



13 years ESJ
Special edition

Etude Comparative des Différentes Méthodes d'Estimation de l'Evapotranspiration en Zone Semi-Aride (cas Plaine Tadla Maroc)

Amroumoussa Benmoussa

Département des Ressources Naturelles, Environnement et Santé,
Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,
Béni Mellal, Morocco

Amina Wafik

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

Abdessamad Najine

Raji Abdletife

Sahar Khrmouch

Département de Géologie, Université Cadi Ayad
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

[Doi: 10.19044/esj.2023.v19n40p74](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p74)

Submitted: 20 June 2022
Accepted: 01 June 2023
Published: 31 October 2023

Copyright 2023 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:

Benmoussa A., Wafik A., Najine A., Abdletife R. & Khrmouch S. (2023). *Etude Comparative des Différentes Méthodes d'Estimation de l'Evapotranspiration en Zone Semi-Aride (cas Plaine Tadla Maroc)*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (40), 74.

<https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p74>

Resume

Dans les régions arides et semi arides, l'eau est une ressource très limitative non seulement pour sa pénurie, mais aussi pour sa disponibilité incertaine. Dans le bassin moyen Oum Er-rbia (plaine Tadla), se caractérise par un climat semi-aride, méso thermique, chaud et sec en été et froid en hiver. Ce climat est conditionné par la présence des deux facteurs principaux : La présence de l'Atlantique à moins de 200km à l'Ouest, qui exerce une influence tempérante mais aussi qui se manifeste par des vents pluvieux en provenance de l'Ouest ; La latitude dont l'effet se traduit par une aridité croissante en se déplaçant du Nord vers le Sud ; les ressources en eau diminuent de l'amont vers l'aval et se traduisent par une raréfaction des taux de précipitation (une

moyenne de 560 mm à Ahmed Hansali et 352 mm à Béni Mellal) et une augmentation des moyennes d'évapotranspiration (465.1mm à Béni-Mellal et 571 mm à Ahmed Hansali) et de la température. Ceci exige une analyse spécifique de ces paramètres pour comprendre et prédire les instabilités des ressources dans la région d'étude. L'objectif de ce travail est de calculer l'évapotranspiration potentielle (mensuelle et annuelle), en se basant sur les séries des données hydroclimatiques, enregistrées au niveau des stations météorologiques. Les précipitations et l'évapotranspiration sont des variables très importantes dans le diagnostic des changements climatiques et leurs effets sur l'environnement. La méthodologie adaptée dans ce travail est basée sur l'étude statistique des séries chronologiques. Ces analyses comprennent la détection de tendances, la détection des ruptures par changement de moyenne, et aussi la corrélation entre les données de précipitation et celle d'évapotranspiration. Les données proviennent de deux stations trouve dans le haut bassin du bassin moyen Oum Er-rbia (Béni Mellal, Ahmed Hansali). Les résultats des analyses statistiques mettent en évidence l'existence des changements sensibles et généralisés représentés essentiellement par le réchauffement dû aux gaz à effet de serre, en étroite relation avec l'activité humaine. Ces changements ont une influence négative sur l'environnement et l'Homme.

Mots- clés: Plaine Tadla, Précipitations, Evapotranspiration, Changements climatiques, Corrélation

Comparative Study of Different Methods of Estimating Evapotranspiration in Semi-Arid Zones (Case Plain Tadla Morocco)

Amroumoussa Benmoussa

Département des Ressources Naturelles, Environnement et Santé,
Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,
Béni Mellal, Morocco

Amina Wafik

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

Abdessamad Najine

Raji Abdletife

Sahar Khrmouch

Département de Géologie, Université Cadi Ayad
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

Abstract

In the middle Oum-rebia basin (plain Tadla), is characterized by a semi-arid, meso-thermal climate, hot and dry in summer and cold in winter. This climate is conditioned by the presence of the following two main factors: The presence of the Atlantic less than 200km to the west, which exerts a tempering influence but also manifests itself in rainy winds from the west; The latitude, the effect of which is reflected in increasing aridity as it moves from north to south; Water resources decrease from upstream to downstream and result in a rarefaction of precipitation rates (an average of 560 mm in Amed Hansali and 352 mm in Béni Mellal) and an increase in average evapotranspiration (465. 1mm in Beni-Mellal and 571 mm in Ahmed Hansali) and temperature. This requires a specific analysis of these parameters to understand and predict resource instabilities in the study area. The objective of this work is to calculate the potential evapotranspiration (monthly and annual), based on the series of hydroclimatic data, recorded at the level of the meteorological stations. Precipitation and evapotranspiration are very important variables in the diagnosis of climate change and its effects on the environment. The methodology adapted in this work is based on the statistical study of time series. These analyses include the detection of trends, the detection of breaks in the mean, and also the correlation between precipitation and evapotranspiration data. The data are from three stations in the upper basin of the middle Oum Rbia basin (Beni Mellal, Ahmed Hansali, Mechra Edahk). The results of the statistical analyses highlight the existence of significant and

widespread changes represented essentially by warming due to greenhouse gases, in close relation with human activity. These changes have a negative influence on the environment and mankind.

Keywords: Tadla Plan, Precipitation, Evapotranspiration, Climate change, Correlation

Introduction

L'évapotranspiration, composante essentielle du bilan hydrologique, permet de comprendre les mécanismes régissant les relations eaux de surface /eaux souterraines (Xu & Chen, 2005). D'autre part, l'étude de ce paramètre présente un grand intérêt pour l'évaluation, Le changement climatique désigne l'ensemble des variations des caractéristiques climatiques en un endroit donné, au cours du temps : réchauffement ou refroidissement dans le sens d'un réchauffement global. Ce phénomène peut entraîner des dommages importants : élévation du niveau des mers, accentuation des événements climatiques extrêmes (sécheresses, inondations, cyclones, ...), déstabilisation des forêts, menaces sur les ressources d'eau douce, difficultés agricoles. Selon son rapport du septembre 2013, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) affirme, que le réchauffement du système climatique du globe est sans équivoque. Parmi les résultats de ce réchauffement, on note :

- L'augmentation de la température moyenne du globe (+0.85°C) et la diminution des précipitations surtout en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du sud ;
- La réduction de la superficie des calottes glacières et les glaciers au rythme de 3.5 à 4.1% par décennie ;
- L'élévation mondiale du niveau moyen de la mer avec une hausse de 19 cm (Costel et al., 2008).

Les précipitations et l'évapotranspiration sont des variables très importants dans le diagnostic des changements climatiques et leurs effets sur l'environnement(Akhal et al., 2022).

L'objectif de ce travail est de calculer l'évapotranspiration potentielle (mensuelle et annuelle), en se basant sur les séries des données hydro-climatiques, enregistrées au niveau de la station météorologique dans la plaine Tadla, En utilisant les données de 1985 à 2016 (Fatah et al., 2011), avec une analyse comparative et statistique des résultats des différents modèles l'Evaporomètre Piche (en ml) et par la Bac Colorado (en mm).

Contexte géographique et géologique

La zone d'étude est située au Nord-Est de la plaine qui fait partie du Bassin Moyen de l'Oum Er-ribia (Fig. 1). Cette plaine se présente comme une vaste dépression mono-synclinale orienté WNW-ESE et couvrant une superficie d'environ 3600 km². Elle est limitée vers le Nord par le Plateau des Phosphates, vers l'Est par la plaine se rétrécit le long de l'Oum Er-ribia en direction des reliefs à l'Ouest, aucune limite géographique ne sépare le Tadla de la Bahira qui lui fait suite, mais le cours inférieur d'Oued El Abid sera pris comme limite régionale de cet ensemble. Au Sud, elle est limitée par la chaîne montagneuse de l'Atlas, essentiellement jurassique (Hammani et al., 2006).

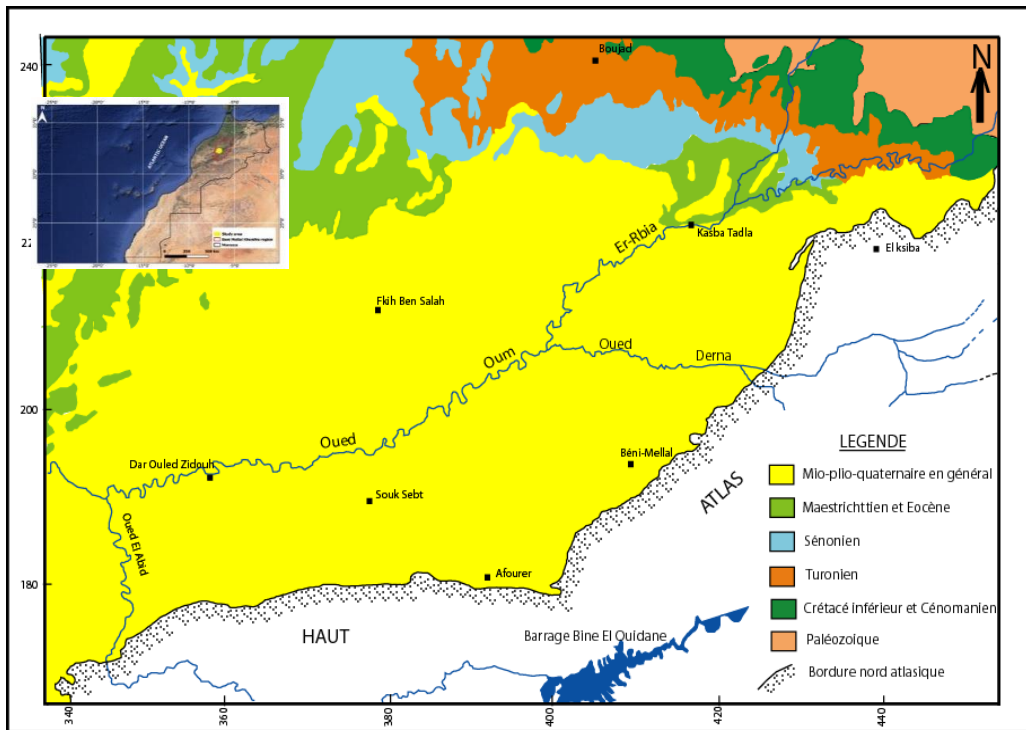


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude (Radouani, Najine, Aifa, et al., 2013)

Géologiquement, la région se présente comme un vaste plateau stratiforme recouvert de dépôts mio-plio-quadernaires hétérogènes reposant sur un socle paléozoïque. Il s'agit d'une série géologique dans laquelle se sont déposées de puissantes séries allant du Trias au Quaternaire (Hsissou et al., 1996). (Fig. 2)

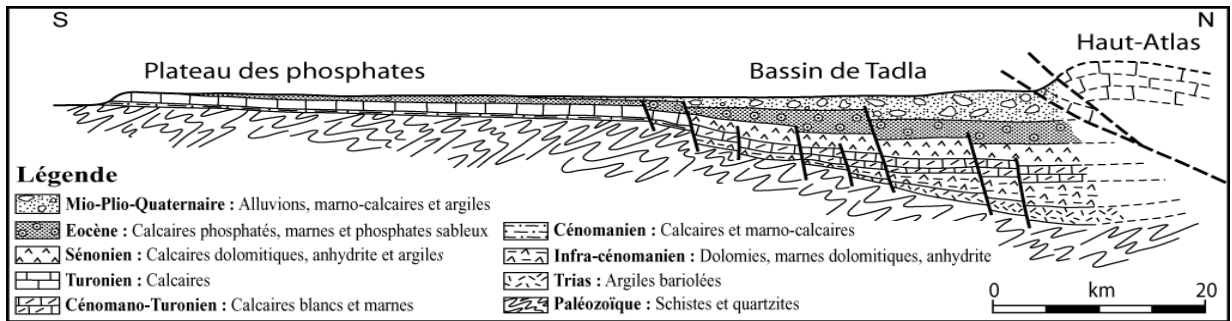





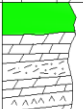




Figure 2. Coupe synthétique du bassin sédimentaire de Tadla
(Radouani, Najine, Aifa, et al., 2013)

Géologiquement, la région se présente comme un vaste plateau stratiforme recouvert de dépôts mio-plio-quaternaires hétérogènes reposant sur un socle paléozoïque. Il s'agit d'une série géologique dans laquelle se sont déposées de puissantes séries allant au Trias au Quaternaire.

- ❖ **Trias** : formé d'une série argilo-gréseuse, basaltique ou argilo-salifère ;
- ❖ **Infra-Lias** : argilo-dolomitique, devenant sub-récifal dans l'Atlas. Il se biseaute rapidement pour disparaître au Nord de Bou-Ghazi ;
- ❖ **Infra-cénomaniens** : silicoclastique à argiles rouges et grès gris avec quelques intercalations de calcaires clairs. Il est parfois mal distingué du Trias à cause de son faciès et sa datation sommairement le Crétacé inférieur ;
- ❖ **Cénomaniens transgressifs** : équivalent aux autres formations du Crétacé supérieur discordant sur les plates-formes. Il s'agit principalement de laminites argilo-carbonatées, parfois légèrement évaporitiques (sulfates) ;
- ❖ **Cénomano-turonien marin** : calcaire, à faune marine franche de plate-forme interne à moyenne, et parfois dolomitisé. Il se distingue alors au sommet du plateau par des bancs métriques très massifs ou caverneux ;
- ❖ **Sénonien lagunaire ou évaporitique** : fortement développé dans les zones à forte subsidence où il constitue une formation écran entre les aquifères. A l'affleurement, le Sénonien est argilo-calcaire ;
- ❖ **Sénonien marin** : assez puissant vers le sillon atlasique ; il est formé de biocalcarénites ; en amont, il se traduit dans le Sénonien indifférencié par des intercalations plus calcaires et plus riches en faunes qui donnent à la formation ses propriétés aquifères ;
- ❖ **Eocène** : on y distingue, au-dessus d'un écran composé de marnes bitumineuses phosphatées du Maestrichtien, des dépôts alternants à débris phosphatés, lits calcaires et lits plus fins, se chargeant en silex vers le haut ;

❖ **Mio-Plio-Quaternaire** : c'est par excellence le niveau où circulent, les nappes phréatiques de la plaine du Tadla. Le Miocène, plus ou moins conglomératique, impliqués dans la phase de déformation atlasique, n'est individualisé que dans la partie basse du sillon ou au contact de l'Atlas dans la partie épaisse du prisme sédimentaire. Ailleurs, on parle surtout de Plio-Quaternaire dans lequel les faciès fluvio-lacustre du Villafranchien prennent une grande place, notamment près de l'Oum-er-Rbia. A proximité de l'Atlas, les grandes épaisseurs de dépôts sont partiellement dues à de grands cônes de piémont formés de produits de démantèlement de la chaîne.

Figure 3. Log synthétique des formations géologique de la plaine de Tadla (M. Hafid et al., 2008)

Plaine du Tadla			
FORMATION	LITHOLOGIE		EPAISSEUR
	LOG INSCRIPTION		
Formation Mio-Plio -Quaternaire		Croute calcaire calcaires sableux Conglomérates polygéniques à ment argileux Marnessableuses	0 à 400 m
Formation Phosphatée (Mastrichtien-Eocène)		Argiles dolomitiques et dolomites a silex avec débris phosphatée Niveau de calcaire et de dolomies phosphatés imprégnation de matière organique	60 à 300 m
Formation Sénorien marin		Calcaires lumchelliens	70 à 400 m
2ème Formation évaporitique "Sénorien lagunaire"		Anyhdrites, dolomies calcaires dolomitiques et marnen	
Cénomaniens - Turonien		Dolomie et dolomies marnesuses	50 à 200 m
1ère Formation évaporitique "infracénomaniens lagunaire"		Dolomie et marnes dolomitiques argiles sableuses , anhydrite Conglomérat de base	20 à 180 m
Trias		Basaltes doléritiques Argiles rouge et vertes légèrement anhydritique conglomérats de base	0 à 500 m
Primaire		Schistes et quartzites	> 100 m

Matériels et méthodes

L'évaporation est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique (Igbadun et al., 2006). La température, l'insolation, l'hygrométrie et les vents jouent un rôle important dans les quantités annuelles évaporées. L'étude du paramètre d'évaporation est importante pour connaître le régime climatique, il est mesuré par l'**évaporomètre**. Les stations climatiques de Béni Mellal et Ahmed Al Hansali ont enregistré des valeurs d'évaporation durant la période 1985-2016 par deux appareils, l'Evaporomètre Piche (en ml) et par la Bac Colorado (en mm).

- **Evaporimètre type Piche** : Cet appareil est constitué essentiellement par une surface poreuse, imbibée d'eau, en équilibre constant avec l'atmosphère et placé dans des conditions telles que l'évaporation soit conditionnée uniquement par les caractéristiques météorologiques : humidité de l'air, température, insolation...
- **Evaporimètre type Bacs** : Parallèlement aux évaporomètres, l'emploi de bacs d'évaporation est fréquent en hydrologie. Ce sont des bacs circulaires de diamètre de 1 à 2 m au max. et de faible profondeur.

L'analyse des données enregistrées dans la station de Béni Mellal montre une quantité annuelle évaporée de l'ordre de 1409mm/an par la Bac Colorado et 2365ml/an mesuré au Piche, alors que l'autre station montre une quantité annuelle évaporée de l'ordre de 2094mm/an par la Bac Colorado et 2678ml/an mesuré au Piche ;

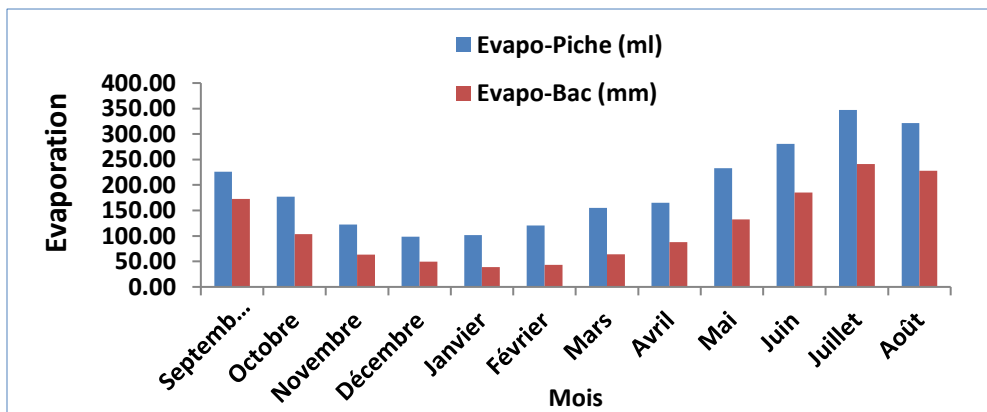


Figure 4. Variations des moyennes mensuelles d'évaporation de la station de Béni Mellal (1985- 2016)

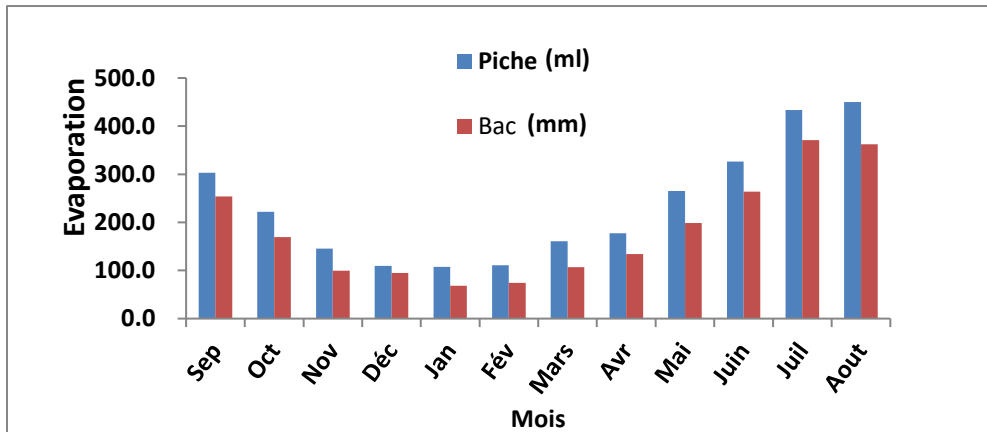


Figure 5. Variations des moyennes mensuelles d'évaporation de la station d'Ahmed Al Hansali (1985- 2016)

La moyenne mensuelle de l'évaporation enregistrée par les deux appareils présente une même variation au cours des mois, les valeurs minimales sont enregistrées pendant les mois de décembre, janvier, février et Mars alors qu'au cours des mois juin, juillet et août, les deux appareils enregistrent des valeurs maximales.

La méthodologie adaptée dans ce travail est basée sur l'étude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas plaine Tadla Maroc) : Les données proviennent deux stations se trouve dans plain Tadla. Ainsi que la zone d'étude connue un pompage agricole très important, dans des projets agricoles (céréales, Olivier, Agrumes Betterave, Grenadier...)(Mengoub et al., 2021).se trouvent entravés par l'insuffisance des ressources hydriques (Boukaa et al., 2001).Ce déficit hydrique nécessite, par ailleurs, une gestion rationnelle, qui nécessite l'établissement d'un bilan hydrologique défini par :

$$P = Q + ETP + \Delta R$$

Où **P** : représente les précipitations en mm, **ETP** : l'évapotranspiration en mm **Q** : le débit de lame d'eau écoulée, **ΔR** : la variation de la réserve en eau en mm (Xu & Chen, 2005).

Formules utilisées pour le calcul Évapotranspiration potentielle ETP

L'évapotranspiration potentielle représente l'évaporation plus la transpiration qui se produisaient si l'approvisionnement en eau était suffisant pour compenser les pertes maximums et répondaient aux pleins besoins de la végétation(Mutti et al., 2022).

Depuis 1950, plusieurs formules ont été développées pour estimer l'évapotranspiration: Thornthwaite (1944),Turc (1962)

➤ **Méthode de Thornthwaite (1948)**

D'après Thornthwaite (1948) le calcul de l'évapotranspiration potentielle se fait selon la formule suivante :

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a F(\lambda)$$

Avec :

T : température moyenne mensuelle (°C)

ETP : Evapotranspiration Potentielle moyenne mensuelle (en mm)

F(λ) : Coefficient de correction tenant compte de la latitude et du mois

Tm : Moyenne interannuelle des températures du mois (en °C)

I : Somme des 12 indices thermiques mensuels $I = \sum_{k=1}^{12} ik$ avec $ik = \left(\frac{tk}{5}\right)^{1.514}$

a : Fonction complexe de l'indice I $a = 1.6/100 * I + 0.5$

La valeur de l'évapotranspiration annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspiration potentielle mensuelles.

Formules utilisées pour le calcul L'évapotranspiration réelle (ETR)

La formule de Turc annuelle

Elle permet de calculer l'ETR en tenant compte des valeurs moyennes annuelles de la température et des précipitations (**Igbadun et al., 2006**).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{\left(0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)\right)^2}}$$

Avec : **L** = $300 + 25T + 0,05T^3$, **L** : pouvoir évaporant de l'atmosphère., **ETR** : évapotranspiration réelle annuelle en (mm), **T** : température moyenne annuelle (°C). **P** : hauteur de précipitation annuelle en (mm).

Résultats et discussions

Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP durant la période (1985- 2016) sont récapitulés dans les **tableaux 1 et 2**.

Tableau 1. Calcul de l'ETP mensuelle et annuelle par la méthode de Thornthwaite pour la station de Béni Mellal (Latitude = 32° 32'N) (Source : ABHOR 1985-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
<i>T</i>	26,15	21,41	16	12,40	12,31	13,67	16,29	18,06	21,98	25,81	29,84	30,44	****
<i>K</i>	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	****
<i>I</i>	12,24	9,04	5,84	3,95	3,91	4,59	5,98	6,99	9,41	12,00	14,95	15,41	****
<i>ETP (mm)</i>	120,9	74,56	35,8	20,24	20,40	24,75	43,35	56,83	95,92	135,9	189,2	187,8	1005,2

Tableau 2. Calcul de l'ETP mensuelle et annuelle par la méthode de Thornthwaite pour la station d'Ahmed AL-Hansali (Latitude = 32° 40'N) (Source : ABHOR 1985-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
<i>T</i>	24,8	20,8	16,0	12,8	11,4	12,2	15,1	17,4	21,3	25,7	30,0	30,4	****
<i>K</i>	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	****
<i>I</i>	11,31	8,64	5,84	4,15	3,46	3,86	5,34	6,62	8,96	11,93	15,09	15,39	****
<i>ETP (mm)</i>	110,8	72,4	37,72	23,11	18,38	20,65	38,91	55,09	92,5	137,8	194,5	189,9	991,7

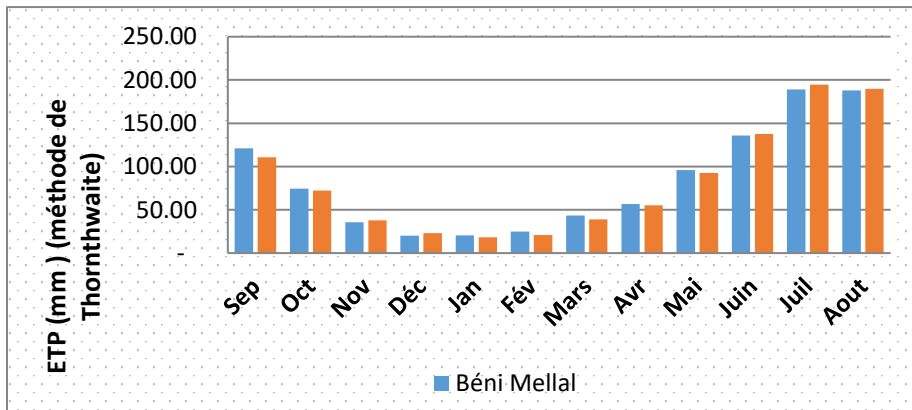


Figure 6. La variation de l'évapotranspiration potentielle mensuelle, entre 1985 et 2016, de la station d'Al-Hansali et la station de Béni Mellal

Tableau 3. Calcul de l'évapotranspiration réelle mensuelle, entre 1985 et 2016, par la méthode de Turc pour l'ensemble des stations étudiées. (Source : ABHOR 1985-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
<i>Béni Mellal</i>	14,76	39,03	74,55	56,83	57,85	57,26	63,16	51,34	34,45	9,60	1,75	4,51	465,10
<i>Ahmed Al-hansali</i>	16,47	41,70	99,10	74,62	76,75	79,32	68,02	59,45	32,00	14,31	2,45	7,58	571,77

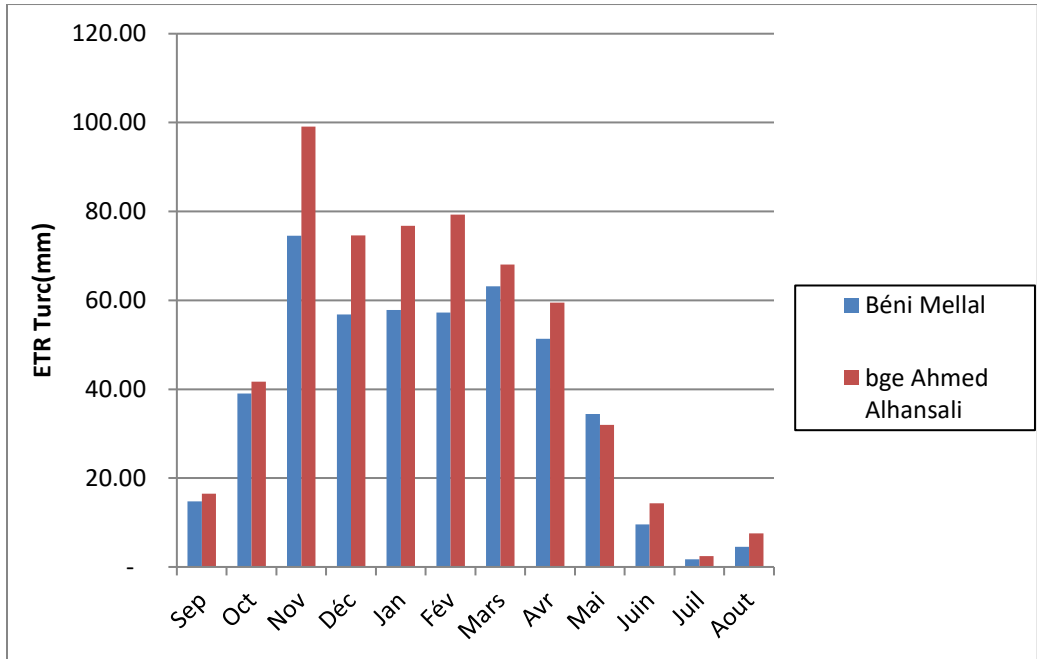


Figure 7. Évapotranspiration réelle, entre 1985 et 2016, du barrage Ahmed Al-Hansali, et la station de Béni Mellal

L'analyse du diagramme d'évapotranspiration potentielle par la méthode de Thornthwaite montre que les mois de décembre à février des deux stations présentent des valeurs relativement basses d'évapotranspiration potentielle surtout à Ahmed Al-Hansali (18,38mm), cependant les Mois de Juin à septembre présentent des valeurs relativement élevées (194,49 mm) (Tableau 2).

L'évapotranspiration reste très importante par rapport à la pluviométrie annuelle (déficit) enregistrée durant la période 1985-2016. C'est ce qui caractérise les zones arides et semi-arides.

- **Diagramme ombro-thermique**

Ce diagramme met en relief la variation des températures et des précipitations au cours de l'année (Fig.8), mais aussi la durée de la période de sécheresse qui n'est pas toujours réduite à la saison estivale. Selon Bagnouls et Gaussen (1953) la saison sèche correspond au nombre de mois dont la pluviométrie moyenne mensuelle (en mm) est inférieure à deux fois la valeur de la température moyenne mensuelle (en °C) ($P \leq 2T$).

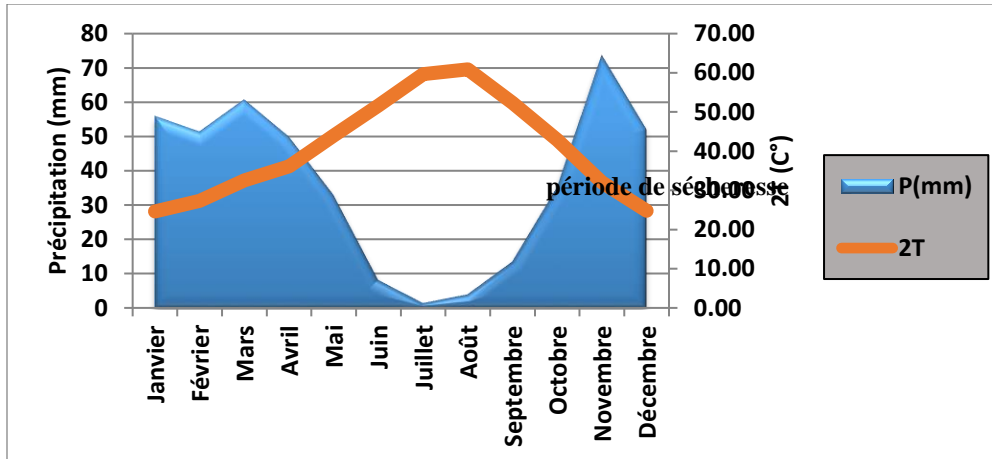


Figure 8. Diagramme Ombro-thermique (Station de Béni Mellal)

La combinaison des moyennes des températures et des précipitations dans le diagramme ombro-thermique de Bagnouls-Gaussen permet un premier dépistage de sous-ensembles basés, à ce niveau, sur l'importance de la saison sèche dans le domaine étudié. Le diagramme ombro-thermique établi montre l'importance des saisons sèches et humides en durée et en intensité : quand la courbe de températures passe au-dessus de celle de précipitations, la période est sèche, dans le cas contraire la période est humide (Science, 2022).

➤ **Méthode de Thornthwaite 1948 :**

La comparaison des valeurs de l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP) et des hauteurs des précipitations mensuelles (P) permet de calculer l'évapotranspiration réelle mensuelle (ETR), plusieurs cas peuvent se présenter :

- **ETR < P**
- **ETR = ETP**

La quantité d'eau correspondant à P-ETP est emmagasinée dans le sol jusqu'à saturation de celui-ci, la partie de « Excédent » dépassent éventuellement la réserve cumulée maximale en eau du sol, constitue le «water-surplus » et est disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

- **ETR = ETP**
- **ETR = ETP = P**

Les réserves en eau de sol restent les mêmes que celles du mois précédent.

- **ETR > P**

ETR = P + tout ou partie de la réserve en eau du sol jusqu'à épuisement de celle-ci. Lorsque les réserves en eau du sol sont épuisées et que ETP > ETR, ETP - ETR = « water- deficiency ».

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	TOT
T °C	26.1	21.4	16	12.4	12.3	13.7	16.3	18.1	22	25.8	29.8	30.4	244.3
P	14.00	37.00	71.00	54.10	55.10	54.50	60.10	48.80	32.70	9.10	1.70	4.30	442.40
ETP (mm)	120.94	74.56	35.79	20.24	20.40	24.75	43.35	56.83	95.92	135.89	189.17	187.84	1005.68
RFU	0	0	35.21	50	50	50	50	41.97	0	0	0	0	277.18
ETR	14.00	37.00	35.79	20.24	20.40	24.75	43.35	56.83	74.67	9.10	1.70	4.30	342.13
Déficit	106.94	37.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.25	126.79	187.47	183.54	663.55
Excédent	0	0	0	19.07	34.70	29.75	16.75	0	0	0	0	0	100.27

Tableau 4. Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2015, pour la station de Béni Mellal

La valeur de l'évapotranspiration réelle annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspiration réelle mensuelles. Les valeurs de l'ETR obtenues par cette méthode sont données par les tableaux ci-dessous.

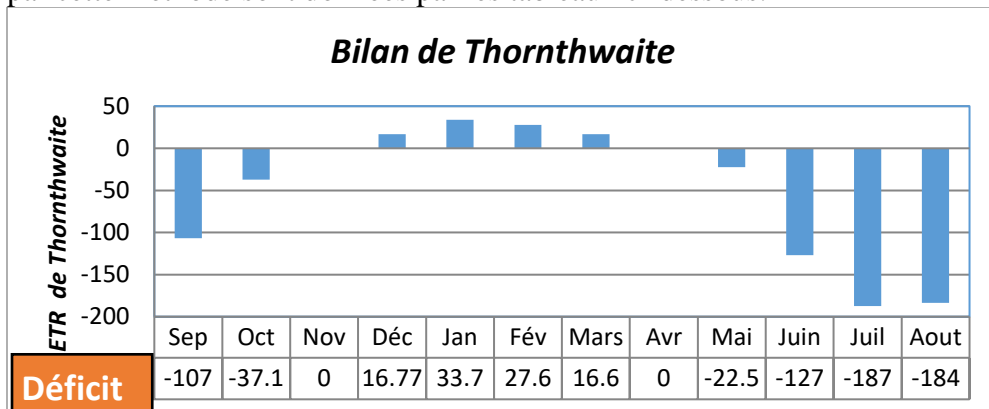


Figure 9. Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2016, de la station de Béni Mellal

À partir du bilan de Thornthwaite appliqué à la station de Béni Mellal, on constate que la région connaît un excédent d'eau qui s'étend surtout de Décembre à Mars où la pluviométrie satisfait les réserves hydriques du sol (RFU) qui atteint son maximum (50mm) car le climat de la région est semi-aride (Ouchouia & Chaouki, 2022), et durant la période allant de Mai à Novembre on remarque un déficit très important qui peut atteindre (663,35 mm).

• **Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée**

À partir des relations entre l'ETP (Piche) et celle estimée à partir des différentes formules, il apparaît une bonne corrélation entre celle-ci et celle obtenue par l'application des différents modèles de calcul (coefficient de corrélation > 0.98). (Figure 10).

Les figures de Corrélation entre l’ETP mesurée et celle de différentes formules

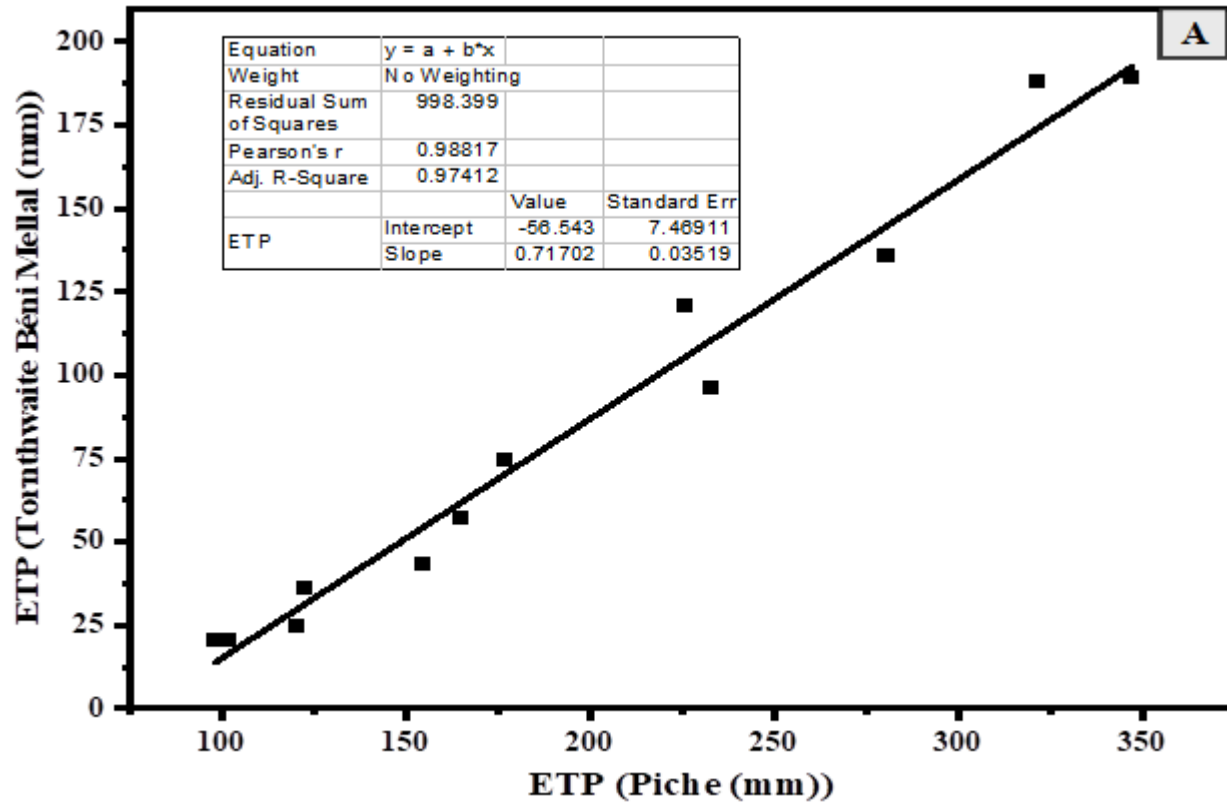


Figure A. Corrélation entre ETP (Thornthwaite Béni-Mellal) et ETP (Piche)

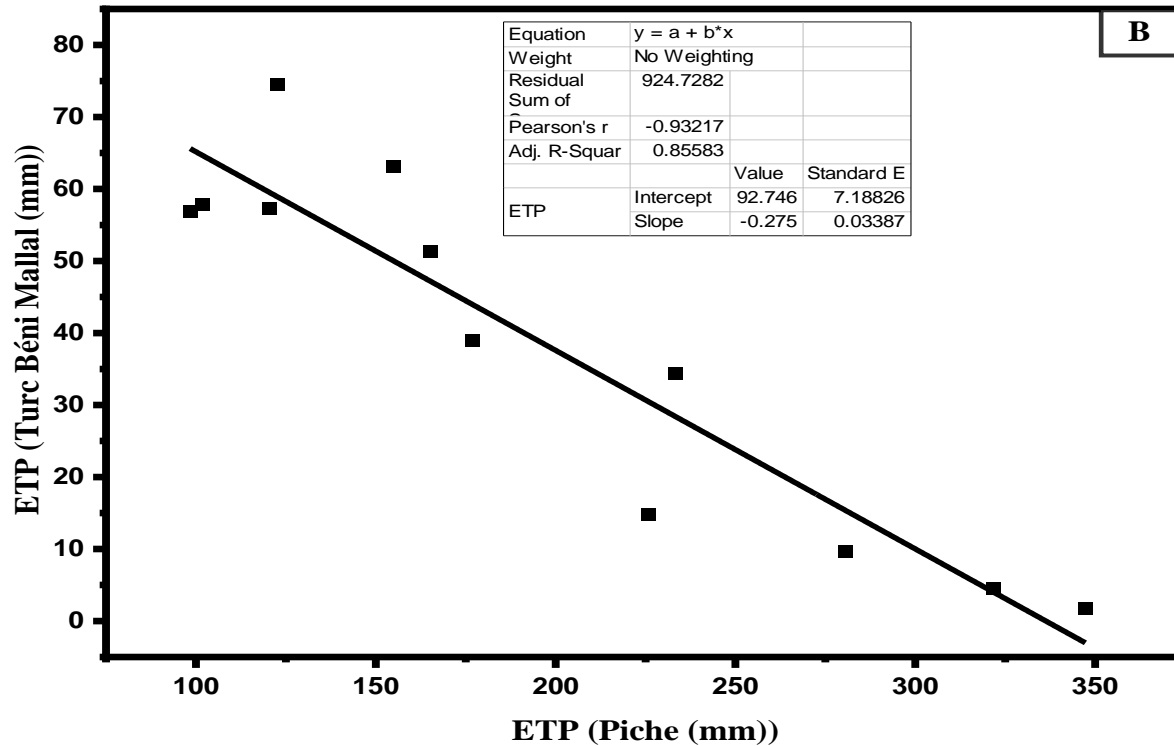


Figure B. Corrélation entre ETP (Turc Béni-Mellal) et ETP (Piche)

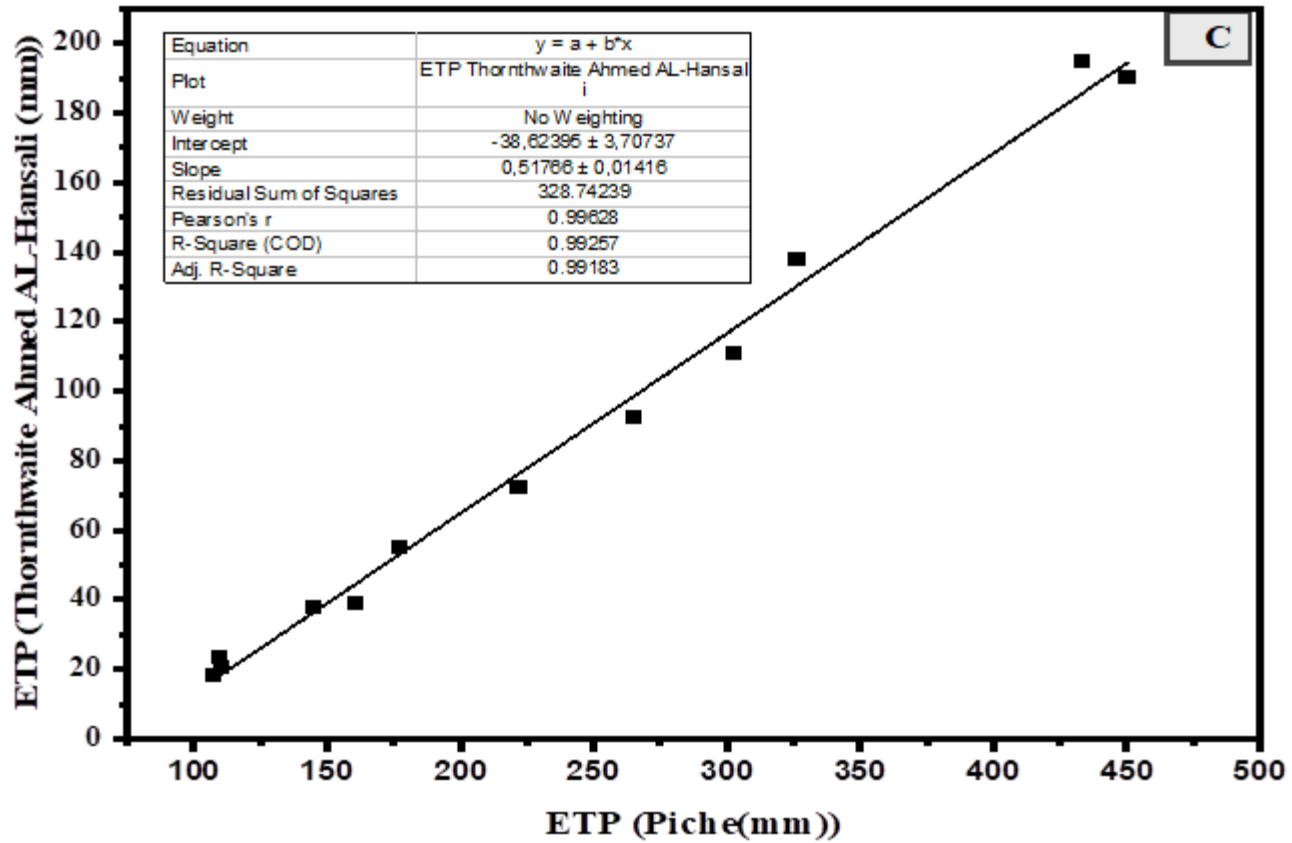


Figure C. Corrélation entre ETP (Thornthwaite Ahmed Al-Hansali) et ETP (Piche)

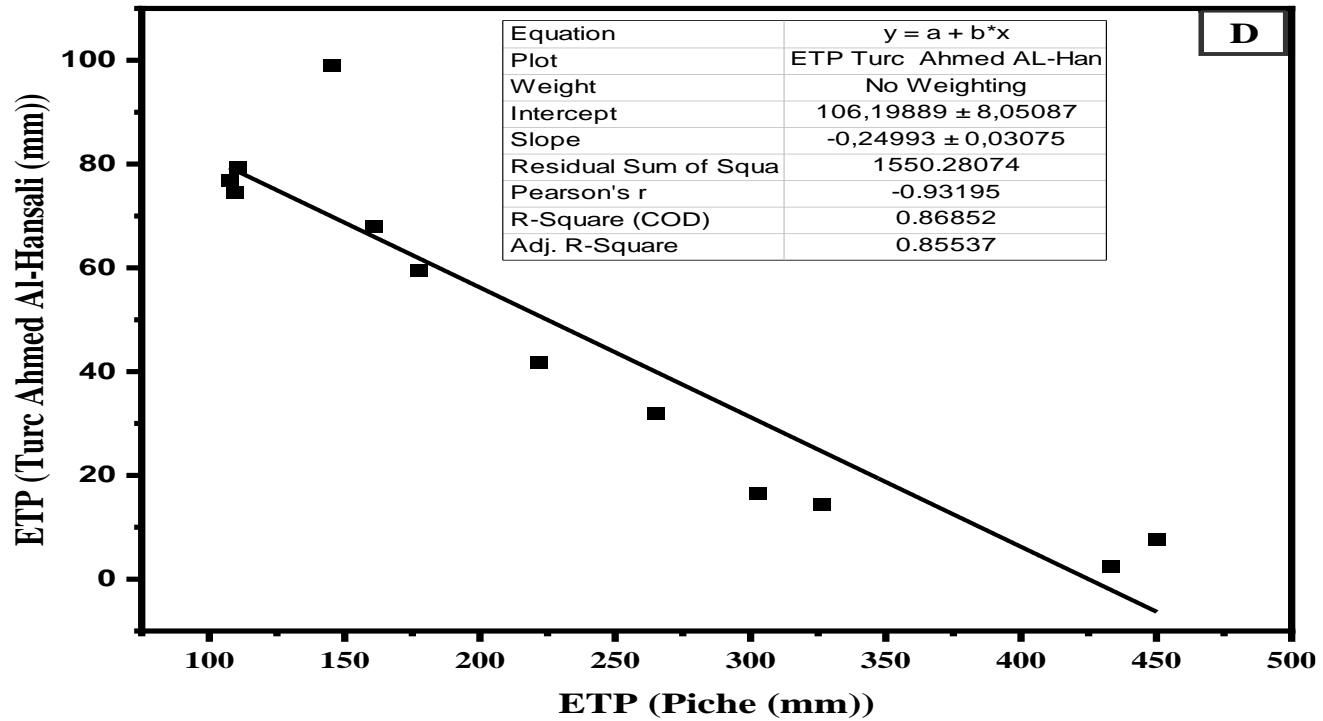


Figure D. Corrélation entre ETP(Turc Ahmed Al-Hansali) et ETP (Piche)

Figure 10 : Courbes (A,B,C,D) des corrélations des résultats obtenus par différentes méthodes par rapport à Piche

Conclusion

Cette étude a permis l'estimation de l'évapotranspiration par les méthodes de Thornthwaite, Turc, Piche (méthodes empiriques); en se basant sur les variables climatiques (température, humidité relative, vitesse du vent, durée d'insolation), qui à des influences climatiques diverses variant du Nord au Sud et de l'Ouest vers l'Est. Cela se manifeste par une tendance à la hausse des températures avec un réchauffement de l'ordre de 2 °C et une tendance généralisée à la baisse des précipitations de 20 %.

Les précipitations sont caractérisées également par une extrême irrégularité qui se manifeste au cours d'une même année et d'une année à l'autre (Boundi & Yacine, 2020). L'analyse des informations pluviométriques disponibles depuis le début du siècle a montré que la plaine du Tadla a connu des excédents et des déficits pluviométriques qui s'équilibraient. Mais depuis les années quatre-vingt, cet équilibre a été rompu et l'on a assisté à un très fort déséquilibre entraînant une sécheresse très aiguë. Cette sécheresse, la plus importante enregistrée depuis le début du siècle a entraîné une baisse spectaculaire des ressources en eaux souterraines (Hammani et al., 2006)

L'analyse de l'évolution pluriannuelle des volumes de précipitations en certaines stations de la plaine confirme clairement les tendances à la baisse des apports pluviométriques. La décroissance de ces apports associée au pompage intensif de la nappe s'est traduite par une baisse spectaculaire et généralisée du niveau de la nappe phréatique. Dans les prochaines décennies, l'incertitude des fluctuations climatiques, la croissance démographique, l'augmentation des besoins socio-économiques et les risques de pollution exacerberont les problèmes de disponibilité de cette ressource en quantité et qualité. Ceci accentuera la tension entre l'offre et la demande et laisse présager des situations extrêmes dans un horizon proche. De telles situations se reproduiront dans l'avenir et peut-être même plus fréquemment si on les rattache au phénomène de désertification qui affecte l'Ouest africain et à l'ampleur des changements climatiques à l'échelle planétaire.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Akhal, N., Tofail, U. I., & Territoire, D. (n.d.). Les eaux souterraines au périmètre irrigué de Tadla entre le risque du réchauffement climatique et la demande en eau d' irrigation. 191–197.
2. Boukaa, H., Chemseddine, M., Abbassi, M., & Brun, J. (2001). La pyrale des dattes dans la région de Tafilalet au Sud-Est du Maroc. *Fruits*, 56(3), 189–196. <https://doi.org/10.1051/fruits:2001122>
3. Boundi, A., & Yacine, Z. A. I. T. (2020). Variability of rainfall regime in an agricultural region with a semi-arid climate : Case of Tadla irrigated perimeter (continental Morocco). 19(1), 31–45.
4. Costel, L. A., Robin, M., Université, P., Rapporteur, D. N., Loveland, T., De, D., Sioux, U., & Examineur, F. (2008). Suivi des changements d' occupation et d' utilisation des sols d' origine anthropique et climatique à l' échelle régionale par télédétection moyenne résolution. 2.
5. Fatah, B., Mohamed, B., & Abdelhamid, G. (2011). Etude comparative des différentes méthodes d' estimation de l' évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa). *March* 2020, 109–116.
6. Hammani, A., Kuper, M., Bekkar, Y., Zaz, H., Hammani, A., Kuper, M., Bekkar, Y., & Exploitation, H. Z. (2006). Exploitation des eaux souterraines dans le perimetre irrigue de Tadla (Maroc). Etat des lieux et elements de methodologie pour contribuer a une reflexion sur une gestion integree et durable des eaux souterraines et de surface. *Economies d'eau En Systèmes IRrigués Au Maghreb. Deuxième Atelier Régional Du Projet Sirma, Marrakech, Maroc, 29-31 Mai 2006.*
7. Hsissou, Y., Chauve, P., & Mania, J. (1996). L'aquifere des calcaires du Turonien (Bassin du Tadla, Maroc). *Alimentations locales et lointaines a partir de l'Atlas. Journal of Hydrology*, 183(3–4), 433–443. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)03010-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)03010-7)
8. Igbadun, H. E., Mahoo, H. F., Tarimo, A. K. P. R., & Salim, B. A. (2006). Performance of Two Temperature-Based Reference Evapotranspiration Models in the Mkoji Sub-Catchment in Tanzania. *Agricultural Engineering International*, 8, 1–19.
9. M. Hafid, G. Tari, D. Bouhadioui, I. El Moussaid, H. Echarfaoui, A. Aıt Salem, M. N. and M. D. (2008). Continental Evolution: The Geology of Morocco. In *Physics of the Earth and Planetary Interiors* (Vol. 116, Issues 3–4). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77076-3>
10. Mengoub, F. E., Agronomique, I., & Ii, H. (2021). Impacts De La Politique De Reconversion Des Systèmes D' irrigation Gravitaire vers l' irrigation Localisée : Cas Du Sous Bassin Du Tadla Azilal
Economic and Resource Impacts of the Policy of Conversion to

- Localized Irrigation Systems : Case of the Tadla Azilal Region. 46–70.
<https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n24p46>
11. Mutti, P., Dubreuil, V., Bezerra, B., Mutti, P., Dubreuil, V., Bezerra, B., La, C. D. E., Le, D., Du, B., São, F., Évolution, B., & Bilan, D. U. (2022). CARACTÉRISATION DE LA SÉCHERESSE DANS LE BASSIN DU FLEUVE SÃO FRANCISCO , BRÉSIL : ÉVOLUTION DU BILAN HYDRIQUE SUR LA PÉRIODE 1942-2016 To cite this version : HAL Id : halshs-03615769.
 12. Ouchouia, I., & Chaouki, A. (2022). De la variabilité climatique au changement du régime hydrologique dans le bassin de l ’ oued Ouzoud / Haut Atlas Central / Maroc To cite this version : HAL Id : hal-03581861.
 13. Radouani, F., Najine, A., Aïfa, T., & Ouzerbane, Z. (2013). Reconnaissance du système aquifère du nord-ouest de la plaine du Tadla (Maroc central) par imagerie électrique. 4(1), 33–41.
 14. Radouani, F., Najine, A., Aïfa, T., Ouzerbane, Z., & Badrane., S. (2013). Reconnaissance géophysique et hydrogéologique par imagerie électrique du secteur nord-ouest de la plaine du Tadla (Centre du Maroc). Sixième Colloque Maghrébin de Géophysique Appliquée, 157–159.
 15. Science, E. (2022). Potential Alternative Evapotranspiration Estimation Methods for Batu Pahat Climatic Condition: A Quantitative Comparison Potential Alternative Evapotranspiration Estimation Methods for Batu Pahat Climatic Condition: A Quantitative. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1022/1/012078>
 16. Xu, C. Y., & Chen, D. (2005). Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes*, 19(18), 3717–3734. <https://doi.org/10.1002/hyp.5853>