

Centre Universitaire AbdelhafidBoussouf -Mila
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Hydraulique



N°Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparé en vue de l'obtention du diplôme
de MASTER
Spécialité : Hydraulique Urbaine

Estimation de l'évapotranspiration en utilisant les
méthodes d'intelligence artificielle cas des bassins
versant algériens

Réalisé par :
-Saidi Kaouther

Soutenu devant le jury :

M. Koussa Miloud
M. Berhail Sabri
M. Keblouti Mehdi

Président
Examineur
Promoteur

Année universitaire : 2024/2025

Dédicace

Avec toute ma gratitude, je commence par remercier Dieu, source de force et de sagesse, qui m'a permis d'atteindre cette étape précieuse de mon parcours académique. Que les prières et la paix soient sur le Prophète Mohammed, modèle de savoir, de patience et de persévérance.

Je dédie ce travail, fruit de persévérance, d'efforts et de foi :

À ceux qui m'ont donné la vie, transmis les valeurs de l'effort, de la patience et de la bienveillance,

à **mes parents bien-aimés**, et tout particulièrement **ma chère mère, Souad**, pilier de ma vie, lumière de mon chemin, dont les prières silencieuses m'ont toujours accompagnée.

À **mon père Farouk**, pour sa sagesse et sa présence.

À mon petit frère, **Oussama**, mon plus grand soutien, ma fierté et ma source de motivation.

À **mes sœurs, Abir, Safaa et Nada**, pour leur affection, leurs mots doux et leur présence chaleureuse dans chaque étape de mon parcours.

À **mes amis(es)**, compagnons de route dans cette belle aventure universitaire, pour leur soutien moral, leur écoute et leur encouragement.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Que Dieu les récompense pleinement ici-bas et dans l'au-delà.



Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, source de force, de patience et de persévérance, qui m'a permis de mener à bien ce travail de fin d'études.

Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance et ma sincère gratitude à **Monsieur Keblouti Mehdi**, qui a assuré la direction de ce travail avec un dévouement remarquable. Son accompagnement bienveillant, sa grande disponibilité, ainsi que la qualité de son encadrement ont constitué un appui fondamental tout au long de cette recherche.

Monsieur Keblouti Mehdi a su m'orienter avec rigueur et méthode, tout en me laissant l'espace nécessaire pour développer mon esprit critique et mon autonomie scientifique. Sa patience, sa pédagogie, et sa générosité intellectuelle ont été pour moi une véritable source de motivation. Il a suivi ce travail avec attention et professionnalisme, répondant à chaque interrogation, corrigeant chaque étape, et m'encourageant sans relâche à donner le meilleur de moi-même.

Je lui adresse mes remerciements les plus respectueux pour la confiance qu'il m'a accordée et pour la qualité humaine et scientifique de son encadrement.

Mes remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignant pour la transmission de leur savoir, leur sérieux et leur engagement, qui ont contribué de manière significative à mon parcours académique.

Enfin, je remercie toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, au bon déroulement de ce travail.



Liste des symboles

P : Pressions de l'air (hPa) ou (mbar)

T_a : Température de l'air (K)

ρ_a : Masse volumique de l'air (kg/m^3)

R : Constante des gaz parfaits J/(kg.K)

H_r : l'humidité relative (%)

e_s : pression de vapeur d'eau saturante (hPa)

T : température de l'air (°C)

e_a : pression de vapeur d'eau (hPa) ou (mbar)

R_G : Le rayonnement global ($MJm^{-2}j^{-2}$)

R_d : Le rayonnement Solaire diffuse

R_s : Le rayonnement du sol

E : Evaporation du bac (mm)

(N_j – N_{j-1}) : Différence de niveau deux mesures successives (mm)

Σ Rech : Recharges effectuée (mm)

ΣP : pluviométrie (mm)

U : vitesse du vent (m/s)

R_n : Radiation nette ($MJm^{-2}j^{-2}$)

t_m : Température sous abri de thermomètre mouillé (°C)

G : Flux de chaleur du sol

γ : Constante psychométrique (kPa°C-1)

Z = latitude en [m]

Δ : Pente de la pression de la vapeur saturée à la température moyenne l'air (kPa°C-1)

RH_{max} : humidité relative maximale (%)

RH_{min} : humidité relative minimale (%)

I_g : Radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol ($cal/cm^2/jour$)

I_{gA} : radiation globale théorique ($cal/cm^2/jour$)

H : durée maximale d'insolation (théorique) en heure par mois.

h : durée d'insolation mesurée en heure par mois

R² : coefficient de détermination

v* : Vitesse de frottement (m/s)

k : Constante de Von Karman

SOMMAIRE

Liste des tableaux	8
Liste des figures	9
Résumé	10
Introduction générale	1
Chapitre 01 : Synthèse bibliographique	2
Introduction	3
I.1. Définition de l'évapotranspiration.....	3
I.1.1. Evaporation	3
I.1.2. Transpiration	4
I.1.3. Évapotranspiration.....	4
I.2. Estimation de l'évapotranspiration	5
I.2.1. Évapotranspiration de référence.....	5
I.2.2. L'évapotranspiration maximale (ETM)	5
I.2.3. L'évapotranspiration réelle (ETR)	6
I.3. Mesure des facteurs contrôlant le mécanisme de l'évapotranspiration	6
I.3.2. Le Rayonnement Solaire	7
I.3.3. Température de l'air	8
I.3.4. L'Humidité de l'air.....	9
I.3.5. La pression de l'air	10
I.3.6. Durée d'insolation.....	10
I.4. Les outils de mesures de l'évapotranspiration	11
I.4.1. La case lysimétriques [13]	12
I.4.2. L'évapotranspiromètre.....	13
I.4.3. Eddy corrélation	14
I.4.4. Les bacs à évaporation	14
I.4.5. Bac Colorado	15
I.4.6. L'évaporomètre Piche	16
I.5. Méthode d'estimation de ETP	17
I.5.1. Formule de Thornthwaite (1944)	17
I.5.3. Formule de TURC (1962).....	18
I.6. L'utilisation des Modèles d'IA pour l'estimation de ET_0	19
I.6.1. Introduction aux Modèles d'IA en Hydrologie.....	19
Conclusion.....	22
23	
Chapitre 02 : Description des zones d'étude	23
II.1. Définition du bassin versant	22

II.2. Présentation des zones d'étude	22
II.2.1. Kébir Rhumel	22
II.2.1.1. Situation géographique	23
II.2.1.2. Géologie de bassin versant du Kébir-Rhumel	24
II.2.1.4. Réseau hydrographique	25
II.2.1.5. Couvert végétale	26
II.2.1.6. Topographie	27
II.2.2. Chéiff	28
II.2.2.1. Situation géographique	28
II.2.2.2. Géologie	29
II.2.2.3. Climatologie.....	29
II.2.2.4. Réseau hydrographique	30
II.2.2.5. Couvert végétal.....	31
II.2.2.6. Topographie	32
II.2.3. Soummam.....	33
II.2.3.1. Situation géographique	33
II.2.3.2. Géologie du bassin.....	34
II.2.3.2. Climatologie.....	35
II.2.3.3. Réseau hydrographique	36
II.2.3.4. Couvert végétale	36
II.2.3.5. Topographie	37
Conclusion.....	38

39

Chapitre 03 : Collecte et traitement des données	39
Introduction	38
III.2. Bassin versant de Kébir-Rhumel	39
III.3. Bassin versant du Chéiff	41
III.3.1. Présentation des données.....	41
III.4. Bassin versant du Soummam	43
III.4.1. Présentation des données.....	43
III.5. Standardisation des données	44
III.6. Métadonnées	44
III.7. Séries de référence et séries voisines pour la comparaison	44
III.8. Méthodes d'homogénéisation des données climatiques	45
III.9. Principales causes des inhomogénéités	46
III.10. Vérification de l'homogénéité des données : le test de Wilcoxon	47
III.10.1. Résultats du test de Wilcoxon.....	48

III.11. Test de Grubbs et Beck horsains	50
III.11.1. Résultats des tests de Grubbs et Beck	50
Conclusion.....	51
Chapitre 04 : Résultats et discussion	53
Introduction	52
IV.1. Objectifs de ce chapitre.....	52
.IV.2.1 Interprétation des résultats	58
IV.3. Bassin versant Soummam	59
IV.3.1. Interprétation des résultats	64
IV.4. Bassin versant Kébir Rhumel	65
IV.4.1. Interprétation des résultats	70
Conclusion.....	71
Conclusion générale.....	72
Bibliographie	74

Liste des tableaux

N°	Titre du tableau	Page
Tableau I-1	Classification des méthodes de mesure estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle	12
Tableau I-2	Coefficient de correction f(h)	17
Tableau I-3	Valeur moyennes mensuelles d'Iga en calories par cm2 et par jour	19
Tableau I-4	Durée mensuelle théorique du jour « H » en heures par mois	20
Tableau I-5	Études récentes sur l'estimation de l'ET ₀ par des modèles d'intelligence artificielle	22
Tableau II-1	Superficie des sous bassins du réseau hydrographique du Kèbir-Rhumel	23
Tableau II-2	Caractéristique des barrages de Kebir Rhumel	23
Tableau III-1	Les stations de mesure existant dans le bassin versant Kébir-Rhumel (Coordonnées en Lambert Nord Algérie)	39
Tableau III-2	Analyse statistique des paramètres météorologiques du bassin versant de Kébir Rhumel	41
Tableau III-3	Les stations de mesure existant dans le bassin versant Chélif (Coordonnées en Lambert Nord Algérie)	41
Tableau III-4	Analyse statistique des paramètres météorologiques du bassin versant de Chélif	42
Tableau III-5	Les stations de mesure existant dans le bassin versant Soummam (Coordonnées en Lambert Nord Algérie)	43
Tableau III-6	Analyse statistique des paramètres météorologiques du bassin versant de Soummam	43
Tableau III-7	Résultats du test de Wilcoxon sur les stations de bassin versant du Kébir Rhumel	48
Tableau III-8	Résultats du test de Wilcoxon sur les stations de bassin versant du Chélif	48
Tableau III-9	Résultats du test de Wilcoxon sur les stations de bassin versant du Soummam	49
Tableau III-10	Test de représentativité du cas de Grubbs et Beck du bassin versant de Kébir Rhumel	50
Tableau III-11	Test de représentativité du cas de Grubbs et Beck du bassin versant de Chélif	51
Tableau III-12	Test de représentativité du cas de Grubbs et Beck du bassin versant de Soummam	51
Tableau IV-1	Les données d'entrées pour chaque combinaison	53
Tableau IV-2	Évaluation des performances des modèles d'IA pour l'estimation de l'ET ₀ dans le bassin versant Chélif selon diverses combinaisons de variables climatiques	53
Tableau IV-3	Évaluation des performances des modèles d'IA pour l'estimation de l'ET ₀ dans le bassin versant Soummam selon diverses combinaisons de variables climatiques	59
Tableau IV-4	Évaluation des performances des modèles d'IA pour l'estimation de l'ET ₀ dans le bassin versant Kébir Rhumel selon diverses combinaisons de variables climatiques	65

Liste des figures

N°	Titre de la figure	Page
Figure I-1	Le processus d'évaporation	3
Figure I-2	Le processus de transpiration	4
Figure I-3	Évaporation et transpiration	5
Figure I-4	L'anémomètre	7
Figure I-5	Pyranomètres	8
Figure I-6	Le thermomètre	9
Figure I-7	Hygromètre	10
Figure I-8	L'héliographe	11
Figure I-9	Mesure de l'évapotranspiration réelle par lysimètre	13
Figure I-10	Schéma d'un évapotranspiromètre	13
Figure I-11	Eddy corrélation, à gauche schéma théorique à droite photo de l'appareil	14
Figure I-12	Bac d'évaporation (classe A)	15
Figure I-13	Le Bac Colorado	15
Figure I-14	Évaporomètre Piche	16
Figure II-1	Situation géographique et réseau hydrographique et localisation des stations pluviométriques du bassin versant Kébir–Rhumel	23
Figure II-2	Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien	25
Figure II-3	Carte du couvert végétal du bassin versant Kébir Rhumel	26
Figure II-4	Modèle Numérique de terrain du bassin versant Kébir Rhumel	28
Figure II-5	Situation géographique et réseau hydrographique et localisation des stations pluviométriques du bassin versant Chélif	29
Figure II-6	Carte du couvert végétal du bassin versant Chélif	32
Figure II-7	Modèle Numérique de terrain du bassin versant Chélif	33
Figure II-8	Situation géographique et réseau hydrographique et localisation des stations pluviométriques du bassin versant Soummam	34
Figure II-9	Carte des étages bioclimatiques du bassin versant de la Soummam	36
Figure II-10	Carte du couvert végétal du bassin versant Soummam	37
Figure II-11	Modèle Numérique de terrain du bassin versant Soummam	38
Figure IV-1	Régression IA vs Penman-Monteith – Chélif (modèles 1-4)	56
Figure IV-2	Régression IA vs Penman-Monteith – Chélif (modèles 5-8)	57
Figure IV-3	Régression IA vs Penman-Monteith – Soummam (modèles 1-4)	62
Figure IV-4	Régression IA vs Penman-Monteith – Soummam (modèles 5-8)	63
Figure IV-5	Régression IA vs Penman-Monteith – Kébir Rhumel (modèles 1-4)	68
Figure IV-6	Régression IA vs Penman-Monteith – Kébir Rhumel (modèles 5-8)	69

Résumé

Une estimation précise de l'évapotranspiration de référence (ET₀) est essentielle pour la gestion des ressources en eau, la planification agricole et les études climatiques. Cette étude évalue les performances de plusieurs modèles d'apprentissage automatique et de régression pour estimer l'ET₀ sur trois bassins versants aux climats distincts : Oued Rhumel (subhumide), Soummam (subhumide) et Cheliff (semi-aride). En utilisant des combinaisons de variables météorologiques (par exemple, T_{max}, RH_{mean}, Vitesse du vent, T_{min}) et quatre approches de modélisation (régression multiple, arbres ensachés, SVM, réseaux de neurones), nous évaluons la précision du modèle grâce aux mesures RMSE, MAE, MRE et R². Les résultats révèlent que les réseaux de neurones surpassent systématiquement les autres modèles, atteignant des valeurs R² parfaites (1,000) avec des combinaisons de variables optimales. Bien que les deux bassins versants subhumides affichent des performances de modélisation élevées, le bassin semi-aride du Cheliff présente une plus grande sensibilité à la sélection des variables, les modèles plus simples (par exemple, la régression) présentant des erreurs plus élevées sous des entrées limitées. Le type de climat influence significativement la robustesse du modèle : les conditions subhumides permettent une certaine flexibilité dans le choix des variables, tandis que les systèmes semi-arides exigent un appariement précis des variables et du modèle. Ces résultats soulignent la nécessité de stratégies d'estimation de l'ET₀ spécifiques au climat afin d'améliorer les applications hydrologiques et agricoles dans des environnements contrastés.

Mots-clés : Bassin versant algérien, évapotranspiration de référence (ET₀), modèles d'apprentissage automatique, influence du climat, variables météorologiques.

Abstract

Accurate estimation of reference evapotranspiration (ET₀) is critical for water resource management, agricultural planning, and climate studies. This study evaluates the performance of multiple machine learning and regression models in estimating ET₀ across three watersheds with distinct climate types: Oued Rhumel (sub-humid), Soummam (sub-humid), and Cheliff (semi-arid). Using combinations of meteorological variables (e.g., T_{max}, RH_{mean}, Vitesse du vent, T_{min}) and four modeling approaches (Multiple Regression, Bagged Trees, SVM, Neural Networks), we assess model accuracy through RMSE, MAE, MRE, and R² metrics. Results reveal that Neural Networks consistently outperform other models, achieving near-perfect R² values (1.000) with optimal variable combinations. While both sub-humid watersheds show

high model performance, the semi-arid Cheliff basin exhibits greater sensitivity to variable selection, with simpler models (e.g., Regression) showing higher errors under limited inputs. Climate type significantly influences model robustness, with sub-humid conditions allowing flexibility in variable choice, whereas semi-arid systems demand precise variable-model pairing. These findings underscore the need for climate-specific ET0 estimation strategies to enhance hydrological and agricultural applications in contrasting environments.

Keywords: Algerian watershed, reference Evapotranspiration (ET0), machine learning models, climate influence, meteorological variables.

الملخص

يُعدّ التقدير الدقيق للتبخّر والنتح المرجعي (ET0) أمرًا بالغ الأهمية لإدارة موارد المياه، والتخطيط الزراعي، ودراسات المناخ. تُقيّم هذه الدراسة أداء نماذج متعددة للتعلّم الآلي والانحدار في تقدير ET0 عبر ثلاث مستجمعات مائية ذات أنواع مناخية مُختلفة: وادي الرميل (شبه رطب)، والصومام (شبه رطب)، والشلف (شبه قاحل). باستخدام توليفات من المتغيرات الجوية (مثل Tmax، RHmean، Vitesse du vent، وTmin) وأربعة مناهج نمذجة (الانحدار المتعدد، والأشجار المُجمّعة، وSVM، والشبكات العصبية)، تُقيّم دقة النموذج من خلال مقاييس RMSE، وMAE، وMRE، وR². تُظهر النتائج أن الشبكات العصبية تتفوق باستمرار على النماذج الأخرى، مُحققة قيم R² شبه مثالية (1.000) مع توليفات مُثلى للمتغيرات. بينما يُظهر كلا المستجمعين المائنين شبه الرطبيين أداءً نموذجيًا عاليًا، يُظهر حوض شيليف شبه الجاف حساسيةً أكبر لاختيار المتغيرات، حيث تُظهر النماذج الأبسط (مثل نموذج الانحدار) أخطاءً أعلى في ظل مدخلات محدودة. يؤثر نوع المناخ بشكل كبير على متانة النموذج، حيث تتيح الظروف شبه الرطبة مرونةً في اختيار المتغيرات، بينما تتطلب الأنظمة شبه الجافة دقةً في اقتران المتغيرات بالنماذج. تُؤكد هذه النتائج على الحاجة إلى استراتيجيات تقدير ET0 خاصة بالمناخ لتعزيز التطبيقات الهيدرولوجية والزراعية في بيئات متباينة.

الكلمات المفتاحية: حوض الجزائر، التبخّر والنتح المرجعي (ET0)، نماذج التعلّم الآلي، تأثير المناخ، المتغيرات الجوية

Introduction générale

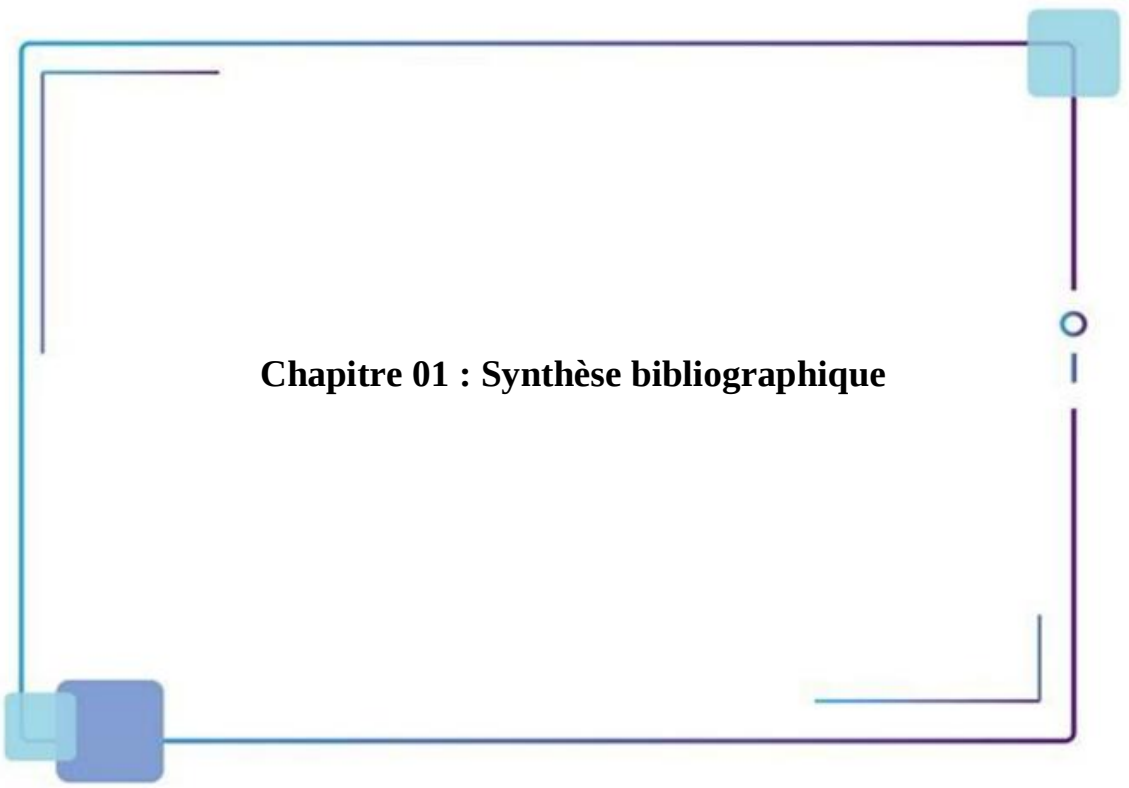
Les phénomènes hydrologiques, tels que l'évapotranspiration, jouent un rôle essentiel dans le cycle de l'eau et influencent directement la gestion durable des ressources en eau, notamment dans les régions soumises à un stress hydrique comme l'Algérie. L'évapotranspiration, qui englobe à la fois l'évaporation de l'eau à partir des surfaces et la transpiration des plantes, constitue une variable clé dans le bilan hydrique des bassins versants.

Cependant, l'estimation précise de cette variable demeure un défi en raison de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques, tels que la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. De plus, l'insuffisance ou la mauvaise qualité des données météorologiques observées complique davantage les méthodes d'estimation traditionnelles, souvent empiriques ou physiques. Avec l'émergence de l'intelligence artificielle (IA) et des techniques d'apprentissage automatique, de nouvelles perspectives s'ouvrent pour modéliser des phénomènes complexes comme l'évapotranspiration. Ces approches offrent la capacité d'apprendre à partir de grands ensembles de données et permettent une estimation plus précise, même en présence de relations non linéaires entre les variables climatiques.

Ce travail de recherche s'inscrit dans cette perspective. Il vise à estimer l'évapotranspiration dans trois bassins versants algériens — Kébir-Rhumel, Chéliff et Soummam — en utilisant des méthodes d'intelligence artificielle, à partir de données climatiques fiables. L'étude commence par une revue bibliographique des concepts liés à l'évapotranspiration et aux approches d'IA utilisées dans ce domaine. Ensuite, une présentation détaillée des zones d'étude est réalisée, suivie par la collecte, l'analyse critique et le nettoyage des données climatiques. Enfin, les résultats obtenus par les modèles d'IA sont discutés et comparés à des méthodes classiques.

L'organisation de ce mémoire est la suivante :

- Chapitre I : Synthèse bibliographique
- Chapitre II : Présentation de la zone d'étude
- Chapitre III : Collecte et critique des données
- Chapitre IV : Résultats et discussion



Chapitre 01 : Synthèse bibliographique

Introduction

L'évapotranspiration, qui représente les phénomènes d'évaporation et de transpiration, constitue l'une des premières étapes du cycle de l'eau. Même si ces phénomènes ont une faible intensité durant un épisode de ruissellement, leur influence s'accroît pendant les intervalles entre deux épisodes, où ils constituent la principale source d'extraction d'eau.

Dans les zones tempérées, l'évapotranspiration peut représenter près de deux tiers des précipitations annuelles. Le reste s'écoule vers les cours d'eau et les nappes phréatiques pour finalement rejoindre les mers et les océans. Par contre, dans les régions sèches, ce chiffre peut excéder 90% de la pluie annuelle, restreignant grandement l'eau disponible pour le ruissellement.

Ainsi, l'évaporation et la transpiration jouent un rôle essentiel dans la redistribution de l'eau, limitant l'accumulation dans les réservoirs naturels et ayant un impact important sur la gestion des ressources en eau.

I.1. Définition de l'évapotranspiration

I.1.1. Evaporation

L'évaporation est le processus par lequel un élément passe de l'état liquide à l'état gazeux. Dans le contexte du cycle de l'eau, ce processus suppose le processus complémentaire de condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère et de son retour sur terre sous forme de précipitations [1].

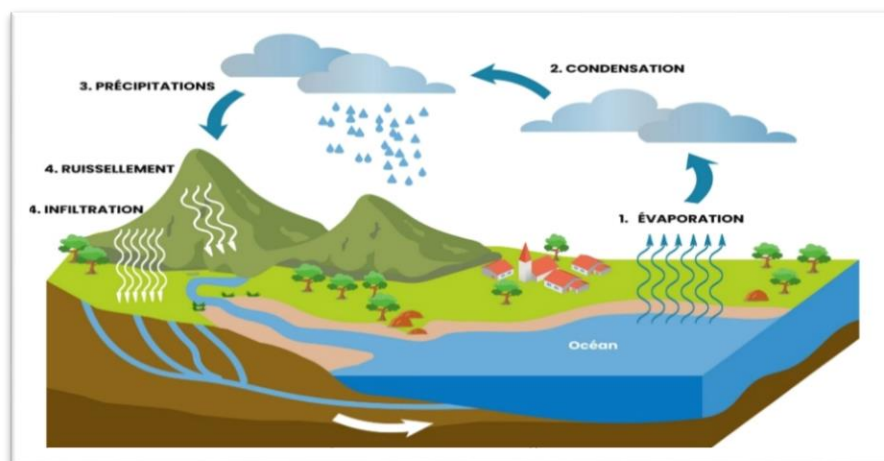


Figure I-1: Le processus d'évaporation (source : SYDEC40, "Le grand cycle naturel de l'eau")

I.1.2. Transpiration

La transpiration est le mécanisme physiologique naturel permettant l'extraction de l'eau contenue dans le sol par les racines des plantes, son passage à travers leur organisme et son évaporation via les stomates de leurs feuilles. La quantité d'eau qu'une plante stocke ne représente pas même un pour cent de celle qu'elle libère pendant sa phase de croissance. Ainsi, d'un point de vue hydrologique, les plantes fonctionnent comme des pompes qui extraient l'eau du sol pour la transférer dans l'atmosphère. Il est ardu d'effectuer des calculs exacts de la quantité d'eau évaporée en raison des multiples facteurs qui influencent le processus. Les estimations disponibles doivent être utilisées avec prudence, en tenant compte des conditions dans lesquelles elles ont été obtenues. Il faut disposer de relations appropriées entre les facteurs climatiques et la transpiration si on veut faire un usage général de données obtenues dans une région climatique particulière [2].

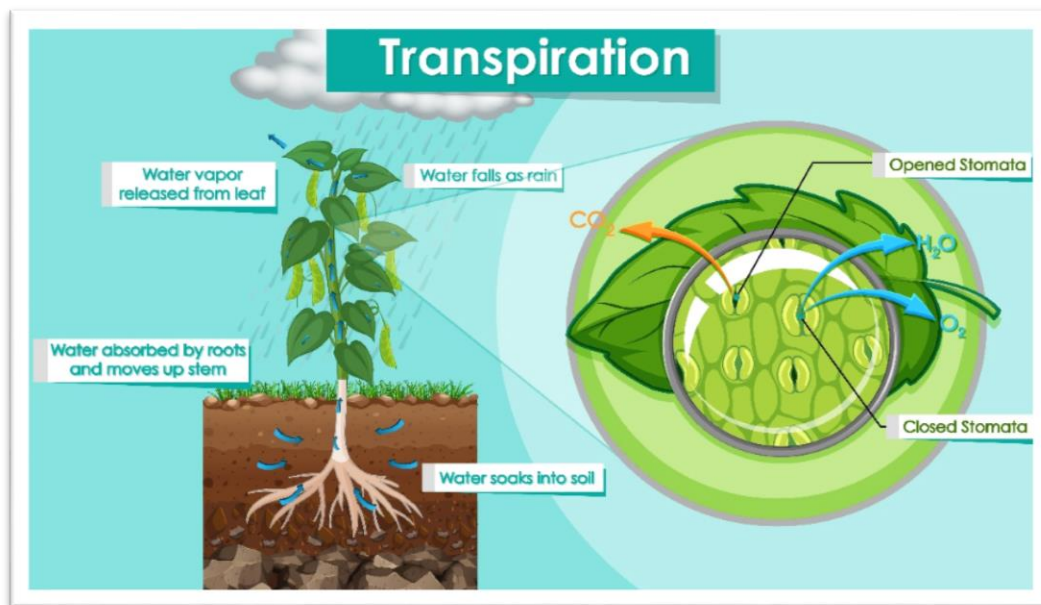


Figure I-2: Le processus de transpiration (source : Freepik, Diagram showing transpiration plant)

I.1.3. Évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) correspond à la perte d'eau depuis la surface du sol et des feuilles par évaporation, ainsi que par la transpiration des végétaux. Elle constitue l'un des principaux composants du cycle hydrologique et se traduit par une perte d'eau au niveau du bassin versant. Les données relatives à l'évapotranspiration (ET) sont essentielles pour la compréhension et la gestion des systèmes de ressources en eau [3].

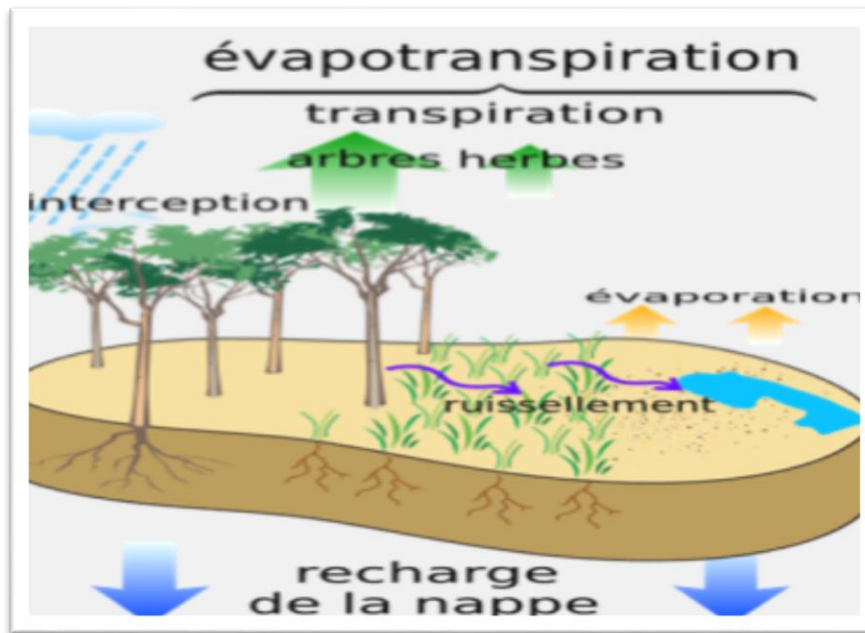


Figure I-3: Évaporation et transpiration (source : Buttar et al. 2018)

I.2. Estimation de l'évapotranspiration

I.2.1. 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, généralement pour les besoins de l'agriculture [4].

I.2.2. L'évapotranspiration maximale (ETM)

Quand la plante produit le maximum de matière sèche donnant un rendement maximum. Aussi l'évapotranspiration maximale est mesurée expérimentalement par les cases lysmétriques et comparée à l'ETP [5].

La formule de calcul de l'ETM est la suivante :

$$ETM = K_c \times ETP \quad (I.1)$$

- K_c : coefficient cultural ;
- ETP : évapotranspiration potentielle.

I.2.3. L'évapotranspiration réelle (ETR)

Qui est la dose à appliquer dans le temps et dans l'espace au niveau du développement de la plante, n'est autre que le produit partir du bilan hydrique (Gains – Pertes) de l'ETP par le coefficient cultural (K_c) défini à acquis par l'outil case lysimétrique [6].

I.3. Mesure des facteurs contrôlant le mécanisme de l'évapotranspiration

Les paramètres intégrant pour le calcul de l'évapotranspiration sont essentiellement d'ordre énergétique et aérodynamique. L'évapotranspiration dépend de la demande climatique et finalement, elle est dépendante de ces deux paramètres.

I.3.1. Le vent

L'évaluation du vent se fait dans les stations météorologiques à l'aide d'anémomètres qui mesurent les vitesses instantanées, accompagnés d'une girouette pour indiquer la direction du vent. En ce qui concerne l'hydrologie, sauf exceptions spécifiques, on peut simplement utiliser des anémomètres totalisateurs.

Dans un scénario basique impliquant un espace dégagé et un relief distinct, le profil vertical de la vitesse du vent est représenté par l'expression logarithmique suivante [6] :

$$V(h) = \frac{v^*}{k} \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \quad (I.2)$$

Avec :

- v^* : Vitesse de frottement (indépendante de la hauteur h) ;
- k : Constante de Von Karman ($k \approx 0.4$) ;
- z_0 : épaisseur de la rugosité de surface.

Les anémomètres mesurent la vitesse du vent, ils sont classés en quatre catégories [7] :

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



Figure I-4: L'anémomètre (Source : Futura-Sciences, « Anémomètre »)

I.3.2. Le Rayonnement Solaire

Ce paramètre est un facteur énergétique important dans la mesure où il a provoqué l'évapotranspiration. En fait, il représente la source d'énergie nécessaire pour mettre en œuvre cette dernière sur une surface évaporant. Le bilan énergétique au niveau de n'importe quelle surface évaporant est déterminé par :

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

Le bilan entre l'énergie reçue et l'énergie perdue représente l'énergie utilisée pour la mise en forme de l'évaporation, et la fonction transpiratoire de la plante. L'énergie à la surface du sol se fait par le rayonnement solaire. La mesure du rayonnement nous fournit des renseignements sur la source de ce rayonnement [7].

A la surface de sol on trouve [8] :

- Le rayonnement global R_G ;
- Le rayonnement Solaire direct I ;
- Le rayonnement Solaire diffuse R_d ;
- Le rayonnement du sol R_s ;
- Le rayonnement atmosphérique R_a .



Figure I-5: Pyranomètres (Source : SCIRP, « Evaluation of the Global Horizontal Irradiation (GHI) on the Ground from the Images of the Second Generation European Meteorological Satellites MSG », 2023)

I.3.3. Température de l'air

Le thermomètre, qui est un dispositif de mesure de la température, fonctionne en observant la dilatation d'un liquide ou d'un solide doté d'un fort coefficient de dilatation, ce qui permet d'en déduire la température. Les types de thermomètres les plus utilisés sont ceux au mercure, à l'alcool et au toluène.

Rappelons une fois de plus le thermomètre à maxima, qui par le biais de la capillarité, est en mesure d'enregistrer la valeur maximale de la journée. L'évaluation de la température atmosphérique nécessite certaines précautions en raison des influences perturbatrices, surtout celles liées au rayonnement. Il est donc indispensable de préserver le thermomètre en le plaçant sous un abri météorologique [9].



Figure I-6: Le thermomètre (Source : Observatori de l'Ebre, « Instrumentos y metodología »)

I.3.4. L'Humidité de l'air

L'humidité de l'air est un paramètre climatique très important par rapport aux autres paramètres, ceci s'explique par le fait, qu'il est impératif à avoir un équilibre de vapeur d'eau entre la surface évaporant, et celle de l'air qui l'entoure [10]. L'instrument de mesure de ce paramètre est appelé L'hygromètre. L'humidité relative de l'air s'exprime la relation suivante [11]:

$$H_r(\%) = 100 \times \frac{e_a}{e_s} \quad (\text{I.3})$$

- e_s : pression de vapeur d'eau saturante (kPa) ;

$$e_s = 0,6018 * \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) ; \quad (\text{I.4})$$

- T : température de l'air en° C ;
- e_a : pression de vapeur d'eau actuelle (kPa).

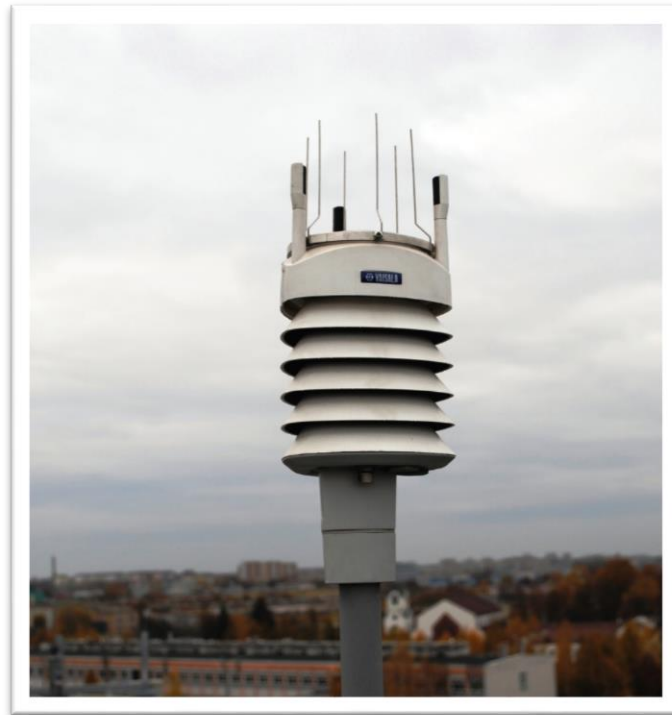


Figure I-7: Hygromètre (Source : Laboratoire d'énergie solaire et thermique de l'environnement, Université de Technologie de Silésie)

I.3.5. La pression de l'air

On utilise divers instruments pour mesurer la pression atmosphérique, parmi lesquels le baromètre à liquide se distingue ; le mercure est fréquemment employé en raison de sa densité 13.6 fois plus élevée que celle de l'eau. Il arrive parfois d'utiliser un baromètre mécanique ou anéroïde, placé à l'abri des intempéries. Il peut être connecté à un dispositif d'enregistrement (stylo), fournissant ainsi un barographe qui évalue la pression en fonction du temps [9] :

La pression atmosphérique diminue avec l'altitude. La température, la pression et la masse volumique de l'air sont liées par la loi des gaz parfaits établie par la relation suivante, [6]:

$$p = R \times T_a \times \rho_a \quad (I.5)$$

- T_a : Température de l'air en Kelvin (K) ;
- ρ_a : Masse volumique de l'air kg/m^3 ;
- R : Constante des gaz parfaits en $\text{J}/(\text{kg.K})$;

I.3.6. Durée d'insolation

L'héliographe est l'instrument utilisé pour mesurer la durée d'exposition au soleil. Son fonctionnement repose sur la concentration des rayons solaires, réalisée grâce à la sphère centrale en verre, sur le diagramme tout en évitant de le mettre en feu. Il doit aussi être insensible à l'humidité.

Une règle transparente permet ensuite d'apprécier la longueur de la trace de brûlure avec une résolution permettant de mesurer la durée d'insolation [12].



FigureI-8 : L'héliographe (Source : Meteorologia en Red)

I.4. Les outils de mesures de l'évapotranspiration

De nombreuses recherches concernant l'application des formules des ETP ont été menées par divers climatologues et agroclimatologues. Diverses méthodes d'évaluation et de calcul ont été appliquées aux sols non cultivés ou cultivés. Dans le domaine de l'hydrologie, l'évaluation est principalement affectée par de vastes surfaces. Des bacs évaporomètres ont été installés pour quantifier directement les pertes d'eau dues à l'évaporation.

Ces instruments sont employés comme s'ils étaient considérés comme placés dans les petites surfaces, avec une assimilation de petites surfaces d'eau dont certaines sont des instruments de formes carrées, par contre d'autre sont circulaires. Les uns sont surélevé par rapport au sol, les autres sont entourés ou immergés. Pour un sol cultivé, l'estimation des besoins en eau des cultures est obtenue généralement par la méthode lysimétrique à l'aide d'un évapotranspiromètre.

Par ailleurs, (**Tableau I-1**) élaboré par Rana et Katerji (2000), résume les méthodes de mesure et de l'estimation de l'évapotranspiration. En effet, la plupart des méthodes directes ou indirectes des mesures de l'évapotranspiration s'appuient sur la détermination de deux classes de facteurs :

- La teneur en eau du sol et les caractéristiques physiques des surfaces à partir desquelles se produit l'évapotranspiration (hauteur, densité des plantes, rugosité du couvert végétal).
- Les variables climatiques telles que le rayonnement solaire, la vitesse du vent, les caractéristiques thermodynamiques de l'atmosphère, au-dessus de la végétation, [13].

Tableau I-1: Classification des méthodes de mesure estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle (Source : Rana et Katerji, 2000)

	Approches	Méthodes
Mesure de l'évaporation	Approche hydrologique	Bilan hydrique
		Lysimètre
	Approche micro-météorologique	Bilan d'énergie et rapport de Bowen
		Méthode aérodynamique
		Eddy covariance
	Approche physiologique-végétale	Méthode du flux de Sève
		Système des chambres
Estimation de l'évapotranspiration	Approche analytique	Méthode de Penman-monteith
	Approche empirique	Méthode de coefficient cultural (Kc)
		Méthode du bilan hydrique
	Approche de la télédétection	Bilan d'énergie
		Activité physiologique des plantes

I.4.1. La case lysimétriques [13]

C'est pour la mesure de l'ETR. Le principe est d'isoler un bloc du sol de quelques mètres-carrés de surface sur environ 2 m d'épaisseur. Cet échantillon de terrain est drainé à sa base et on enregistre les débits **D** sortant par les drains. En surface, un collecteur fait le tour de la parcelle et récupère les eaux de ruissellement dont le débit **Q** est également enregistré. Les apports d'eau par la pluie **P** sont mesurés avec un pluviomètre. Enfin, l'évaluation du stock d'eau **R** contenu dans la case se fait, soit par une mesure à la sonde à neutron des teneurs en eau

dans le sol, soit en montant la case sur un système de bascule. Un bilan très simple permet d'évaluer l'ETR sur un intervalle de temps Δt puisque l'on doit avoir la relation suivante :

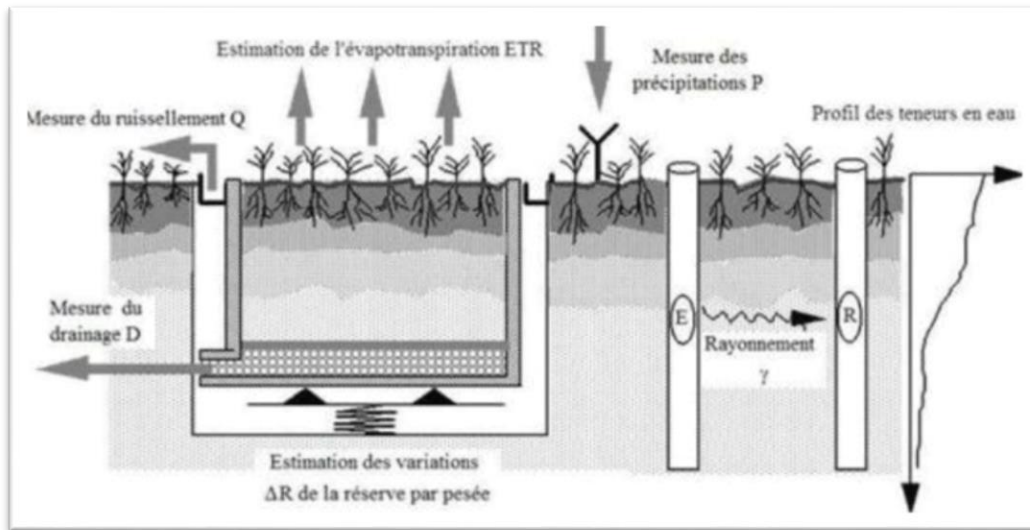


Figure I-8: Mesure de l'évapotranspiration réelle par lysimètre (source : Rana et Katerji, 2000)

$$\text{Entrée} = [Q + D + ETR] + \Delta R \quad (\text{I.6})$$

Entrée = [sortie] + variation de réserve

I.4.2. L'évapotranspiromètre

Cet instrument permet de mesurer l'ETP. Il suffit alors de maintenir un niveau d'eau dans les drains pour que l'eau disponible ne soit plus un facteur limitant de l'ETR. On mesure ETP en écrivant le même bilan que précédemment mais le terme **D** pouvant être positif ou nul.

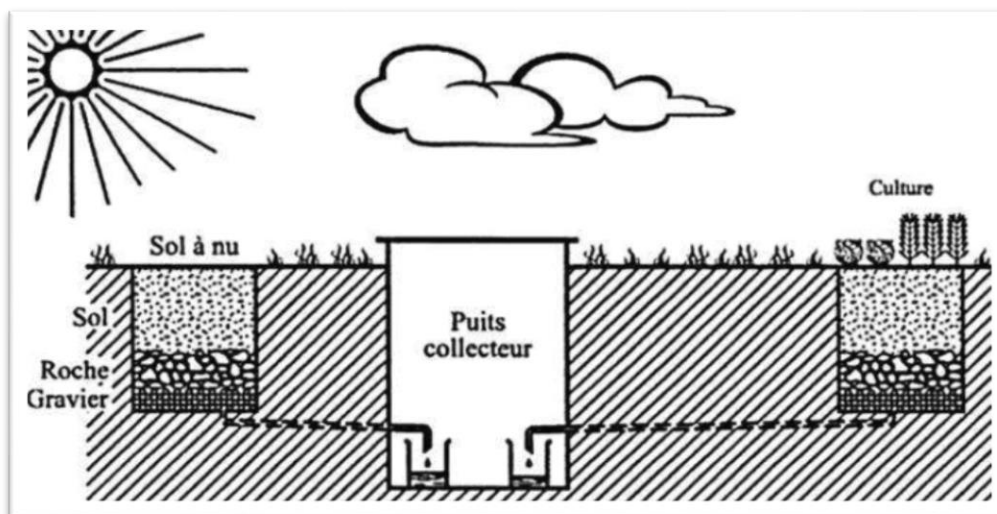


Figure I-9: Schéma d'un évapotranspiromètre (source : Capus, 1984)

I.4.3. Eddy corrélation

C'est une méthode statistique qui utilise les mesures à haute fréquence des températures et la vitesse du vent pour décrire la turbulence et depuis là, les flux de chaleur sensible (**Figure I-11**). L'avantage de cette méthode qu'elle permet une mesure directe des flux verticaux de la chaleur latente et sensible. En revanche aucune hypothèse n'est faite concernant les caractéristiques de la surface du sol, telles que la rugosité aérodynamique et aucune correction de stabilité atmosphérique n'est nécessaire. La méthode Eddy corrélation est avantageuse dans les zones à végétations hétérogènes et clairsemées, en particulier, dans les régions semi- arides, caractérisées par des conditions climatiques très variables.

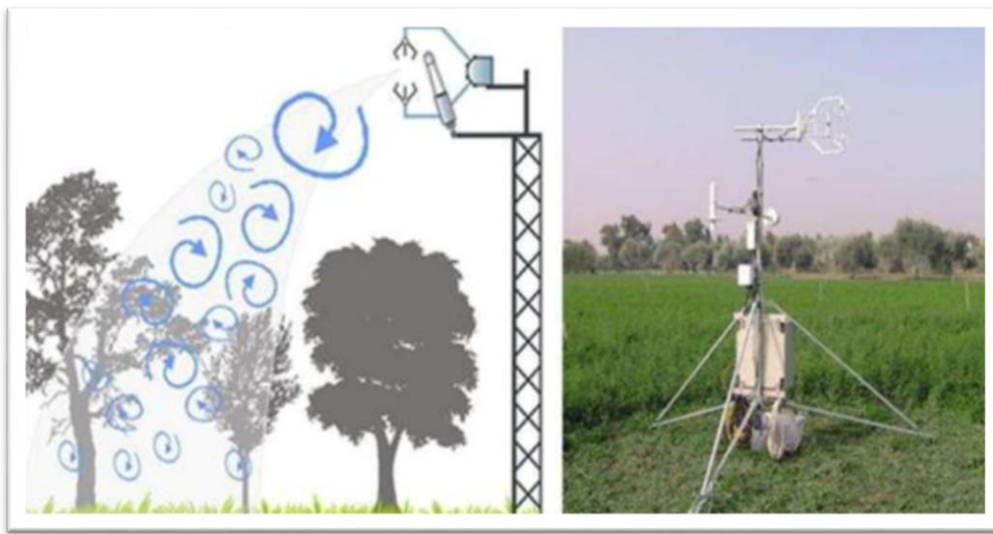


Figure I-10: Eddy corrélation, à gauche schéma théorique à droite photo de l'appareil (source : Projet SUDMED,2007)

I.4.4. Les bacs à évaporation

On peut aussi mesurer l'évapotranspiration de référence par le bac évaporant (**Figure I-12**). Ainsi, l' ET_0 est reliée à l'évaporation bac (EB) au-dessus des surfaces d'eau libres (lacs, barrages, réservoirs) par un coefficient **KP** appelé coefficient du bac selon la formule suivante [13] :

$$ET_0 = EB * KP \quad (I.7)$$

Avec :

- EB : évaporation moyenne journalière du bac pour la période considérée en mm/jour ;
- KP : coefficient du bac varie de 0,5 à 1,1.

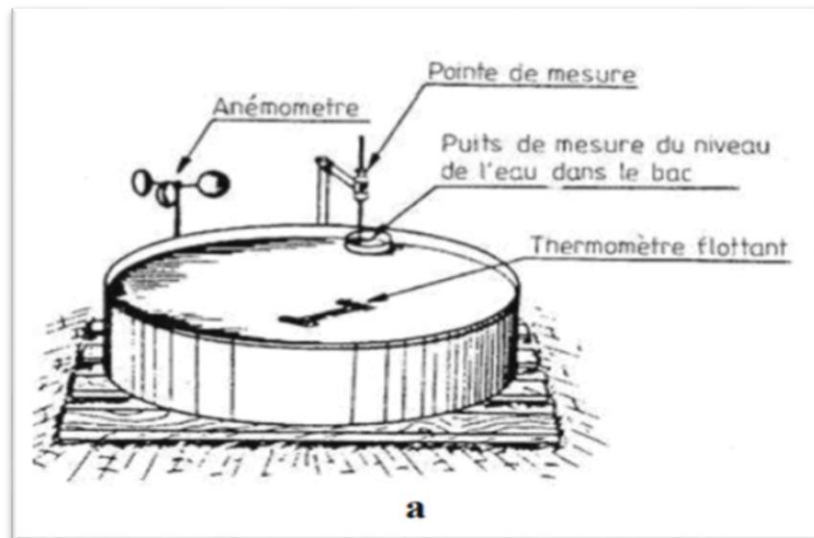


Figure I-11: Bac d'évaporation (classe A) (source : Capus,1984)

I.4.5. Bac Colorado

Le bac Colorado est de caractéristiques différentes par rapport au bac de classe A. Ses dimensions sont nettement inférieures à celle du bac classe (A). Il est de forme carrée de 91.4 cm de cotés et 45.7 cm de profondeur. Pour question de sécurité des venues extérieures, l'eau est maintenue au niveau du sol à 10.2 cm du rebord.

Grace à cette dernière mesure, cet instrument, les gouttes de pluie ayant rebondi du sol et les débris entrainés par le vent ne peuvent en aucun cas accéder au bac. Les erreurs du point de vue données ne sont pas trop excessives, il est sans dire qu'il est moins sensible à la température et au rayonnement solaire [14].

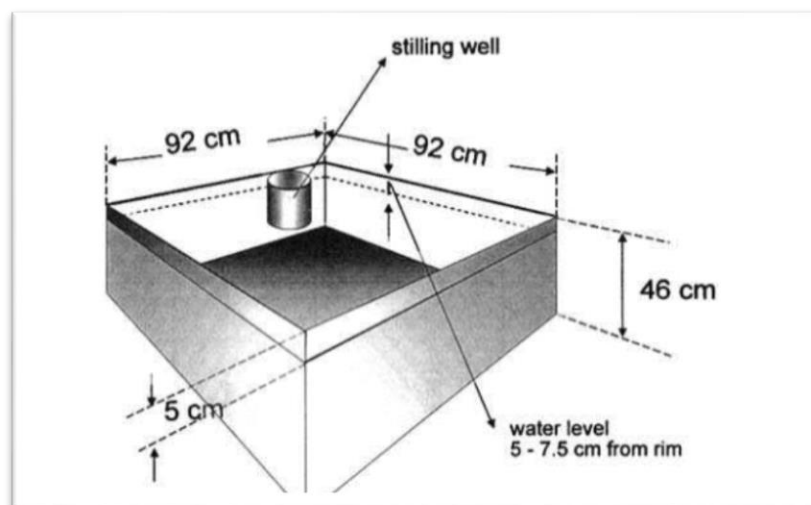


Figure I-12: Le Bac Colorado (Source : Université de Chlef, Equipements hydrauliques, Cours M2 Eau & Agroequipements)

I.4.6. L'évaporomètre Piche

L'atmomètre piche, bien qu'il ne réponde qu'imparfaitement aux qualités exigibles d'un appareil de mesure il est utilisé très fréquemment par les agronomes, son emploi se justifie par la simplicité et le faible cout de l'appareil. La surface évaporant est constituée par un film de papier buvard blanc fixé à l'extrémité du tube en verre en forme de U. ce tube sert à la fois à l'alimentation et à la mesure de l'évaporation. La feuille de buvarde est changée chaque jour après lecture de l'appareil. Le piche est disposé à intérieur de l'abri métrologique. La mesure de la quantité évaporée (EP), dépend beaucoup des conditions climatiques, et elle peut être exprimée par la formule suivante [14] :

$$EP = 0.59(t - t_m)u \quad (I.8)$$

Avec :

- EP : évaporation piche en mm ;
- T : Température de l'aire en ° C ;
- t_m : température sous abri du thermomètre mouillé ° C ;
- U : Vitesse du vent à 2 m du sol en m/s.

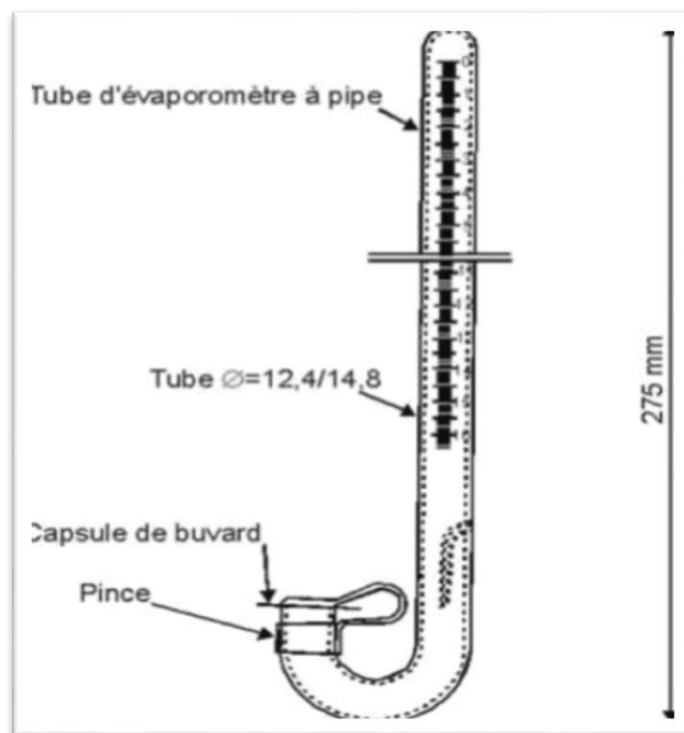


Figure I-13: évaporomètre Piche (Source : Capus,1984)

I.5. Méthode d'estimation de ETP

I.5.1. Formule de Thornthwaite (1944)

La formule de Thornthwaite a été la première équation publiée permettant d'estimer l'évapotranspiration, et elle a été développée à partir des mesures sur des cases lysométriques à l'est des USA, et elle est exprimée par la formule suivante :

$$ETP = 16. \left(\frac{10t}{I}\right)^a \cdot f(h) \quad (I.9)$$

Tableau I-2: coefficient de correction $f(h)$.

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
$f(h)$	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.05	1.03	0.97	0.88	0.86

- ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm) [15] ;
- I : indice thermique annule, c'est la somme de douze indices mensuels, [16] ;
- $I = \sum_{1}^{12} i ; i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} ;$ (I.10)
- t : température moyenne mensuelle °C ;
- $f(h)$: terme correctif qui tiens compte de la latitude de lieu, (Tableau I-2) [17] ;
- a : fonction complexe de l'indice I, [18].

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5 \quad (I.11)$$

I.5.2. Formule de Penman-Monteith-FAO (1998)

Vu la complexité de la mise en œuvre des dispositifs de mesure de ETP, il est presque toujours préférable de recourir à des méthodes d'estimation, on dispose actuellement des formules et des méthodes suffisamment variées, et adaptées à différents climats. La formule Penman-Monteith (F.A.O) est l'une des formules les plus utilisées dans le monde. Elle est exprimée par :

$$ET0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e_b)}{\Delta + \lambda(1 + 0.34u_2)} \quad (I.12)$$

Avec :

- ET0 : évapotranspiration de référence, [19].
- T : température moyenne journalière à la hauteur 2m°C. Elle est calculée en utilisant la formule suivante :

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

- Tmax : température journalière maximale (°C) ;
- Tmin : température journalière minimale (°C) ;
- u2 : vitesse du vent à 2m de hauteur [m/s] ;
- es : pression de vapeur saturante de l'air [kPa] ;
- ea : pression de vapeur réelle [kPa] ;
- G : flux de chaleur du sol [MJ/m²/jour] ;
- G=0.1Rn durant la journée (rad>0) ;
- γ : Constante psychrométrique, soit : $\gamma = 0.066 \text{ kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$;

$$\gamma = 0.665 \times 10^3 P$$

- Rn : Radiation nette (MJm-2 j -1) ;
- P : Pression (kPa) ;

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \quad (\text{I.13})$$

- Z= l'altitude en [m] ;

Δ : Pente de la pression de la vapeur saturée à la température moyenne l'air (KPa. °C-1).

$$\Delta = 4098 \left[\frac{0.6108 \exp\left(\frac{17.27t}{t+237.3}\right)}{(t+237.3)^2} \right] \quad (\text{I.14})$$

- T : Température moyenne de l'air C° ;
- U2 : La vitesse de vent (ms-1) ;
- Ea : pression de vapeur d'eau saturante (kPa).

$$e_a = \frac{1}{2} [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] \quad (\text{I.15})$$

- Eb : Pression actuelle de vapeur d'eau (kPa).

$$e_b = \frac{1}{2} [e_s(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e_s(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}] \quad (\text{I.16})$$

- RHmax: humidité relative maximale (%) ;
- RHmin: humidité relative minimale (%) .

I.5.3. Formule de TURC (1962)

Cette méthode fait intervenir la température moyenne mensuelle, la radiation globale du mois considéré et l'insolation relative, dans ce cas l'ETP est exprimé en mm/mois selon les cas suivants :

Si $H_r > 50\%$ on a :

$$ETP = 0.4 \frac{t}{t+15} (Ig + 50) \cdot \left(1 + \frac{50-H_r}{70}\right) \quad (I.17)$$

Si $H_r < 50\%$ on a :

$$ETP = 0.4 \frac{t}{t+15} (Ig + 50) \cdot \left(1 + \frac{50-H_r}{70}\right) \quad (I.18)$$

- ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/mois), [18] ;
- H_r : Humidité relative moyenne (%) ;
- T : Température moyenne de l'air °C ;
- Ig: Radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (cal/cm² /jour), [18]

$$Ig = IgA \left(0.8 + 0.62 \frac{h}{H}\right) \quad (I.19)$$

- IgA : radiation globale théorique en (cal/cm² /jour) (Tableau I-3) ;
- H : durée maximale d'insolation (théorique) en heure par mois (Tableau I-4) ;
- h : durée d'insolation mesurée pendant le mois considéré en heure par mois.

Tableau I-3: Valeurs moyennes mensuelles d'Iga en calories par cm² et par jour [20]

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
IgA	456.8	567.8	731.6	863.8	947.8	977.4	956.8	880.2	761	614.8	479.4	415.8

Tableau I-4: Durée mensuelle théorique du jour « H » en heures par mois, [20]

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
H	316.8	309.4	309.4	390.6	432.2	431	438	415.4	371.8	352.4	312.8	308

L'utilisateur de ces modèles nécessite la connaissance de certaines données climatiques telles que, la température moyenne mensuelle de l'air, l'humidité relative moyenne mensuelle, la vitesse du vent, les radiations solaires globales et les durées d'ensoleillement.

I.6. L'utilisation des Modèles d'IA pour l'estimation de ET_0

I.6.1. Introduction aux Modèles d'IA en Hydrologie

L'évapotranspiration de référence (ET_0) est un élément hydrologique essentiel pour la gestion durable et efficace des ressources en eau agricole et pour une planification optimale de l'irrigation. Bien que des méthodes directes existent pour estimer l' ET_0 , telles que les mesures

par lysimètres ou les méthodes de transfert de vapeur d'eau, elles sont souvent coûteuses, chronophages et présentent des limitations spatiales et temporelles. En conséquence, des modèles mathématiques basés sur des données météorologiques fournies par des stations météorologiques sont couramment utilisés pour estimer l'ET_o. Parmi ces modèles, l'équation FAO-56 Penman-Monteith est recommandée comme modèle de référence en raison de son incorporation des aspects aérodynamiques et thermodynamiques, offrant des résultats plus précis par rapport à d'autres méthodes empiriques. Cependant, cette équation nécessite de nombreuses variables géologiques et météorologiques, ce qui peut limiter son application dans les régions où les données sont insuffisantes. Pour surmonter ces défis, des modèles d'apprentissage automatique, tels que les réseaux de neurones artificiels (ANN) et les réseaux de neurones profonds (DNN), ont été proposés pour estimer l'ET_o de manière précise en exploitant les relations complexes entre les variables climatiques, même lorsque certaines données sont manquantes. Ces approches offrent une alternative prometteuse aux méthodes traditionnelles, en particulier dans les régions où les données météorologiques sont limitées, [21].

Parmi les avantages de l'IA dans l'évaluation des ET_o

- Faciliter la compréhension des relations non linéaires entre les variables climatiques ;
- S'adapter aux différentes zones et climats sans ajustements continus ;
- Donner une meilleure précision que les modèles conventionnels.

Pour comprendre les développements les plus récents en matière d'estimation de l'évaporation et de la transposition de référence à l'aide de modèles IA, le tableau suivant (**Tableau I-5**), présente diverses recherches scientifiques qui mettent en évidence les auteurs, les normes climatiques utilisées comme variables d'entrée, le modèle IA utilisé et les résultats obtenus.

Tableau I-5: Études récentes sur l'estimation de l'ET_o par des modèles d'intelligence artificielle

Auteur (s)	Site d'étude	Paramètres d'entrée	Modèles d'IA utilisés	Résultats
Hatice Citakoglu, Murat Cobaner, Tefaruk Haktanir, Ozgur Kisi	Turquie	Température de l'air, humidité relative, vitesse du vent,	Réseaux de neurones artificiels (ANN), Système adaptatif	L'ANFIS et ANN donnent de meilleures estimations que les méthodes classiques avec une erreur quadratique moyen plus faible

		rayonnement solaire	neuro-flou (ANFIS)	
Ali Hassan Al Aboodi	Bassorah, Irak	Température de l'air, humidité relative, vitesse du vent	Gene Expression Programming (GEP)	GEP a donné de bons résultats, surtout avec trois variables climatiques en entrée
Allan T. Tejada Jr., Victor B. Ella, Rubenito M. Lampayan, Consorcia E. Reaño	Région IV-A, Philippines (7 stations météorologiques)	Tmax, Tmin, Tdew (température du point de rosée), RH (humidité relative), Uz (vitesse du vent), Rs (rayonnement solaire)	-Support Vector Machine (SVM) -Extreme Learning Machine (ELM)	-SVM et ELM donnent de meilleurs résultats que les modèles empiriques pour estimer ETo quotidiennement -Les meilleures performances sont obtenues avec les combinaisons incluant au moins Tmax, Tmin, et Rs. -SVM est plus rapide que ELM mais similaire en précision.
Bahram Bakhtiari, Alireza Mohebbi-Dehaghani, Kourosh Qader	Sud de la mer Caspienne, Iran	Température moyenne, humidité relative, radiation solaire, vitesse du vent	ANN, ANFIS, SVM, M5 Tree	ANFIS a obtenu la meilleure précision, ANN et SVM ont eu les pires performances avec une seule variable d'entrée
Halil Karahan, Mahmut Çetin, Müge Erkan Can, Omar Alsenjar	Turquie	NDVI, Température de surface, données climatiques limitées	Artificial Neural Networks (ANN)	ANN a montré une bonne capacité d'estimation de l'évapotranspiration journalière avec des données climatiques limitées

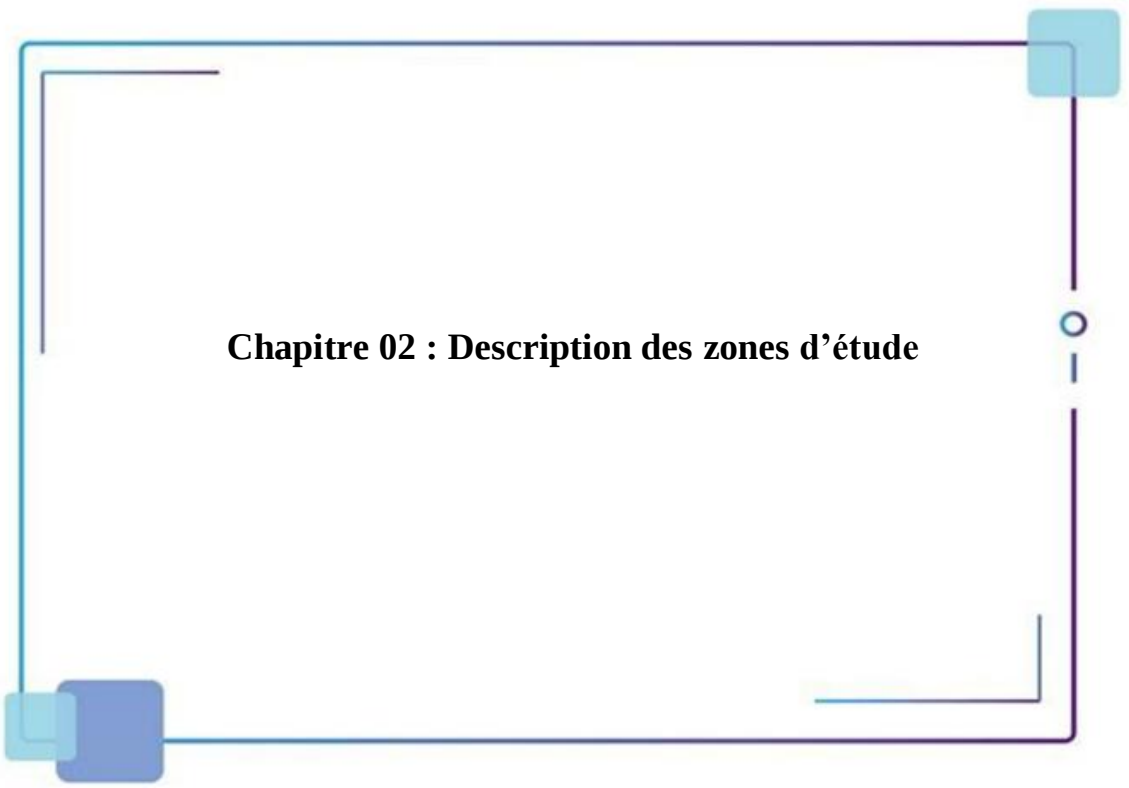
Juan Camilo Triana-Madrid, Camilo Ocampo-Marulanda, Yesid Carvajal-Escobar, et al.	Sud-ouest de la Colombie	Tmax, Tmin, Tmean, humidité (RH), heures d'ensoleillement (SBH), altitude	- Multiple Linear Regression (MLR) - Artificial Neural Networks (ANN) - ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)	-ARIMA-M3 a fourni la meilleure performance locale (RMSE = 4.13 mm/mois, NSE = 0.96, R = 0.98) mais non généralisable. - ANN-M1 est plus flexible et généralisable après entraînement. - Ces modèles permettent une estimation fiable d'ETo avec peu de données climatiques, utile dans les zones isolées.
---	--------------------------	---	--	--

Conclusion

À travers ce premier chapitre, nous avons construit un socle théorique solide autour de l'évapotranspiration, un processus aussi subtil qu'essentiel dans le cycle de l'eau. En distinguant ses composantes (évaporation, transpiration, ETo, ETM et ETR), nous avons pu mieux appréhender la complexité de ce phénomène naturel, qui dépend de multiples facteurs climatiques, tels que le vent, la température, le rayonnement solaire ou encore l'humidité de l'air.

Nous avons exploré diverses méthodes permettant d'évaluer cette variable cruciale, des techniques de terrain comme les lysimètres ou les bacs d'évaporation, jusqu'aux formules empiriques classiques, chacune apportant un éclairage spécifique, mais aussi soulevant certaines limites, notamment lorsqu'on se heurte à un manque de données fiables ou à des conditions environnementales contraignantes.

C'est justement face à ces limites que les modèles d'intelligence artificielle apparaissent comme une alternative à la fois innovante et pertinente. Leur capacité à capturer les relations complexes entre les variables climatiques, même dans des contextes incertains, ouvre la voie à une estimation plus souple et potentiellement plus précise de l'évapotranspiration.



Chapitre 02 : Description des zones d'étude

II.1. Définition du bassin versant

L'aire délimitée par le contour où l'eau précipitée converge vers la sortie du bassin est appelée bassin versant, également connu sous le nom de bassin de drainage. Il est caractérisé comme l'espace où les pluies se transforment en débits, réagissant de manière spécifique aux précipitations [22].

Les caractéristiques hydrologiques d'un bassin sont en fonction d'une part du climat qu'il subit et d'un autre part de son propre milieu physique, L'utilisation des différents paramètres morphométriques a pour but la quantification des facteurs caractéristiques du milieu physique d'un bassin versant.

II.2. Présentation des zones d'étude

II.2.1. Kébir Rhumel

Le bassin versant Kébir-Rhumel est l'un des plus grands bassins hydrographiques importants en Algérie. Centré à 36° de latitude Nord et à 7° de longitude (**Figure II- 1**), Il couvre une superficie de 8115 Km² et possède une façade maritime d'environ 7 Km. Il est subdivisé en 7 sous bassins (**Tableau II- 1**) [23].

Tableau II-1: Superficie des sous bassins du réseau hydrographique du Kébir-Rhumel [24]

Code de sous bassin	Superficie (Km ²)	Nom de sous bassin	N
10 - 01	1067	Oued Déhamcha-Kébir amont	1
10 - 02	1102	Oued Kébir amont Endja	2
10 - 03	1230	Oued Kébir amont	3
10 - 04	1150	Oued Rhumel-Séguen	4
10 - 05	1832	Oued Boumerzoug	5
10 - 06	1091	Oued Rhumel-Smendou	6
10 - 07	1339	Oued Kébir maritime	7

Le bassin du Kébir-Rhumel compte trois barrages : HAMMAM-GROUZ, BENI-HAROUN et BERLA, dont deux sont en exploitation actuellement (**Tableau II- 2**) [23].

Tableau II- 2: Caractéristique des barrages de Kebir Rhumel [23]

Sous bassin	Wilaya	Commune	dénomination	Capacité Mm ³	V. Régularisable Mm ³ /An
1003	43	Oued El Athmania	Hammam Grouz	45.0	18.0
1005	25	Ain smara	Berla	3.2	3.1
1007	42	Grarem	Beni Haroun	795.0	435 ?0

II.2.1.1. Situation géographique

Le périmètre Kébir - Rummel est délimité administrativement (**Figure II-1**)

- Au Nord par : les wilayas de : Skikda, Jijel, Bejaia.
- A l'Ouest : Bejaia et Bou Arreridj.
- Au Sud : Batna, Oum El bouaghi.
- A L'Est : Constantine.

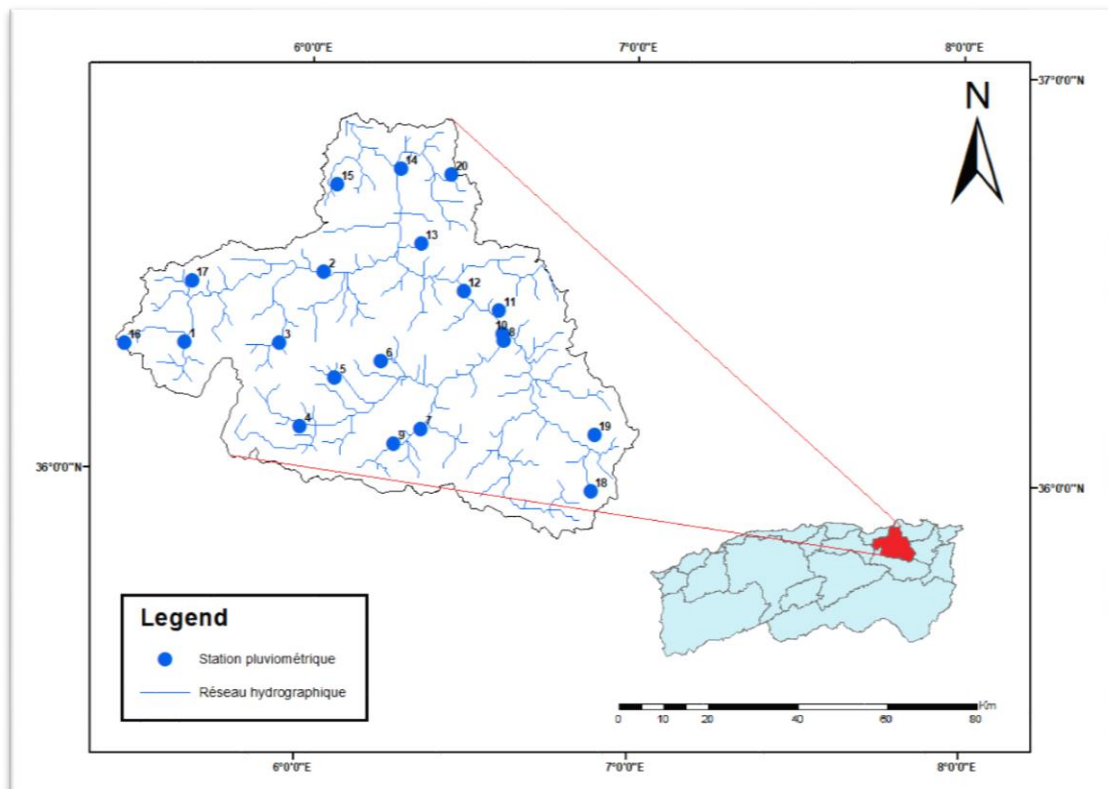


Figure II-1: Situation géographique et réseau hydrographique et localisation des stations pluviométriques du bassin versant Kébir–Rhumel

II.2.1.2. Géologie de bassin versant du Kébir-Rhumel

L'histoire géologique du bassin du Kébir-Rhumel est particulièrement mouvementée et marquée par un empilement d'unités structurales du Nord au Sud, la carte géologique montre en relief l'existence d'une mosaïque de terrains et de structures plus ou moins complexes dont le résultat se traduit par une grande diversité des ressources souterraines tant sur le plan quantitatif que qualitatif.

En effet, à l'opposition topographique par laquelle se caractérise le bassin, s'ajoute une opposition structurale qui se traduit par un substratum relativement simple au Sud formé de vastes étendues sédimentaires d'où émergent des massifs calcaires isolés, et d'un édifice beaucoup plus complexe au nord constitué de nombreuses séries hétérogènes empilées durant les phases tectoniques successives [25].

II.2.1.3. Climatologie

Le bassin de Kébir-Rhumel est caractérisé par un climat méditerranéen, il comporte :

- **Un régime monomodal (maritime) :** caractérisé par une forte proportion de pluie d'Hiver, puis une décroissance régulière jusqu'à un minimum estival. Ce régime correspond à un étage bioclimatique subhumide au nord du bassin (**Figure II-2**) [26].

Un régime de transition Tellien : avec un maximum pluviométrique principal en Décembre, et un décroissement à partir de Mars et Avril. Il correspond aux stations situées dans la zone médiane du bassin (**Figure II-3**) [26].

- **Un régime de transition Tellien :** avec un maximum pluviométrique principal en Décembre, et un décroissement à partir de Mars et Avril. Il correspond aux stations situées dans la zone médiane du bassin (**Figure II-4**) [26].
- **Un régime continental :** caractérisé par l'abondance relative des pluies du Printemps-Eté et la présence de deux maximum, l'un en Hiver (Décembre, Janvier) et l'autre au printemps (Mars et Avril). Ce régime s'identifie au secteur des hautes plaines, donc un bio climat exclusivement semi-aride (**Figure II-5**) [26].

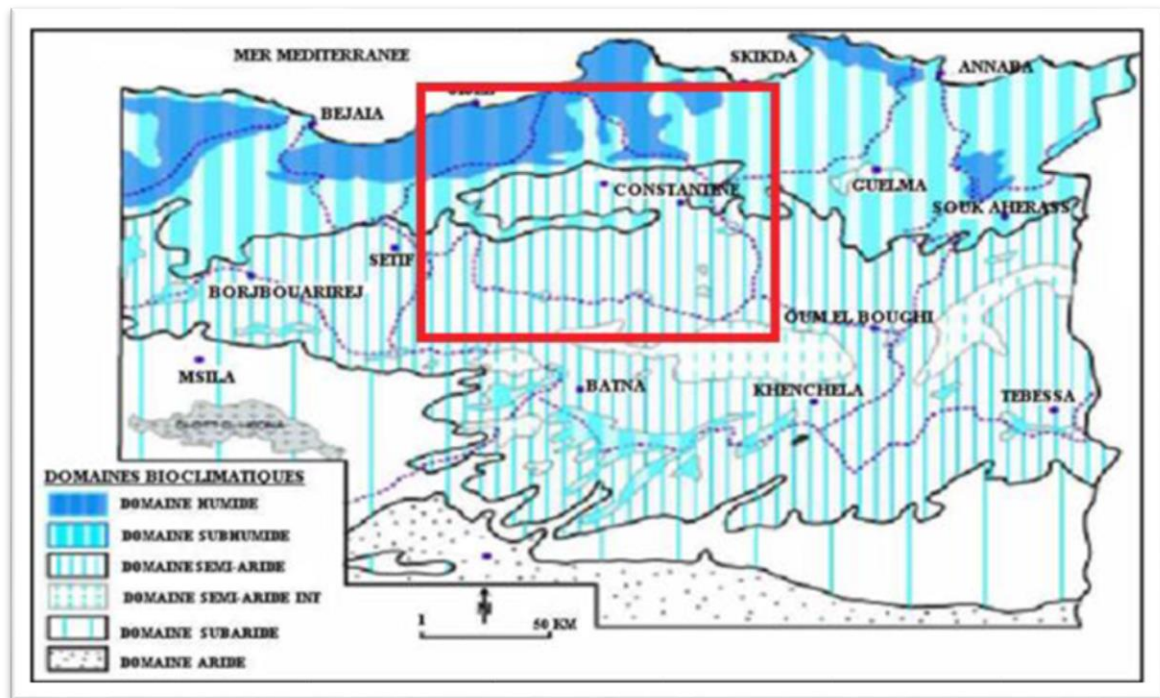


Figure II-6: Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (Mébarki A, 2005)

II.2.1.4. Réseau hydrographique

Le bassin Kébir Rhumel regroupe un réseau de plus de 4200 Km, il présente un chevelu hydrographique très dense dont quarante oueds ont une longueur supérieure à 10 km. Ce bassin naît de la jonction de deux cours d'eau importants : l'oued Rhumel et l'oued Endja, couvrant respectivement une superficie de 5315 km² et 2160 km² et dont la confluence donne naissance à l'oued Kebir [27].

➤ Oued Rhumel

C'est le cours d'eau le plus important du bassin, s'étendant sur plus de 123 km. Il trouve son origine dans les hautes plaines de Sétif (région de Bellaa, Wilaya de Sétif), traverse les gorges de Constantine jusqu'à la rencontre avec l'Oued Endja avant d'être nommé El Kebir [28].

➤ Oued Endja

Il prend naissance à la confluence de l'oued Kebir et de l'oued Redjas. Son lit a une forme morphologique très intéressante du point de vue hydrologique. Il s'étend sur une longueur de 15 Km [28].

➤ Oued El Kebir

La confluence des oueds, Rhumel et Endja donne l'oued El Kebir, il fait 56 km de long et se déverse dans la mer méditerranée [28].

➤ Oued Boumerzoug

Considéré comme le principal affluent de l'oued Rhumel, il prend naissance dans la région d'Aïn M'lila où ses eaux sont largement employées à des fins d'irrigation. Le groupement thermique majeur d'Ain Fesguia se trouve à l'extrémité supérieure de la vallée. Il fournit de l'eau potable à la ville de Constantine [28].

II.2.1.5. Couvert végétale

Le bassin est caractérisé par une couverture végétale discontinue, favorable à l'écoulement et à l'érosion, mis à part le bassin inférieur, où une bonne partie est recouverte par des formations arbustives efficaces. Par contre, la flore est généralement pauvre dans la zone semi-aride compte tenu de la qualité saline de ses sols [29]. On distingue sur les monts les forêts de chêne vert et de pin d'Alep (Djebels Chettaba, El-Ouahch, ...). Cependant, le domaine semi-aride à hiver frais, le plus répandu dans les Hautes Plaines, portées à 800 ou 1 000 m d'altitude, se caractérise par l'omniprésence de la céréaliculture, souvent pratiquée avec de la jachère (Figure II-3) [29].

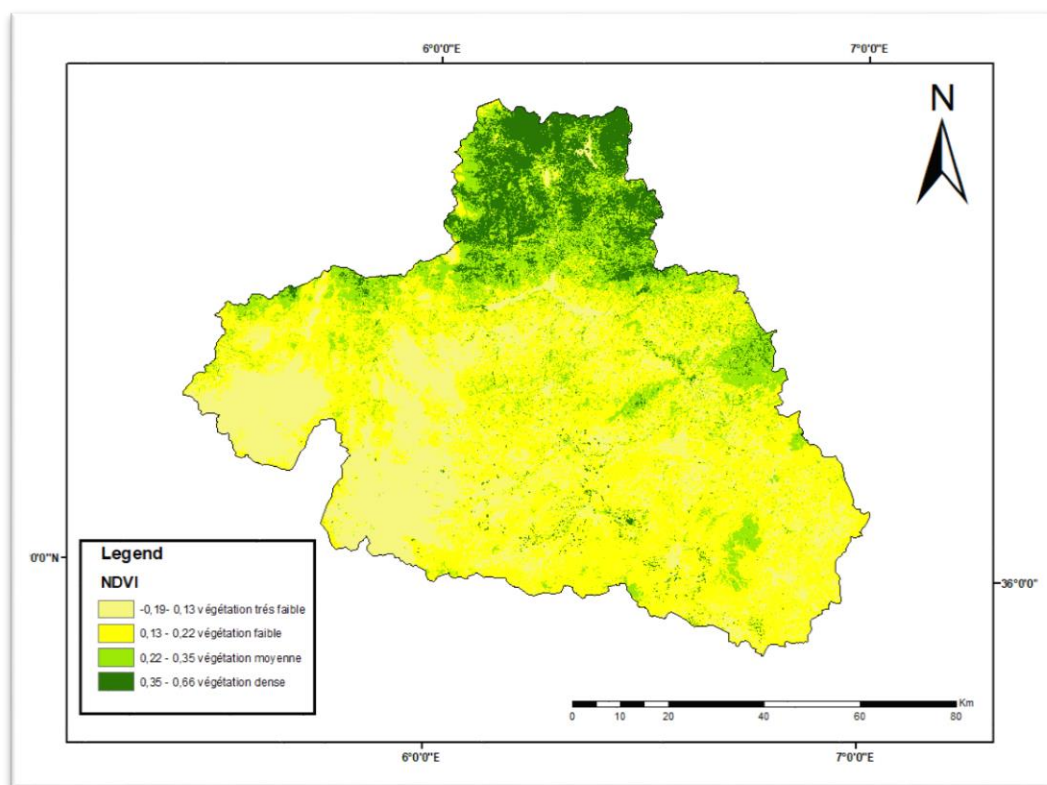


Figure II-7: Carte du couvert végétal du bassin versant Kébir Rhumel

L'analyse du couvert végétal du bassin versant Kébir Rhumel (Figure II-3), met en évidence une nette variation spatiale influencée principalement par les conditions climatiques et les caractéristiques topographiques. La partie nord du bassin se distingue par une densité végétale importante, signe d'un environnement plus humide, souvent associé à une

pluviométrie plus élevée et à des altitudes plus faibles favorisant l'accumulation d'eau et le développement de la végétation. À l'inverse, en progressant vers le sud, une diminution graduelle de la couverture végétale est observée, laissant place à des zones plus clairsemées, parfois quasi-désertiques, traduisant un climat plus sec, une faible capacité de rétention en eau et une pression anthropique éventuellement plus marquée. Cette répartition du couvert végétal reflète donc les dynamiques environnementales du bassin et constitue un indicateur pertinent pour l'étude des processus hydrologiques à l'échelle régionale.

II.2.1.6. Topographie

La carte topographique du bassin versant Kebir-Rhumel (**Figure II-8**), illustre une répartition altitudinale contrastée, influençant directement les dynamiques hydrologiques et les conditions microclimatiques.

Au nord du bassin, les altitudes varient entre -1 et 626 mètres, représentées par des teintes vertes. Cette partie se caractérise par un relief relativement bas, souvent associé à une végétation plus dense et à une humidité plus élevée. Ces conditions géographiques favorisent une infiltration accrue des eaux de pluie et réduisent l'évaporation directe. En allant vers le sud, le terrain s'élève progressivement, passant par des altitudes intermédiaires (jaune et orange), jusqu'à atteindre des zones montagneuses comprises entre 1010 et 1719 mètres, figurées en rouge. Ces zones présentent un relief plus accidenté, une couverture végétale parfois plus clairsemée, ainsi qu'une plus grande exposition au rayonnement solaire et aux vents, ce qui intensifie les pertes en eau par évaporation.

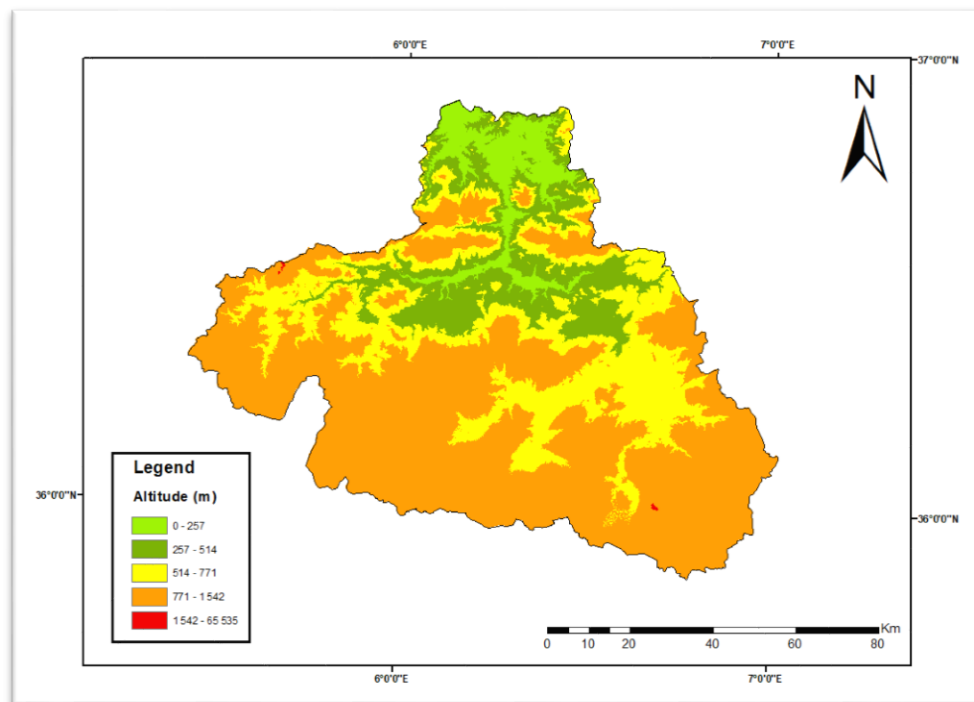


Figure II-9: Modèle Numérique de terrain du bassin versant Kébir Rhumel

II.2.2. Chélif

II.2.2.1. Situation géographique

Le bassin du Chélif, se trouve au Nord de l'Algérie dans la région Centre Ouest entre 34° et 36°30' de latitude Nord, et entre 0° et 3°30' de longitude Est, se limite au Nord par les crêtes de l'atlas tellien littoral et au Sud par l'atlas tellien saharien, occupant une superficie de 43799 Km².

La région du Cheliff – Zahrez ; qu'elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, à l'Ouest par la région Oranie - Chott - Chergui, au Sud par le désert et à l'Est par la région de l'Algérois et Chott– Hodna (**Figure II-5**).

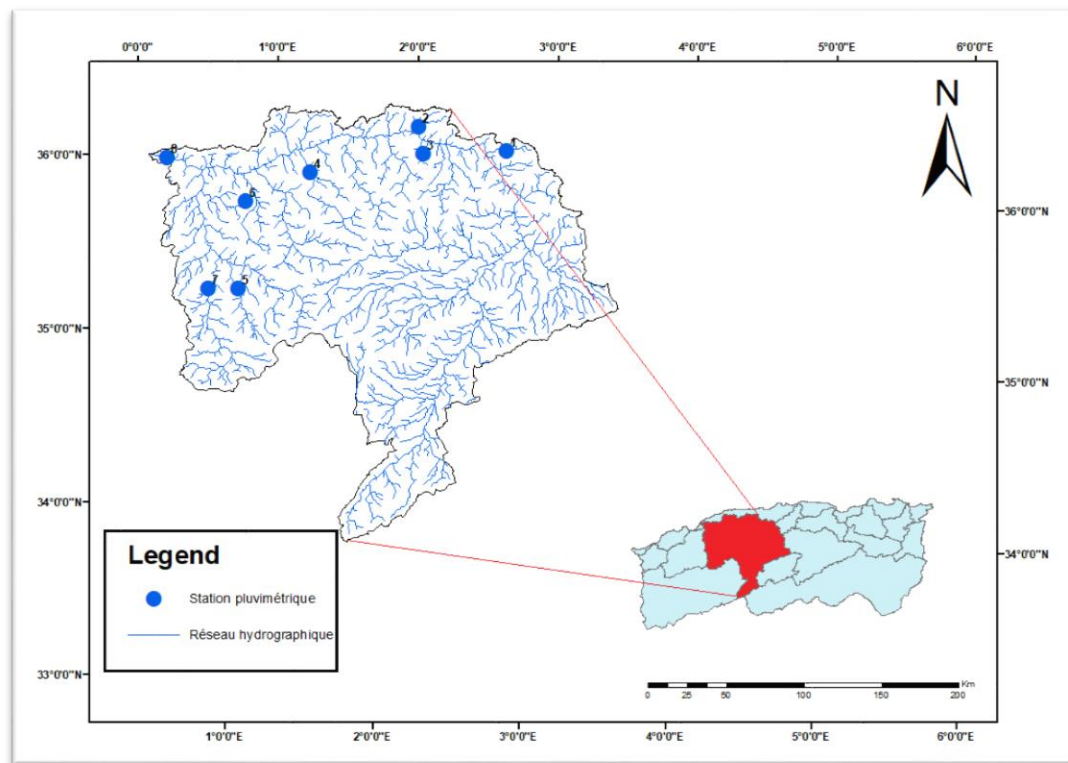


Figure II-10: Situation géographique et réseau hydrographique et localisation des stations pluviométriques du bassin versant Chélif

II.2.2.2. Géologie

Le bassin de Cheliff appartient aux bassins sédimentaires sublittoraux allongés Est-Ouest et mis en place après la dernière phase alpine tectonique tangentielle.

Au Nord, cette dépression est séparée de la mer par le tell septentrional représenté par une suite de reliefs parallèles formes essentiellement des terrains jurassico-crétacés que l'on retrouve aussi dans la plaine (Dahra et massif épi-métamorphiques et schistosités de Doui, Rouina et Temoulga) Au sud, le bassin du Cheliff est limité par le tell méridional représenté par un ensemble de massif montagneux ou le substratum y est principalement marno-calcaire et correspond à l'allochtone tellien avec ses différentes nappes [30].

II.2.2.3. Climatologie

Le climat du bassin du Cheliff est une transition entre un climat aride dans la partie sud des hauts plateaux et semi-aride à subhumide au Nord. Il intervient principalement par sa composante hydrique (pluviométrie) qui régit fortement le régime des eaux souterraines et superficielles du fait de son appartenance géographique à la zone aride et semi-aride. Le climat du bassin du Chélif est caractérisé par des étés chauds, peu pluvieux et rares en orages, ainsi que par des hivers doux et humides. On peut donc le qualifier de méditerranéen semi-aride [31].

Le Cheliff est soumis à des conditions hydro-climatiques défavorables, caractérisées par :

- Des précipitations irrégulières avec des variations interannuelles importantes,
- Des régimes hydrologiques dominés par une forte irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements et par la violence des crues.

II.2.2.4. Réseau hydrographique

Le bassin Chélif résulte de la jonction de deux cours d'eau importants : l'Oued Touil et Nahr Ouassel, drainant respectivement une superficie de 16 338 km² et 3 651 km² et dont la confluence donne naissance à l'Oued Chélif.

- L'oued Touil prend sa source dans l'Atlas saharien, près d'Aflou dans les monts de Djebel Ammour. Il traverse les hautes plaines de 4 Wilaya successivement : Laghouat, Djelfa, Tiaret et Medea au barrage Boughzoul, avec une orientation SW-NE jusqu'à Chahbounia à Médéa pour confluer avec l'oued Nahr Ouassel qui coule en oblique vers le Nord-Est et traverse successivement (03) wilayas : Tiaret, Tissemsilt et Médéa.

- L'Oued Chélif résultant de jonction des deux grands cours d'eau précédents, prend d'abord une direction Sud-Nord et franchit la chaîne de Médea (Boughari). Ensuite, suivant une orientation SE-NW il traverse le massif de Gantass, et enfin il coule en oblique de l'Est à l'Ouest, traversant ainsi successivement (04) wilayas : Ain Defla, Chlef, Relizane et Mostaganem, jusqu'à son embouchure dans une large vallée vers la mer méditerranée. Sur la majeure partie de son cours d'eau, il serpente au fond d'une vallée parallèle à la mer bordée au sud par le massif des Ouarsenis et au nord par la chaîne côtière des monts du Dahra et du Zaccar. De Boughzoul à l'embouchure du Chélif, la distance en ligne droite est d'environ 250 km et la dénivellation à peu près 625 m. Durant tout ce parcours, l'Oued Chélif ne reçoit pas d'affluents importants sur sa rive droite sauf l'Oued Ebda et l'Oued Ras Ouahrane, mais sur sa rive gauche, il collecte les eaux de l'Oued Deurdeur, Harreza, Rouina Zeddine, Fodda, Sly, Rhiau, Djediouia et l'affluent important plus au Ouest : Oued Mina qui suit une direction Sud-Nord.
- Les cours d'eau du massif Côtier du Dahra, qui s'étend sur une centaine de kilomètres l'Est en Ouest et sur une trentaine de kilomètres de large, sont orientés Sud-Nord vers méditerranée et sont très courts et présentent une forte pente (Oued Damous, Allala, Tarzoult et Kramis).

De cet ensemble, il est possible de délimiter trois grandes parties du bassin :

- 1- Le bassin Chélif à l'amont du barrage Boughzoul : correspondant à l'Oued Touil et Nahr Ouassel ainsi que le bassin du Zahrez.
- 2- Le bassin Chélif à l'aval du barrage Boughzoul : formé par l'Oued Chélif et ses affluents jusqu'à son embouchure.
- 3- Le bassin Côtier-Dahra : correspondant de l'Ouest à l'Est aux Oueds de Kramis, Allala et Damous [32].

II.2.2.5. Couvert végétal

La répartition spatiale du couvert végétal au sein du bassin versant du Chélif met en évidence un gradient marqué du nord vers le sud. La partie nord du bassin se caractérise par une couverture végétale dense et continue, ce qui reflète des conditions plus favorables, tant sur le plan climatique qu'agronomique. Cette densité de végétation peut s'expliquer par une pluviométrie plus élevée, une meilleure disponibilité en eau et une activité agricole plus intense. En progressant vers le sud, le couvert végétal devient progressivement plus clairsemé. La végétation y apparaît de manière discontinue, laissant place à de vastes zones à faible densité de couverture ou à nu, signe d'un environnement plus aride, soumis à un stress hydrique important et à une pression anthropique potentielle. Cette répartition hétérogène du couvert végétal reflète directement les contrastes écologiques du bassin, et constitue un indicateur essentiel dans l'étude du cycle hydrologique, notamment dans l'analyse de l'évapotranspiration (**Figure II-11**).

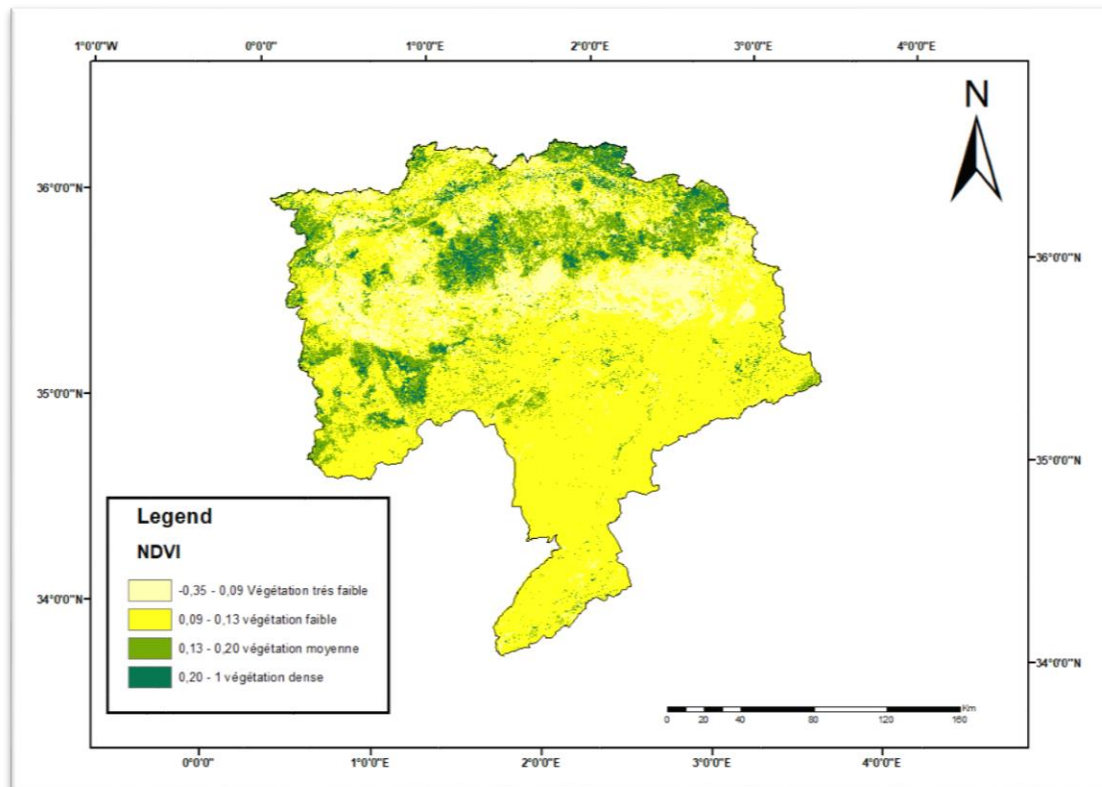


Figure II-12: Carte du couvert végétal du bassin versant Chélif

II.2.2.6. Topographie

Le Modèle Numérique de Terrain du bassin versant du Chélif révèle une morphologie variée (**Figure II-13**), structurée par des contrastes d'altitude qui influencent directement la dynamique hydrologique et les conditions environnementales de la région. La partie nord et nord-est présente des reliefs plus marqués, avec des altitudes relativement élevées, correspondant aux zones montagneuses ou aux contreforts de l'Atlas. Ces reliefs jouent un rôle fondamental dans la régulation des écoulements et dans la distribution spatiale des précipitations. Plus on se dirige vers le centre et le sud du bassin, plus le relief s'adoucit. On y retrouve des zones de plaines, des vallées plus larges, et une topographie plus plane, favorisant l'accumulation des eaux et les activités agricoles.

Cette organisation du relief structure profondément le fonctionnement naturel du bassin. Les zones en altitude servent souvent de points de captation des précipitations, tandis que les zones plus basses deviennent des lieux d'accumulation ou de passage pour les eaux de surface. Les pentes influencent la vitesse de ruissellement et la capacité des sols à retenir l'eau, mais elles jouent aussi sur l'érosion, la stabilité des terrains et la façon dont l'homme peut occuper ou exploiter le territoire. Le MNT devient ainsi un outil de lecture essentiel pour

comprendre les dynamiques internes du bassin, car il révèle comment le paysage façonne les flux, les contraintes et les potentiels de la région

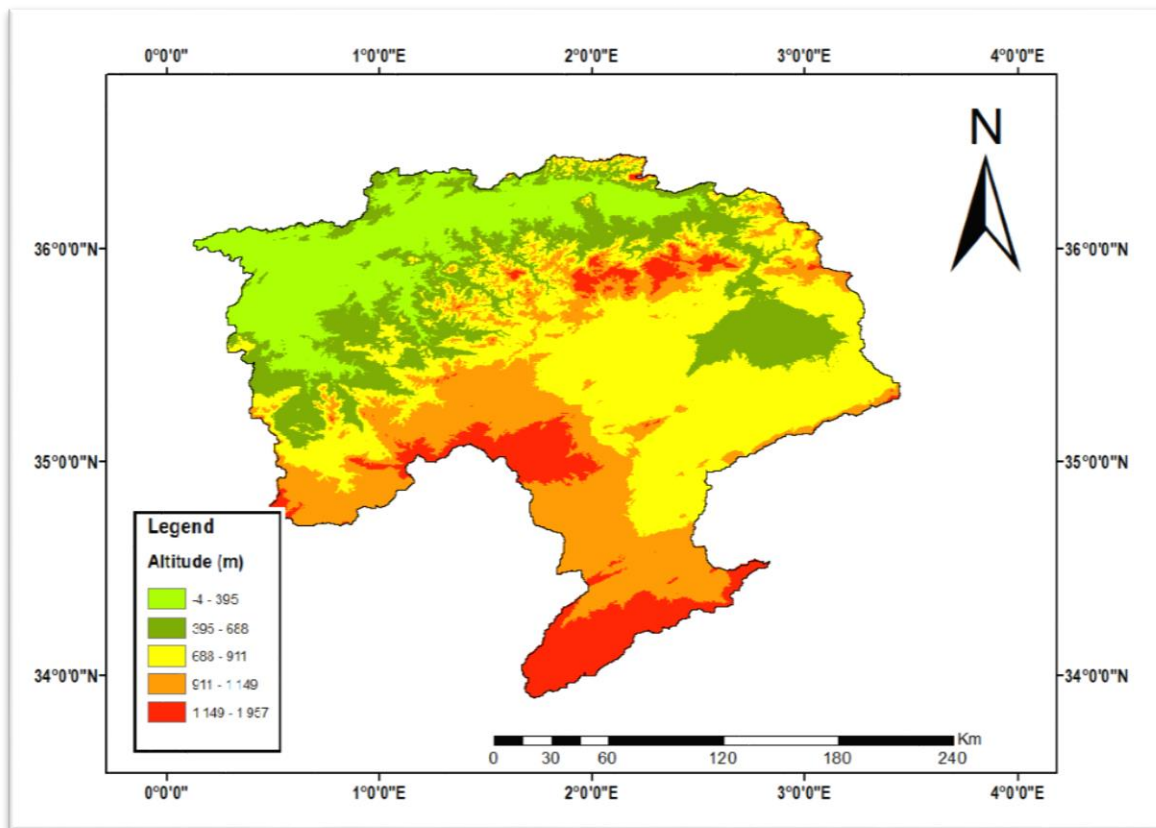


Figure II-14: Modèle Numérique de terrain du bassin versant Chélif

II.2.3. Soummam

II.2.3.1. Situation géographique

Le bassin versant de la Soummam est situé dans la partie centrale au Nord de l'Algérie et il s'étend sur 9 125 Km². Cette étendue est de forme irrégulièrement allongée suivant la direction de parallèle (35° 45' et 36° 45') et les méridiens entre (3° 38' et 5° 38') [33].

Au Nord, ce bassin est délimité principalement par la chaîne montagneuse du Djurdjura, dont le sommet le plus élevé est de 2 308 m d'altitude (Lalla khedidja), tandis que sa limite au sud située aux monts du Hodna. Moins élevée que le Djurdjura (l'altitude maximale est de 1862 m). Vers l'Est et l'Ouest le bassin de la Soummam est ouvert, c'est dans cette partie du bassin que se situent les hauts plateaux de Sétif et de Bouira.

Le bassin versant de la basse Soummam est limité par : [34].

- ❖ **Au nord** : par un axe orographique orienté Est-Ouest, constitué par les monts d'Akfadou et de Taourirt Ighil à l'Ouest, s'étendant par les DjBELs Aghbalou et Gourayaa l'Est.

- ❖ **Au sud** : par un second axe orographique disposé parallèlement au premier, constitué par les monts des babors occidentaux, qui se prolongent plus à l'Est par ceux des babors orientaux.
- ❖ **A l'ouest** : par l'étranglement de la vallée au niveau du seuil hydrogéologique de Sidi Aich.
- ❖ **A l'est** : par la mer méditerranée, (**Figure II-15**).

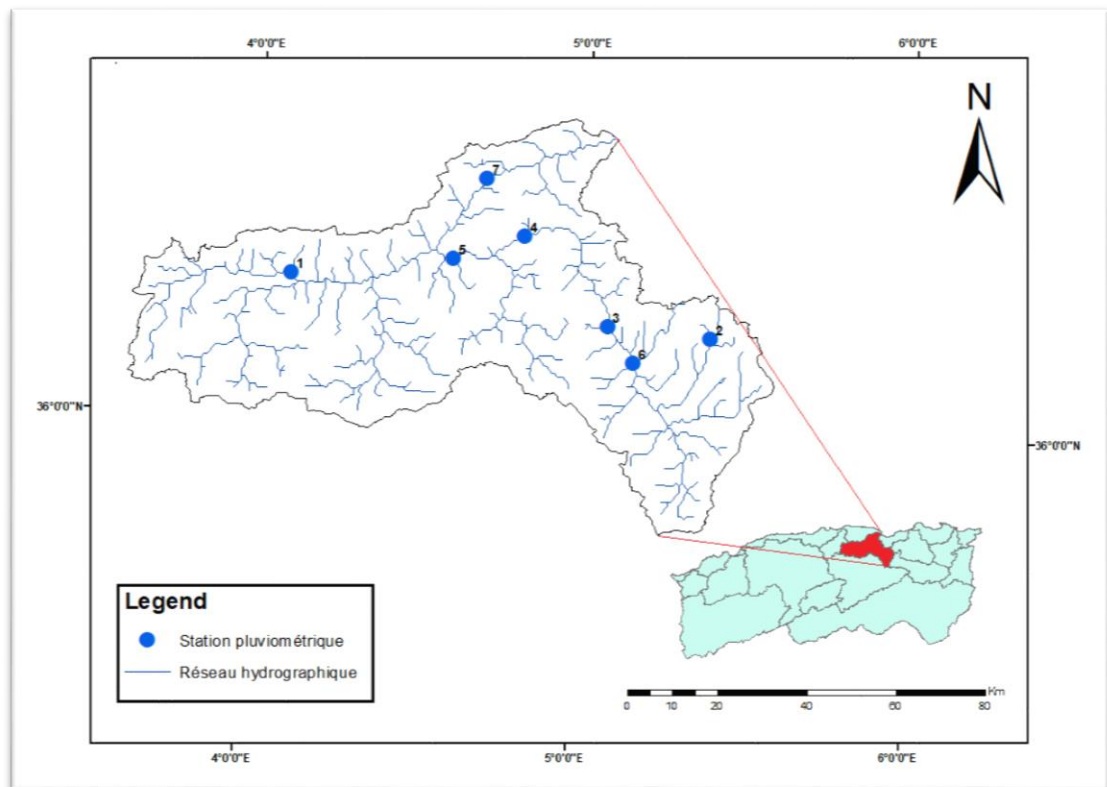


Figure II-16: Situation géographique et réseau hydrographique et localisation des stations pluviométriques du bassin versant Soummam

II.2.3.2. Géologie du bassin

Le bassin versant de la Soummam est dans ses grandes lignes constitué, sur la rive gauche, par de l'oligocène traversé par des formations du crétacé inférieur ; du miocène inférieur apparaît dans la partie aval, en bordure de l'oued de terrasses alluviales importantes tapissant en générale les pieds des pentes sauf dans la région de Sidi aiche ou le crétacé apparaît jusqu'au lit.

Le versant de la rive droite est en majeure partie formé de crétacé inférieur, moyen et supérieur ; les terrasses alluviales sont beaucoup plus restreintes.

Les terrains rencontrés sont généralement imperméables : argilogrès de l'oligocène, schistes de l'alboaptien et marno calcaires du crétacé [35].

II.2.3.2. Climatologie

Le bassin versant de la Soummam dépend de trois types de climat, ce qui d'ailleurs place la région dans trois étages bioclimatiques en fonction du climat dominant (**Figure II-9**).

▪ Climat Littoral

Domine sur la région parallèle à la bande méditerranéenne, dite zone inférieure de la Soummam. Cette région est classée en étage bioclimatique Humide. La température moyenne dans cette région varie de 14° à 15°, l'humidité relative est plutôt élevée, tandis que la pluviométrie augmente de l'Ouest vers l'Est avec un maximum en mois de décembre et un minimum en mois de juillet.

▪ Climat de l'Atlas Tellien

Tout au long de l'Oued Soummam, de Sidi Aiche jusqu'à Bejaia (moyenne Soummam, et une partie de la haute Soummam), la zone est classée en étage bioclimatique Subhumide. Ce climat se démarque avec un degré de continentalité qui augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer, les températures varient de 10°C à 17°C, l'humidité relative est plus élevée durant les nuits marquant un cycle diurne, ce qui est des précipitations, elles diminuent du nord vers le sud, le climat Tellien constitue une véritable barrière face aux masses d'air chargées d'eau, ce qui rend la pluviométrie plus importante sur les montagnes que sur les hautes plaines.

▪ Climat des hautes plaines Tellies

Le climat des hautes plaines telliennes est typiquement continental ; les températures moyennes annuelles varient de 10°C à 15°C en fonction de l'altitude croissante et l'amplitude des moyennes mensuelles oscillent entre 20°C et 21°C.

La pluviométrie moyenne annuelle varie de 250 à 500 mm avec l'accroissement d'altitude.

En général, il pleut de 50 à 100 jours par an. Le régime mensuel présente un maximum principal en janvier mais les pluies orageuses d'automne et de printemps prennent sous ce climat une importance non négligeable, principalement en Mai on observe fréquemment un maximum secondaire. Les gelées blanches sont très fréquentes (60 à 70 jours par an). Elles se produisent en novembre à avril avec un maximum en janvier. Le sirocco est également fréquent (40 à 45 jours en moyenne par année). Il faut toutefois noter la position privilégiée de Sétif pour laquelle les fréquences des gelées blanches et du sirocco sont respectivement de 15 et 34 jours par an [36].

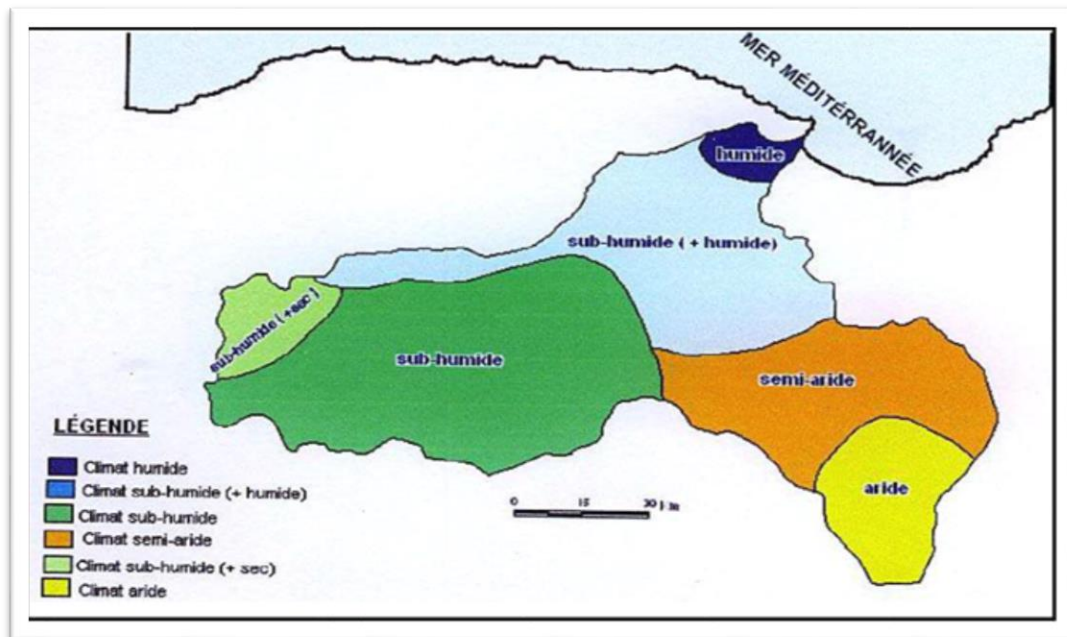


Figure II- 17: Carte des étages bioclimatiques du bassin versant de la Soummam (Source : CNC)

II.2.3.3. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est défini comme l'ensemble de cours d'eau naturels (rivières) ou artificiels (réseaux) drainant un bassin versant.

Selon la répartition du réseau hydrographique du bassin versant de la Soummam maritime (15-10) on distingue :

Une rivière principale à écoulement permanent, appelée l'oued Soummam et de six affluents, qui se répartissent comme suit :

- **Rive gauche :** Oued Challata, Oued El Kseur, Oued Chemini.
- **Rive droite :** Oued Sedouk, Oued Timezrit, Oued Amizour [34] .

Ces principaux affluents sont caractérisés par un écoulement intermittent. Outre ces affluents de l'Oued de Soummam, il y'a aussi deux Oueds importants qui drainent les plaines côtières de Béjaia ; Oued Sghir et Oued Djebira.

II.2.3.4. Couvert végétale

La carte du couvert végétal du bassin versant de la Soummam (**Figure II-10**), montre une répartition inégale de la végétation sur l'ensemble du territoire. La partie nord du bassin est largement couverte de végétation, ce qui s'explique par un climat plus humide, un relief plus favorable et la présence d'activités agricoles. Les zones vertes y sont denses et continues, ce qui indique une bonne disponibilité en eau et une pression humaine plus marquée.

En allant vers le sud, la couverture végétale devient de plus en plus faible. La végétation y est dispersée, parfois presque absente. Ce changement montre une transition vers des zones plus sèches, avec moins de ressources naturelles. Cela peut être lié à la topographie, à un climat plus sec ou à des sols moins fertiles. Cette différence entre le nord et le sud reflète bien les contrastes naturels du bassin, mais aussi l'impact de l'usage des terres par les populations locales.

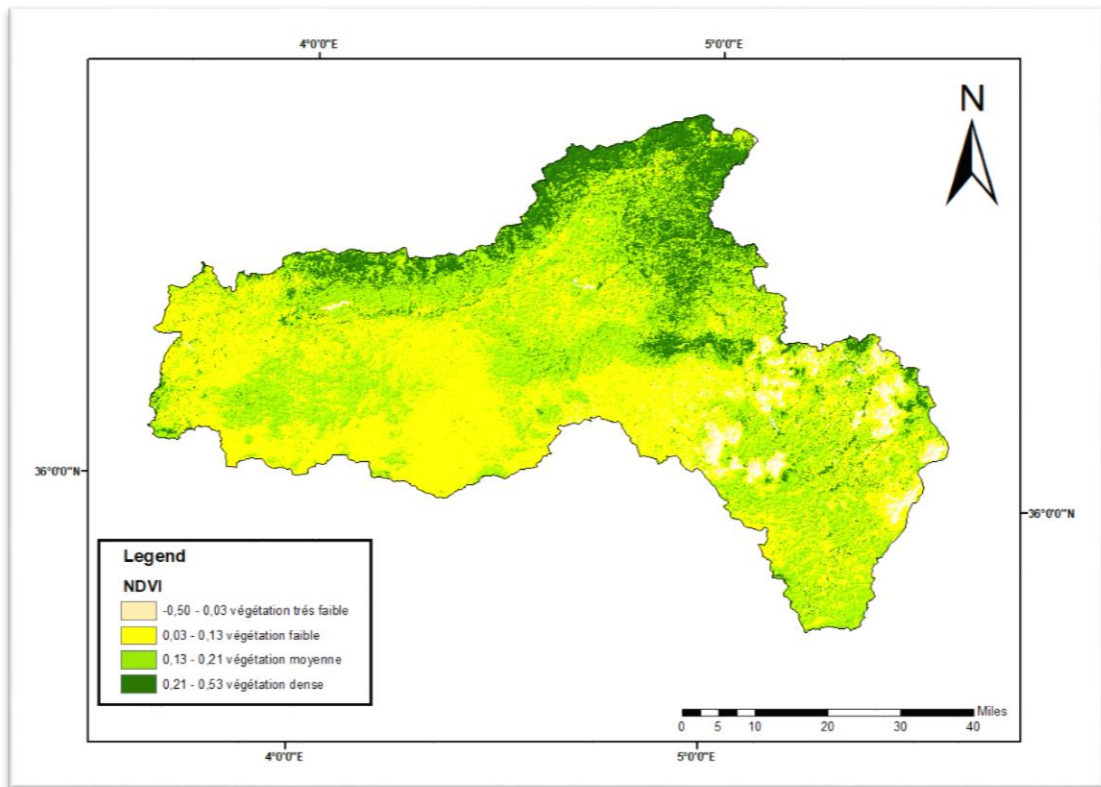


Figure II- 18: Carte du couvert végétal du bassin versant Soummam

II.2.3.5. Topographie

La carte montre un paysage très varié. Au nord, les zones sont plus basses, en vert, avec un terrain plutôt plat ou légèrement vallonné. Ces endroits semblent plus accessibles, plus doux. En allant vers le sud, les couleurs deviennent plus chaudes, du jaune jusqu'au rouge. Cela indique que le relief monte peu à peu, avec des zones plus élevées, parfois montagneuses. Le terrain y devient plus dur, plus accidenté. Ce changement d'altitude donne au bassin de la Soummam un caractère unique, avec une vraie diversité entre le nord plus ouvert et le sud plus escarpé (**Figure II-11**).

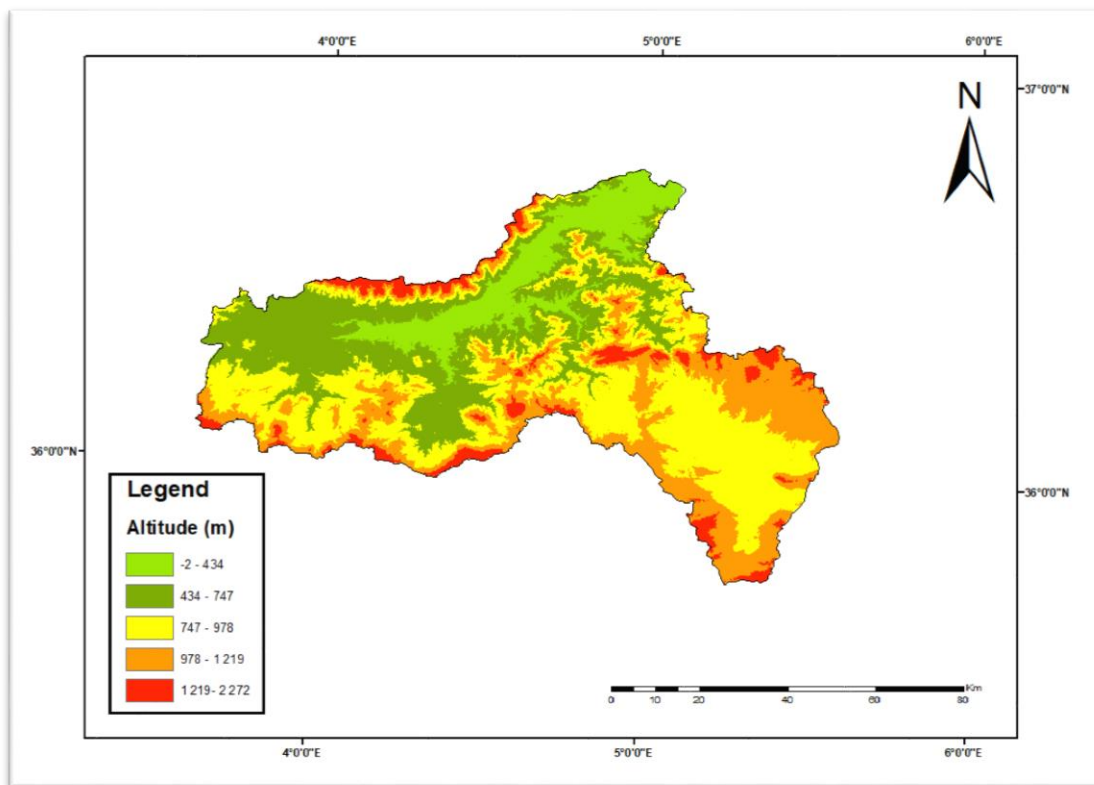


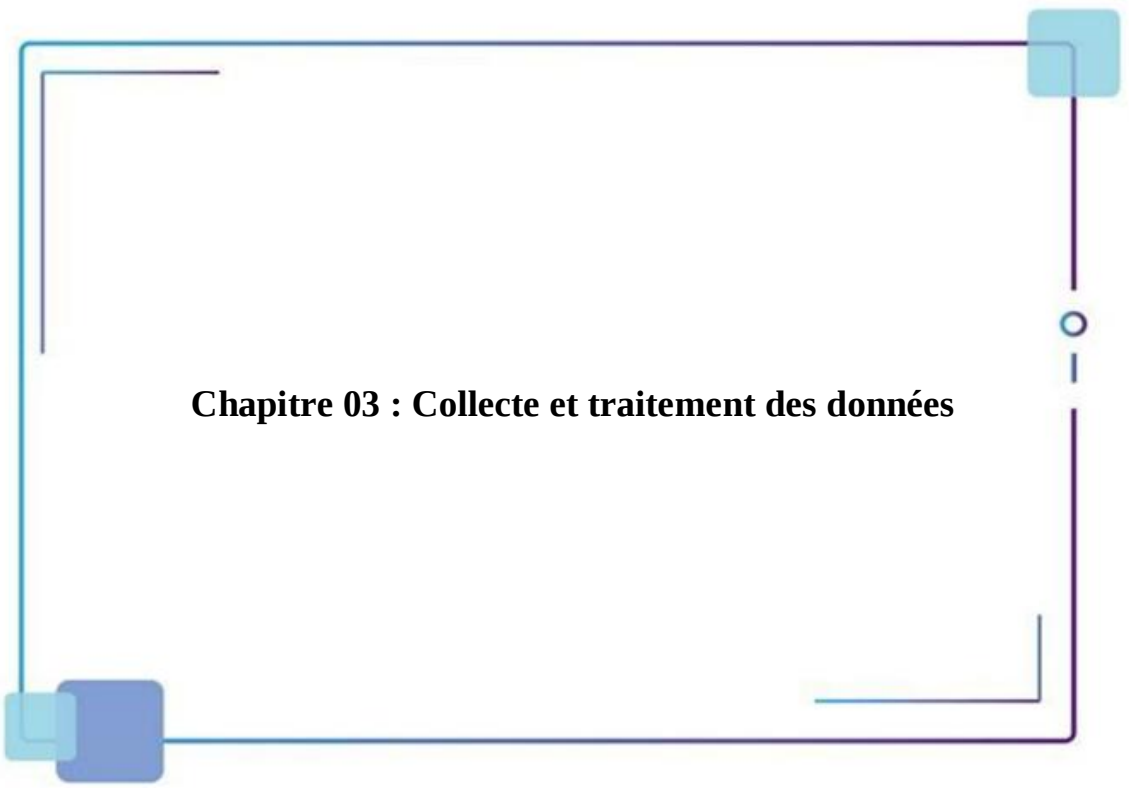
Figure II- 19: Modèle Numérique du terrain du bassin versant Soummam

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter en détail les caractéristiques géographiques, climatiques et hydrologiques des trois bassins versants étudiés : Kébir-Rhumel, Chélif et Soummam. Ces régions, bien que toutes situées dans le Nord de l'Algérie, présentent une variabilité spatiale marquée en termes de topographie, de climat, d'occupation du sol et de régime hydrique.

L'analyse comparative de ces bassins a mis en évidence la diversité des contextes environnementaux influençant les processus hydrologiques, notamment l'évapotranspiration. Cette variabilité justifie pleinement le recours à des approches flexibles et robustes, telles que les méthodes d'intelligence artificielle, pour modéliser ce phénomène complexe.

Les éléments développés dans ce chapitre constituent ainsi une base essentielle pour la suite de ce travail, en particulier pour la collecte, l'analyse critique et l'exploitation des données nécessaires à l'estimation de l'évapotranspiration à l'échelle locale.



Chapitre 03 : Collecte et traitement des données

Introduction

L'évapotranspiration joue un rôle clé dans de nombreux domaines, qu'il s'agisse de la gestion durable des ressources en eau, du développement agricole ou encore de l'analyse des dynamiques climatiques. Pour pouvoir l'estimer avec précision, il est essentiel de disposer de données fiables, complètes et homogènes. Pourtant, dans des régions comme l'Algérie, marquées par un climat semi-aride, la collecte de données hydrométéorologiques de qualité représente un véritable défi. La forte variabilité des conditions climatiques, les ruptures dans les séries temporelles, les erreurs liées aux instruments de mesure ou encore les différences dans les méthodes de collecte compliquent considérablement la tâche. Face à ces contraintes, ce chapitre se penche sur les sources de données mobilisées dans cette étude, les types de variables retenues, ainsi que sur les différentes étapes de traitement et de préparation des données. L'objectif est de garantir une base solide et cohérente, indispensable pour entraîner des modèles d'intelligence artificielle capables de fournir des estimations fiables de l'évapotranspiration. Les étapes à suivre pour vérifier et corriger nos données consiste, à détecter d'éventuelles anomalies des observations, à vérifier l'homogénéité et enfin détecter les valeurs singulières de ces dernières.

III.1. Critique des données

Dans le cadre de notre travail sur l'estimation de l'évapotranspiration, la qualité et la cohérence des données météorologiques utilisées jouent un rôle central. Pour cette étude, nous avons rassemblé des informations climatiques telles que la température (minimale et maximale), l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire, issues principalement de stations météorologiques nationales et de bases de données internationales fiables. Cependant, au moment de leur traitement, nous avons rapidement constaté que ces données n'étaient pas toujours homogènes. Certaines stations présentaient des interruptions de mesure sur plusieurs années, tandis que d'autres affichaient des valeurs manifestement incohérentes, probablement dues à des erreurs de capteurs ou à des défaillances d'enregistrement. D'autres fois encore, c'est le déplacement de la station ou un changement d'observateur qui venait perturber la continuité de la série. Ces irrégularités, bien que fréquentes dans les études climatiques, compliquent considérablement le travail d'analyse, en particulier lorsqu'on cherche à alimenter des modèles d'intelligence artificielle qui exigent des données nettes, fiables et continues. Il a donc fallu effectuer un long travail de vérification, de correction et parfois même de reconstitution des données, afin de garantir des résultats scientifiquement solides et représentatifs des conditions réelles.

III.2. Bassin versant de Kébir-Rhumel

Le bassin versant de Kébir-Rhumel est situé dans le nord-est de l'Algérie et couvre une superficie d'environ 9 100 km². Il s'étend principalement sur les wilayas de Constantine, Mila et Jijel. Ce bassin occupe une position stratégique dans le paysage hydrologique de la région grâce à ses deux principaux cours d'eau, l'oued Kébir et l'oued Rhumel, qui traversent des zones à fort relief avant de converger vers la Méditerranée. Sa configuration montagneuse au sud, combinée à des vallées plus ouvertes au nord, génère un régime hydrologique contrasté, influencé par les pluies hivernales et parfois par la neige en altitude. Cette ressource est vitale pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture irriguée et la recharge des barrages, mais elle reste confrontée à des problématiques telles que l'érosion des sols, l'envasement des réservoirs et la variabilité climatique.

III.2.1. Présentation des données

Les stations météorologiques présentées dans les tableaux ci-dessus ont été recensées à titre informatif pour illustrer le réseau climatique existant dans chaque bassin versant. Toutefois, ces stations n'ont pas été exploitées dans l'étude.

Pour garantir une homogénéité spatiale et temporelle des données utilisées dans les trois bassins, **nous avons eu recours à une station climatique virtuelle fournie par la base de données NASA POWER.**

Nous avons pris en compte 20 stations pluviométriques du bassin versant de Kébir Rhumel (**Tableau III-1**).

Tableau III-1: Les stations de mesure existant dans le bassin versant Kébir-Rhumel (Coordonnées en Lambert Nord Algérie)

Nom de la station	Code de la station	X(m)	Y(m)	N
HAMMAM	100110	763300,00	338800,00	1
MECHTAT SERADJ	100206	800000,00	360300,00	2
KOUDIAT TINDART	100208	789150,00	340350,00	3
TADJENANT	100303	796150,00	318000,00	4
BIR EL ARCH	100306	804843,1238	331705,69	5

				6
BOUMALEK M.C	100401	817150,00	337000,00	
TELERGHMA	100402	829050,00	319250,00	7
CONSTANTINE (ANRH)	100410	850350,00	344750,00	8
MECHTA MELHA (MCHIRA)	100404	821933,54	314925,36	9
FOURCHI	100511	849850,00	346600,00	10
HAMMA BOUZIANE	100603	848500,00	352800,00	11
EL KHENEG	100620	838500,00	357450,00	12
HAMALA	100703	826050,00	369700,00	13
EL MILIA	100706	819300,00	389700,00	14
OUED MASAOUDA	100708	802200,00	384200,00	15
ZIARI	100613	746900,00	337500,00	16
BENIAZIZ P	100104	764200,00	355650,00	17
AIN FAKROUN	100503	876600,00	305500,00	18
OULED NACEUR	100527	876800,00	320700,00	19
ZIGHOUD	100619	833100,00	389000,00	20

Afin de mieux comprendre la distribution et la variabilité des paramètres climatiques utilisés comme données d'entrée dans l'estimation de l'évapotranspiration, une analyse statistique descriptive a été réalisée.

Cette analyse porte sur les principales variables météorologiques, à savoir : la température maximale (Tmax), la température minimale (Tmin), le rayonnement solaire (Rs), la vitesse du vent (Wind speed), ainsi que l'évapotranspiration de référence (ET₀).

Les indicateurs statistiques calculés sont : la moyenne, la médiane, l'écart-type et le coefficient

de variation (CV).

Le tableau suivant présente les résultats obtenus (**Tableau III-2**).

Tableau III-2: Analyse statistique des paramètres météorologiques du bassin versant de Kébir Rhumel

Paramètre	Moyenne	Médiane	Min	Max	Ecart type	Coefficient de variation
Tmax(°C)	31,67	30,73	16,8	47,3	8,16	0,26
Tmin(°C)	6,71	5,62	-3,63	19	5,90	0,88
RHmean	66,85	69,89	36,8	84,8	11,53	0,17
Rs(MJ/m/month)	383,83	360	158	663	137,70	0,36
Vitesse du vent (m/s)	2,30	2,25	1,45	3,46	0,34	0,15
ET0(mm/month)	93,55	72,932	2,16	256	67,04	0,72

III.3. Bassin versant du Chélif

Avec une superficie estimée à environ 44 000 km², le bassin versant du Chélif est le plus vaste d'Algérie. Il s'étend des Hauts Plateaux jusqu'au littoral méditerranéen, traversant plusieurs wilayas telles que Tiaret, Chlef, Aïn Defla et Tipaza. Son axe principal est l'oued Chélif, le plus long fleuve du pays, qui draine des plaines agricoles fertiles, notamment dans la région de Chlef. Ce bassin est un pilier de la production agricole nationale grâce à son potentiel d'irrigation. Toutefois, il est également confronté à de multiples pressions : surexploitation des nappes phréatiques, pollution diffuse d'origine agricole, et phénomènes de salinisation des sols. Le bassin du Chélif illustre bien les défis liés à la gestion intégrée des ressources en eau dans les grandes régions hydrauliques du pays.

III.3.1. Présentation des données

Nous avons pris en compte 8 stations pluviométriques du bassin versant de Chélif (**Tableau III-3**).

Tableau III-3: Les stations de mesure existant dans le bassin versant Chélif (Coordonnées en Lambert Nord Algérie).

Nom	Code	X(m)	Y(m)	N
Tamesguida	011501	497000	323900	1

Arib	011801	439650	335550	2
El Ababsa	011715	443900	318500	3
O ben E A	012311	372550	301700	4
Kef mahboula	013001	331600	224250	5
Oued Rhiou Rn4	012603	332530	280980	6
Ain Amara	013302	312150	223380	7
Sidi Bel Abbes	013602	280750	305550	8

Dans le but d'évaluer la qualité et la variabilité des données climatiques utilisées dans le cadre de l'estimation de l'évapotranspiration de référence, une analyse statistique descriptive a été effectuée pour le bassin versant du Chélif.

Cette analyse concerne les variables météorologiques essentielles, à savoir : la température maximale (Tmax), la température minimale (Tmin), le rayonnement solaire (Rs), la vitesse du vent (Wind speed), ainsi que l'ET₀.

Les paramètres statistiques calculés incluent la moyenne, la médiane, l'écart-type et le coefficient de variation (CV), permettant de mieux caractériser la dispersion et la tendance centrale des séries.

Le tableau ci-dessous présente les résultats de cette analyse (**Tableau III-4**).

Tableau III-4: Analyse statistique des paramètres météorologiques du bassin versant de Chélif

Paramètre	Moyenne	Médiane	Min	Max	Ecart type	Coefficient de variation
Tmax(°C)	30,53	30,16	16,7	44,6	7,32	0,24
Tmin(°C)	5,74	4,65	-4,92	18,9	6,20	1,08
Rhmean	61,95	63,43	31	84,3	12,41	0,20
Rs(MJ/m/month)	362,66	349,2	134	627	132,02	0,36
Vitesse du vent (m/s)	2,14	2,09	1,41	3,52	0,31	0,15
ET0(mm/month)	86,85	72,82	0,12	238	61,11	0,70

III.4. Bassin versant du Soummam

Localisé dans le nord de l'Algérie, le bassin du Soummam couvre une surface d'environ 9 200 km², englobant en grande partie les wilayas de Béjaïa, Sétif et Bouira. Il doit son nom à l'oued Soummam, un cours d'eau majeur qui traverse des zones montagneuses avant de se jeter dans la mer Méditerranée à Béjaïa. Ce bassin présente une grande diversité climatique, allant du semi-aride dans l'amont à un climat plus humide en aval, ce qui en fait une zone agricole active, notamment dans la vallée du Soummam. Néanmoins, cette richesse naturelle est fragilisée par une urbanisation croissante, une exploitation excessive des ressources en eau, et une exposition fréquente aux crues soudaines, surtout en période de fortes pluies. La gestion équilibrée de ce bassin est donc un enjeu crucial pour le développement durable de la région.

III.4.1. Présentation des données

Nous avons pris en compte 7 stations pluviométriques du bassin versant de Soummam (**Tableau III-5**).

Tableau III-5: Les stations de mesure existant dans le bassin versant Soummam (Coordonnées en Lambert Nord Algérie)

Nom de la Station	Code	X(m)	Y(m)	N
Telsdit I	150106	626380	340580	1
Fermatou	150601	742020	329400	2
Magraoua	150702	713650	331100	3
Boubireck	150703	689450	354500	4
Sidi Yahia	150901	670400	347100	5
Ain Zada	150701	721200	321500	6
Sidi Aich	151001	678200	369700	7

Le tableau ci-dessous présente les résultats de l'analyse, (**Tableau III-6**).

Tableau III-6: Analyse statistique des paramètres météorologiques du bassin versant de Soummam.

Paramètre	Moyenne	Médiane	Min	Max	Ecart type	Coefficient de variation
Tmax(°C)	31,21	31,69	18,8	43,1	6,65	0,21
Tmin(°C)	6,92	6,76	-2,7	17,7	5,31	0,77

Rhmean	65,95	67,86	38,5	84	9,67	0,15
Rs(MJ/m/month)	381,27	380,7	196	601	116,47	0,31
Vitesse du vent (m/s)	0,72	0,71	0,51	1,06	0,10	0,14
ET0(mm/month)	61,70	56,63	0,02	155	44,66	0,72

III.5. Standardisation des données

Pour garantir la cohérence des données climatiques, différentes méthodes peuvent être mises en œuvre. Dans certains cas, les chercheurs corrigent directement les séries de données en se basant sur les informations disponibles, comme les métadonnées, les différences entre instruments ou les changements connus dans le matériel utilisé [37]. Cette approche fonctionne bien lorsque les données sont fiables et bien documentées.

Cependant, il arrive souvent que ces informations soient incomplètes ou inexistantes. Dans ce cas, on a recours à des méthodes dites indirectes, qui consistent à comparer les données d'une station avec celles de stations voisines, afin de détecter d'éventuelles anomalies ou ruptures. Ces méthodes sont largement décrites dans plusieurs travaux de recherche [38], [39].

III.6. Métadonnées

Des métadonnées fiables et complètes jouent un rôle essentiel dans la qualité des données climatiques utilisées pour estimer l'évapotranspiration à l'aide de méthodes d'intelligence artificielle. Elles permettent de s'assurer que les données ont été collectées dans des conditions cohérentes et contrôlées. Lorsqu'il y a eu des changements dans les conditions d'observation comme un déplacement de la station, un changement d'équipement ou de protocole les métadonnées permettent de retracer l'historique de la station.

Grâce à ces informations, on peut repérer et corriger d'éventuelles ruptures dans les séries de données, ce qui est crucial pour éviter d'introduire des biais dans les modèles. Les métadonnées peuvent prendre différentes formes : rapports techniques, photos des installations, journaux de bord, ou encore témoignages du personnel sur place [37].

III.7. Séries de référence et séries voisines pour la comparaison

Lorsqu'on analyse des données climatiques dans le but d'estimer l'évapotranspiration à l'aide de méthodes d'intelligence artificielle, il est crucial de prendre en compte les inhomogénéités que peuvent contenir les séries chronologiques. Ces irrégularités dues, par exemple, à un changement de capteur ou au déplacement d'une station peuvent parfois avoir une amplitude comparable aux vraies variations du climat, ce qui risque d'altérer la fiabilité des résultats obtenus par les modèles.

Pour identifier et corriger ces inhomogénéités, on compare généralement la série concernée (appelée série de base) à d'autres séries issues de stations voisines, situées dans la même zone climatique. Ces séries voisines doivent être elles-mêmes homogènes et exposées à des conditions climatiques similaires. Cependant, si toutes les stations de la région ont subi le même type de changement, cette méthode perd en efficacité.

Pour limiter ce problème, il est recommandé d'utiliser plusieurs séries voisines en parallèle. Certains chercheurs vont plus loin en construisant une série de référence synthétique, obtenue en combinant plusieurs séries voisines de manière pondérée. Ces pondérations sont calculées en fonction des coefficients de corrélation entre les séries différenciées, ce qui permet d'augmenter la fiabilité de la détection des ruptures et d'améliorer la qualité de l'analyse.

III.8. Méthodes d'homogénéisation des données climatiques

L'homogénéisation des données climatiques constitue une étape essentielle avant toute modélisation, notamment dans le cadre de l'estimation de l'évapotranspiration à l'aide de techniques d'intelligence artificielle. Cette étape permet de corriger les discontinuités éventuelles dans les séries temporelles, qui pourraient sinon biaiser les résultats des modèles prédictifs.

Plusieurs méthodes d'homogénéisation ont été développées afin de s'adapter à la nature des variables climatiques à corriger, à la variabilité spatiale et temporelle des données selon l'emplacement des stations, à la longueur des séries, au taux de données manquantes, à la disponibilité des métadonnées, ainsi qu'à la densité du réseau d'observation. Ces techniques diffèrent également selon les objectifs poursuivis et les choix méthodologiques des équipes de recherche.

De manière générale, les méthodes d'homogénéisation peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Méthodes subjectives : lorsque l'identification des ruptures se fait visuellement à partir de graphiques, même si des tests statistiques sont ensuite appliqués.
- Méthodes objectives : qui reposent sur des algorithmes ou des tests statistiques indépendants du jugement de l'utilisateur.

Parmi les méthodes objectives les plus couramment utilisées, on peut citer :

- Le test d'homogénéité normal standard [Alexandersson, 1986 ; Khaliq et Ouarda, 2007] ;

- La régression multiple [Vincent, 1998] ;
- La régression en deux phases [Easterling et Peterson, 1995 ; Lund et Reeves, 2002] ;
- Le test bivarié [Maronna et Yohai, 1978 ; Potter, 1981] ;
- Le test de Wilcoxon séquentiel [Karl et Williams, 1987 ; Lanzante, 1996 ; Ducré-Robitaille et al., 2003] ;
- Le test t séquentiel [Gullett et al., 1990]
- La méthode de Jaruskova [Jaruskova, 1996]
- L'approche bayésienne [Rasmussen, 2001].

L'application rigoureuse de ces méthodes permet d'assurer la qualité et la fiabilité des données météorologiques avant leur intégration dans des modèles d'IA, et ainsi d'améliorer la précision de l'estimation de l'évapotranspiration.

III.9. Principales causes des inhomogénéités

Lorsqu'on travaille avec des données climatiques pour estimer l'évapotranspiration à l'aide de méthodes d'intelligence artificielle, il est important de savoir que ces données peuvent parfois présenter des irrégularités, appelées inhomogénéités. Ces irrégularités ne sont pas liées à des changements climatiques réels, mais à des modifications dans la façon dont les données ont été collectées au fil du temps.

Par exemple, un changement dans les horaires d'enregistrement, une nouvelle méthode de calcul ou même une simple mise à jour du matériel de mesure peut entraîner des écarts dans les séries de température, d'humidité, de rayonnement solaire ou de vitesse du vent autant de variables essentielles dans le calcul de l'évapotranspiration.

L'une des causes les plus fréquentes de ces perturbations est le déplacement de la station météorologique. Ce changement, souvent accompagné d'une nouvelle instrumentation, d'un autre environnement ou d'un nouvel opérateur, peut fortement influencer les valeurs mesurées. Si ces ruptures ne sont pas détectées et corrigées, elles risquent de fausser les résultats des modèles d'intelligence artificielle, qui se basent sur la régularité et la qualité des données d'entrée [40].

III.10. Vérification de l'homogénéité des données : le test de Wilcoxon

Parmi les différentes méthodes utilisées pour détecter des ruptures dans les séries climatiques, le test de Wilcoxon constitue un outil simple et efficace. Ce test non paramétrique, introduit par Frank Wilcoxon en 1945 [41] est largement diffusé grâce aux travaux de Sidney Siegel dans les années 1950 [42], est particulièrement utile pour comparer deux périodes au sein d'une même série de données climatiques (par exemple, avant et après une rupture suspectée).

Dans le cadre de ce test, on ne s'appuie pas directement sur les valeurs des observations, mais sur leur classement par ordre croissant. Cela permet de réduire l'influence des valeurs extrêmes ou anormales, ce qui est idéal pour des données climatiques souvent sujettes à des irrégularités.

Concrètement, le test consiste à diviser une série (par exemple, des températures maximales) en deux échantillons : l'un avant une date de rupture supposée, et l'autre après. Après avoir classé toutes les valeurs des deux périodes ensemble, on calcule la somme des rangs associés à l'un des échantillons. Cette somme, notée W , permet ensuite d'évaluer s'il existe une différence significative entre les deux périodes.

Le test de Wilcoxon est d'autant plus utile dans les travaux comme le nôtre, où l'objectif est de fournir à un modèle d'intelligence artificielle des données homogènes et fiables pour l'estimation de l'évapotranspiration. En identifiant les discontinuités ou les anomalies dans les séries climatiques, ce test contribue à améliorer la qualité des données d'entrée et, par conséquent, la performance du modèle.

Nous ne nous intéresserons qu'au rang de chacun des éléments des deux échantillons dans cette série. Si une valeur est répétée plusieurs fois, nous lui associons le rang moyen correspondant. Nous calculons ensuite la somme W_x des rangs des éléments du premier échantillon dans la série commune :

$$W_x = \sum Rang X$$

Wilcoxon constitue une série homogène, la quantité W_x se situe entre deux bornes W_{max} et W_{min} données par les formules suivantes :

$$W_{min} = \frac{(N1+N2+1)N1-1}{2} - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{N1N2(N1+N2+1)}{12}} \quad (III.01)$$

Et

$$W_{max} = (N1 + N2 + 1) - W_{min} \quad (III.02)$$

$Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ Représente la valeur de la variable centrée réduite de la loi normale correspondant à :

- $1 - \frac{\alpha}{2}$ [Au niveau de confiance de 95 %, nous avons].
- $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}=1.96$
- On peut dire que la série est homogène si :

$$Wmin < \sum Rang X < Wmax$$

III.10.1. Résultats du test de Wilcoxon

Les résultats du test de Wilcoxon sur les stations des trois bassins versants, (**Tableau III-7, Tableau III-8, Tableau III-9**) sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau III-7: Résultats du test de Wilcoxon sur les stations de bassin versant du Kébir Rhumel

Paramètre	Wmin	Wmax	$\Sigma rangX$	Inégalité	Observation
Tmax (°C)	45745,73	51764,27	27114	$45745,73 > 27114 < 51764,27$	Non homogène
Tmin (°C)	45745,73	51764,27	28085	$45745,73 > 28085 < 51764,27$	Non homogène
RHmean (%)	45745,73	51764,27	16984	$45745,73 > 16984 < 51764,27$	Non homogène
Rs (MJ/m ² /month)	45745,73	51764,27	26696	$45745,73 > 26696 < 51764,27$	Non homogène
Vitesse du vent (m/s)	45745,73	51764,27	38241	$45745,73 > 38241 < 51764,27$	Non homogène
ET0 (mm/month)	45745,73	51764,27	25489	$45745,73 > 25489 < 51764,27$	Non homogène

Tableau III-8: Résultats du test de Wilcoxon sur les stations de bassin versant du Chélif.

Paramètre	Wmin	Wmax	$\Sigma rangX$	Inégalité	Observation
Tmax (°C)	45015,84	50902,16	36212	$45015,84 > 36212 < 50902,16$	Non homogène

Tmin (°C)	45015,84	50902,16	31524	45015,84 > 31524 < 50902,16	Non homogène
RHmean (%)	45015,84	50902,16	64648	45015,84 < 64648 > 50902,16	Non homogène
Rs (MJ/m²/month)	45015,84	50902,16	30886	45015,84 > 30886 < 50902,16	Non homogène
Vitesse du vent (m/s)	45015,84	50902,16	100983	45015,84 < 100983 > 50902,16	Non homogène

Tableau III-9: Résultats du test de Wilcoxon sur les stations de bassin versant du Soummam

Paramètre	Wmin	Wmax	ΣrangX	Inégalité	Observation
Tmax (°C)	27541,05	31858,95	20542	27541,05 > 20542 < 31858,95	Non homogène
Tmin (°C)	27541,05	31858,95	18588	27541,05 > 18588 < 31858,95	Non homogène
RHmean (%)	27541,05	31858,95	39403	27541,05 < 39403 > 31858,95	Non homogène
Rs (MJ/m²/month)	27541,05	31858,95	18805	27541,05 > 18805 < 31858,95	Non homogène
Vitesse du vent (m/s)	27541,05	31858,95	69671	27541,05 < 69671 > 31858,95	Non homogène
ET0 (mm/month)	27541,05	31858,95	17808	27541,05 > 17808 < 31858,95	Non homogène

Les données climatiques utilisées dans cette étude proviennent du site en ligne de la NASA, reconnu pour la qualité et la couverture spatiale de ses bases de données climatiques à l'échelle globale. Toutefois, l'analyse statistique, notamment à travers le test de Wilcoxon, a révélé une non-homogénéité dans certaines séries temporelles. Cette rupture d'homogénéité peut être attribuée principalement aux effets du changement climatique, qui se traduisent par une modification progressive ou brutale des régimes pluviométriques et thermiques. D'autres facteurs peuvent également contribuer à cette non-homogénéité, tels que les erreurs systématiques liées aux méthodes de ré analyse satellitaire, les variations saisonnières

naturelles, ou encore l'influence d'événements extrêmes (sécheresses prolongées, inondations exceptionnelles, etc.) sur les tendances climatiques régionales.

III.11. Test de Grubbs et Beck horsains

Avant d'analyser les données, il est essentiel de repérer les valeurs qui sortent vraiment de l'ordinaire, appelées valeurs aberrantes. Leurs présences peuvent fausser les résultats et rendre les prévisions moins précises. Pour éviter cela, plusieurs tests ont été utilisés pour les détecter et les retirer.

Parmi ces tests, le test de Grubbs, proposé par [43] et recommandé par l'ISO, est très utilisé. Ce test est simple à mettre en œuvre : il utilise la moyenne et l'écart type des données. Il sert à vérifier si une valeur jugée étrange est réellement une anomalie ou non. Pour cela, on compare le résultat du test à une valeur de référence. Si le résultat est plus petit, alors on considère que la valeur est bien une valeur aberrante [44].

Ce test a été appliqué, entre autres, pour identifier les valeurs extrêmes dans les séries de crues. Les différentes versions du test de Grubbs (1950, 1969, 1972) permettent de détecter soit la plus grande valeur, soit la plus petite, ou même les deux à la fois (dans le cas du test double). Le test suppose que les données suivent une distribution normale, c'est-à-dire une répartition équilibrée autour de la moyenne.

Les valeurs singulières appelées horsains sont déduites en calculant la statistique suivante :

$$X_{max} = (\bar{X} + S) * K_n \quad \text{(III.03)}$$

$$X_{min} = (\bar{X} - S) * K_n \quad \text{(III.04)}$$

$\bar{X}$ et S : Sont, respectivement, la moyenne et l'écart type des logarithmes naturels des éléments constituant l'échantillon.

K_n : Valeur statistique du test de Grubbs et Beck, tabulée pour différentes tailles d'échantillon et niveaux de signification.

Au niveau de risque de 5 %, l'approximation polynomiale suivante a été proposée par [45].

III.11.1. Résultats des tests de Grubbs et Beck

Les résultats du test de Grubbs et Beck sur les stations des trois bassins versants sont présentés dans les tableaux suivants : (**Tableau III-10, Tableau III-11, Tableau III-12**)

Tableau III-10: Test de représentativité du cas de Grubbs et Beck du bassin versant de Kébir Rhumel

	Tmax	Tmin	RHmean	Rs	Vitesse du vent	ET0
--	------	------	--------	----	-----------------	-----

N	489	489	489	489	489	489
Xmax	127,85	40,48	251,58	1674,09	8,49	515,51
Xmin	75,46	2,63	177,58	790,07	6,30	85,08
Kn; 0,05	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21

Tableau III-11: Test de représentativité du cas de Grubbs et Beck du bassin versant de Chélif

	Tmax	Tmin	RHmean	Rs	Vitesse du vent	ET0
N	481	481	481	481	481	481
Xmax	121,4793	38,3321	251,58	1587,898	7,864958	474,934
Xmin	74,50567	-1,49224	177,58	740,3507	5,87224	82,63368
Kn; 0,05	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21

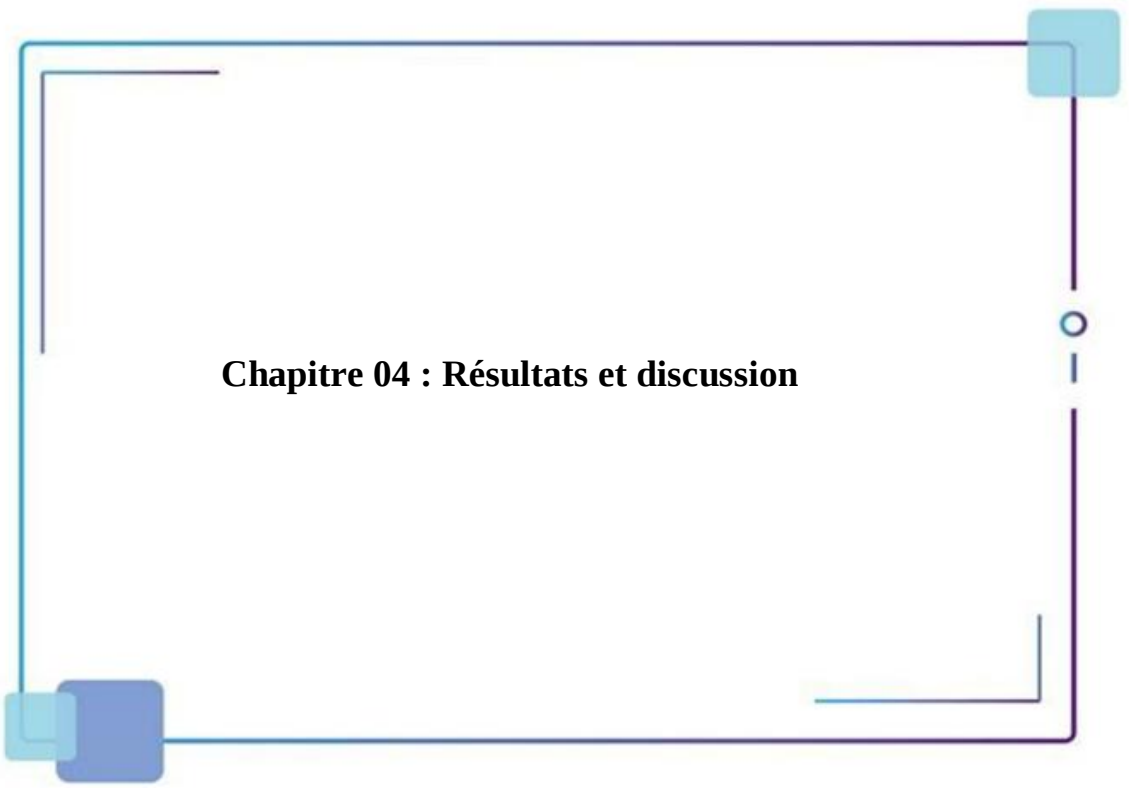
Tableau III-12: Test de représentativité du cas de Grubbs et Beck du bassin versant de Soummam

	Tmax	Tmin	RHmean	Rs	Vitesse du vent	ET0
N	395	395	395	395	395	395
Xmax	121,513	39,25	242,763	1597,74	2,64657	341,42
Xmin	78,8312	5,1798	180,65	849,996	1,98835	54,6749
Kn; 0,05	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21

Conclusion

La collecte et l'analyse critique des données météorologiques sont des étapes essentielles dans le cadre de l'estimation de l'évapotranspiration, notamment lorsqu'on fait appel à des méthodes d'intelligence artificielle. Les données telles que la température, l'humidité, la vitesse du vent, et le rayonnement solaire fournissent des informations clés sur les conditions climatiques qui influencent directement le processus d'évapotranspiration. Une base de données fiable et bien nettoyée, exempte de valeurs aberrantes, est indispensable pour entraîner des modèles d'IA performants et produire des estimations précises. Grâce à l'application de tests statistiques comme le test de Wilcoxon, le test de Grubbs et Beck, il est possible d'évaluer la

cohérence, la distribution et la qualité des données. Ces analyses permettent non seulement de mieux comprendre la variabilité climatique, mais aussi de renforcer la robustesse des modèles utilisés pour la gestion de l'eau et l'agriculture durable.



Chapitre 04 : Résultats et discussion

Introduction

L'estimation de l'évapotranspiration de référence (ET_0) joue un rôle essentiel dans la gestion durable des ressources en eau, en particulier dans les régions à climat semi-aride comme l'Algérie. Ce besoin devient encore plus pressant dans un contexte de changement climatique et de pression croissante sur les ressources hydriques.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus à partir de l'application de quatre modèles d'intelligence artificielle (IA) à la modélisation de l' ET_0 :

- La régression multiple,
- Les arbres ensachés (Bagging),
- Les machines à vecteurs de support (SVM),
- Les réseaux de neurones artificiels (ANN).

Ces modèles ont été testés sur trois bassins versants algériens :

- Soummam (code 15),
- Kébir Rhumel (code 10),
- Chélif (code 01).

Les données météorologiques utilisées ont été divisées en deux ensembles :

80% pour l'entraînement des modèles et 20% pour leur validation.

La performance de chaque méthode a été évaluée à l'aide de plusieurs indicateurs statistiques :

- **RMSE** (Root Mean Square Error),
- **MAE** (Mean Absolute Error),
- **MRE** (Mean Relative Error),
- **R^2** (coefficient de détermination).

IV.1. Objectifs de ce chapitre

- Utiliser huit combinaisons afin de déterminer celle qui donne les meilleurs résultats, (**Tableau IV-1**)

Tableau IV.1: Les données d'entrées pour chaque combinaison.

Combinaison N°	Données d'entrées	Combinaison N°	Données d'entrées
1	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	5	Tmin, Vitesse du vent
2	Tmax, Tmin	6	Tmax, RHmean, Vitesse du vent
3	Tmean, Tmin, RHmean	7	RHmean, Vitesse du vent
4	Tmean, Tmax, RHmean, Vitesse du vent	8	Tmean, Tmax, Tmin, RHmean, Vitesse du vent

- Comparer les performances des différents modèles en fonction des combinaisons de variables climatiques (température, humidité relative, vitesse du vent).
- Identifier le modèle le plus performant pour chaque bassin versant.
- Analyser les facteurs pouvant influencer les résultats, tels que la qualité des variables d'entrée ou les particularités climatiques de chaque zone.

Les résultats obtenus sont présentés dans : **(Tableau IV-2)**, **(Figure IV-1)** et **(Figure IV-2)**

Bassin versant Chélif

Tableau IV.1: Évaluation des performances des modèles d'IA pour l'estimation de l'ET₀ dans le bassin versant Chélif selon diverses combinaisons de variables climatiques

Combinaison N°	Variables d'entrées	Type de Modèle	RMSE	MAE	MRE	R ²
1	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	9,125	7,589	1,890	0,976
	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	9,057	7,177	0,505	0,976
	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	SVM	9,391	7,799	1,654	0,974

	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	6,609	4,975	0,150	0,987
2	Tmax, Tmin	Régression multiple	9,173	7,365	1,154	0,975
	Tmax, Tmin	Arbres ensachés	8,882	6,881	0,259	0,977
	Tmax, Tmin	SVM	9,512	7,333	0,807	0,973
	Tmax, Tmin	Réseaux neuronaux	5,758	4,770	0,332	0,990
3	Tmean, Tmin, RHmean	Régression multiple	7,666	6,115	1,413	0,983
	Tmean, Tmin, RHmean	Arbres ensachés	9,763	7,889	0,229	0,972
	Tmean, Tmin, RHmean	SVM	9,455	7,107	1,053	0,974
	Tmean, Tmin, RHmean	Réseaux neuronaux	4,605	3,658	0,415	0,994
4	Tmean,Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	6,119	4,960	1,496	0,989
	Tmean,Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	6,739	4,887	0,163	0,987
	Tmean,Tmax,RHmean, Vitesse du vent	SVM	6,585	5,651	1,283	0,987
	Tmean,Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	0,885	0,684	0,070	1,000
5	Tmin, Vitesse du vent	Régression multiple	21,286	15,578	0,906	0,867
	Tmin, Vitesse du vent	Arbres ensachés	26,776	21,198	5,111	0,790
	Tmin, Vitesse du vent	SVM	21,549	15,537	1,175	0,864
	Tmin, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	19,841	14,494	1,918	0,885
6	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	9,125	7,589	1,890	0,976

	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	9,057	7,177	0,505	0,976
	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	SVM	9,391	7,799	1,654	0,974
	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	6,527	4,719	0,123	0,988
7	RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	18,102	14,619	1,689	0,904
	RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	26,199	19,224	1,060	0,799
	RHmean, Vitesse du vent	SVM	19,133	15,306	1,091	0,893
	RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	19,412	14,657	0,635	0,889
8	Toutes les variables	Régression multiple	6,119	4,960	1,496	0,989
	Toutes les variables	Arbres ensachés	6,296	4,616	0,384	0,988
	Toutes les variables	SVM	6,416	5,247	1,246	0,988
	Toutes les variables	Réseaux neuronaux	0,607	0,386	0,321	1,000

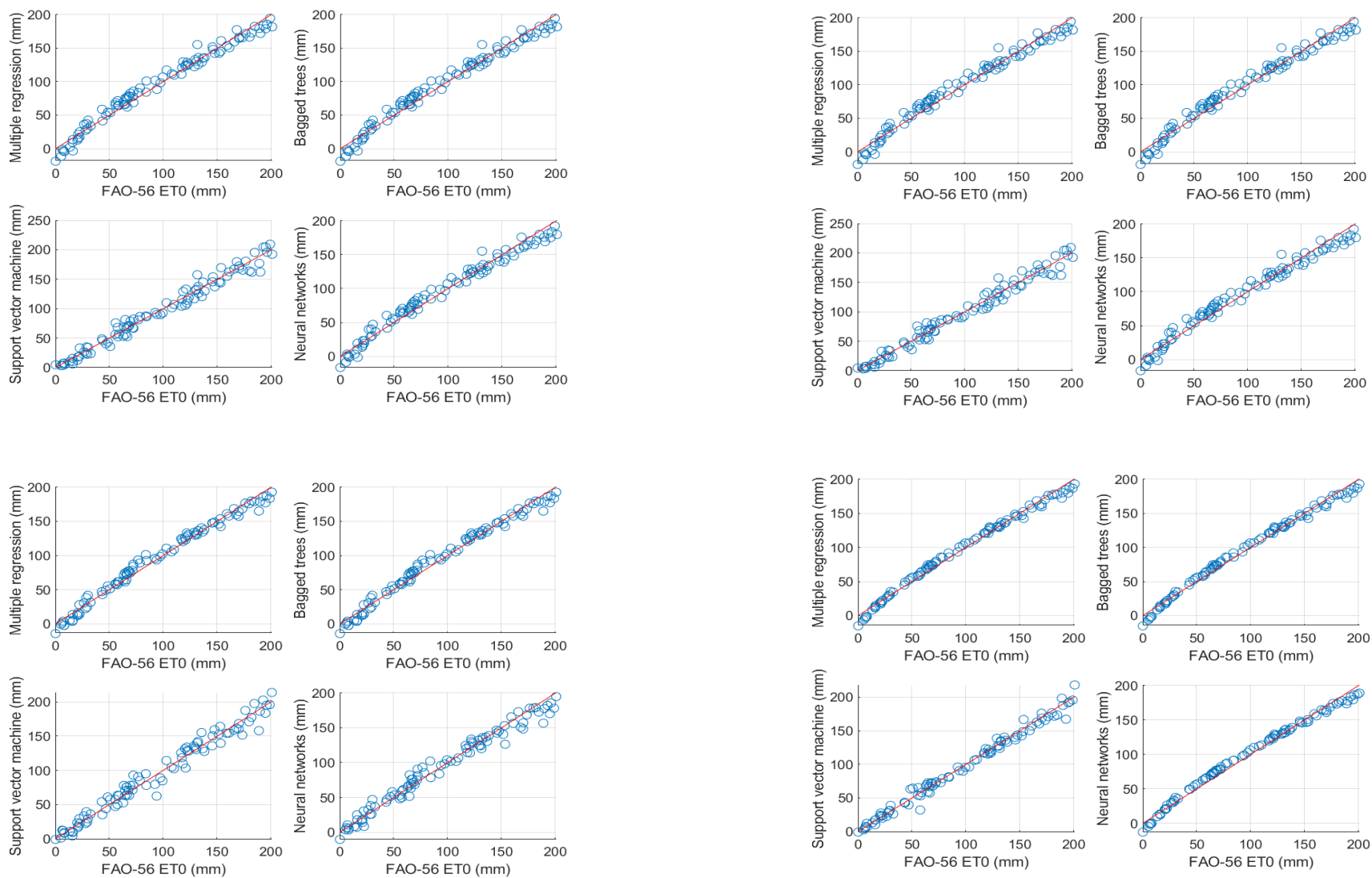


Figure IV-1: Régression IA vs Penman-Monteith – Chélif (modèles 1-4)

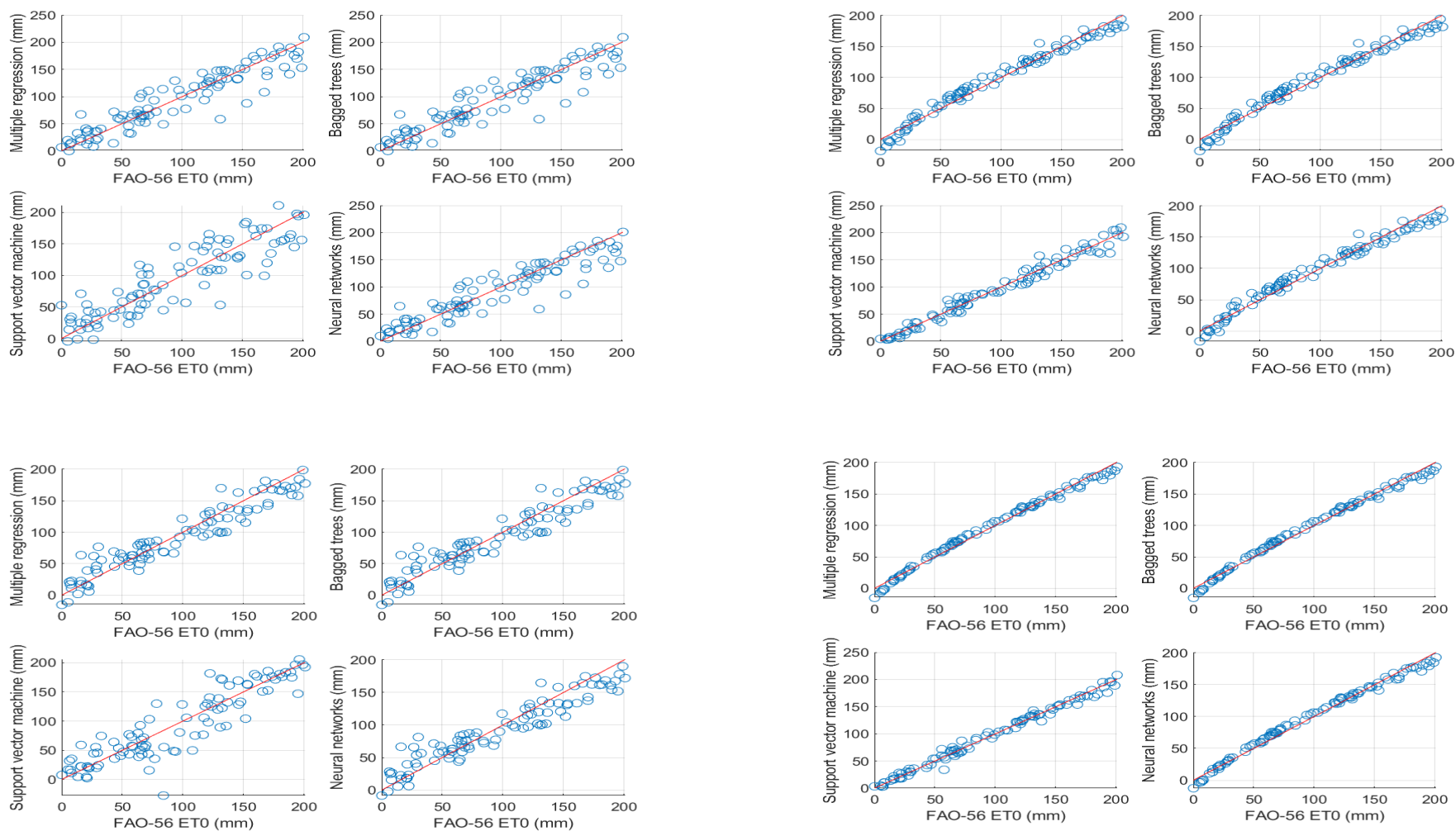


Figure IV-2: Régression IA vs Penman-Monteith – Chélif (modèles 5-8)

IV.2.1. Interprétation des résultats

L'analyse des résultats met en évidence plusieurs points intéressants :

- Les réseaux neuronaux se sont révélés les plus efficaces, en particulier dans le modèle 8 qui inclut toutes les variables climatiques. Ce modèle a atteint un RMSE de 0,607 et un coefficient de détermination R^2 de 1, ce qui montre une précision remarquable.
- Le modèle 4 (qui utilise Tmean, Tmax, RHmean et Vitesse du vent) donne également de très bons résultats avec l'ANN, avec un RMSE de 0,885 et un MAE de 0,684, tout en gardant un R^2 parfait.
- À l'inverse, les modèles plus simplifiés comme le modèle 5 basé uniquement sur Tmin et Vitesse du vent présentent une nette baisse de performance. Par exemple, l'ANN affiche un RMSE supérieur à 19, et même 26,7 pour les arbres ensachés. Cela suggère que ces deux variables ne suffisent pas à elles seules pour estimer correctement l'ETo.
- Enfin, les méthodes intermédiaires comme le SVM ou le Bagging montrent des résultats acceptables, mais restent généralement en dessous des performances obtenues avec les réseaux neuronaux, surtout quand les données sont complexes ou non linéaires.

Les résultats obtenus permettent de tirer plusieurs enseignements clés :

- L'évapotranspiration apparaît comme un processus complexe et clairement non linéaire, influencé par l'interaction entre plusieurs facteurs climatiques.
- C'est précisément cette complexité qui explique la bonne performance des réseaux neuronaux : ils sont capables de capter et modéliser des relations difficiles à représenter avec des approches classiques.
- Lorsque les modèles intègrent un ensemble varié de variables comme la température moyenne, l'humidité relative et la vitesse du vent ils disposent d'une vision plus globale des conditions climatiques, ce qui renforce leur capacité prédictive.
- En revanche, les méthodes plus simples, comme la régression multiple, offrent une précision moindre. Cela dit, elles restent intéressantes dans des situations où la compréhension et l'interprétabilité du modèle sont prioritaires, notamment dans un cadre opérationnel.
- La qualité des données, tout comme leur richesse temporelle (saisons, extrêmes climatiques...), influence également la robustesse des modèles.

IV.3. Bassin versant Soummam

Les résultats obtenus sont présentés dans : **(Tableau IV-3)**, **(Figure IV-3)** et **(Figure IV-4)**

Tableau IV.3: Évaluation des performances des modèles d'IA pour l'estimation de l'ET₀ dans le bassin versant Soummam selon diverses combinaisons de variables climatiques.

Combinaison N°	Variables d'entrées	Type de Modèle	RMSE	MAE	MRE	R2
1	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	7,0702	5,3752	0,5380	0,9714
	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	8,1135	6,0855	0,5556	0,9623
	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	SVM	7,7218	6,0753	0,4793	0,9659
	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	6,3638	4,4899	0,3413	0,9768
2	Tmax, Tmin	Régression multiple	4,3046	3,5568	0,4601	0,9894
	Tmax, Tmin	Arbres ensachés	4,4852	3,2890	0,2994	0,9885
	Tmax, Tmin	SVM	4,3598	3,6594	0,3600	0,9891
	Tmax, Tmin	Réseaux neuronaux	1,8874	1,5970	0,1285	0,9980
3	Tmean, Tmin, RHmean	Régression multiple	4,0811	3,3402	0,3906	0,9905
	Tmean, Tmin, RHmean	Arbres ensachés	3,4705	2,8357	0,1617	0,9931
	Tmean, Tmin, RHmean	SVM	5,4271	4,3229	0,2939	0,9832
	Tmean, Tmin, RHmean	Réseaux neuronaux	1,8444	1,4953	0,1208	0,9981
4	Tmean, Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	3,2213	2,7210	0,4331	0,9941
	Tmean, Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	4,3709	2,9940	0,1482	0,9891

	Tmean,Tmax,RHmean, Vitesse du vent	SVM	4,0522	3,2843	0,2535	0,9906
	Tmean,Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	0,3981	0,2903	0,0266	0,9999
5	Tmin,Vitesse du vent	Régression multiple	12,2217	10,0071	0,9206	0,9145
	Tmin,Vitesse du vent	Arbres ensachés	17,4325	13,3298	1,0599	0,8261
	Tmin,Vitesse du vent	SVM	12,6356	10,3814	0,8662	0,9087
	Tmin,Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	10,9708	8,4690	0,7657	0,9311
6	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	7,0702	5,3752	0,5380	0,9714
	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	8,1135	6,0855	0,5556	0,9623
	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	SVM	7,7218	6,0753	0,4793	0,9659
	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	6,0998	4,4508	0,3482	0,9787
7	RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	23,5999	18,2906	2,0870	0,6814
	RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	33,6499	26,2273	1,8917	0,3522
	RHmean, Vitesse du vent	SVM	23,4986	18,2393	2,1934	0,6841
	RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	23,1283	17,4436	1,8379	0,6940
8	Toutes les variables	Régression multiple	3,2213	2,7210	0,4331	0,9941
	Toutes les variables	Arbres ensachés	3,7755	2,7073	0,1331	0,9918
	Toutes les variables	SVM	3,5069	2,8965	0,2810	0,9930

	Toutes les variables	Réseaux neuronaux	0,4411	0,3384	0,0326	0,9999
--	----------------------	----------------------	--------	--------	--------	--------

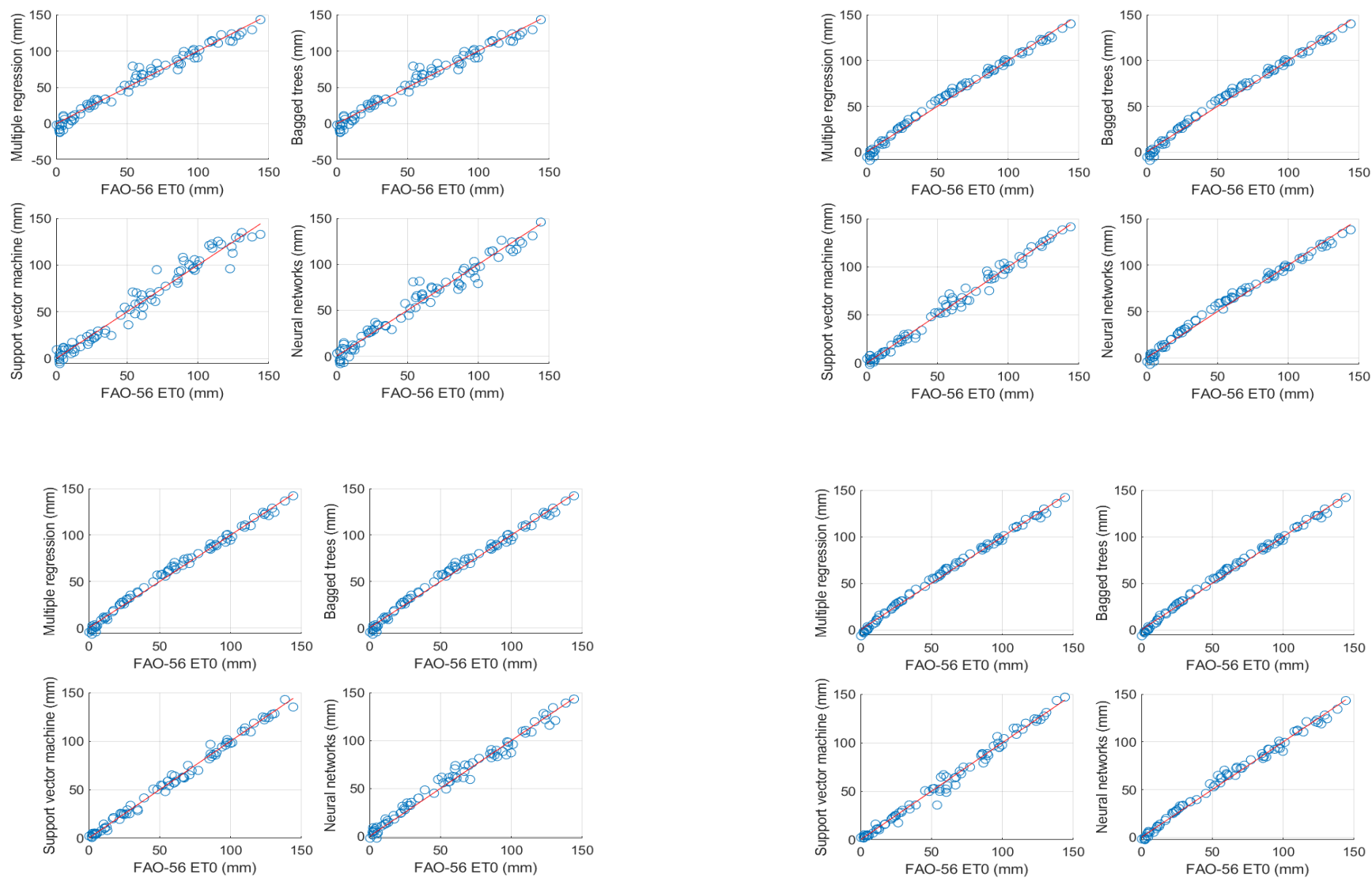


Figure IV-3: Régression IA vs Penman-Monteith – Soummam (modèles 1-4)

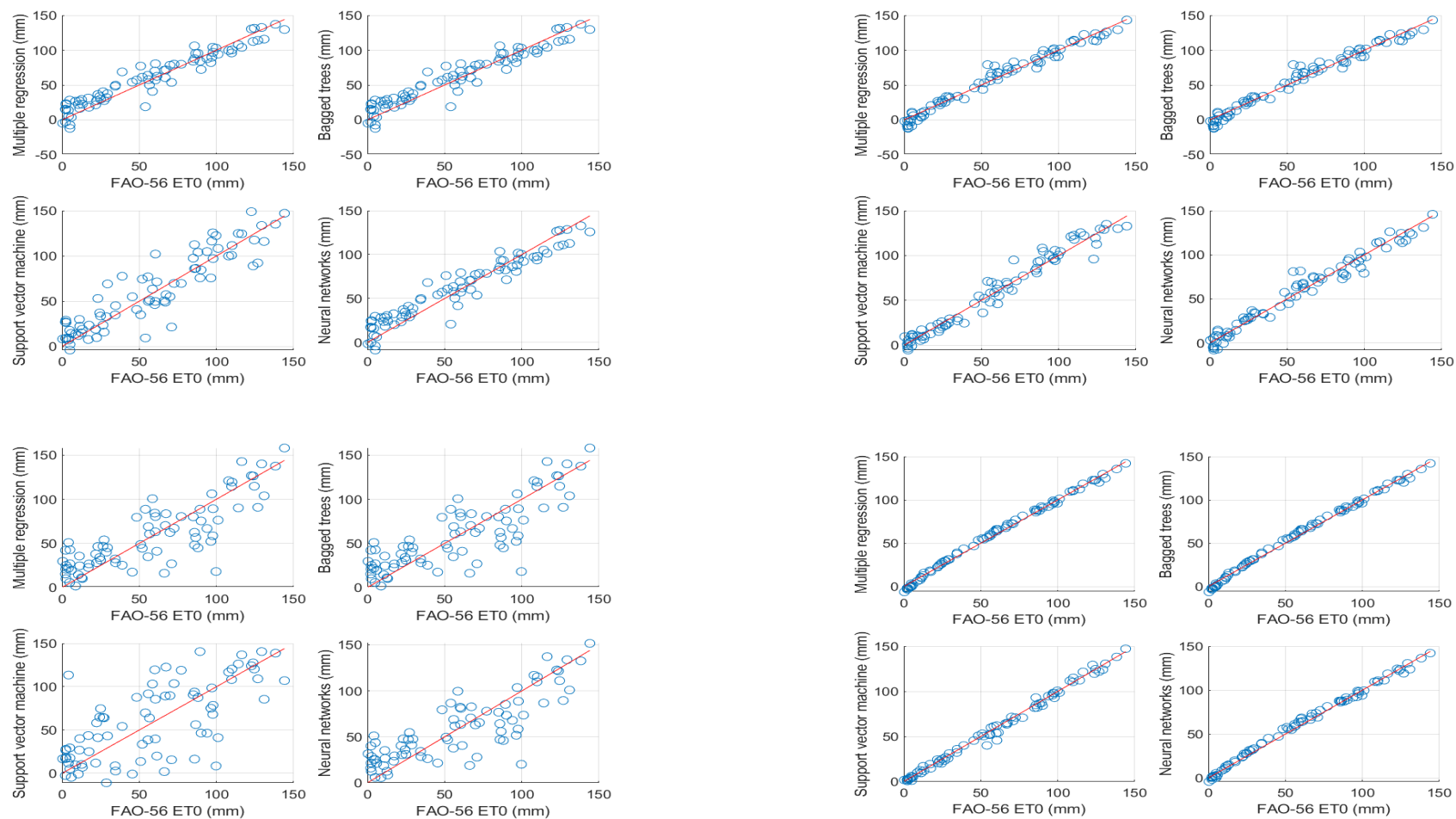


Figure IV-4: Régression IA vs Penman-Monteith – Soummam (modèles 5-8)

IV.3.1. Interprétation des résultats

Dans le bassin du Soummam, les résultats se distinguent par leur grande cohérence et stabilité :

- Le modèle 4 (Tmean, Tmax, RHmean, Vitesse du vent), combiné aux réseaux neuronaux, s'impose comme le plus performant de tous :

RMSE : 0,3981, MAE : 0,2903, MRE : 0,0266, avec un R^2 avoisinant 0,9999.

- Même des modèles plus simples, comme le modèle 2 (Tmax, Tmin) utilisé avec les réseaux neuronaux, affichent des résultats remarquablement bons :

RMSE : 1,8874, R^2 : 0,9980.

- Les méthodes classiques comme la régression multiple ou les arbres ensachés donnent elles aussi des performances très correctes, avec un RMSE généralement inférieur à 5 dans la majorité des cas.

En revanche, lorsque les modèles sont construits avec très peu de variables (par exemple le modèle7, basé seulement sur RHmean et Vitesse du vent), les résultats deviennent nettement moins bons :

RMSE supérieur à 23, R^2 inférieur à 0,7, quel que soit l'algorithme utilisé.

Les performances observées dans le bassin du Soummam suggèrent une configuration climatique particulièrement favorable à la modélisation de l'ET_o :

- Les liens entre les variables climatiques et l'évapotranspiration y semblent forts, peu perturbés par du bruit ou des extrêmes, ce qui facilite l'apprentissage des modèles.
- Le fait que même des approches simples, comme la régression multiple, donnent de bons résultats, montre que les données sont bien structurées et cohérentes, rendant les prédictions fiables, quel que soit l'algorithme choisi.
- Cela dit, les réseaux neuronaux permettent de tirer pleinement parti des interactions complexes entre variables, atteignant ainsi des niveaux de précision presque parfaits.

IV.4. Bassin versant Kébir Rhumel

Les résultats obtenus sont présentés dans : (Tableau IV-4), (Figure IV-5) et (Figure IV-6)

Tableau IV.4: Évaluation des performances des modèles d'IA pour l'estimation de l'ET₀ dans le bassin versant Kébir Rhumel selon diverses combinaisons de variables climatiques.

Combinaison N°	Variables d'entrées	Type de Modèle	RMS E	MAE	MRE	R2
1	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	9,719	8,225	0,340	0,982
	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	7,564	5,900	0,110	0,989
	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	SVM	9,741	8,134	0,263	0,982
	Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	5,772	4,205	0,082	0,994
2	Tmax, Tmin	Régression multiple	11,440	9,691	0,336	0,975
	Tmax, Tmin	Arbres ensachés	8,697	6,905	0,130	0,985
	Tmax, Tmin	SVM	12,067	9,710	0,243	0,972
	Tmax, Tmin	Réseaux neuronaux	5,975	4,697	0,109	0,993
3	Tmean, Tmin, RHmean	Régression multiple	7,691	6,277	0,261	0,988
	Tmean, Tmin, RHmean	Arbres ensachés	7,235	5,634	0,128	0,990
	Tmean, Tmin, RHmean	SVM	8,046	6,318	0,183	0,987
	Tmean, Tmin, RHmean	Réseaux neuronaux	3,852	3,064	0,098	0,997
4	Tmean, Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	6,580	5,534	0,270	0,992

	Tmean, Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	5,007	3,667	0,082	0,995
	Tmean, Tmax, RHmean, Vitesse du vent	SVM	7,198	6,204	0,224	0,990
	Tmean, Tmax, RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	0,421	0,333	0,011	1,000
5	Tmin, Vitesse du vent	Régression multiple	20,965	16,68 5	0,400	0,914
	Tmin, Vitesse du vent	Arbres ensachés	30,485	21,84 6	0,620	0,819
	Tmin, Vitesse du vent	SVM	22,369	18,10 3	0,456	0,903
	Tmin, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	20,859	16,06 3	0,439	0,915
6	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	9,719	8,225	0,340	0,982
	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	7,564	5,900	0,110	0,989
	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	SVM	9,741	8,134	0,263	0,982
	Tmax,RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	5,650	4,061	0,070	0,994
7	RHmean, Vitesse du vent	Régression multiple	18,317	14,54 5	0,469	0,935
	RHmean, Vitesse du vent	Arbres ensachés	24,630	18,73 0	0,428	0,882
	RHmean, Vitesse du vent	SVM	18,965	15,05 1	0,494	0,930
	RHmean, Vitesse du vent	Réseaux neuronaux	17,895	13,76 4	0,422	0,938

8	Toutes les variables	Régression multiple	6,580	5,534	0,270	0,992
	Toutes les variables	Arbres ensachés	5,570	4,144	0,089	0,994
	Toutes les variables	SVM	6,645	5,709	0,222	0,991
	Toutes les variables	Réseaux neuronaux	0,511	0,408	0,015	1,000

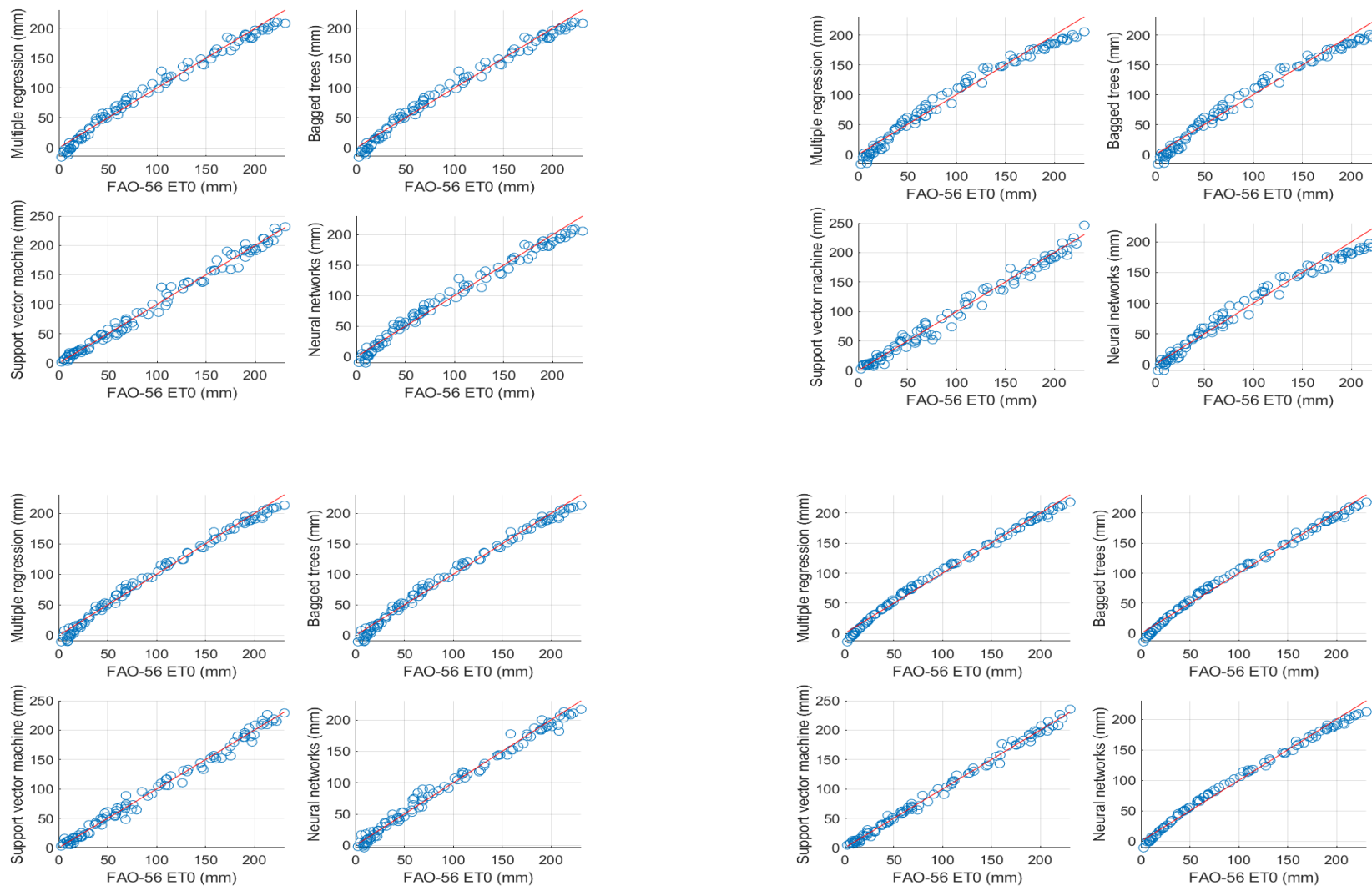


Figure IV-5: Régression IA vs Penman-Monteith – Kébir Rhumel (modèles 1-4)

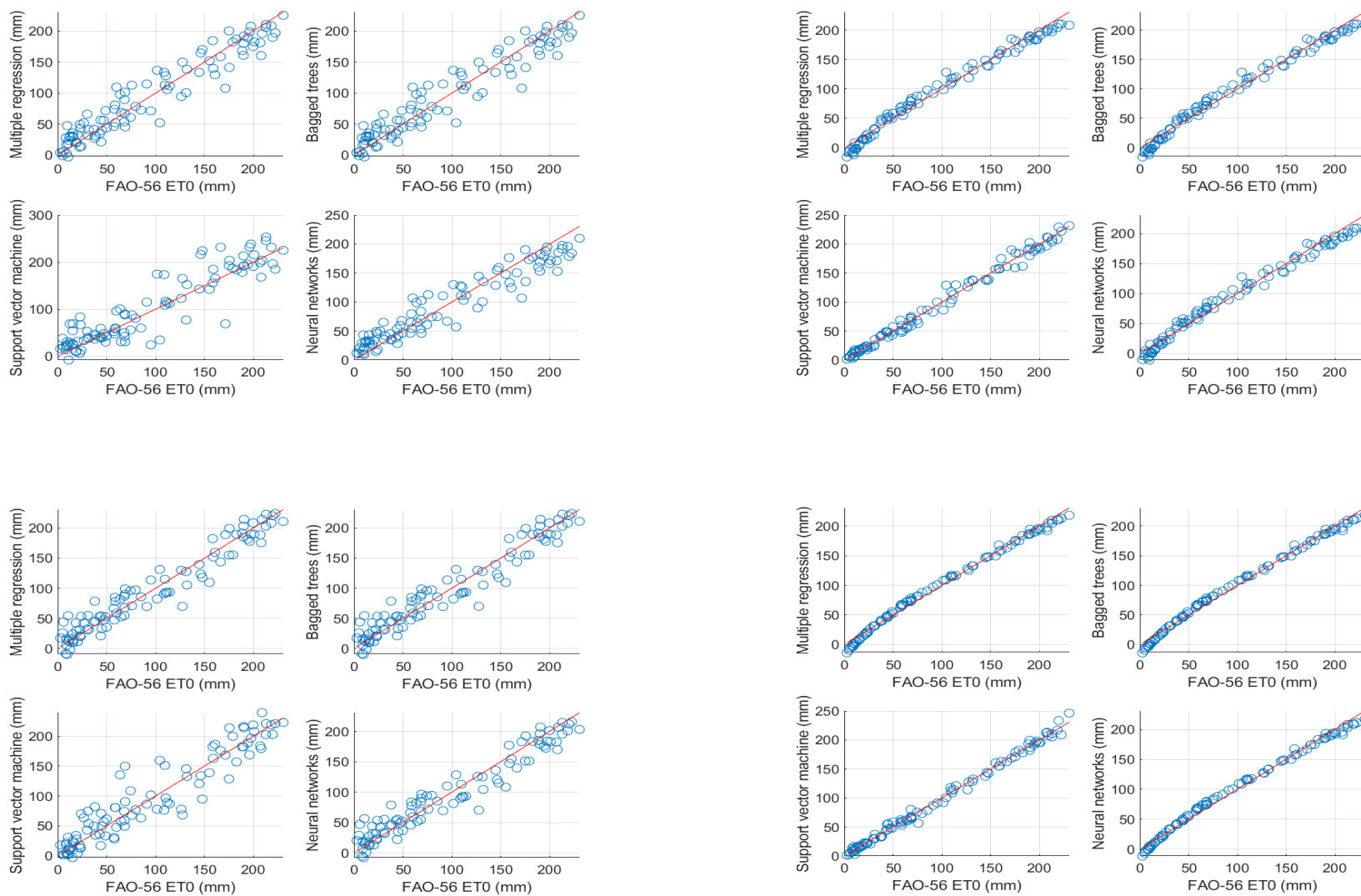


Figure IV-6: Régression IA vs Penman-Monteith – Kébir Rhumel (modèles 5-8)

IV.4.1. Interprétation des résultats

- Le modèle 4 (Tmean, Tmax, RHmean, Vitesse du vent) appliqué avec les réseaux de neurones donne d'excellents résultats :
 - $RMSE = 0,421$, $MAE = 0,333$, $R^2 = 1,000$.
- Dans ce bassin, les arbres ensachés (Bagging) sont également performants, surtout avec des modèles riches en variables :
 - Par exemple, avec le modèle 4, on obtient $RMSE = 5,007$ et $R^2 = 0,995$.
- En revanche, les modèles simples, comme le modèle 5 (Tmin + Vitesse du vent), donnent de très mauvaises performances :
 - $RMSE$ supérieur à 20 pour tous les algorithmes. Cela montre que ces variables seules ne suffisent pas à estimer correctement l'ET₀.
- Les modèles linéaires (comme la régression multiple) sont moins efficaces dans cette région, ce qui indique une relation plus complexe entre les variables climatiques et l'ET₀.
- Le climat du bassin du Kébir Rhumel est influencé par des facteurs variés : saisons marquées, humidité, brouillard, et différences géographiques.
Cela rend la modélisation plus difficile que dans les autres bassins.
- Les réseaux de neurones restent les plus efficaces, mais l'écart avec les arbres ensachés est plus petit ici.
Cela peut s'expliquer par des relations partiellement linéaires dans certaines zones.
- Ce bassin est aussi plus sensible aux erreurs ou aux données manquantes, ce qui nécessite une validation plus rigoureuse des modèles.

Conclusion

L'estimation de l'évapotranspiration de référence (ET_0) par des approches d'intelligence artificielle révèle des performances variables selon les caractéristiques climatiques et géographiques de chaque bassin versant.

Dans le bassin du Chélif, marqué par une forte variabilité climatique, les réseaux de neurones combinés à un ensemble étendu de variables (notamment dans les modèles 4 ou 8) s'imposent comme l'approche la plus fiable. Leur capacité à capter la complexité des interactions climatiques en fait un choix privilégié pour des estimations précises de l' ET_0 , même si d'autres modèles peuvent rester pertinents pour des cas d'usage spécifiques. Le bassin du Soummam, quant à lui, offre un contexte plus homogène et stable, permettant l'obtention de résultats très satisfaisants même avec des modèles relativement simples. Cela en fait un environnement favorable à l'expérimentation de nouvelles architectures ou de combinaisons hybrides. Ici, le choix du modèle repose davantage sur des considérations pratiques telles que la vitesse de calcul, les ressources disponibles ou la simplicité d'implémentation que sur les seules performances.

Enfin, dans le bassin du Kébir Rhumel, la complexité climatique exige des modèles puissants et adaptatifs. Les réseaux de neurones y fournissent les meilleures estimations, mais les arbres ensachés (bagged trees) représentent une alternative intéressante, en particulier en cas de limitations informatiques. Il serait pertinent d'explorer des approches hybrides ou spécifiques à chaque sous-région pour affiner encore davantage les résultats.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment que l'intelligence artificielle constitue un outil robuste pour l'estimation de l' ET_0 , à condition de bien adapter le choix du modèle au contexte local et aux objectifs d'application.

Conclusion générale

Dans un contexte où les impacts du réchauffement climatique se font de plus en plus ressentir, la question de la régulation de l'eau s'avère cruciale, particulièrement dans des régions telles que l'Algérie, qui sont marquées par un climat semi-aride. L'évapotranspiration, représentant la quantité d'eau éliminée par l'évaporation du sol et par la transpiration des végétaux, constitue un élément essentiel pour saisir le cycle de l'eau et optimiser la gestion de nos ressources en eau. Une estimation précise de ce paramètre facilite l'optimisation de l'irrigation, le pronostic des sécheresses et une meilleure gestion de l'eau.

Des techniques classiques telles que celle de Penman-Monteith, malgré leur efficacité et leur validation scientifique, sont souvent tributaires d'une multitude de données climatiques exactes et exhaustives. Cependant, dans diverses zones de l'Algérie, ces informations sont soit restreintes, soit de qualité inégale. C'est pourquoi nous avons décidé d'explorer une alternative : celle de l'intelligence artificielle, de plus en plus employée dans les domaines scientifiques pour surmonter les contraintes des méthodes conventionnelles.

Dans le cadre de cette étude, nous avons exploré l'opportunité d'évaluer l'évapotranspiration à travers des méthodes d'intelligence artificielle, en particulier l'usage des réseaux de neurones artificiels (ANN). Cette méthode fait appel à la faculté de ces modèles à déduire de manière autonome les liens entre les variables, même en présence de données manquantes ou perturbées. Trois bassins versants en Algérie ont été sélectionnés comme sites d'étude : Kébir-Rhumel, Chélif et Soummam. Nous les avons choisis pour leur variété géographique et climatique, ce qui nous a autorisés à évaluer l'efficacité des modèles dans divers environnements.

L'approche a débuté par la collecte et le traitement des données météorologiques (température, humidité, vitesse du vent, rayonnement solaire, etc.). Des tests statistiques ont été utilisés pour détecter les valeurs hors norme afin d'assurer la qualité des données. Par la suite, les modèles d'intelligence artificielle ont été élaborés, formés et évalués. Les conclusions ont démontré que les évaluations réalisées par les réseaux de neurones étaient généralement satisfaisantes et se rapprochaient de celles dérivées de la méthode de référence. Dans certaines situations, elles se sont même avérées plus stables.

Cette étude a démontré que l'intelligence artificielle peut avoir une importance notable dans l'estimation de l'évapotranspiration, surtout dans les zones où les données sont limitées ou insuffisantes. Cependant, il y a toujours des points à améliorer. Par exemple, l'intégration de

stations de mesure supplémentaires, l'utilisation de données satellitaires ou la combinaison de divers modèles pourraient apporter des résultats plus forts.

Au-delà des chiffres et des résultats, cette étude montre à quel point l'innovation technologique peut aider à résoudre des problèmes concrets liés à la gestion de l'eau. Elle ouvre aussi la voie à de futurs travaux qui pourraient inclure d'autres régions du pays, utiliser des techniques plus avancées comme le deep learning, ou encore intégrer ces modèles dans des outils opérationnels destinés aux ingénieurs, aux agriculteurs ou aux décideurs.

En somme, ce mémoire est une première étape modeste mais importante vers une approche plus intelligente, plus moderne et plus durable de la gestion de l'eau en Algérie. Il met en lumière la force de l'intelligence artificielle lorsqu'elle est bien utilisée, et souligne l'importance de continuer à innover pour mieux protéger nos ressources naturelles.

Bibliographie

- [1] B. H., «Contribution à l'étude de la productivité des parcours steppiques de la région de Tlemcen. Mémoire de Master en Foresterie. Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen,» *Département des Sciences de l'Agronomie et des Forêts. Faculté des Sciences de la Nature et de Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers.*, p. 65p., 2014.
- [2] R. K. Sinha, «Modern Plant Physiology,» *CRC Press. ISBN 978-08493-1714-9.*, 01 01 2004.
- [3] R. P. L. S. H. T. A. a. J. E. Allen, «Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy, *Agr. Water Manage.*,» 98, 899-920, , [En ligne]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>, 2011..
- [4] Lu, Jianbiao, et al, «A Comparison of Six Potential Evapotranspiration Methods for Regional Use in the Southeastern United States.,» *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 41.3: , 2005, pp. pp 621-633..
- [5] CHARLES, Riou., *La détermination pratique de l'évaporation. Application*, 1975.
- [6] «Travaux pratiques du cours d'hydrogéologie, Cycle hydrologique et bilans en eau d'un bassin,» Université de liège., P7.
- [7] LABORDE, J.P. Sophia, A., «éléments d'hydrologie de surface,» *U.M.R. 5651 "Espace" du C.N.R.S.*, , p. p204., 2000..
- [8] B. I., «Elément pour l'étude du climat et la bioclimatologie,» *Document reneotupé INA. Paris*, p. p101., (1978).
- [9] BONNET, M. DELAROZIERE, O. BOUILLIN, CI. JUSSRAND, ROUX. P, «Calcul automatique des bilans d'eau mensuels et annuels par les méthodes de thornthwaite et de turc,» *BRGM, PARIS*, p. p21, 1970.
- [10] L. N., «Contribution à la conception d'un évaporomètre a surface poreuse.,» *Thèse Ing.Agr., INA,Al harrach.*, (1991).
- [11] J. RIQUIER, «Formule d'évapotranspiration,» *En Annexes tables utilisables, Madagascar.*, p. p18.
- [12] BEN MANSOUR. S, KORICHI, R., «de l'évapotranspiration réelle liée à l'évapotranspiration potentielle et à la production agricole phœnicicole à l'échelle de l'écosystème de l'ITAS.,» *university kasdi merbah, Ouargla*, p. P 97, 2013.
- [13] M. MJEJRA, «Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de l'Oued Mejerda (en Tunisie),» *apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique.*, pp. Thèse pp 13-14, (2015).
- [14] O. M. P. Charles, «Les réseaux d'irrigation téhorie, Thechnique et économie des arrosages,» *boulevard saint germain, paris*, p. p141, 1983.
- [15] E. Valérie Borrelli, «L'évapotranspiration,» *Université Montpellier*, p. p23, 2011.
- [16] OUTELDJAOUI, F. BESSENASSE, M. GUENDOUZ., «Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa),» *Université Saad Dahl ab, BLIDA*, p. P116, 2011.
- [17] ANDRE, M. CHRISTOPHE, H., «Hydrologie une science de la nature,» *presses polytechniques et universel la mature sitaires romandes*, p. p 310, 2004..
- [18] ANCHTIL, F. ROUSELLE, J. LOUZON, N, «Hydrologie presse Internationale polytechnique,» *CANNADA*, p. P 317, 2007.

- [19] «évaluation des quantités nécessaires aux irrigations,» *Ministère de l'agriculture C.T.G.R.E.F, Afrique*, p. p300, 1979.
- [20] C. R., «La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale.,» *ORSTOM. Paris* , pp. pp 27-67. , 1975.
- [21] Özgür, A., & Yamaç, S. S., « Modelling of daily reference evapotranspiration using deep neural network in different climates.,» *arXiv preprint arXiv:2006.01760*, (2020).
- [22] S. w, «Quantification des Rejets des eaux résiduaires de la région de Mila et leurs impacts sur la retenue du barrage de Beni Haroun.,» *mémoire du diplôme de Master2 : Université Larbi Ben M'hidi– OUM EL BOUAGHI* , p. 108 P, ,2012 .
- [23] ABH, «Les Châliers d'agence le bassin du Kébir Rhumel,» , *Agence de Bassin Hydrographique constantinois Seybousse Mellegue. Constantinois*,, p. 34 P, 2004.
- [24] ABH, « Les châliers d'agence le bassin du Kébir Rhumel,» *Agence de Bassin hydrographique constantinois Seybousse Mellegue* , , p. 25P., 1999..
- [25] M. A. SEKHERI R, «Régionalisation des paramètres climatiques, cas du bassin versant Kébir-Rhumel, Nord-Est de l'Algérie.,» *Mila mémoire du diplôme de Master 2 : Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf Mila*, p. 120 P, 2020.
- [26] Marouf N, «Etude de Qualité des eaux et de transport solide dans le Barage de Beni Haroun Mila,» *Mouhamed Khider Biskra ,Thèse de doctorat d'état*, p. 242 P., 2012 .
- [27] A. .. Mebarki, « Le bassin du Kébir-Rhumel (Algérie). Hydrologie de surface et Aménagement des ressources en eau.,» *Thèse doctorat de 3ème cycle. Université de Nancy II* , , p. 304p., (1982).
- [28] M. Melghit, « Qualité physico-chimique pollution organique et métallique des compartiments eau/sédiments de l'Oued Rhumel et des barrages Hammam Grouz et Beni Haroun.,» *Diplôme de magister spécialité gestion des déchets. Université Mentouri Constantin* , . (2012).
- [29] El-Hadef-El-Okki, M. , « Etude des relations Lumbricidae-éléments traces métalliques en conditions naturelles et contrôlées.,» *Thèse de doctorat option Pollution et Ecotoxicologie. Université Frère Mentouri Constantine*, p. . 272p, (2016)..
- [30] A. Moali, «Fiche descriptive Ramsar de la vallée de l'oued Soummam.,» *Département de Biologie des Organismes et des Populations, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université A. Mira de Béjaia, Algérie.*, p. p. 10, 2014.
- [31] D. Gomer, «Écoulement et érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen.,» *Traduction française (Paschen H. et Vogt H.). Collab. Agence Nationale Ressources Hydrauliques (Algérie) GTZ (Allemagne) dans le cadre du "Projet Pilote d'Aménagement Intégré du BV de l'Oued Mina"*, vol. vol. 25, p. 207p, 1994.
- [32] MEHAIGUENE, MADJID. , «Bilan hydrologique et ressources en eau de surface du bassin Cheliff-Zahrez.,» *Thèse de doctorat. MEDDI Mohamed.*, 2005. .
- [33] M. O. FAH, «Etude Hydrologique Du Bassin Versant De La Soummam.,» *Mémoire de Master, Université de Mohamed Boudiaf - M'sila.*, (2016) .
- [34] B. e. MAZOU.M, « Hydrodynamique Des Eaux Souterraines De La Basse Soummam.,» *Mémoire de Master, Université de A. MIRA-BEJAIA.*, (2020).
- [35] L. MOUNI, « Etude et caractérisation physico-chimique des rejets dans l'oued Soummam.,» *Thèse de magister : université A. Mira de Bejaia.*, p. 145p., 2004..

- [36] A. .. AKDIM, « Traitement des séries chronologiques pluie-débit pour la mise en évidence des impacts climatique et humain sur le bassin versant de la Soummam.,» *Thèse de magister: université de waraguela.*, p. 185p. , 2012.
- [37] PETERSON, T.C., EASTERLING, D.R., Karl, T.R., Groisman, P., Nicholls, N., Plummer, N., Torok, S., Auer, I., Boehm, R., Gullett, D., Vincent, L., Heino, R., Tuomenvirta, H., Mestre, O., Szentimrey, T., Salinger, J., Forland, E.J., Hanssen-Bauer, I., Alexande.
- [38] AGUILAR, E., AUER, I., BRUNET, M., PETERSON, T.C., WIERINGA, J. , «Guidelines on climate meta data and homogenization.,» *WMO- TD No. 1186, World Meteorological Organization, Geneva, Switzer land.*, (2003) .
- [39] C. O. T. S. O. BEAULIEU, «Synthèse des techniques d'homogénéisation des séries climatiques et analyse d'applicabilité aux séries de précipitations.,» *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques* 52 (1), 18-37., (2007) .
- [40] O. MESTRE, «Méthodes statistiques pour l'homogénéisation des données climatiques.,» *Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.*, (2000) .
- [41] F. WILCOXON, «Individual comparisons by ranking methods.,» (*PDF*). *Biometrics Bulletin.* 1 (6): 80–83., Dec 1945.
- [42] S. SIEGEL, « Non-parametric statistics for the behavioral sciences. New York : McGraw-Hill.,» p. pp. 75–83., (1956)..
- [43] F. GRUBBS, « Sample criteria for testing outlying observations.,» *Ann. Math. Stat.* 21 (1), 27–58., 1950..
- [44] COHN, T, ENGLAND, J., BERENBROCK, C., MASON, R., STEDINGER, J.,.
- [45] PAF, «Analyse quantitative de problème de gestion Louis Houde.,» *Department de Mathématiques ET d'informatique University du Québec à Trois-Rivières*, 2010 .

<https://www.sydec40.fr/le-grand-cycle-naturel-de-leau>