

أعمال الملتقى الجهوي للبحث والابتكار بجهة مراكش أسفي  
الجغرافية التطبيقية في خدمة التنمية الترابية بجهة مراكش أسفي:  
التحديات والفرص



الجغرافية التطبيقية في خدمة التنمية الترابية بجهة مراكش أسفي:  
التحديات والفرص

La géographie appliquée au service du développement territorial  
dans la région de Marrakech-Safi : défis et opportunités

متنوعات مهداة إلى الأستاذ  
الدكتور أحمد زروال

تنسيق:

محمد الأكلع  
طارق العرفي

عبد الجليل الكريفات  
ميلود وشالت

2025

Actes du Colloque régional  
de la recherche et de l'innovation de la région Marrakech-Safi:  
La géographie appliquée au service du développement territorial  
dans la région de Marrakech-Safi : défis et opportunités



Mélanges en l'honneur du professeur  
Dr. Ahmed ZAROUAL

Coordination:

Abdeljalil Lokrifa  
Miloud Ouchala

Mohammed El Aklaa  
Tarik El Orfi

2025

**La géographie appliquée au service du  
développement territorial dans la région  
de Marrakech-Safi : défis et opportunités**



جهة مراكش أسفي  
ⵜⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⴰⴳⴷⴰⵢⵜ  
Région Marrakech Safi



LERMA  
مختبر الدراسات حول الموارد، الحركية والجاذبية  
Laboratoire des Etudes sur les Ressources,  
Mobilité et Attractivité



كلية الآداب والعلوم الإنسانية مراكش  
ⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⴰⴳⴷⴰⵢⵜ  
MARRAKECH  
جامعة القاضي عياض  
UNIVERSITÉ CAADI AYYAD  
Faculté des Lettres et Sciences Humaines - Marrakech

# La géographie appliquée au service du développement territorial dans la région de Marrakech-Safi : défis et opportunités

Mélanges en l'honneur du professeur Ahmed ZAROUAL

**Coordination:**

**Abdeljalil LOKRIFA**

**Mohamed ELAKLAA**

**Miloud OUCHALA**

**Tarik ELORFI**

**2025**

**La géographie appliquée au service du développement territorial  
dans la région de Marrakech-Safi : défis et opportunités**

**Mélanges en l'honneur du professeur Ahmed ZAROUAL**

**Coordination:** Abdeljalil LOKRIFA, Mohamed ELAKLAA, Miloud OUCHALA  
et Tarik ELORFI

**Publication:** Laboratoire des Etudes sur les Ressources, Mobilité et  
Attractivité -LERMA - Faculté des Lettres et des Sciences Humaines,  
Université CADI AYYAD – Marrakech

**Edition: 2025**

**Dépôt légal :** 2025MO2439

**ISBN:** 978-9920-620-15-4

**Conception:** Tarik ELORFI, Miloud OUCHALA

**Editions et Impressions:** Bouregreg - Rabat



**Editions & Impressions Bouregreg**

10, Avenue Alaouiyyine - Hassan - Rabat

Tél: 05 37 20 75 83 / Fax : 05 37 20 75 89

E-mail : [editionsbouregreg2015@gmail.com](mailto:editionsbouregreg2015@gmail.com)



**Ahmed Zaroual** est un ancien professeur au Département de Géographie de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Université Cadi Ayyad de Marrakech. Né le 1er janvier 1954 à El Attaouia, Kelaat Sraghna, il est titulaire d'un Diplôme d'Études Supérieures (DES) en Lettres obtenu en 1987 à la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Rabat, et d'une Habilitation Universitaire obtenue en 2015. Ses recherches portent sur la géographie physique en général, et plus particulièrement sur les dynamiques des milieux naturels montagnards ainsi que sur les problèmes de l'aménagement et du développement.



## Sommair

### Axe 1 : Hydrologie, Changement Climatique et Risques Naturels

<b>Spatio-temporal evolution of rainfall and its impacts on water resources: Case study of the sub-basins of the Al Haouz-Mejjate hydrographic basin 1992-2018 (Morocco)</b>	11
Jalal Aguerd, Meriem Hamid, Youness Bouhafa, Kouldia Nafia, and Mohamed El ghachi	
<b>Analyse des tendances thermiques actuelles et projections futures dans la région Marrakech-Safi</b>	21
Tarik El Orfi, Miloud Ouchala, Mohamed El Ghachi et Chaima Hafid	
<b>Integration of QMNA Analysis into Climate Resilience Planning for Semi-Arid Watersheds: Lessons from Oued Reghaya in the Context of Climate Change</b>	33
Choukri Bahija , El Ghachi Mohamed	
<b>Les inondations dans la vallée de l'Ourika: formation et résilience de la population</b>	41
Ait Zaouit Adil , El Adib Mohamed	
<b>Les crues de référence instantanées dans le bassin versant de l'Oued Zat (Bassin Tensift, Maroc): cas de la crue de 2011</b>	55
Elgzouli Abdelbasset, El Ghachi Mohamed, Lahlou Nadia	
<b>Les stations de dessalement dans la région Marrakech Safi : entre exigences de développement et adaptation au changement climatique</b>	67
El-Louzi Zineb, Mansoum Mohamed	

### Axe 2 : Développement Territorial, Gouvernance et Enjeux Socio-économiques

<b>Traditional craft in mountainous areas: an economic backbone between marginalization and the challenge of valuation case study of province Al Haouz, Morocco</b>	85
Soufyane Moussaoui	
<b>Governance of mobility between Tamansourt and Marrakech</b>	101
Loubna Elhoucine	
<b>Construire l'avenir après le séisme : Habitat parasismique, durabilité et préservation du patrimoine dans la province d'AL Haouz</b>	119
Zaineb Lahdachi, Bouazza Sallak, Jihane Lahrour	
<b>La faiblesse de l'appareil économique urbain et ses incidences sur la polarisation territoriale extérieure, l'exemple des quatre petites villes de la zone du Haouz oriental de Marrakech (El'attaouia, Tاملةlet, Sidi Rahal, et Essahrij)</b>	135
El Habbache Nour Eddine	
<b>Vers un indice d'attractivité territoriale institutionnelle : approche mathématique et applications pratiques</b>	151
Laarich Jawad	
<b>Lifelong learning in Mosques and women's socio-economic integration in Morocco, case study of Kelaat Sraghna province</b>	169
Aomar ibourk, kabir elmakhloufi, Mohammed Elaklaa, kabira raziqi , Zakaria elouaourti	



**Axe 1 :**  
**Hydrologie, Changement Climatique**  
**et Risques Naturels**

# Analyse des tendances thermiques actuelles et projections futures dans la région Marrakech-Safi

## Analysis of current thermal trends and future projections in the Marrakech-Safi region

Tarik El Orfi<sup>1,2</sup>, Miloud Ouchala<sup>1</sup>, Mohamed El Ghachi<sup>2</sup> et Chaima Hafid<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Cadi Ayyad, FLSH, Laboratoire LERMA, Marrakech,

<sup>2</sup> Université Sultan Moulay Slimane, FLSH, Laboratoire DPRP, Beni Mellal, - E-mail de l'auteur correspondant : telorfi@uca.ac.ma

**Résumé :** Dans un contexte mondial marqué par l'accentuation du changement climatique, la région de Marrakech-Safi, caractérisée par une forte hétérogénéité géographique et climatique, fait face à une élévation préoccupante des températures. Cette étude vise à analyser les tendances thermiques récentes (1981–2024) et à projeter leur évolution future à l'horizon 2100, en mobilisant des données issues de la base NASA/POWER et des modèles climatiques régionaux (EURO-CORDEX), sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. L'analyse des températures maximales et minimales observées met en évidence une augmentation généralisée des températures, plus marquée dans les zones continentales et en altitude. Les tendances actuelles montrent une élévation des températures allant jusqu'à +0,41 °C par décennie, notamment dans les régions montagneuses. Les projections futures confirment cette dynamique avec des hausses pouvant dépasser 3 °C pour les températures minimales et atteindre près de 2 °C pour les maximales dans le scénario RCP 8.5. Les résultats révèlent une intensification du réchauffement dans les zones de haute altitude, accentuant leur vulnérabilité aux aléas climatiques. Ces évolutions thermiques pourraient entraîner des répercussions majeures sur les ressources en eau, les systèmes agricoles, la santé publique et la biodiversité. Cette étude souligne l'urgence d'adopter des stratégies d'adaptation différenciées, fondées sur des données climatiques fines et localisées.

**Mots-clés :** Changement climatique, Températures, Projections climatiques, Région Marrakech-Safi.

**Abstract:** In the context of global climate change, the Marrakech-Safi region—characterized by marked geographical and climatic heterogeneity—is experiencing a worrying rise in temperature. This study aims to analyze recent thermal trends (1981–2024) and project their future evolution by 2100 using data from NASA/POWER and regional climate models (EURO-CORDEX) under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. The analysis of observed maximum and minimum temperatures reveals a generalized warming trend, particularly pronounced in inland and high-altitude areas. Current trends indicate temperature increases of up to +0.41 °C per decade, especially in mountainous zones. Future projections confirm this pattern, with increases exceeding 3 °C for minimum temperatures and approaching 2 °C for maximum temperatures under the RCP 8.5 scenario. The results highlight an amplified warming in high-elevation areas, which significantly increases their vulnerability to climatic hazards. These thermal shifts may have substantial impacts on water resources, agricultural systems, public health, and biodiversity. This study emphasizes the urgent need to implement differentiated adaptation strategies based on high-resolution and localized climate data.

**Keywords:** Climate change, temperatures, Climate projections, Marrakech-Safi region.

## Introduction

Le réchauffement climatique constitue l'un des phénomènes les plus marquants du XXI<sup>e</sup> siècle, affectant l'ensemble des composantes climatiques à l'échelle planétaire. Selon le sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la température moyenne mondiale a augmenté de 1,1 °C entre 1850 et 2020, avec une tendance au dépassement du seuil des +1,5 °C dès la prochaine décennie (IPCC, 2021). Ce réchauffement est inégalement réparti selon les régions. D'après un indice régional de changement climatique, la région méditerranéenne figure parmi les 25 points chauds les plus préoccupants à l'échelle mondiale (IPCC, 2013). Les pays situés au sud de la Méditerranée, y compris le Maroc, où la rareté de l'eau constitue déjà un facteur limitant, sont plus vulnérables aux effets du changement climatique que les pays du Nord (Saadi et al., 2015). Ces changements sont d'ores et déjà perceptibles à travers la multiplication des épisodes de canicule, la prolongation des saisons chaudes et la fréquence accrue des sécheresses. Le Maroc, à l'instar des autres pays nord-africains, connaît une élévation des températures à un rythme de +0,33 °C par décennie depuis les années 1980 (Driouech et al., 2021), ce qui dépasse la moyenne mondiale et reflète une vulnérabilité croissante face aux effets du changement climatique.

Parmi les régions marocaines particulièrement sensibles à ces dynamiques thermiques, la région de Marrakech-Safi, localisée entre l'océan Atlantique et le Haut Atlas, constitue un espace climatique contrasté. Elle se caractérise par un climat semi-aride à aride, avec de fortes amplitudes thermiques et une pluviométrie irrégulière, concentrée principalement entre l'automne et le printemps (Gourfi et al., 2022). Les travaux réalisés dans le bassin du Tensift ont révélé une hausse significative des températures et une réduction des nuits froides, notamment dans la ville de Marrakech, où les extrêmes de chaleur sont devenus plus fréquents et prolongés (Khomsi et al., 2016). Ces signaux climatiques locaux sont en cohérence avec les observations à l'échelle nationale et confirment une tendance au réchauffement accéléré dans le sud marocain (Woillez, 2019). L'augmentation des températures dans cette région ne se limite pas à une élévation des moyennes annuelles : elle concerne également la fréquence des vagues de chaleur, l'extension des périodes caniculaires et la réduction de l'amplitude thermique journalière (IPCC, 2021). Cette évolution thermique s'accompagne d'une intensification du stress hydrique, rendant les milieux naturels et les activités humaines plus vulnérables.

Les projections climatiques futures confirment la poursuite de cette dynamique de réchauffement dans les prochaines décennies. Gumus et al. (2023) estiment, à travers un ensemble de scénarios socio-économiques (SSP), une élévation des températures de +2,5°C à +5 °C dans certaines régions marocaines d'ici la fin du siècle, avec une tendance plus marquée sous le scénario pessimiste SSP5-8.5. À l'horizon 2100, la combinaison d'une chaleur excessive et d'une diminution de l'humidité atmosphérique pourrait transformer durablement les conditions climatiques régionales et accroître la fréquence des canicules extrêmes dépassant les 45 °C (Lelieveld et al., 2016). Ces tendances rendent la région nord-africaine particulièrement exposée aux risques climatiques, avec des répercussions attendues sur les ressources en eau, l'agriculture, la biodiversité et la santé publique (Schilling et al., 2020). Pour la région de Marrakech-Safi, les scénarios suggèrent une augmentation significative des températures, associée à une baisse des précipitations (Choukrani et al., 2018). Les projections soulignent également la nécessité de renforcer les

capacités locales d'adaptation, notamment par une gestion intégrée de l'eau, l'adoption de pratiques agricoles résilientes, et l'aménagement thermique des espaces urbains.

Dans ce contexte d'urgence climatique, il devient impératif d'analyser les tendances thermiques actuelles et futures de manière détaillée et localisée, afin d'anticiper les impacts potentiels et d'orienter les politiques publiques. Cette étude propose de se focaliser sur la région de Marrakech-Safi, en mobilisant des données climatiques historiques et des projections issues des modèles régionaux du programme EURO-CORDEX. Elle vise à caractériser la dynamique du réchauffement régional, à travers l'analyse des températures minimales, maximales et moyennes, en considérant deux scénarios contrastés : le RCP 4.5 et le RCP 8.5. Cette approche permettra d'évaluer l'intensité et la récurrence des vagues de chaleur projetées à l'horizon 2100. L'objectif est de fournir une base scientifique robuste pour soutenir les processus d'adaptation régionale, en lien avec les politiques climatiques nationales et les stratégies de résilience territoriale. En éclairant les trajectoires climatiques futures de la région, cette recherche contribue à la production de connaissances applicables aux défis du développement durable en contexte semi-aride.

#### **4. Zone d'étude**

Située dans le centre-ouest du Maroc, la région de Marrakech-Safi couvre une superficie d'environ 39 000 km<sup>2</sup>, soit près de 5,5 % du territoire national, et compte 4,86 millions d'habitants (HCP, 2024). Elle est administrativement constituée de la préfecture de Marrakech et de sept provinces (Fig. 1). Délimitée à l'ouest par l'océan Atlantique, la région est bordée au nord par Casablanca-Settat, à l'est par Béni Mellal-Khénifra et au sud-est par Drâa-Tafilalet. Elle présente une diversité topographique remarquable, s'étendant des plaines littorales d'Abda aux plateaux de Rehamna et de Bahira, jusqu'aux contreforts montagneux du Haut Atlas. La plaine du Haouz, pôle agricole majeur, est encadrée par la chaîne des Jebilet au nord et les hauts sommets de l'Atlas au sud, culminant à 4 167 m au Jbel Toubkal. Cette hétérogénéité géomorphologique confère à la région une sensibilité particulière aux contrastes climatiques et en fait un territoire représentatif des gradients thermiques et des dynamiques hydrologiques du Maroc central.

Le climat de la région de Marrakech-Safi est marqué par une forte variabilité pluviométrique, résultant de la combinaison de trois facteurs : la position aux latitudes pré-sahariennes, les altitudes élevées du Haut Atlas, et l'influence maritime de l'océan Atlantique. Cette configuration génère une diversité climatique allant du climat aride à semi-aride sur la majeure partie du territoire, jusqu'à des conditions subhumides localisées en altitude. Environ 80 % de la région enregistre une température moyenne annuelle avoisinant 18 °C, avec des extrêmes thermiques variant de 4,9 °C pour les minimales à près de 38 °C pour les maximales. Les précipitations, globalement faibles et irrégulières, présentent de fortes disparités spatiales et saisonnières : elles varient entre 190 mm/an dans les plaines et jusqu'à 650 à 800 mm dans les zones montagneuses (Choukrani et al., 2018). Sur le plan hydrologique, la région est traversée par deux grands bassins versants : le bassin du Tensift et une partie de celui de l'Oum Er-Rbia, alimentés par des affluents issus du versant nord du Haut Atlas (Zat, Ourika, Nfis, Tassaout, ...). Depuis les années 1980, une tendance nette à la baisse des précipitations, combinée à une élévation des températures, a entraîné une recrudescence des épisodes de sécheresse (Najmi et al., 2023), renforçant la vulnérabilité climatique de la région, tant pour ses écosystèmes que pour ses activités agricoles et ses ressources en eau.

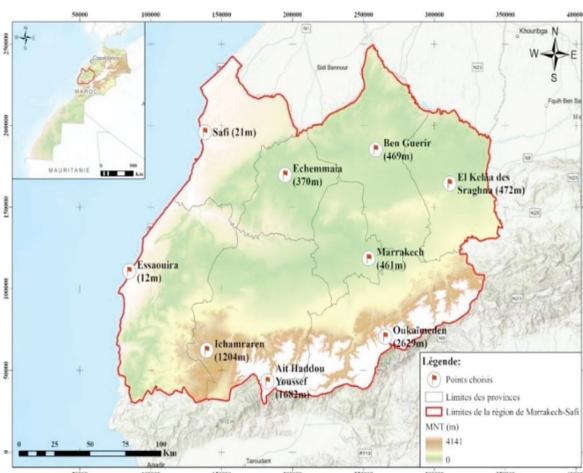


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude.

## 5. Données et méthodes

La disponibilité limitée de données météorologiques constitue un obstacle majeur à l'analyse précise des dynamiques climatiques régionales. Le projet Prediction Of Worldwide Energy Resources (NASA/POWER) de la NASA apporte une solution en fournissant des données spatialisées sur les températures maximales et minimales, ainsi que sur d'autres variables climatiques. Ces données sont issues de sources multiples, incluant les observations satellitaires, les relevés au sol, les radiosondages et les modèles de simulation atmosphérique (White et al., 2008). Dans le cadre de cette étude, les données journalières de température maximale et minimale ont été extraites pour la région de Marrakech-Safi sur la période 1981–2024, afin de caractériser les tendances thermiques actuelles. Ces données ont été validées par El Orfi (2023) à travers une comparaison avec les observations enregistrées dans plusieurs stations météorologiques situées dans le bassin de l'Oum Er-Rbia. Les résultats de cette validation ont montré une bonne concordance entre les deux sources, avec des performances globalement très satisfaisantes.

Concernant les projections climatiques futures, plusieurs jeux de données issus de modèles climatiques sont disponibles pour simuler les évolutions des températures. Le projet CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) a été initié afin de promouvoir la recherche sur la régionalisation des projections climatiques. Il constitue aujourd'hui une référence incontournable pour les études à l'échelle régionale (Giorgi, 2019). CORDEX propose une série de modèles climatiques régionaux (MCR) couvrant les principales zones continentales, y compris le Maroc. Pour cette étude, nous avons utilisé les projections climatiques journalières des températures maximales et minimales issues de quatre MCR du programme EURO-CORDEX, pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Ces données sont fournies à une résolution spatiale fine de 12 km × 12 km (Tab. 1).

Tableau 1. Liste des RCM choisis.

MCR	Evaluation	Historique	RCP4.5 / 8.5	Institution
ALADIN63_v2	1979-2018	1951-2005	2006-2100	CNRM

<b>CCLM4-8-17_v1</b>	1989-2008	1949-2005	2006-2100	CLMcom
<b>RACMO22E_v1</b>	1979-2012	1950-2005	2006-2100	KNMI
<b>RCA4_v1</b>	1980-2010	1970-2005	2006-2100	SMHI

Pour l'analyse des projections futures, aucune sélection spécifique des MCR n'a été effectuée. L'étude repose sur la moyenne des résultats issus des quatre modèles climatiques régionaux, permettant ainsi une évaluation plus robuste et intégrée des tendances futures. Afin d'assurer une comparaison rigoureuse entre les données projetées et les observations historiques, la période de référence retenue est celle définie par l'Organisation météorologique mondiale (OMM, 2017), à savoir la période de 30 ans allant de 1991 à 2020.

## 6. Résultats et discussions

### 6.1 Analyse des températures actuelles

L'analyse des températures maximales (Tmax) et minimales (Tmin) observées sur la période 1981-2024 dans la région de Marrakech-Safi révèle une diversité thermique marquée selon les caractéristiques géographiques des zones étudiées (Fig.2). Les valeurs les plus élevées de Tmax sont enregistrées dans les plaines intérieures, notamment à El Kelâa des Sraghna (28,3 °C), Ben Guerir (27,92 °C) et Echemmaia (27,57 °C). Ces stations, situées à une altitude modérée, sont caractérisées par un climat continentalisé où l'amplitude thermique est plus marquée, ce qui favorise des étés plus chauds. En revanche, les températures maximales les plus faibles sont relevées dans les zones d'altitude, notamment à Oukaïmeden (23,51 °C) et Ait Haddou Youssef (23,71 °C), ainsi que dans les zones littorales comme Essaouira (21,11 °C) et Safi (21,41 °C). Concernant les températures minimales (Tmin), les valeurs les plus basses sont observées dans les zones de haute altitude, en particulier à Oukaïmeden (8,87 °C) et Ait Haddou Youssef (9,48 °C). Ces faibles températures témoignent de l'influence directe de l'altitude sur les bilans énergétiques. À l'inverse, les Tmin les plus élevées sont enregistrées dans les stations côtières telles qu'Essaouira (17,20 °C) et Safi (16,75 °C), reflétant la faible amplitude thermique caractéristique du climat océanique.

L'analyse des tendances thermiques met en évidence une augmentation généralisée des températures minimales et maximales au cours des quatre dernières décennies, à l'exception des stations côtières d'Essaouira et Safi, où les Tmax affichent une très légère baisse, respectivement de -0,03 °C et -0,04 °C par décennie. Cette tendance légèrement négative pourrait être liée à l'effet de l'océan qui limite les extrêmes thermiques. En revanche, les stations intérieures et de montagne présentent des tendances nettement positives. Les hausses les plus marquées des Tmax sont enregistrées à Oukaïmeden (+0,41 °C/décennie), Ait Haddou Youssef (+0,39 °C/décennie) et Marrakech (+0,32 °C/décennie). En ce qui concerne les Tmin, la tendance à la hausse est généralisée pour toutes les stations, avec une intensité variable. Les augmentations les plus fortes sont observées à Ait Haddou Youssef (+0,33 °C/décennie) et Oukaïmeden (+0,34 °C/décennie), confirmant un réchauffement plus prononcé dans les montagnes. Cette élévation des températures minimales pourrait avoir des implications importantes sur les bilans hydriques, la phénologie végétale et les besoins en irrigation, notamment dans un contexte semi-aride.



Figure 2. Variations et tendances des températures annuelles maximales et minimales (1981–2024) dans la région Marrakech-Safi.

## 6.2 Prévisions des températures futures

### 3.3.1 Projections futures des températures minimales

L'analyse des projections futures des températures minimales (Tmin) vers l'horizon 2100, comparées à la période de référence 1991–2020 (P0), révèle une tendance généralisée à l'augmentation des températures nocturnes dans l'ensemble des zones de la région Marrakech-Safi (Fig.3). Cette hausse s'inscrit dans les deux scénarios climatiques examinés : le scénario modéré RCP 4.5 et le scénario pessimiste RCP 8.5. La lecture croisée des données permet d'identifier des disparités spatiales significatives, fortement corrélées à l'altitude et à la continentalité des stations.

Dans le scénario RCP 4.5, les augmentations les plus modérées sont observées dans les zones côtières. À Essaouira, la température minimale moyenne passe de 17,16 °C à 18 °C, soit une augmentation de 0,83 °C correspondant à 4,9 % par rapport à la période de référence. Une tendance similaire est observée à Safi avec une élévation de 0,77 °C (4,6%). Ces résultats traduisent l'effet modérateur de l'océan Atlantique, qui continue d'atténuer le réchauffement nocturne même en contexte de changement climatique. À l'opposé, les stations de l'intérieur, plus continentales et souvent situées à plus haute altitude, connaissent une augmentation plus marquée. Marrakech, par exemple, enregistre une hausse de 1,13 °C (9,25 %), tandis qu'Ait Haddou Youssef voit sa Tmin augmenter de 2,32 °C, soit une progression remarquable de 24,64 %.

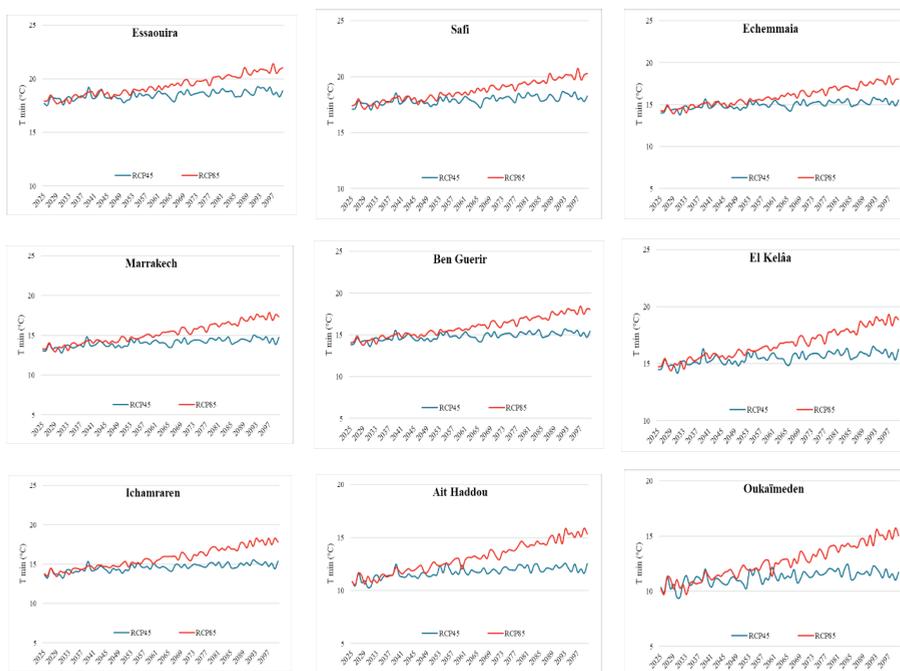


Figure 3. Projections des températures minimales annuelles à l'horizon 2100 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 dans la région Marrakech-Safi.

Cette dynamique est accentuée dans le scénario RCP 8.5, où les températures minimales évoluent de manière plus significative. La zone d'Aït Haddou Youssef enregistre une hausse spectaculaire de 3,67 °C, ce qui représente une augmentation de près de 39 %. Oukaïmeden, à 2629 mètres d'altitude, connaît également un réchauffement important avec une hausse de 1,83 °C (20,83 %). Ces évolutions confirment le phénomène de réchauffement amplifié en altitude, souvent observé dans les régions montagneuses à l'échelle globale. Il s'explique par des modifications du bilan radiatif et des rétroactions liées à l'enneigement et à la couverture nuageuse.

Dans les zones à moyenne altitude, telles qu'El Kelâa des Sraghna, Ben Guerir et Echemmaia, les températures minimales augmentent également de manière notable, avec des hausses comprises entre 1,10 °C et 1,36 °C dans le scénario RCP 8.5, équivalant à une élévation relative de 8 à 10 %. Ces tendances laissent présager des impacts significatifs sur la demande énergétique (notamment en climatisation), la phénologie des cultures et la dynamique des écosystèmes.

### 3.3.2 Projections futures des températures maximales

L'analyse des températures maximales (T<sub>max</sub>) projetées vers l'horizon 2100, en comparaison avec la période de référence 1991-2020 (P0), met en évidence une tendance généralisée à l'augmentation des températures diurnes dans toutes les stations de la région Marrakech-Safi (Fig.4). L'intensité du réchauffement varie selon l'altitude, la localisation géographique et le scénario retenu, illustrant ainsi la complexité des réponses climatiques régionales au changement climatique global.

Sous le scénario RCP 4.5, l'élévation des températures maximales reste modérée mais significative. Les zones côtières telles qu'Essaouira et Safi présentent des

augmentations plus limitées, respectivement de 0,84 °C (4,02 %) et 0,76 °C (3,56 %). Cette faible variabilité s'explique par l'effet modérateur de l'océan Atlantique qui amortit les extrêmes thermiques grâce à l'inertie thermique marine. À l'intérieur de la région, les stations situées dans les plaines et les zones à moyenne altitude enregistrent une hausse plus marquée. À Marrakech, par exemple, la température maximale moyenne passe de 26,8 °C à 28,03 °C, soit une augmentation de 1,21 °C (4,52 %), tandis qu'à Ben Guerir et El Kelâa des Sraghna, les hausses atteignent environ 1,18 à 1,21 °C.

Le réchauffement devient nettement plus prononcé dans les zones d'altitude, notamment à Ichamraren, Aït Haddou Youssef et Oukaïmeden, où les températures maximales augmentent respectivement de 1,33 °C, 1,64 °C et 1,70 °C. En termes relatifs, ces hausses représentent une augmentation allant de 5,24 % à plus de 7 %, confirmant le phénomène de réchauffement amplifié en montagne, déjà mis en évidence pour les températures minimales. Ce phénomène peut être attribué à une série de mécanismes, notamment la diminution de l'albédo liée à la réduction de l'enneigement, des rétroactions atmosphériques spécifiques et une dynamique locale de l'humidité.

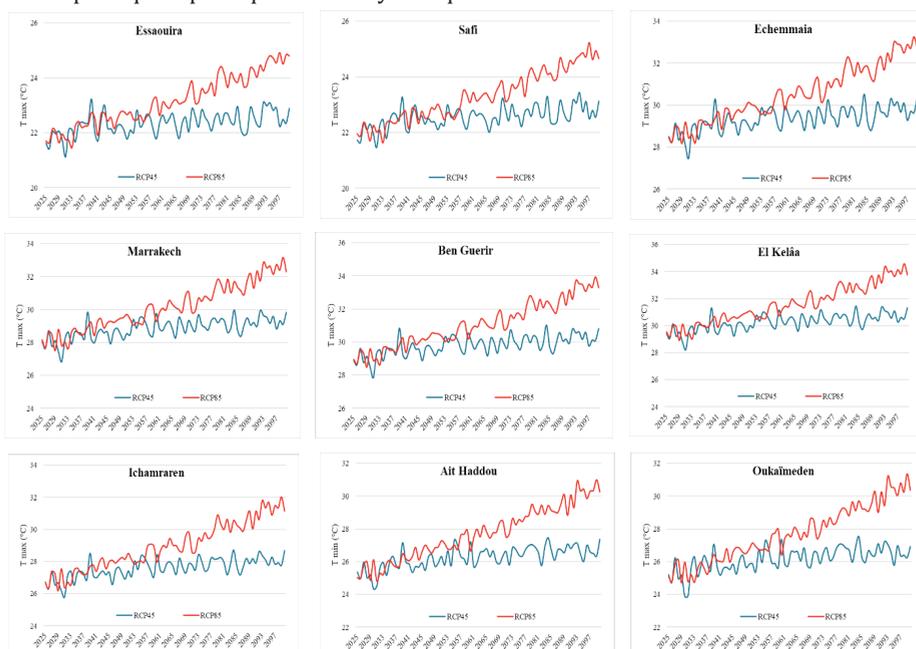


Figure 4. Projections des températures maximales annuelles à l'horizon 2100 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 dans la région Marrakech-Safi.

Sous le scénario RCP 8.5, les augmentations deviennent plus sévères dans toutes les stations, traduisant un futur climatique sensiblement plus chaud. À Essaouira et Safi, les hausses atteignent 0,95 °C (4,54 %) et 0,84 °C (3,94 %) respectivement, tandis que les stations intérieures comme Marrakech, Ben Guerir et El Kelâa des Sraghna enregistrent des augmentations comprises entre 1,41 °C et 1,47 °C, avec un impact thermique plus marqué (5 à 5,5 % d'augmentation). Les stations d'altitude, quant à elles, continuent de se démarquer par une dynamique de réchauffement accentuée : Ait Haddou Youssef passe de 23,60 °C à 25,48 °C (+1,88 °C, soit 7,97 %), et Oukaïmeden enregistre la plus forte

augmentation, atteignant 1,98 °C, soit 8,44 % d'élévation par rapport à la période de référence.

Ces résultats traduisent un réchauffement plus rapide et plus intense dans les zones élevées, ce qui pourrait entraîner des effets écologiques et socio-économiques importants, notamment en matière d'agriculture, de santé publique et de disponibilité en eau. L'augmentation des températures maximales en montagne risque par ailleurs d'accélérer la fonte des neiges, de perturber les régimes hydrologiques et de modifier les conditions de vie dans ces environnements sensibles.

## **Conclusion**

L'analyse combinée des tendances thermiques historiques et des projections futures dans la région de Marrakech-Safi met en évidence une dynamique climatique marquée par un réchauffement significatif, affectant aussi bien les températures minimales que maximales. L'étude révèle une élévation généralisée des températures au cours de la période 1981-2024, avec des hausses particulièrement accentuées dans les zones continentales et montagneuses. Les stations côtières, bien que relativement épargnées par les extrêmes, témoignent également d'un réchauffement latent, attestant d'une homogénéisation progressive du signal thermique à l'échelle régionale.

Les projections climatiques à l'horizon 2100, fondées sur les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, confirment une poursuite, voire une intensification de cette tendance. Les scénarios modérés indiquent des augmentations de température allant de 0,7 à 1,7 °C selon les localités, tandis que les scénarios pessimistes prévoient des hausses pouvant dépasser les 3 °C pour les températures minimales et approcher les 2 °C pour les maximales. Le phénomène de réchauffement amplifié en altitude se confirme avec une intensité accrue dans les stations telles qu'Oukaïmeden et Aït Haddou Youssef. Ce constat soulève des enjeux majeurs en matière de gestion des ressources hydriques, d'adaptation agricole, et de résilience des écosystèmes de montagne.

Dans un contexte semi-aride déjà marqué par une forte variabilité climatique, les résultats obtenus soulignent la vulnérabilité croissante des territoires de Marrakech-Safi face au changement climatique. La hausse projetée des températures minimales pourrait altérer les cycles phénologiques des cultures, accroître la demande énergétique estivale, et impacter la santé humaine. L'élévation des maximales, quant à elle, pose la question de la fréquence accrue des vagues de chaleur extrême, avec des répercussions potentielles sur la mortalité, la productivité et la sécurité alimentaire.

Cette étude met ainsi en lumière la nécessité de renforcer les capacités d'observation climatique à l'échelle régionale et de promouvoir des politiques d'adaptation territorialisées, tenant compte des spécificités topographiques et socio-environnementales locales. À travers une meilleure compréhension des dynamiques thermiques futures, ce travail contribue à poser les fondements d'une gouvernance climatique anticipative, appuyée sur la science, la planification intégrée et l'action territoriale.

## **Références bibliographiques**

- Choukrani, G., Hamimsa, A., Saidi, M. E. M., & Babqiqi, A. (2018). Diagnostic et projection future du changement climatique en zone aride. Cas de la region Marrakech-Safi (Maroc). Larhyss Journal, n°36, 49-63.

- Driouech, F., Stafi, H., Khouakhi, A., Moutia, S., Badi, W., ElRhaz, K., & Chehbouni, A. (2021). Recent observed country-wide climate trends in Morocco. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E855-E874. <https://doi.org/10.1002/joc.6734>
- El Orfi, T. (2023). Quantification, modélisation et usages des ressources en eau dans le Haut Bassin de l'Oum Er Rbia (Amont du barrage Ahmed El Hansali, Maroc) [These de doctorat en cotutelle]. Université Sulttan Moulay Slimane - Maroc et Université de Lorraine - France.
- Giorgi, F. (2019). Thirty Years of Regional Climate Modeling : Where Are We and Where Are We Going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(11), 5696-5723. <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>
- Gourfi, A., Taïbi, A. N., Salhi, S., Hannani, M. E., & Boujrouf, S. (2022). The Surface Urban Heat Island and Key Mitigation Factors in Arid Climate Cities, Case of Marrakesh, Morocco. *Remote Sensing*, 14(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/rs14163935>
- Gumus, V., El Moçayd, N., Seker, M., & Seaid, M. (2023). Evaluation of future temperature and precipitation projections in Morocco using the ANN-based multi-model ensemble from CMIP6. *Atmospheric Research*, 292, 106880. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106880>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V; p. 1552)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC. (2021). *Summary for Policymakers. In : 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. In Press.
- Khomsi, K., Mahe, G., Trambly, Y., Sinan, M., & Snoussi, M. (2016). Regional impacts of global change : Seasonal trends in extreme rainfall, run-off and temperature in two contrasting regions of Morocco. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(5), 1079-1090. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1079-2016>
- Lelieveld, J., Proestos, Y., Hadjinicolaou, P., Tanarhte, M., Tyrlis, E., & Zittis, G. (2016). Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21st century. *Climatic Change*, 137(1), 245-260. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1665-6>
- Najmi, A., Igmoullan, B., Namous, M., El Bouazzaoui, I., Brahim, Y. A., El Khalki, E. M., & Saidi, M. E. M. (2023). Evaluation of PERSIANN-CCS-CDR, ERA5, and SM2RAIN-ASCAT rainfall products for rainfall and drought assessment in a semi-arid watershed, Morocco. *Journal of Water and Climate Change*, 14(5), 1569-1584. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.461>
- OMM. (2017). *Guidelines for the Calculation of Climate Normals (WMO-N° 1203; p. 29 p.)*. Organisation Météorologique Mondiale.

- Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2015). Climate change and Mediterranean agriculture : Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, 147, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.008>
- Schilling, J., Hertig, E., Tramblay, Y., & Scheffran, J. (2020). Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. *Regional Environmental Change*, 20(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01597-7>
- White, J. W., Hoogenboom, G., Stackhouse, P. W., & Hoell, J. M. (2008). Evaluation of NASA satellite- and assimilation model-derived long-term daily temperature data over the continental US. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10), 1574-1584. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.05.017>
- Woillez, M.-N. (2019). Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : Observations, projections et impacts. In *Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : Observations, projections et impacts* (p. 1-33). Agence française de développement. <https://doi.org/10.3917/afd.woill.2019.01.0001>

