



## Climate change and worsening aridity in the Djeffara region, southeastern Tunisia, over the period 1984-2024

## Changement climatique et aggravation de l'aridité dans la région de Djeffara, sud-est tunisien, sur la période 1984-2024

Lajher Imen<sup>1,2</sup> \* & Mahdhi Naceur<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Economie et Sociétés Rurales, Institut des Régions Arides de Médenine, Tunisie

<sup>2</sup> Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Agronomie et de l'Environnement, Institut National Agronomique de Tunisie, Université de Carthage, Tunisie

<sup>3</sup> Institut Supérieur de Gestion de Gabès, (ISGG), Université de Gabès

### Article info

Article history:

Received: 08 January 2025

Accepted: 24 November 2025

**Keywords:** Climate, Aridity, Djeffara, Climatic trends, Adaptation strategies.



Copyright©2026 JOASD

**\*Corresponding author**

[lajharimen@gmail.com](mailto:lajharimen@gmail.com)

**Conflict of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

### Article info

Histoire de l'article:

Reçu: 20 Décembre 2025

Accepté: 18 Février 2026

**Mots-Clès:** Climat, Aridité, Djeffara, Tendances climatiques, Stratégies d'adaptation.

**\*Auteur Correspondant**

[lajharimen@gmail.com](mailto:lajharimen@gmail.com)

### Abstract

This research examines the progression of major climate parameters in the Djeffara region, located in southeastern Tunisia (33.21°N ; 10.29°E), over a forty-year period from 1984 to 2024. Monthly and annual climate data were obtained from the NASA POWER database. The factors analyzed include precipitation, relative humidity, average and extreme temperatures, wind speed, and potential evapotranspiration (ETP). The assessment of climate trends is based on the use of parametric and non-parametric statistical tests, such as the Mann-Kendall test, Pettitt test, and linear regression. Furthermore, the calculation of climatic aridity is performed using the De Martonne index. The results highlight a significant increase in annual average temperatures (+1.5 °C over 40 years), decrease in average precipitation, and an exacerbation of drought, with the De Martonne index changing from 5,14 to 4,75. These changes attest to an intensification of global warming in this semi-arid region and underscore the urgent need to develop comprehensive adaptation strategies to mitigate the environmental and socio-economic impacts.

### Résumé

Cette recherche examine la progression des paramètres climatiques majeurs dans la zone de Djeffara, qui se trouve dans le sud-est de la Tunisie (33,21°N ; 10,29°E), sur une durée de quarante ans s'étendant de 1984 à 2024. Les données climatiques mensuelles et annuelles ont été obtenues à partir de la base de données NASA POWER. Les facteurs analysés comprennent les précipitations, l'humidité relative, les températures moyennes et extrêmes, la vitesse du vent et l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'évaluation des tendances climatiques se fonde sur l'utilisation de tests statistiques paramétriques et non paramétriques, comme les tests de Mann-Kendall, de Pettitt et la régression linéaire. Par ailleurs, le calcul de l'aridité climatique s'effectue au moyen de l'indice de De Martonne. Les résultats soulignent un accroissement significatif des températures moyennes annuelles (+1,5 °C sur 40 ans), une baisse des précipitations moyennes et une exacerbation de la sécheresse, l'indice de De Martonne évoluant de 5,14 à 4,75. Ces évolutions attestent d'une intensification du réchauffement climatique dans cette région semi-aride et soulignent le besoin urgent de développer des stratégies d'adaptation globales pour minimiser les effets environnementaux et socio-économiques.

## 1. INTRODUCTION

La Tunisie, à l'instar des pays du pourtour méditerranéen, subit de plein fouet les effets du changement climatique. Les études menées à

l'échelle nationale, notamment celles de Gueddari et al. (2017), montrent une tendance nette au réchauffement, avec une hausse significative des températures moyennes

annuelles et une accentuation des extrêmes thermiques. Les travaux de ministère de l'Environnement (2022) dans le cadre de la communication nationale à la CCNUCC confirment que le pays se réchauffe plus rapidement que la moyenne planétaire, avec des projections alarmantes pour les décennies à venir. Parallèlement, le régime des précipitations se modifie, caractérisé par une grande variabilité interannuelle, une baisse tendancielle des cumuls annuels, surtout dans les régions du centre et du sud, et une intensification des épisodes pluvieux extrêmes, comme l'ont documenté Ozer et al. (2020). Cette évolution climatique globale exacerbe les tensions hydriques, menace la sécurité alimentaire et accroît la vulnérabilité des écosystèmes déjà fragiles.

Cette réalité climatique nationale se décline avec une acuité particulière dans les zones arides et semi-arides, qui couvrent une large part du territoire. La région de la Djefara, dans le sud-est tunisien, en est une illustration paradigmatique. Territoire agro-économique vital mais particulièrement vulnérable, elle se situe à l'interface des influences méditerranéennes et sahariennes, ce qui la rend très sensible aux moindres fluctuations climatiques. Les recherches fondatrices en climatologie tunisienne, à l'image des travaux de Ben Boubaker (1987), ont historiquement mis en lumière la forte variabilité naturelle du climat dans cette région. Des études plus récentes à l'échelle nationale, telles que celles de Snoussi et al. (2009) et Missaoui et al. (2014), confirment les tendances inquiétantes dans le sud du pays. Cependant, comme le soulignent Baccari et al. (2021), une analyse fine à l'échelle régionale, s'appuyant sur des séries de données longues et actualisées, reste nécessaire pour dépasser les généralités et quantifier avec précision l'ampleur des changements locaux. Ainsi, cette étude se propose d'analyser l'évolution climatique de la Djefara sur les quatre dernières décennies (1984–2024). La problématique centrale qui la guide est la suivante : dans quelle mesure cette analyse révèle-t-elle une aggravation significative de l'aridité, et par quels indicateurs climatiques qu'il s'agisse des tendances thermiques et pluviométriques ou du calcul d'indices synthétiques comme celui de De Martonne cette tendance se manifeste-t-elle le plus clairement ?

Pour répondre à cette problématique, notre étude procédera en trois temps. Nous

analyserons d'abord les tendances à long terme des paramètres fondamentaux que sont les températures et les précipitations. Ensuite, nous évaluerons la dynamique de l'aridité à travers le calcul d'indices synthétiques, tels que l'Indice d'Aridité de De Martonne, qui intègrent le bilan entre les apports hydriques et les pertes par évapotranspiration. Enfin, nous discuterons des implications de ces évolutions climatiques avérées pour les ressources en eau et les systèmes socio-économiques de la région.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. Zone d'étude et données

La région de la Djefara, précisément la zone située aux coordonnées 33°21'N et 10°29'E, dans le sud-est tunisien, est une plaine côtière vitale mais vulnérable, caractérisée par un climat méditerranéen aride aux précipitations rares et variables et à des étés très chauds (Fig. 1). Cette zone agro-économique cruciale repose sur une agriculture mixte, associant une irrigation intensive (maraîchage, arboriculture) exploitant des nappes souterraines surexploitées, et une agriculture pluviale extensive (céréales, élevage). Son extrême sensibilité aux fluctuations climatiques et au stress hydrique croissant en fait un observatoire privilégié pour analyser l'impact du changement climatique sur les environnements arides. Cette étude s'appuie sur des données climatiques homogénéisées (1984-2024).

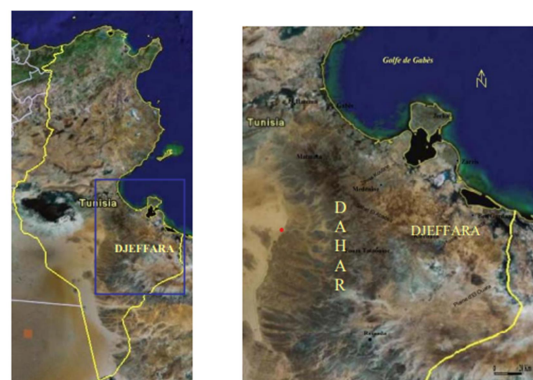


Fig. 1. Carte de localisation de la zone d'étude.

Fig. 1. Location map of the study area.

Dans le cadre de cette étude, les données climatiques mensuelles et annuelles couvrant la période 1984–2024 ont été extraites de la base NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resource). Cette base de données est largement utilisée dans les études climatologiques, notamment dans les régions insuffisamment couvertes par un réseau de stations météorologiques, grâce à sa cohérence interne et

à sa validation par plusieurs travaux scientifiques (Stackhouse et al., 2020). Les variables climatiques analysées incluent les températures (moyennes et extrêmes), les précipitations, l'humidité relative, la vitesse du vent, le rayonnement et l'évapotranspiration potentielle.

## 2.2. Méthodes statistiques d'analyse des tendances

### 2.2.1. Test de Mann-Kendall

Le test non paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) a été utilisé pour détecter les tendances monotones. La statistique S est calculée comme :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \right]$$

Où :

- $n$  = nombre total d'observations dans la série temporelle
- $x_i, x_j$  = valeurs aux temps  $i$  et  $j$  (avec  $j > i$ )
- $\text{sgn}()$  = fonction signe

La pente de la tendance ( $\beta$ ) est estimée par la méthode de Theil-Sen (Theil, 1950 ; Sen, 1968) :

$$\beta = \text{median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right)$$

### 2.2.2. Test de Pettitt pour la détection de ruptures

Le test de Pettitt (1979) a été utilisé pour identifier les années de rupture dans les séries temporelles. La statistique  $U_t$  est calculée comme :

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j)$$

### 2.2.3. Régression linéaire

Des régressions linéaires ont été ajustées pour quantifier les taux de changement annuels :

$$y = \alpha + \beta x + \epsilon$$

Où :

- $y$  : Variable climatique étudiée (ex : température, précipitations, ETP)
- $x$  : Année ou temps (variable explicative)
- $\alpha$  (alpha) : Ordonnée à l'origine (valeur de  $y$  quand  $x=0$ )
- $\beta$  (bêta) : Pente de la droite (taux de changement par an)

- $\epsilon$  (epsilon) : Terme d'erreur ou résidu (différence entre valeur observée et valeur prédite)

## 2.3. Calcul des indices d'aridité

### 2.3.1. Indice de De Martonne (1926)

L'indice d'aridité de De Martonne a été calculé annuellement et par décennie :

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

où P est la précipitation annuelle (mm) et T la température moyenne annuelle (°C).

Classification selon De Martonne :

$IDM < 5$  : hyper aride (désertique)

$5 \leq IDM < 10$  : aride

$10 \leq IDM < 20$  : semi-aride

$20 \leq IDM < 30$  : méditerranéen subhumide

### 2.3.2. Indice d'aridité de l'UNEP (1997)

L'indice d'aridité (AI) de l'UNEP a été calculé :

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

Où P précipitation et ETP évapotranspiration

Classification :

$AI < 0,05$  : hyper-aride

$0,05 \leq AI < 0,20$  : aride

$0,20 \leq AI < 0,50$  : semi-aride

$0,50 \leq AI < 0,65$  : subhumide sec

### 2.3.3. Analyse de la variabilité

Le coefficient de variation (CV) a été calculé pour évaluer la variabilité interannuelle :

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100$$

- CV = Coefficient de variation (%)
- $\sigma$  (sigma) = Écart-type de l'échantillon/population
- $\mu$  (mu) = Moyenne de l'échantillon/population

## 3. RESULTATS

Les résultats de l'analyse climatologique, exposés dans cette section, sont organisés selon une logique allant des paramètres fondamentaux aux indices synthétiques. Ils documentent d'abord les tendances observées pour les variables primaires (températures, précipitations), avant d'en examiner les conséquences intégrées à travers le calcul des indices d'aridité et l'analyse de la variabilité interannuelle.

### 3.1. Tests de tendance des paramètres climatiques

Les tests de tendance de Mann-Kendall, associés à l'estimateur de pente de Theil-Sen, présenter dans le Tableau 1 révèlent des évolutions contrastées des paramètres climatiques étudiés sur la période analysée. La température moyenne annuelle (T<sub>moy</sub>) présente une tendance croissante hautement significative ( $\tau = 0,47$  ;  $p < 0,001$ ), avec une pente estimée à  $+0,038$  °C/an. De même, la température maximale absolue (T<sub>max abs</sub>) montre une tendance positive significative ( $\tau = 0,52$  ;  $p < 0,001$ ), avec une augmentation de  $+0,057$  °C/an. La température minimale absolue (T<sub>min abs</sub>) affiche également une tendance croissante significative ( $\tau = 0,31$  ;  $p = 0,002$ ), bien que l'amplitude de l'augmentation soit plus faible ( $+0,006$  °C/an) (Fig. 2).

Les précipitations annuelles présentent une tendance décroissante non significative ( $\tau = -$

$0,18$  ;  $p = 0,112$ ), avec une diminution moyenne estimée à  $-0,85$  mm/an. L'humidité relative moyenne montre une tendance significative à la baisse ( $\tau = -0,29$  ;  $p = 0,008$ ), avec une diminution de  $-0,089$  %/an. L'évapotranspiration potentielle (ETP) affiche une tendance croissante très significative ( $\tau = 0,63$  ;  $p < 0,001$ ), avec une augmentation de  $+6,44$  mm/an. En revanche, la vitesse moyenne du vent ne présente aucune tendance significative ( $\tau = 0,05$  ;  $p = 0,661$ ), indiquant une relative stabilité de ce paramètre au cours de la période étudiée (Tableau 1).

### 3.2. Détection de ruptures dans les séries temporelles

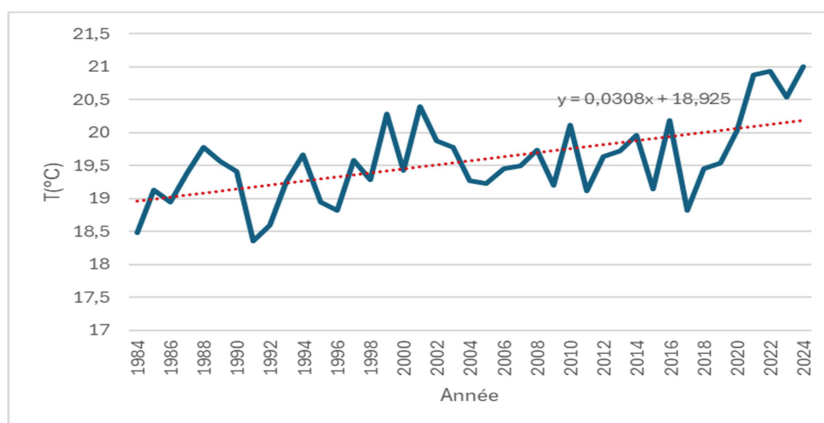
Le test de rupture de Pettitt met en évidence des changements structurels dans certaines séries climatiques au cours de la période étudiée. La

**Tableau 1.** Résultats des tests de tendance (Mann-Kendall et Theil-Sen) pour les variables climatiques annuelles (1984-2024).

**Table 1.** Results of trend tests (Mann-Kendall and Theil-Sen) for annual climatic variables (1984-2024).

Variable	$\tau$ de Mann-Kendall	p-value	Pente ( $\beta$ )	Unité/an	Tendance	Significativité
T <sub>moy</sub> (°C)	0,47	< 0,001	+0,0308	°C/an	↗	***
T <sub>max abs</sub> (°C)	0,52	< 0,001	+0,057	°C/an	↗	***
T <sub>min abs</sub> (°C)	0,31	0,002	+0,006	°C/an	↗	**
P (mm)	-0,18	0,112	-0,85	mm/an	↘	Ns
Hr moy (%)	-0,29	0,008	-0,089	%/an	↘	**
ETP (mm)	0,63	< 0,001	+6,44	mm/an	↗	***
Vitesse du vent (m/s)	0,05	0,661	+0,003	m/s/an	→	Ns

\*\*\* p < 0,001    \*\* p < 0,01    ns : non significatif    ↗ augmentation    ↘ diminution    → stabilité



**Fig. 2.** Évolution des températures moyennes annuelles avec tendance linéaire.

**Fig. 2.** Evolution of mean annual temperatures with a linear trend.

**Tableau 2.** Résultats du test de Pettitt pour la détection de ruptures.

**Table 2.** Results of the Pettitt test for change-point detection.

Variable	Année de rupture	p-value	Moyenne avant	Moyenne après	Changement
T <sub>moy</sub> (°C)	1998	0,014	19,58 °C	20,29 °C	+0,71 °C
ETP (mm)	1997	0,016	2207 mm	2299 mm	+92 mm
P (mm)	2007	0,665	183,4 mm	83,11 mm	-100,29 mm
Hr moy (%)	2007	0,135	54 %	52,1 %	-1,9 %

température moyenne annuelle (Tmoy) présente une rupture statistiquement significative en 1998 ( $p = 0,014$ ). La moyenne annuelle passe de 19,58 °C avant la rupture à 20,29 °C après celle-ci, soit une augmentation de +0,71 °C. De même, l'évapotranspiration potentielle (ETP) montre une rupture significative en 1997 ( $p = 0,016$ ), avec une augmentation de la moyenne annuelle de 2207 mm avant rupture à 2299 mm après rupture, correspondant à un accroissement de +92 mm (Tableau 2).

En revanche, les précipitations annuelles présentent une rupture détectée en 2007, mais celle-ci n'est pas statistiquement significative ( $p = 0,665$ ). La moyenne annuelle diminue néanmoins de 183,4 mm avant rupture à 83,11 mm après rupture, soit une baisse de -100,29 mm. L'humidité relative moyenne affiche également une rupture en 2007, non significative ( $p = 0,135$ ), avec une diminution de la moyenne de 54 % à 52,1 %, correspondant à une baisse de -1,9 % (Tableau 2).

### 3.3. Évolution des indices d'aridité

Dans le Tableau 3 l'analyse de l'évolution des indices d'aridité par décennie met en évidence une aggravation progressive des conditions arides dans la région étudiée. L'indice de De Martonne montre une légère stabilité entre les décennies 1984–1993 et 1994–2003, avec des valeurs respectives de 5,14 et 5,15, correspondant à une classification aride. À partir

de la décennie 2004–2013, une diminution notable de l'indice est observée (4,76), traduisant un basculement vers des conditions très arides (désertiques), tendance qui se maintient durant la période 2014–2024 avec une valeur similaire (4,75).

L'indice d'aridité de l'UNEP (AI) confirme cette évolution. Les deux premières décennies présentent des valeurs proches (0,067 et 0,066), correspondant à une classification aride. À partir de 2004–2013, l'AI diminue à 0,062, indiquant toujours des conditions arides, avant d'atteindre 0,047 durant la décennie 2014–2024, seuil correspondant à une classification très aride (désertique). Parallèlement, le pourcentage de jours secs ( $P < 1$  mm) montre une augmentation continue, passant de 78,2 % durant la période 1984–1993 à 83,4 % sur la période 2014–2024 (Tableau 3).

Le diagramme ombrothermique dans la Fig. 3 met en évidence un régime climatique typiquement aride, caractérisé par une nette dissociation entre les précipitations et les températures au cours de l'année. Les précipitations mensuelles restent globalement faibles et irrégulières, avec des maxima relatifs observés au printemps (mars–avril) et surtout en automne, où le mois d'octobre enregistre le pic pluviométrique annuel. En revanche, les mois estivaux, en particulier juin, juillet et août, se distinguent par des précipitations très faibles,

Tableau 3. Évolution des indices d'aridité par décennie.

Table 3. Evolution of aridity indices by decade.

Décennie	Indice De Martonne	Classification	AI (UNEP)	Classification UNEP	% jours secs ( $P < 1$ mm)
1984–1993	5,14	Aride	0,067	Aride	78,2 %
1994–2003	5,15	Aride	0,066	Aride	80,1 %
2004–2013	4,76	Très Aride (désertique)	0,062	Aride	81,7 %
2014–2024	4,75	Très Aride (désertique)	0,047	Très Aride (désertique)	83,4 %

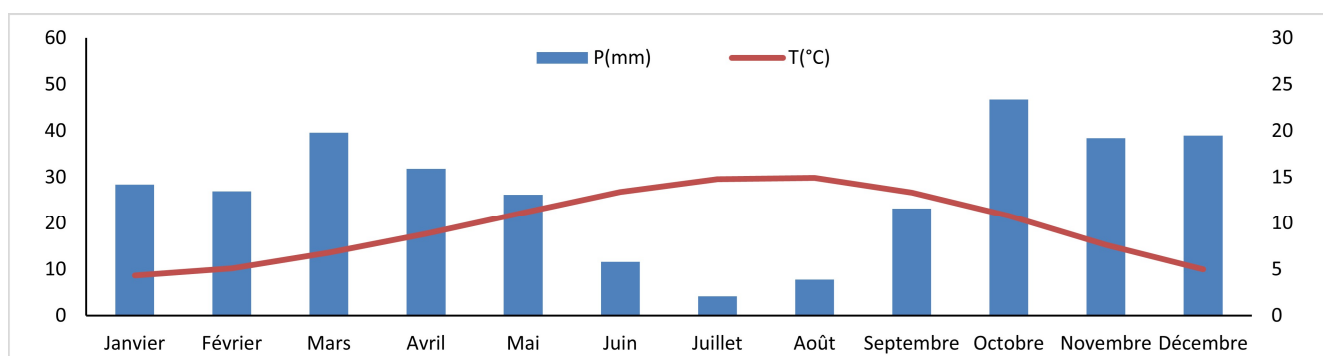


Fig. 3. Diagramme ombrothermique de Médénine (moyenne 1984–2024).

Fig. 3. Ombrothermic diagram of Medenine (average 1984–2024)

voire quasi nulles, traduisant une saison sèche marquée et prolongée.

La température moyenne mensuelle présente une évolution saisonnière classique, avec une augmentation progressive de janvier jusqu'à un maximum estival atteint en juillet-août, suivie d'une diminution vers les mois hivernaux. Les températures élevées observées durant la période estivale coïncident avec les plus faibles valeurs de précipitations, ce qui accentue le déficit hydrique et renforce les conditions de sécheresse climatique. Selon le critère de Gaussen ( $P < 2T$ ), la période sèche s'étend sur une grande partie de l'année, couvrant au minimum les mois de mars à octobre, ce qui confirme la dominance d'un climat aride à très aride (Fig. 3).

Dans l'ensemble, le diagramme ombrothermique confirme l'installation de conditions climatiques sévères, dominées par une longue saison sèche et une pluviométrie faible et irrégulière, en cohérence avec les résultats des indices d'aridité, des analyses de tendances et des tests de rupture. Cette configuration climatique souligne la forte contrainte hydrique pesant sur la région et la nécessité d'une gestion adaptée des

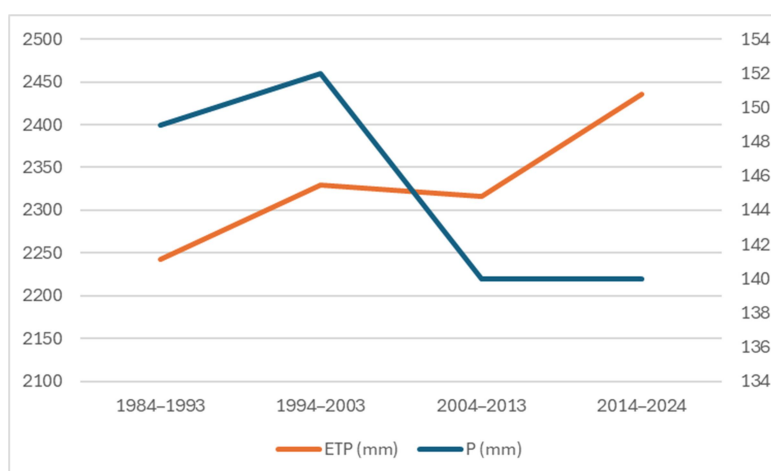
ressources en eau et des systèmes agricoles.

### 3.4. Bilan hydrique et stress climatique

Sur la période 1984–2024, l'analyse du bilan hydrique montre un stress hydrique extrême et persistant dans la zone étudiée. Les précipitations annuelles moyennes (P) restent faibles et relativement stables (entre 140 et 152 mm), tandis que l'évapotranspiration potentielle (ETP) augmente de façon continue, passant de 2243 mm à 2436 mm (Tableau 4). La Fig. 4 montre que cette divergence entre l'offre en eau (P) et la demande atmosphérique (ETP) se traduit par un déficit hydrique croissant, qui s'accroît de -2094 mm à -2296 mm d'une décennie à l'autre. L'indice d'aridité ( $AI = P/ETP$ ) diminue progressivement, de 0,066 (1984–1993) à 0,057 (2014–2024), ce qui situe la région dans une classe de climat extrêmement aride sur l'ensemble des quatre périodes considérées. Cette approche d'indice d'aridité, qui compare l'apport pluviométrique et la demande climatique, est fréquemment utilisée pour caractériser les zones arides et hyper-arides (très aride) comme indicateur du déficit hydrique climatique à long terme (WAD, 2024).

**Tableau 4.** Évolution du bilan hydrique potentiel  
**Table 4.** Evolution of the potential water balance

Période	P (mm)	ETP (mm)	Déficit (mm)	AI (P/ETP)	Stress hydrique
1984–1993	149	2243	-2094	0,066	Extrême
1994–2003	152	2330	-2178	0,065	Extrême
2004–2013	140	2316	-2176	0,060	Extrême
2014–2024	140	2436	-2296	0,057	Extrême



**Fig. 4.** Évolution comparée des précipitations et de l'ETP décennales  
**Fig. 4.** Comparative evolution of decadal precipitation and evapotranspiration (ETP)

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Significativité des tendances détectées

Les résultats mettent en évidence une évolution climatique marquée par un réchauffement significatif et une aridification accrue, conformément aux tendances régionales. L'augmentation significative de la température moyenne annuelle confirme les tendances à l'échelle nationale (Ben Abdallah et al., 2012 ; Driouech et al., 2021). L'augmentation plus prononcée des températures maximales traduit une intensification des extrêmes chauds, caractéristique du bassin méditerranéen (Kuglitsch et al., 2010 ; IPCC, 2021).

La tendance décroissante non significative des précipitations annuelles s'inscrit dans un contexte de forte variabilité interannuelle typique (Tramblay et al., 2013), mais une modification de la distribution temporelle peut avoir des impacts hydrologiques importants (Kingumbi et al., 2005 ; Feki et al., 2017). La diminution significative de l'humidité relative, combinée au réchauffement, renforce la sécheresse atmosphérique (Vicente-Serrano et al., 2014).

L'augmentation très significative de l'évapotranspiration potentielle (ETP) constitue un résultat majeur, reflétant l'effet combiné du réchauffement et de la baisse de l'humidité, et représentant un moteur essentiel de l'aggravation du déficit hydrique (Allen et al., 1998 ; Scheff et Frierson, 2015).

Les ruptures significatives détectées pour la température moyenne annuelle (+0,71 °C après 1998) et l'ETP (+92 mm après 1997) traduisent un changement climatique marqué, cohérent avec une accélération du réchauffement à la fin des années 1990 dans la région (Giorgi, 2006 ; IPCC, 2021). Une rupture non significative pour les précipitations après 2007 (baisse de -100,29 mm) suggère néanmoins une dégradation des conditions hydriques.

Dans l'ensemble, cette dynamique confirme une évolution vers des conditions plus chaudes et plus sèches, renforçant la vulnérabilité des régions arides tunisiennes, une zone identifiée comme particulièrement sensible aux changements climatiques (Giorgi, 2006 ; IPCC, 2021).

### 4.2. Aggravation de l'aridité

Les indices d'aridité confirment et quantifient une aggravation progressive et significative des

conditions climatiques vers une aridité extrême. L'indice de De Martonne montre une détérioration constante, passant de 5,14 (aride) à 4,75 (très aride/désertique) entre la première et la dernière décennie, traduisant une augmentation plus rapide des températures par rapport à la baisse des précipitations. Cette tendance est corroborée par l'indice d'aridité de l'UNEP, qui chute de 0,067 à 0,047, franchissant le seuil hyper-aride de 0,05 (UNEP, 1997). L'analyse mensuelle confirme que tous les mois sont classés comme "désertiques", rendant l'agriculture pluviale quasiment impossible sans irrigation.

La dynamique décennale révèle un régime aride stable jusqu'au début des années 2000, suivi d'une dégradation marquée à partir de la décennie 2004–2013, cohérente avec les ruptures thermiques détectées à la fin des années 1990 (Ben Abdallah et al., 2012). Cette tendance est renforcée par l'augmentation continue du pourcentage de jours secs, passant de moins de 80% (1984–1993) à plus de 83% récemment, un signal robuste du changement climatique en Méditerranée (Giorgi, 2006 ; IPCC, 2021).

Dans l'ensemble, l'évolution concordante des indices valide une transition vers des conditions désertiques, confirmant l'intensification récente du processus d'aridification dans le bassin méditerranéen (Tramblay et al., 2013 ; Vicente-Serrano et al., 2014), et souligne la nécessité de stratégies d'adaptation urgentes.

### 4.3. Implications pour les ressources en eau

Les indices hydriques confirment un stress hydrique extrême et croissant. Le déficit hydrique annuel moyen s'est aggravé, passant de -2094 mm dans les années 1980 à -2296 mm dans la dernière décennie. Ce déficit accru exacerbe la pression sur les nappes phréatiques déjà surexploitées (Mamou, 2019), créant une situation critique.

Un facteur clé de ce stress est le décalage chronique entre les maxima thermiques et les pluies efficaces. Même avec un léger regain automnal, les précipitations restent insuffisantes face à la forte demande évaporative générée par les températures élevées, un régime ombrothermique caractéristique des zones arides du Sud tunisien (Giorgi, 2006 ; Tramblay et al., 2013).

Cette dynamique (ETP en hausse, déficit hydrique élevé, indice d'aridité en baisse) s'inscrit dans un contexte global d'aridification liée au changement climatique. La principale cause est l'augmentation de la demande atmosphérique en eau, un facteur majeur d'intensification des sécheresses même lorsque les précipitations sont stables (Vicente-Serrano et al., 2017). La baisse de l'indice d'aridité (P/PET) constitue un indicateur fiable du durcissement des conditions hydroclimatiques dans les zones arides mondiales, comme le démontrent des études récentes (Shi et al., 2023 ; Li et al., 2023).

Ces observations soulignent l'urgence de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation ciblant la réduction de la vulnérabilité à la sécheresse, l'optimisation des ressources en eau et le développement de pratiques agricoles résilientes.

#### 4.4. Impacts sur l'agriculture et les écosystèmes

L'élévation des températures, associée à une diminution des précipitations moyennes, joue un rôle clé dans l'accentuation du stress hydrique dans le sud-est tunisien, et tout particulièrement dans la région de Médenine. Cette zone aride est très exposée aux impacts du changement climatique en raison de sa forte dépendance à des ressources naturelles limitées. Des études régionales indiquent que la raréfaction de l'eau, conjuguée à la dégradation des sols et à la salinisation, fragilise profondément les systèmes agricoles ainsi que les équilibres socio-économiques locaux (Abdeladhim et al., 2017 ; AFD, 2018).

Dans ce contexte, les cultures subissent un stress thermique accru qui altère directement leur développement physiologique. La hausse des températures accélère les cycles de croissance des plantes, ce qui réduit la période de remplissage des grains et entraîne une baisse des rendements, en particulier pour les cultures pluviales dominantes dans la région. Les travaux menés dans le bassin versant de l'Oued Oum Zessar (Médenine) montrent que les systèmes agricoles, déjà fragilisés par la variabilité climatique, voient leur vulnérabilité accrue par la diminution des ressources en eau (Ben et al., 2014).

Par ailleurs, les besoins en irrigation augmentent considérablement sous l'effet conjugué de la hausse des températures et de la baisse des précipitations. L'intensification de

l'évapotranspiration pousse les agriculteurs à mobiliser davantage d'eau pour maintenir leurs cultures, ce qui accroît la pression sur des ressources hydriques déjà limitées. À l'échelle nationale, le projet GEMMES Tunisie souligne que la disponibilité en eau diminue tandis que la demande agricole croît, aggravant les déséquilibres hydriques et menaçant la sécurité alimentaire (AFD, 2018).

Les changements climatiques perturbent également la phénologie végétale à Médenine. L'augmentation des températures provoque une avancée des stades phénologiques, notamment la floraison et la maturation, ce qui bouleverse les cycles agricoles traditionnels. Ces modifications peuvent entraîner un décalage entre les besoins des cultures et la disponibilité en eau ou en nutriments, réduisant ainsi l'efficacité des systèmes de production. Des observations locales confirment que les agriculteurs perçoivent déjà des changements dans le calendrier des saisons agricoles et des périodes de croissance (Daghari et al., 2023).

Enfin, les écosystèmes naturels et pastoraux de Médenine, bien qu'adaptés à des conditions arides, atteignent aujourd'hui leurs limites de résilience face à l'intensification du stress climatique. Les parcours naturels, essentiels à l'élevage, se dégradent progressivement sous l'effet de la sécheresse, des pressions anthropiques et du changement climatique. Selon les recherches menées par l'Institut des Régions Arides et ses partenaires, cette dégradation se manifeste par une perte de biodiversité, une réduction de la couverture végétale et une accélération des processus de désertification (Fetoui et al., 2015 ; ICARDA, 2018).

#### 4.5. Comparaison avec les projections climatiques

L'évolution climatique observée dans cette étude est cohérente avec les projections à moyen et long terme pour la région méditerranéenne, considérée comme un "hotspot" du changement climatique (Giorgi, 2006 ; IPCC, 2021). Les tendances documentées, réchauffement significatif (+0,71°C post-1998), augmentation très marquée de l'ETP (+92 mm post-1997), dégradation des indices d'aridité (De Martonne passant de 5,14 à 4,75 ; AI sous le seuil hyper-aride de 0,05) et aggravation du déficit hydrique (de -2094 mm à -2296 mm), s'alignent sur les scénarios prospectifs.

Les modèles climatiques régionaux, tels que ceux utilisés dans le cadre du Med-CORDEX, projettent en effet pour l'Afrique du Nord une augmentation continue des températures, une baisse des précipitations (bien que moins certaine et plus variable spatialement), et une augmentation forte de l'évapotranspiration potentielle, conduisant à une intensification de l'aridité et du stress hydrique (Driouech et al., 2021 ; Trambly et al., 2020). La rupture détectée à la fin des années 1990 et la transition vers un régime climatique plus aride signalent que ces projections sont déjà en cours de matérialisation dans la région étudiée. Cette concordance entre les observations actuelles et les tendances projetées renforce la crédibilité des scénarios climatiques futurs et souligne l'urgence d'actions d'adaptation face à une aridification appelée à se poursuivre (IPCC, 2022).

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette recherche a fourni une caractérisation minutieuse de l'évolution climatique de la région de Djefara (sud-est tunisien) pour la période 1984-2024, en se basant sur des ensembles de données étendus et des instruments statistiques solides. Les conclusions soulignent un réchauffement notable, caractérisé par une hausse de la température moyenne annuelle (+0,71 °C après 1998) et des extrêmes thermiques. De plus, l'indice d'aridité s'aggrave continuellement, comme le confirment les indicateurs De Martonne (qui passent de 5,14 à 4,75) et de l'UNEP (AI passant de 0,067 à 0,047).

L'augmentation marquée de l'évapotranspiration potentielle (+92 mm post-1997), couplée à une stagnation ou un déclin progressif des précipitations et une réduction de l'humidité relative, indique une pression hydrique sévère et durable, avec un déficit hydrique annuel qui s'accroît de -2094 mm à -2296 mm. Les discontinuités observées à la fin des années 1990 signalent un passage à un climat plus chaud et plus sec, en accord avec les projections des modèles climatiques régionaux pour la région méditerranéenne.

Ces changements ont des répercussions directes sur l'agriculture et les écosystèmes de la région. Les petits exploitants agricoles, qui dépendent grandement de l'eau et du climat, sont confrontés à une vulnérabilité croissante : réduction de la productivité, stress thermique sur les plantations, exigences renforcées en matière d'irrigation et surcharge des réserves

d'eau souterraine. Les changements climatiques observés, qui sont perçus par les exploitants, influencent également leurs choix stratégiques et décisions d'adaptation.

À partir de cela, plusieurs pistes de recherche et d'intervention émergent :

1. Incorporation des perceptions locales : L'observation des divergences ou convergences entre les données scientifiques et l'expérience locale en comparant les changements climatiques observés avec les perceptions des agriculteurs pourrait améliorer la pertinence des mesures d'adaptation.

2. Examen de la vulnérabilité des petits exploitants agricoles : Les indices climatiques tels que l'aridité, le déficit hydrique et la fréquence des journées sèches peuvent être utilisés comme variables explicatives pour mesurer leur influence sur la production agricole, les revenus et la sécurité alimentaire, en combinant des données climatiques avec des enquêtes socio-économiques.

3. Amélioration de la capacité à s'adapter : Les conclusions mettent en évidence le besoin pressant de stratégies spécifiques, comme la gestion durable des ressources hydriques, l'implémentation de méthodes agricoles résilientes et la propagation d'informations climatiques sur mesure pour les producteurs.

4. Stratégies anticipatives et futurs possibles : L'intégration des prévisions climatiques régionales (Med-CORDEX, IPCC) aiderait à prévoir la progression future de la vulnérabilité et à élaborer des stratégies d'adaptation à long terme pour la Djefara, zone climatique sensible en Méditerranée.

Pour faire court, cette recherche offre une évaluation précise de l'intensification du climat et de la sécheresse dans la zone de Djefara, en mettant l'accent sur la corrélation directe entre le changement climatique constaté, la perception à l'échelle locale et la vulnérabilité des petits exploitants agricoles. Elle souligne l'importance d'une stratégie globale, alliant suivi climatique, vision des agriculteurs et mesures adaptatives, pour améliorer la résilience des systèmes agricoles dans un contexte de climat de plus en plus sec.

## REFERENCES

Abdeladhim, M. A., Sghaier, M., Fleskens, L., Shutes, L., & Akari, A. (2017). *Assessing the impacts of climate change on sustainable*

- development at the regional level: Case of Medenine.
- AFD (2018). *Projet GEMMES Tunisie : stress hydrique et agriculture*.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Baccari, N., Boussema, M. R., & Smane, M. H. (2021). Variabilité et tendance des précipitations dans le sud-est tunisien : Cas du bassin versant de la Djeffara. *Revue des Sciences de l'Eau*, 34(2), 145-160.
- Ben Abdallah, S., Elleuch, F., & Chaabane, M. (2012). Variabilité et tendances climatiques en Tunisie. *Theoretical and Applied Climatology*, 110, 475-488.
- Ben Boubaker, M. H. (1987). *Le climat de la Tunisie : les régimes pluviométriques*. Publications de l'Université de Tunis.
- Ben et al. (2014). *Adaptation au changement climatique dans le bassin Oum Zessar (Médenine)*.
- Bouguerra, H., Jarraya-Horriche, F., & Abida, H. (2019). Analysis of wind speed variability in Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-13.
- Daghari, I. et al. (2023). *Climate change and agriculture in Tunisia*
- De Martonne, E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique : L'indice d'aridité. *La Météorologie*, 449-458.
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., & Caesar, J. (2014). Updated analyses of temperature extremes over the land surface. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 1-18.
- Driouech, F., et al. (2020). Future climate change in the Mediterranean region: implications for water resources and agriculture. *Regional Environmental Change*, 20(4), 1-15.
- Driouech, F., Déqué, M., & Sánchez-Gómez, E. (2021). Weather regimes, blocking and heat waves in the Mediterranean region. *Climate Dynamics*, 56, 1143-1162.
- Easterling, D. R., Horton, B., Jones, P. D., et al. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277, 364-367.
- Fetoui, M. et al. (2015). *Vulnerability of natural resources in Tunisian arid zones*
- Feki, H., Slimani, M., & Cudennec, C. (2017). Seasonal rainfall variability and drought in Tunisia. *Journal of Arid Environments*, 139, 1-10.
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8), L08707.
- Gueddari, M., Baccari, N., & Ouerchefani, D. (2017). Changements climatiques en Tunisie : tendances observées et projections futures. *Revue Tunisienne de Géographie*, 48, 25-42.
- Huang, J., et al. (2017). Dryland climate change : Recent progress and challenges. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 719-778.
- ICARDA (2018). *Rangelands management in Medenine*.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Griffin.
- Kingumbi, A., Bergaoui, K., & Hubert, P. (2005). Impact of climate variability on rainfall and runoff in Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 775-788.
- Kuglitsch, F. G., Toreti, A., Xoplaki, E., et al. (2010). Heat wave changes in the eastern Mediterranean. *Geophysical Research Letters*, 37, L04802.
- Li, X., Zhang, Y., & Chen, W. (2023). Global trends in land aridity and hydroclimatic change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 4551-4572.
- Lionello, P., & Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18(5), 1481-1493.
- Mamou, A. (2019). Caractéristiques et gestion des aquifères du Sud tunisien. *Journal of Water and Land Development*, 41, 105-116.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.
- Ministère de l'Environnement (Tunisie). (2022). *Troisième Communication Nationale de la Tunisie à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC)*. République Tunisienne.
- Missaoui, R., Bouzaienne, O., & Dhieb, M. (2014). Évolution des paramètres climatiques en Tunisie et impacts sur les ressources en eau. *Revue Sécheresse*, 25(3), 153-162.
- Mtibaa, S., et al. (2020). Analysis of climate variability and trends in Tunisia. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 1463-1475.
- NASA POWER  
<https://www.power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (last access 18.12.2025)
- Ozer, P., Hountondji, Y.-C., & Niang, A. J. (2020). Évolution récente des extrêmes

- pluviométriques en Afrique du Nord (1930-2019). *Physio-Géo*, 15, 1-30.
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135.
- Scheff, J., & Frierson, D. M. W. (2015). Terrestrial aridity and its response to global warming. *Journal of Climate*, 28, 5583–5600.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
- Shi, Z., Wang, H., & Zhou, T. (2023). Increasing aridity in drylands: Observations and projections. *Science of the Total Environment*, 856, 159–172.
- Snoussi, M., Ouchani, T., & Niazi, S. (2009). Vulnérabilité du littoral tunisien face à l'élévation du niveau de la mer. *Méditerranée*, (112), 39-47.
- Snoussi, M., Ouchani, T., & Niazi, S. (2009). Vulnerability assessment of the Moroccan coastal zone to the impacts of sea-level rise. *Climate Research*, 37(1), 23-33.
- Stackhouse, P. W., et al. (2020). NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Daily Data. NASA Langley Research Center.
- Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Sciences*, 53, 386-392.
- Tramblay, Y., El Adlouni, S., & Servat, E. (2013). Trends and variability in extreme precipitation indices over North Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 58, 1–15.
- UNEP. (1997). *World Atlas of Desertification*. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2014). A multiscalar drought index sensitive to global warming. *Nature Climate Change*, 4, 17–22.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2017). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 30(19), 7481–7501.