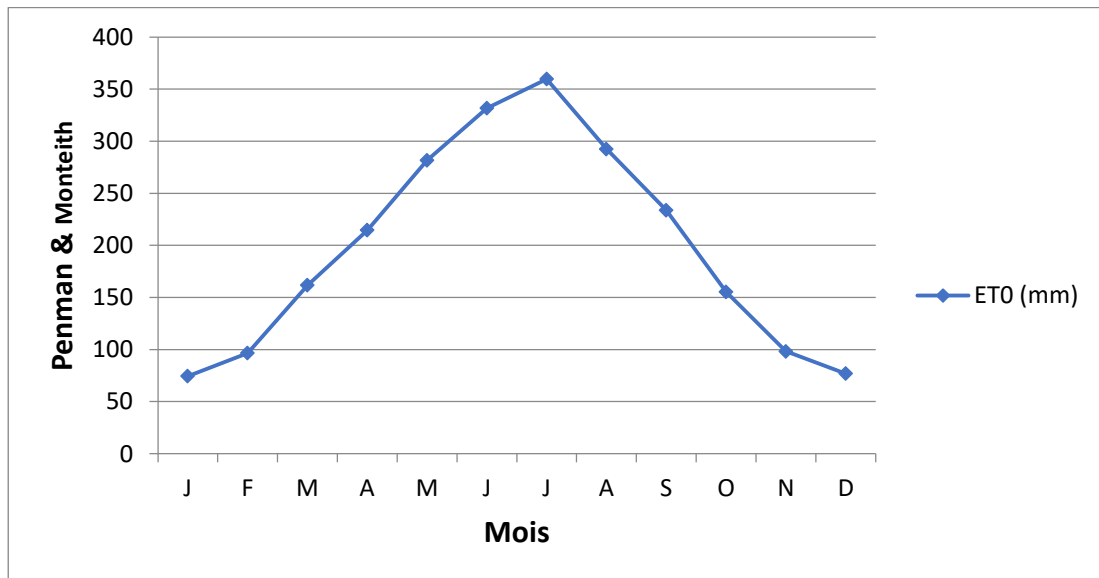


Figure III.8: Estimation de l'ETP avec la formule de Penman-Monteith

Conclusion

Au cours de ce chapitre ; nous avons cherché à présenter l'ensemble des méthodes et des équations employées dans la littérature scientifique pour estimer la valeur de l'ETP en insistant aussi bien sur les dispositifs et les outils de mesure que sur l'ensemble des relations mathématiques proposées par divers chercheurs spécialistes ; notamment celles de Turc ; Penman-Monteith (FAO) ; ANRH ; Blaney-Criddle et Thornthwaite.

Le besoin de faire appel aux formules empiriques demeure toujours incontournable lorsque plusieurs paramètres météorologiques viennent à manquer. Pour cette raison ; il convient d'adapter l'une de ces équations à notre zone d'étude ; ce qui nécessitera une comparaison

entre es différentes formules empiriques ; objectif du chapitre suivant Indispensable en cas de l'absence de plusieurs paramètres météorologiques. Pour ça on doit adapter une de ces formules selon notre zone d'étude et pour cela on va faire une comparaison entre ces formules empiriques, qui est l'objectif du prochain chapitre.



Chapitre IV

Estimation de la Réserve Facilement Utilisable



Introduction:

L'eau constitue l'un des facteurs essentiels au développement des cultures. Dans ce contexte; le sol représente un réservoir naturel capable de stocker et de restituer l'eau nécessaire aux plantes. La connaissance des caractéristiques hydriques du sol ainsi que de son comportement vis-à-vis de l'eau est indispensable pour une gestion rationnelle de l'irrigation. Ces informations permettent aussi bien aux ingénieurs de concevoir et de dimensionner les infrastructures hydrauliques qu'aux agriculteurs d'optimiser l'utilisation des ressources en eau disponibles.

Le sol est un milieu complexe constitué de trois phases : solide, liquide, gazeuse. Les propriétés physiques qui le caractérisent dépendent de l'interaction composantes. La fraction solide; généralement comprise entre 45 et 65% du volume total ; demeure relativement stable ; tandis que les proportions occupées par l'eau et l'air varient en fonction des conditions climatiques ; des pratiques culturales et de l'état hydrique du sol.

L'étude des relations entre ces différentes phases est fondamentale pour comprendre les mécanismes de rétention et de circulation de l'eau dans le sol ; ainsi que leur influence sur l'alimentation hydrique des plantes.

IV.1. Estimation De La Réserve Facilement Utilisable :

Etant donné le rapport $(RFU/RU) = 2/3$, l'estimation de la réserve facilement utilisable est basée sur le calcul de RU.

IV.1.1. Estimation par la formule de Rawls :

Cette estimation est basée sur l'analyse granulométrique du sol. Elle utilise la formule suivante :

$$RU = (W_{330} - W_{15000}) \times Z$$

Avec :

W_{330} : la teneur en eau du sol à -330 hPa (mm/m), c'est-à-dire la capacité au champ :

$$W_{330} = 257.6 - (2 \times Sa) + (3.6 \times Ar) + (29.9 \times Mo)$$

W_{15000} : la teneur en eau à -15000 hPa (mm/m), c'est-à-dire le point de flétrissement

$$W_{15000} = 26 + (5 \times Ar) + (15.8 \times Mo)$$

Ar : la teneur en argile (%),

Sa : la teneur en sable (%),

Mo : la teneur en matière organique (%),

Z : l'enracinement (m).

▪ **Application numérique :**

D'après l'analyse granulométrique :

- sables : 96 %

- limons : 3 %

- Argiles : 1 %

Avec un taux presque nul de matières organiques :

$$W_{330} = 257.6 - (2 \times 96) + (3.6 \times 1)$$

$$W_{330} = 62$$

$$W_{15000} = 26 + (5 \times 1)$$

$$W_{15000} = 31$$

On déduit la RU pour un enracinement d'1 mètre :

$$RU = (62 - 31) \times 1 = 31 \text{ mm}$$

On calcule la RFU :

$$RFU = \frac{2}{3} RU$$

$$RFU = \frac{2}{3} \times 31 = 20.67 \text{ mm}$$

Pour un enracinement de 60 cm :

$$RU = (62 - 31) \times 0.6 = 18.6 \text{ mm}$$

$$RFU = \frac{2}{3} \times 18.6 = 12.4 \text{ mm}$$

IV.1.2. Méthode empirique :

Dans cette méthode, on a essayé d'estimer la valeur de la réserve facilement utilisable par une procédure purement empirique sans mise en jeu des formules précédemment citées. Cette méthode était basée essentiellement sur la réalisation de certaines mesures saisonnières sur le terrain pour évaluer le volume de la lame d'eau remontée dans certains forages entre la période d'octobre à janvier. Le niveau de ce volume est affecté par plusieurs facteurs dont les précipitations, l'irrigation et l'assainissement qui implique l'augmentation de ce niveau. A l'opposé, il faut noter l'existence d'autres facteurs qui le diminuent (l'évapotranspiration).

Etant donné que le bassin versant caractérisant la région d'étude est, actuellement, de surface inconnue, on n'a pas pu déterminer le volume d'eau infiltré. La réalisation de ce processus était suspendue par une pénurie sévère des informations scientifiques relatives de l'étude avec un manque aigu de méthodes et de moyens techniques.

IV.1.3. Estimation par la formule de Hallaire :

La réserve utile en eau d'un sol peut être calculée par la relation suivante :

$$RU = (H_{cc} - H_{pf}) \times D_a \times Z \times (1 - C_x)$$

Avec :

RU : la réserve volumique en eau du sol (mm) ;

H_{cc} : Humidité pondérale à la Capacité au Champ (%) ;

H_{pf} : Humidité pondérale au Point de Flétrissement (%) ;

(H_{cc} – H_{pf}) : humidité équivalente (%) ;

D_a : la densité apparente (g / cm³) ;

Z : l'épaisseur du sol (mm) ;

C_x : la charge en éléments grossiers, la réserve utile de ces éléments étant considérée nulle.

En pratique, la réserve utile en eau d'un sol correspond à la somme des réserves de chaque horizon jusqu'à une profondeur limite correspondant à la profondeur maximale de prospection racinaire.

La réserve utile d'un sol dépend donc de trois grands facteurs :

- De la charge en éléments grossiers ;
- De la profondeur maximale d'enracinement ;
- De la teneur en eau volumique correspondant à la différence entre le volume d'eau retenu à la capacité au champ (saturation de la microporosité) et le volume d'eau retenu au point de flétrissement permanent ; ces volumes étant eux-mêmes dépendant de la composition granulométrique (texture), de la densité apparente (qui traduit la structure), de la charge en matière organique, etc.

IV.1.3.1. Charge en éléments grossiers :

Les charges en éléments grossiers ont été estimées sur le terrain au moyen de six classes d'abondance.

Pour les calculs de réserve, ces classes sont recodées en (valeurs de charge) en utilisant la médiane de chaque classe :

- classe 0 - charge nulle	0%.....	0
- classe 1 - très faible charge	0% à 5% de cailloux	0,025
- classe 2 - faible charge	5% à 25% de cailloux	0,150
- classe 3 - charge moyenne	25% à 50% de cailloux	0,375
- classe 4 - forte charge	50% à 75% de cailloux	0,625
- classe 5 - très forte charge	75% à 100% de cailloux	0,875

Selon le tableau ci-dessous, une région dont le sol est de nature sableuse présente une charge presque nulle en éléments grossiers.

Tab. IV. 1 : Caractères morphologiques essentiels des sols

Texture	Eléments grossiers %	Structure
Limono-sableuse	0	Fragmentaire grumeleuse
Limono-argileuse	65	Fragmentaire grumeleuse
Sableuse	0	Grumeleuse fine à tendance particulière

IV.1.3.2. Profondeurs maximales d'enracinement :

Le volume de sol prospectable par les racines conditionne l'alimentation hydrique et minérale de la plante. Le volume effectivement prospecté dépend du développement du système racinaire. En l'absence de contrainte, la plupart des essences végétales peut développer des systèmes racinaires profonds (2 mètres et plus) et ceci, quelle que soit l'architecture générale des systèmes.

L'architecture du système racinaire est cependant très sensible aux conditions pédologiques comme la texture, la densité apparente, la stabilité structurale, la perméabilité et l'aération. De ce fait, l'enracinement peut être entravé par différentes contraintes comme un facteur chimique, un facteur hydrique, ou un facteur physique.

Certaines contraintes sont un obstacle absolu (présence d'une roche massive, d'un horizon induré ou d'une nappe d'eau permanente). Dans ces conditions, la profondeur maximale d'enracinement correspond à la profondeur d'apparition de l'obstacle. Dans de nombreux cas cependant, les contraintes ne sont que relatives.

La compacité des horizons peut également être considérée comme une contrainte relative. Si à un accroissement de la compacité du sol correspond une diminution marquée du développement et de la ramification des racines, l'augmentation progressive de la densité apparente avec la profondeur n'a pas la même influence sur l'enracinement qu'un changement brutal.

- **L'impact de la profondeur d'enracinement :**

L'introduction de la profondeur d'enracinement observée in situ conduit à une sous-estimation de la RU. D'une part, l'estimation de la densité racinaire sur un plan ne fournit pas obligatoirement une bonne image de la répartition volumique des racines aux faibles densités.

D'autre part, la notion de RFU est une simplification relative à un fonctionnement global. Si l'on veut prendre en compte la répartition racinaire, il faudrait intégrer les

mécanismes complexes de transfert d'eau des zones non prospectées par les racines vers ces dernières, et des remontées capillaires des zones sous-jacentes. Ces mécanismes ne sont pas intégrés dans les modèles classiques de bilan hydrique basés sur la RFU. Un modèle de transfert multicouches serait nécessaire. Rechercher une précision en introduisant la mesure du front racinaire, peut conduire à des erreurs importantes, tout au moins dans ce type de sol.

Toutefois il est évident que des cultures à enracinement superficiel explorent une RU plus faible qu'une culture à enracinement profond.

IV.1.3.3. L'humidité du sol :

L'humidité du sol joue un rôle important dans le maintien de la vie sur la Terre, sa première utilisation est de permettre la croissance de la végétation. Elle conditionne également la mise en place du peuplement végétal (germination des semences, émergence, implantation du système racinaire, etc.).

Surveiller l'humidité de sols améliore les décisions d'irrigation. Son évaluation est donc importante en hydrologie et en agronomie, et constitue un paramètre d'alerte pour la désertification. Apporter seulement l'eau nécessaire à la plante au bon moment procure une vigueur accrue des plants, des rendements optimaux des cultures, une meilleure qualité des récoltes, une résistance des plantes aux maladies, une plus grande valorisation de l'eau et une diminution du coût de l'irrigation.

Elle est déterminée essentiellement par la valeur de la capacité au champ (volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir) et de la valeur du point de flétrissement (volume minimal d'eau dans le sol pour qu'un plant ne meure pas).

L'humidité d'un sol peut être exprimée soit en humidité pondérale, soit en humidité volumique.

- **L'humidité pondérale :**

Elle est définie par la relation :

$$H_p = \frac{P_e}{P_s}$$

P_e : Poids d'eau.

P_s : Poids de sol sec.

- **L'humidité volumique :**

Elle est définie par la relation :

$$H_v = \frac{V_e}{V_s}$$

V_e : Volume d'eau.

V_s : Volume de sol.

On peut exprimer l'humidité volumique en fonction de l'humidité pondérale :

$$H_v = H_p \times D_a$$

Il est donc indispensable de connaître la densité apparente de la terre sèche lorsque l'on veut passer de l'humidité pondérale à l'humidité volumique ou inversement.

- **La capacité au champ :**

La capacité au champ c'est le volume maximal d'eau que peut retenir le sol dans les micro porosités, les macro porosités étant drainées. On parle aussi de capacité de rétention en eau du sol. La capacité de rétention de l'eau par un sol varie selon sa texture et sa compaction. La quantité d'eau disponible pour les cultures est différente d'un sol à un autre. Si on compare le sol à une éponge on pourra dire que c'est le moment où l'éponge est pleine, où elle ne goutte plus car toutes les porosités accessibles sont pleines. Pour connaître la capacité au champ de son sol, il faut attendre deux à trois jours de ressuyage après saturation du sol par les pluies et faire la mesure avec un appareil de mesure de l'humidité. Il semble que ce pF puisse varier de 1,5 à 2,5 selon les types de sol et le climat.

Lorsque l'on explique les échanges d'eau dans le sol, on a l'habitude de comparer le sol à une éponge. Ainsi la capacité au champ s'obtient quand l'éponge est saturée d'eau et qu'elle ne goutte plus. Si l'éponge goutte cela signifie qu'il y a trop d'eau, l'eau est alors drainée en profondeur.

Cette eau est perdue pour le développement de la culture, elle ruisselle ou percole vers le sous-sol. Connaître la capacité au champ de sa parcelle est déterminant pour calculer la dose d'eau maximale à apporter à sa culture.

- **Le point de flétrissement :**

La définition du point de flétrissement permanent pour les plantes pose moins de difficulté, principalement parce que la teneur en eau varie peu dans le domaine de potentiel correspondant à cet état hydrique. Le point de flétrissement permanent est l'état hydrique du sol auquel les plantes ne peuvent plus puiser de l'eau et flétrissent de manière irréversible. On serre très fort l'éponge et plus une seule goutte d'eau s'en échappe.

Elle correspond à l'humidité pour laquelle la force de succion du sol équilibre la force de succion des cellules des racines : le débit d'eau du sol à la plante s'annule. C'est également une notion variable selon la nature de la plante. On convient en général de la définir comme correspondant à une pression de succion dans le sol de 15 atmosphères, bien que certaines plantes soient capables d'extraire par leurs racines de l'eau à des tensions bien supérieures.

L'humidité au point de flétrissement correspond approximativement au pF 4.2, cette humidité est plus délicate à mesurer. En l'absence des données précis on admettra qu'elle vaut la moitié de l'humidité à la capacité de rétention : $H_{pf} = 1/2 H_{cc}$.

- **Humidité équivalente :**

C'est la différence ($H_{cc} - H_{pf}$). Cette mesure est faite en laboratoire : on extrait l'eau d'un échantillon de sol à saturation, au moyen d'une centrifugeuse produisant une accélération de 1,000 fois l'accélération de la pesanteur pendant 30 mn.

- **Humidité hygroscopique :**

C'est l'humidité d'un sol séché à l'air. L'eau du sol est alors en équilibre avec la tension de vapeur d'eau dans l'air.

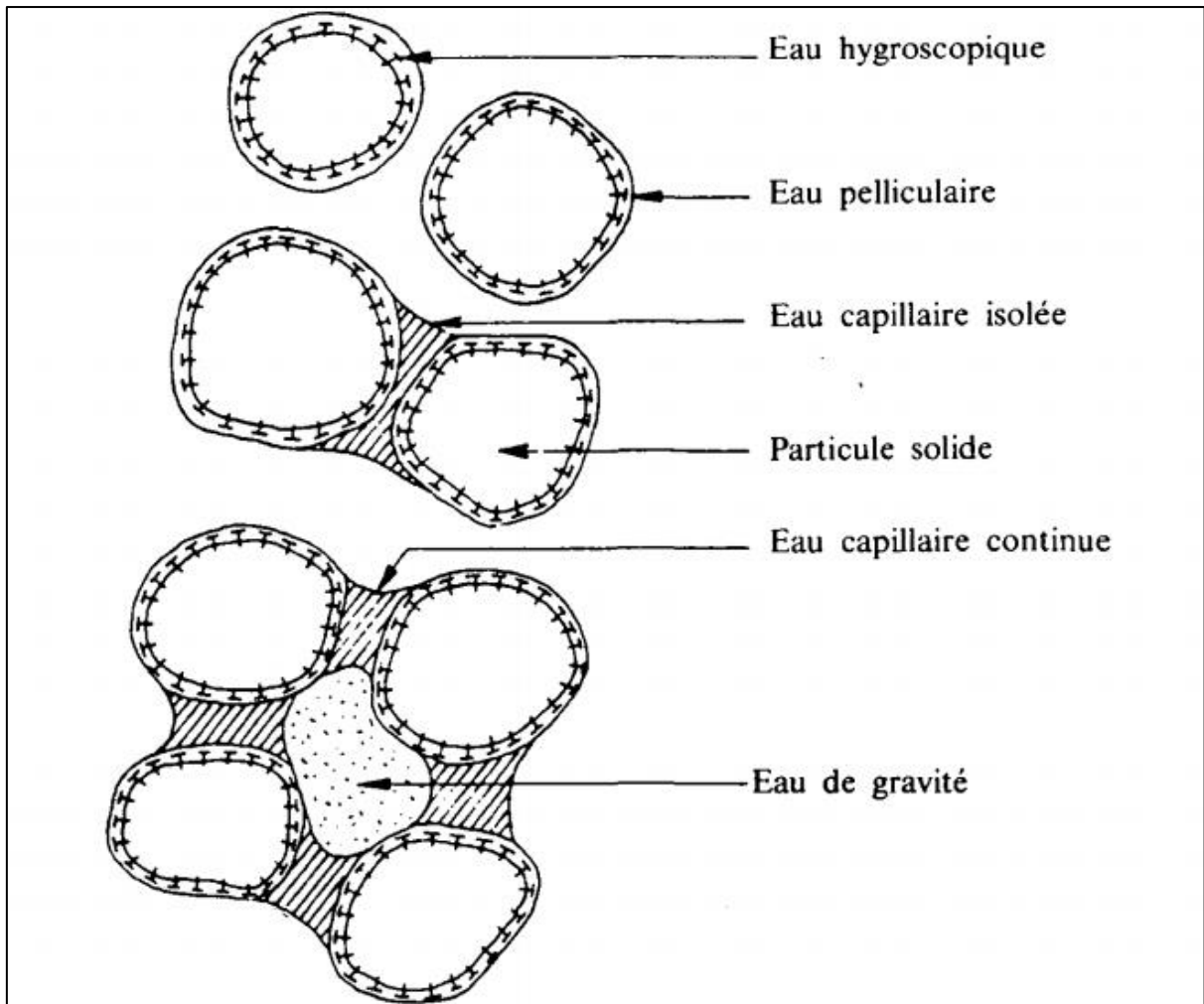


Fig. IV.1 : Différents types d'eau dans le sol (CTA, 1976).

IV.1.3.4. Potentiel hydrique :

Le potentiel hydrique correspond à l'énergie qu'il est nécessaire de fournir à l'unité de masse d'eau pure pour la faire passer, au cours d'une transformation réversible, de l'état d'eau libre à la pression atmosphérique, à l'état qu'elle a dans le système considéré.

Le potentiel hydrique ainsi défini est négatif en milieu non saturé (c'est généralement le cas de l'eau du sol) ; il est positif pour l'eau sous pression. La définition du potentiel hydrique fait qu'il s'exprime en principe en unités d'énergie par unité de masse, soit en Joules/kg dans le système MKSA.

Dans la pratique, on le rapporte à l'unité de volume d'eau, et il a la dimension d'une pression. On peut donc l'exprimer en atmosphères, en bars, en kg/cm^2 , ou en mètres de colonne d'eau. On parle alors plutôt de tension, que l'on donne généralement en valeur absolue, sans tenir compte du signe.

Le potentiel hydrique est la résultante de différents phénomènes agissant sur l'eau, et dont les plus importants sont :

- la pesanteur (Ψ_n) ;
- la tension superficielle et les phénomènes de capillarité (Ψ_m) ;
- le potentiel osmotique de l'eau (Ψ_o) ;
- le potentiel de turgescence (Ψ_t).

Le système est en équilibre lorsque le potentiel hydrique total est le même en tout point.

$$h = \Psi_n + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_t = \text{constante.}$$

le pF défini de la manière d'une échelle logarithmique des potentiels hydriques:

$$\text{pF} = \log h$$

h étant exprimé en centimètres de colonne d'eau.

- **Relation entre le pf et l'humidité du sol :**

La tension de l'eau du sol est évidemment en relation étroite avec sa teneur en eau : le pF varie en raison inverse de l'humidité du sol. La mesure du pF permet donc une mesure indirecte de l'humidité, à condition de tenir compte des points suivants :

- la relation tension-humidité est différente pour chaque type de sol : par exemple, pour les 2 mêmes valeurs de pF, les valeurs correspondantes de l'humidité seront d'autant plus importantes et présenteront entre elles des différences d'autant plus grandes, que la teneur en éléments fins sera plus élevée ;

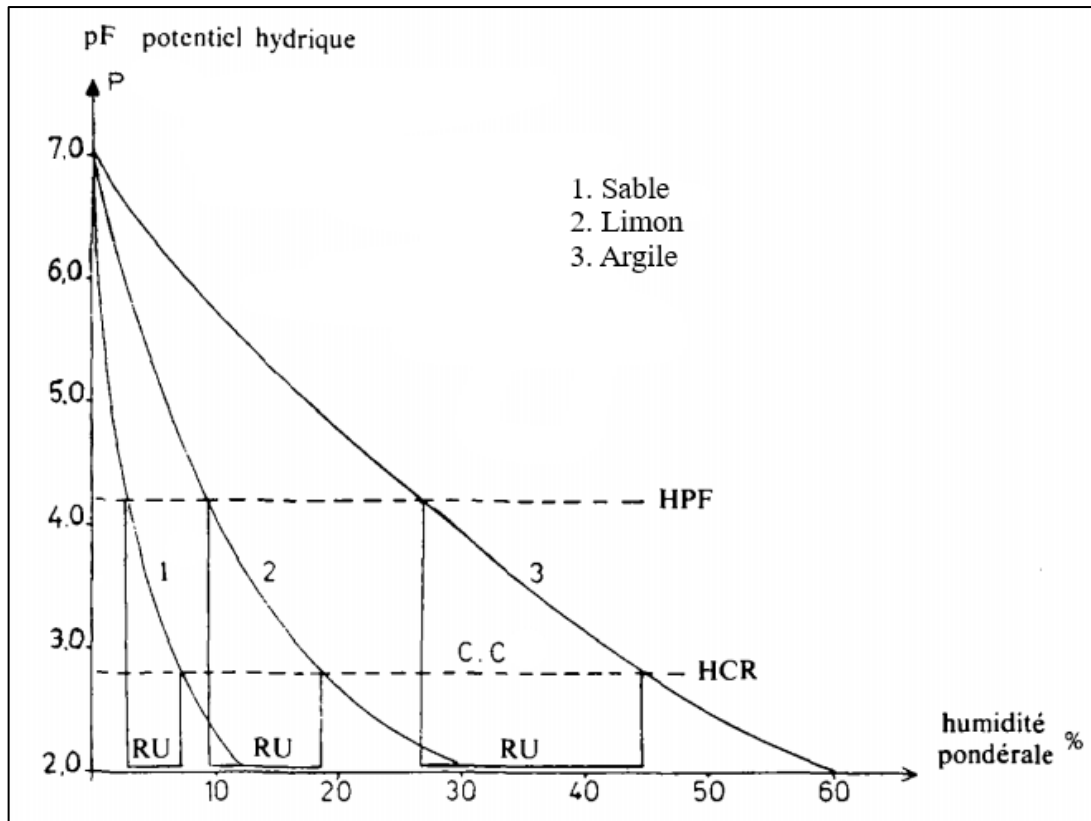


Fig. IV.2 : Relation potentiel - humidité pour trois types de sol (CTA, 1976).

- cette relation n'est pas la même en phase d'humectation et en phase de dessiccation : pour une même valeur de l'humidité d'un sol, le pF est moins élevé dans la phase de réhumectation que dans la phase de dessiccation. On observe donc un retard ou « hystérésis ». Ce phénomène est très nettement marqué sur des sols riches en argiles, mais presque insignifiant sur des sols sableux ;

- enfin, toujours pour une même valeur d'humidité, le pF est d'autant plus élevé que la vitesse de dessèchement est plus rapide.

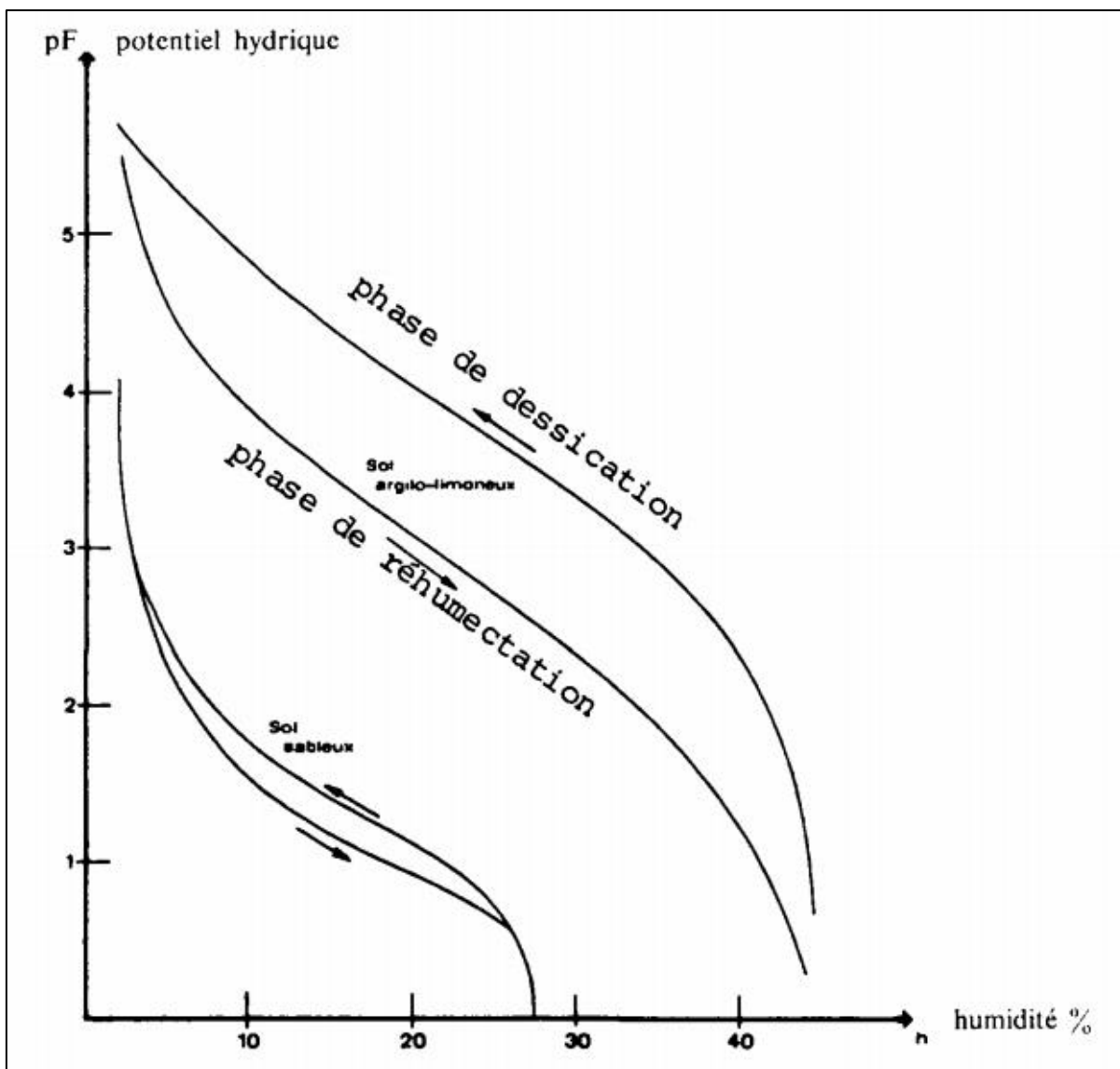


Fig. IV.3 : Relation potentiel - humidité (effet d'hystérésis), (CTA, 1976).

IV.1.3.5. La densité apparente :

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Elle est, en effet, liée à la nature et à l'organisation des constituants du sol. Elle permet en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines, la cohésion des horizons et la réserve en eau du sol.

Son étroite relation avec le type de structure fait qu'elle est faible dans "les sols à structure grumeleuse stable" comme le chernozem dont les agrégats sont en grumeaux. Dans les sols tropicaux, les horizons humifères, relativement structurés se caractérisent par des densités apparentes plus faibles que celles des horizons minéraux sous-jacents à structure massive.

Sa connaissance peut permettre de déterminer ou d'orienter les travaux de préparation du sol tels que le labour, le sous-solage, le pulvérisage, le hersage.

Elle peut être évaluée au laboratoire sur des échantillons, ou sur le terrain dans des horizons en place selon que l'on veut déterminer la porosité texturale, la microporosité ou la macroporosité. Au laboratoire, sont essentiellement utilisées la méthode à la paraffine et à l'eau et la méthode au pétrole. Ces deux méthodes conviennent surtout pour la mesure de la densité apparente des mottes, des petits agglomérats et des agrégats. Pour les mesures in situ, il existe quatre méthodes : la méthode au cylindre, la méthode au sable, la méthode au densitomètre à membrane et la méthode par gammamétrie.

Les descriptions, les avantages et les limites d'utilisation de ces méthodes, sont repris dans le Bulletin de Groupe de Travail édité par l'ORSTOM. Ce bulletin n'aborde malheureusement pas le problème de l'uniformité ou de la dispersion des densités apparentes déterminées dans un même sol ou horizon à partir de plusieurs méthodes. En outre, divers travaux mentionnant la porosité calculée à partir de la densité apparente, ne précisent pas laquelle des quatre méthodes de terrain a été utilisée. Certains travaux comme ceux de BLIC (1987) s'appuient sur les densités apparentes obtenues en utilisant alternativement deux méthodes. Or, au cours de quelques-unes de nos études nous avons remarqué que pour un même horizon nous obtenons des densités apparentes sensiblement différentes lorsque nous utilisons simultanément la méthode au sable et la méthode au densitomètre à membrane. Nos constatations n'étant pas fondées sur une analyse statistique ne permettaient pas de dégager l'influence de la méthode sur la valeur de la densité apparente.

Cette étude est une contribution à la connaissance de la variation des valeurs mesurées de la densité apparente d'un sol ou d'un horizon donné en fonction des méthodes de mesure.

- **Principes des méthodes de terrain :**

Les principes de la méthode au cylindre (C), de la méthode au sable (S) et de la méthode au densitomètre à membrane (M) sont fondés sur la détermination du poids spécifique apparent d'un volume de sol prélevé.

Le volume est estimé immédiatement sur le terrain alors que le poids est évalué au laboratoire après séchage et pesée. La connaissance de ces deux variables permet de calculer la densité apparente selon la relation :

$$Da = Ps/Vt$$

Ps : le poids sec de l'échantillon,

Vt : le volume de l'échantillon prélevé et séché (cm³).

Des deux variables, le volume apparaît le plus important car sa détermination nécessite beaucoup d'attention et de doigté. Un geste en plus ou en moins et le volume est surestimé ou sous-estimé.

▪ **Application numérique :**

On réécrit la formule de Hallaire tenant compte la charge nulle en éléments grossiers et le rapport RFU / RU = 2/3 :

$$RU = (H_{cc} - H_{pf}) \times Da \times Z$$

Après les données obtenues au laboratoire étaient :

$$H_{cc} = 4.42 \%$$

$$H_{pf} = H_{cc} / 2 = 2.21 \%$$

$$Da = 1.27 \text{ g / cm}^3$$

Pour une moyenne de profondeur de racines égale à 1 mètre :

$$RU = (0.0442 - 0.0221) \times 1.27 \times 1000$$

$$RU = 28.067 \text{ mm}$$

$$RFU = \frac{2}{3} \times 28.067$$

$$RFU = 18.71 \text{ mm}$$

Pour une moyenne de profondeur de racines égale à 60 cm :

$$RU = (0.0442 - 0.0221) \times 1.27 \times 600$$

$$RU = 16.8402 \text{ mm}$$

$$RFU = \frac{2}{3} \times 16.8402$$

$$RFU = 11.2268 \text{ mm}$$

IV.2.Estimation par les teneurs volumiques en eau :

La teneur en eau volumique correspond à la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ (saturation de la microporosité) et au point de flétrissement permanent. Cette définition fait appel à deux états caractéristiques de l'eau dans le sol, définis par les agronomes par une approche essentiellement statique, sur la fraction terre fine du sol.

$$\theta = (H_{cc} - H_{pf}) \times DA$$

Avec :

θ : le teneur en eau volumique ;

Les humidités pondérales caractéristiques n'ayant pas été mesurées sur les sols du réseau, il est nécessaire d'estimer les capacités en eau utile de chaque horizon à partir de leurs

caractéristiques physico-chimiques pour accéder à la réserve utile de ces sols. Ces estimations ne sont pas triviales. Comme le constate Bastet (1999), nous n'avons encore qu'une connaissance très approximative des propriétés hydrauliques des sols à l'échelle du territoire national et notamment des propriétés de rétention en eau. A cette constatation, nous pouvons ajouter que la majorité des études ne concernant que des sols agricoles ou ne prenant pas en compte l'effet du mode d'occupation du sol sur ses propriétés hydriques ; sauf rares exceptions. L'examen de la littérature montre qu'il n'existe pas de résultats probants comparant et quantifiant les propriétés physiques des sols cultivés.

La réserve en eau des sols étant un paramètre important dans le calcul des bilans hydriques et minéraux, il nous a donc semblé nécessaire de rechercher plusieurs méthodes de calcul des teneurs en eau, non pas pour obtenir une valeur précise et absolue des réserves (celles-ci ne pouvant être connues que par l'application de méthodes lourdes), mais pour évaluer l'erreur potentielle introduite dans les calculs de bilans par les différentes méthodes d'estimation des réserves en eau. Ces méthodes sont classées en deux groupes :

- les fonctions de pédotransfert (FPT).
- les méthodes dites des coefficients de texture ;

Remarque :

Nous soulignerons ici l'absence de consensus sur les valeurs caractéristiques de potentiel hydrique.

La teneur en eau à la capacité au champ correspond à la teneur en eau du sol après ressuyage, lorsque tout écoulement gravitaire a cessé. Cette valeur ne peut théoriquement être déterminée qu'*in situ*. Les différents auteurs utilisent donc des valeurs d'humidité correspondant à une capacité au champ déterminée au laboratoire qui varie selon les études, la nature des échantillons, etc. de -50 à -1000 hPa (pF 1,7 à 3).

Le point de flétrissement permanent correspond au potentiel hydrique à partir duquel les racines ne peuvent plus extraire l'eau du sol. La valeur de pF 4,2 (-15 000 hPa) est communément admise par les agronomes pour les plantes cultivées et les semis forestiers.

IV.2.1.Fonctions de pédotransfert :

Par le terme fonction de pédotransfert, on entend toute fonction mathématique destinée à relier les propriétés de rétention en eau des sols à leurs caractéristiques physico-chimiques (texture, densité apparente, porosité, teneur en matière organique ou en carbone, capacité d'échange cationique, etc.). Un grand nombre de fonctions ont été publiées depuis les années 60, les unes permettant d'estimer des teneurs en eau à des valeurs ponctuelles de potentiel

matriciel, d'autres permettant d'estimer de façon continue les quantités d'eau retenues en fonction du potentiel matriciel.

IV.2.2.Méthode des coefficients de texture :

La méthode des coefficients de texture consiste à utiliser des tables proposant des moyennes elles-mêmes établies par plusieurs mesures d'humidités pondérales (à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent) sur divers échantillons de sol.

- **Estimations de Jamagne et al., (1977) :**

Les résultats les plus souvent cités, et les plus couramment utilisés lorsqu'il est nécessaire de calculer une réserve utile en eau, sont ceux publiés par Jamagne et al., 1977. Des estimations moyennes de réserve en eau ont été proposées pour 15 classes de texture après des mesures sur plusieurs centaines d'échantillons prélevés dans le département. Cette méthode est intéressante pour classer hiérarchiquement les réserves potentielles de plusieurs solum mais elle reste assez grossière pour plusieurs raisons. Les mesures des teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été réalisées sur des échantillons remaniés (séchés et tamisés à 2 mm), or cette méthode détruit la structure du sol et ne reflète plus la porosité de celui-ci. Les coefficients proposés ne tiennent compte que de la texture des horizons ; la densité apparente, qui traduit la structure, n'est pas prise en compte, ni la charge en matière organique. Enfin, les valeurs de réserve en eau utile varient peu entre les différentes classes de texture.

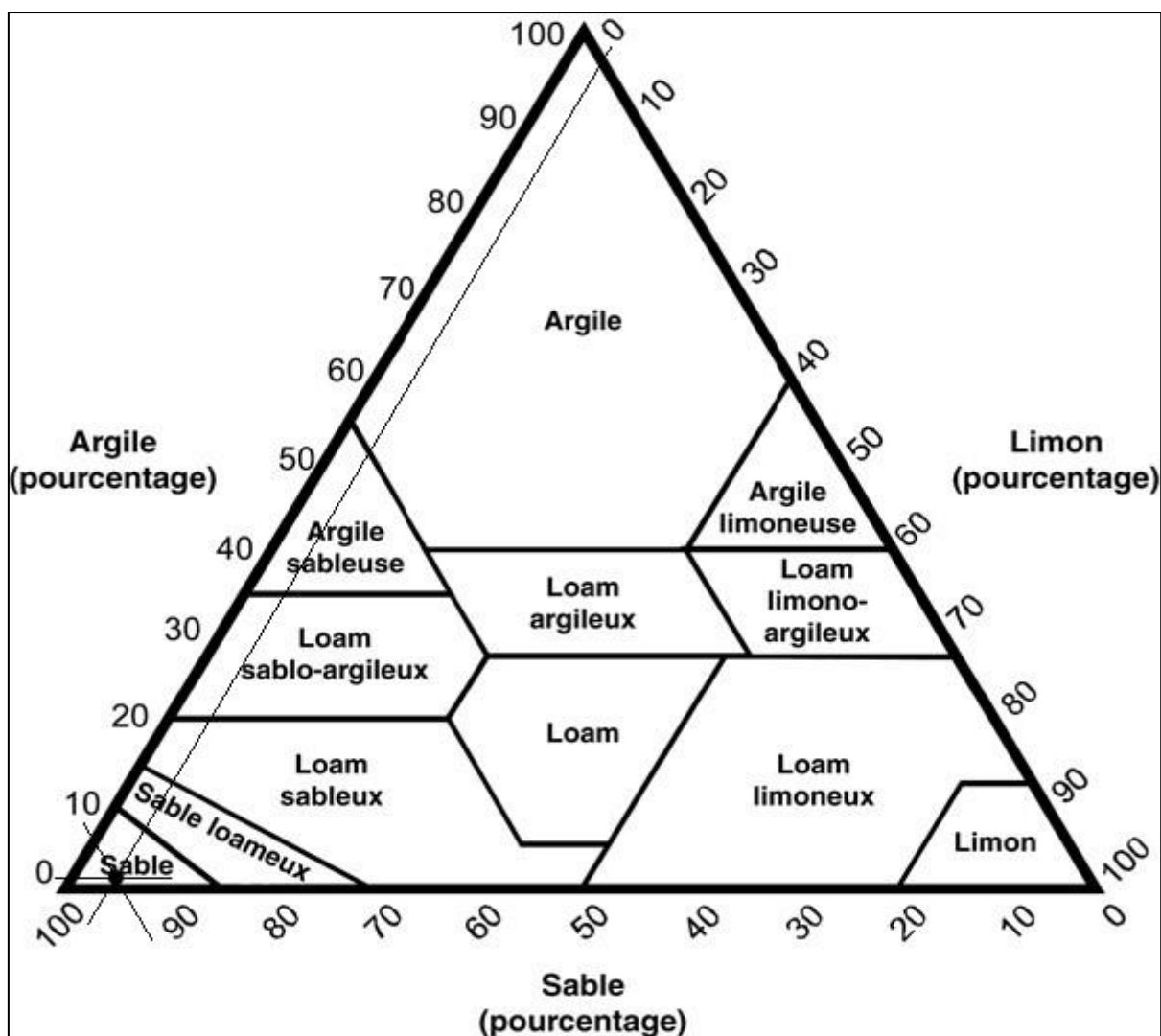


Fig. IV.4 : Diagrammes de classification des textures (Jamagne, 1967)

Tab. IV. 2 : Tableau des coefficients de texture (Jamagne et al., 1977)

Texture	Hcc (g/100g)	Hp _f (g/100g)	Da (g/cm ³)	RU (mm/cm)
Sable	8	3	1.35	0.70
Sable limoneux	12	5	1.40	1.00
Sable argileux	19	10	1.50	1.35
Limon léger sableux	15	7	1.50	1.20
Limon sableux	19	9	1.45	1.45
Limon moyen sableux	20	9	1.45	1.60
Limon sablo-argileux	22	11	1.50	1.65
Limon argilo-sableux	24	12	1.45	1.75
Limon léger	17	8	1.45	1.30

Limon moyen	23	10	1.35	1.75
Limon argileux	27	13	1.40	1.95
Argile sableuse	33	22	1.55	1.70
Argile	37	25	1.45	1.75
Argile limoneuse	32	19	1.40	1.80
Argile lourde	33.5	21.5	1.40	1.675

$$RU = Da \times \frac{(H_{cc} - H_{pf})}{10}$$

RU : réservoir utilisable maximal en mm d'eau / cm de sol.

H_{cc} : humidité pondérale à la capacité au champ (pF = 2,5) ;

H_{pf} : humidité pondérale au point de flétrissement permanent (pF = 4,2) ;

Da : densité apparente (g/cm³).

▪ **Application numérique :**

Selon la méthode de (Jamagne et al.), on calcule la RU par l'équation donnée ci-dessus en utilisant les paramètres de la région d'étude :

H_{cc} = 8 %;

H_{pf} = 3 %;

Da = 1.35 g/cm³.

En appliquant l'équation :

$$RU = 1.35 \times (8 - 3) / 10$$

$$RU = 0.675 \approx 0.70 \text{ mm/cm}$$

On déduit la valeur de la RFU :

$$RFU = \frac{2}{3} RU$$

$$RFU = \frac{2}{3} \times 0.70$$

$$RFU = 0.4667 \text{ mm/cm}$$

Pour une moyenne de profondeur de racines égale à 1 mètre :

$$RFU = 0.4667 \times 100 = 46.67 \text{ mm}$$

Pour une moyenne de profondeur de racines égale à 60 cm :

$$RFU = 0.4667 \times 60 = 28 \text{ mm}$$

• **Estimation de Jamagne et Bétrémieux, (1992) :**

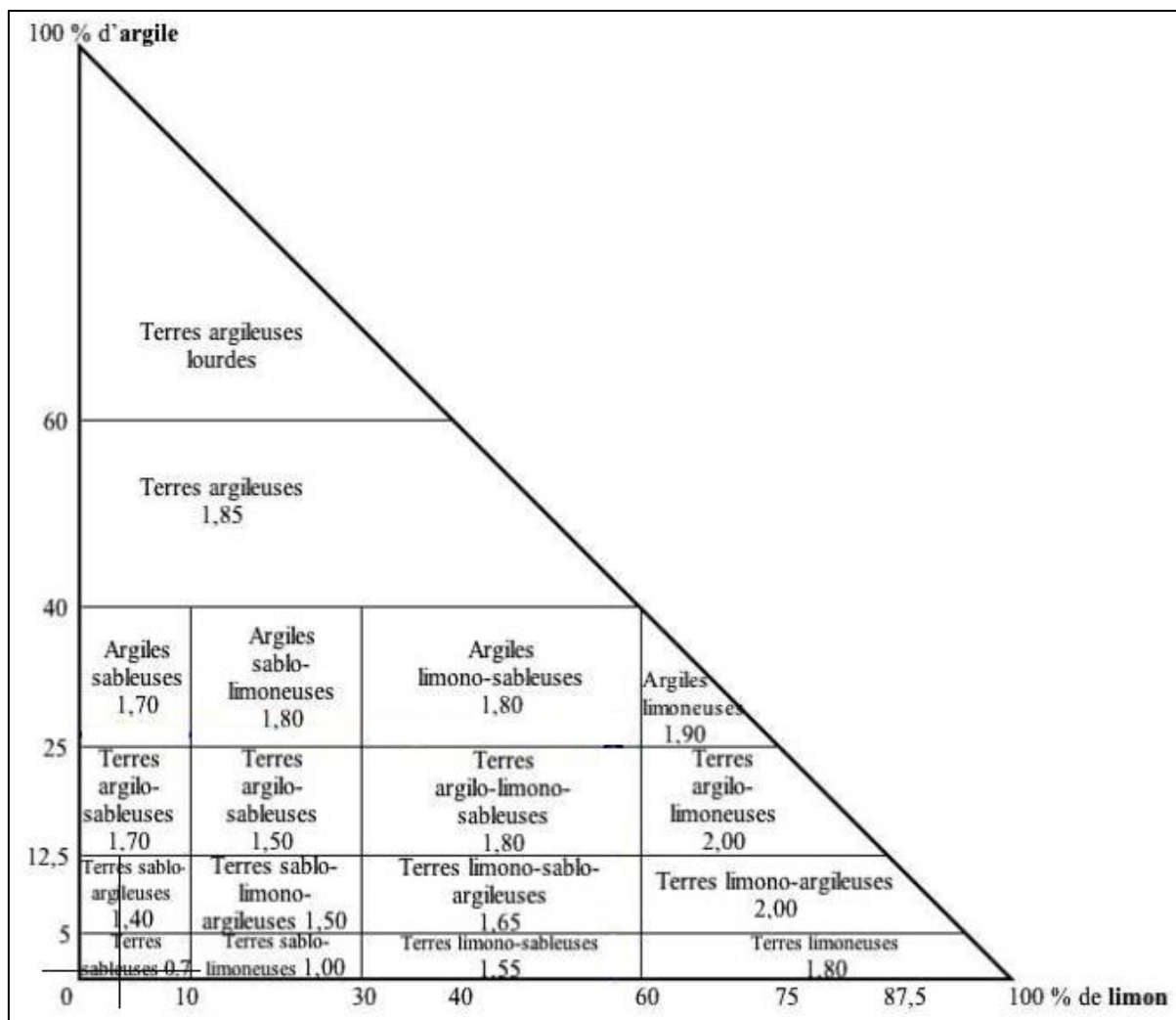


Fig. IV.5 : Triangle de coefficient des textures Jamagne et Bétrémieux (1992)

On détermine la RFU max selon la profondeur du sol et l'enracinement de la culture.

On effectue une expérience pour déterminer la structure granulométrique du sol de la région :

On prend un échantillon du sol dans un récipient transparent, gradué, muni d'un système de fermeture et qui permet une lecture facile, on ajoute de l'eau, on ferme le récipient et on agite verticalement puis horizontalement pendant environ trois minutes jusqu'au mélange bien l'ensemble. Les particules solides commencent à sédimenter. On attend deux à trois jours pour que la quasi-totalité des particules solides soient au fond du récipient et que l'eau soit presque nette avec un taux négligeable d'impuretés (MO). A ce moment, on observe que les particules solides sont organisées en trois strates différentes qui sont du bas vers le haut : couche de sable, de limon et d'argile qui reste à la surface du mélange. On mesure la hauteur de chaque strate et on calcule son pourcentage :

$(\text{Hauteur de sables} \times 100) / \text{hauteur totale} = \% \text{ de sables} ;$

$(\text{Hauteur de limons} \times 100) / \text{hauteur totale} = \% \text{ de limons} ;$

$(\text{Hauteur d'argiles} \times 100) / \text{hauteur totale} = \% \text{ d'argiles}.$

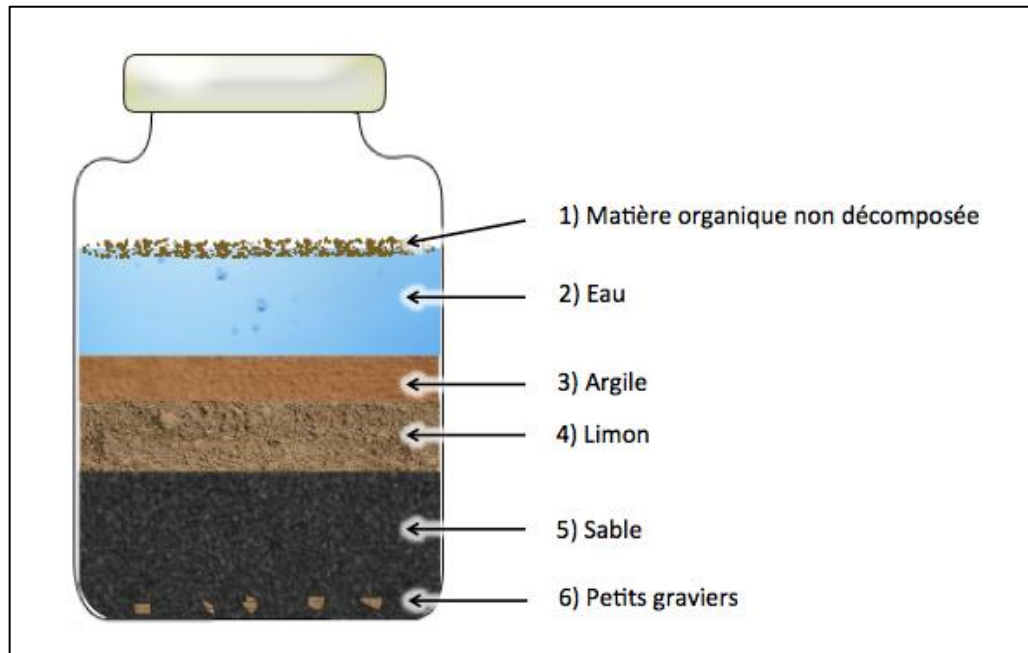


Fig. IV.6 : Résultat virtuel de la superposition des strates composant le sol

D'après l'analyse granulométrique du sol de la région :

- sables : 96 %
- limons : 3 %
- Argiles : 1 %

Le triangle des textures indique : Terre sableuses ; $RU = 0.7 \text{ mm} / \text{cm}.$

Sur 60 cm de sol : $RU = 0.7 \times 60$

Soit : $RU = 42 \text{ mm}$

$RFU/RU = 2/3 :$

$RFU = 28 \text{ mm}$

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, une estimation de la Réserve Facilement Utilisable (RFU) a été réalisée à partir de données théoriques et de différentes approches de calcul adaptées aux caractéristiques des sols sableux dominants dans la région d'étude. Trois méthodes d'estimation ont ainsi été appliquées, conduisant à des résultats relativement convergents, ce qui témoigne d'une cohérence satisfaisante entre les valeurs obtenues.

Les résultats ont montré que la valeur de la RFU se situe dans une plage relativement restreinte. Toutefois, la valeur déterminée à l'aide de la formule de Hallaire, estimée à 18,71

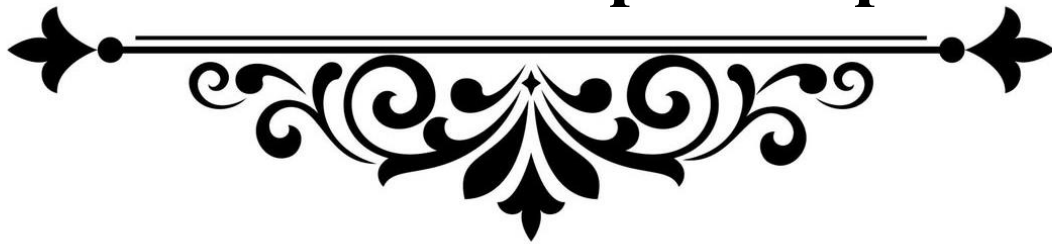
mm, apparaît comme la plus représentative des conditions pédoclimatiques de la région étudiée. Cette pertinence s'explique par sa meilleure prise en compte des propriétés physiques du sol. Cette valeur correspond à la quantité d'eau aisément mobilisable par la plante sans engendrer de stress hydrique. Elle constitue également un paramètre essentiel pour la gestion rationnelle de l'irrigation, en permettant d'éviter les apports excessifs d'eau susceptibles de provoquer des pertes par infiltration profonde et, par conséquent, un gaspillage des ressources hydriques.

Dans le but d'améliorer la fiabilité des résultats obtenus, il a été envisagé de réaliser des mesures et des expérimentations de terrain permettant d'aboutir à une estimation plus précise et mieux adaptée aux conditions hyperarides ainsi qu'à la nature sableuse des sols de la région. Néanmoins, la mise en œuvre de cette démarche n'a pas pu être menée à son terme en raison de certaines contraintes techniques et opérationnelles. En effet, le protocole expérimental retenu nécessite un suivi sur une période suffisamment longue afin de garantir l'obtention de résultats scientifiquement fiables et représentatifs.



Chapitre V

**Comparaison de l'évaporation
mesurée avec celle des méthodes
d'estimation de l'évapotranspiration**



Introduction

Les mesures de l'évaporation à partir de l'évaporomètre de Piche installé à l'Aéroport de Guemar (ONM), ont été confrontées avec les valeurs de l'Evapotranspiration Potentielle (ETP) estimées par certaines méthodes tels que : Thornthwaite (1944), Turc (1962), et Penman-Monteith (FAO)...ect; en se basant sur les mesures météorologiques collectées de la station comme la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et la durée d'insolation.

Cette confrontation permet d'identifier quelles sont les méthodes d'estimation d'ETP qui donnent des estimations les plus proches des mesures réelles. Ceci s'avère nécessaire pour estimer les besoins en eau nécessaire à la croissance des végétations et des cultures agricoles et de l'appliquer ensuite sans risque sur les régions à climat similaire au climat saharien de la région d'Oued Souf.

V.1 Evolutions mensuelles de l'évaporation mesurée et les ETP estimées par les Formules empiriques.

Nous pouvons représenter les valeurs de l'ETP mesurées et les résultats calculés par les formules empiriques dans le tableau ci-dessous.

Tableau V.1: Les valeurs de l'ETP des six modèles

Mois	ETP piche	ETPB_C	ETP Thor	ETP_Turc	ETPANRH	ETP Penman
janvier	99,4	106,3	11,1	70,6	61,4	74,4
février	157,5	110,8	16,2	79,1	114,1	96,6
mars	157,5	152,1	40,2	122,4	227,8	161,8
avril	204,2	173,1	72,4	156,2	356,3	214,6
mai	270,7	215,2	132,9	162,5	470,1	281,6
juin	301,3	246,6	209,8	174,0	566,4	331,7
juillet	339,4	267,8	265,2	254,0	581,4	359,7
août	300,2	237,8	195,7	230,5	469,7	292,5

septembre	193,9	206,4	151,9	140,9	337,7	233,6
octobre	147,3	167,9	74,4	90,8	189,8	155,3
novembre	103,2	125,4	30,0	97,6	84,3	98,4
décembre	84,7	107,9	14,0	89,9	50,1	76,9

V.2 Discussion des résultats

V.2.1 Comparaison des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration

V.2.1.1 Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée avec le logiciel "SPSS"

a-Statistiques descriptives

Pour mieux préciser, nous avons entré les valeurs obtenues par les formules de Thoronthwaite, de Turc, de Penman-Monteith (FAO), de Blaney et Criddle et de ANRH ainsi que l'ETP mesurée par le Piche in situ, dans logiciel d'analyses statistiques SPSS version 22, et après avoir effectué l'analyse statistique, les résultats étaient les suivants :

Tableau V.2 Statistiques descriptives

Formule	Moyenne	Ecart type	Minimum	Maximum
ETP PICHE	196,6	87,29	84,70	339,40
ETP TURC	139,03	59,29	70,60	254,00
ETP Blaney - Criddle	176,44	57,71	106,30	267,80
ETP Penman- Monteith	198,09	102,14	74,40	359,70
ETP Thornthwaite	101,15	87,63	11,10	265,20
ETP ANRH	292,43	197,61	50,20	581,40

A -Analyse descriptive

Les valeurs ETP ANRH varient entre 50.20 et 581.40, avec une moyenne de 292,43 et écart-type de 197.61, ce qui est surestimée que les valeurs de l'ETP Piche en termes de moyenne arithmétique ainsi que de valeur maximum.

Il est à noter que les données ETP estimées à la Formule de Thoronthwaite, dont les valeurs sont comprises entre 11.10 et 265.20, avec une moyenne de 101.15 et écart-type de 87.63,

sont les moins importantes en termes de moyenne arithmétique, la valeur maximale et minimale.

Ce test a démontré que le modèle Penman-Monteith (FAO) avec une moyenne de 198.09 et écart-type de 102.14, donnait des résultats qui étaient les plus proches des valeurs ETP Piche.

b-Corrélation

Tableau V.3 Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée

Corrélation de Pearson	ETP TURC	ETP Blaney et Criddle	ETP Penman-Monteith (FAO)	ETP Thornthwaite	ETP _{ANRH}
ETP PICHE	0,928**	0,951**	0,973**	0,936**	0,977**

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

A partir des relations entre l'ETP (Piche) et celles estimées à partir des différentes formules, il apparaît une bonne corrélation significative entre celle-ci et celle obtenue par l'application des différents méthodes d'estimation (sign> 0.9).

Évidemment la meilleure corrélation est obtenu entre l'ETP (Piche) et ANRH- Penman-Monteith (FAO), avec une valeur significative de corrélation respectivement 0.977-0.973, assurant qu'il existe une corrélation très forte entre celui-ci et ETP Piche.

D'après les résultats de logiciel "SPSS", nous trouvons que la méthode de Penman-Monteith (FAO) et de Blaney-Criddle sont les plus proches de celles de Piche (198.0917) en point de vue moyennes annuelles (198.0917,176.4417) et la méthode de Penman-Monteith (FAO) , Blaney-Criddle et ANRH de point de vue corrélation (0.973 , 0.951 et 0.977) respectivement. C'est pour cela qu'on va fait une autre comparaison entre les résultats de Penman-Monteith (FAO) et celles de Blaney-Criddle avec Piche (mesurées).

c-Régression linéaire

Les relations entre l'évaporation ETP mesurée et les méthodes d'estimation d'ETP sont linéaire, chacune peut être représentée par une équation linéaire de la forme $y=ax+b$.

Le tableau IV.5 résume pour chaque méthode les paramètres a et b ainsi le coefficient de **Corrélation** correspondant.

Tableau V.4 : Équation linéaire entre l'ETP mesurée et celle de différentes formules

Méthode	Équation linéaire	R ²
Turc	ETP (Tu) = 0.63 ETP (Piche) + 15.15	0.86
Blaney-Criddle	ETP (B-C) = 0.63 ETP (Piche) + 52.81	0.905
Thornthwaite	ETP (Thor) = 0.94 ETP (Piche) - 83.6	0.876
Penman-Monteith (FAO)	ETP (Panm) = 1.14 ETP (Piche) - 25.8	0.947
ANRH	ETP (ANRH) = 2.21 ETP (Piche) - 142.14	0.955

A partir des relations entre l'ETP mesurée par le Piche et l'estimation dans les différentes formules, il semble qu'il existe une bonne corrélation entre ETP mesurée par Piche et celles qui ont été obtenue en appliquant les différentes formules. Notez que la meilleure corrélation a été obtenue entre l'ETP mesurée et celles de l'ANRH, Penman-Monteith (FAO), Blaney-Criddle, avec le coefficient corrélation respectivement ($R^2 = 0.955, 0.947, 0.905$).

Afin d'obtenir la formule de mesure la plus précise et la plus proche l'ETP mesurée par Piche et avec un bon coefficient de corrélation, nous effectuons une comparaison entre les moyennes, en effectuant un test T.

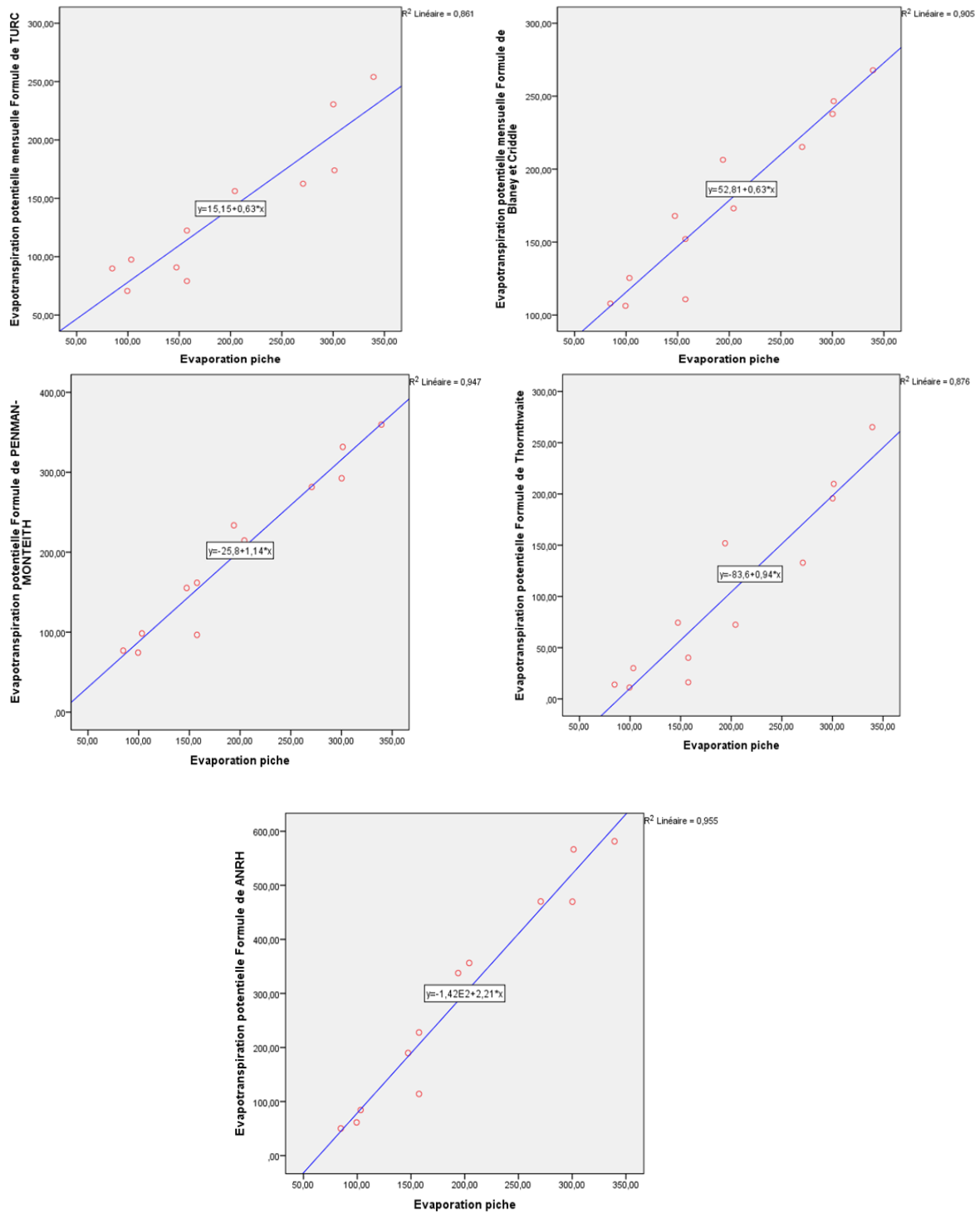


Figure V.1 : Régression linéaire entre les valeurs de l'ETP mesurées et l'ETP calculées par les cinq formules

V.2.1.2. Comparaison des moyennes par T-Test Pour échantillons indépendants

Le test t de Student pour échantillons indépendants a été utilisé afin d'évaluer l'existence d'éventuelles différences significatives entre les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) mesurées à l'aide de l'évaporimètre de Piche et celles estimées par les différentes

méthodes empiriques étudiées. Cette analyse statistique permet de vérifier si les moyennes des deux séries de données sont statistiquement équivalentes ou significativement différentes.

À cet effet, les données ont été introduites dans le logiciel SPSS, où les analyses statistiques ont été réalisées en adoptant un seuil de signification de 5 % ($\alpha = 0,05$). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau V.5 Résultats du T.test pour la différence entre les moyennes

Paramètres Modèles	N	Moyenne	Ecart type	valeur signification	Signification statistique	Différence moyenne
ETP Piche	12	196,6	87,29	0,014	Non < 0.05	95.85
ETP Thoronthwait	12	101,15	87,63			
ETP Piche	12	196,6	87,29	0.072	Oui	30.46
ETP Turc	12	139.03	59.29			
ETP Piche	12	196,6	87,29	0.97	Oui	1.48
ETP Penman Monteith	12	198.09	102.14			
ETP Piche	12	196,6	87,29	0.51	Oui	20.20
ETP Blainy et Cridell	12	176,44	57,71			
ETP Piche	12	196,6	87,29	0,139	Oui	95,82
ETP ANRH	12	292,43	197,61			

*Intervalle de confiance de la différence à 95 %

Il ressort clairement des données du tableau IV.6 que l'ETP Piche moyen de (196.6) avec écart-type (87.29) est presque égal à l'ETP Penman-Monteith(FAO) moyen de (198.09) avec écart-type (102.14), la différence des moyennes est estimée à 1.48. De plus, un niveau de signification de (0.97) Supérieur à (0.05), on peut donc dire qu'il n'y a pas de différence significative dans les moyennes entre (Piche ETP) et (ETP Penman Monteith (FAO)).

V.2.1.3. Comparaison avec l'erreur relatif

Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP, à l'échelle mensuelle ont été comparés à l'ETP (Piche), en se basant sur les valeurs de l'écart

relatif « ER ». Ainsi, des corrélations linéaires ont été établies entre les résultats des différents modèles par rapport à l'ETP (Piche).

L'erreur relatif est défini par :

$$ER = \frac{ETP\ Piche - ETP_i}{ETP\ Piche} \times 100(\%)$$

ETPi : ETP calculée par les méthodes de Thornthwaite, Turc, Blaney-Criddle et Penman-Monteith(FAO) et L'ANRH

Plus les valeurs de « ER » sont faibles, plus la méthode d'estimation de l'ETP donne une estimation satisfaisante de cette composante.

Les valeurs de l'ETP des cinq modèles avec l'erreur relatif nous les représentons dans le tableau IV.2.se dessous:

Tableau V.6: Les valeurs de l'erreur relatif des cinq modèles

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ER Turc	29.02	49.78	22.30	23.50	39.96	42.24	25.16	23.22	27.35	38.38	5.47	-6.14
ER B/cc	-6.98	29.63	3.44	15.24	20.52	18.16	21.11	20.79	-6.43	-14.01	-21.50	-27.36
ER Thornoth	88.80	89.73	74.45	64.55	50.91	30.36	21.87	34.81	21.64	49.48	70.90	83.52
ER ANRH	38.19	27.57	-44.65	-74.49	-73.65	-88.00	-71.31	-56.45	-74.18	-28.88	18.30	40.90
ER Penman	25.11	38.70	-2.70	-5.07	-4.01	-10.08	-5.99	2.56	-20.49	-5.42	4.68	9.21

D'après le tableau, nous trouvons que :

- Pour Thornthwaite ER est entre [+21.64 à +88.8] %.
- Pour Turc ER est entre [-6.14 à +49.78] %.
- Pour Penman- Monteith(FAO) ER est entre [-20.49 à +38.7] %
- Pour Blaney-CriddleER est entre [-27.36 à +29.63] %.
- Pour ANRH ER est entre [-88 à +40.9] %.

Les erreurs de chaque méthode nous les représentons dans les figures suivantes:

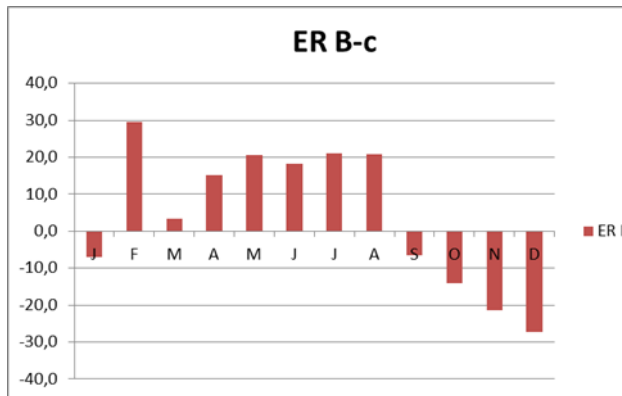


**Figure V.2 Erreur relatif entre
 ETP_{Piche} & $ETP_{BI/Cr}$**

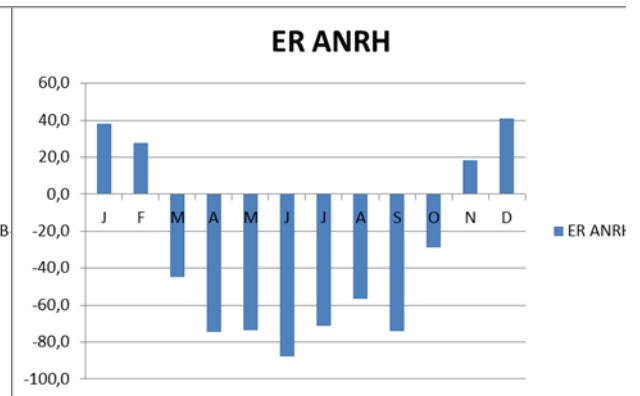


**Figure V.3 Erreur relatif entre ETP_{Piche} &
 ETP_{ANRH}**

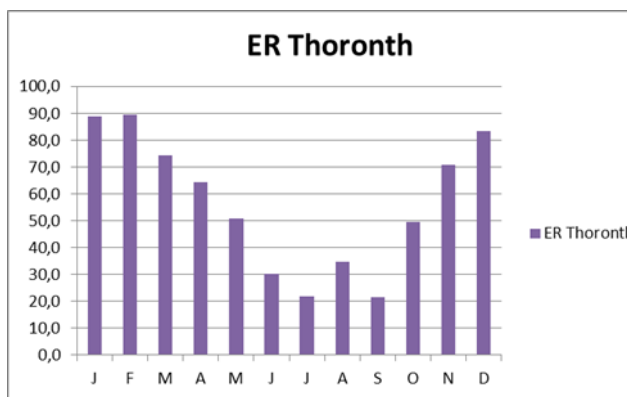


**Figure V.4 Erreur relatif entre
 ETP_{Piche} & ETP_{Thornt}**

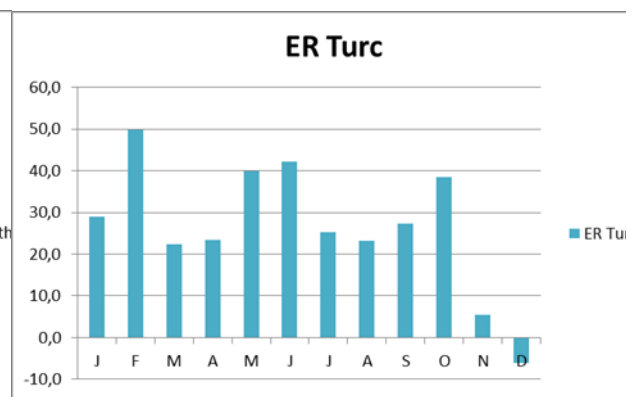


**Figure V.5 Erreur relatif entre
 ETP_{Piche} & ETP_{Turc}**

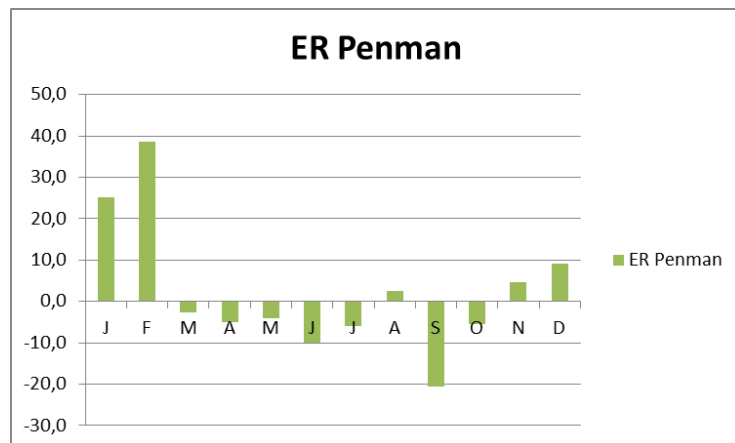


Figure V.6 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{Penman}

On confirme encore une fois que la méthode de Penman- Monteith (FAO) présente pour chaque mois le minimum d'erreur relative.

V.2.1.4. Comparaison graphique

Les valeurs moyennes mensuelles au cours de la période (1996 – 2020) de l'évaporation mesurée EP (Piche) et ceux estimées ETP (Thornthwaite), ETP (Turc),

ETP (Penman-Monteith(FAO)), ETP (Blaney-Criddle) et ETP (ANRH) sont présentées par la Figure IV.3.

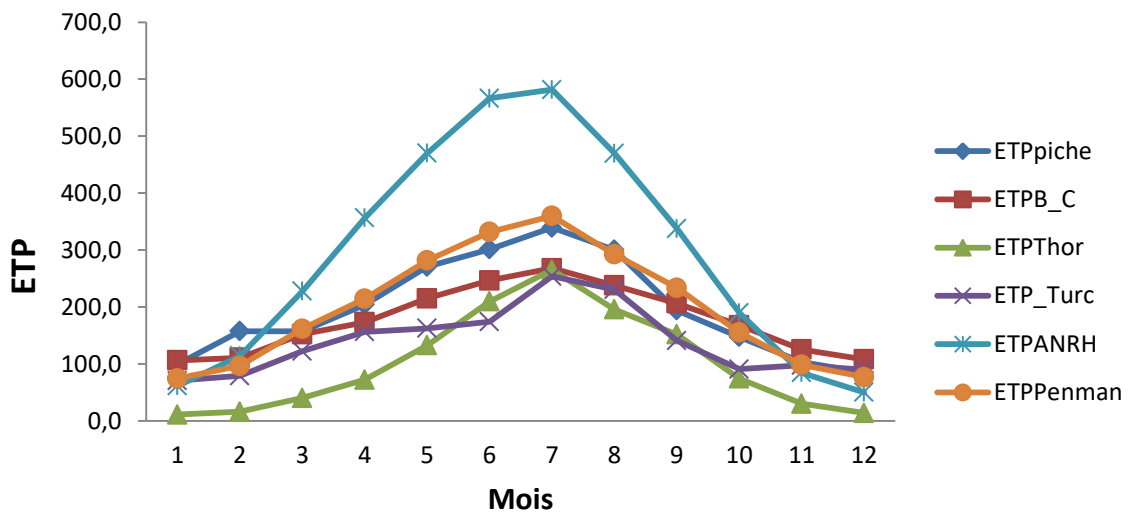


Figure V.7 : Evolutions moyennes mensuelle des ETP estimées et de l'évaporation de Piche, pour la région d'Oued Souf au cours de la période (1996 - 2020).

On note que :

- La formule de Thornthwaite sous-estime l'ETP par rapport aux autres formules.
- La formule de l'ANRH climatique et de culture surestime l'ETP par rapport aux autres formules.
- Concernant le mois de pointe, nous constatons que la plus grande valeur de l'évapotranspiration potentielle correspond au mois de Juillet, les six formules présentent la même tendance d'évolution d'évapotranspiration.
- Pour la période mars- août, ainsi que octobre, novembre et décembre les valeurs données par la formule de Penman-Monteith(FAO) sont plus proches des valeurs de l'ETP mesurées que des valeurs données par les formules de Turc, Thornthwaite, ANRH, alors que la formule de Blaney-Criddle traduit bien l'évolution de l'ETP mesurée pour les mois de janvier et mars et septembre avec des résultats assez similaires.

- La formule ANRH a concordée l'ETP mesuré à la valeur la plus basse enregistrée en décembre. mais le reste des formules, a été enregistré au mois de janvier.

Nous concluons de la figure ci-dessus que les valeurs de la formule de Penman-Monteith (FAO) semblent les plus proches des valeurs mesurées de l'ETP au cours de l'année.

V.2.1.5. Comparaison selon les paramètres climatiques

Une simple aperçue sur les précédentes figures nous constatons que les erreurs des formules de Turc, Thornthwaite et de l'ANRH sont des erreurs énormes comparaison avec celles de Blaney-Criddle et de Panman – Montieth (FAO) qui nous avons données des résultats plus proche de ETP mesurées. Et d'un autre coté la formule de Penman-Montieth (FAO) est la seul formule qui utilise plus de données climatiques. Ce qui nous conduit à l'adapter pour l'estimation de l'ETP pour notre zone d'étude (La vallée d'Oued Souf) parmi les autres formules empiriques.

V.3. Calcul du bilan hydrique

L'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut donc se faire à l'aide d'une équation de bilan appelée "bilan hydrique" qui représente le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un sol (entité naturelle en générale) et dans le temps.

Le but de calcule de bilan hydrique est la détermination des besoins en eau des plantes, ces besoins sont les doses apportés au plante dans des moments propices, afin de mettre celle-ci dans les meilleures conditions d'humidité requises, pour obtenir son rendement maximal.

V.3.1 Facteurs influençant le bilan hydrique

L'équation du bilan hydrique se base sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un espace donnés :

$$P = ETR + \Delta S$$

P : précipitation moyenne mensuelle (mm).

ETR : évapotranspiration real mensuelle (mm).

ΔS : représente le déficit agricole (Da) ou l'excédent dans chaque mois (mm).

" Cas de la vallée d'Oued Souf ") a estimé la réserve utile RU dans notre zone d'étude : RU = 28.067mm OÙ: RFU = 18.71mm

En tenant compte les conditions suivantes :

1- Si $P - ETP > 0$; c-a-d : $P > ETP$, dans ce cas $ETR = ETP$.

2- Si $P - ETP < 0$; c-a-d : $P < ETP$, ce cas est subdivisé encore en deux cas :

a- Si $P + RFU > ETP$ $\square \square ETR = ETP$.

b- Si $P + RFU < ETP$ $\square \square ETR = P + RFU$.

On peut résumer le calcul de bilan hydrique dans le Tableau IV.7.

Tableau V.7 Calcul de bilan hydrique.

Mois	ETP	P	P-ETP	RU	RFU	ETR	DEFICIT	EXCEDENT
janvier	74.44	16.40	-58.04	28.067	0.00	16.40	58.04	0.00
février	96.55	5.40	-91.15	28.067	0.00	5.40	91.15	0.00
mars	161.75	6.40	-155.35	28.067	0.00	6.40	155.35	0.00
avril	214.55	5.90	-208.65	28.067	0.00	5.90	208.65	0.00
mai	281.55	4.80	-276.75	28.067	0.00	4.80	276.75	0.00
juin	331.68	1.50	-330.18	28.067	0.00	1.50	330.18	0.00
juillet	359.73	0.40	-359.33	28.067	0.00	0.40	359.33	0.00
août	292.50	1.50	-291.00	28.067	0.00	1.50	291.00	0.00
septembre	233.63	6.50	-227.13	28.067	0.00	6.50	227.13	0.00
octobre	155.29	8.40	-146.89	28.067	0.00	8.40	146.89	0.00
novembre	98.37	10.60	-87.77	28.067	0.00	10.60	87.77	0.00
décembre	76.90	7.20	-69.70	28.067	0.00	7.20	69.70	0.00
somme	2376.94	75.00	-2301.94		0.00	75.00	2301.94	0.00

Pour la vérification on utilise les formules suivantes:

$$1. \Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EX$$

On a: $\Sigma ETR + \Sigma EX = 75 + 0 = 75 = \Sigma P$. (Vérifier)

$$2. \Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DA$$

On a: $\Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DA = 75 + 2301.94 = 2376.94 = \Sigma ETP$. (Vérifier)

Donc le bilan est vérifié.

Du tableau se dessus, on constate que le bilan hydrique est déficitaire, c'est-à-dire apporté de l'eau au plante le long de l'année.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une comparaison entre les différentes formules empiriques calculant l'ETP, nous avons trouvés que les résultats de la formule de Penman-Montieth (FAO) est la plus proche des valeurs mesurées que les autres formules, en plus elle utilise plus des données climatiques, qui nous conduit à l'adaptation de cette dernière.

Lors du calcul du bilan hydrique à partir des valeurs d'évapotranspiration calculées en fonction de la formule adoptée dans la zone d'étude, les résultats ont montré la présence d'une pénurie d'eau tout au long de l'année, ce qui nécessite une irrigation permanente des cultures agricoles pour obtenir un bon rendement.

Conclusion générale

Conclusion générale

La gestion rationnelle des ressources en eau constitue l'un des principaux défis du développement agricole dans les régions arides et hyperarides, où la réussite de tout projet agricole dépend étroitement de la compréhension des caractéristiques climatiques et hydrologiques du milieu étudié. Dans ce contexte, la présente étude a porté sur l'analyse des données climatiques de la région d'Oued Souf durant la période 1996–2020, ainsi que sur l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à l'aide de plusieurs méthodes de calcul, en complément de l'évaluation de la Réserve Utile (RU) et de la Réserve Facilement Utilisable (RFU).

Les résultats obtenus ont montré que l'ensemble des méthodes d'estimation de l'ETP suit une évolution saisonnière similaire, caractérisée par des valeurs minimales en hiver et maximales en été, avec un pic enregistré au mois de juillet. L'analyse comparative a également révélé que la méthode de Penman-Monteith (FAO-56) est la plus précise et la mieux adaptée aux conditions climatiques de la région d'étude, ce qui en fait la méthode la plus appropriée pour l'évaluation des besoins en eau des cultures.

Par ailleurs, l'estimation de la Réserve Facilement Utilisable a été réalisée en tenant compte des caractéristiques des sols sableux dominants dans la région. Les différentes méthodes appliquées ont conduit à des résultats relativement convergents. Toutefois, la valeur de RFU estimée à 18,71 mm selon la formule de Hallaire s'est révélée la plus représentative des conditions pédoclimatiques locales. Cette valeur correspond à la quantité d'eau que la plante peut prélever aisément sans subir de stress hydrique, ce qui en fait un paramètre essentiel pour la programmation de l'irrigation et l'optimisation des apports en eau.

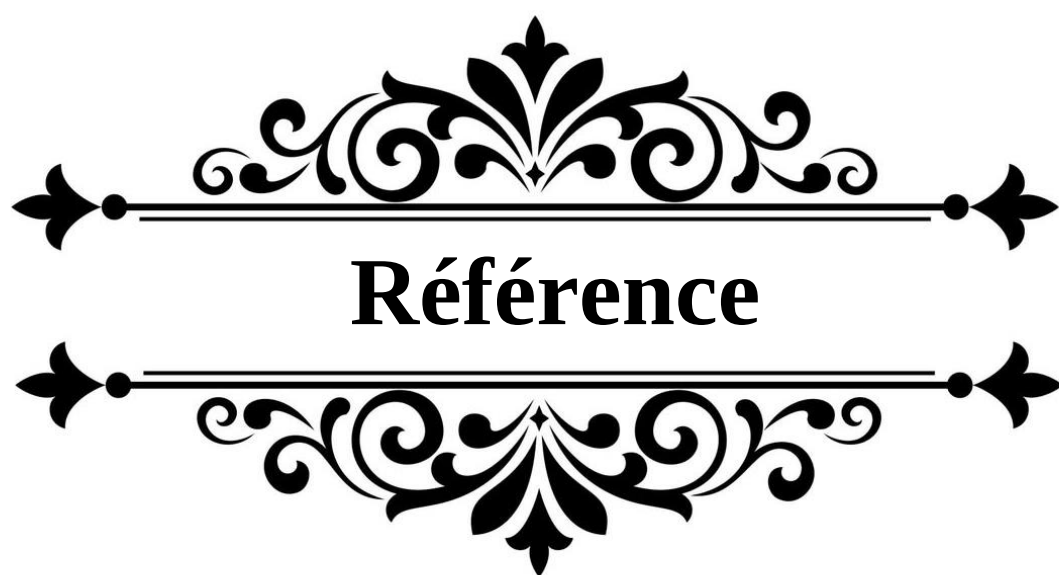
Les résultats obtenus confirment également la faible capacité de rétention en eau des sols sableux de la région d'Oued Souf, ce qui nécessite une gestion rigoureuse de l'irrigation afin de limiter les pertes par infiltration profonde et d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources hydriques. Ainsi, l'association d'une méthode fiable d'estimation de l'évapotranspiration avec une bonne connaissance des réserves hydriques du sol constitue une base scientifique solide pour la détermination des besoins en eau des cultures et la mise en œuvre d'une gestion durable de l'irrigation dans les zones sahariennes.

Au regard de ces résultats, il peut être affirmé que cette étude a permis d'identifier la méthode la plus adaptée pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle dans la région d'Oued Souf, tout en fournissant une évaluation de la réserve en eau disponible pour les plantes dans les sols sableux caractéristiques de cette région. Les conclusions obtenues représentent un outil d'aide à la décision pouvant contribuer à l'amélioration de la gestion des

Conclusion générale

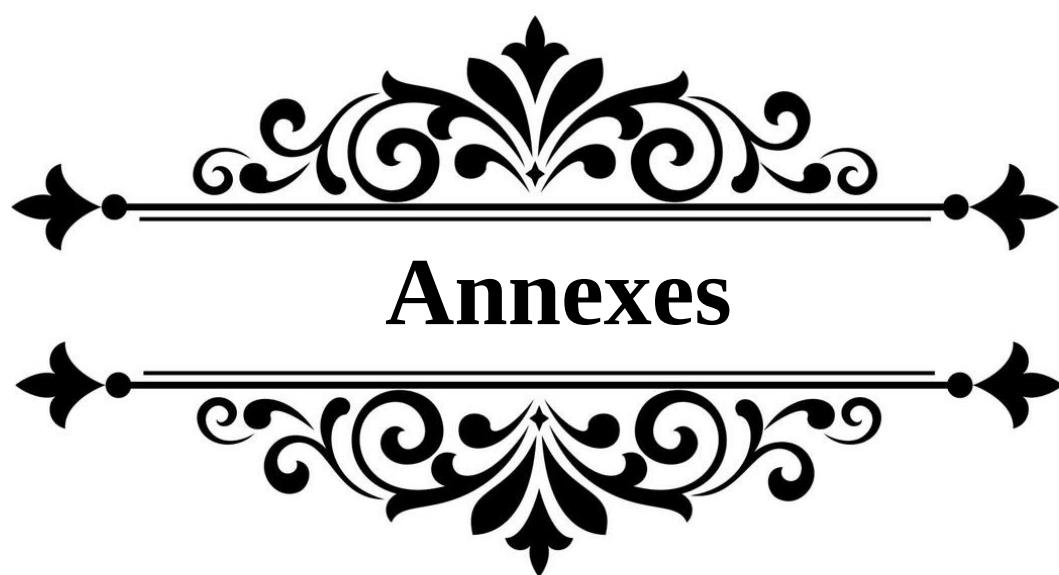
eaux d'irrigation, à la préservation des ressources hydriques et au renforcement du développement agricole durable dans les milieux désertiques.

Enfin, il serait souhaitable de compléter ces travaux par des expérimentations et des mesures de terrain à long terme afin d'améliorer la précision des estimations et de valider les résultats obtenus dans les conditions réelles d'exploitation agricole. Une telle démarche permettrait également d'étendre l'application de cette méthodologie à d'autres régions sahariennes présentant des caractéristiques climatiques et pédologiques similaires.

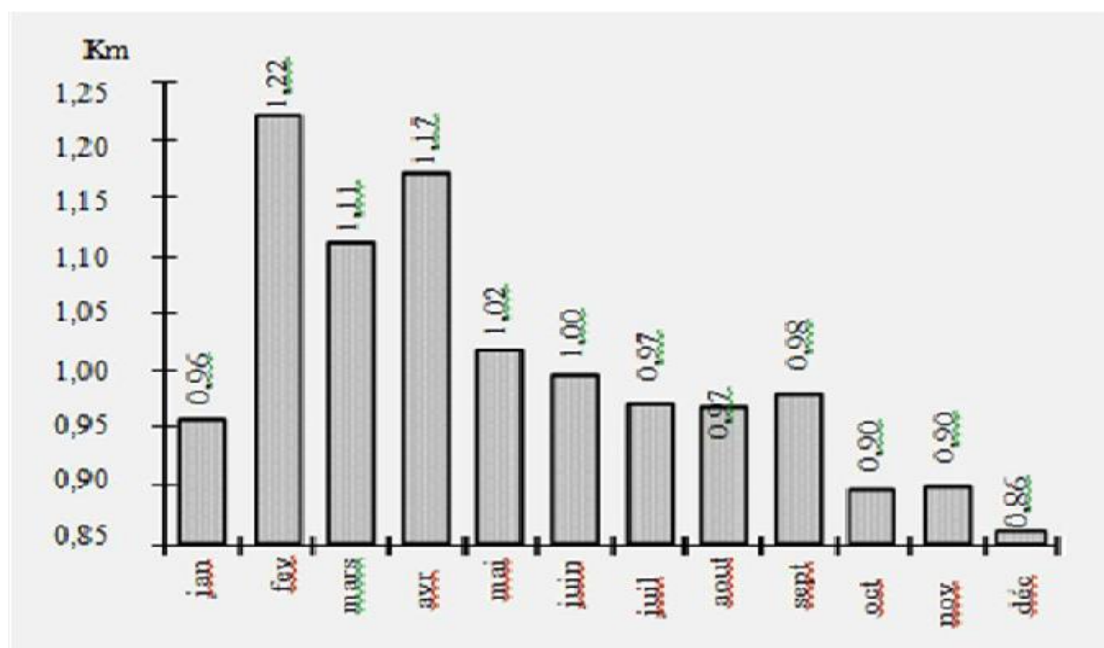


Référence

- [01] FAO, 2012. Coping with Water Scarcity: An Action Framework for Agriculture and Food Security. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- [02] Anctil, F., Rousselle, J. et Lauzon, N., 2005. Hydrologie : Cheminements de l'eau. Presses Internationales Polytechnique, Montréal, Canada, 319 p.
- [03] Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R., 1955. The Water Balance. Publications in Climatology, Vol. 8, No. 1, Laboratory of Climatology, Centerton, New Jersey, USA.
- [04] Beauchamp, J. (2006). Gestion de l'eau dans les sols agricoles. Québec, Canada.
- [05] Duchaufour, P. (2000). Introduction à la science du sol : Sol, végétation, environnement. 6e édition. Paris : Dunod.
- [06] Khechana, S., et al. (2016). Contribution à l'identification de la Réserve Facilement Utilisable (RFU) dans les régions arides : cas de la vallée d'Oued Souf. Recherches scientifiques, pp. 196–199.
- [07] Bouselsal. B (2016), Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued Souf (SE Algérie), Thèse de Doctorat En Sciences- Université Badji Mokhtar, Annaba- 160 p
- [08] Koussa.M, 2017, Apport d'un système d'information géographique pour la gestion des ressources en eau de la région de Djelfa, Thèse de doctorat en Hydraulique, Université Mohamed Khider, Biskra, 90 p
- [04] Islem Hajji, (2020), Vers Une Meilleure Modélisation De L'évapotranspiration (Et) Sous Des Conditions Environnementales Diversifiées, Université Laval, Québec, Canada, 89 p.
- [09] OUDIN .L, (2004) , recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global, Thèse de l'engref, Sc eau, 477p.
- [10] Charles R., 1975, La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. ORSTOM. Paris: pp 27-67.
- [11] Boudjerada. I (2015), Estimation Et Cartographie De L'évapotranspiration Potentielle- Mémoire de Master en Hydraulique, Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique , Arbaoui Abdellah, 59 p.



Annexe 01: Valeurs de Coefficient mensuel (Km)



Annexe 02: Valeurs de coefficient régional (Kr) pour chaque station

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