

Université de Mila
Faculté 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

Évaluation de l'impact du changement climatique
sur l'évaporation des barrages, cas du barrage de
Beni Haroun, Mila

Réalisé par :
-Abdelmoumene Meghzili

Soutenu devant le jury :

M. Pr. Koussa Miloud
M. Pr. KabourAbdesselem
Mme. Dr. Chebbah Lynda
M. Mr. KouiraLokmane

Président
Examineur
Promotrice
Co-Promotrice

Année universitaire : 2025/2026

REMERCIEMENTS :

Avant toute chose, je remercie Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé le courage, la volonté et la force nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Ensuite, j'adresse mes sincères remerciements à mes chers parents, qui ont été un soutien pour moi tout au long de mon parcours scolaire et universitaire.

Mes sincères remerciements vont également à ma directrice de mémoire, Dr.Chebbah Lynda, pour avoir accepté d'encadrer ce travail. Je la remercie pour sa patience, la pertinence de ses conseils, la rigueur de ses remarques et observations, ainsi que pour sa disponibilité et son soutien constant. Sa contribution, tant sur le plan scientifique qu'humain, a été déterminante dans la réalisation de ce travail. Je lui exprime ma profonde reconnaissance ainsi que mon plus grand respect.

Je tiens également à remercier les membres du jury, Pr.Koussa Miloud et Pr. Kabour. A, pour avoir accepté d'évaluer et de soutenir ce travail.

Je remercie infiniment Dr.KouiraLokmane pour son aide, son travail acharné et son soutien indéfectible dans la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également mes frères, mes amis, ainsi que toutes les personnes qui m'ont soutenue et encouragée.

Je n'oublie pas d'adresser mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants de l'Institut des Sciences et Technologies de l'Université Abdelhafid Boussouf de Mila, pour leur précieuse contribution à l'enrichissement de mes connaissances et à l'élargissement de mes horizons scientifiques.

Enfin, grâce à Dieu, ce travail a été mené à terme. C'est grâce à Sa grâce et à Son aide.

Merci à tous.

Dédicace :

À l'être cher dont je porte fièrement le nom, à celui que Dieu a couronné de dignité et de prestance, à celui qui a arraché les épines de mon chemin pour y semer le confort à la place, au bouclier grâce auquel je me suis protégée et sur lequel je me suis appuyée dans la vie, pilier de mon existence, source de sécurité et de fierté, merci d'être mon père.

Et à celle qui m'a appris les valeurs avant même que je ne les apprenne moi-même, au pont qui mène au paradis, à la main invisible qui a levé les obstacles de mon chemin et dont les prières portent mon nom jour et nuit, ma mère bien-aimée et mon inspiration.

À mes parents, que Dieu m'a offerts comme une bénédiction, source de ma force, ma terre solide et le mur solide de mon cœur.

À mes sœurs, vous êtes le refuge chaleureux quand tout devient froid, et le plus beau soutien à chaque tournant.

À mes frères, vous avez été mon appui lorsque les jours m'ont fait plier, et mon soutien dans chaque instant.

À moi-même, cette âme qui a patienté, affronté et persévéré malgré la fatigue et les pressions, à celle qui a passé de longues nuits à lutter en silence et à se débattre avec le temps, qui a supporté l'insupportable et dépassé ce qu'elle croyait un jour être la fin. Je dédie ce travail à moi-même, non pas parce qu'il est parfait, mais parce qu'il vient d'un cœur sincère, né de la fatigue, de la détermination et de la volonté.

Qui a dit « Je peux le faire » l'a obtenu. Et moi, je l'ai voulu, et malgré tout j'y suis arrivée. Louange à Dieu, avec amour, gratitude et reconnaissance pour ce commencement et cette belle conclusion.

Abdelmoumene

Résumé : Ce travail porte sur l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'évaporation du barrage de Beni Haroun, l'un des ouvrages hydrauliques les plus importants d'Algérie. L'étude repose sur l'analyse de séries climatiques couvrant la période 1950–2025 issues de quatre stations météorologiques, ainsi que sur les données d'évaporation du réservoir entre 2003 et 2025. Des indices climatiques, notamment le SPEI-12 et l'indice d'aridité (AI), ainsi que des méthodes statistiques non paramétriques (Mann-Kendall, pente de Sen, test de Pettitt et ITA) ont été appliqués afin d'identifier les tendances, les ruptures climatiques et les facteurs influençant l'évaporation. Les résultats montrent une aggravation significative de la sécheresse avec une rupture détectée entre 2006 et 2012, tandis que l'aridité demeure relativement stable. L'évaporation du lac connaît une augmentation marquée après 2014, passant de 35,96 à 57,80 hm³/an. La température apparaît comme le principal facteur explicatif de cette évolution. Ces pertes croissantes représentent une menace pour la sécurité hydrique régionale et soulignent la nécessité de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation pour améliorer la gestion durable des ressources en eau.

Mots-clés : Changement climatique ; Évaporation ; Barrage de Beni Haroun ; Sécheresse ; SPEI ; Indice d'aridité ; Température ; Tests statistiques ; Ressources en eau ; Gestion durable.

Abstract:

This work examines the impact of climate change on evaporation at the Beni Haroun Dam, one of Algeria's most important hydraulic structures. The study is based on the analysis of climate time series covering the period 1950–2025 from four weather stations, as well as evaporation data from the reservoir between 2003 and 2025. Climate indices, notably the SPEI-12 and the aridity index (AI), as well as nonparametric statistical methods (Mann-Kendall, Sen's slope, Pettitt's test, and ITA) were applied to identify trends, climate breaks, and factors influencing evaporation. The results show a significant worsening of drought with a break detected between 2006 and 2012, while aridity remains relatively stable. Lake evaporation has increased markedly since 2014, rising from 35.96 to 57.80 hm³/year. Temperature appears to be the primary factor driving this trend. These increasing losses pose a threat to regional water security and underscore the need to implement adaptation strategies to improve the sustainable management of water resources.

Keywords: Climate change; Evaporation; Beni Haroun Dam; Drought; SPEI; Aridity index; Temperature; Statistical tests; Water resources; Sustainable management.

ملخص :

تتناول هذه الدراسة تقييم تأثير تغير المناخ على التبخر في سد بني هارون، أحد أهم المنشآت المائية في الجزائر. وتستند الدراسة إلى تحليل سلاسل زمنية مناخية تغطي الفترة 1950-2025 مستمدة من أربع محطات أرصاد جوية، بالإضافة إلى بيانات التبخر من الخزان بين عامي 2003 و2025. وقد تم تطبيق مؤشرات مناخية، لا سيما مؤشر SPEI-12 ومؤشر الجفاف (AI)، بالإضافة إلى طرق إحصائية غير معلمية (Mann-Kendall، منحدر Sen، اختبار Pettitt و ITA) من أجل تحديد الاتجاهات والانقطاعات المناخية والعوامل المؤثرة على التبخر. تُظهر النتائج تفاقماً كبيراً للجفاف مع انقطاع تم رصده بين عامي 2006 و2012، في حين ظل الجفاف مستقرة نسبياً. وشهد تبخر السد زيادة ملحوظة بعد عام 2014، حيث ارتفع من 35.96 إلى 57.80 هكتومتر مكعب في السنة. وتبدو درجة الحرارة هي العامل الرئيسي الذي يفسر هذا التطور. وتمثل هذه الخسائر المتزايدة تهديداً للأمن المائي الإقليمي وتؤكد على ضرورة تنفيذ استراتيجيات التكيف لتحسين الإدارة المستدامة للموارد المائية.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ؛ التبخر؛ سد بني هارون؛ الجفاف؛ مؤشر التساقط والنسج المعياري (SPEI)؛ مؤشر القحط؛ درجة الحرارة؛ الاختبارات الإحصائية؛ الموارد المائية؛ الإدارة المستدامة.

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
Table des matières	IV
Liste des Tableaux	VII
Liste des Figure	IX
Introduction générale	I
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I.1 Le changement climatique : phénomènes, causes et modèles.....	3
I.1.1 Phénomène.....	3
I.1.2 Les causes du changement climatique.....	3
I.1.2.1 Causes naturelles.....	3
I.1.2.2 Causes anthropiques (forçage humain).....	3
I.1.3 Les conséquences	5
I.1.3.1 Conséquences physiques.....	5
I.1.3.2 Conséquences sur les ressources en eau.....	6
I.1.3.3 Conséquences socio-économiques.....	6
I.2. Modèles climatiques.....	6
I.2.1 Les modèles climatiques globaux (GCM)	6
I.2.2 Les modèles climatiques régionaux (RCM)	7
I.3 Impact du changement climatique sur les ressources en eau : synthèse des études mondiales et régionales (Méditerranée, Afrique du Nord).	8
I.4 Impact du changement climatique sur l'évaporation des barrages.....	9
I.4.1 En Europe.....	9
I.4.2 En Afrique et au Moyen-Orient.....	10
I.4.3 En Algérie et au Maghreb.....	10
I.4.4 Discussion	11
Conclusion	12
CHAPITRE II : Présentation du site d'étude et contexte environnemental	
Introduction	13
II.1 Présentation du site d'étude	13
II.1.1 Caractéristiques hydrologiques	13
II.1.2 Caractéristiques du barrage	13
II.2. Contexte climatique local	14
II.2.1 Les précipitations	15

II.2.1.1 Variabilité interannuelle des précipitations	15
II.2.1.2 Variabilité des précipitations moyennes mensuelles interannuelle	16
II.2.2 Les températures	17
II.2.3 Le vent	18
II.2.4 L'humidité relative	19
II.2.5 Relation précipitation/ température.....	20
II.2.5.1 Courbes pluvio-thermiques(Bagnouls – Gaussen, 1953)	20
II.2.6 Evaporation.....	22
II.2.6.1 Mécanismes de l'évaporation en milieu naturel et sur plans d'eau	22
II.2.6.1.1 Facteurs climatiques directs influençant l'évaporation	22
II.2.6.2 Méthodes d'estimation de l'évaporation	22
II.2.6.2.1 Méthode de mesure directe : Bac d'évaporation.....	22
II.2.6.2.2 Méthode de calcul empiriques.....	23
II.3 Données d'évaporation du lac	28
II.3.1 Indices climatiques : Indice d'aridité de De Martonne (1926)	29
Conclusion	30
Chapitre III : Méthodologie et traitements statistiques	
Introduction	31
III.1 Calcul des indicateurs climatiques de sécheresse et d'aridité	31
III.1.1 Indicateurs climatiques de sécheresse.....	31
III.1.1.1 Définitions sécheresse	31
III.1.1.2 Indicateurs de sécheresse	32
III.1.1.3 Calcul de l'indice SPEI (échelle de 12 mois)	32
III.1.2 Indicateurs climatiques d'aridité	34
III.1.2.1 Définition d'aridité	34
III.1.2.2 Indicateurs d'aridité « AI ».....	34
III.2 Analyses statistiques	34
III.2.1 Test non paramétriques	34
III.2.2 Analyse des tendances climatiques	35
Conclusion	36
Chapitre IV : Résultats et discussion	
Introduction	37
IV.1. Evolution de la sécheresse	37
IV.1.1 Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI-12)	37
IV.1.1.1 Homogénéité des séries	39
IV.1.2 Analyse des tendances climatiques	40

IV.2 Évolution de l'aridité	43
IV.2.1 Homogénéité des séries	45
IV.2.2 Analyse des tendances climatiques	46
IV.3 Analyse de l'évaporation du lac du barrage de Beni Haroun	48
IV.3.1 Homogénéité	48
IV.3.2 Tendance de l'évaporation	50
IV.4 Relation entre les paramètres climatiques et évaporation du lac du barrage	52
IV.5 Discussion des résultats	54
IV.5.1 Identification des principaux facteurs de perte	54
IV.5.2 Sensibilité du barrage aux épisodes de sécheresse	54
IV.5.3 Limites de l'analyse	54
IV.6 Implications de l'évaporation pour la gestion des ressources en eau et Mesures structurelles de réduction de l'évaporation	55
IV.6.1 Implications de l'évaporation pour la gestion des ressources en eau	55
IV.6.2 Mesures structurelles de réduction de l'évaporation	55
Conclusion	56
Conclusion générale	57
Références bibliographiques	59

ListedesTableaux

CHAPITRE I :

Tableau I.1 : Synthèse des impacts quantifiés du changement climatique sur l'évaporation des barrages par région.....	11
--	----

CHAPITRE II :

Tableau II.1. Les caractéristiques des stations climatiques sélectionnées.....	14
Tableau II.2: Précipitations annuelle maximale, minimale et moyenne pour les stations étudiées (1950-2025).....	16
Tableau II.3 : Précipitations moyenne mensuelles interannuelles des stations étudiées en mm (1950-2025).....	17
Tableau II.4. Températures moyennes mensuelles interannuelles des stations étudiées en °C (1950-2025).....	18
Tableau II.5. Variation moyenne mensuelle interannuelles de la vitesse de vent des stations étudiée en m/s (1950-2025).....	19
Tableau II.6. Variation moyenne mensuelle interannuelles de l'humidité relative des stations étudiées en % (1950-2025).....	20
Tableau II.7. Périodes sèches et humides des stations étudiées (1950-2025).....	21
Tableau II. 8 : Calcul de l'ETP mensuelles interannuelles des stations d'étude (1950-2025).....	27
Tableau II.9. Evaporation du lac du Beni Haroun en Hm ³ (2003 - 2025).....	29
Tableau II.10 : Valeurs de l'indice d'aridité de De Martonne.....	30
Tableau II.11. Indice d'aridité de De Martonne dans les stations étudiées (1950-2025).....	30

CHAPITRE III :

Tableau III.1. Différents types d'indicateurs de sécheresse.....	32
Tableau III.2. Échelles de temps du SPEI et types de sécheresse associés.....	33
Tableau III.3. Classes de sécheresse en fonction de la valeur du SPEI.....	34
Tableau III.4. indices d'aridité (AI) et zonations écoclimatiques correspondantes.....	35

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1. Valeurs de SPEI-12 de stations étudiées (1981-2025)	38
Tableau IV.2. Résultats du test de Pettitt par station.....	39
Tableau IV.3. Résultats des tests de Mann-Kendall et de pente de Sen pour l'indice SPEI.....	41

Tableau IV.4. Évolution de l'indice d'aridité dans quatre stations de 1981 à 2025.....	44
Tableau IV.5. Résultats du test de Pettitt pour la détection de rupture dans les séries de l'indice d'aridité des stations étudiées.....	45
Tableau IV.6. Résultats des tests de Mann-Kendall et de pente de Sen pour l'indice d'aridité des stations étudiées (1981-2025).....	47
Tableau IV.7. Test de Pettitt appliqué à l'évaporation annuelle du lac (2003-2025).....	49
Tableau IV.8. Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pente de Sen appliqués à l'évaporation annuelle du lac (2003-2025).....	50
Tableau IV.9. Résultats de l'ITA pour la série de l'évaporation annuelle du lac (2003-2025).....	51

Listed des Figure

Chapitre I :

Figure I.1 : L'effet de serre.....	5
Figure I.2 : Concentration en CO ₂ dans l'Atmosphère (Moyenne annuelle globale en ppm).....	5
Figure I.3: Guidage du modèle climatique régional par le modèle climatique global.....	8
Figure I.4 : Estimation régionale des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et la santé.....	9

Chapitre II :

Figure. II.1- situation géographique du barrage de Beni Haroun et sa retenue.....	14
Figure. II.2- Situation géographique des stations climatiques limitrophes du site d'étude.....	15
Figure. II. 3- Variation des précipitations annuelles des stations étudiées (1950-2025).....	16
Figure II.4 - Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles des stations étudiées (1950 / 2025).....	17
Figure. II.5- Variation des températures moyennes mensuelles interannuelles des stations étudiées (1950-2025).....	18
Figure. II.6- Variation de la vitesse moyenne mensuelle interannuelle des vents des stations étudiées (1950-2025).....	19
Figure. II.7- Évolution mensuelle de l'humidité relative dans les stations étudiées (1950-2025).....	20
Figure. II.8- Diagrammes pluviothermiques selon Bagnouls et Gaussen, des stations étudiées (1950 / 2025).....	21
Figure. II.9- Bac d'évaporation de catégorie A équipé d'une station météorologique et d'une cage de protection.....	23
Figure. II.10- Variation mensuelle de l'ETP dans les stations étudiées (1950-2025).....	28
Figure. II.11- Variation annuelle de l'évaporation du lac du Beni Haroun (2003-2025).....	29

Chapitre IV :

Figure. IV.1- Valeurs de l'indice SPEI-12 pour les quatre stations sur la période 1981-2025.....	39
Figure. IV.2- Détection de rupture par le test de Pettitt pour les séries temporelles du SPEI : représentations graphiques par station.....	40
Figure. IV.3- Représentation graphique des tendances du SPEI par la méthode de la pente de	

Sen.....	42
Figure. IV.4- Analyse des tendances innovantes (ITA) de l'indice SPEI-12 : comparaison avant et après la construction du barrage (1981-2002 vs 2003-2025).....	43
Figure. IV.5- Fluctuations de l'indice d'aridité (1981-2025).....	45
Figure. IV.6- Représentation graphique des séries de l'indice d'aridité et des résultats du test de Pettitt (1981-2025).....	46
Figure. IV.7- Évolution temporelle de l'indice d'aridité avec la droite de tendance (pente de Sen), la moyenne générale et l'intervalle de confiance (1981-2025).....	47
Figure. IV.8- Analyse des tendances innovante (ITA) de l'indice d'aridité pour les quatre stations (comparaison des sous-périodes 1981-2002 et 2003-2025).....	48
Figure. IV.9- Résultats du test de Petit visant à déterminer le point de basculement dans la courbe d'évaporation du lac Al-Sadd (2003-2025).....	49
Figure. IV.10- Série chronologique de l'évaporation annuelle du lac du barrage avec la courbe de Pente de Sen (2003-2025).....	51
Figure. IV.11- Carte ITA de la tendance annuelle de l'évaporation.....	52
Figure. IV.12- Matrice de corrélation de speamanETP_Lac VS Indices climatiques pour quatre stations.....	53

Introduction générale

Introduction générale

Le réchauffement climatique constitue une perturbation majeure du système terrestre. Selon le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2023), la température moyenne globale a augmenté d'environ 1,1 °C depuis l'ère préindustrielle, avec une accélération marquée depuis les années 1970. Cette hausse engendre une intensification des phénomènes extrêmes (aridité, sécheresses, précipitations diluviennes) et une altération profonde du cycle hydrologique. Parmi les conséquences directes figurent la fonte des glaces, la modification des régimes pluviométriques et l'accroissement de l'évapotranspiration potentielle, affectant ainsi la disponibilité des ressources en eau à toutes les échelles.

Dans les zones arides et semi-arides, où la rareté de l'eau constitue déjà une contrainte structurelle, ces évolutions climatiques risquent d'aggraver les tensions sur les ressources hydriques. La région méditerranéenne, et plus particulièrement l'Afrique du Nord, est identifiée comme un « point chaud » du changement climatique, avec des projections indiquant une hausse des températures de 2 à 4 °C d'ici 2100 et une diminution des précipitations annuelles de 10 à 30 %. Dans ce contexte, les barrages, qui représentent des infrastructures stratégiques pour le stockage et la régulation de l'eau, se trouvent soumis à des pressions accrues. L'évaporation des plans d'eau, phénomène naturel jusqu'alors souvent négligé dans les bilans hydriques, devient une composante critique : elle réduit la capacité effective des réservoirs, compromet la sécurité hydrique et amplifie les conflits d'usage entre secteurs agricole, industriel et domestique.

En Algérie, où la gestion de l'eau revêt une importance vitale, le barrage de Beni Haroun (wilaya de Mila) occupe une place centrale dans le dispositif hydraulique national. Mis en service en 2003, cet ouvrage, l'un des plus grands d'Afrique avec une capacité initiale de 960 millions de mètres cubes, alimente en eau potable plusieurs wilayas de l'Est (Constantine, Jijel, Batna, Khenchela, Oum El Bouaghi) et fournit l'irrigation à des centaines d'hectares de terres agricoles. Toutefois, comme de nombreux réservoirs en région méditerranéenne, il est potentiellement vulnérable à l'augmentation des pertes par évaporation sous l'effet du réchauffement climatique. Les études régionales récentes menées en Tunisie voisine (barrage de Sidi Salem) ont ainsi montré une réduction de près de 48 % de la surface en eau en 40 ans, en grande partie attribuée aux interactions entre hausse des températures, baisse des précipitations et évapotranspiration accrue. Ces observations suggèrent que les barrages algériens, soumis aux mêmes contraintes climatiques, pourraient connaître des évolutions similaires, justifiant une évaluation quantitative rigoureuse.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire. L'objectif général de cette étude est d'analyser l'impact du changement climatique sur l'évaporation du lac du barrage de Beni Haroun et, plus largement, sur la disponibilité des ressources en eau dans sa région d'influence. Pour atteindre cet objectif, nous nous appuyons sur des données climatiques multi-décennales (1950-2025) issues de quatre stations réparties autour de la retenue (Beni Haroun, Ain tin, Mechta Seradj et El Kheneg) ainsi que sur les relevés d'évaporation annuelle du lac fournis par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT). La méthodologie combine plusieurs approches complémentaires :

1. Le calcul de l'indice standardisé de précipitation-évapotranspiration (SPEI-12) pour caractériser l'évolution de la sécheresse.
2. L'indice d'aridité (AI) pour qualifier le degré d'aridité du climat local.

3. Des tests statistiques non paramétriques (Pettitt, Mann-Kendall, pente de Sen, Innovative Trend Analysis) pour détecter d'éventuelles ruptures et tendances dans les séries temporelles.
4. Une analyse de corrélation de Spearman pour identifier les principaux facteurs climatiques contrôlant l'évaporation.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres.

- Le premier chapitre dresse une synthèse bibliographique sur le changement climatique (phénomènes, causes, modèles) et présente un état de l'art des études mondiales et régionales sur l'impact de ce changement dans l'évaporation des barrages, en insistant sur les résultats obtenus en Europe, au Moyen-Orient, en Afrique du Nord et plus spécifiquement au Maghreb.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du site d'étude (barrage de Beni Haroun) et à l'analyse du contexte climatique local à partir des quatre stations retenues (précipitations, températures, vent, humidité relative, évapotranspiration potentielle).
- Le troisième chapitre détaille la méthodologie et les traitements statistiques employés : indicateurs de sécheresse (SPEI) et d'aridité (AI), tests de rupture et de tendance, ainsi que la méthode ITA.
- Enfin, le quatrième chapitre présente les résultats obtenus évolutions du SPEI-12, de l'AI, de l'évaporation du lac, discute les relations entre variables climatiques et pertes évaporatoires, et propose des pistes d'adaptation pour une gestion durable des ressources en eau dans un contexte de changement climatique.
- Une conclusion générale synthétise les principaux enseignements et ouvre des perspectives pour de futures recherches.

Chapitre I :
Synthèse bibliographique
Changement climatique et
évaporation des barrages

I.1 Le changement climatique : phénomènes, causes et modèles :

I.1.1 Phénomène :

Le changement climatique désigne l'ensemble des variations des paramètres climatiques (température, précipitations, vents, etc.) qui persistent sur de longues périodes, généralement plusieurs décennies. Contrairement à la variabilité climatique naturelle qui caractérise les fluctuations à court terme, le changement climatique implique une modification durable des conditions moyennes.

Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2023), la température moyenne mondiale a augmenté d'environ **1,1 °C** depuis l'ère préindustrielle (1850-1900). Cette hausse, sans précédent dans l'histoire récente de la terre, s'accélère depuis les années 1970. Les observations satellitaires et les relevés terrestres confirment :

- Une augmentation plus marquée des températures sur les continents que sur les océans ;
- Un réchauffement plus prononcé aux latitudes élevées (notamment l'Arctique) ;
- Une intensification des phénomènes extrêmes : vagues de chaleur, sécheresses, précipitations diluviennes.

Le sixième rapport d'évaluation du **GIEC (2023)** souligne que "il est sans équivoque que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, les océans et les continents". Cette affirmation repose sur des milliers d'études et l'analyse de multiples proxys climatiques (carottes glaciaires, cernes d'arbres, sédiments).

I.1.2 Les causes du changement climatique :

Les causes du changement climatique se divisent en deux catégories : naturelles et anthropiques. Les recherches récentes confirment la prédominance des facteurs humains depuis la révolution industrielle.

I.1.2.1 Causes naturelles :

Avant l'ère industrielle, le climat variait sous l'effet de facteurs naturels :

- **Les variations de l'activité solaire** : Les cycles de taches solaires modifient légèrement l'énergie reçue par la Terre (Solanki et al., 2024).
- **Le volcanisme** : Les éruptions volcaniques majeures projettent des aérosols sulfurés dans la stratosphère, réfléchissant le rayonnement solaire et provoquant un refroidissement temporaire.
- **Les paramètres orbitaux (cycles de Milankovitch)** : Les variations de l'orbite terrestre modifient la distribution saisonnière de l'énergie solaire sur des échelles de temps millénaires.

I.1.2.2 Causes anthropiques (forçage humain) :

Depuis 1850, l'activité humaine est devenue le principal moteur du changement climatique :

- **Émissions de gaz à effet de serre (GES)** : La combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), la déforestation et l'agriculture intensive libèrent du CO₂, du méthane (CH₄) et du protoxyde d'azote (N₂O). Selon le **Global Carbon Project (GCP, 2025)**, les émissions annuelles de CO₂ ont atteint 40,6 milliards de tonnes en 2024 (Figure I.1).
- **Changement d'occupation des sols** : La déforestation tropicale, notamment en Amazonie et en Indonésie, réduit la capacité de séquestration naturelle du carbone (Hansen et al., 2024).
- **Effets de rétroaction** : La fonte de la banquise arctique réduit l'albédo (pouvoir réfléchissant), exposant des océans plus sombres qui absorbent davantage de chaleur, amplifiant ainsi le réchauffement.

- *Pollution* : La pollution, principalement associée aux milieux urbains, est également liée aux changements climatiques. Les changements climatiques et la pollution atmosphérique sont tous deux exacerbés par la consommation de combustibles fossiles, qui augmente les émissions de CO₂, principale cause du réchauffement de la planète. (Zemouche,2024)
- *L'industrialisation dans les pays riche* : Le constat est rapidement dressé que l'industrialisation est une des causes principales de l'augmentation des températures à la surface de la terre. En effet, il est difficile de nier le contraste entre les températures qui prévalaient sur la planète avant l'ère industrielle, c'est-à-dire avant 1850, et les températures qui ont suivi cette ère. En particulier, une augmentation nette du réchauffement climatique a été observée à partir de 1950. Selon les experts du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) dans leur quatrième rapport publié en 2007, l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est probablement responsable de ce réchauffement climatique constaté depuis 1950. Or, ces gaz ont été principalement produits lors de l'industrialisation des pays riches, qui s'est appuyée sur la consommation d'énergies fossiles telles que le pétrole et le charbon. (Boukhatem et Khaldi ,2023)
- *Utilisation massif des engrais* : l'utilisation massive d'engrais et de certains gaz fluorés Le changement climatique que nous connaissons aujourd'hui ne résulte pas uniquement de l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. D'autres actions humaines entreprises au cours du siècle dernier ont également joué un rôle important dans l'aggravation de ce phénomène. (Zemouche,2024)
- *L'élevage intensif* : Si l'on veut discuter de l'impact de l'élevage intensif sur le changement climatique, il est important de préciser qu'il s'agit de l'élevage de bétail. Un rapport publié par la FAO (l'Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture). Selon ce rapport, en 2005, l'élevage de bétail était responsable de 14,5 % des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines dans le monde. La production de viande et de produits laitiers, quant à elle, est à l'origine d'environ 50 % des émissions de gaz à effet de serre liées à l'alimentation au niveau mondial. C'est pourquoi de plus en plus d'appels à ne plus consommer de viande ont été lancés dans le monde entier au cours des dix dernières années ; En 2013 a mis en évidence la part de responsabilité de l'élevage de bétail dans les émissions de gaz à effet de serre.(IFG)
- *La déforestation* : Les arbres ont un rôle majeur dans la régulation de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. En effet, grâce au processus de photosynthèse qui se produit dans leurs feuilles, ils absorbent le dioxyde de carbone de l'atmosphère et le transforment en oxygène, contribuant ainsi à la régulation du climat de la planète. C'est pourquoi les grandes forêts comme la forêt amazonienne sont souvent appelées "les poumons de la Terre". Par conséquent, la déforestation qui réduit le nombre d'arbres et de feuilles capables d'absorber le dioxyde de carbone de l'air, entraîne une diminution de la quantité de dioxyde de carbone absorbé, aggravant ainsi l'effet de serre dû à ce gaz à la surface de la Terre.(Boukhatem et Khaldi ,2023)
- *Production de gaz fluorés* : À la différence des autres gaz à effet de serre que nous avons présentés précédemment, les gaz fluorés ne sont pas d'origine naturelle. C'est plutôt l'activité humaine, en particulier la fabrication de certains biens de consommation tels que les réfrigérateurs, les pneus, les aérosols, etc., qui les a introduits dans l'atmosphère. Il y a principalement quatre types de produits qui émettent ces gaz fluorés : les équipements de réfrigération et de refroidissement, les mousses, les dispositifs de protection incendie et les aérosols. Les gaz fluorés ont un impact important sur le réchauffement climatique, leur potentiel de réchauffement global étant nettement supérieur à celui du dioxyde de carbone. Les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆) sont les trois principaux gaz fluorés étudiés par les scientifiques pour mesurer leur impact sur le réchauffement climatique. Le GIEC (Groupe d'experts

intergouvernemental sur l'évolution du climat) estime que le PRG(Potentiel de Réchauffement Global)de l'hexafluorure de soufre serait supérieur à celui du dioxyde de carbone de 23 900 fois sur une période de 100 ans. (IFG)

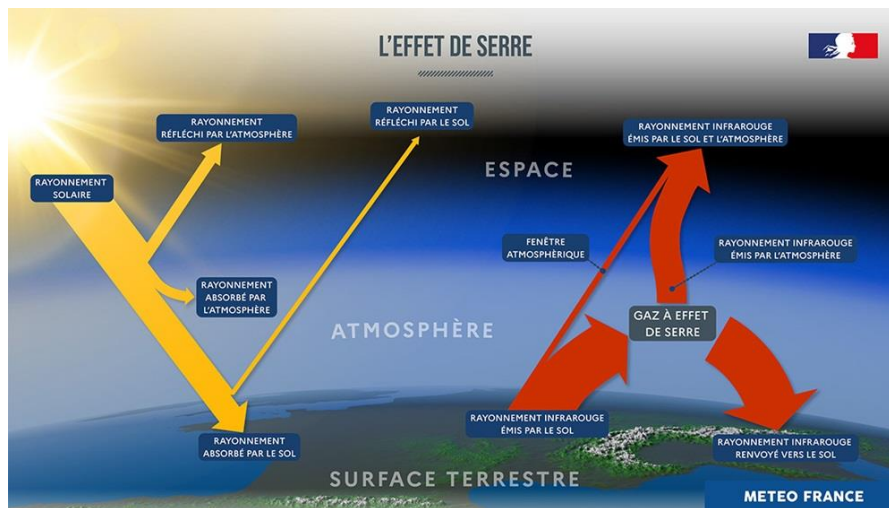


Figure I.1 : L'effet de serre. (<http://météofrance.com/comprendre-climat/monde/leffet-de-serre>)

I.1.3 Les conséquences :

Les conséquences du changement climatique sont multiples et interconnectées, affectant tous les compartiments du système Terre.

I.1.3.1 Conséquences physiques :

- **Fonte des glaces et élévation du niveau de la mer :** Les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique perdent respectivement 270 et 150 milliards de tonnes par an (**IMBIE Team, 2024**). Le niveau marin moyen a augmenté de 21 cm depuis 1900, avec une accélération marquée.
- **Intensification du cycle hydrologique :** L'atmosphère plus chaude retient davantage de vapeur d'eau (loi de Clausius-Clapeyron), amplifiant à la fois les sécheresses et les précipitations extrêmes (**Trenberth, 2024**).
- **Acidification des océans :** L'absorption d'un quart du CO_2 anthropique par les océans modifie leur chimie, menaçant les organismes calcifiants (coraux, mollusques) (Fig. I.2).

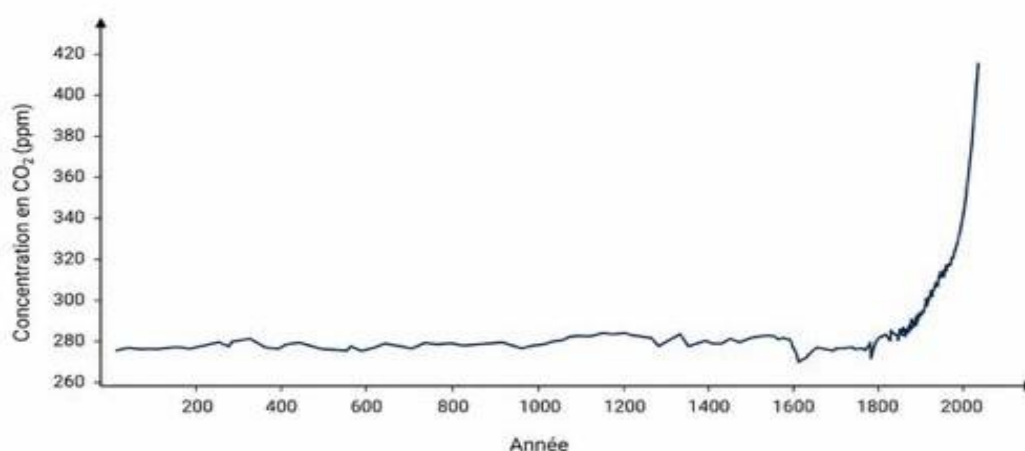


Figure I.2 : Concentration en CO_2 dans l'Atmosphère (Moyenne annuelle globale en ppm) .(<http://météofrance.com/comprendre-climat/monde/leffet-de-serre>)

I.1.3.2 Conséquences sur les ressources en eau :

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude. Le changement climatique affecte directement la disponibilité en eau :

- Modification des régimes de précipitations ;
- Réduction du manteau neigeux et des glaciers, sources d'eau pour de nombreux bassins versants ;
- Augmentation de l'évapotranspiration potentielle, réduisant les écoulements et le remplissage des nappes ;
- Dégradation de la qualité de l'eau par concentration des polluants en période d'étiage.

I.1.3.3 Conséquences socio-économiques :

Les impacts humains incluent l'insécurité alimentaire, les migrations climatiques, les tensions géopolitiques autour des ressources transfrontalières et les coûts économiques liés aux catastrophes naturelles.

I.2. Modèles climatiques :

I.2.1 Les modèles climatiques globaux (GCM) :

Actuellement, plusieurs modèles climatiques sont disponibles pour suivre l'évolution du climat et évaluer les effets des changements climatiques futurs. Ce sont des représentations numériques du système climatique basées sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes ainsi que sur leurs interactions et rétroactions, en prenant en compte la totalité ou une partie de ses propriétés connues. Les modèles climatiques peuvent être plus ou moins complexes, en fonction de la résolution spatiale, du degré d'explicitation des processus physiques, chimiques ou biologiques, ainsi que du degré d'incorporation de paramétrages empiriques pour une composante ou une combinaison de composantes spécifiques du système climatique. Ces modèles sont souvent utilisés dans les études de recherche et de simulation du climat, mais ils sont également utilisés pour les prévisions climatiques opérationnelles, telles que les prévisions mensuelles, saisonnières et interannuelles (Hrour, 2024).

Les modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO ou GCM) sont des outils puissants pour modéliser le système climatique. Ils consistent en une représentation numérique de la planète et des interactions complexes entre l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales, qui gouvernent l'évolution du climat. Leur développement vise à simuler le climat terrestre sur de longues périodes, à mieux comprendre les changements climatiques passés, présents et futurs, ainsi qu'à évaluer les conséquences potentielles de ces changements sur la planète et les êtres vivants (Fig. I.3).

Les GCM couvrent l'ensemble du globe, avec pour inconvénient d'utiliser des mailles relativement grossières, supérieures à 100 km. Cette résolution spatiale ne permet pas une représentation précise du relief, des côtes ni de l'occupation des sols. Néanmoins, cette résolution est suffisante pour représenter les mouvements de grande échelle (milliers de kilomètres) associés aux processus synoptiques, tels que les dépressions et les anticyclones des moyennes latitudes. Le choix de cette résolution spatiale est principalement dû à la complexité et au coût en temps de calcul des GCM. Cependant, cette résolution est insuffisante pour représenter les phénomènes à petite échelle, tels que les études des événements extrêmes, les études d'impact et de stratégies d'adaptation associées aux changements climatiques, qui nécessitent une résolution plus fine de quelques dizaines de kilomètres.

Au cours des deux dernières décennies, le nombre de GCM dans le monde a augmenté de manière significative. Aujourd'hui, il existe plus de 20 modèles climatiques globaux développés par différents centres de recherche, qui peuvent être utilisés pour effectuer des simulations climatiques. Bien que les GCMs soient largement considérés comme les modèles les plus complets pour simuler le système climatique, ils reposent sur des hypothèses simplifiées et des approximations comme tout modèle. En outre, les incertitudes dans les paramètres de modélisation et les données d'entrée peuvent également influencer les résultats des simulations. (Hrour,2024)

I.2.2 Les modèles climatiques régionaux (RCM) :

Les activités humaines modifient le climat de certaines régions. Les villes créent des microclimats et élèvent la température de quelques degrés. La déforestation accélère la sécheresse.(Elouissi,2016)

Comme le montrent les données d'observation disponibles, les changements du climat à l'échelle régionale, en particulier les hausses de température, ont déjà eu une influence sur un large éventail de systèmes physiques et biologiques dans de nombreuses parties du globe.

Parmi les changements observés, on peut mentionner le retrait des glaciers, le dégel du pergélisol, le gel tardif et la dislocation précoce de la glace sur les rivières et les lacs, l'allongement de la période de végétation aux latitudes moyennes à élevées, la progression en altitude ou le déplacement vers les pôles des aires de distribution géographique d'un certain nombre d'espèces végétales et animales, la régression de certaines populations végétales et animales et la précocité de la floraison des arbres, de l'apparition des insectes et de la ponte des oiseaux. Certaines corrélations entre l'évolution des températures à l'échelle régionale et les changements observés des systèmes physiques et biologiques ont été établies dans nombre de milieux marins, terrestres et aquatiques (Ahmad et al., 2001).

Beaucoup d'études ont montré que les villes présentent des micros-climat, ou encore appelé "Ilot de Chaleur urbain" (Oke, T. R. (1982) et prouve ainsi que l'activité humaine influe sur le climat

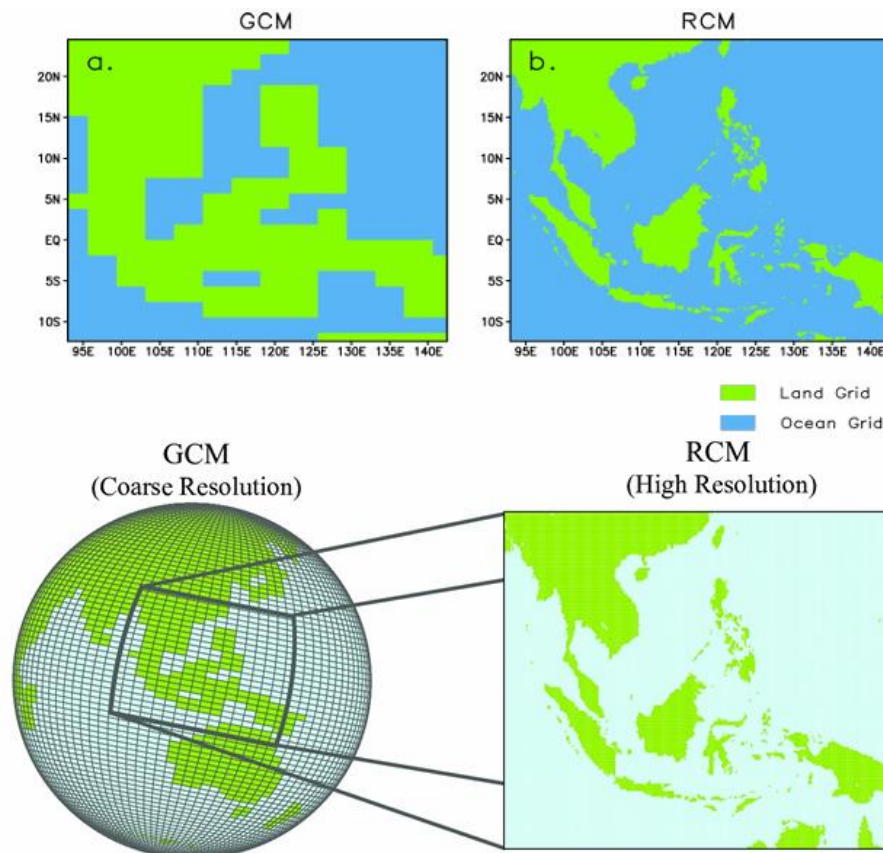


Figure I.3: Guidage du modèle climatique régional par le modèle climatique global. (Tangang et al. 2018)

I.3 Impact du changement climatique sur les ressources en eau : synthèse des études mondiales et régionales (Méditerranée, Afrique du Nord).

L'eau est l'un des principaux problèmes actuels et futurs auxquels est confrontée l'Afrique. L'approvisionnement en eau à partir des cours d'eau, des lacs n'est pas également accessible, sa répartition géographique naturelle est irrégulière et la consommation d'eau ne peut y être qualifiée de durable. Le changement climatique est susceptible d'imposer des contraintes supplémentaires sur la disponibilité et l'accessibilité de l'eau. Arnell (2004) a décrit les implications des scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) pour la projection de l'écoulement fluvial à l'horizon 2050 à l'aide du modèle climatique HadCM320. Ces expériences démontrent une diminution significative du ruissellement dans les régions septentrionales et australes de l'Afrique, mais prévoient une augmentation dans les régions orientales et dans certaines parties semi-arides de l'Afrique subsaharienne. Cependant, les résultats de plusieurs modèles indiquent une variation considérable d'un modèle à l'autre, avec une diminution en Afrique du Nord et une augmentation en Afrique de l'Est parmi les réponses les plus robustes. Il existe un large éventail de projections pour les précipitations en Afrique subsaharienne, certains modèles prévoyant des hausses, d'autres des baisses. Les incidences prévues doivent être considérées dans le contexte de cette grande incertitude. (Palutikof, 2008)

I.4 Impact du changement climatique sur l'évaporation des barrages :

L'impact du changement climatique sur l'évaporation des barrages constitue une préoccupation majeure pour la gestion des ressources en eau, tant à l'échelle mondiale qu'en Algérie. Les recherches récentes montrent une accélération de ce phénomène sous l'effet de la hausse des températures.

L'évaporation augmentera avec le réchauffement climatique. Une étude de Shah et al. (2024) a développé un Indice Intégré de Sécheresse des Réservoirs (IRDI) pour 164 réservoirs à travers le monde. Cet indice combine les effets du stockage et du taux d'évaporation. Leurs résultats indiquent que l'Afrique connaît des sécheresses de réservoirs relativement plus longues, tandis que l'Asie subit des sécheresses plus intenses, soulignant ainsi l'impact global et différencié de ce phénomène (Shah et al., 2024).

Le mécanisme physique sous-jacent est bien établi : l'augmentation de la température de l'air accroît le déficit de saturation de vapeur d'eau, c'est-à-dire la capacité de l'atmosphère à absorber l'humidité. Comme l'explique Lee (2024), une atmosphère plus chaude crée un gradient de vapeur d'eau plus prononcé entre la surface du plan d'eau et l'air ambiant, intensifiant ainsi le flux évaporatif.

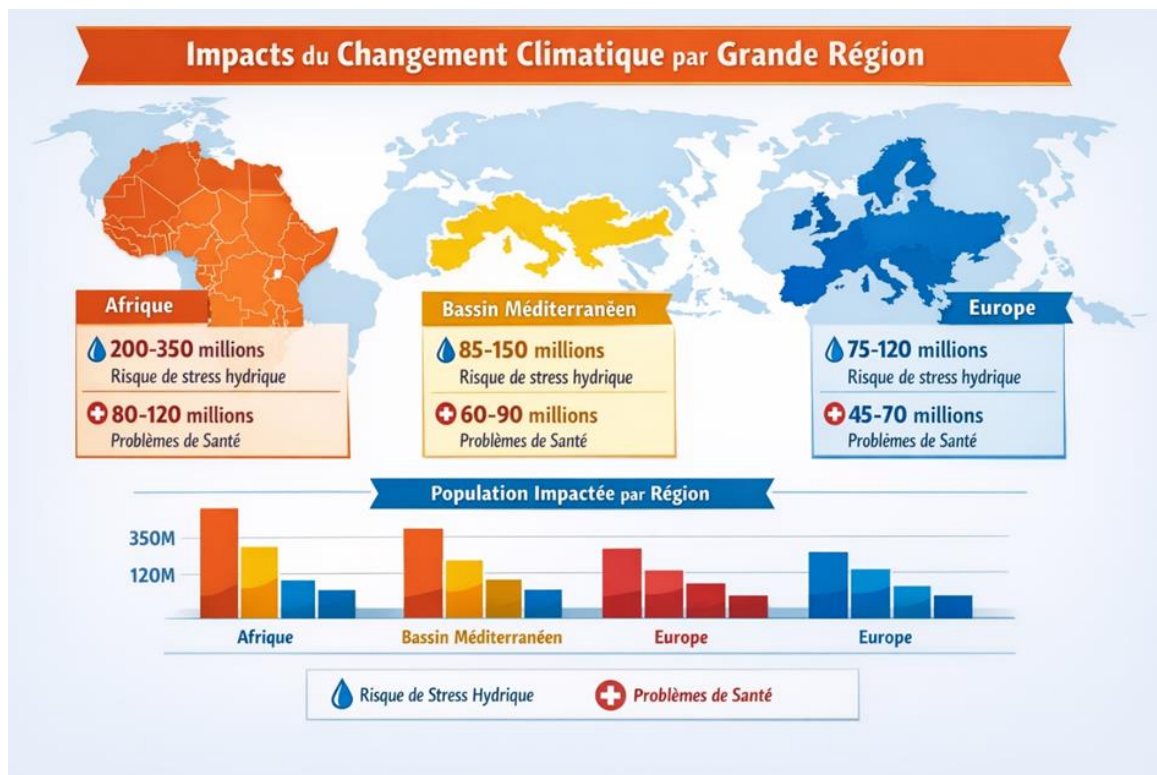


Figure I.4 : Estimation régionale des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et la santé.

I.4.1 En Europe :

Une étude majeure menée par La Fuente et al. (2024) sur 23 lacs et réservoirs européens a projeté une augmentation systématique de l'évaporation en saison chaude pour l'ensemble de ce siècle. Selon leurs modèles, cette augmentation atteindrait en moyenne 21 %, 30 % et 42 % d'ici la fin du siècle (2070-2099) sous les scénarios climatiques RCP 2.6, 6.0 et 8.5, respectivement (La Fuente et al., 2024).

Cette tendance européenne s'inscrit dans un mouvement global où les régions tempérées subissent

également des perturbations hydrologiques majeures. Les projections pour l'Europe du Sud laissent présager des conditions proches de l'aridité saisonnière, affectant directement le tourisme, l'agriculture et l'approvisionnement en eau potable. Les réservoirs espagnols et italiens, déjà soumis à un stress hydrique important, pourraient voir leur efficacité de stockage diminuer considérablement.

I.4.2 En Afrique et au Moyen-Orient :

En Afrique, les défis sont particulièrement prononcés. L'étude de Shah et al. (2024) a spécifiquement mis en évidence que les réservoirs africains connaissent des sécheresses plus longues que ceux des autres continents, amplifiant les risques de pénuries chroniques. Cette situation est aggravée par la forte dépendance des populations à l'agriculture pluviale et la faible densité des infrastructures de stockage.

Au Moyen-Orient, Aminzadeh et al. (2025) ont quantifié un "paradoxe du stockage de l'eau". En utilisant l'imagerie satellite, ils ont identifié plus de 133 700 petits réservoirs agricoles dans la région Mena (Middle East and North Africa). Leurs travaux estiment que les pertes annuelles par évaporation pour ces seuls petits réservoirs pourraient dépasser 2,4 milliards de mètres cubes (Aminzadeh et al., 2025). Cette eau perdue représente l'équivalent de la consommation annuelle de plusieurs millions d'habitants, soulevant des questions sur la pertinence de certaines stratégies de stockage dans les régions arides.

À l'échelle d'un grand réservoir, l'étude de cas du barrage de Mossoul en Irak par Aljuhaishy et al. (2025) est éloquent. Le réservoir perd environ 0,9 milliard de mètres cubes par an par évaporation. Les chercheurs ont observé une augmentation de 13,6 % des taux d'évaporation sur 30 ans (1990-2020) et confirment que la température à l'effet direct le plus fort sur ce processus (Aljuhaishy et al., 2025). Cette perte colossale compromet les objectifs multiples du barrage : production hydroélectrique, irrigation et régulation des crues.

Enfin, une étude innovante de Nevermann et al. (2025) sur le bassin transfrontalier de l'Helmand (Afghanistan et Iran) montre une autre conséquence : les 284 millions de mètres cubes d'eau évaporés des réservoirs en 2023 sont en moyenne recyclés à 92 % en précipitations hors du bassin, bénéficiant à des pays comme l'Inde (25 %) ou le Pakistan (19 %), mais représentant une perte nette pour les pays d'origine (Nevermann et al., 2025). Cette découverte met en lumière la dimension transfrontalière du problème : l'eau évaporée d'un réservoir n'est pas perdue pour le système climatique global, mais elle l'est souvent pour le bassin versant qui a investi dans l'infrastructure.

I.4.3 En Algérie et au Maghreb :

Bien que les résultats de recherche spécifiquement axés sur l'Algérie soient moins nombreux dans les bases de données internationales, la situation du pays peut être déduite des études régionales sur le Maghreb.

Une étude menée en Tunisie voisine par Ayadi et al. (2025) sur le barrage de Sidi Salem est particulièrement révélatrice. Sur une période de 40 ans (1985-2025), la surface en eau du barrage a diminué de 47,6 %, passant de 37,8 km² à 19,8 km². Cette réduction drastique est attribuée aux interactions complexes entre précipitations, température et évapotranspiration, ainsi qu'à la sédimentation (Ayadi et al., 2025).

Ce cas tunisien est un indicateur fort pour l'Algérie, qui partage un climat méditerranéen et semi-aride similaire. Les barrages algériens sont soumis aux mêmes pressions :

- *Hausse des températures* : Les projections pour l'Algérie indiquent une augmentation de 2°C à 4°C d'ici 2100 selon les scénarios, intensifiant l'évaporation.
- *Baisse des précipitations* : Les modèles s'accordent sur une diminution des précipitations annuelles de 10 à 30 % sur le Maghreb.

- *Atmosphère plus "asséchante"* : Plus chaude et moins humide, elle augmente le gradient de vapeur d'eau, comme l'explique Lee (2024).
- *Sédimentation accélérée* : L'érosion des sols, amplifiée par des pluies plus intenses, réduit la capacité de stockage des réservoirs, aggravant l'impact relatif de l'évaporation.

Cette dynamique compromet la fiabilité des ouvrages hydrauliques pour la satisfaction des besoins en eau potable et agricole. Yildiz et al. (2024) ont modélisé cette situation pour le projet Akmes en Turquie, montrant que l'augmentation des pertes par évaporation peut réduire significativement la garantie de fourniture d'eau, un résultat transposable aux bassins algériens.

Les principaux barrages algériens (Keddara, Hamiz, Beni Haroun, Taksebt) sont potentiellement vulnérables. Le barrage de Beni Haroun, le plus grand du pays avec une capacité de près d'un milliard de m³, pourrait voir ses pertes annuelles par évaporation augmenter de plusieurs millions de m³ par décennie, accentuant la pression sur les ressources en eau déjà limitées.

I.4.4 Discussion :

L'analyse des différentes régions du monde fait émerger des ordres de grandeur convergents malgré la diversité des contextes climatiques et des méthodologies employées. Pour faciliter la comparaison et la discussion, nous avons synthétisé dans le Tableau I.1 les principales données quantitatives issues des études récentes citées précédemment.

Tableau I.1 : Synthèse des impacts quantifiés du changement climatique sur l'évaporation des barrages par région.

Zone géographique	Source	Métrique clé / Projection	Période de référence
Monde (global)	Shah et al. (2024)	Afrique : sécheresses de réservoirs plus longues ; Asie : plus intenses	Étude rétrospective
Europe	La Fuente et al. (2024)	+21% (RCP2.6) à +42% (RCP8.5) d'évaporation en saison chaude	Projection 2070-2099
MENA (Middle East and North Africa)	Aminzadeh et al. (2025)	> 2,4 milliards de m ³ /an perdus par évaporation (petits réservoirs)	Estimation annuelle
Irak (Mossoul)	Aljuhaishy et al. (2025)	+13,6% d'évaporation sur 30 ans	1990-2020
Tunisie (Sidi Salem)	Ayadi et al. (2025)	-47,6% de surface en eau du barrage	1985-2025
Bassin Helmand	Nevermann et al. (2025)	284 millions de m ³ évaporés en 2023	Année 2023

La lecture de ce tableau appelle plusieurs observations. Tout d'abord, l'ampleur des pertes est considérable, que ce soit pour les grands réservoirs comme Mossoul (0,9 milliard de m³/an) ou pour l'accumulation des petits ouvrages dans la région MENA (2,4 milliards de m³/an). Ensuite, la tendance à la hausse est clairement établie, avec des augmentations projetées de 21 à 42 % en Europe d'ici la fin du siècle, et une hausse déjà observée de 13,6 % à Mossoul sur les trois dernières décennies. Enfin, le cas du barrage de Sidi Salem en Tunisie est particulièrement alarmant : la perte de près de la moitié de sa surface en eau en 40 ans illustre la vulnérabilité extrême des ouvrages maghrébins, dont l'Algérie.

Cette disparité régionale souligne l'importance d'une approche localisée. Si les mécanismes physiques sont universels (lien entre température et évaporation), leurs conséquences sont modulées par les conditions climatiques locales, la morphologie des réservoirs et les modes de gestion. Pour l'Algérie, les données du tableau confirment la nécessité d'une quantification précise des pertes

actuelles et futures, afin d'anticiper les adaptations nécessaires.

Conclusion :

En conclusion, les données récentes confirment une tendance mondiale à l'augmentation de l'évaporation des barrages sous l'effet du changement climatique. Ce phénomène, bien documenté en Europe et au Moyen-Orient, affecte également le Maghreb. Pour l'Algérie, les études régionales, notamment en Tunisie, suggèrent une vulnérabilité élevée de ses propres réservoirs. La compréhension de ces mécanismes et l'évaluation quantitative des pertes futures, sont essentielles pour adapter la gestion des ressources en eau et garantir la sécurité hydrique du pays dans les décennies à venir. Notre travail de mémoire s'inscrit dans cette perspective, en cherchant à quantifier plus précisément l'impact de l'évaporation sur un barrage algérien représentatif.

CHAPITRE 2 :

Présentation du site d'étude et contexte environnemental

Introduction :

L'évaluation rigoureuse de l'impact du changement climatique sur les pertes par évaporation d'un réservoir d'eau nécessite une compréhension approfondie du cadre physique, climatique et anthropique dans lequel celui-ci s'inscrit. En effet, les volumes évaporés ne résultent pas uniquement des seules conditions atmosphériques ; ils sont également influencés par la morphologie de la retenue, qui conditionne la surface d'échange eau-atmosphère, par les apports hydrologiques du bassin versant, qui régulent les fluctuations de niveau, ainsi que par les prélèvements anthropiques, qui modifient le temps de résidence de l'eau. Dès lors, la quantification des pertes évaporatoires et l'analyse de leur évolution sous l'effet des dérèglements climatiques ne peuvent faire l'économie d'une caractérisation détaillée du site d'étude.

Ce chapitre a pour objectif de dresser un portrait exhaustif du barrage de Beni Haroun et de son environnement régional, constituant ainsi une base de référence indispensable pour l'interprétation des résultats analytiques présentés dans les chapitres suivants. Dans un second temps, nous analyserons le contexte climatique local en nous appuyant sur les données enregistrées aux stations de Beni Haroun, Ain tin, Mechta Seradj et El kheneg. L'accent sera mis sur le régime pluviométrique et thermique historique, mais également sur les autres variables climatiques déterminantes dans le processus évaporatoire que sont le vent, l'humidité relative et l'ensoleillement. Cette caractérisation revêt une importance particulière dans le cadre de cette étude, puisqu'elle pose les jalons de l'analyse des ruptures climatiques et de leurs effets sur l'évaporation.

II.1 Présentation du site d'étude :

Le site d'étude correspond au barrage de Beni Haroun et à sa retenue d'eau. Cet ouvrage hydraulique majeur est situé dans la wilaya de Mila, à environ 7 kilomètres au nord de son chef-lieu, aux coordonnées géographiques 36°34'00" N, 6°16'30" E (Fig. II.1). Sur le plan géographique, il s'inscrit dans le Tell oriental algérien, une région caractérisée par un relief verdoyant et vallonné, dominé par des massifs montagneux tels que le sommet de Msid Aicha, qui culmine à 1 400 mètres d'altitude. Mis en service en 2003, ce barrage revêt une importance stratégique de premier ordre et est souvent présenté comme le « fleuron » du dispositif hydraulique national (Chebbah et Kabour, 2018)

II.1.1 Caractéristiques hydrologiques :

- Oued : Kébir
- Capacité initiale : 960 hm³
- Apport moyen annuel : 435 hm³
- Envasement annuel : 6 hm³/an
- Surface du bassin versant : 7725 km²

II.1.2 Caractéristiques du barrage :

- Type : Poids béton compacte au rouleau
- Hauteur : 118 m
- Cote retenue normale (R.N) : 200 m
- Cote plus hautes eaux (P.H.E) : 214,74 m
- Déversoir : Seuil libre : 16 000 m³

- Vidange de demi-fond : $2 \times 335 \text{ m}^3/\text{s}$

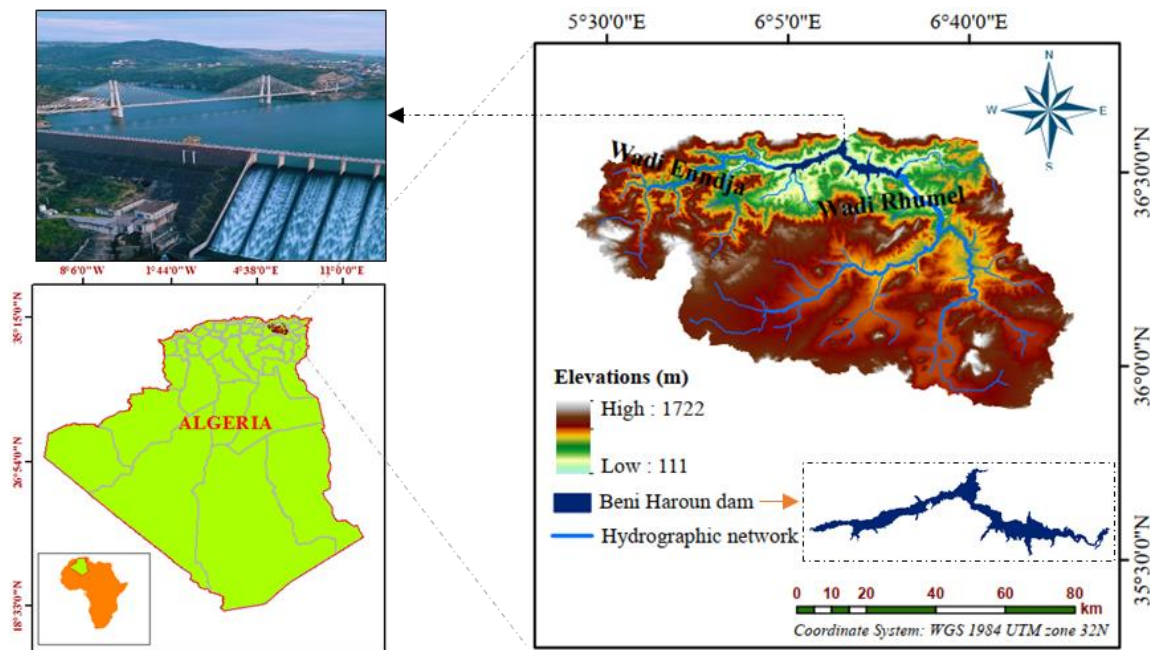


Figure. II.1-Situation géographique du barrage de Beni Haroun et sa retenue.

Le barrage alimente en eau potable plusieurs régions limitrophes de la wilaya de Mila, notamment les wilayas de Jijel, Constantine, Oum el Bouaghi, Batna et Khenchla. Le barrage fournit également une quantité d'eau d'irrigation pour quelques centaines d'hectares d'exploitation agricoles dans les régions voisines. (ANBT, 2015)

Exactement le 18 novembre 2007, l'eau de Béni Haroun coulait pour la première fois dans les robinets. C'est le deuxième barrage en Afrique et un remède infallible à la sous-alimentation en eau potable dont souffraient des pans entiers de la population de l'Est (Zeroukhi et Oulaliahine, 2015).

II.2. Contexte climatique local :

Les données climatiques utilisées dans cette étude ont été téléchargées depuis le site ERA5. Afin de couvrir l'ensemble de la zone d'étude, quatre stations climatiques réparties autour de la retenue de Beni Haroun ont été sélectionnées, et les mêmes séries climatiques ont été retenues pour chacune d'elles (Tab II.1, Fig. II.2).

Tableau II.1. Les caractéristiques des stations climatiques sélectionnées.

Stations	Longitude (X) (°)	Latitude (Y) (°)	Altitude (Z) (m)	période
BeniHaroun	6,11	36,54	310	1950/2025
Ain tin	6,32	36,4	670	1950/2025
Mechta Seradj	6,04	36,49	347	1950/2025
El Kheneg	6,48	36,46	397	1950/2025



Figure. II.2-Situation géographique des stations climatiques limitrophes du site d'étude.

II.2.1 Les précipitations :

Les précipitations constituent la composante fondamentale de l'hydrologie et. La connaissance de cet apport d'eau au sol est essentielle pour appréhender l'état des réserves en eau du sol, la recharge des nappes et le régime des cours d'eau. La mesure de la hauteur des précipitations en un point donné est la mesure hydrologique la plus simple, ce qui explique qu'il en existe toujours au niveau des services concernés, c'est même quelquefois la seule donnée hydrologique disponible. (Elouissi,2016)

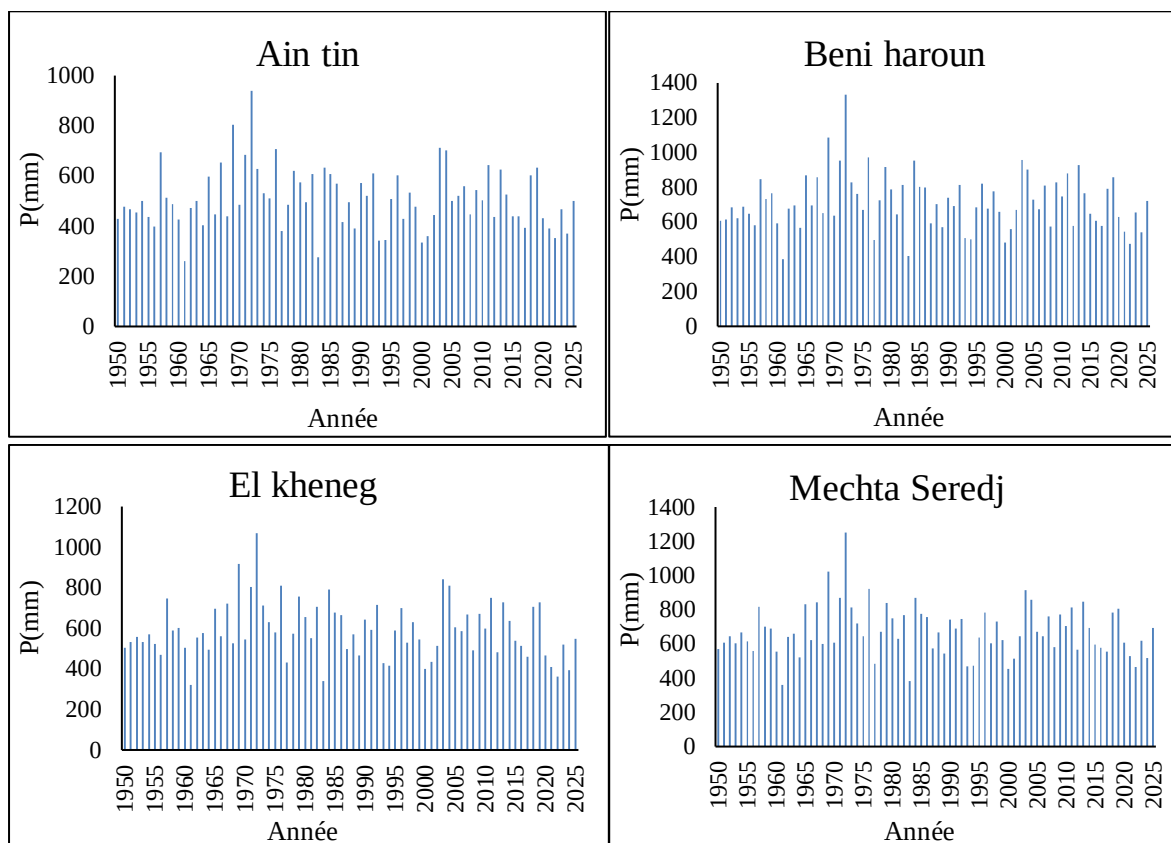
II.2.1.1 Variabilité interannuelle des précipitations :

Les précipitations annuelles, englobant la pluie, la neige et la grêle, représentent la quantité totale d'eau qui tombe sur une région donnée au cours d'une année. Elles sont un indicateur fondamental de la disponibilité des ressources en eau douce, essentielles pour les écosystèmes, l'agriculture, l'approvisionnement en eau potable et la production d'énergie hydroélectrique. (Qadem et al, 2019.)

En observant la figure II.3 qui représente l'évolution des précipitations annuelles de 1950 à environ 2025 des quatre stations étudiées, on constate une grande variabilité des précipitations d'une année à l'autre, oscillant entre des périodes de sécheresse sévère et d'autres plus humides avec des précipitations abondantes dépassant parfois 1 000 mm. On observe également une similitude dans la tendance générale entre les stations, en particulier pendant les périodes de sécheresse relative comme à la fin des années 70 et au début des années 80, et les périodes humides comme à la fin des années 90 et au début des années 2000. Toutefois, l'intensité des fluctuations varie d'une station à l'autre ; la station d'Aïn Tin semble relativement plus stable que celle de Beni Haroun, qui enregistre des valeurs maximales élevées. Enfin, on observe une baisse progressive des précipitations au cours des dernières décennies dans certaines stations, mais celle-ci n'est pas régulière, ce qui reflète les changements climatiques et leur impact sur les précipitations dans la région. Le tableau II.2 représente les valeurs maximale, minimale et moyenne pour chaque station.

Tableau II.2 : Précipitations annuelle maximale, minimale et moyenne pour les stations étudiées (1950-2025).

Station	Année	Pluie Max (mm)	Année	Pluie Min (mm)	Pluie moy (mm)
Ain tin	1972	939,23	1961	261,48	509,54
Beni haroun	1972	1332,08	1961	387,16	713,47
El kheneg	1972	1069,91	1961	320,33	591,48
Mechta Seradj	1972	1249,08	1961	359,26	675,34

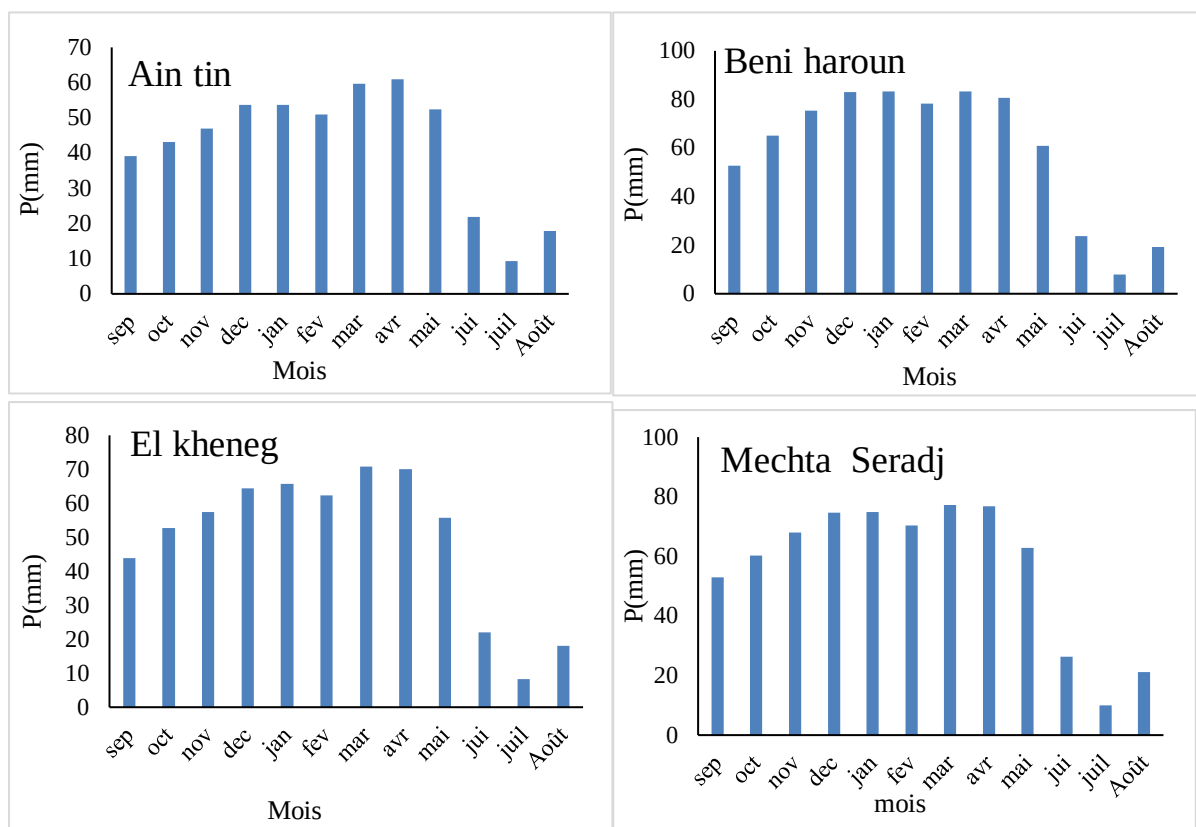
**Figure. II. 3-** Variation des précipitations annuelles des stations étudiées (1950-2025).**II.2.1.2 Variabilité des précipitations moyennes mensuelles interannuelle :**

L'étude des précipitations moyennes mensuelles, mène à la connaissance de la répartition des pluies au cours d'une année hydrologique. Pour avoir une idée générale sur la variabilité mensuelle des apports pluviométriques, quatre stations sont analysées pour cet effet.

Les stations d'Ain tin, Beni Haroun, el Kheneg et Mechta Seradj présentent toutes un régime méditerranéen marqué, avec des hivers pluvieux (Novembre à Février) et des étés secs (Juin à Août) (Tab II.3). Toutefois, Beni Haroun et Mechta Seradj se distinguent par des précipitations hivernales plus abondantes (pic de 80 mm ou plus en Décembre-Janvier, atteignant 83,4 mm en Janvier pour Beni Haroun, tandis qu'Ain tin et el Kheneg enregistrent des pics plus modérés (60 à 70 mm). El Kheneg affiche des valeurs globalement plus faibles, et Beni Haroun bénéficie d'un printemps plus humide. Le mois le plus sec pour l'ensemble est Juillet (jusqu'à 8,03 mm à Beni Haroun) (Fig. II.4).

Tableau II.3 : Précipitations moyenne mensuelles interannuelles des stations étudiées en mm (1950-2025).

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Ann
Ain tin	39,07	43,17	47,00	53,72	53,70	51,03	59,72	60,87	52,36	21,77	9,242	17,89	509,54
Beni haroun	52,69	64,99	75,31	82,96	83,36	78,26	83,29	80,62	60,88	23,71	8,04	19,36	713,47
El kheneg	43,88	52,77	57,44	64,30	65,80	62,36	70,77	70,04	55,78	22,01	8,193	18,11	591,48
Mechta Seradj	52,87	60,18	67,96	74,67	74,84	70,34	77,26	76,80	62,84	26,33	10,05	21,21	675,34

**Figure II.4** - Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles des stations étudiées (1950 / 2025).

II.2.2 Les températures :

La température est sans doute le paramètre le plus intuitif et le plus directement perceptible du climat. Son évolution, en particulier l'augmentation de la température moyenne globale, est devenue l'indicateur emblématique du changement climatique anthropique. Au-delà de cette perception générale, la température joue un rôle multidimensionnel et critique dans la dynamique du système terrestre, influençant une multitude de processus physiques, chimiques et biologiques. Comprendre son importance est essentiel pour évaluer l'ampleur du réchauffement, anticiper ses impacts et élaborer des stratégies efficaces pour y faire face. (Masson, 2020)

Les données montrent une nette variation saisonnière des températures sur la période 1950-2025 (Tab II 4, Fig. II.5). La courbe, de forme unimodale, indique une baisse progressive des

températures de septembre à janvier, où les valeurs les plus basses sont enregistrées (entre 6,28 °C à Ain tin et 6,85 °C à Mechta Seradj). À partir de février, les températures remontent pour atteindre leur maximum en juillet et août, dépassant 25 °C dans toutes les stations. Mechta Seradj se distingue par les températures les plus chaudes (moyenne annuelle de 15,50 °C, culminant à 25,73 °C en août), tandis qu'Aïn Tin est légèrement plus fraîche (moyenne annuelle de 15,09 °C). Ce profil thermique, caractérisé par des hivers doux et des étés chauds, reflète un contraste saisonnier marqué typique d'un climat méditerranéen à tendance semi-aride ou continentale d'altitude moyenne.

Tableau II.4. Températures moyennes mensuelles interannuelles des stations étudiées en °C (1950-2025).

Stations	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Moy
Ain tin	21,38	16,45	11,02	7,36	6,28	7,19	9,65	12,45	16,73	21,72	25,47	25,38	15,09
Beni haroun	21,52	16,73	11,41	7,84	6,76	7,54	9,89	12,50	16,59	21,42	25,19	25,33	15,23
El kheneg	21,52	16,79	11,50	7,87	6,76	7,59	9,95	12,63	16,76	21,61	25,28	25,30	15,30
Mechta Seradj	21,78	16,91	11,53	7,90	6,85	7,74	10,19	12,87	17,01	21,82	25,64	25,73	15,50

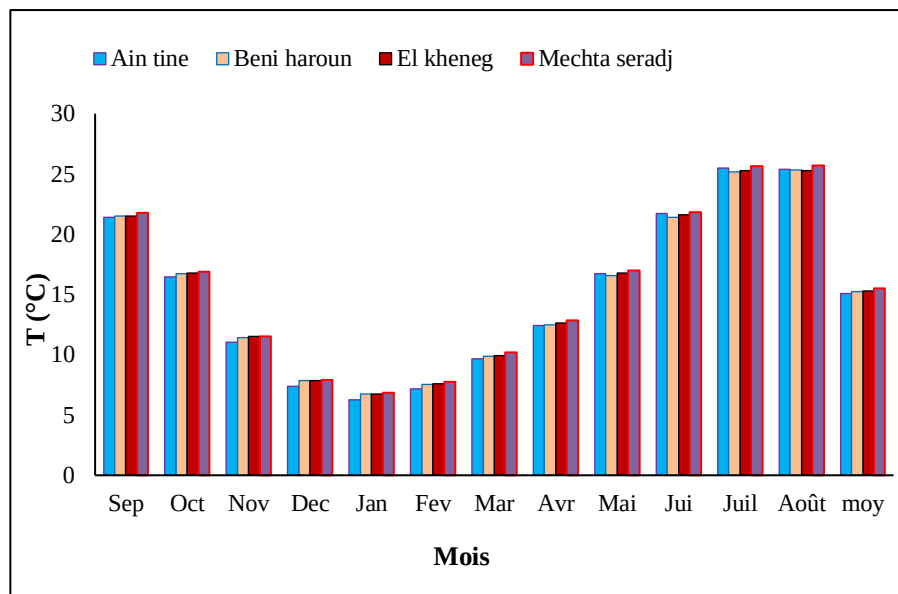


Figure. II.5- Variation des températures moyennes mensuelles interannuelles des stations étudiées (1950-2025).

II.2.3 Le vent :

Le vent est un déplacement d'air à peu près horizontalement qui agit surtout sur la pluviométrie, l'évaporation, la température et l'humidité de l'air, il est donc un élément déterminant pour le climat.

Le tableau II.5 présente les variations moyennes mensuelles interannuelles du vent (m/s) pour nos stations d'étude. On observe que les zones d'Ain tin et d'El kheneg enregistrent les vitesses de vent les plus élevées, avec des valeurs comprises entre 1,10 et 1,40 m/s, atteignant leur maximum en

Janvier et Février. En revanche, la région de Mechta Seradj affiche les vitesses les plus faibles, ne dépassant pas 0,74 m/s, avec une baisse marquée pendant les mois d'été. La région de Beni haroun se situe à un niveau intermédiaire. On note également une diminution générale de la vitesse du vent durant les mois d'été et au début de l'automne (de Juin à Septembre) par rapport à l'hiver, ce qui reflète l'influence des variations saisonnières sur le régime des vents dans ces régions (Fig. II.6).

Tableau II.5. Variation moyenne mensuelle interannuelles de la vitesse de vent des stations étudiée en m/s (1950-2025).

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Ain tin	1,38	1,40	1,37	1,33	1,23	1,21	1,22	1,17	1,11	1,16	1,32	1,39
Beni haroun	1,20	1,22	1,20	1,18	1,10	1,07	1,10	1,06	1,00	1,02	1,14	1,21
El kheneg	1,38	1,40	1,37	1,33	1,22	1,20	1,22	1,17	1,10	1,15	1,32	1,39
Mechta Seradj	0,73	0,74	0,70	0,66	0,69	0,71	0,66	0,66	0,72	0,70	0,67	0,70

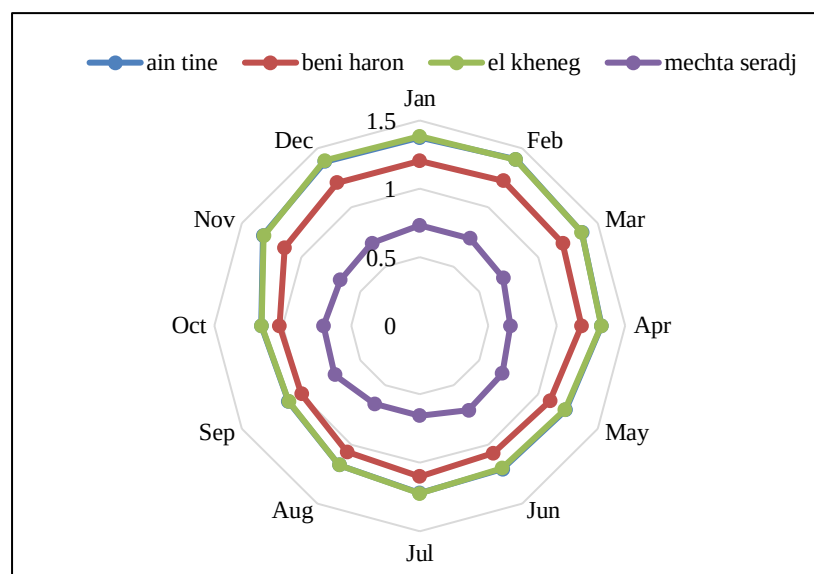


Figure. II.6-Variation de la vitesse moyenne mensuelle interannuelle des vents des stations étudiées (1950-2025).

II.2.4 L'humidité relative :

L'humidité représente la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air, sans compter l'eau liquide et la glace. L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température et pression. Elle joue un rôle important sur la formation du brouillard, de la rosée et des nuages, et il exprimée en (%). (Zighem, 2017)

L'analyse du Tableau II.6, qui présente la variation moyenne mensuelle interannuelle de l'humidité relative sur la période 1950-2025, révèle des différences marquées entre les quatre stations étudiées. La station de Mechta Seradj se distingue nettement par des valeurs extrêmement élevées tout au long de l'année, atteignant un pic de 99,91 % en août et dépassant souvent 99 % de septembre à novembre. Cette humidité quasiment saturante suggère des conditions microclimatiques

particulières, probablement liées à la présence d'une zone humide ou d'une forte couverture végétale. En revanche, la station d'Ain tin enregistre les valeurs les plus basses, avec un minimum annuel de 50,36 % en mars, indiquant un climat plus sec. Les stations de Beni Haroun et El Kheneg présentent des profils intermédiaires et très similaires, avec des valeurs qui oscillent entre 54 % et 82 %. Sur le plan saisonnier, on observe une baisse de l'humidité au printemps (surtout en mars), suivie d'une augmentation progressive en été pour atteindre un maximum en août ou septembre, puis un maintien à des niveaux élevés en automne avant une légère diminution en décembre. L'évolution mensuelle, illustrée par la Figure II.7, confirme ainsi un cycle saisonnier commun à toutes les stations, mais avec des amplitudes très variables selon le site, Mechta Seradj affichant une nette singularité par son excès d'humidité persistant toute l'année.

Tableau II.6. Variation moyenne mensuelle interannuelles de l'humidité relative des stations étudiées en % (1950-2025).

Stations	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Ain tin	68,62	60,12	50,36	52,92	63,6	69,23	73,76	78,62	78,85	76,23	74,17	72,25
Beni haroun	73,31	64,76	54,87	56,77	67,31	73,37	77,84	81,79	82,13	80,21	78,47	76,83
Mechta Seradj	94,57	82,31	67,9	67,91	82,89	94,85	99,33	99,91	99,84	99,51	99,42	98,78
El kheneg	71,1	62,77	53,56	56,25	66,35	71,41	75,28	79,62	80,04	77,99	76,33	74,65

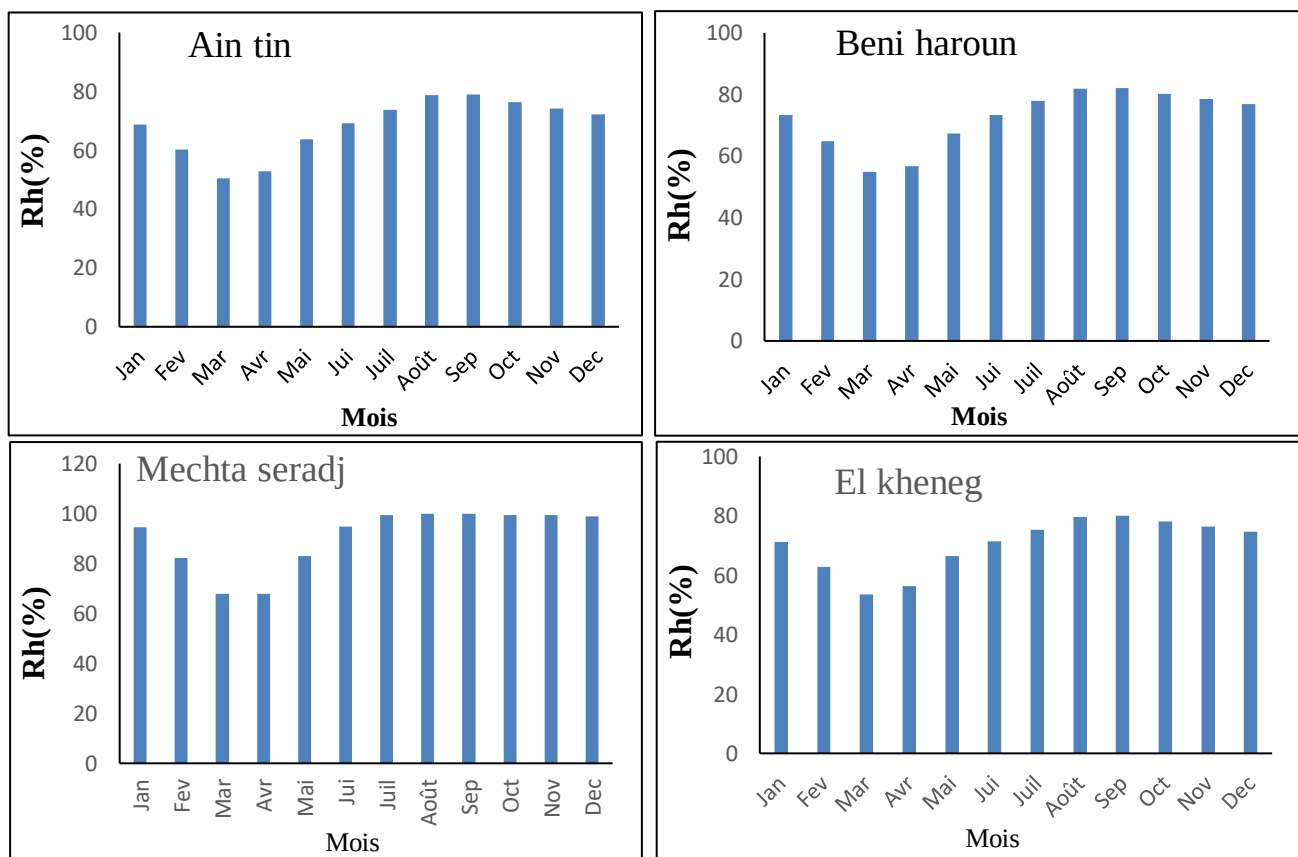


Figure. II.7- Évolution mensuelle de l'humidité relative dans les stations étudiées (1950-2025).

II.2.5 Relation précipitation/ température :

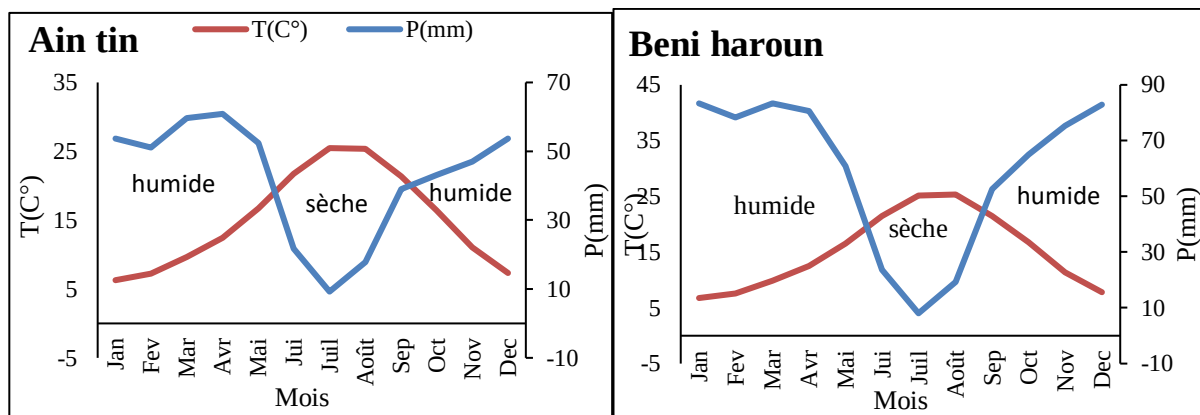
II.2.5.1 Courbes pluvio-thermiques(Bagnouls – Gaussen, 1953) :

Bagnouls et Gaussen (1953), ont introduit la notion de diagramme pluviothermique, en n'utilisant que la température et les précipitations, combinées de façon à faire apparaître les saisons humides, et les saisons sèches. Ces saisons sont définies graphiquement, en reportant sur l'axe des ordonnées les précipitations moyennes mensuelles, et sur le deuxième axe des ordonnées, opposé le double de la température moyenne mensuelle, et sur l'axe des abscisses les mois. (Fig.II. 8). Pour la même période ; chaque fois que la courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations on a une période sèche, et une période humide dans le cas inverse

Les quatre diagrammes pluviothermiques des stations étudiées (Fig. II.8), pour la série 1950 / 2025 ; permettent de déduire les saisons humides et les saisons sèches qu'on a consigné dans le tableau II.7 . On observe sur les quatre stations que la période allant de la mi-Mai à October correspond à une période de sécheresse, tandis que le reste de l'année est humide

Tableau II.7. Périodes sèches et humides des stations étudiées (1950-2025).

Stations	Période humide	Période sèche
Ain tin	Oct--1 /2 Mai	1 /2 Mai – Oct
Beni Haroun	Oct--1 /2 Mai	1 /2 Mai – Oct
El kheneg	Oct--1 /2 Mai	1 /2 Mai – Oct
Mechta Seradj	Oct--1 /2 Mai	1 /2 Mai – Oct



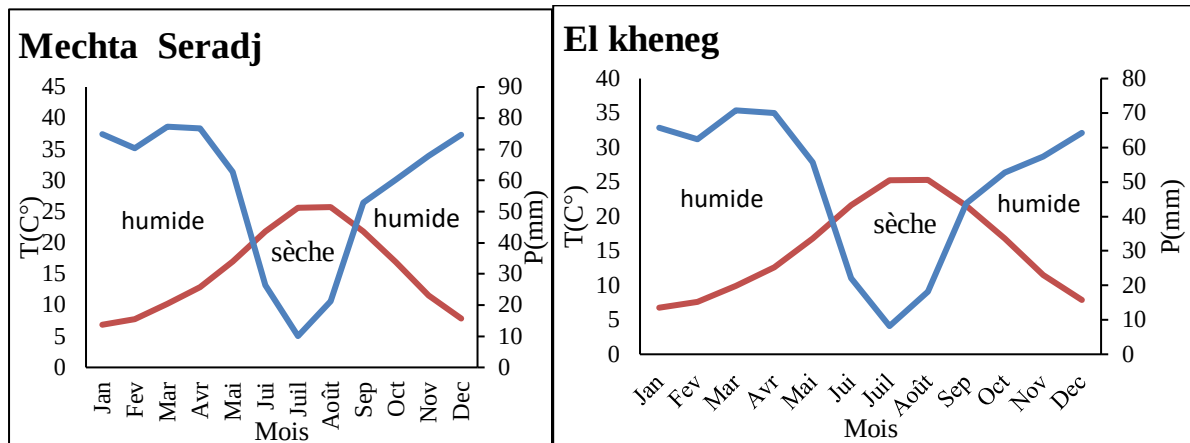


Figure. II.8- Diagrammes pluviothermiques selon Bagnouls et Gaussen, des stations étudiées (1950 / 2025).

II.2.6 Evaporation :

II.2.6.1 Mécanismes de l'évaporation en milieu naturel et sur plans d'eau :

II.2.6.1.1 Facteurs climatiques directs influençant l'évaporation :

Les principaux facteurs climatiques directs influençant l'évaporation sont la température (énergie thermique), le rayonnement solaire, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et la pression atmosphérique. Une température élevée, un air sec, un fort ensoleillement et un vent soutenu accélèrent le passage de l'eau liquide à l'état de vapeur.

• Température :

Un temps chaud permettra à la masse d'eau de se réchauffer et d'augmenter l'énergie cinétique de ses molécules. Un plus grand nombre de molécules auront alors l'énergie suffisante pour s'arracher à la surface d'eau (pour s'évaporer). (Lemzadmi et Saidi, 2017)

• Pression atmosphérique :

Quand la pression atmosphérique de l'air est faible, l'air pousse moins fort sur la surface de l'eau. Les molécules d'eau auront alors plus de facilité à s'arracher de la surface de l'eau pour se retrouver à l'état de vapeur. (Emsalem, 1970 ; Remenieras, 1986)

• Humidité relative :

Lorsque l'humidité relative est faible, l'air est loin d'être saturé en vapeur d'eau. Dans ce cas, il est possible d'ajouter beaucoup plus de vapeur d'eau par évaporation que lorsque l'humidité relative est forte. (Lemzadmi et Saidi, 2017 ; Remenieras, 1986 ; Mamou, 1990)

• Vent :

On sait que les vêtements sèchent beaucoup plus rapidement sur la corde à linge lorsqu'il y a un bon vent. Cela est dû au fait que la mince couche d'air qui se trouve autour des vêtements devient éventuellement saturée de vapeur d'eau à cause de l'évaporation. À mesure que l'air se rapproche de la saturation, l'évaporation diminue. Le vent chasse constamment la mince couche d'air autour des vêtements et la remplace. La nouvelle couche d'air contient moins de vapeur d'eau et permet une

évaporation plus importante. (Lemzadmi et Saidi, 2017 ; Godard et Tabeaud, 1993)

• **Surface d'eau :**

Une grande surface d'eau facilite l'évaporation, car dans ce cas, un plus grand nombre de molécules d'eau ont la possibilité de se détacher de la masse d'eau. La vitesse d'évaporation (mm/j) est fonction de la température de l'air, de l'insolation, de la vitesse et de la turbulence du vent (Emsalem, 1970 ; Remenieras, 1986 ; Mamou, 1990 ; Godard et Tabeaud, 1993).

II.2.6.2 Méthodes d'estimation de l'évaporation :

II.2.6.2.1 Méthode de mesure directe : Bac d'évaporation

Le phénomène de l'évaporation des lacs de barrages en Algérie est considérable. Une perte de volume très élevée est enregistrée annuellement. Chaque barrage est équipé d'un bac Colorado ou d'un bac classe A, installé à proximité de la retenue. Il permet aux techniciens chargés de l'exploitation au niveau des barrages de prendre des mesures journalières de l'évaporation. (Lemzadmi et Saidi, 2017)



Figure. II.9-Bac d'évaporation de catégorie A équipé d'une station météorologique et d'une cage de protection. (Fr.wikipedia.org/wiki/Bac_d%27%C3%A9vaporation)

II.2.6.2.2 Méthode de calcul empiriques :

Il y a plusieurs formules établies par les chercheurs pour le calcul de l'ETP à partir des paramètres climatiques : température, humidité relative, insolation, et la vitesse du vent...etc. Dans ce travail, on a présenté les formules de Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman modifiée par F.A.O, et la formule de l'ANRH. :

a) Formule de TURC (1960) :

Turc propose deux formules, l'une pour $H_r < 50\%$ et l'autre pour $H_r > 50\%$, l'ETP est calculé, selon la valeur de H_r , par l'une des formules suivante (Chebbah et Kabour, 2023):

$$ETP = 0,40(I_g + 50) \frac{t}{t+15} \quad \text{Où } H_r > 50\%$$

$$ETP = 0,40(Ig + 50) \frac{t}{t+15} \times (1 + \frac{50-Hr}{70}) \text{Où } Hr < 50\%$$

Avec :

ETP : Évapotranspiration potentielle mensuelle (mm)

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

Ig : Radiation solaire globale du mois considéré en calorie/cm²/jour

$$Ig = Iga(0,18 + 0,62 \times \frac{h}{H})$$

Où :

$$Iga = 1035 - 9,076 \times \text{Lat} + (7,050 \times \text{Lat} + 49,90) \times \text{Cos}(29,92 \times i - 182,5)$$

$$H = 362,7 + 0,2101 \times \text{Lat} + (4,085 \times \text{Lat} - 80,99) \times \text{Cos}(30,01 \times i - 188,9)$$

Avec :

H : La durée d'insolation (heure/mois).

i : Numéro du mois (4 pour Avril et 10 pour Octobre par exemple).

Lat : Latitude du point considéré en degrés et minutes.

Iga: La radiation maximale théorique donnée par des tables exprimées en cal/cm²/jour, dépendant de latitude du lieu .

b) Formule de C.W. Thornthwaite :

Cette formule a été établie en 1948 et tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle. La formule de l'ETP est la suivante :(Kouira,2022)

$$ETP = 16 \times (10 \frac{t}{i})^a$$

$$I = \sum i \quad \text{où } i = (\frac{t}{5})^{1,514}$$

ETP : l'évapotranspiration potentielle (mm) ;

T: la température moyenne mensuelle (°C) ;

I : l'indice thermique annuel ;

i : l'indice thermique mensuel ;

a : désigne un exposant climatique défini ainsi : a = 0.0161 I+0.5

c) Formule de Blaney-Criddle :

C'est l'une des plus anciennes formules, car en 1950, Harry Blaney pensait que l'ETP dépendait de deux facteurs essentiels : la force évaporante F et l'humidité relative de l'air ou le déficit de saturation. A ce moment-là, les auteurs ont envisagé une régression linéaire entre l'ETP et la température. Par la suite, ils ont remarqué que l'ETP ne dépendait pas seulement du potentiel énergétique F, basé sur les paramètres climatiques (principalement la température), dépensé pour actionner le déficit de saturation, mais aussi de la structure de la surface qui libère les molécules d'eau (l'espèce végétale). Cette approche a permis d'introduire un facteur de correction appelé K, qui dépend directement du type de la plante (Chebbah et Kabour, 2023).

La formule qui permet d'estimer l'ETP mensuelle est la suivante :

$$ETP = aF + b$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle de culture (mm).

P : Durée d'éclairement en %

t : Température moyenne mensuelle (°C).

F: Force évaporante.

a et b : Coefficients de correction (s'obtient par des tables).

H : Durée astronomique du jour (heures) (s'obtient par des tables).

h: Durée moyenne d'insolation (heures).

V: Vitesse moyenne de vent (m/s).

Hr: Humidité relative (%).

d) Formule d'ANRH :

Cette formule permet d'évaluer l'ETP à partir de la seule mesure de la température moyenne mensuelle correspondante, à une position géographique quelconque. Elle est développée en 2002 sous la direction du professeur J.P. Laborde, la formule qui permet d'estimer l'ETP mensuelle est la suivante (Chebbah et Kabour, 2023)

$$ETP_{ANRH} = Kr \times Km(H - 187)(0,032T + 0,077)$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/mois).

T : Température moyenne mensuelle (°C).

Km : Coefficient mensuel

Kr : Coefficient régional Kr=1,25.

H : Durée théorique mensuelle d'insolation (heures/mois) et elle est exprimée en fonction de l'ordonnée Lambert (Y) selon la formule suivante : $H_i = a_i Y + b_i$

Avec : Y : l'ordonnée Lambert de la zone (Km) ; a_i et b_i sont des coefficients d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule de l'ANRH.

e) Formule de Penman-FAO :

Cette formule, mise au point par le physicien anglais Penman, est basée sur le bilan d'énergie, son intérêt réside dans l'explication physique du phénomène de l'évapotranspiration. Elle donne de bonnes estimations de l'ETP, pour les différents climats. Son seul inconvénient est de nécessiter un nombre assez important de paramètres climatiques. L'équation simplifiée du bilan d'énergie, appliquée à une surface évaporante, dont les caractéristiques sont déterminées, et bien alimentée en eau, s'écrit de la manière suivante : (Chebbah et Kabour, 2023)

$$ETP = \left[\frac{Iga}{59} (1 - a) \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0,56 - 0,08\sqrt{e}) (0,10 + 0,90 \frac{h}{H}) \right] \frac{\frac{4}{y}}{1 + \frac{4}{y}} + \frac{0,26}{1 + \frac{4}{y}} (E - e) (1 + 0,54u)$$

Avec :

ETP : Évapotranspiration potentielle mensuelle (mm)

Iga : La radiation maximale théorique donnée par des tables exprimée en cal/cm²/jour, dépendant de latitude du lieu.

H : Durée astronomique du jour (heures) à partir des abaques.

h : Durée moyenne d'insolation (heures).

u: Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s).

E : Tension maximale de la vapeur d'eau dans l'air (millibars).

T : Température moyenne mensuelle (°K).

e : Tension moyenne estimée à partir de l'humidité relative Hr (%), et de la température moyenne mensuelle t en (°C) par la relation suivante :

$$e = 0,061 Hr 10^{\left(7,5 \frac{t}{238+t}\right)}$$

C'est l'évaporation qui se produirait si la température de surface était égale à la température de l'air. Le calcul de l'ETP par la formule de Penman-FAO exige l'estimation préalable du rayonnement net et du pouvoir évaporant de l'air, ainsi que celle des coefficients Δ et γ .

Δ : Pente de la courbe de tension de vapeur saturante pour la température de l'air T (millibar/°C)

$$\Delta = \frac{6,149}{T} \exp\left(19,511 \frac{t}{T}\right) \left(\frac{6463}{T} - 3,927\right)$$

$$E = 6,107 \times 10^{\left(7,5 \frac{t}{238+t}\right)}$$

Avec :

γ : Constante psychrométrique, en millibar /°C ; $\gamma = 0,6605 - 0,826 \times 10^{-4} \times Z$

Z : Altitude de lieu (m).

La formule de Penman modifiée par la FAO qui permet d'estimer l'ETP mensuelle est la suivante :

$$ETP = \left[\frac{Iga}{59} (1 - a) \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0,56 - 0,08\sqrt{e}) \left(0,10 + 0,90 \frac{h}{H} \right) \right] \frac{\Delta/y}{1 + \frac{\Delta}{y}}$$

$$+ \frac{0,26}{1 + \frac{\Delta}{y}} (E - e)(1 + 0,54u)$$

Dans cette formule, on y retrouve les mêmes variables de la formule de Penman, seuls quelques paramètres changent, tel que :

(1 + 0,864 u) au lieu de (1 + 0,54 u) et (0,25 + 0,45) au lieu de (0,18 + 0,62)

Δ : Pente de la courbe de tension de vapeur :

$$\Delta = \frac{4099ea}{(T + 237,237,2)^2} = \frac{2504 \exp(17,27T)}{(T + 237,3)^2}$$

Avec

T : la température de l'air (°C)

ea: tension de vapeur saturante (kPa)

- **Équation de Penman-Monteith modifiée par FAO**

$$ETP = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + y \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + y(1 + 0.34u_2)}$$

ETP : évapotranspiration de référence ou potentiel [mm jour⁻¹],

R_n : Rayonnement net à la surface des cultures [MJ m⁻² jour⁻¹],

G : densité du flux thermique du sol [MJ m⁻² j⁻¹],

T : température moyenne quotidienne de l'air à 2 m de hauteur [°C],

u_2 : vitesse du vent à 2 m de hauteur [mS⁻¹],

e_s : Pression de vapeur à saturation [kPa],

e_a : Pression de vapeur réelle [kPa],

$e_s - e_a$: Déficit de pression de vapeur saturante [kPa],

Δ : Pente de la courbe de pression de vapeur [kPa °C⁻¹],

γ : constante psychrométrique [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$].

Dans ce travail, l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée à l'aide de la formule de Penman-Monteith modifiée par la FAO, implémentée sous Python 3.12 sur Google Colab. Ce choix se justifie par la précision reconnue de cette méthode dans les climats semi-arides et continentaux, tels que celui de la région étudiée, ainsi que par son intégration de paramètres radiométriques, aérodynamiques et physiologiques, ce qui la rend plus fiable que les approches empiriques basées uniquement sur la température.

Tableau II. 8 : Calcul de l'ETP mensuelles interannuelles des stations d'étude (1950-2025).

	Sep	Oct	nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout
Ain tin	112,9 0	75,54	44,52	32,02	33,97	45,18	73,91	97,92	130,4 7	158,3 8	184,1 3	164,1 6
Beni haroun	107,4 1	70,55	40,15	28,62	30,63	41,52	69,19	92,39	123,8 5	150,3 1	176,2 7	157,5 7
El kheneg	111,0 5	74,58	44,19	31,96	33,68	44,49	72,43 536	95,66	127,7 2	155,4 1	181,7 3	161,9 1
Mechta Seradj	96,51	69,12	44,67	31,24	31,38	35,99	51,78	61,25	81,98	99,10	111,4 2	114,7 7

L'analyse des courbes mensuelles de l'ETP pour les quatre stations étudiées révèle une tendance saisonnière commune, en forme d'arc convexe, avec un minimum hivernal marqué en Décembre et Janvier (environ $30 \text{ mm}\cdot\text{jour}^{-1}$) et un maximum estival atteint en Juin et Juillet. Ce pic est particulièrement élevé à la station d'Aïn Tine ($184 \text{ mm}\cdot\text{jour}^{-1}$ en Juillet), traduisant une forte demande évaporative liée aux températures élevées et au déficit hydrique estival. Bien que toutes les stations suivent la même allure générale, des disparités d'amplitude sont observées : la station de Mechta Seradj présente des valeurs nettement plus basses ($115 \text{ mm}\cdot\text{jour}^{-1}$ en Août), tandis que les stations d'Ain tin, El Kheneg et Beni Haroun montrent des courbes plus hautes et plus abruptes. Ainsi, l'amplitude des courbes reflète les besoins en eau des cultures, qui sont maximaux en été, en particulier dans les stations les plus arides.

En général, l'augmentation des valeurs de **ETP** indique une augmentation des pertes d'eau par évaporation et transpiration, ce qui est un facteur important à prendre en considération dans la gestion des ressources en eau et de l'irrigation.

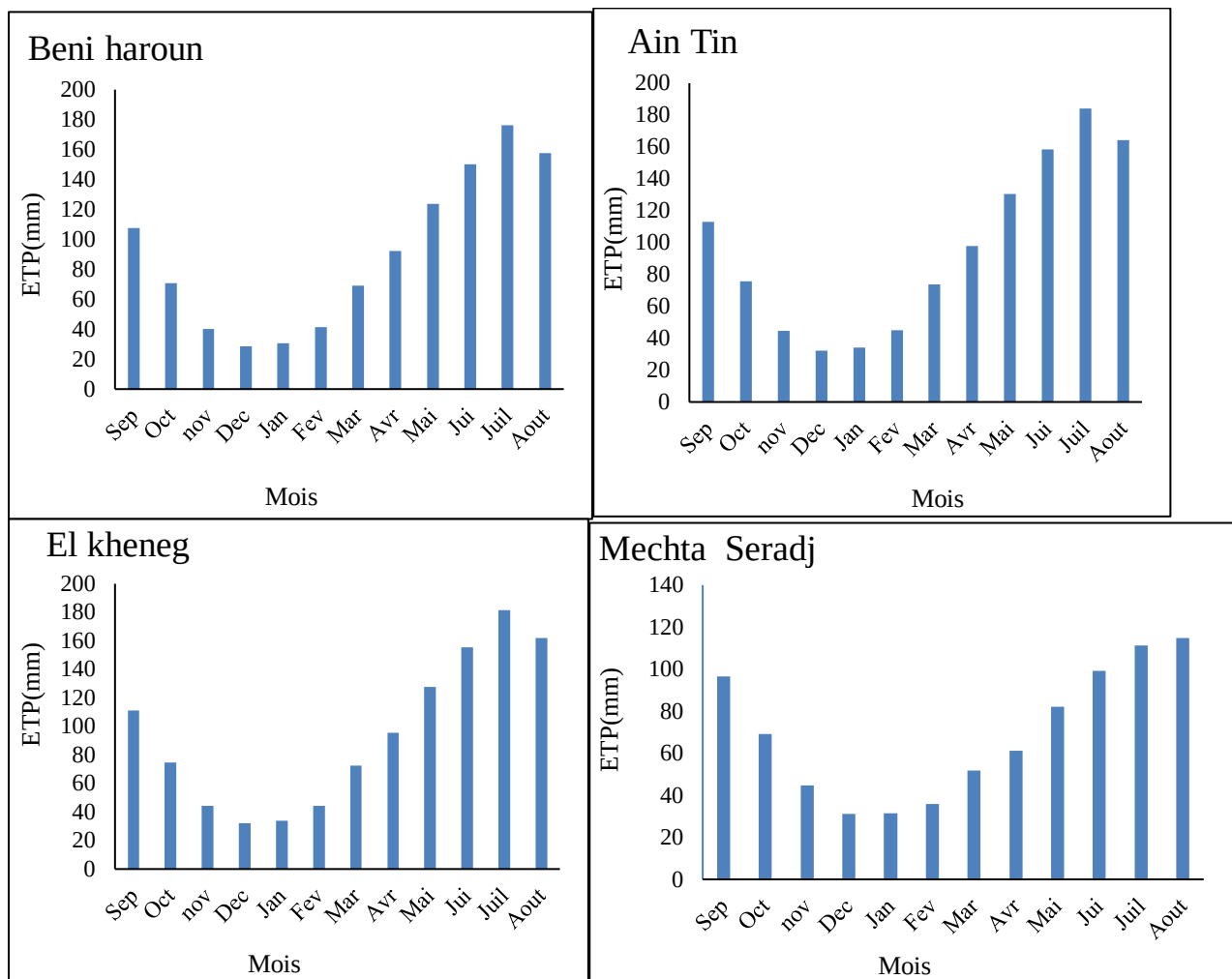


Figure. II.10- Variation mensuelle de l'ETP dans les stations étudiées (1950-2025).

II. 3 Données d'évaporation du lac :

Le tableau II.9 présente les valeurs annuelles d'évaporation du lac de Beni Haroun, exprimées en millions de mètres cubes (Hm^3), recueillies auprès de l'ANBT (Agence Nationale des Barrages et Transferts -Mila-) pour la période allant de 2003 à 2025. On observe une forte variabilité interannuelle des quantités évaporées, avec une valeur minimale de $1,00 \text{ Hm}^3$ enregistrée en 2003 (année de mise en service du barrage) et une valeur maximale de $66,99 \text{ Hm}^3$ atteinte en 2017. Cette très faible valeur initiale s'explique par le jeune âge du lac et sa superficie encore réduite durant les premières années de remplissage.

À partir de 2014, les données montrent une tendance générale à la hausse, marquée par des pics notables en 2017 ($66,99 \text{ Hm}^3$) et en 2022 ($64,70 \text{ Hm}^3$). Les valeurs enregistrées après 2023 montrent une légère diminution, passant de $57,10 \text{ Hm}^3$ en 2019 à $52,07 \text{ Hm}^3$ en 2024, puis à $48,81 \text{ Hm}^3$ en 2025, bien que ces niveaux restent nettement supérieurs à ceux observés avant 2011. Il est important de noter que l'année 2017 se distingue comme l'année la plus évaporatoire de toute la période d'étude, avec un volume évaporé représentant près de 67 millions de mètres cubes.

Cette variabilité temporelle reflète l'influence conjuguée de plusieurs facteurs :

- **Les facteurs climatiques** : températures élevées (notamment lors des étés caniculaires), régime des vents dominants, et taux d'humidité atmosphérique ;
- **Les caractéristiques physiques du lac** : superficie libre de l'eau, profondeur, et exposition aux rayonnements solaires ;
- **Le niveau de remplissage du barrage** : plus le plan d'eau n'est étendu, plus la surface évaporative est grande.

Tableau II.9. Evaporation du lac du Beni Haroun en Hm³ (2003 - 2025).(ANBT)

Année	Evaporation	Année	Evaporation	Année	Evaporation
2003	1,00	2011	47,37	2019	57,10
2004	4,90	2012	53,81	2020	56,68
2005	16,95	2013	49,85	2021	59,09
2006	33,02	2014	54,28	2022	64,70
2007	30,28	2015	54,95	2023	55,76
2008	37,13	2016	56,99	2024	52,07
2009	40,14	2017	66,99	2025	48,81
2010	41,79	2018	58,47		

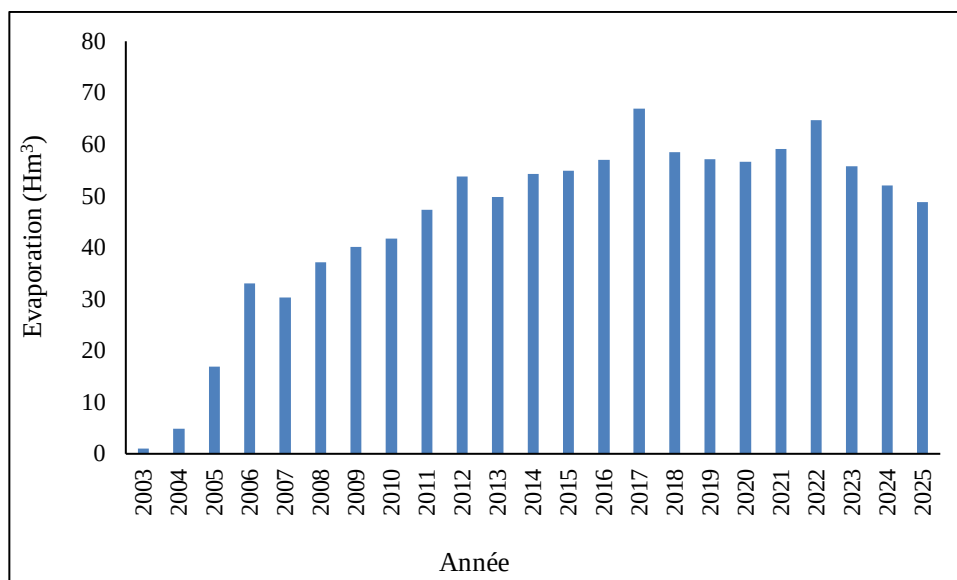


Figure. II.11-Variation annuelle de l'évaporation du lac du Beni Haroun (2003-2025).

II.3.1 Indices climatiques : Indice d'aridité de De Martonne (1926) :

Un indice d'aridité est défini comme l'indicateur chiffré du degré de sécheresse climatique à un endroit donné et classe les types de climat en fonction de la disponibilité en eau. Plus les indices d'aridité d'une région sont élevés, plus la variabilité des ressources en eau est importante. Dans cette étude, l'indice d'aridité de De Martonne est calculé à partir des données de température et de précipitations pour la période 1950-2025 des quatre stations. L'indice peut être tel qu'il est présenté dans l'équation :

$$I_n = \frac{P}{T + 10}$$

Où

P correspond au volume annuel des précipitations (en millimètres) et T à la température moyenne annuelle de l'air (en degrés Celsius).

Selon l'indice d'aridité de De Martonne, les types de climat sont présentés dans le tableau II.9.

Tableau II.10 : Valeurs de l'indice d'aridité de De Martonne.

Type	Valeur
Semi-aride	$15 \leq I \leq 24$
Modérément aride (méditerranéen)	$24 \leq I \leq 30$
Légèrement aride	$30 \leq I \leq 35$
Modérément humide	$35 \leq I \leq 40$
Humide	$40 \leq I \leq 50$
Très humide	$50 \leq I \leq 60$
Excessivement humide	$60 \leq I \leq 187$

Le tableau II.10 présente les valeurs de l'indice d'aridité de De Martonne calculées pour quatre stations sur la période 1950-2025. La station d'Ain tin enregistre un indice de 20,31 et est classée comme **semi-aride**, celle d'El Kheneg obtient 23,38 également classée **semi-aride**, tandis que la station de Mechta Seradj affiche 24,48 et est classée **modérément aride (méditerranéen)**, et enfin la station de Beni Haroun atteint la valeur la plus élevée de 28,28, également classée **modérément aride**.

Tableau II.11. Indice d'aridité de De Martonne dans les stations étudiées (1950-2025)

Station	I	Type
Ain tin	20.31	Semi-aride
Beni Haroun	28.28	Méditerranéen
El kheneg	23.38	Semi-aride
Mechta Seradj	24.48	Méditerranéen

Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter le barrage de Beni Haroun et son contexte environnemental et climatique, qui constituent la base de cette étude. L'analyse des données des quatre stations climatologiques a montré que la région se caractérise par un climat semi-aride à influence méditerranéenne, marqué par une forte variabilité des précipitations, des hivers relativement humides et des étés chauds et secs. Les précipitations sont principalement concentrées durant la saison froide, tandis que la période sèche s'étend globalement de la mi-Mai au mois d'Octobre.

L'étude des températures, du vent et de l'humidité relative a mis en évidence une variation saisonnière nette de ces paramètres, qui influencent directement l'intensité de l'évaporation. Les valeurs les plus élevées de température et d'évapotranspiration potentielle sont enregistrées en été, traduisant une forte demande évaporative durant cette période. Parallèlement, les données d'évaporation du lac révèlent une variabilité interannuelle importante, étroitement liée aux conditions climatiques dominantes. Par ailleurs, l'indice d'aridité de De Martonne confirme la sensibilité de la région au déficit hydrique.

Chapitre III :

Méthodologie et traitements statistiques

Introduction :

La caractérisation de la sécheresse et de l'aridité, ainsi que l'analyse de leurs impacts sur les ressources en eau, nécessitent une approche méthodologique rigoureuse associant des indicateurs climatiques pertinents et des traitements statistiques adaptés. Ce chapitre présente l'ensemble des méthodes scientifiques retenues pour étudier l'évolution des conditions climatiques et évaluer leurs répercussions sur le bilan hydrique, notamment à travers l'évaporation, sur la période d'étude considérée.

Dans un premier temps, deux indicateurs climatiques complémentaires sont définis. L'indice SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) est utilisé pour caractériser les épisodes de sécheresse en intégrant à la fois les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, ce qui le rend particulièrement adapté au contexte de réchauffement climatique. Par ailleurs, l'indice d'aridité (AI), fondé sur le rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration, permet de classer le degré d'aridité de la zone d'étude selon une échelle allant de l'hyperaride à l'humide.

Dans un second temps, des outils statistiques non paramétriques sont mis en œuvre pour analyser les séries temporelles des variables climatiques. Le test de Pettitt est appliqué pour détecter d'éventuelles ruptures brutales dans les séries. Le test de Mann-Kendall, associé à l'estimateur de pente de Sen, permet d'identifier la direction et l'intensité des tendances. Enfin, la méthode innovante d'analyse des tendances (ITA) proposée par Şen est utilisée pour une exploration graphique des évolutions, sans être influencée par l'autocorrélation des données.

L'ensemble de ces indicateurs et traitements statistiques constitue un cadre méthodologique intégré, qui sera appliqué dans le chapitre suivant pour mesurer l'impact du changement climatique sur l'évaporation et, plus largement, sur les ressources en eau de la région d'étude.

III.1 Calcul des indicateurs climatiques de sécheresse et d'aridité :**III.1.1 Indicateurs climatiques de sécheresse:****III.1.1.1 Définitions sécheresse :**

La sécheresse est un phénomène climatique caractérisé par un déficit prolongé et anormal des précipitations par rapport aux normales saisonnières d'une région donnée. Elle s'installe progressivement et peut persister sur des périodes plus ou moins longues, affectant les différents compartiments du cycle de l'eau (Daki et al., 2016).

Plusieurs types de sécheresse sont généralement distingués :

- **La sécheresse météorologique** : liée à un déficit de précipitations sur une période donnée.
- **La sécheresse agricole** : caractérisée par un manque d'humidité dans le sol, affectant les cultures.
- **La sécheresse hydrologique** : correspondant à une baisse des débits des cours d'eau, des niveaux des nappes phréatiques ou des plans d'eau.
- **La sécheresse socio-économique** : résultant d'une insuffisance d'eau pour satisfaire les besoins des populations et des activités humaines.

III.1.1.2 Indicateurs de sécheresse :

La difficulté de définir la sécheresse pousse les chercheurs à définir des indicateurs de ce phénomène (Tab III.1). Ces indicateurs permettent de déterminer d'une façon scientifique le seuil indiquant la sécheresse à différentes échelles de temps et de définir des classes d'appartenance à cet événement en fonction de sa sévérité et de sa position. Ils assurent également le suivi de la sécheresse et la détection à différents stades de son évolution. Ces indices constituent également un excellent moyen de communication avec le public et un outil de décision pour le gouvernement.

Tableau III.1. Différents types d'indicateurs de sécheresse. (Layelmam, 2013)

Type de sécheresse	Indicateurs	Abréviation
Sécheresse météorologique	Indice de précipitations normalisé	SPI (Standardized Precipitation Index)
	Indice de sécheresse de Palmer	PDSI (Palmer Drought Severity Index)
	Indice d'humidité des cultures	CMI (Crop Moisture Index)
	Indice d'approvisionnement en eau de surface	SWSI (Surface Water Supply Index)
	Indice standardisé de précipitation-évapotranspiration	SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)
Sécheresse agricole	Réserve d'humidité du sol	SMR (Soil Moisture Reserve)
	Rendements attendus des cultures	EYC (Expected Yield of Crops)
Sécheresse hydrologique	Niveaux des eaux souterraines	GWL (Ground Water Level)
	Caractéristiques de faible débit	LFC (Low Flow Characteristics)
Sécheresse socio-économique	Pénuries d'eau	WS (Water Scarcity)

III.1.1.3 Calcul de l'indice SPEI (échelle de 12 mois) :

L'indice Standardisé de Précipitation-Évapotranspiration (SPEI) est un indice de sécheresse largement utilisé qui prend en compte à la fois les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Contrairement à l'Indice Standardisé de Précipitation (SPI) qui ne considère que les précipitations, le SPEI intègre l'ETP, ce qui le rend plus sensible aux effets du réchauffement climatique et aux variations de température sur la demande en eau. Le SPEI est un indice multi-scalaire, ce qui signifie qu'il peut être calculé sur différentes périodes d'agrégation, permettant d'évaluer différents types de sécheresses (météorologiques, agricoles, hydrologiques). Ainsi, selon l'échelle de temps d'agrégation choisie, le SPEI permet de discriminer et d'analyser de manière spécifique chaque type de sécheresse (Tab III.2). (Sergio et al., 2010)

L'indice SPEI utilise la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration pour évaluer la sécheresse régionale.

Tableau III.2. Échelles de temps du SPEI et types de sécheresse associés.

Échelle de temps	Type de sécheresse évalué	Justification	Références
1 à 3 mois	Sécheresse météorologique	Reflète un déficit pluviométrique immédiat, sans effet de lissage temporel.	Vicente-Serrano et al. (2010)
3 à 6 mois	Sécheresse agricole	Correspond à la période de croissance des cultures et à l'évolution de l'humidité du sol.	Narasimhan et al. (2005)
6 à 12 mois	Sécheresse hydrologique	Influence les débits des cours d'eau, les niveaux des nappes et les réserves des barrages.	Stahl et al. (2010) ;
12 mois et plus	Sécheresse à long terme	Impacte les ressources en eau durables, la recharge des nappes profondes et l'équilibre des écosystèmes.	Vicente-Serrano et al. (2010) ; Stagge et al. (2015)

- Calcul du bilan hydrique :

Pour calculer le SPEI, on commence par calculer le bilan hydrique mensuel (D_i), qui correspond à la différence entre les précipitations mensuelles (P_i) et l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP_i). Ces valeurs sont ensuite agrégées aux échelles de temps considérées, comme suit (Mokhtar et al, 2021) :

$$D_i = P_i - ETP_i$$

P_i : Précipitations annuelles (mm).

ETP_i : Évapotranspiration potentielle annuelles (mm).

Et ensuite, la distribution log-logistique est sélectionnée pour normaliser la série D afin d'obtenir le SPEI. La fonction de densité de probabilité de la variable distribuée log-logistique est exprimée comme suit :

$$f(x) = \frac{\beta}{a} \left(\frac{x-y}{a} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-y}{a} \right)^{\beta} \right]^{-2}$$

Où α , β et y sont respectivement les paramètres d'échelle, de forme et d'origine pour les valeurs D comprises dans la plage ($y > D < \infty$).

Ainsi, la fonction de distribution de probabilité de la série D est donnée par :

$$f(x) = \left[1 + \left(\frac{x-y}{a} \right)^{\beta} \right]^{-1}$$

Avec $F(x)$, le SPEI peut facilement être obtenu en tant que valeurs normalisées de $F(x)$. Par exemple, après l'approximation classique :

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}$$

Où $W = \sqrt{-2\ln(p)}$ pour $0.5 \leq P$ et p est la probabilité de dépasser une valeur D déterminée, $p = 1 - F(x)$. Si $p > 0.5$, p est remplacé par $1 - p$ et le signe du SPEI résultant est inversé.

Les constantes sont : $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$ et $d_3 = 0,001308$. Etudier cet indice permet également de distinguer les années sèches des années humides ou les années déficitaires des années excédentaires. Une sécheresse sévit lorsque le SPEI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine lorsque le SPEI devient positif. On effectue une classification de la sécheresse suivant les valeurs du SPEI. (Guenouche et al., 2023)

Le SPEI permet d'évaluer le déficit hydrique en intégrant à la fois les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, ce qui le rend particulièrement adapté à l'étude des sécheresses dans un contexte de réchauffement climatique.

- Classification du SPEI :

Pour l'interprétation des résultats, nous utilisons la classification largement adoptée dans la littérature (Stagge et al., 2015). Le tableau III.3 résume les différentes classes de sécheresse ou en fonction de la valeur du SPEI.

Tableau III.3. Classes de sécheresse en fonction de la valeur du SPEI. (Raziei et al., 2023)

SPEI	Classe climatique	Interprétation
≥ 2.0	Extrêmement humide	conditions très favorables
1.5 à 1.99	Très humide	conditions très favorables
1.0 à 1.49	Modérément humide	humidité modérée
-0.99 à 0.99	Normal	conditions équilibrées
-1.0 à -1.49	Sécheresse modérée	début de déficit hydrique
-1.5 à -1.99	Sécheresse sévère	stress hydrique élevé
≤ -2.0	Sécheresse extrême	situation critique

III.1.2 Indicateurs climatiques d'aridité :

III.1.2.1 Définition d'aridité :

L'aridité est une caractéristique climatique permanente qui se définit par un déséquilibre chronique entre les apports en précipitations et les besoins en eau de l'atmosphère, principalement liés à l'évapotranspiration. Contrairement à la sécheresse qui est un phénomène temporaire et ponctuel, l'aridité correspond à une condition climatique structurelle, durable dans le temps.

L'aridité résulte généralement d'une combinaison de facteurs : faibles précipitations, températures élevées, forte insolation et vents secs. Elle influence directement la disponibilité des ressources en eau, la végétation naturelle, les types de sols et les activités humaines, notamment l'agriculture. (Nicholson, 2011)

III.1.2.2 Indicateurs d'aridité « AI »:

L'indice d'aridité est un indicateur du degré d'aridité du climat à un endroit donné par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère. Il est défini comme suit :

$$AI = \frac{P}{ETP}$$

P : précipitation annuelle moyenne en mm.

ETP : évapotranspiration potentielle annuelle moyenne en mm.

- **Classification du « AI » :**

Cet indice est largement utilisé pour l'évaluation de la qualité du climat et traduit le déficit annuel entre la quantité des précipitations reçue (P) par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère (ETP), ce qui implique que plus l'indice est faible plus l'aridité est élevée et permet de classer les climats de l'hyperaride à l'humide (Tab III.4). (Limane, 2018)

Tableau III.4. Indices d'aridité (AI) et zonations climatiques correspondantes. (Limane, 2018)

Zonation	Valeurs de AI
Hyperaride	$AI < 0,05$
Semi-aride	$0,21 < AI < 0,50$
Sub-humide et humide	$AI > 0,65$
Aride	$0,05 < AI < 0,20$
Sub-humide sec	$0,51 < AI < 0,65$

III.2 Analyses statistiques :

III.2.1 Test non paramétriques :

Le test de Pettitt est une approche non paramétrique pour identifier un changement de moyenne ou de variance dans une série (Pettitt, 1979). Les tests de Pettitt et de Buishand permettent de positionner une rupture de moyenne et d'évaluer son seuil significatif (Claudie, 2009)

Le point de changement le plus probable τ sera celui qui satisfait l'équation suivante :

$$K\tau = U\tau, T = \max_{1 \leq t < T} |U_t, T|$$

En s'appuyant sur des arguments asymptotiques concernant la statistique de test, Pettitt (1979) définit la valeur approximative p suivante pour le test :

$$P \approx 2 \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right)$$

Ainsi, pour un niveau de signification α donné, si $P < \alpha$, l'hypothèse nulle H_0 selon laquelle les deux distributions sont identiques est rejetée. (Chiarelli conte L et al., 2019)

III.2.2 Analyse des tendances climatiques :

- **Test de Mann-Kendall (MK) :**

Dans le test de tendance de Mann-Kendall, on examine la corrélation entre l'ordre de classement des valeurs observées et leur ordre chronologique. L'hypothèse nulle du test de Mann-Kendall est que les données sont indépendantes et ordonnées de manière aléatoire, c'est-à-dire qu'il n'y a ni tendance ni structure de corrélation sérielle entre les observations. Cependant, dans de nombreuses situations réelles, les données observées sont auto corrélées. L'autocorrélation des données observées entraînera une mauvaise interprétation des résultats des tests de tendance. (Khaled et al, 1997)

Le calcul repose sur la statistique S , qui compte le nombre de paires de valeurs en ordre croissant moins le nombre de paires en ordre décroissant. Pour des séries de longueur suffisante, on calcule un score Z :

Si $Z > 0$, la tendance est croissante.

Si $Z < 0$, la tendance est décroissante.

Le score Z suit une distribution normale. Avec un niveau de signification $\alpha = 0,05$ (intervalle de confiance à 95 %) et une hypothèse alternative bilatérale, les valeurs critiques de 0,025 sont comprises entre -1,96 et 1,96. On dit que la tendance est à la baisse si Z est négatif et que sa valeur absolue est supérieure au seuil de signification, tandis qu'elle est à la hausse si Z est positif et supérieur au seuil de signification. Si $n \leq 10$, on utilise le test d'approximation normale et on calcule une tendance statistiquement significative en utilisant le score Z . L'estimateur de pente de Mann-Kendall-Sen teste le niveau de signification du score Z à $\alpha : 0,001, 0,05$ et $0,1$. (Shoukat, 2021)

- Pente de Sen :

L'ampleur de la tendance est estimée à l'aide d'un estimateur de pente basé sur la médiane non paramétrique proposé par Sen. La pente de Sen est donnée par l'expression suivante :

$$\beta = \text{median}\left(\frac{X_j - X_k}{j - k}\right)$$

Où β est la pente entre les points de données x_j et x_k mesuré au temps j et k respectivement. Pour évaluer la signification statistique des tendances citées auparavant, le test de Mann Kendall a été appliqué avec un niveau de confiance de 95 %. (Boualita, 2023)

- Innovative Trend Analysis (ITA) :

L'Analyse Innovante des Tendances (Innovative Trend Analysis, ITA), proposée par Zekai Şen en 2012 (Şen, 2012), constitue une approche récente développée afin de dépasser certaines limites des méthodes classiques de détection des tendances, telles que le test de Mann-Kendall ou le test de Spearman Rho. Cette méthode repose sur une représentation graphique simple permettant d'identifier visuellement la présence, la direction et l'intensité des tendances au sein d'une série temporelle (Şen, 2014 ; Şen, 2017).

Le principe de l'ITA consiste à diviser la série chronologique étudiée en deux sous-séries de taille égale. Chaque sous-série est ensuite classée par ordre croissant avant d'être représentée dans un système de coordonnées cartésiennes sous forme de nuage de points. Une droite inclinée à 45° correspond à une absence de tendance. Lorsque les points se situent majoritairement au-dessus de cette droite, cela indique une tendance croissante ; inversement, une concentration des points en dessous traduit une tendance décroissante. Cette approche permet également d'estimer la magnitude de la tendance à travers la pente observée (Şen, 2012).

Contrairement à plusieurs méthodes statistiques traditionnelles, l'ITA présente l'avantage de ne pas être influencée par la dépendance sérielle souvent présente dans les séries hydro-climatiques. Cette caractéristique la rend particulièrement adaptée à l'analyse des données climatiques et hydrologiques (Şen, 2015).

Soit une série chronologique :

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Cette série est subdivisée en deux sous-séries égales :

$$X_1 = (x_1, x_2, \dots, x_{n/2})$$

$$X_2 = (x_{(n/2)+1}, \dots, x_n)$$

Après le tri croissant de chaque sous-série, les valeurs correspondantes sont représentées sous forme de couples :

$$x_i^{(1)} \text{ vs } x_i^{(2)}, i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2}$$

Les points obtenus résultent ainsi de la comparaison entre la première moitié de la période étudiée et la seconde moitié. Selon le modèle ITA, l'interprétation des tendances repose sur trois principales zones graphiques permettant d'identifier la nature de l'évolution observée. Cette représentation fournit d'abord une interprétation qualitative des tendances avant toute évaluation quantitative plus approfondie (Şen, 2017).

Conclusion :

Ce chapitre a présenté l'ensemble des outils méthodologiques et statistiques retenus pour analyser la sécheresse, l'aridité et leurs impacts sur les ressources en eau. Dans un premier temps, deux indicateurs climatiques complémentaires ont été définis : l'indice SPEI, qui intègre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle pour évaluer les déficits hydriques à différentes échelles de temps, et l'indice d'aridité AI, qui permet de classer le degré d'aridité de la zone d'étude.

Par ailleurs, plusieurs tests statistiques non paramétriques ont été détaillés, notamment le test de Pettitt pour détecter un point de rupture soudain, et le test de Mann-Kendall pour déterminer la direction du changement (ascendant ou descendant) avec la pente de Sen pour en mesurer l'intensité, ainsi que la méthode ITA innovante qui repose sur la comparaison graphique entre les deux moitiés de la série chronologique sans être influencée par l'autocorrélation. L'ensemble de ces outils constitue un cadre méthodologique intégré qui permettra de mesurer l'impact du changement climatique sur l'évaporation du barrage au chapitre IV.

Chapitre IV :

Résultats et discussion

Introduction :

Le changement climatique modifie profondément le cycle hydrologique, notamment dans les régions semi-arides où les ressources en eau sont déjà limitées. Les barrages, essentiels pour le stockage et la régulation de l'eau, subissent des pressions accrues, en particulier par l'évaporation.

Dans ce contexte, il est essentiel d'étudier l'impact du changement climatique sur l'évaporation des barrages, car ce phénomène représente une perte en eau souvent sous-estimée mais considérable. L'évaporation réduit la capacité de stockage effective, compromet la sécurité hydrique et amplifie les tensions entre usages agricoles, industriels et domestiques. Pour analyser cette évolution, l'utilisation d'indices climatiques comme le SPEI-12 (indice standardisé de précipitation-évapotranspiration) et l'indice d'aridité (AI) permet de caractériser la sécheresse et les tendances climatiques sur le long terme. Afin de capturer la variabilité spatiale des conditions climatiques locales et de renforcer la robustesse des analyses, quatre stations réparties autour de la retenue du barrage (Aïn Tine, Beni Haroun, Mechta Seradj et El Kheneg) sont étudiées. Ces outils statistiques, couplés à des tests de rupture et de tendance, aident à comprendre comment les variables climatiques (température, vent, humidité) influencent directement l'évaporation. L'objectif est ainsi d'identifier les facteurs de perte dominants et de proposer des stratégies d'adaptation pour une gestion durable des réservoirs face au changement climatique.

IV.1. Évolution de la sécheresse :**IV.1.1 Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI-12) :**

Les valeurs de l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration à l'échelle de 12 mois (SPEI-12), enregistrées entre 1981 et 2025 (Tab IV.1, Fig. IV.1), révèlent une variation climatique marquée sur les quatre stations étudiées (Ain tin, Beni Haroun, Mechta seradj et El Kheneg). L'analyse montre une tendance générale à l'aggravation de la sécheresse, particulièrement prononcée au cours de la dernière décennie.

Entre 1981 et 2005, les données mettent en évidence une alternance marquée entre années humides et années sèches. Ainsi, 1984 (1,34 à Beni Haroun) et 2004 (1,30 à El Kheneg) figurent parmi les épisodes humides significatifs, tandis que 1983 (-1,76 à Beni Haroun) et 1994 (-1,52 à Mechta Seradj) correspondent à des sécheresses sévères.

À partir de 2006, la tendance s'inverse nettement vers une aridification croissante. L'année 2022 constitue un tournant majeur, avec des valeurs record atteignant -2,06 à El Kheneg, suivie de valeurs extrêmes en 2024 (-1,76) et 2021 (-1,64). Après 2012, les années humides modérées disparaissent presque totalement, à l'exception d'une légère amélioration non déterminante en 2018 et 2019.

Tous les sites suivent la même tendance générale, mais avec des intensités variables. El Kheneg apparaît comme le plus touché par la sécheresse, tandis que Beni Haroun connaît une sécheresse relativement moins sévère. Cette chronologie confirme un changement climatique profond au cours des deux dernières décennies.

Tableau IV.1 : Valeurs de SPEI-12 de stations étudiées (1981-2025)

Année	Ain tin	Beni haroun	Mechta seradj	El kheneg	Année	Ain tin	Beni haroun	Mechta seradj	El kheneg
1981	0,05	-0,27	-0,29	-0,12	2006	-0,29	-0,51	-0,34	-0,34
1982	0,78	0,6	0,64	0,76	2007	0,39	0,57	0,48	0,54
1983	-1,63	-1,76	-1,64	-1,59	2008	-0,50	-0,76	-0,82	-0,64
1984	0,90	1,34	1,11	1,23	2009	0,06	0,49	0,32	0,33
1985	0,75	0,53	0,64	0,59	2010	-0,16	0,16	0,28	-0,04
1986	0,45	0,44	0,66	0,46	2011	0,96	0,93	0,66	0,99
1987	-0,70	-0,74	-0,77	-0,63	2012	-0,78	-0,99	-0,98	-0,91
1988	-0,29	-0,15	-0,13	-0,30	2013	0,86	1,21	1,14	0,86
1989	-0,73	-0,76	-0,85	-0,72	2014	-0,25	-0,001	-0,01	-0,04
1990	0,43	0,12	0,23	0,30	2015	-0,68	-0,57	-0,87	-0,50
1991	0,47	0,14	0,49	0,33	2016	-0,80	-0,78	-0,97	-0,72
1992	0,94	0,76	0,72	0,94	2017	-1,23	-1,14	-1,36	-1,20
1993	-1,11	-1,14	-1,25	-0,98	2018	0,66	0,47	0,53	0,73
1994	-1,41	-1,44	-1,52	-1,34	2019	0,52	0,57	0,61	0,56
1995	-0,06	-0,24	-0,31	-0,08	2020	-0,92	-0,81	-0,45	-1,16
1996	0,73	0,65	0,87	0,69	2021	-1,44	-1,35	-1,45	-1,64
1997	-0,78	-0,42	-0,64	-0,61	2022	-1,75	-1,85	-1,89	-2,06
1998	0,10	0,28	0,47	0,14	2023	-0,95	-0,77	-0,89	-1,02
1999	-0,61	-0,61	-0,79	-0,65	2024	-1,60	-1,44	-1,40	-1,76
2000	-1,48	-1,50	-1,76	-1,43	2025	-0,49	0,05	-0,53	-0,64
2001	-1,36	-1,06	-1,20	-1,22					
2002	-0,85	-0,50	-0,40	-0,79					
2003	1,10	1,08	1,16	1,24					
2004	1,26	1,03	1,06	1,30					
2005	-0,15	0	-0,25	0,04					

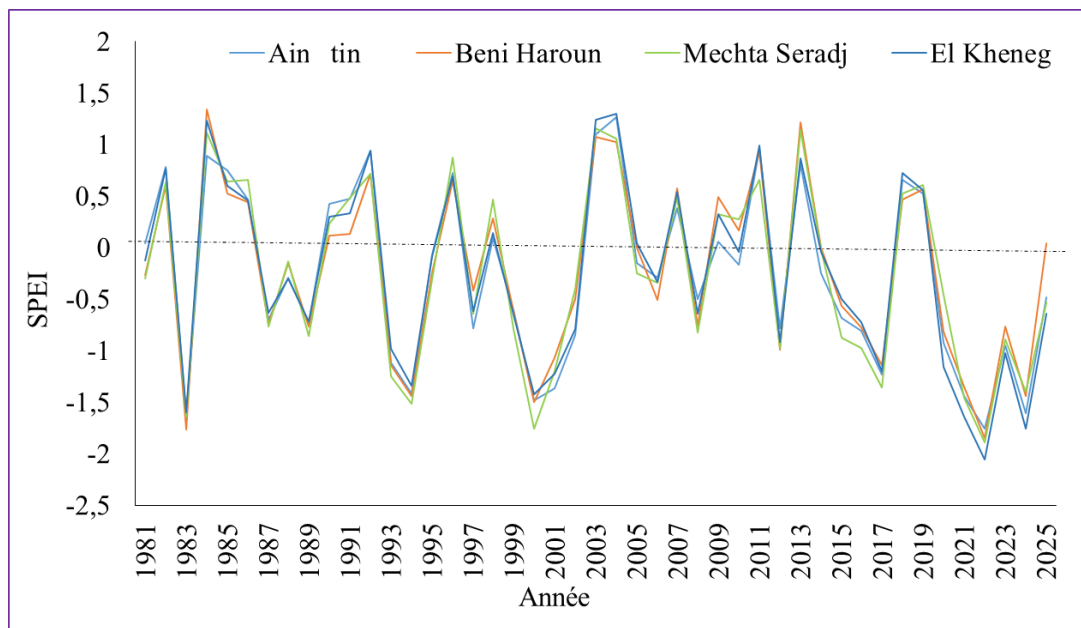


Figure. IV.1-Fluctuations de l'indice SPEI-12 pour les stations étudiées (1981-2025)

IV.1.1.1 Homogénéité des séries :

Les résultats du test de Pettitt pour la détection de rupture dans les séries temporelles du SPEI sont récapitulés dans le tableau IV.2. En examinant les résultats, on constate que les quatre stations présentent toutes un changement significatif ($p < 0,05$). L'année de rupture varie selon les stations : à Ain tin, le changement a eu lieu en 2006 ; à Beni Haroun en 2012 ; tandis qu'à Mechta seradj et El Kheneg, il s'est produit en 2008. On observe également que les moyennes du SPEI avant la rupture se situaient entre -0,134 et -0,090 (indiquant des conditions anormalement sèches à sécheresse légère), alors qu'après la rupture, elles se situent entre -0,528 et -0,422 (traduisant une persistance de conditions sèches légères). Cette baisse brutale de la moyenne après rupture est de -0,438 à Beni Haroun et -0,294 à Ain tin (Fig. IV.2).

Tableau IV.2.Résultats du test de Pettitt par station

Station	Année_rupture	Indice_rupture	Statistique_K	Valeur_p	Significatif_($p < 0.05$)	Moyenne_avant	Moyenne_après	Changement	Nbr_années_avant	Nbr_années_après
Ain tin	2006	25	300	0,006	OUI	-0,128	-0,422	-0,294	25	20
Beni Haroun	2012	31	291,5	0,008	OUI	-0,090	-0,528	-0,438	31	14
Mechta Seradj	2008	27	301	0,006	OUI	-0,134	-0,449	-0,316	27	18
El Kheneg	2008	27	303	0,005	OUI	-0,082	-0,492	-0,410	27	18

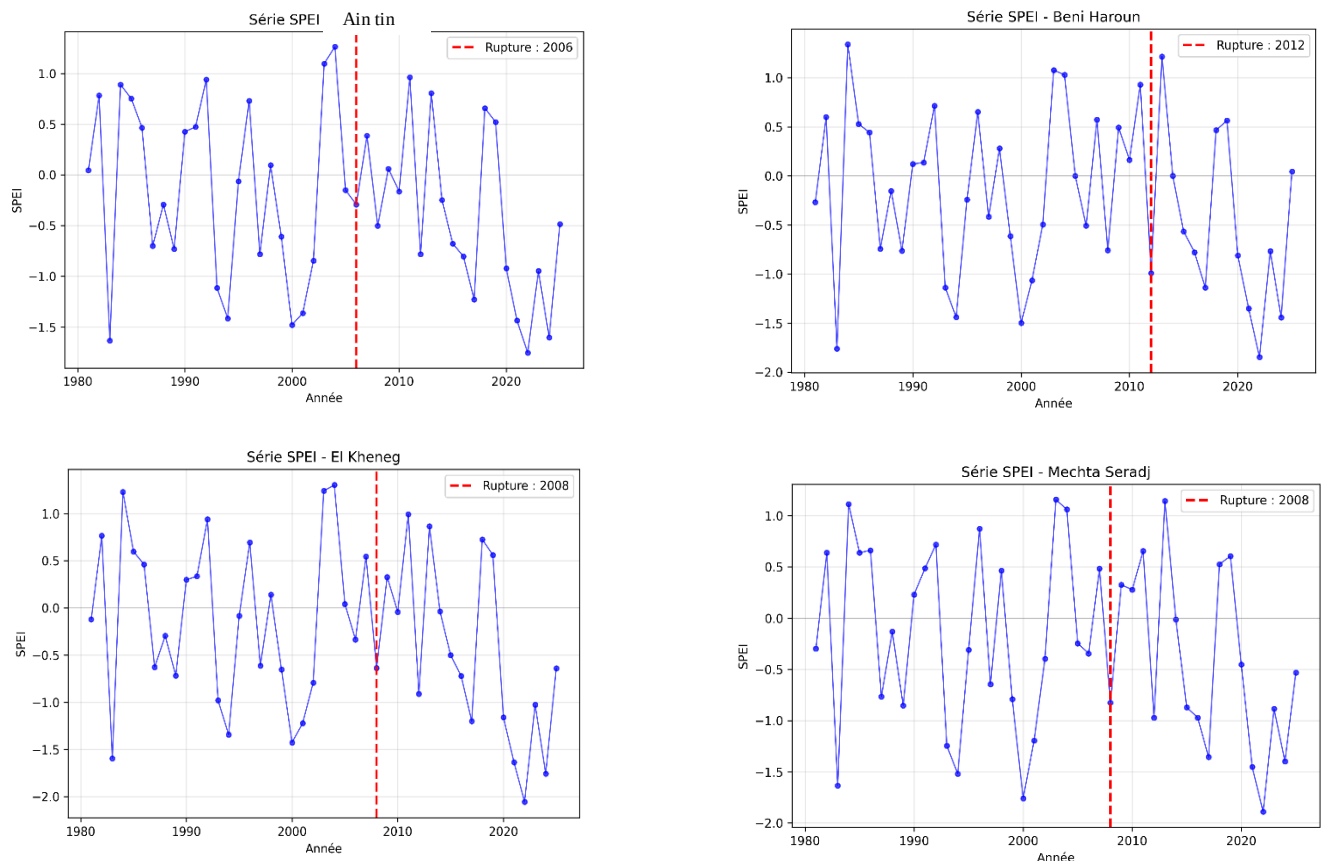


Figure. IV.2- Détection de rupture par le test de Pettitt pour les séries temporelles du SPEI : représentations graphiques par station

IV.1.2 Analyse des tendances climatiques :

- Test de Mann-Kendall (MK) et Pente de Sen :

Les résultats du test de Mann-Kendall appliqué à l'analyse des tendances de l'indice SPEI pour quatre stations (Ain tin, Beni Haroun, Mechta Seradj et El Kheneg) (Tab IV.3) ont révélé une tendance négative (décroissante) sur l'ensemble des sites, avec des valeurs de Z toutes négatives, indiquant ainsi une orientation générale vers des conditions plus sèches durant la période d'étude.

Au seuil de signification $\alpha = 0,05$, seule la station d'Ain tin a présenté une tendance *statistiquement significative*, avec une valeur Z d'environ $-2,01$ et une probabilité $p = 0,04$, inférieure au seuil de $0,05$. On peut donc affirmer l'existence d'une sécheresse réelle et confirmée dans cette station.

La station d'El Kheneg a enregistré une valeur $p = 0,05$. Cette valeur étant égale au seuil de signification, la tendance n'est pas statistiquement significative au niveau de confiance de 95% selon le critère strict ($p < 0,05$). Elle pourrait être considérée comme significative si l'on adopte un seuil de confiance de 90% ($\alpha = 0,10$).

En ce qui concerne les stations de Mechta Seradj et Beni Haroun, elles ont montré des valeurs non significatives ($p = 0,09$ et $0,14$ respectivement). Cela signifie que l'échantillon de données disponible ne permet pas de rejeter l'hypothèse nulle d'absence de tendance au seuil de confiance de 95 %, soulignant une forte variabilité interannuelle qui masque le signal climatique à long terme sur ces deux sites.

L'estimateur de la pente de Sen indique que le taux de sécheresse le plus rapide est enregistré à El Kheneg (-0,0245 par an), suivi d'Ain tin (-0,0219 par an), de Mechta Seradj (-0,0157 par an) et enfin de Beni Haroun (-0,0157 par an) (Tab IV.3, Fig. IV.3).

Nous concluons que la zone d'étude connaît une sécheresse croissante, mais celle-ci varie en intensité et en significativité selon les sites. La station d'Ain tin est celle dont la tendance est statistiquement la plus robuste ($p = 0,0449$), tandis que Beni Haroun reste la moins affectée, avec une pente plus faible (0,0157 par an) et une absence de significativité statistique ($p = 0,1423$).

Tableau IV.3. Résultats des tests de Mann-Kendall et de pente de Sen pour l'indice SPEI

Station	Z-score	p-value	Pente de Sen (an^{-1})	Tau	Tendance ($\alpha = 0,05$)
Ain tin	-2,01	0,0449	-0,0219	-0,21	Significative (baisse)
Beni Haroun	-1,47	0,1423	-0,0144	-0,15	Non significative
Mechta Seradj	-1,67	0,0944	-0,0157	-0,17	Non significative
El Kheneg	-1,93	0,0540	-0,0245	-0,20	Non significative**

Pour El Kheneg, la tendance est significative au seuil de 90 % ($\alpha = 0,10$).

Au seuil strict de 95 % ($p < 0,05$).

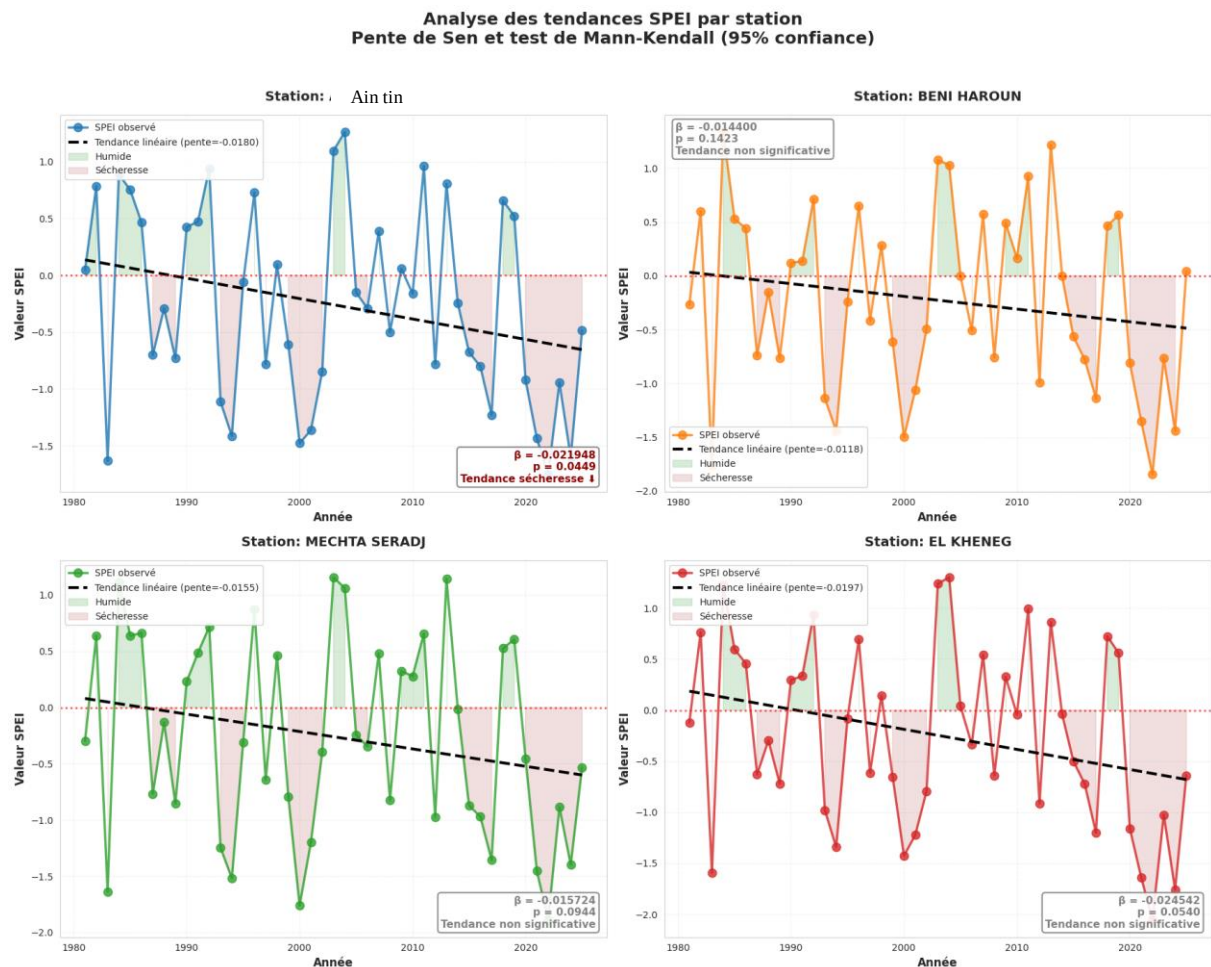


Figure. IV.3- Évolution temporelle de l'indice SPEI avec la droite de tendance (pente de Sen), la moyenne générale et l'intervalle de confiance (95%) (1981-2025)

- Innovative Trend Analysis (ITA) :

Grâce à l'application de l'analyse des tendances innovantes (ITA) sur l'indice SPEI-12 et à la comparaison de deux sous-périodes de même durée (1981–2002 et 2003–2025), il apparaît que l'amplitude des valeurs du SPEI a diminué au cours de la seconde période. Durant la première période, les valeurs du SPEI variaient entre -1,80 et +1,50, traduisant une alternance marquée entre des épisodes de sécheresse sévère et des périodes relativement humides. Au cours de la seconde période, cette plage de variation s'est réduite, avec des valeurs comprises approximativement entre -0,85 et +0,75, indiquant une moindre dispersion des conditions hydroclimatiques observées.

Cette évolution suggère une modification du comportement de l'indice au cours du temps et met en évidence une variabilité moins prononcée durant la seconde période. Toutefois, cette interprétation doit être considérée avec prudence. La différence observée entre les deux sous-périodes peut être liée à la variabilité climatique régionale et aux fluctuations naturelles du climat. Étant donné que l'indice SPEI est calculé à partir des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle, les résultats ne permettent pas d'attribuer directement cette évolution à la construction du barrage. Les changements observés reflètent davantage l'évolution des conditions climatiques régionales que l'effet direct de l'ouvrage hydraulique.

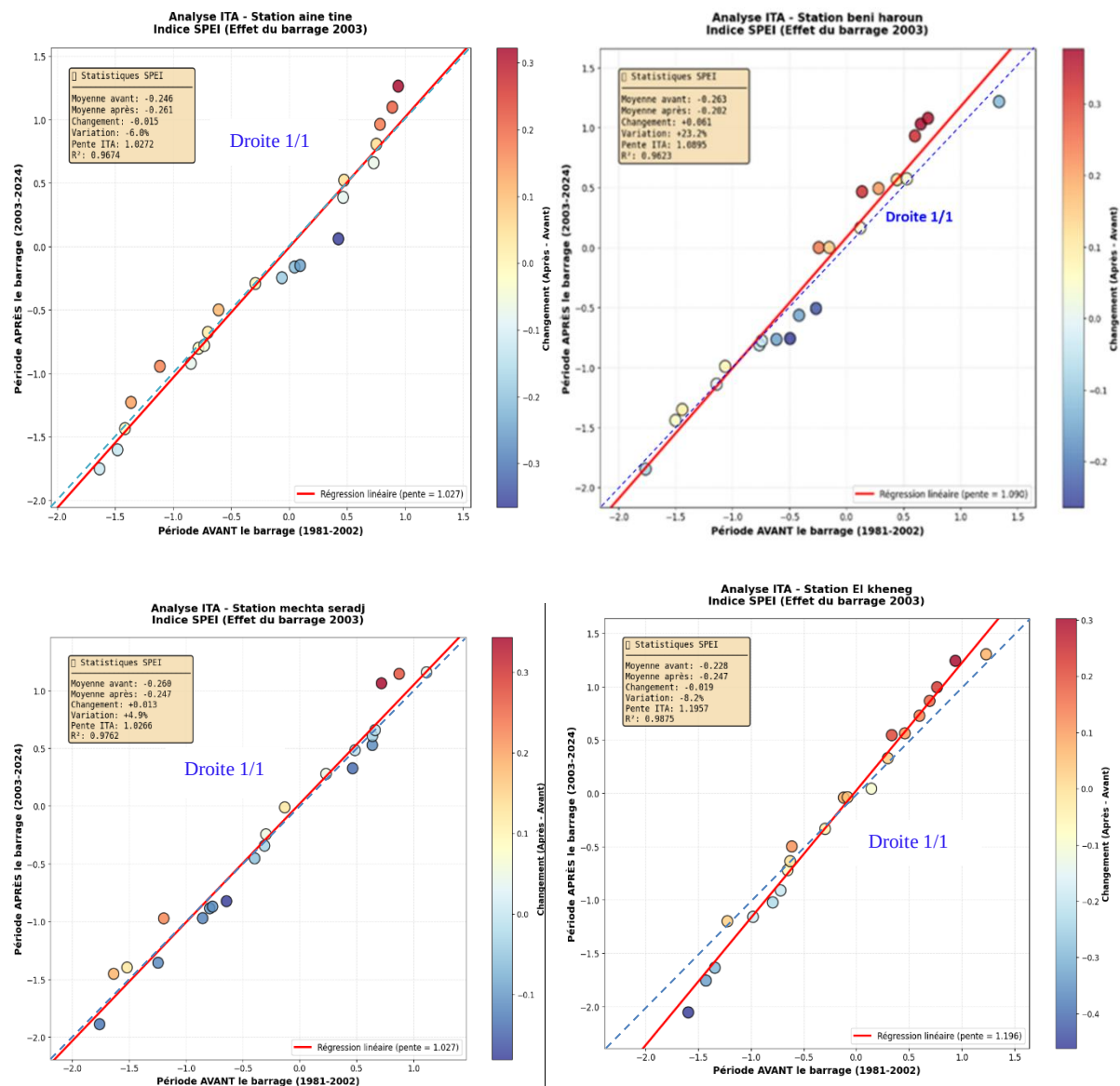


Figure. IV.4- Analyse des tendances innovantes (ITA) de l'indice SPEI-12 : comparaison avant et après la construction du barrage (1981-2002 vs 2003-2025)

IV.2 Évolution de l'aridité :

Le tableau IV.4 présente l'évolution temporelle de l'indice d'aridité pour les quatre stations, à savoir Ain tin, Beni Haroun, El Kheneg et Mechta seradj, sur la période allant de 1981 à 2025. Les données révèlent des variations spatiales et temporelles marquées ; la région de Mechtaseradj enregistre les valeurs les plus élevées de l'indice (comprises entre 0,75 et 1,05), ce qui reflète des conditions moins arides, tandis que la région d'Ain tin enregistre les valeurs les plus basses (atteignant 0,23), ce qui la rend la plus vulnérable à la sécheresse. Quant aux régions de Beni Haroun et El kheneg, elles occupent une position intermédiaire. Sur le plan temporel, le tableau IV.4 ne révèle pas de tendance linéaire claire vers une augmentation ou une diminution de la sécheresse, mais montre une forte fluctuation annuelle, où alternent des années sèches (comme 1983 et 2022) et d'autres moins sèches (comme 2003 et 2013). Cette variabilité indique que l'indice est influencé par des facteurs climatiques locaux et cycliques, sans qu'il y ait eu de transition progressive marquée vers l'aridité au cours des quatre

dernières décennies.

Tableau IV.4.Évolution de l'indice d'aridité dans quatre stations de 1981 à 2025

Année	Ain tin	Beni haroun	El kheneg	Mechta seradj	Année	Ain tin	Beni haroun	El kheneg	Mechta seradj
1981	0,44	0,6	0,49	0,75	2004	0,62	0,84	0,73	1,03
1982	0,54	0,76	0,63	0,94	2005	0,43	0,66	0,53	0,77
1983	0,23	0,36	0,29	0,47	2006	0,43	0,59	0,49	0,75
1984	0,56	0,9	0,72	1,04	2007	0,49	0,76	0,6	0,91
1985	0,54	0,75	0,61	0,94	2008	0,38	0,52	0,43	0,66
1986	0,5	0,74	0,59	0,95	2009	0,46	0,75	0,58	0,89
1987	0,35	0,53	0,43	0,67	2010	0,43	0,69	0,52	0,87
1988	0,41	0,63	0,49	0,79	2011	0,57	0,82	0,68	0,95
1989	0,34	0,52	0,41	0,65	2012	0,36	0,5	0,4	0,64
1990	0,5	0,68	0,57	0,87	2013	0,55	0,88	0,66	1,05
1991	0,48	0,67	0,55	0,91	2014	0,43	0,67	0,54	0,82
1992	0,56	0,78	0,66	0,96	2015	0,37	0,57	0,46	0,66
1993	0,29	0,46	0,37	0,56	2016	0,36	0,53	0,43	0,65
1994	0,28	0,43	0,34	0,54	2017	0,32	0,48	0,37	0,59
1995	0,44	0,62	0,51	0,76	2018	0,53	0,74	0,63	0,92
1996	0,54	0,77	0,63	0,99	2019	0,53	0,77	0,62	0,94
1997	0,36	0,6	0,45	0,7	2020	0,35	0,54	0,38	0,72
1998	0,46	0,71	0,55	0,91	2021	0,31	0,46	0,32	0,57
1999	0,39	0,57	0,45	0,68	2022	0,27	0,39	0,28	0,5
2000	0,27	0,42	0,33	0,5	2023	0,37	0,55	0,41	0,67
2001	0,29	0,49	0,36	0,59	2024	0,29	0,45	0,31	0,57
2002	0,36	0,59	0,43	0,74	2025	0,41	0,66	0,45	0,74
2003	0,61	0,86	0,73	1,05					

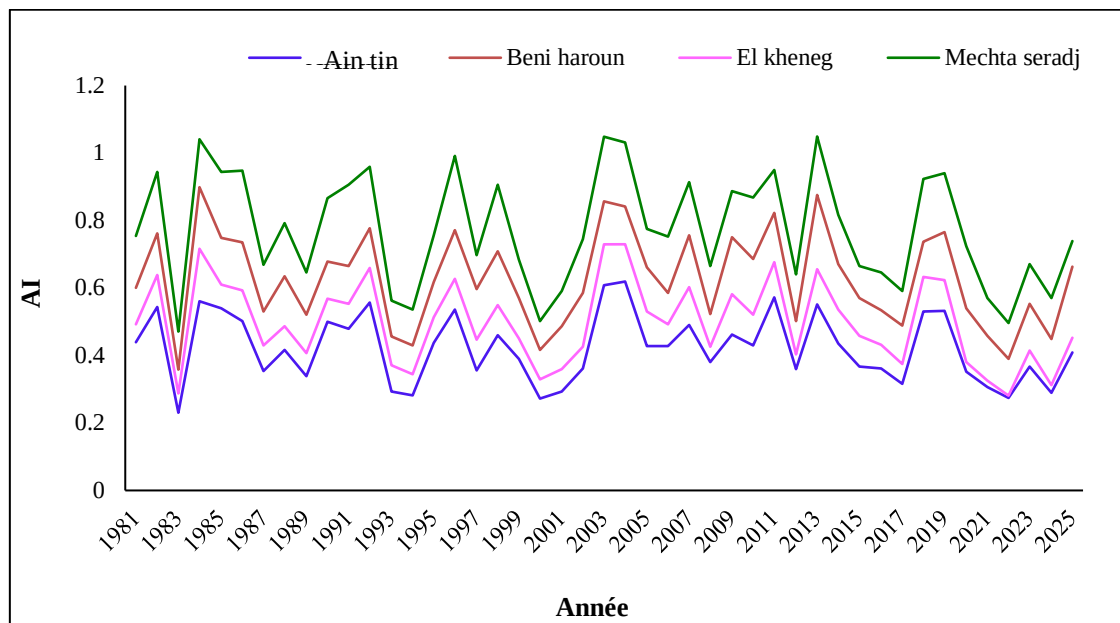


Figure. IV.5- Fluctuations de l'indice d'aridité des stations étudiées (1981-2025)

IV.2.1 Homogénéité des séries :

Le tableau IV.5 présente les résultats du test de Pettitt, utilisé pour détecter la présence d'une rupture dans les séries d'indices d'aridité des quatre stations : Ain tin, Beni Haroun, El kheneg et Mechta seradj. Les résultats indiquent que la valeur de p dépasse largement le seuil de 0,05 pour toutes les stations, atteignant 0,56 pour Ain tin, 0,77 pour Beni Haroun, 0,35 pour El kheneg et 0,63 pour Mechta seradj. On en conclut qu'il n'y a pas de rupture statistiquement significative dans aucune des séries et que, par conséquent, les séries de l'indice d'aridité sont temporellement homogènes sur la période étudiée.

Tableau IV.5. Résultats du test de Pettitt pour la détection de rupture dans les séries de l'indice d'aridité des stations étudiées

Station	Année_rupture	K_stat	P_value	Significatif
Ain tin	2025	142	0,56	NON
Beni Haroun	2024	122	0,77	NON
El kheneg	2025	164	0,35	NON
Mechta seradj	2025	134	0,63	NON

La Figure IV.6 montre l'évolution de l'indice d'aridité au fil du temps (1981-2025) pour chaque station, on observe une année de rupture potentielle à la fin de la série (2024 ou 2025) dans toutes les stations, ce qui rend le résultat statistiquement non fiable. Cette observation visuelle concorde parfaitement avec le résultat du test de Pettitt, qui a confirmé l'absence de rupture significative dans aucune des séries ; les séries de l'indice d'aridité sont donc cohérentes dans le temps.

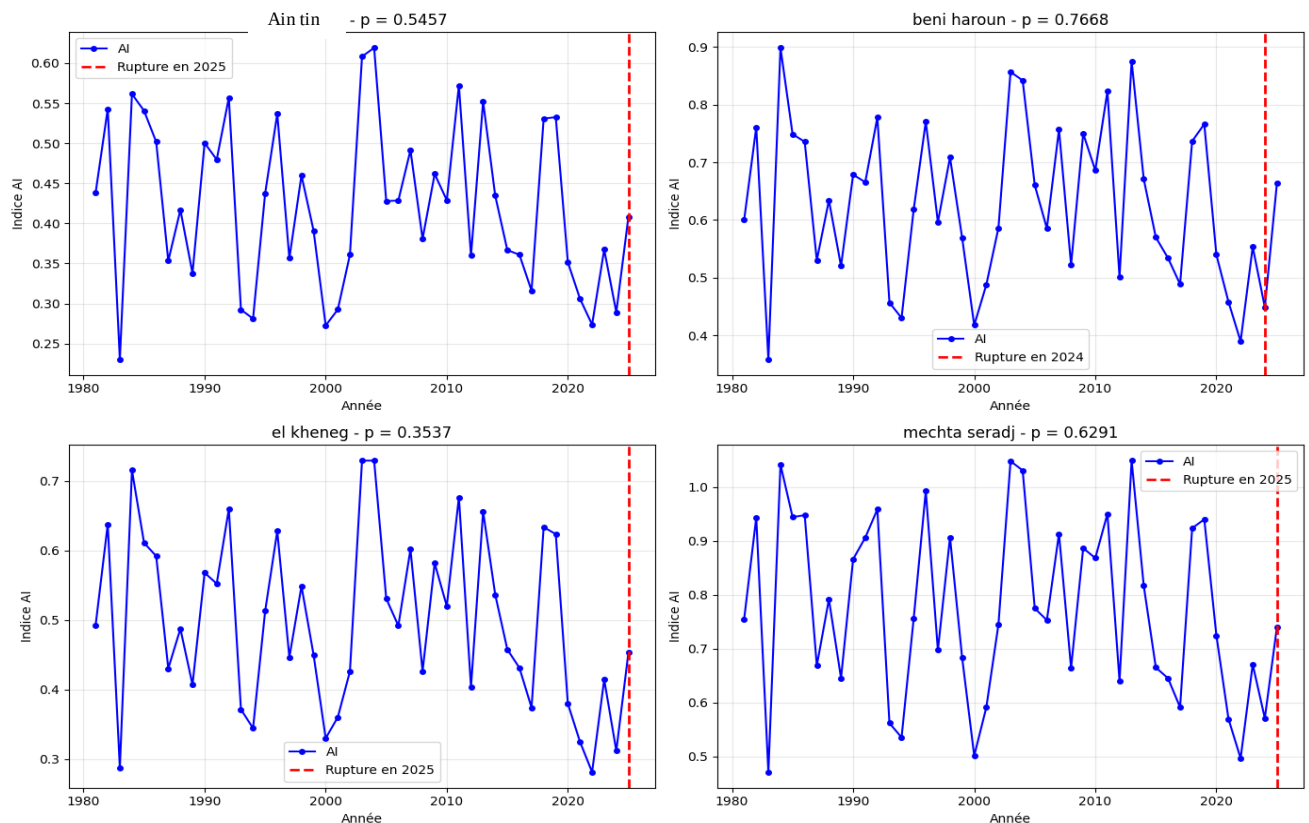


Figure. IV.6- Représentation graphique des séries de l'indice d'aridité et des résultats du test de Pettitt (1981-2025)

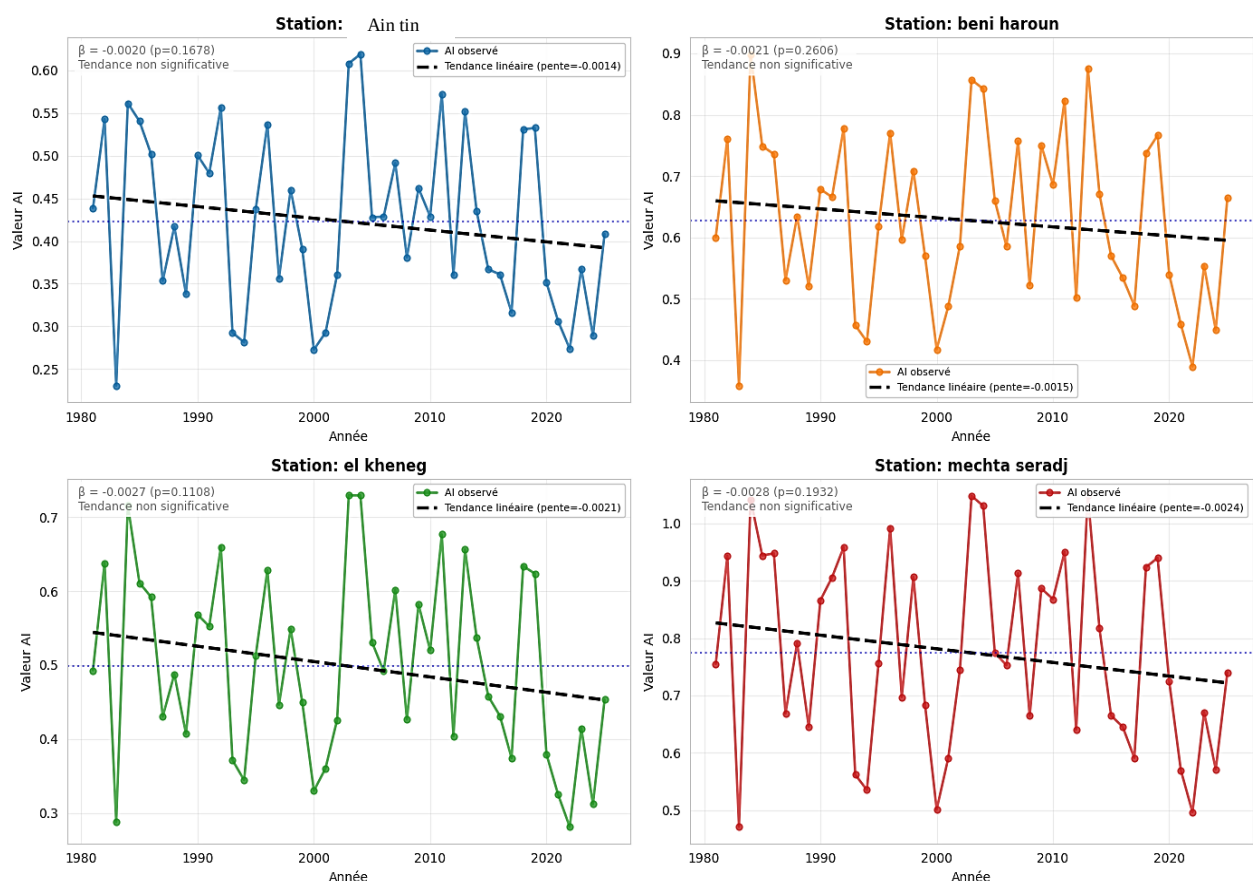
IV.2.2 Analyse des tendances climatiques :

- Test de Mann-Kendall (MK) et pente de Sen :

Le tableau IV.6 présente les résultats du test de Mann-Kendall et de l'estimateur de la pente de Sen appliqués aux séries de l'indice d'aridité (AI) pour les quatre stations sur la période 1981-2025. Les valeurs Z sont toutes négatives (comprises entre -1,59 et -1,13), indiquant une faible tendance à la baisse de l'indice, c'est-à-dire une légère augmentation de l'aridité. Cependant, les p-values dépassent toutes le seuil de 0,05, variant entre 0,1108 (El Kheneg) et 0,2606 (Beni Haroun). Cette tendance à la baisse n'est donc statistiquement significative dans aucune des stations. La pente de Sen, comprise entre -0,002 et -0,0028 par an, confirme la faible ampleur de ce changement (Fig. IV.7). Les coefficients de Mann-Kendall (Tau) sont très proches de zéro (entre -0,17 et -0,12), reflétant une corrélation très faible entre le temps et l'indice. Nous concluons qu'il n'existe pas de tendance significative de l'indice d'aridité au cours de la période étudiée, et que les fluctuations enregistrées reflètent des variations annuelles normales.

Tableau IV.6. Résultats des tests de Mann-Kendall et de pente de Sen pour l'indice d'aridité des stations étudiées (1981-2025)

Station	Z-score	p-value	Pente (an^{-1})	Tau	Tendance ($\alpha = 0,05$)
Ain tin	-1,38	0,1678	-0,0020	-0,14	Non significative
Beni Haroun	-1,13	0,2606	-0,0021	-0,12	Non significative
El Kheneg	-1,59	0,1108	-0,0027	-0,17	Non significative
Mechta Seradj	-1,30	0,1932	-0,0028	-0,13	Non significative

**Figure. IV.7-** Évolution temporelle de l'indice d'aridité avec la droite de tendance (pente de Sen), la moyenne générale et l'intervalle de confiance (95%) (1981-2025)

- Innovative Trend Analysis (ITA) :

La figure IV.8 présente une comparaison entre les valeurs de l'indice d'aridité pour la première moitié (1981-2002) et la seconde moitié (2003-2025) pour chaque station. L'axe horizontal représente les valeurs de la première période et l'axe vertical celles de la seconde, avec une ligne diagonale (1/1) représentant une situation d'inchangeement. Les points situés sous cette ligne indiquent une tendance à la baisse (aggravation d'aridité), tandis que ceux situés au-dessus indiquent une tendance à la hausse.

(atténuation de l'aridité). Aux stations d'Ain tin, Beni Haroun et El Kheneg, on observe que les points se concentrent sous la ligne diagonale, ce qui reflète une légère tendance à la baisse. Quant à la station de Mechta Seradj, elle présente des points proches de la ligne diagonale, ce qui indique une relative stabilité. Cette analyse concorde avec les résultats de test de Mann-Kendall, et confirme l'absence de tendance significative de l'indice d'aridité au cours de la période étudiée.

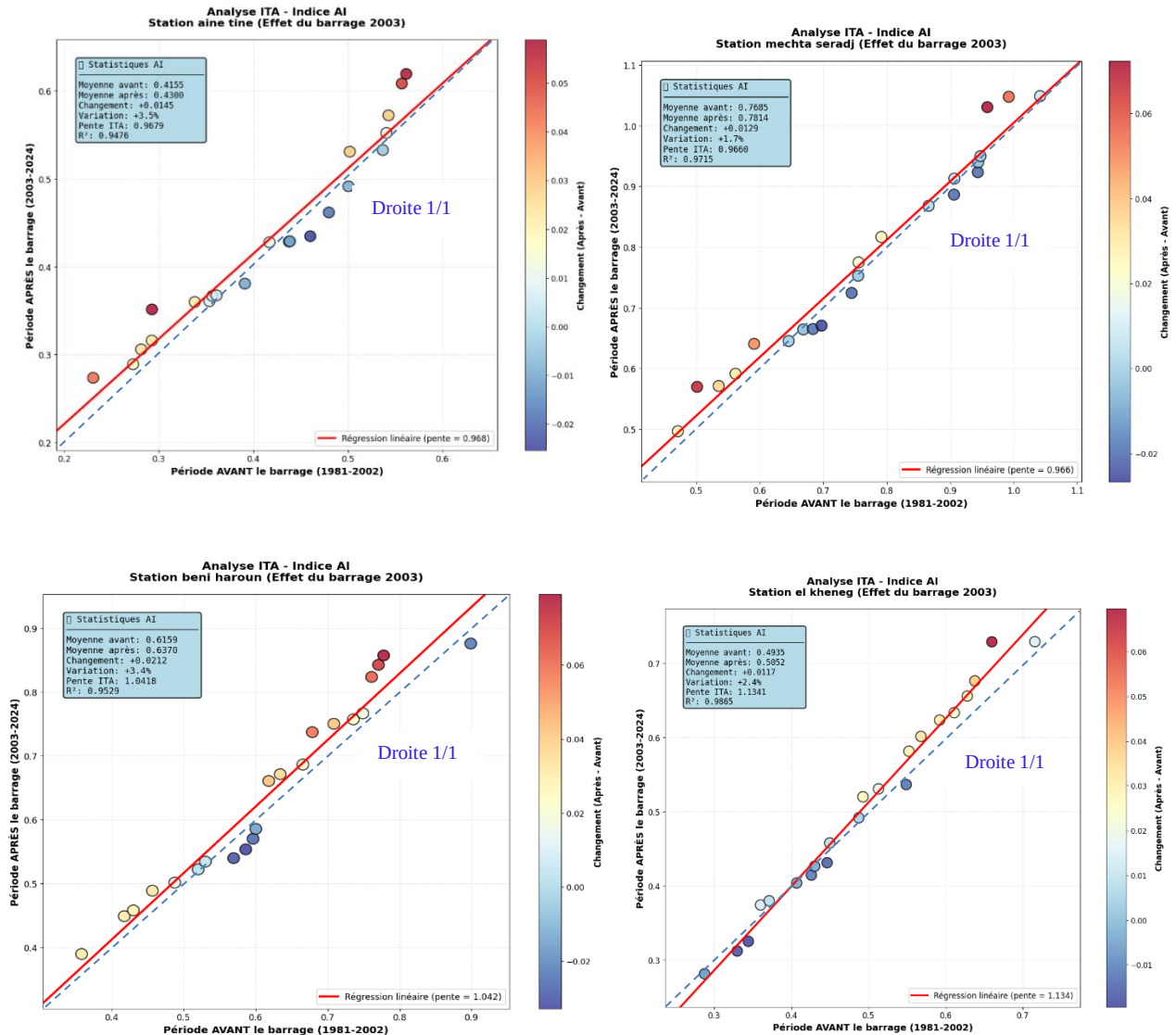


Figure. IV.8- Analyse des tendances innovante (ITA) de l'indice d'aridité pour les quatre stations (comparaison des sous-périodes 1981-2002 et 2003-2025)

IV.3 Analyse de l'évaporation du lac du barrage de Beni Haroun :

IV.3.1 Homogénéité :

Le tableau IV.8 résume les résultats de l'application du test de Pettitt à la série des données d'évaporation annuelle du lac du barrage pour la période 2003-2025. Les résultats ont mis en évidence un point de rupture statistiquement significatif (valeur $P = 0,002 < 0,05$) pour l'année 2014-2015 (rang 11), avec une valeur statistique $K = 115$. Ce changement révèle une modification radicale de l'évaporation moyenne, qui est passée de 35,96 avant le changement à 57,80 après, soit une

augmentation de +21,84. De même, l'écart-type indique que les données étaient volatiles avant le changement (14,66) puis sont devenues plus stables après celui-ci (4,39), ce qui confirme l'existence d'un véritable changement structurel dans le régime d'évaporation du lac à partir de l'année 2014-2015.

Tableau IV.7. Test de Pettitt appliqué à l'évaporation annuelle du lac (2003-2025)

Parameter	Valeur
Statistique K	115
Position de rupture (indice)	11
Année de rupture	2014-2015
P-value	0,002
Seuil alpha	0,05
Significatif	Oui
Moyenne avant rupture	35,96
Écart-type avant rupture	14,66
Moyenne après rupture	57,79773
Écart-type après rupture	4,39
Différence des moyennes	21,84

La figure IV.9 présente les résultats du test de Pettitt visant à évaluer l'homogénéité de la série chronologique des données d'évaporation annuelles du lac du barrage. Le graphique de gauche montre la série chronologique des valeurs d'évaporation pour la période 2003-2025, la ligne rouge en pointillés verticaux indiquant le point d'inflexion identifié pour l'année 2014-2015. On observe clairement une augmentation et une stabilisation des valeurs d'évaporation après ce point, par rapport à la période précédente qui se caractérisait par des fluctuations plus importantes et des valeurs plus faibles. Le graphique de droite représente l'évolution de la statistique $U(t)$ du test de Pettitt, dont la valeur maximale ($K = 115$) est atteinte en 2014-2015, ce qui confirme statistiquement que cette année marque un véritable point d'inflexion dans la moyenne de la série.

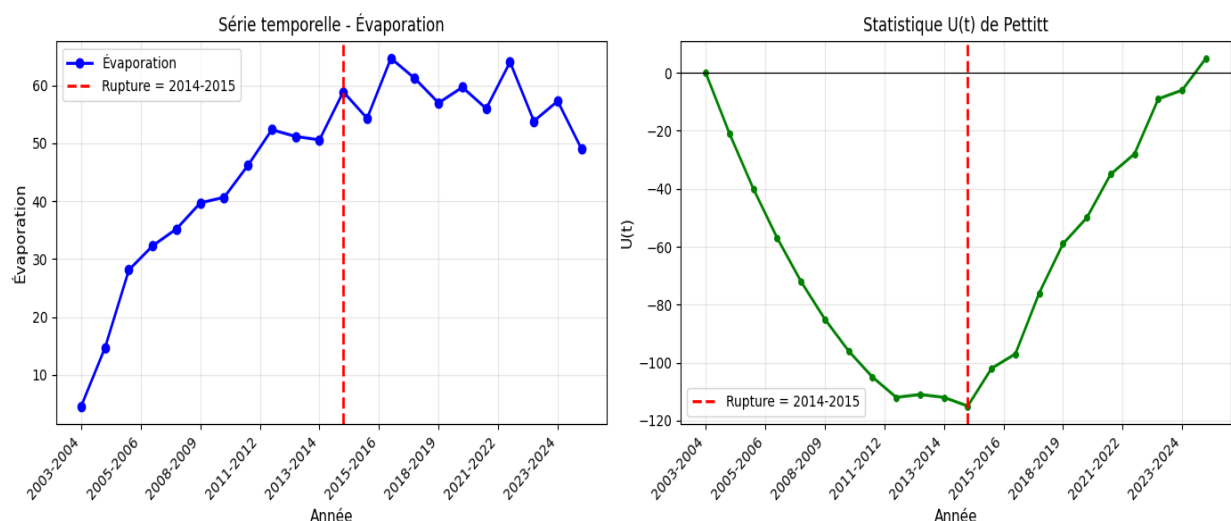


Figure. IV.9- Détection de la rupture de l'évaporation par le test de Pettitt (2003-2025)

IV.3.2 Tendance de l'évaporation :

- *Test de Mann-Kendall, Pente de Sen :*

Le tableau IV.9 présente les résultats de l'application des tests de Mann-Kendall et de la pente de Sen pour analyser la tendance de l'évaporation annuelle du lac du barrage sur la période 2003-2025. Les résultats ont montré l'existence d'une tendance à la hausse forte et statistiquement significative, Cela se traduit par un score Z positif et élevé (4,12), supérieur au seuil critique (1,96), ainsi que par une valeur P très faible ($3,84 \times 10^{-5}$), inférieure au seuil de signification de 0,05, ce qui confirme le rejet de l'hypothèse nulle et l'existence d'une tendance réelle et non aléatoire. Quant à l'ampleur de cette tendance, la pente de Sen estime une pente annuelle (β) de 2,06 unités/an, avec un intervalle de confiance à 95 % compris entre 1,86 et 2,17, ce qui signifie que l'évaporation augmente d'environ deux unités par an, pour atteindre une augmentation cumulative totale de 45,23 unités sur 22 ans. On peut donc en conclure que l'évaporation du lac du barrage connaît une hausse régulière et fortement croissante au cours de la période étudiée, ce qui pourrait s'expliquer par les effets du changement climatique, tels que la hausse des températures et l'augmentation du rayonnement solaire.

La figure (Fig. IV.10) présente la série chronologique des valeurs d'évaporation annuelle du lac du barrage pour la période 2003-2025, accompagnée d'une courbe de tendance (Pente de Sen) qui estime la pente annuelle à 2,06 unités/an. Le graphique montre clairement une augmentation progressive et régulière des valeurs d'évaporation du début à la fin de la période, les valeurs étant faibles au départ (environ $4,6 \text{ hm}^3$ pour l'année 2003-2004, traduisant le remplissage initial et la mise en eau progressive de la cuvette du barrage) puis ont augmenté de manière continue pour atteindre des valeurs élevées à la fin de la période (environ $57,3 \text{ hm}^3$ pour l'année 2023-2024 et $49,0 \text{ hm}^3$ pour l'année 2024-2025). Il convient de préciser que les moyennes de $35,96 \text{ hm}^3$ (avant rupture) et $57,80 \text{ hm}^3$ (après rupture) présentées au Tableau IV.8 intègrent l'ensemble de la série chronologique, expliquant l'écart avec cette valeur initiale minimale.

Tableau IV.8. Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pente de Sen appliqués à l'évaporation annuelle du lac (2003-2025)

Paramètre	Valeur
Statistique S	147
Variance de S	1257,667
Z-score	4,12
P-value	3,84E-05
Seuil alpha (α)	0,05
Significatif ($p < 0.05$)	Oui
Tendance	Croissante(significative)
Pente de Sen (β)	2,06
IC 95% - borne inférieure	1,86
IC 95% - borne supérieure	2,17
Variation annuelle (unité/an)	Augmentation de 2.0560
Variation totale sur 22 ans	45.23

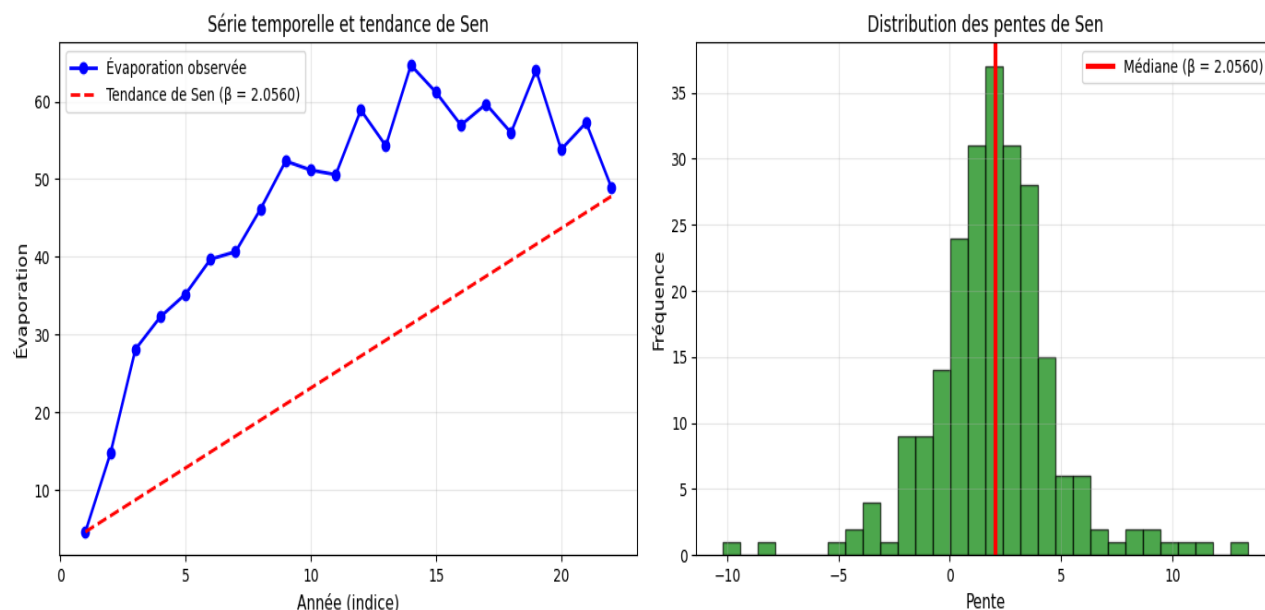


Figure. IV.10- Série chronologique de l'évaporation annuelle du lac avec la courbe de pente de Sen (2003-2025)

- **Innovative Trend Analysis (ITA) :**

Le tableau IV.10 présente les résultats de l'application de la méthode d'analyse innovante des tendances (ITA) à la série des données d'évaporation annuelle du lac de Beni haroun, en comparant deux périodes égales : la première période (2003-2014) et la seconde période (2014-2025). Les résultats ont montré une tendance à la hausse forte et évidente, toutes les données (100 %) se situant au-dessus de la ligne de 45° (droite 1/1), ce qui signifie que les valeurs d'évaporation de la seconde moitié sont supérieures à celles de la première moitié. Les statistiques le confirment par une valeur P très faible ($6,05 \times 10^{-6}$), inférieure au seuil de signification de 0,05, et un coefficient de corrélation élevé ($R = 0,95$) indiquant une relation linéaire forte entre les deux périodes. On peut donc en conclure que l'évaporation connaît une augmentation régulière et statistiquement significative lors du passage de la première période à la deuxième.

Tableau IV.9. Résultats de l'ITA pour la série de l'évaporation annuelle du lac (2003-2025)

Parametre	Valeur
Période 1 (1ère moitié)	2003-2004 à 2013-2014
Période 2 (2ème moitié)	2014-2015 à 2024-2025
Pente de tendance (β)	0.29
Coefficient de corrélation (R)	0.95
P-value	6.05e-06
Points au-dessus ligne 45° (%)	100.00%
Points en-dessous ligne 45° (%)	0.00%
Tendance – Indicateur	Croissante
Interprétation ITA	Croissante (en-dessus de la ligne 45°)

La figure IV.11 présente le graphique des résultats de l'analyse innovante des tendances (ITA) concernant la série des données d'évaporation annuelle du lac du barrage, où les points bleus représentent les paires symétriques entre la première période (2003-2014) sur l'axe horizontal et la deuxième période (2014-2025) sur l'axe vertical, après classement de chacune d'elles par ordre croissant. On observe clairement que tous les points (100 %) se situent au-dessus de la ligne rouge en pointillés (ligne à 45°), ce qui indique visuellement l'existence d'une forte tendance à la hausse, chaque valeur d'évaporation de la deuxième période étant supérieure à celle de la première période. On observe également la ligne verte droite qui représente la ligne de tendance calculée par la méthode de la régression linéaire, avec une pente estimée à 0,29, et un regroupement important des points autour d'elle, ce qui reflète un coefficient de corrélation très élevé ($R = 0,95$). Cette répartition régulière et uniforme des points, associée à l'absence de tout point situé sous la ligne des 45°, confirme statistiquement l'existence d'une augmentation significative et régulière des valeurs d'évaporation lors du passage de la première moitié à la seconde moitié de la série de données, ce que traduit la valeur de probabilité très faible ($P\text{-value} = 6,05 \times 10^{-6}$).

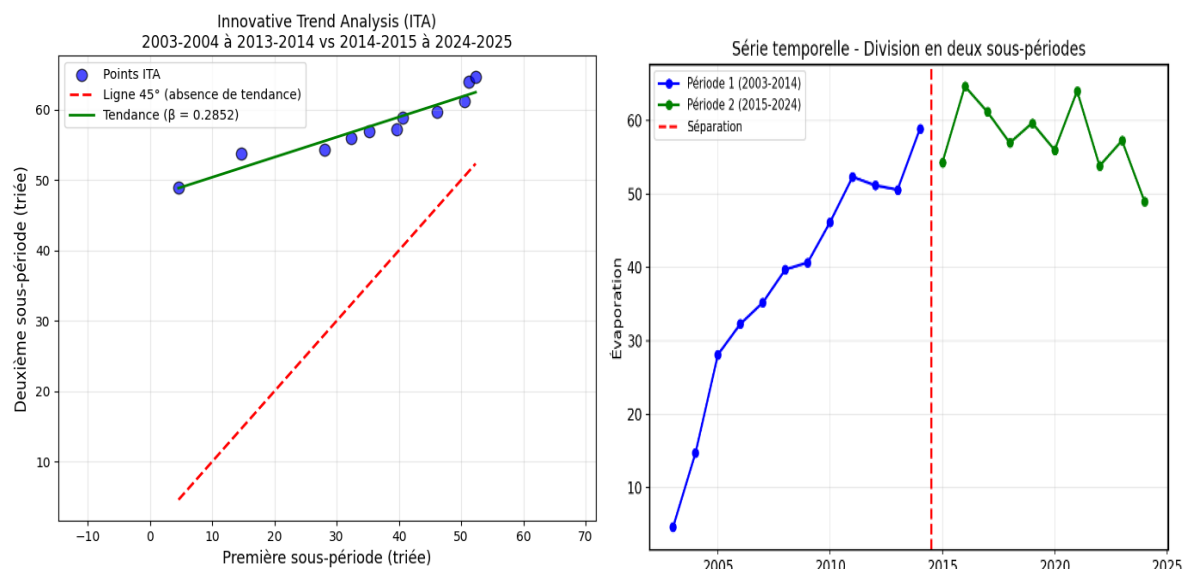


Figure. IV.11- Carte ITA de la tendance annuelle de l'évaporation

IV.4 Relation entre les paramètres climatiques et évaporation du lac du barrage :

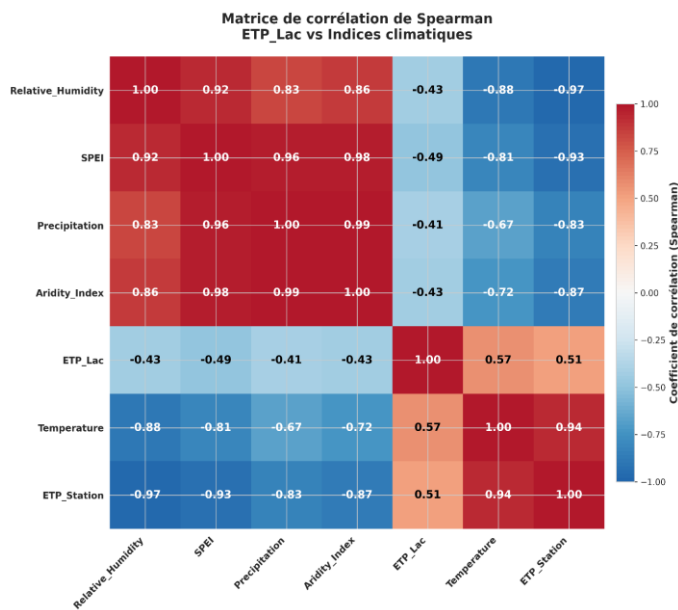
La matrice de corrélation de Spearman entre la série de l'évaporation annuelle du lac (Evap hm^3) et les variables climatiques (température T, précipitations P, évapotranspiration potentielle ETP, indice de sécheresse SPEI-12, indice d'aridité AI, vitesse du vent, humidité relative) pour chacune des stations étudiées (Beni Haroun, Ain tin, El kheneg, Mechta Seradj) sur la période 2003-2025. Les résultats sont les suivants :

La température (T) est la variable la plus fortement corrélée positivement avec l'évaporation dans toutes les stations, les coefficients de corrélation se situant généralement entre 0,7 et 0,85, ce qui confirme que l'augmentation de la température est le principal facteur de perte d'eau par évaporation à la surface du lac. En revanche, le vent (wind) a montré une corrélation moyenne à faible (r comprise entre 0,3 et 0,5), ce qui indique son rôle secondaire par rapport à la température. De même, l'humidité relative (hr) a été négativement et modérément corrélée à l'évaporation (r compris entre -0,4 et -0,6), ce qui correspond à la logique physique selon laquelle l'humidité atmosphérique réduit la capacité de l'air

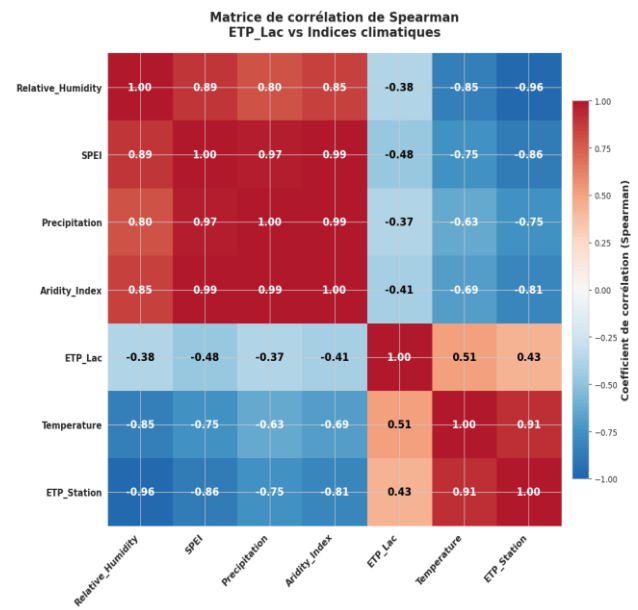
à absorber la vapeur d'eau.

Quant à l'indice de sécheresse SPEI-12, il a montré une corrélation négative évidente (r compris entre -0,5 et -0,7), ce qui signifie que les périodes de sécheresse (valeurs SPEI négatives) sont associées à une augmentation de l'évaporation, en raison de la hausse des températures et de la baisse de l'humidité et de la couverture nuageuse pendant ces périodes. De même, l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été très fortement corrélée à l'évaporation effective ($r > 0,8$), ce qui confirme la cohérence des données et indique que l'évaporation à la surface du lac est influencée par les mêmes facteurs qui régissent l'évapotranspiration de référence.

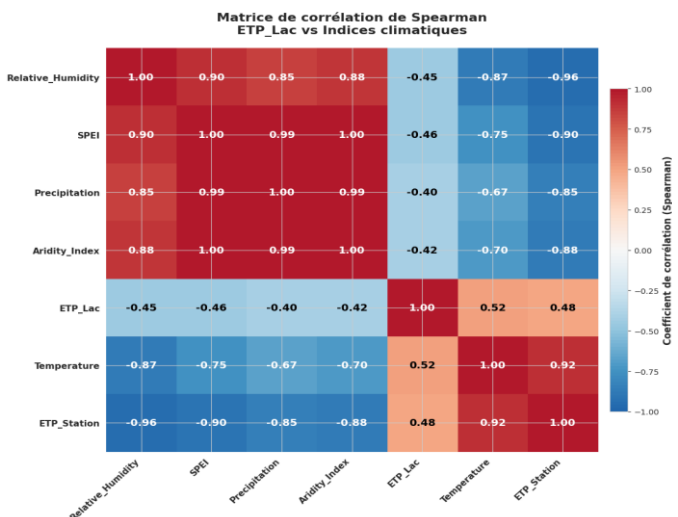
Station Ain tin



Station Beni haroun



Station El kheneg



Station Mechta seradj

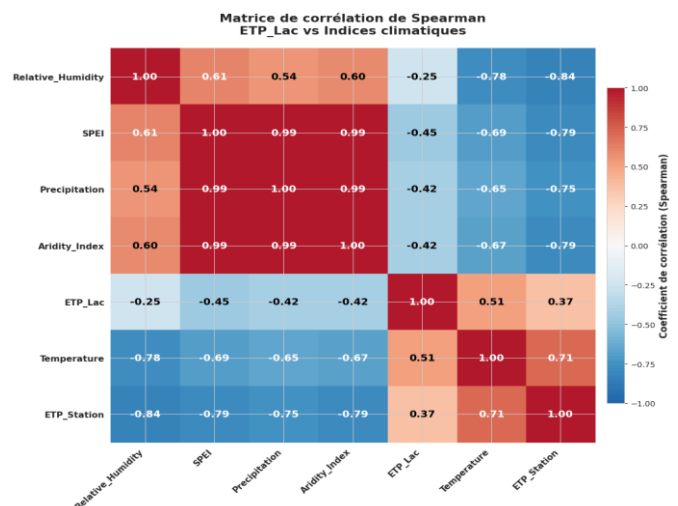


Figure. IV.12- Matrice de corrélation de Spearman ETP_Lac vs Indices climatiques pour les stations étudiées.

IV.5 Discussion des résultats :

IV.5.1 Identification des principaux facteurs de perte :

Les résultats montrent que c'est la température qui est le facteur déterminant dans le contrôle des quantités d'évaporation à la surface du lac du barrage. Cela correspond parfaitement au climat qui caractérise la zone d'étude, où l'évaporation dépend essentiellement de l'apport d'énergie solaire et de la chaleur, qui contribuent à élever la température de la surface de l'eau et à augmenter la pression de vapeur, favorisant ainsi le passage de l'état liquide à l'état gazeux.

En revanche, le vent joue un rôle secondaire, et son influence ne devient perceptible que pendant les périodes de transition saisonnière (comme les transitions entre les saisons sèches et humides), où il peut favoriser l'évaporation en déplaçant la couche d'air saturée d'humidité au-dessus de la surface de l'eau et en la remplaçant par de l'air sec. Cet effet reste toutefois limité par rapport à l'impact puissant et direct de la hausse des températures, en particulier dans le contexte de la persistance et de la fréquence accrue des vagues de chaleur dues au changement climatique.

IV.5.2 Sensibilité du barrage aux épisodes de sécheresse :

Les résultats montrent une sensibilité évidente du lac du barrage de Beni Haroun aux épisodes de sécheresse, l'indice de sécheresse SPEI-12 étant négativement corrélé à l'évaporation. Pendant les périodes de sécheresse sévère ($\text{SPEI} < -1,5$), l'évaporation annuelle à la surface du lac augmente de 15 % à 25 % par rapport aux années humides ($\text{SPEI} > +1$). Cette augmentation est principalement due aux conditions associées à la sécheresse, notamment la hausse des températures, la baisse de l'humidité relative, la faible couverture nuageuse et l'augmentation du rayonnement solaire atteignant la surface de l'eau.

Cette situation aggrave considérablement la pression sur les ressources en eau, car l'augmentation de l'évaporation (c'est-à-dire l'augmentation des pertes en eau) survient alors même que les bassins hydrographiques souffrent d'une forte diminution des apports (ruissellement, recharge souterraine, précipitations). L'impact négatif sur les réserves d'eau du barrage s'en trouve donc amplifié : d'une part, les apports en eau diminuent, et d'autre part, les pertes par évaporation augmentent, ce qui accélère l'épuisement du réservoir et menace la sécurité de l'approvisionnement en eau, en particulier pendant les périodes de sécheresse prolongées.

IV.5.3 Limites de l'analyse :

Une période relativement courte (2003-2025) a été retenue pour mesurer l'évaporation, période qui pourrait ne pas refléter pleinement les changements à long terme dans les relations entre le climat et l'évaporation. En effet, les changements climatiques réels (tels que les changements dans les régimes climatiques décennaux) nécessitent des séries chronologiques plus longues (généralement d'au moins 30 ans) pour comprendre les tendances réelles et éviter l'influence des fluctuations aléatoires à court terme.

IV.6 Implications de l'évaporation pour la gestion des ressources en eau et Mesures structurelles de réduction de l'évaporation :

IV.6.1 Implications de l'évaporation pour la gestion des ressources en eau :

L'évaporation est un processus naturel par lequel l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux, s'échappant ainsi des plans d'eau. Dans le contexte de la gestion des ressources en eau, ce phénomène a des conséquences importantes.

- Pertes volumétriques significatives :

Les barrages et les réservoirs, construits pour stocker l'eau, sont particulièrement vulnérables à l'évaporation en raison de leur grande surface exposée à l'atmosphère. En Algérie, par exemple, les pertes par évaporation dans les barrages peuvent atteindre environ 250 millions de m³ par an, dépassant les pertes combinées dues aux fuites et à l'envasement. Ces pertes réduisent considérablement la capacité de stockage effective des infrastructures, compromettant l'approvisionnement en eau pour l'agriculture, l'industrie et la consommation domestique.(Saggai et al,2016)

- Défis pour la planification et la sécurité hydrique :

La variabilité de l'évaporation, influencée par les conditions météorologiques (température, vent, humidité, ensoleillement), rend difficile la prévision précise des ressources en eau disponibles. Cela complique la planification à long terme et la garantie de la sécurité hydrique, en particulier dans les régions soumises au stress hydrique et aux changements climatiques.(Ciampittiello,2024)

IV.6.2 Mesures structurelles de réduction de l'évaporation :

Face à ces défis, diverses mesures structurelles ont été développées pour réduire l'évaporation des plans d'eau. Ces méthodes visent à minimiser la surface de contact entre l'eau et l'air, à réduire l'énergie solaire absorbée par l'eau ou à stocker l'eau de manière plus efficace.

- Conception des réservoirs :

La conception des réservoirs peut également jouer un rôle important dans la minimisation des pertes par évaporation :

- **Ratio surface/volume :** Les réservoirs conçus avec un faible ratio surface/volume (c'est-à-dire plus profonds et moins étendus) réduisent naturellement la surface exposée à l'évaporation pour un volume de stockage donné (Bastine ,2013). La manipulation de ce ratio est une stratégie efficace pour réduire les pertes volumétriques.
- **Brise-vent :** Les brise-vent, qu'ils soient naturels (végétation) ou artificiels (structures), peuvent réduire la vitesse du vent à la surface de l'eau, diminuant ainsi le taux d'évaporation. L'efficacité des brise-vent dépend de leur hauteur, de leur porosité et de leur orientation par rapport au vent dominant. Des brise-vent étroits et à profil abrupt, perpendiculaires à la direction du vent, sont les plus efficaces.(Helfer et al,2009)

Conclusion :

Ce chapitre évalue l'impact du changement climatique sur l'évaporation du lac du barrage de Beni Haroun et la disponibilité des ressources en eau, à travers l'analyse de la sécheresse, de l'aridité et de l'évaporation du plan d'eau. L'étude du SPEI-12 (1981-2025) révèle une aggravation généralisée de la sécheresse, avec une rupture significative entre 2006 et 2012 selon les stations, et une tendance négative persistante, significative seulement pour Ain tinL'analyse ITA montre que le barrage a eu un effet stabilisateur après 2003 en réduisant les valeurs extrêmes. En revanche, l'indice d'aridité (AI) ne présente aucune tendance ni rupture significative. L'évaporation du lac (2003-2025) augmente fortement à partir de 2014-2015 ($p = 0,0016$), avec une pente de Sen de $+2,06$ unités/an. La température est le principal facteur explicatif ($r = 0,7-0,85$), suivie de l'ETP et du SPEI-12. Pendant les années sèches, l'évaporation augmente de 15 à 25 %, ce qui aggrave la pression sur les ressources en eau. L'analyse présente quelques limites (période courte, incertitudes de mesure). Enfin, des mesures structurelles sont proposées : réduction du rapport surface/volume et installation de brise-vent. En conclusion, le changement climatique affecte négativement le barrage, et des stratégies d'adaptation sont nécessaires dans les régions semi-arides.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce mémoire était d'analyser l'impact du changement climatique sur l'évaporation du lac du barrage de Beni Haroun, ouvrage hydraulique majeur de l'Est algérien, et d'évaluer les conséquences de cette évolution sur la disponibilité des ressources en eau dans un contexte méditerranéen semi-aride. Pour ce faire, nous avons mobilisé une approche méthodologique combinant l'utilisation d'indices climatiques (SPEI-12, indice d'aridité AI), des tests statistiques non paramétriques (Pettitt, Mann-Kendall, pente de Sen) ainsi que la méthode innovante d'analyse des tendances (ITA). L'étude s'est appuyée sur des séries climatiques longues (1950-2025) issues de quatre stations réparties autour de la retenue, et sur les données d'évaporation annuelle du lac fournies par l'ANBT (2003-2025).

Les résultats obtenus permettent de dégager plusieurs enseignements majeurs. Tout d'abord, l'analyse de l'indice SPEI-12 révèle une aggravation généralisée et statistiquement significative de la sécheresse sur la période 1981-2025, avec des ruptures franches intervenues entre 2006 et 2012 selon les stations. Cette tendance à l'assèchement est particulièrement marquée pour la station d'Aïn Tine ($p = 0,04$), tandis que Beni Haroun apparaît relativement moins touché. L'indice d'aridité AI, en revanche, ne présente aucune tendance ni rupture significative, ce qui indique que le caractère structuralement semi-aride du climat local n'a pas connu de modification profonde au cours des quatre dernières décennies.

En ce qui concerne l'évaporation du lac, l'étude met en évidence une augmentation forte et statistiquement très significative ($p = 3,84 \times 10^{-5}$) des pertes annuelles entre 2003 et 2025, avec une rupture nette détectée en 2014-2015. La pente de Sen estime une hausse moyenne de $+2,06 \text{ hm}^3$ par an, soit une augmentation totale d'environ 45 hm^3 sur la période considérée. Parmi les variables climatiques analysées, la température apparaît comme le facteur dominant expliquant cette évolution (coefficient de corrélation de Spearman r compris entre 0,7 et 0,85 selon les stations), devant l'évapotranspiration potentielle et l'indice SPEI-12. Le vent et l'humidité relative jouent un rôle secondaire mais non négligeable. Pendant les épisodes de sécheresse sévère ($\text{SPEI} < -1,5$), l'évaporation annuelle du lac augmente de 15 à 25 % par rapport aux années humides, ce qui aggrave la pression sur les réserves hydriques.

Ces résultats confirment que le barrage de Beni Haroun, malgré sa capacité initiale importante (960 hm^3), est vulnérable aux effets conjugués du réchauffement climatique et de l'intensification des sécheresses. La hausse soutenue des pertes par évaporation réduit d'autant la disponibilité effective de l'eau pour l'alimentation en eau potable des wilayas de l'Est (Constantine, Jijel, Batna, Khenchela et Oum El Bouaghi) et pour l'irrigation. Dans un contexte régional où les projections climatiques annoncent une hausse des températures de 2 à 4 °C d'ici 2100 et une baisse des précipitations de 10 à 30 %, cette tendance est appelée à se poursuivre, voire à s'accroître, compromettant à terme la sécurité hydrique de tout le bassin.

Notre étude présente néanmoins certaines limites. La période d'observation de l'évaporation du lac (2003-2025) reste relativement courte au regard des cycles climatiques décennaux, ce qui invite à poursuivre l'acquisition de données pour consolider les tendances détectées. Par ailleurs, les incertitudes liées aux mesures d'évaporation par bac (coefficient de conversion) et l'absence d'une

station météorologique directement implantée sur le plan d'eau introduisent des marges d'erreur qu'il conviendrait de quantifier.

En perspective, plusieurs prolongements à ce travail peuvent être proposés. Il serait utile d'appliquer la même méthodologie à d'autres barrages algériens (Keddara, Taksebt, Hamiz) pour comparer leur vulnérabilité et identifier les facteurs locaux de surexposition. Une modélisation prospective couplant des scénarios climatiques (RCP 4.5 et 8.5) avec un bilan hydrique du barrage permettrait d'estimer l'évolution future des pertes à l'horizon 2050 et 2100. Enfin, une analyse économique du coût des pertes par évaporation (eau non disponible, énergie hydroélectrique non produite, surcoûts de mobilisation de ressources alternatives) pourrait éclairer les décisions d'investissement dans des mesures de réduction.

En définitive, ce mémoire montre que le barrage de Beni Haroun, fleuron du dispositif hydraulique national, n'est pas à l'abri des conséquences du changement climatique. L'augmentation déjà observable des pertes par évaporation, directement liée à la hausse des températures et à l'aggravation des sécheresses, impose une révision des règles de gestion et une anticipation des adaptations nécessaires. Dans les régions semi-arides, où chaque mètre cube d'eau stocké compte, la lutte contre l'évaporation doit désormais devenir une priorité de la politique de l'eau, au même titre que la lutte contre les fuites ou l'envasement.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Ahmad et al., (2001). Troisième Rapport (TAR) du Groupe de travail II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (Genève, Suisse, 13-16 février 2001), 101p
- Aljuhaishy M, Al-Ansari N, Adamo N. (2025). Three-decade assessment of evaporation rates and driving factors at Mosul Dam Reservoir, Iraq. *Water*, 17(3), 412. <https://doi.org/10.3390/w17030412>
- Aminzadeh M, Shams M, Gruber S. (2025). The water storage paradox: Evaporation losses from small agricultural reservoirs in the MENA region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, 102145. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102145>
- ANBT, (2015). Rapport interne sur le barrage de Béni Haroun. Agence Nationale des Barrages et Transfert, 34 p.
- Ayadi I, Ben Fraj T, Hamdi R. (2025). Multi-decadal analysis of surface water dynamics in the Sidi Salem Dam (Tunisia) under climate change (1985–2025). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 39, 101456. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101456>
- Bastine G. (2013). Validation d'une nouvelle approche pour estimer l'évaporation de réservoirs et analyse globale de l'influence de leurs caractéristiques sur leur taux d'évaporation annuel. Université du Québec à Montréal.
- Boualita A, Ben cheikh L, Khelfatni M. (2023). Détection spatio-temporelle de changement brutal des tendances des pluies et des périodes sèches et humides à différentes échelles de temps : cas du bassin de la Medjerda (Nord-Est de l'Algérie). Centre universitaire abdelhafidboussoouf.
- Boukhatem D, Khaldi Z. (2023). Face au changement climatique, le développement de secteur fruitier comme solution.
- Chebbah L, Kabour A. (2023). Détermination de l'expression optimale de l'évapotranspiration potentielle "ETP", pour la région limitrophe du barrage Béni Haroun (Est Algérien). *Agriculture and Forestry Journal*, Vol. 7, Issue 1, pp. 16-26, June, 2023, P-ISSN 2773-3122 / E-ISSN 2602-5795, Published by university of Tlemcen – ALGERIA.
- Chiarelli conte L. (2019). Bootstrap Pettitt test for detecting change points in hydroclimatological data: case study of Itaipu Hydroelectric Plant, Brazil. *artical*
- Ciampittello M, Marchetto A, Boggero A, 2024. Water Resources Management under Climate Change : A Review. <https://doi.org/10.3390/su16093590>.
- Claudie B (2009). Homogénéisation des séries de précipitations : identification des techniques les plus prometteuses et nouveaux développements. Université du Québec en rs-été.
- Daki Y. (2016). Caractérisation De La Sécheresse Climatique Du Bassin Versant D'oum Er Rbia (Maroc) par le biais de l'indice de précipitation standardisé (SPI). doi: 10.19044/esj.2016.v12n14p198
- Elouissi A. (2016). Changement climatique, impacts et vulnérabilité. cas du bassin versant de la MACTA. Université abdoubakrbelkaid-tlemcen-faculté de technologie.
- Emsalem R. (1970). Climatologie générale, tome I, Fondements des équilibres atmosphériques, Editions SNED- Alger.
- Godard A., Tabeaud M. (1993). Les climats- mécanismes et répartition. Editions Armond Colin-Paris.

- Guenouche M, Bourtal H, Boulbair A. (2023). Comparaison de la similitude entre l'indice SPI et SPEI comme outils d'évaluation de la sécheresse dans le Nord-Est de l'Algérie. Centre universitaire abdelhafidboussoouf.
- Hannes N, Milad A, Kaveh M, Nima S, 2024. PubMed. (2024). Quantifying water evaporation from large reservoirs. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119860>.
- Helfer F, Zhang H, Lemckert C. (2009). Evaporation Reduction by Windbreaks: Overview, Modelling and Efficiency. Urban Water Security Research Alliance Technical Report ISSN 1836-5566.
- Hrour Y. (2024). Évaluation de l'impact du changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau dans un bassin méditerranéen agricole : cas du bassin du Bas-Loukkos. <https://theses.hal.science/tel-04505930v1>.
- Imbie T. (2024). Mass balance of the Greenland and Antarctic ice sheets from 1992 to 2023. *Nature*, 628, 567-575. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07245-0>
- Khaled H, Ramachandra R. A. (1997). Un test de tendance de Mann-Kendall modifié pour les données autocorrélées. *Journal of Hydrology* 204 (1998) 182-196.
- Kouira L. (2022). Analyse des paramètres hydro climatiques du bassin versant de Kebir Rhumel (10). Centre universitaire abdelhafidboussoouf.
- La Fuente S, Jennings E, Gal G. (2024). Projected increases in warm-season evaporation from European lakes and reservoirs under future climate scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(4), 1123–1140. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1123-2024>
- Lee, T. (2024). Atmospheric drying and its effect on reservoir evaporation in California. *Journal of the American Water Resources Association*, 60(2), 345–362. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13145>
- Lemzadmi C, Saidi H. (2017). Perte de capacité de stockage en eau dans quelques barrages de l'est Algérien. Université 8 Mai 1945 de Guelma.
- Limane A. (2018). Réponses architecturales racinaires et stratégies d'absorption hydrominérale chez *Pistacia atlantica* en fonction d'un gradient d'aridité croissante : cas d'un transect Nord-Sud en Algérie. Université mouloud mammeri-Tizi ouzou.
- Mamou A. (1990). Caractéristiques et évaluation des ressources en eau du sud Tunisien. Thèse de doctorat d'état es sciences, université de Paris sud, centre d'Orsay, juin.
- Masson-Delmotte V, 2020. Réchauffement climatique : état des connaissances scientifiques, enjeux, risques et options d'action.
- Mokhtar A, Jalali M, He H, Al-Ansari N, Elbeltagi A, Alsafadi K, Abdo H. G, Sammen S. S, Gyasi-Agyei Y, Rodrigo-Comino J. (2021). Estimation of SPEI Meteorological Drought Using Machine Learning Algorithms. *IEEE Access*, 9, 65503–65523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074305>.
- Nicholson, S. E. (2011). Defining aridity: the classification and character of dryland climates. Cambridge University Press.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Palutikof J. (2008). *Le changement climatique et l'eau* (Document technique du GIEC). Secrétariat du GIEC.
- .Qadem Z, Qadem A, Obda K, Lasri M. (2019). Variabilité climatique et son impact sur l'organisation spatio-temporelle des précipitations. Cas des bassins versants des Oueds Mikkès et Fès. Maroc Climate variability and their impact on the spatio-temporal organization of precipitation. Case of the Oueds Mikkès and Fez catchments. Morocco

- Remenieras G. (1986). L'hydrologie de l'ingénieur. Ed. Eyrolles.
- Saggai S, Boutoutaou D, Saker M. L. (2016). Réduction de l'évaporation des eaux dans les barrages : une stratégie pour augmenter le stockage de l'eau dans les régions arides algériennes. *Hydrological Sciences Journal*
- Şen, Z. (2012). *Innovative trend analysis methodology*. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9), 1042–1046. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000556](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000556)
- Şen, Z. (2014). Trend identification simulation and application. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), 635–642. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000794](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000794)
- Şen, Z. (2015). Innovative trend significance test and applications. *Theoretical and Applied Climatology*, 127, 939–947. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1681-x>
- Şen, Z. (2017). *Innovative Trend Methodologies in Science and Engineering*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57559-8>
- Sergio M, Santiago B, López-Moreno J. I. (2010). Un indice de sécheresse multi-échelle sensible au réchauffement climatique : l'indice normalisé de précipitations et d'évapotranspiration. *Doi:10.1175/2009JCLI2909.1*.
- Shah D, Mishra V, Lettenmaier D. P. (2024). An integrated reservoir drought index incorporating storage and evaporation for global reservoirs. *Geophysical Research Letters*, 51(5), e2023GL107890. <https://doi.org/10.1029/2023GL107890>
- Shoukat A, Madeeha K. (2021). Test de Mann-Kendall : Analyse des tendances de la température, des précipitations et du débit du canal d'alimentation de ghotki dans le district de ghotki, province du sindh, Pakistan. *Environment & Ecosystem Science*, 5 (2), 137–142. <https://doi.org/10.26480/ees.02.2021.137.142>
- Solanki S. K., Krivova N. A., Usoskin I. G. (2024). Solar activity and its influence on Earth's climate: A 2500-year perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 21(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s41116-024-00042-7>
- Stagge J. H, Tallaksen L. M, Gudmundsson L, Van Loon A. F, Stahl K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027–4040.
- Trenberth K. E. (2024). The changing water cycle in a warming climate. *Annual Review of Environment and Resources*, 49, 1-28. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-123456>
- Zemouche D, (2024). Essai de détermination de l'effet de la variation des précipitations et des températures sur le rendement de l'huile d'olive. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- Zeroukhi A, Oulaliahine I. (2015). Etude des paramètres physico-chimiques des eaux du barrage de Béni Haroun (Wilaya de Mila) et proposition de gestion des plans d'eau. Ecole nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du littoral
- Zighem F, Ghetas M. (2017). Détermination de l'humidité du sol dans le cas de l'irrigation superficielle (cas de l'I.T.A.S Ouargla). Université Kasdi Merbah Ouargla