

Analyse des Extrêmes thermiques à la Station Météorologique de Constantine Ain El Bey

Ahmed GASSI^{1*}, Khaled Abed Alfettah GASSI^{1a}

Résumé

Une analyse de la variabilité des extrêmes thermiques a été conduite dans la région de Constantine sur une période de 44 ans (1981-2024). Onze indices climatiques pertinents ont été calculés à partir des données d'observation de la station météorologique d'Ain El Bey, permettant de caractériser les différents aspects des températures extrêmes et de mettre en évidence les tendances complexes associées dans cette région. Les résultats révèlent des signes manifestes de réchauffement climatique à Constantine sur la période étudiée (1981-2024). Les indices liés aux conditions chaudes, tels que les jours d'été (SU), les vagues de chaleur (WSDI), les jours chauds (TX90p) et l'amplitude thermique quotidienne (DTR), affichent une augmentation statistiquement significative. À l'inverse, Les indices associés aux conditions froides, notamment les jours froids (TX10p, -2,337 %décennie) et les vagues de froid (CSDI, -1,28 jours/décennie), présentent une baisse significative ($p < 0,05$). Les indices tels que les nuits chaudes (TN90p), les nuits froides (TN10p) et les jours de gel (FD) ne montrent pas de tendances significatives. Par ailleurs, la température moyenne annuelle (TM) enregistre une hausse significative de 0,328 °C par décennie ($p < 0,05$), avec une distribution normale (Shapiro-Wilk : $p = 0,584$) et une homogénéité des variances entre les décennies (Levene : $p = 0,177$).

Mots-clés : Changement climatique, indices climatiques, extrêmes thermiques, Constantine .

¹ Office National de la Météorologie (DMRE-ONM), Cité des Frères Ferrad Ain el Bey, Constantine
* Correspondant: A.GASSI, a.gassi@meteo.dz

Table des matières

1 Introduction :	1	3.9 Variation et Tendance de l'Indice vagues de chaleur (WSDI)	8
1.1 Présentation de la zone d'étude	2	3.10 Variation et Tendance de l'Indice vagues de froid (CSDI)	9
2 Matériel et méthode	3	3.11 Variation et Tendance de l'Indice jours de gel (FD)	9
2.1 Matériel	3	3.12 Variation et Tendance de l'Indice (DTR)	10
Bases de données • Logiciels utilisés		3.13 Variation et Tendance Évolution des extrêmes annuelles	10
2.2 Traitement des Données	3	4 Discussion	11
Contrôle par CLICOM (CLimate COmputing PROject) • Contrôle de Qualité • Choix et Calcul des Indices • Analyse des Tendances		5 Conclusion	12
3 Résultats	5	Références	12
3.1 Variation et Tendance de l'Indice TXx	5		
3.2 Variation et Tendance de l'Indice TNn	5		
3.3 Variation et Tendance de l'Indice température moyenne annuelle (TM)	5		
3.4 Variation et Tendance de l'Indice jours chauds (TX90p)	5		
3.5 Variation et Tendance de l'Indice nuits chaudes (TN90p)	6		
3.6 Variation et Tendance de l'Indice jours froids (TX10p)	6		
3.7 Variation et Tendance de l'Indice nuits froides (TN10p)	7		
3.8 Variation et Tendance de l'Indice jours d'été (SU)	7		

1. Introduction :

Le bassin méditerranéen, reconnu comme un point chaud du changement climatique, subit des impacts particulièrement marqués, exacerbés par sa vulnérabilité écologique et socio-économique. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la région a enregistré une hausse des températures dépassant +0,8°C par rapport à la période de référence 1961-1990, soit un rythme 20% supérieur à la moyenne mondiale (GIEC, 2023 ; MedECC, 2020). Cette tendance s'accompagne d'une amplification des événements climatiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur,

les sécheresses prolongées et les précipitations intenses, qui affectent profondément les écosystèmes, les ressources en eau et les systèmes socio-économiques (Cramer et al., 2018). Ces phénomènes menacent la biodiversité méditerranéenne, déjà sous pression, et aggravent les défis liés à l'agriculture, à la sécurité alimentaire et à la gestion des ressources hydriques (Lionello et al., 2018; Tuel et al., 2021).

En Algérie, le changement climatique se manifeste par une augmentation significative des épisodes de chaleur, avec une hétérogénéité spatiale marquée entre les zones côtières, semi-arides et continentales (Sahabi-Abed Kerrouche, 2017). Les régions du nord, bien que mieux étudiées, révèlent des tendances thermiques préoccupantes, avec des vagues de chaleur plus fréquentes et intenses (Bensaad et al., 2022; Kherbouche et al., 2021; Meddi et al., 2020). Cependant, les analyses spécifiques aux extrêmes thermiques dans la région de Constantine, caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride à forte influence continentale, demeurent limitées. Cette région, située à la croisée des dynamiques climatiques méditerranéennes et sahariennes, est particulièrement vulnérable en raison de ses contraintes hydriques et de sa dépendance aux activités agricoles (Djellouli et al., 2019).

La station météorologique de Constantine Ain El Bey, localisée dans ce contexte climatique singulier, se distingue par des particularités thermiques remarquables, notamment une amplitude thermique parmi les plus élevées du nord algérien (Boucefiane et al., 2019; ONM, 2021). Ces caractéristiques, combinées à une topographie complexe et à une urbanisation croissante, font de Constantine un site d'étude privilégié pour analyser l'évolution des extrêmes thermiques et leurs impacts locaux. Par exemple, les vagues de chaleur prolongées observées récemment ont exacerbé les stress hydriques et affecté les rendements agricoles, soulignant l'urgence de comprendre ces dynamiques pour élaborer des stratégies d'adaptation (Zeroual et al., 2020).

Dans ce contexte, cette étude adopte une approche méthodologique rigoureuse, basée sur les protocoles standardisés de l'Expert Team on Climate Change Detection and Clearpage Indices (ETCCDI, 2023), reconnus pour leur fiabilité dans l'analyse des extrêmes climatiques (Zhang et al., 2005). Ces indices, tels que les jours de chaleur extrême (TX90p) et les nuits chaudes (TN90p), sont complétés par des analyses statistiques robustes, notamment le test de Mann-Kendall pour détecter les tendances et la régression linéaire pour quantifier l'évolution des températures, implémentées sous le logiciel R (Alexander et al., 2006). Cette méthodologie permet de capturer les variations climatiques locales avec une précision accrue, tout en s'inscrivant dans un cadre scientifique international.

En outre, cette recherche vise à combler le manque de données spécifiques à Constantine, une région sous-étudiée malgré son importance stratégique. Les résultats attendus devraient non seulement enrichir la littérature sur la variabilité régionale-clearpage des extrêmes thermiques, mais aussi fournir des informations cruciales pour les décideurs locaux dans la plani-

fication de mesures d'adaptation, comme l'optimisation de la gestion de l'eau ou la résilience des infrastructures urbaines (Giorgi Lionello, 2008; Xoplaki et al., 2012). En intégrant des perspectives écologiques, sociales et économiques, ce travail souligne l'importance d'une approche interdisciplinaire pour faire face aux défis climatiques dans les zones méditerranéennes.

1.1 Présentation de la zone d'étude

La wilaya de Constantine (Figure 1), située dans le nord-est de l'Algérie (36°16'36" N, 6°37'12" E), s'étend sur une superficie de 2 187 km², constituant un carrefour géographique et écologique au sein de la région méditerranéenne (IGN Algérie, 2020). Son relief accidenté, caractérisé par des clearpage formations montagneuses, des gorges profondes et des plateaux calcaires, confère à la région une topographie complexe qui influence ses dynamiques climatiques et hydrologiques (Boudjema Fekrache, 2018). Géographiquement, Constantine est en contiguïté directe avec les wilayas de Skikda au nord, Guelma à l'est, Oum El Bouaghi au sud-est et sud, et Mila à l'ouest. Des proximités géographiques, sans continuité territoriale, sont également observées avec Sétif au sud-ouest, Batna au sud-est et Jijel au nord-ouest, renforçant son rôle de nœud régional (Djellouli et al., 2019).

Le cadre géomorphologique de la wilaya, marqué par le massif de l'Atlas tellien et les influences du bassin sédimentaire constantinois, façonne un paysage où les plateaux s'entre-coupent de vallées abruptes, notamment les célèbres gorges du Rhummel (Benabbas Laouar, 2021). Cette configuration topographique, combinée à une urbanisation croissante, amplifie les défis environnementaux, tels que l'érosion des sols et la gestion des ressources en eau, dans un contexte de changement climatique (Zeroual et al., 2020). La région est également reconnue pour sa biodiversité, abritant des écosystèmes méditerranéens vulnérables, comme les forêts de chênes et les zones humides, qui subissent des pressions accrues dues aux extrêmes climatiques (MedECC, 2020).

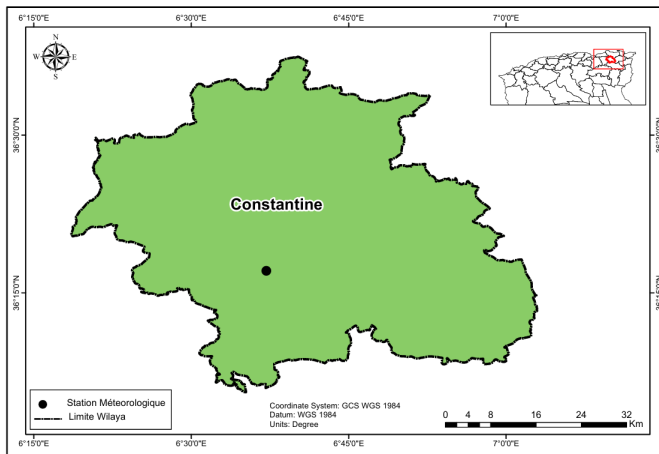


FIGURE 1. Zone d'étude

2. Matériel et méthode

2.1 Matériel

2.1.1 Bases de données

L'étude s'appuie sur un ensemble robuste de données climatiques journalières couvrant une période de 44 ans, du 1er janvier 1981 au 31 décembre 2024, soit 16 071 jours, extraites de la Banque régionale des données climatologiques de la Direction météorologique régionale Est Constantine (ONM). Ces données, collectées à la station météorologique de Constantine Ain El Bey, comprennent trois variables clés : la température maximale quotidienne (TX), la température minimale quotidienne (TN) et la température moyenne quotidienne (TM). La qualité et la continuité de cette série temporelle, soumise à des contrôles rigoureux d'homogénéité et de cohérence selon les protocoles de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), garantissent une fiabilité optimale pour l'analyse des extrêmes thermiques.

2.1.2 Logiciels utilisés

Les analyses climatiques de cette étude sont conduites avec le logiciel R (version 4.3.2), un environnement open-source de référence pour le traitement statistique des données, offrant une robustesse inégalée dans l'analyse des séries temporelles climatiques (R Core Team, 2023). Le package climdex.pcic (version 1.1-11), spécifiquement conçu pour les normes de l'Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI), permet de calculer avec précision les indices d'extrêmes thermiques. Ces outils garantissent une analyse standardisée et fiable, essentielle pour décrypter les dynamiques thermiques régionales.

2.2 Traitement des Données

2.2.1 Contrôle par CLICOM (CLimate COMputing PROject)

Les données de température ont été soumises à une vérification rigoureuse via le système CLICOM, développé par l'Organisation Météorologique Mondiale, afin d'en garantir la fiabilité. Ce processus de contrôle qualité, appliqué aux enregistrements quotidiens et horaires, comprend :

- **Contrôles syntaxiques** : validation du format des données (e.g., température exprimée avec un chiffre décimal maximum).
- **Plages numériques** : vérification que les valeurs sont comprises dans des intervalles plausibles (e.g., -90°C à $+70^{\circ}\text{C}$ pour la température).
- **Cohérence inter-variables** : contrôle de la compatibilité entre variables (e.g., température de l'air supérieure ou égale au point de rosée).
- **Cohérence temporelle** : analyse de la plausibilité des variations dans les séries chronologiques (e.g., écarts limités entre mesures consécutives).
- **Cohérence spatiale** : vérification de la cohérence des données entre stations voisines (e.g., différences de température dans des limites acceptables).

Ce protocole assure l'intégrité des données avant toute analyse.

2.2.2 Contrôle de Qualité

Le contrôle de qualité des données de température est une étape essentielle pour identifier et corriger les erreurs dans les enregistrements quotidiens. Ce processus a été effectué à l'aide du logiciel RCLimDex, un outil conçu pour le traitement des séries climatiques (Peter, 2004 ; Planche, 2005). Les principes appliqués pour assurer la fiabilité des données sont les suivants :

- **Vérification des températures maximales et minimales** : Si la température maximale quotidienne (TX) est inférieure à la température minimale quotidienne (TN), les deux valeurs sont considérées comme erronées et remplacées par -99.9 .
- **Limite du nombre d'observations** : Une année ne peut contenir plus de 365 ou 366 observations journalières (en cas d'année bissextile).
- **Contrôle des observations mensuelles** : Le mois de février ne doit pas dépasser 28 jours, sauf pour les années bissextiles où 29 jours sont autorisés.
- **Gestion des données manquantes ou incohérentes** : Les valeurs manquantes ou incohérentes (par exemple, températures négatives aberrantes) sont remplacées par -99.9 avant le contrôle de qualité dans RCLimDex.

Ces vérifications garantissent que seules des données fiables sont utilisées pour le calcul des indices climatiques, minimisant ainsi les biais dans l'analyse des extrêmes thermiques.

2.2.3 Choix et Calcul des Indices

Pour analyser les températures extrêmes, nous nous sommes appuyés sur des indicateurs climatiques développés par des experts (ETCCDI). Parmi les 27 indices disponibles, 11 sont spécialement conçus pour les extrêmes de chaud et de froid. Nous les avons sélectionnés parce qu'ils conviennent parfaitement au climat semi-aride de Constantine et qu'ils reflètent bien les variations des températures extrêmes. Le tableau 1 résume ces indices, leurs définitions et leur mode de calcul.

Tableau : Indices climatiques basés sur les températures selon les normes ETCCDI

Identifiant	Nom de l'indice	Définition	Formule	Unité
TXx	Température maximale annuelle	Température maximale la plus élevée de l'année.	$\max(T_{\max})$ sur l'année.	°C
TNn	Température minimale annuelle	Température minimale la plus basse de l'année.	$\min(T_{\min})$ sur l'année.	°C
TX90p	Jours chauds	Pourcentage de jours où la température maximale dépasse le 90 ^e percentile de la période de référence (1981–2000).	$(\text{Nombre de jours où } T_{\max} > T_{\max 90}) / \text{Nombre total de jours} \times 100$	%
TN90p	Nuits chaudes	Pourcentage de jours où la température minimale dépasse le 90 ^e percentile de la période de référence (1981–2000).	$(\text{Nombre de jours où } T_{\min} > T_{\min 90}) / \text{Nombre total de jours} \times 100$	%
TX10p	Jours froids	Pourcentage de jours où la température maximale est inférieure au 10 ^e percentile de la période de référence (1981–2000).	$(\text{Nombre de jours où } T_{\max} < T_{\max 10}) / \text{Nombre total de jours} \times 100$	%
TN10p	Nuits froides	Pourcentage de jours où la température minimale est inférieure au 10 ^e percentile de la période de référence (1981–2000).	$(\text{Nombre de jours où } T_{\min} < T_{\min 10}) / \text{Nombre total de jours} \times 100$	%
SU	Jours d'été	Nombre de jours où la température maximale dépasse 25°C.	Nombre de jours où $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$	Jours
WSDI	Vagues de chaleur	Nombre total de jours par an dans des périodes d'au moins 6 jours consécutifs où la température maximale dépasse le 90 ^e percentile.	Somme des jours où $T_{\max} > T_{\max 90}$ pendant 6 jours consécutifs	Jours
CSDI	Vagues de froid	Nombre total de jours par an dans des périodes d'au moins 6 jours consécutifs où la température minimale est inférieure au 10 ^e percentile.	Somme des jours où $T_{\min} < T_{\min 10}$ pendant 6 jours consécutifs	Jours
FD	Jours de gel	Nombre de jours où la température minimale est inférieure à 0°C.	Nombre de jours où $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$	Jours
DTR	Amplitude thermique quotidienne	Différence moyenne quotidienne entre $T_{\max}$ et $T_{\min}$, agrégée annuellement.	$DTR = \text{mean}(T_{\max} - T_{\min})$ pour chaque jour, puis moyenne annuelle.	°C

Pour chaque indice, nous appliquons une batterie de tests statistiques :

- **Tests de normalité** : Shapiro-Wilk, Anderson-Darling
- **Tests d'homogénéité** : Bartlett, Levene
- **Tests de tendance** : (Mann-Kendall, régression linéaire)

2.2.4 Analyse des Tendances

Pour évaluer l'évolution des extrêmes thermiques, des analyses de tendances linéaires ont été réalisées sur Chaque indice. Les tendances sont exprimées en unités spécifiques par année (par exemple, °C/an pour TXx, %an pour TX90p, jours/an pour WSDI). La méthode utilisée est la régression linéaire, où chaque indice est modélisé en fonction du temps (années).

3. Résultats

3.1 Variation et Tendance de l'Indice TXx

Les températures maximales annuelles (TXx), représentées dans la figure 2, révèlent une tendance claire à la hausse sur la période étudiée, avec une augmentation statistiquement significative de 0,909°C par décennie (p-valeur de 0,000, test de Mann-Kendall). La courbe des TXx, illustrée par des points colorés par décennie et une droite de tendance linéaire, montre des valeurs minimales autour de 38°C au début des années 1980 (1981-1985) et des pics dépassant fréquemment 42°C après 2015, notamment entre 2020 et 2024. Malgré une variabilité interannuelle, trois phases d'évolution se distinguent : une légère hausse avec fluctuations marquées entre 1981 et 1995 (TXx autour de 39-40°C), une relative stabilité entre 1996 et 2010 (TXx entre 40 et 41°C), et une augmentation prononcée de 2011 à 2024 (TXx souvent supérieur à 42°C). Les tests statistiques confirment la robustesse de ces observations : les tests de normalité Shapiro-Wilk ($p = 0,074$) et Anderson-Darling ($p = 0,087$) suggèrent une distribution proche de la normale, validant l'usage de la régression linéaire. Le test de Bartlett ($p = 0,023$) indique une hétérogénéité significative des TXx entre décennies, reflétant des différences notables, par exemple entre 1980-1990 et 2010-2020. En revanche, le test de Levene ($p = 0,090$) montre une homogénéité des variances, indiquant une constance relative de l'amplitude des fluctuations. Ces résultats soulignent une intensification marquée des températures maximales, cohérente avec les tendances climatiques globales.(Fig2)

3.2 Variation et Tendance de l'Indice TNn

Les températures minimales annuelles (TNn), illustrées dans la figure 3, révèlent une légère diminution de 0,126°C par décennie, représentée par une droite de tendance linéaire. Cette baisse, toutefois, n'est pas statistiquement significative (p-valeur de 0,292, test de Mann-Kendall). La courbe des TNn met en évidence une variabilité interannuelle marquée, avec un minimum historique de -10,2°C enregistré le 2 février 1999, coïncidant avec une vague de froid notable. Trois périodes distinctes émergent de la courbe de lissage : de 1981 à 1995, les

TNn fluctuent sans tendance claire ; de 1995 à 2005, une forte variabilité est observée avec des baisses prononcées ; enfin, de 2005 à 2024, les températures minimales se stabilisent relativement. Les analyses statistiques révèlent que les données ne suivent pas une distribution normale (Shapiro-Wilk, $p = 0,000$; Anderson-Darling, $p = 0,011$), rendant les approches paramétriques moins appropriées. Une hétérogénéité significative entre les décennies est confirmée par le test de Bartlett ($p = 0,009$), reflétant des différences marquées dans les TNn, tandis que le test de Levene ($p = 0,412$) indique une homogénéité des variances, suggérant une constance dans l'amplitude des fluctuations. Ces résultats mettent en lumière une absence de tendance significative à la baisse des TNn, contrastant avec les évolutions observées pour les températures maximales.(Fig3)

3.3 Variation et Tendance de l'Indice température moyenne annuelle (TM)

Les températures moyennes annuelles (TM), illustrées dans la figure 4, révèlent une augmentation significative de 0,328°C par décennie, mise en évidence par une droite de tendance linéaire. Cette hausse, statistiquement très significative (p-valeur de 0,000, test de Mann-Kendall), témoigne d'une évolution marquée sur la période étudiée. La courbe de lissage permet d'identifier trois phases distinctes : de 1981 à 1995, les TM restent stables, fluctuant modérément autour de 15,5°C sans tendance claire ; de 1995 à 2010, une légère augmentation progressive est observée, avec des variations mais une trajectoire globale à la hausse ; enfin, de 2010 à 2024, la hausse s'accroît, les températures moyennes approchant 17°C vers la fin de la période. Les analyses statistiques confirment la robustesse de ces observations : les tests de normalité Shapiro-Wilk ($p = 0,584$) et Anderson-Darling ($p = 0,485$) indiquent une distribution normale des données, validant l'emploi de méthodes paramétriques. Les tests de Bartlett ($p = 0,207$) et de Levene ($p = 0,177$) révèlent une homogénéité des variances entre décennies, renforçant la fiabilité de l'analyse. Ces résultats soulignent une tendance nette à l'augmentation des températures moyennes, cohérente avec les dynamiques climatiques globales.

3.4 Variation et Tendance de l'Indice jours chauds (TX90p)

Les valeurs des jours chauds (TX90p), illustrées dans la figure 5, révèlent une augmentation marquée de 3,170 % par décennie, mise en évidence par une droite de tendance linéaire. Cette hausse, statistiquement très significative (p-valeur de 0,000, test de Mann-Kendall), traduit une intensification notable du nombre de jours chauds sur la période étudiée. La courbe de lissage distingue trois phases principales : de 1981 à 1995, le nombre de jours chauds demeure relativement stable ; de 1995 à 2010, une augmentation progressive est observée, accompagnée de fluctuations mais suivant une trajectoire globale à la hausse ; enfin, de 2010 à 2024, la hausse s'accroît fortement, particulièrement vers la fin de la période. Les analyses statistiques montrent une distribution des données ambiguë : le test Shapiro-Wilk ($p = 0,044$) suggère une distri-

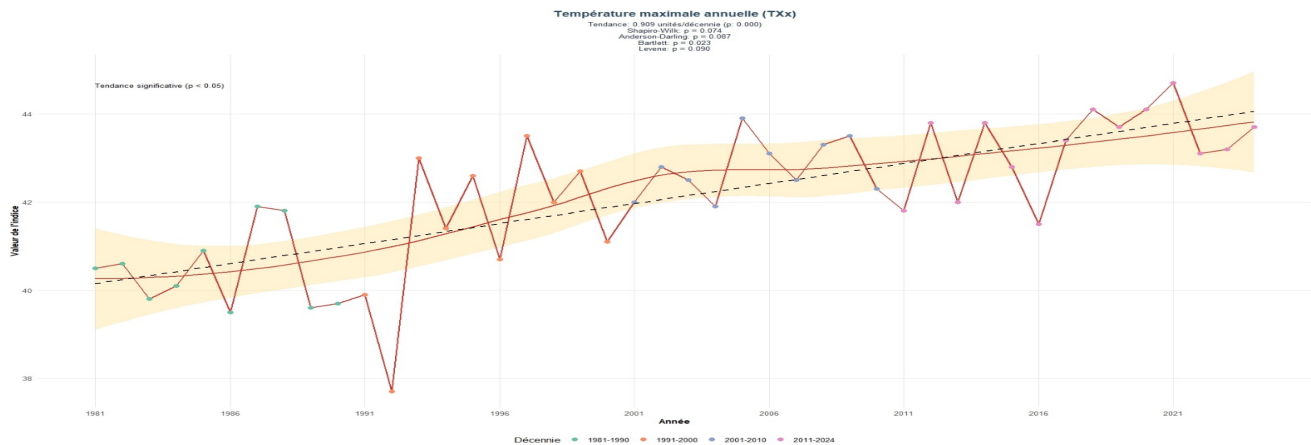


FIGURE 2. Évolution de la température maximale annuelle (TXx) sur 1981–2024.

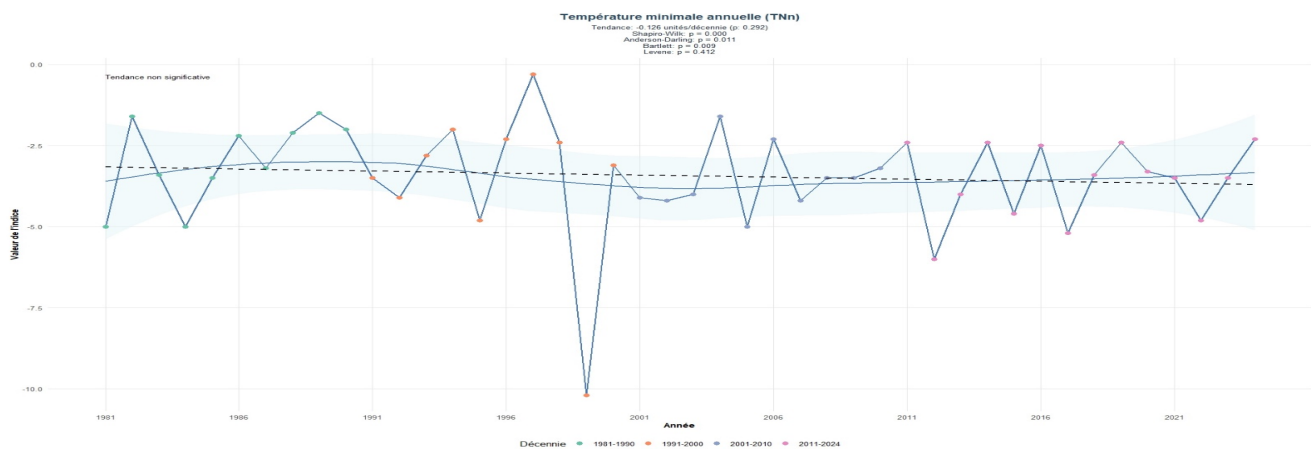


FIGURE 3. Évolution de la température minimale annuelle (TNn) sur 1981–2024.

bution non normale, tandis que le test Anderson-Darling ($p = 0,073$) indique une distribution proche de la normale. Les tests de Bartlett ($p = 0,062$) et de Levene ($p = 0,139$) confirment une homogénéité des variances entre décennies, renforçant la robustesse de l'analyse. Ces résultats mettent en évidence une tendance significative à l'augmentation des jours chauds, en cohérence avec les évolutions climatiques globales.

3.5 Variation et Tendance de l'Indice nuits chaudes (TN90p)

Les valeurs des nuits chaudes (TN90p), illustrées dans la figure 6, indiquent une légère augmentation de 0,328 % par décennie, représentée par une droite de tendance linéaire. Cette hausse, toutefois, n'est pas statistiquement significative (p -valeur de 0,275, test de Mann-Kendall), suggérant une absence de tendance claire sur la période étudiée. La courbe de lissage met en évidence trois phases distinctes : de 1981 à 1995, le nombre de nuits chaudes reste relativement stable ; de 1995 à 2010, des fluctuations marquées sont observées, sans direction nette ; enfin, de 2010 à 2024, une légère augmentation apparaît, bien que les variations demeurent modérées. Les analyses statistiques confirment la robustesse des

observations : les tests de normalité Shapiro-Wilk ($p = 0,476$) et Anderson-Darling ($p = 0,786$) indiquent une distribution normale des données, validant l'utilisation de méthodes paramétriques. Les tests de Bartlett ($p = 0,411$) et de Levene ($p = 0,149$) révèlent une homogénéité des variances entre décennies, renforçant la fiabilité des résultats. Ces constatations suggèrent une stabilité relative du nombre de nuits chaudes, contrastant avec les tendances plus marquées observées pour d'autres indicateurs climatiques.

3.6 Variation et Tendance de l'Indice jours froids (TX10p)

Les valeurs des jours froids (TX10p), illustrées dans la figure 7, révèlent une diminution significative de 2,337 % par décennie, mise en évidence par une ligne de tendance en pointillés noirs. Cette baisse, statistiquement très significative (p -valeur $< 0,000$, test de Mann-Kendall), indique une raréfaction progressive des jours froids sur les 44 années étudiées. La courbe de lissage (en bleu) distingue trois phases principales : de 1981 à 1990, le nombre de jours froids fluctue fortement mais reste élevé, reflétant leur fréquence relative ; de 1991 à 2010, une diminution progressive s'observe, avec

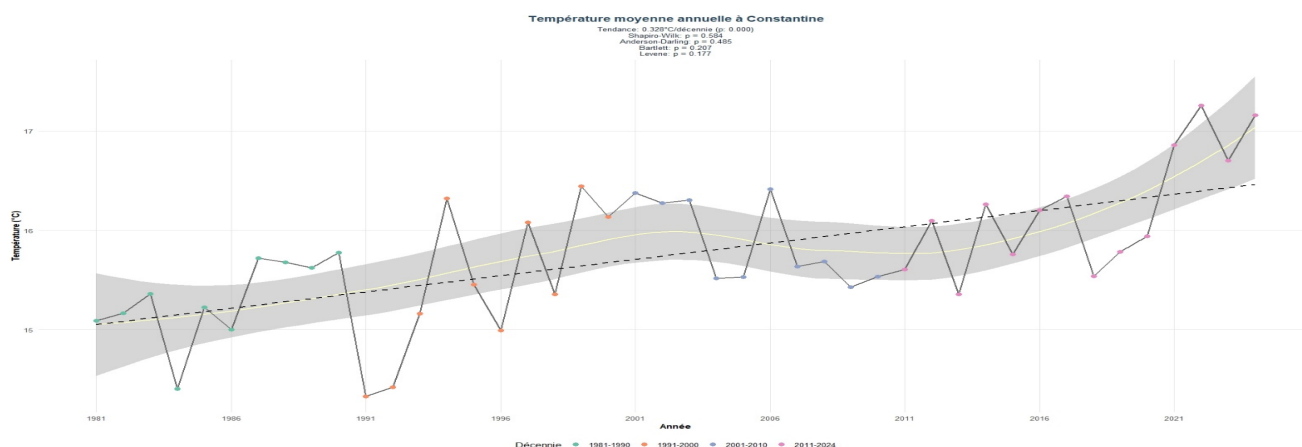


FIGURE 4. Évolution de la température moyenne annuelle (TM) sur 1981-2024.

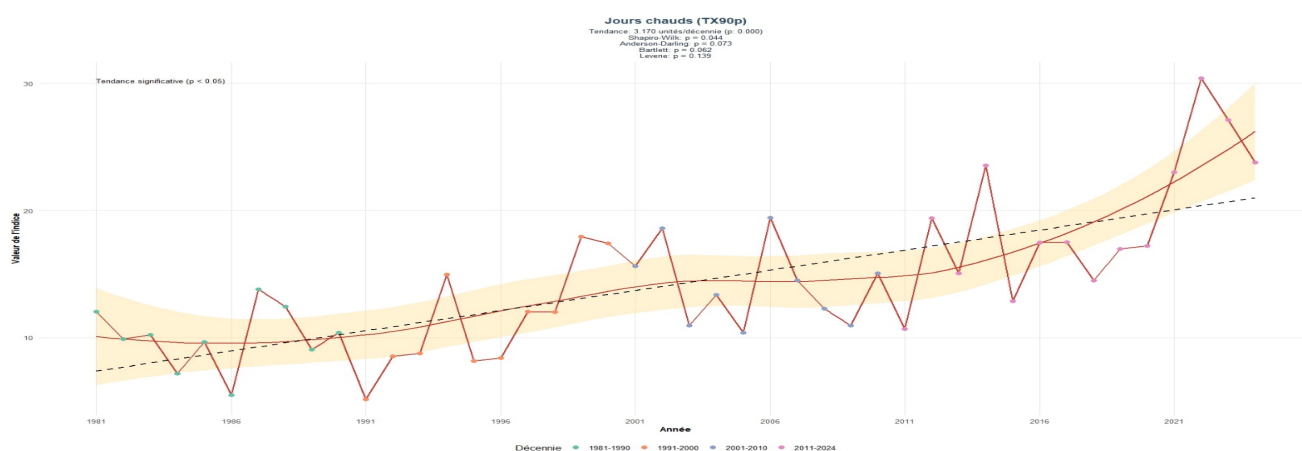


FIGURE 5. Évolution des jours chauds (TX90p) sur 1981-2024.

des variations interannuelles mais une tendance générale à la baisse ; enfin, de 2011 à 2024, la baisse s'accroît, les jours froids devenant nettement plus rares. Les analyses statistiques confirment la robustesse de ces résultats : les tests de normalité Shapiro-Wilk ($p = 0,064$) et Anderson-Darling ($p = 0,079$) suggèrent une distribution proche de la normale, bien que légèrement limitée, validant l'utilisation de méthodes paramétriques. Les tests de Bartlett ($p = 0,127$) et de Levene ($p = 0,147$) indiquent une homogénéité des variances entre décennies, confirmant une stabilité de la dispersion des données. Ces observations soulignent une réduction marquée des jours froids, cohérente avec les tendances climatiques globales.

3.7 Variation et Tendance de l'Indice nuits froides (TN10p)

Les valeurs des nuits froides (TN10p), illustrées dans la figure 8, indiquent une légère diminution de 0,165 % par décennie, représentée par une ligne de tendance en pointillés noirs. Cette baisse, toutefois, n'est pas statistiquement significative (p -valeur de 0,634, test de Mann-Kendall), suggérant une absence de tendance claire sur les 44 années étudiées. La courbe de lissage (en bleu) révèle trois phases principales :

de 1981 à 1990, les nuits froides sont relativement fréquentes, avec des valeurs oscillant souvent autour de 10 % ou plus ; de 1991 à 2010, une forte variabilité est observée, avec des fluctuations marquées entre années, certaines affichant jusqu'à 15 % de nuits froides et d'autres descendant à environ 5 % ; enfin, de 2011 à 2024, les valeurs se stabilisent à un niveau plus bas, autour de 5 %, mais sans diminution prononcée. Les analyses statistiques confirment la robustesse des observations : les tests de normalité Shapiro-Wilk ($p = 0,221$) et Anderson-Darling ($p = 0,294$) indiquent une distribution normale des données, validant l'emploi de méthodes paramétriques. Les tests de Bartlett ($p = 0,593$) et de Levene ($p = 0,510$) révèlent une homogénéité des variances entre décennies, confirmant une stabilité de la dispersion des données. Ces résultats suggèrent une stabilité relative des nuits froides, contrastant avec les tendances plus marquées d'autres indicateurs climatiques.

3.8 Variation et Tendance de l'Indice jours d'été (SU)

Le graphique 9 illustre une augmentation notable du nombre de jours d'été sur les 44 années étudiées, avec une ligne de tendance en pointillés noirs indiquant une hausse moyenne de 6,746 jours par décennie, soit environ 29,7 jours supplémentaires.

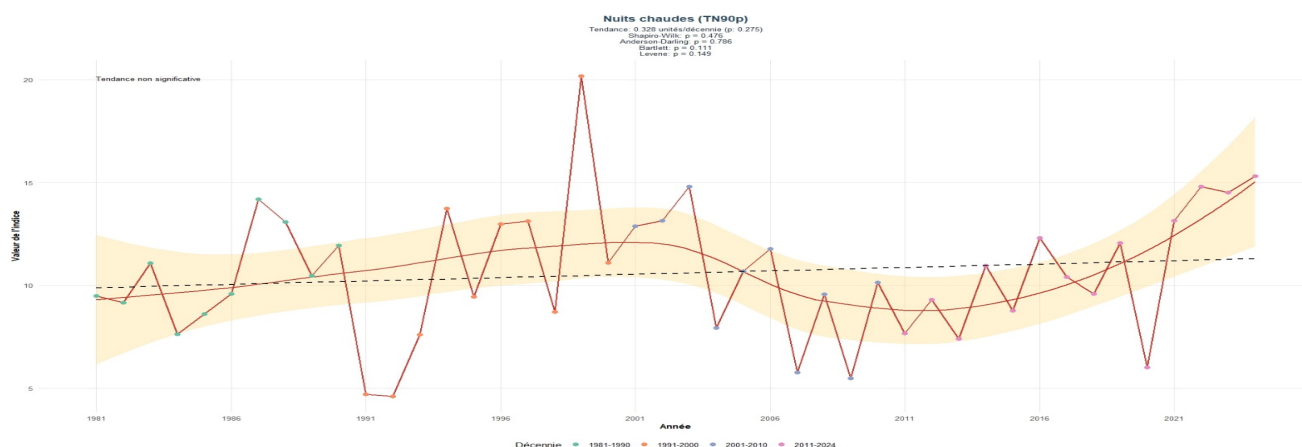


FIGURE 6. Évolution des nuits chaudes (TN90p) sur 1981-2024.

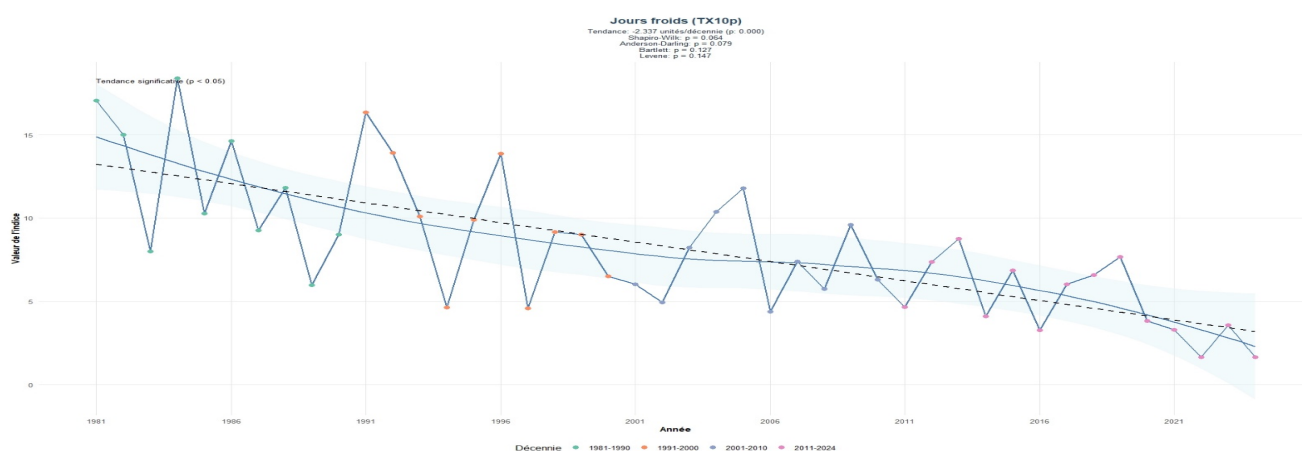


FIGURE 7. Évolution des jours froids (TX10p) sur 1981-2024.

taires sur l'ensemble de la période. Cette augmentation, statistiquement très significative (p-valeur de 0,000, test de Mann-Kendall), reflète une nette intensification des jours chauds. La courbe de lissage (en rouge) distingue trois phases principales : de 1981 à 1990, le nombre de jours d'été reste relativement stable autour de 140 jours par an, avec des variations modérées ; de 1991 à 2010, des fluctuations sont observées, mais une légère augmentation émerge, certaines années dépassant 160 jours tandis que d'autres retombent vers 140 jours ; enfin, de 2011 à 2024, la hausse s'accroît, les valeurs atteignant progressivement environ 170 jours par an, voire plus, témoignant d'une fréquence accrue des jours d'été. Les analyses statistiques confirment la robustesse de ces observations : les tests de normalité Shapiro-Wilk ($p = 0,484$) et Anderson-Darling ($p = 0,445$) indiquent une distribution normale des données, validant l'utilisation de méthodes paramétriques. Les tests de Bartlett ($p = 0,475$) et de Levene ($p = 0,589$) révèlent une homogénéité des variances entre décennies, confirmant une stabilité de la dispersion des données. Ces résultats soulignent une augmentation marquée des jours d'été, en cohérence avec les tendances climatiques globales.

3.9 Variation et Tendance de l'Indice vagues de chaleur (WSDI)

Le graphique 10 illustre une augmentation significative du nombre de jours de vagues de chaleur sur les 44 années étudiées, avec une ligne de tendance en pointillés noirs indiquant une hausse moyenne de 3,344 jours par décennie, soit environ 14,7 jours supplémentaires sur l'ensemble de la période. Cette augmentation, statistiquement significative (p-valeur de 0,009, test de Mann-Kendall), reflète une intensification notable des épisodes de chaleur intense prolongée. La courbe de lissage (en rouge) distingue trois phases principales : de 1981 à 1990, les vagues de chaleur sont quasi inexistantes, avec des valeurs proches de 0, indiquant une rareté des températures extrêmes prolongées ; de 1991 à 2005, une augmentation progressive émerge, marquée par des pics, notamment autour de 1995 où les valeurs dépassent 20 jours, signe d'une fréquence accrue ; enfin, de 2006 à 2024, la hausse s'accroît, avec des valeurs oscillant entre 15 et 30 jours par an, particulièrement élevées vers la fin de la période, témoignant d'une banalisation des vagues de chaleur. Les analyses statistiques révèlent une distribution non normale des données, confirmée par les tests de Shapiro-Wilk ($p = 0,000$) et Anderson-Darling ($p = 0,000$),

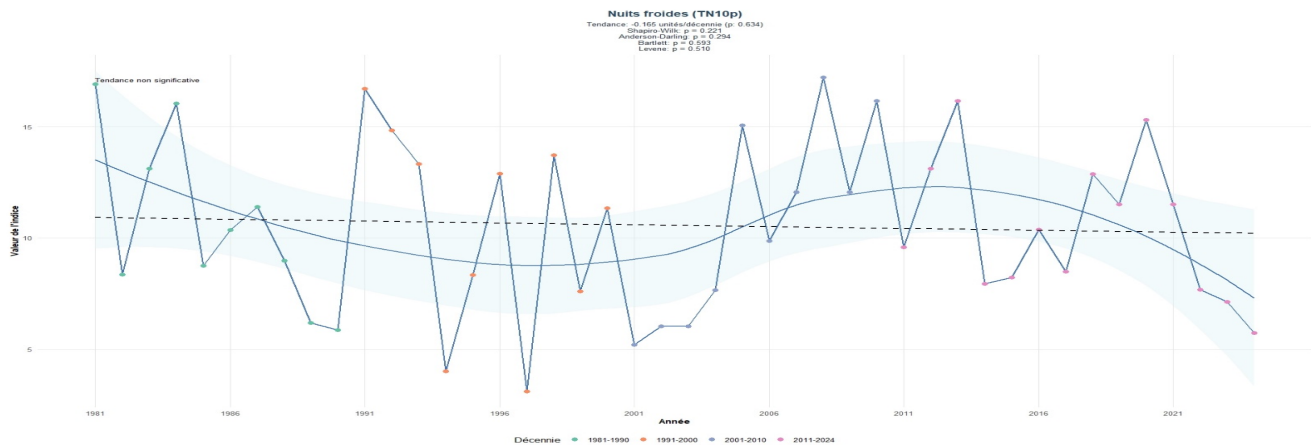


FIGURE 8. Évolution des nuits froides (TN10p) sur 1981-2024

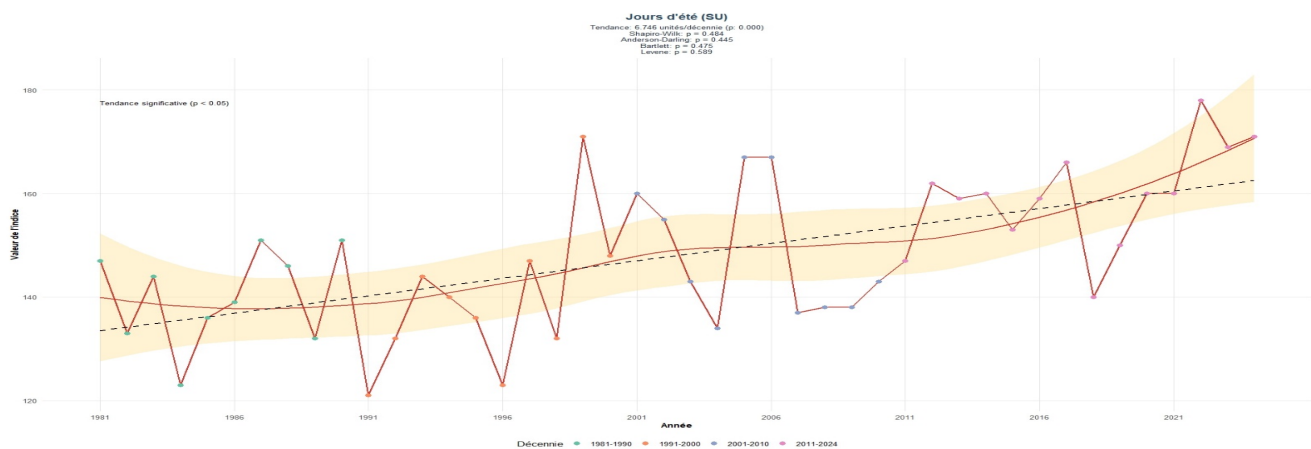


FIGURE 9. Évolution des jours d'été (SU) sur 1981-2024.

indiquant une forte dispersion des valeurs. Le test de Bartlett ($p = 0,019$) met en évidence une hétérogénéité significative des variances entre décennies, tandis que le test de Levene ($p = 0,118$) ne confirme pas cette hétérogénéité, nuancant l'interprétation. Ces résultats soulignent une augmentation marquée des vagues de chaleur, cohérente avec les tendances climatiques globales.

3.10 Variation et Tendance de l'Indice vagues de froid (CSDI)

Le graphique 11 illustre une diminution significative du nombre de jours de vagues de froid sur les 44 années étudiées, avec une ligne de tendans et les jours de gel restent relativement stables. Ces évolutions, particulièrement prononcées après 2010, s'alignent avec les tendances climatiques globales rapportées par le GIEC (2023) et soulignent la vulnérabilité accrue de Constantine aux impacts du changement climatique. Si cette étude confirme une hausse nette des extrêmes chauds à Constantine, l'évolution moins marquée des nuits froides et des jours de gel suggère une résilience partielle du froid hivernal, probablement liée aux spécificités topographiques et climatiques locales. Ces nuances rappellent que les

impacts du changement climatique peuvent varier selon les paramètres considérés, nécessitant des stratégies d'adaptation différenciées pour les vagues de chaleur estivales et les risques résiduels de froid extrême.

3.11 Variation et Tendance de l'Indice jours de gel (FD)

Le graphique 12 illustre une légère diminution du nombre de jours de gel sur les 44 années étudiées, avec une ligne de tendance en pointillés noirs indiquant une baisse moyenne de 0,986 jour par décennie, soit environ 4,3 jours de moins sur l'ensemble de la période. Cette diminution, cependant, n'est pas statistiquement significative (p -valeur de 0,265, test de Mann-Kendall), suggérant une absence de tendance claire. La courbe de lissage (en bleu) distingue trois phases principales : de 1981 à 1990, les jours de gel sont relativement fréquents, oscillant autour de 20 jours avec un pic proche de 30 jours en 1985 ; de 1991 à 2005, une légère baisse s'observe, les valeurs se stabilisant entre 10 et 15 jours par an, avec quelques pics plus élevés ; enfin, de 2006 à 2024, les fluctuations persistent, certaines années descendant à 10 jours tandis que d'autres remontent à 30 jours, sans diminution marquée. Les analyses

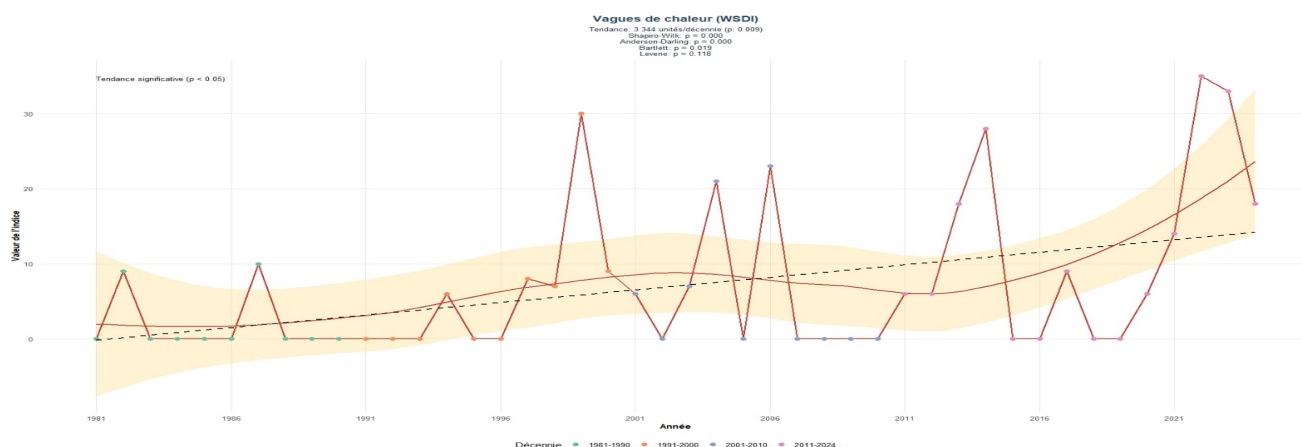


FIGURE 10. Évolution des vagues de chaleur (WSDI) sur 1981-2024.

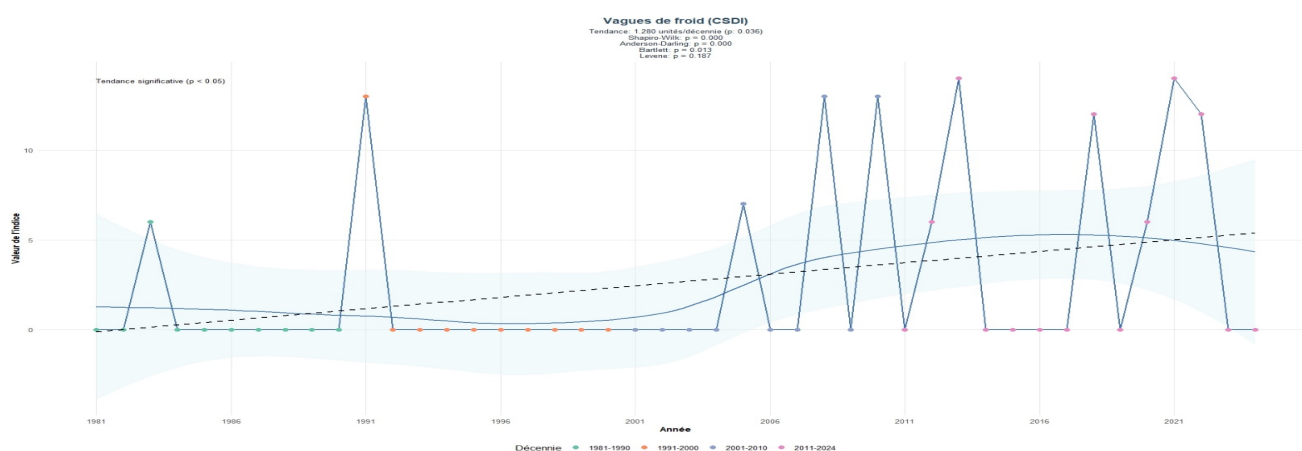


FIGURE 11. Évolution des vagues de froid (CSDI) sur 1981-2024.

statistiques révèlent une distribution non normale des données, confirmée par les tests de Shapiro-Wilk ($p = 0,013$) et Anderson-Darling ($p = 0,007$), indiquant une forte variabilité interannuelle. Les tests de Bartlett ($p = 0,614$) et de Levene ($p = 0,749$) confirment une homogénéité des variances entre décennies, suggérant une stabilité de la dispersion des données. Ces résultats indiquent une stabilité relative des jours de gel, contrastant avec les tendances plus marquées d'autres indicateurs climatiques.

3.12 Variation et Tendance de l'Indice (DTR)

Le graphique 13 met en évidence une augmentation significative de l'amplitude thermique quotidienne sur les 44 années étudiées, avec une ligne de tendance en pointillés noirs indiquant une hausse moyenne de $0,593^{\circ}\text{C}$ par décennie, soit environ $2,6^{\circ}\text{C}$ supplémentaires sur l'ensemble de la période. Cette augmentation, statistiquement très significative (p -valeur de 0,000, test de Mann-Kendall), reflète un élargissement notable de l'écart entre les températures maximales et minimales. La courbe de lissage (en noir) distingue trois phases principales : de 1981 à 1990, l'amplitude thermique reste stable autour de 12°C , avec des fluctuations mineures ;

de 1991 à 2005, une légère hausse s'observe, les valeurs passant progressivement de 12°C à environ 13°C ; enfin, de 2006 à 2024, la hausse s'accélère, les amplitudes atteignant fréquemment 14°C ou plus, particulièrement vers la fin de la période, indiquant des écarts thermiques quotidiens plus marqués. Les analyses statistiques confirment la robustesse de ces observations : les tests de normalité Shapiro-Wilk ($p = 0,080$) et Anderson-Darling ($p = 0,120$) suggèrent une distribution proche de la normale, validant l'utilisation de méthodes paramétriques. Les tests de Bartlett ($p = 0,419$) et de Levene ($p = 0,507$) révèlent une homogénéité des variances entre décennies, indiquant une stabilité de la dispersion des données. Ces résultats soulignent une intensification significative de l'amplitude thermique quotidienne, cohérente avec les tendances climatiques globales.

3.13 Variation et Tendance Évolution des extrêmes annuelles

Le graphique 14 illustre l'évolution des températures maximales (TX) et minimales (TN) sur 44 années à travers deux courbes distinctes. La courbe rouge des TX révèle une augmentation progressive, passant d'environ 22°C en 1981 à près

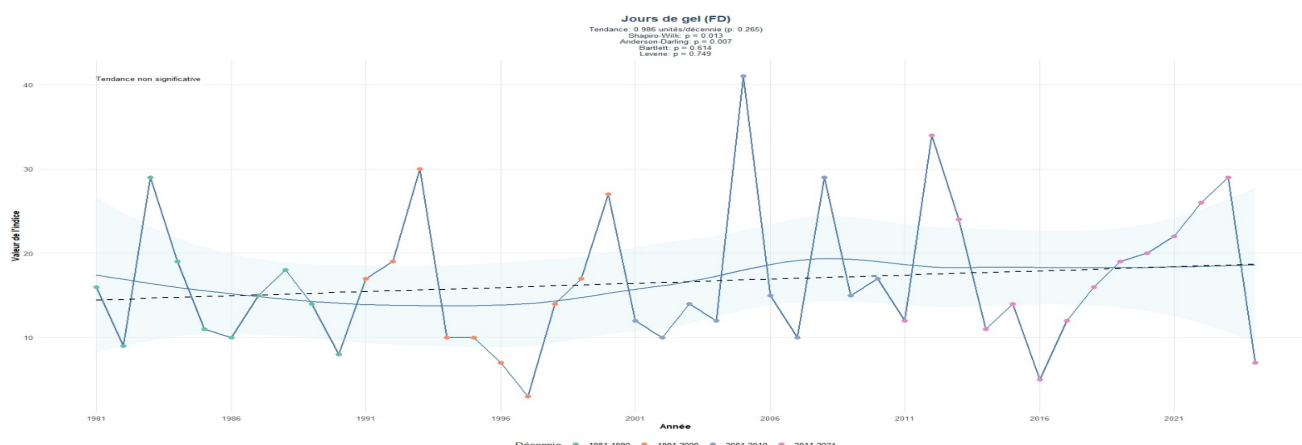


FIGURE 12. Évolution des jours de gel (FD) sur 1981-2024.

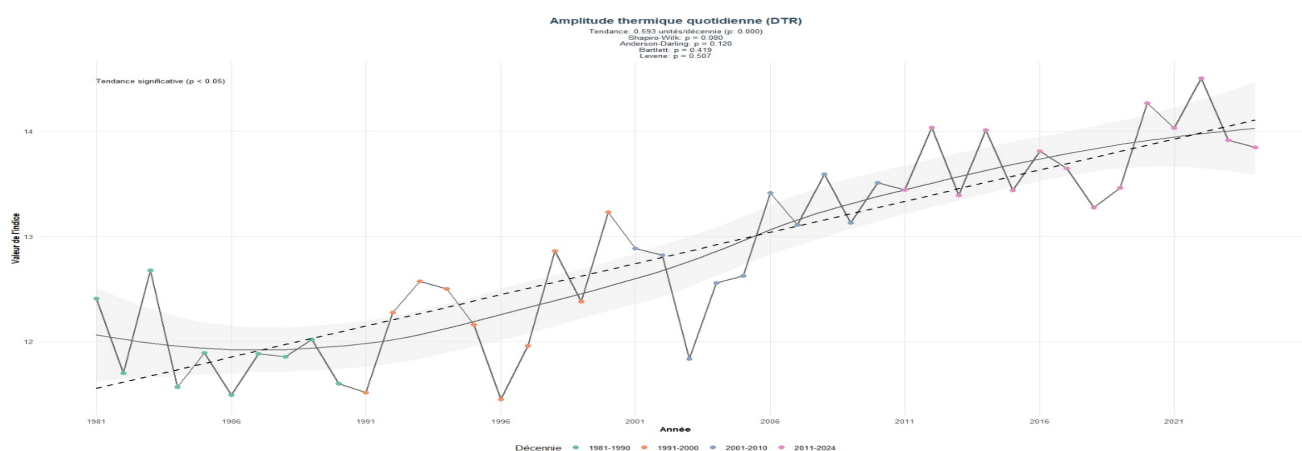


FIGURE 13. Évolution Amplitude thermique quotidienne (DTR) sur 1981-2024.

de 25°C en 2024, indiquant une intensification notable des journées les plus chaudes. En revanche, la courbe bleue des TN demeure relativement stable, fluctuant légèrement autour de 10°C, avec une légère diminution non statistiquement significative de 0,126°C par décennie pour l'indice TNn (p-valeur > 0,05, test de Mann-Kendall). Trois phases principales se dégagent : de 1981 à 1990, les TX oscillent autour de 22°C avec des variations interannuelles, tandis que les TN restent constantes à environ 10°C ; de 1991 à 2005, les TX montrent une légère hausse, atteignant parfois 24°C, tandis que les TN demeurent stables autour de 10°C ; enfin, de 2006 à 2024, la hausse des TX s'accroît, atteignant progressivement 25°C, alors que les TN affichent une très légère baisse, se maintenant entre 9 et 10°C. Ces observations soulignent une divergence croissante entre les températures maximales et minimales, les premières contribuant principalement à l'augmentation de l'amplitude thermique, en cohérence avec les tendances climatiques globales.

4. Discussion

L'étude à Constantine sur 1981-2024 montre des signes clairs de réchauffement climatique. Les indices de chaleur

augmentent significativement : les températures maximales (TXx) grimpent de 0,909°C par décennie, les jours d'été (SU) de 6,746 jours, les jours chauds (TX90p) de 3,17 %, et les vagues de chaleur (WSDI) de 3,344 jours, avec des p-valeurs faibles (p < 0,05). La température moyenne (TM) suit, avec +0,328°C par décennie. Ces tendances, surtout marquées après 2010, confirment ce qu'on voit ailleurs, comme dans les travaux de Donat et al. (2013) sur les extrêmes climatiques.

En revanche, les indices de froid diminuent : les jours froids (TX10p) baissent de 2,337% et les vagues de froid (CSDI) de 1,28 jours par décennie (p < 0,05). Mais les nuits froides (TN10p) et jours de gel (FD) restent stables, avec des baisses non significatives. L'amplitude thermique quotidienne (DTR) augmente de 0,593°C par décennie (p < 0,05), car les maximales annuelles (TX) passent de 22 à 25°C, tandis que les minimales (TN) restent stables, avec une légère baisse non significative de 0,126°C par décennie, car les maximales (TX) montent de 22 à 25°C, tandis que les minimales (TN) stagnent.

Ces changements peuvent poser problème. Plus de chaleur, c'est plus de stress pour les cultures, surtout dans une région sèche comme Constantine, et des risques pour la santé, comme

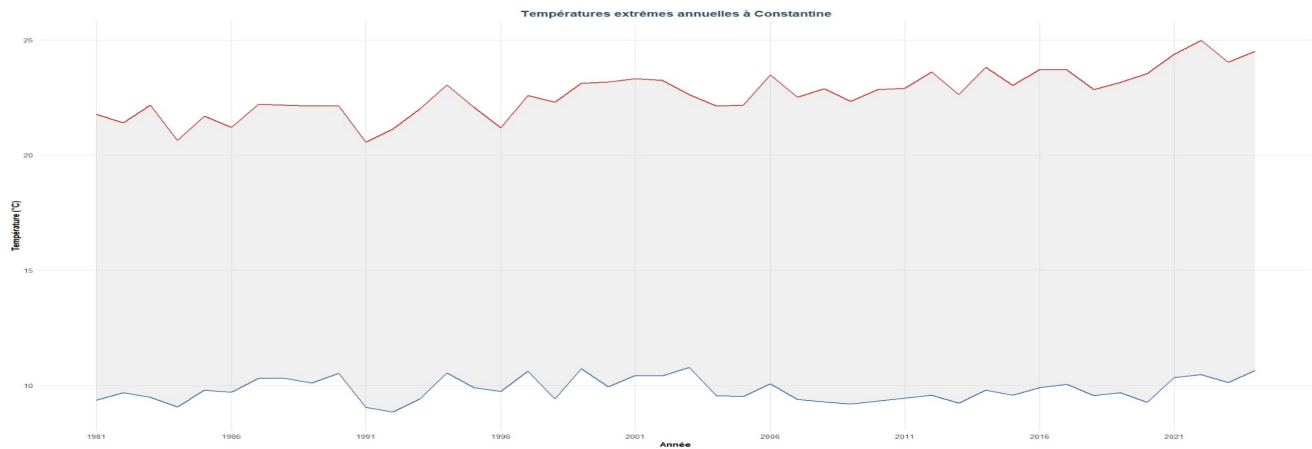


FIGURE 14. Évolution des extrêmes annuelles sur 1981-2024.

les coups de chaleur. Moins de froid peut perturber certains cycles naturels. Les données montrent des variations : WSDI et CSDI ne sont pas normales ($p < 0,05$), avec des différences entre décennies, mais TM et SU sont plus stables.

Le réchauffement observé pourrait être attribué à l'augmentation des gaz à effet de serre (GIEC, 2023), et à des facteurs locaux, et l'urbanisation (Meddi et al.

L'absence de tendance significative pour certains indices de froid (TN10p, FD), contrairement aux extrêmes chauds, pourrait s'expliquer par la forte continentalité du climat constantinois, qui favorise un refroidissement nocturne marqué malgré le réchauffement diurne. De plus, la variabilité naturelle et la persistance occasionnelle de masses d'air froid en hiver pourraient maintenir des épisodes de gel isolés, masquant ainsi une tendance à long terme. Ces résultats soulignent que le réchauffement n'affecte pas uniformément tous les extrêmes thermiques, avec des dynamiques différenciées entre journées chaudes et nuits froides.

5. Conclusion

Cette étude, centrée sur l'analyse des extrêmes thermiques à Constantine sur la période 1981-2024, met en évidence une intensification marquée du réchauffement climatique dans cette région méditerranéenne semi-aride. Les résultats révèlent des tendances significatives : une hausse des températures maximales annuelles (+0,909°C par décennie), des jours chauds (+3,17 % par décennie), des jours d'été (+6,746 jours par décennie) et des vagues de chaleur (+3,344 jours par décennie), ainsi qu'une augmentation de l'amplitude thermique quotidienne (+0,593°C par décennie). En parallèle, une diminution notable des jours froids (-2,337 % par décennie) et des vagues de froid (-1,28 jours par décennie) est observée, tandis que les nuits froides et les jours de gel restent relativement stables. Ces évolutions, particulièrement prononcées après 2010, s'alignent avec les tendances climatiques globales rapportées par le GIEC (2023) et soulignent la vulnérabilité accrue de Constantine aux impacts du changement climatique. Si cette étude confirme une hausse nette des extrêmes

chauds à Constantine, l'évolution moins marquée des nuits froides et des jours de gel suggère une résilience partielle du froid hivernal, probablement liée aux spécificités topographiques et climatiques locales. Ces nuances rappellent que les impacts du changement climatique peuvent varier selon les paramètres considérés, nécessitant des stratégies d'adaptation différenciées pour les vagues de chaleur estivales et les risques résiduels de froid extrême.

Références

- [1] Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M., and Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **111**, D05109. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- [2] Bensaad, M., Kherbouche, D., & Meddi, M. (2022). Analyse des tendances des températures extrêmes dans le nord de l'Algérie. *Rev. Algér. Climatol.*, **12**, 45–60.
- [3] Boucefiane, A., Bensaad, M., & Meddi, M. (2019). Caractérisation des variations thermiques à Constantine Ain El Bey. *J. Algér. Sci. Environ.*, **8**, 112–125.
- [4] Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nat. Clim. Change*, **8**, 972–980. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- [5] Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Glob. Planet. Change*, **63**, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>

- [6] GIEC (2023). Sixième Rapport d'Évaluation – Contribution du Groupe de travail I. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [7] Kherbouche, D., Meddi, M., & Bensaad, M. (2021). Évolution des extrêmes climatiques dans le nord-est algérien. *Ann. Inst. Météorol. Algér.*, **15**, 23–38.
- [8] Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., Alpert, P., Artale, V., Li, L., Luterbacher, J., May, W., Trigo, R., Tsimplis, M., Ulbrich, U., & Xoplaki, E. (2018). *The climate of the Mediterranean region : From the past to the future*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811534-3.00001-8>
- [9] MedECC (2020). *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin, First Mediterranean Assessment Report*. <https://www.medecc.org/>
- [10] Zeroual, A., Assani, A. A., & Meddi, M. (2020). Impacts des vagues de chaleur sur l'agriculture en Algérie. *J. Arid Environ.*, **182**, 104252. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104252>
- [11] Zeroual, A., Assani, A. A., & Meddi, M. (2020). Impacts des vagues de chaleur sur l'agriculture en Algérie. *J. Arid Environ.*, **182**, 104252. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104252>
- [12] ETCCDI (2023). *Climate Change Indices : Definitions and Software*. Expert Team on Climate Change Detection and Indices. <http://etccdi.pacificclimate.org/>
- [13] ONM (2021). *Rapport annuel sur les observations climatiques en Algérie*. Office National de la Météorologie, Alger.
- [14] R Core Team (2023). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- [15] Benabbas, C., & Laouar, R. (2021). Géomorphologie et dynamique sédimentaire dans le bassin de Constantine. *Rev. Algér. Géol.*, **15**, 34–49.
- [16] IGN Algérie (2020). *Cartographie géographique de la wilaya de Constantine*. Institut Géographique National Algérien.