

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES EXTRÊMES DE TEMPÉRATURES AU MAROC

Wahib HAMMOUDY¹, Rachid ILMEN², Mohamed SINAN².

¹ Direction Générale de la Météorologie (DGM), Casablanca, Maroc. wahibhammoudy@gmail.com

² Département Hydraulique, Environnement et Climat (HEC), Ecole Hassania des Travaux Publics (EHTP), Casablanca, Maroc. ilmenrachid@gmail.com

² Département Hydraulique, Environnement et Climat (HEC), Ecole Hassania des Travaux Publics (EHTP), Casablanca, Maroc. sinanmohamed1960@gmail.com

Résumé : L'augmentation de l'évolution de certains types d'événements extrêmes a le potentiel de produire des impacts et des dégâts sur les secteurs socio-économiques. Une augmentation de la température minimale et maximale, se manifestant par de forts épisodes de canicule et des vagues de froid se renforcent bel et bien en terme d'intensité, de fréquence et leur durée. Notre étude vise à évaluer les changements climatiques observés en étudiant les tendances observées des indices de la température ainsi que leur significativité. Les résultats montrent que le Maroc a connu une augmentation des extrêmes chauds et une diminution des extrêmes froids sur notre pays à l'exception de quelques points d'observations où la tendance apparaît non significative.

Mots-Clés : extrêmes chauds, réchauffement climatique, tendances observées.

Abstract. The increase in the evolution of certain types of extreme events has the potential to produce impacts and damage on socio-economic sectors. An increase in heat and cold temperature manifested by strong heat waves and cold waves are clearly increasing in terms of intensity, frequency and durability. Our study aims to evaluate the observed climate changes by studying the observed trends of temperature extremes and their significance. The results show that Morocco has experienced an increase in hot and decrease in cold extremes over our country except for some observation points where the trend appears insignificant.

Key words: Hot extremes, global warming, observed trends.

Introduction

L'augmentation de certains types d'événements climatiques extrêmes a le potentiel de produire des impacts qui peuvent être catastrophiques. S'ils se poursuivent, les changements dans toutes les composantes du système climatique persisteront, ce qui augmentera la probabilité de conséquences plus graves et irréversibles pour les populations et les écosystèmes. Selon "l'index de vulnérabilité au changement climatique 2018", les menaces liées au dérèglement climatique font accentuer les extrêmes plus particulièrement dans les continents vulnérables. Les incidences de phénomènes climatiques extrêmes survenus récemment mettent en évidence la grande vulnérabilité de certaines régions à faire face à ce changement.

L'Afrique, considérée comme le dernier continent responsable des émissions de gaz à effet de serre, s'est réchauffée plus rapidement que la moyenne mondiale. Le GIEC confirme dans le 6ème rapport d'évaluation que "depuis 1970, Le rythme du réchauffement climatique s'accélère : la température a augmenté plus rapidement au cours des deux derniers 50 ans voire davantage...les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines ont élevé les températures presque **1,1 °C**".

Situé à l'angle nord-ouest du continent africain, le Royaume du Maroc se caractérise par une situation géographiquement qui présente à la fois de vastes opportunités et de nombreux risques et défis dans la lutte contre le changement climatique. Les études ont mis en évidence que le Maroc subit les effets extrêmes thermiques accentué par les effets de changements climatiques en termes de diversité, d'intensité et d'occurrence, notamment les vagues de chaleurs et les canicules, ces deux phénomènes ont été bel et bien

observés fréquemment durant ces dernières décennies et persisteront pendant une longue durée avec des températures qui atteignent les limites (Driouech et al. 2013 ; Schilling et al. 2020).

C'est dans ce même contexte que s'inscrit notre projet de recherche, qui consiste à évaluer les tendances observées des deux paramètres notamment température maximale et minimale à partir des données observées de plusieurs points d'observations météorologiques de la Direction Générale de la Météorologie (DGM) couvrant les différentes zones climatiques du Maroc. L'évaluation de ces tendances climatiques observées fournira des informations très utiles pour la prise de décision et contribue à accroître la sensibilisation et la compréhension des effets du changement climatique et leur relation avec les extrêmes climatiques (Tramblay et al. 2013, Filahi et al. 2015). Cette évaluation de la tendance sera basée sur l'évaluation de trois indices climatiques notamment le nombre annuel de jours avec au moins 6 jours consécutifs où la température maximale est supérieure au 90ème percentile, le pourcentage des jours chauds et le pourcentage des nuits chaudes.

Cet article sera divisé en 3 sections : la section qui suit est consacrée à la présentation de la méthodologie, des indices climatiques, des données à utiliser et à la définition du test de tendance et de signification, la deuxième section présente les résultats obtenus. Enfin, la dernière section est consacrée à la conclusion de l'étude.

1. Données et Méthodologie

1.1. Données

La base de données utilisée pour évaluer les changements observés dans cette étude est constituée des observations quotidiennes des températures maximales et minimales sur la période 1998-2018 (la période commune entre les points d'observations) recueillies à partir du réseau de la Direction Générale de la Météorologie (DGM). Afin de couvrir toute la zone d'étude qui est le Royaume du Maroc, 29 points d'observation météorologique ont été sélectionnés (Figure 1). Un prétraitement était nécessaire avant tout calcul, pour cette raison ces données ont passé plusieurs tests de contrôle de qualité, notamment, le contrôle des valeurs répétées successivement 4 fois, le contrôle à l'aide des fourchettes, le contrôle des données manquantes, le contrôle des valeurs limites à l'aide des boîtes à moustaches, le contrôle du cycle saisonnier ainsi que le contrôle des valeurs manquantes. Suite à ces différents tests, plusieurs valeurs ont été vérifiées et les valeurs manquantes ont été omises de l'analyse. En plus du contrôle de qualité, nous avons également effectué un contrôle d'homogénéité des données afin de vérifier les fluctuations dues aux facteurs non climatiques qui affectent les tendances d'une série temporelle (Alexandersson, 1986).

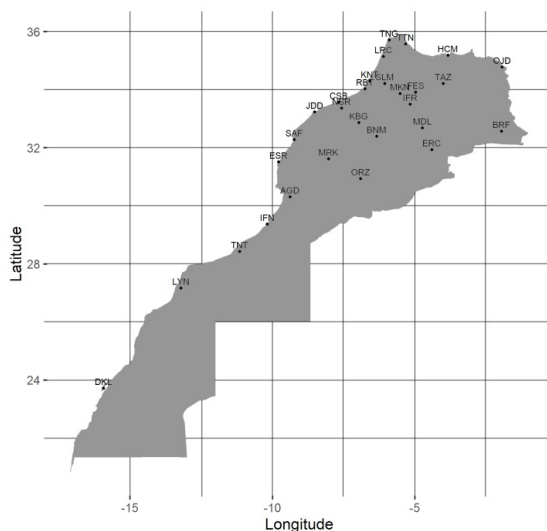


figure 1. Localisation de la zone d'étude, Maroc.

1.2. Méthodologie

Ce projet de recherche consiste tout d'abord à calculer trois indices climatiques (définis dans la sous-section suivante) sur l'ensemble des points d'observation étudiés (voir 2.1), ces indices ont été générés à partir des deux paramètres météorologiques observés suivants : la température maximale, la température minimale. Nous avons ensuite procédé à la mesure de leurs tendances à l'aide du test de Sen's Slope, ainsi que de leur significativité selon le test de Mann-Kendall (ces deux tests seront définis dans ce qui suit). Les résultats obtenus seront pointés sur la carte par des triangles soit vers le haut (tendance à la hausse), soit vers le bas (tendance à la baisse) soit par des croix noires (absence de tendance). En ce qui concerne la significativité, le triangle rempli signifie que la tendance est significative sinon elle est non significative.

1.3. Indices Climatiques

Il convient de noter que l'extension CLIMPACT2 a été utilisée sous langage R pour calculer un ensemble de 3 indices climatiques ainsi que les percentiles. Ces indices peuvent être utilisés (Tableau 1) pour décrire l'état du changement climatique et les variations statistiques du climat, les extrêmes et les tendances qui font l'objet de ce projet de recherche. Il est à noter que ces indices ne sont déterminés que si au moins 70% des données sont disponibles (Thomas R. 1999).

Tableau 1. La définition des indices climatiques utilisés ainsi que leur unité.

Indice	Définition	Unité
WSDI	Le nombre annuel de jours avec au moins 6 jours consécutifs où la température maximale est supérieure à 90ème percentile (la période de calcul des percentiles est 1998-2018).	Jour
TX90p	le pourcentage de jours où la température maximale est supérieure à 90ème percentile (la période de calcul des percentiles est 1998-2018).	%
TN90p	Le pourcentage de jours où la température minimale est supérieure à 90ème percentile (la période de calcul des percentiles est 1998-2018).	%

1.4. Test de Tendance : Sen's Slope

Parmi les inconvénients de la méthode linéaire destinée à estimer la pente d'une ligne de régression, cette méthode n'est valable lorsque les éléments de données ne correspondent pas à une ligne droite ; elle est également sensible aux valeurs aberrantes. Pour éviter ces problèmes et avoir des résultats pertinents et significatifs. Nous avons procédé à l'utilisation d'une méthode, fréquemment utilisées, qui est la pente de régression, c'est une méthode plus robuste et fortement recommandée, appelée pente de Sen (Sen, 1968).

Pour l'ensemble des paires (i, x_i) où x_i est une série temporelle. La pente de Sen est définie par la médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de points dans la série et présentée comme suit :

$$\text{Sen's Slope} = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}; i < j\right)$$

1.5. Test de significativité : Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall est un test non paramétrique, utilisé pour déterminer la tendance identifiable dans une série temporelle continue ne présentant pas de ruptures et qui comporte éventuellement une composante saisonnière (Mann, 1945 ; Kendall, 1975). Il est fortement recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale. Notons qu'une série temporelle continue et bien contrôlée de 20 ans est suffisante pour avoir des résultats significatifs.

Il consiste à supposer une hypothèse initiale H_0 : "qu'il n'y a pas de tendance", la valeur de S montre que la tendance sera significative ou non. Elle est initialisée à 0 au début, puis elle est incrémentée soit à 1 soit à 0. Cette valeur de S permet de conclure à la fin sur l'existence ou l'absence de la tendance (Fatima Driouech., 2010).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} S_k = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sig}(x_j - x_k) \quad \text{et} \quad S_i = \sum_{i < k}^n \text{sig}(x_k - x_i)$$

Avec :

$$\text{sig}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

2. Résultats et discussion

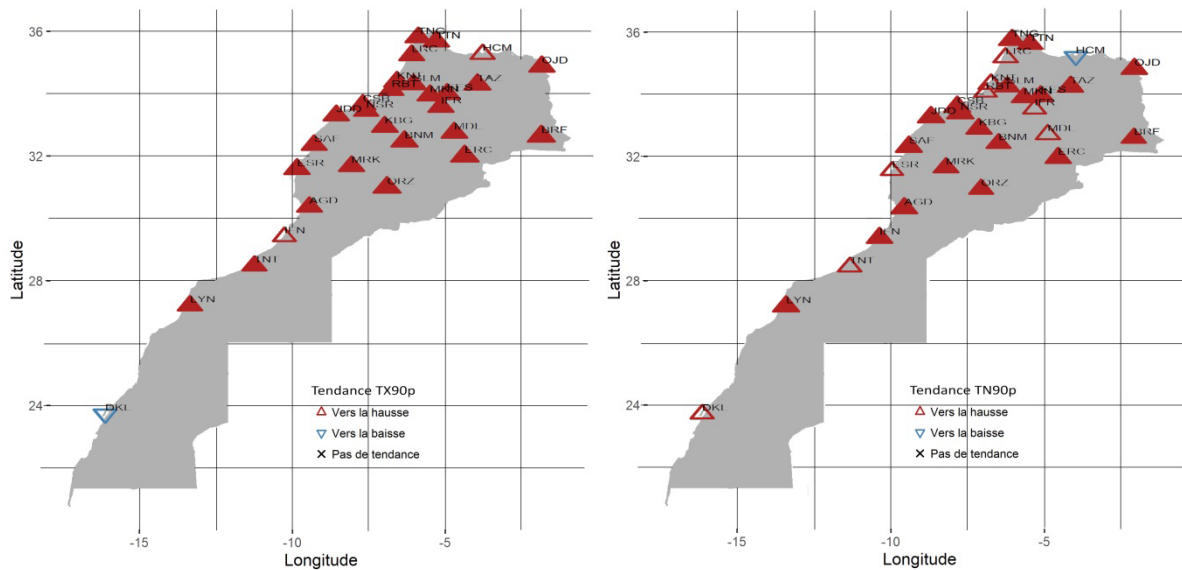


figure 2. Tendances observées des indices TX90p (à gauche) et TN90p (à droite) des 29 points d’observations sur la période 1998-2018.

Selon la figure 2, le pourcentage de jours où la température maximale est supérieure à 90ème percentile et le pourcentage de jours où la température minimale est supérieure à 90ème percentile montrent une nette augmentation presque généralisée sur l’ensemble des points d’observation étudiés durant la période d’étude 1998-2018 (figure 2). En effet, l’indice TX90p montre une tendance significative (notamment une valeur limite de p-value à 0,05 est souvent utilisée pour conclure sur la significativité de la tendance) à la hausse pour la quasi-totalité des points d’observations sauf à Al-Hoceima, Sidi Ifni et Dakhla. Cette hausse varie entre 3,29 jour/décennie à Rabat (RBT) et 19,35 jour/décennie à Ouarzazate (ORZ). De la même façon, le pourcentage de jours où la température minimale est supérieure à 90ème percentile indique une hausse, généralement significative et varie entre 1,8 jour/décennie à Tétouan (TTN) et 14,9 jour/décennie à JADIDA (JDD).

Tableau 2. Les tendances observées (Sen’s Slope) statistiquement significatives de l’indice TX90p entre 1998 et 2018 de quelques stations.

Station	RBT	ORZ	FES	LRC	OJD	MRK	IFR	BRF	MDL
Tendances	0.09	0.53	0.35	0.25	0.29	0.29	0.2	0.51	0.38

Tableau 3. Les tendances observées (Sen’s Slope) statistiquement significatives de l’indice TN90p entre 1998 et 2018 de quelques stations.

Station	TTN	BNM	FES	TAZ	OJD	JDD	IFR	AGD	TNG
Tendances	0.05	0.16	0.23	0.32	0.32	0.41	0.1	0.3	0.27

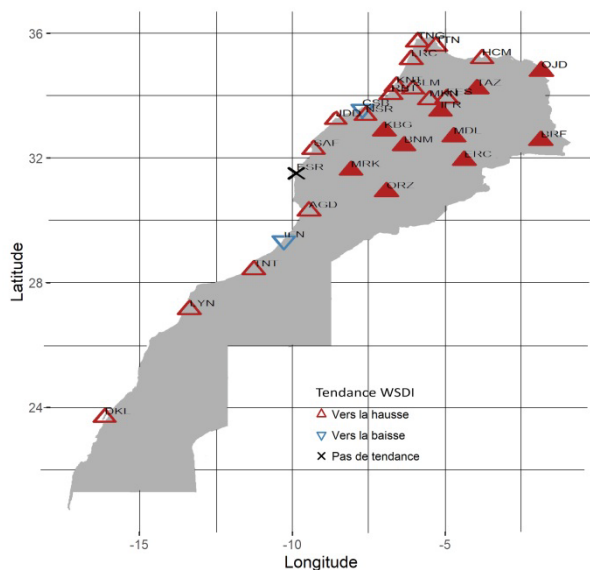


Figure 3. Tendances observées de l'indice WSDI des 29 points d'observations sur la période 1998-2018.

L'évolution de l'indice du nombre annuel de jours avec au moins 6 jours consécutifs où la température maximale est supérieure à 90^{ème} percentile entre 1998 et 2018 est caractérisée par des tendances à la hausse significative vers l'Est et le sud des montagnes de l'atlas. Ces tendances allant de 1,83 jours/décennie à Oujda (OJD) jusqu'à 7 jours/décennie au niveau de Bouarfa (BRF).

Tableau 4. Les tendances observées (Sen's Slope) statistiquement significatives de l'indice WSDI entre 1998 et 2018 de quelques stations.

Station	OJD	BRF	TAZ	MDL	ORZ	MRK	BNM	KBG	IFR
Tendances	0.05	0.19	0.06	0.09	0.12	0.11	0.11	0.15	0.08

Conclusion

Cette étude examine les évolutions des tendances des indices climatiques observés au Maroc sur la base des paramètres observés notamment les températures maximales et minimales quotidiennes de 29 points d'observations sur la période 1998-2018. Des contrôles de qualité de toutes les données ont été effectués avant le calcul des trois indices climatiques qui sont le pourcentage de jours où la température maximale est supérieure à 90^{ème} percentile, le pourcentage de jours où la température minimale est supérieure à 90^{ème} percentile et le nombre annuel de jours avec au moins 6 jours consécutifs où la température maximale est supérieure à 90^{ème} percentile.

Les résultats obtenus des indices TX90p et TN90p montrent des changements significatifs à la hausse au cours du temps, presque généralisés sur l'ensemble du pays à l'exception de quelques points d'observation, reflétant une tendance vers des conditions plus chaudes. Vers l'Est du pays et le sud des montagnes de l'atlas, une hausse significative est remarquée de l'indice WSDI. Les autres points d'observations montrent une tendance à la hausse non significative à l'exception de Casablanca (CSB) et Sidi-Ifni (IFN) où la tendance est vers la baisse mais non significative selon le test de Mann-Kendall.

En comparaison avec les résultats réalisés, l'augmentation généralisée des tendances significatives observées des températures au Maroc est cohérente avec celles obtenues dans les régions méditerranéennes et confirme le réchauffement climatique observé (par exemple, GIEC, 2013 ; Driouech et El Rhaz, 2017 ; GIEC, 2018 ; Knutti et al, 2015 ; Driouech et al., 2020).

Remerciement : Nous sommes reconnaissants de la qualité d'encadrements des directeurs de thèse ainsi que les professeurs et examinateurs du laboratoire Hydrogéologie, Traitement et Epuration des Eaux et

Changements Climatiques (HGT2E2C) pour leur contribution, leur aide précieuse et leur patience. Un grand merci au comité d'organisation du 35^{ème} colloque de l'AIC.

Bibliographie

- Driouech, F., Ben Rached, S. et Al Hairech, T., 2013. *Variabilité et changement climatiques dans les pays d'Afrique du Nord*. Dans: Sivakumar, MVK, Selvaraju, RLR et Hamdan, I. (Eds.) *Climate Change and Food Security in West Asia and North Africa*. Dordrecht Heidelberg New York Londres : Springer.
- Filahi, S., Tanarhte, M., Mouhir, L., El Morhit, M. et Tramblay, Y.j, 2015. *Tendances des indices des extrêmes journaliers de température et de précipitations au Maroc*. *Climatologie théorique et appliquée*, **124** (3–4), 959 – 972.
- Schilling, J., Hertig, E., Tramblay, Y. and Scheffran, J., 2020. *Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa*. *Regional Environmental Change*, **20**, 15.
- Tramblay, Y., El Adlouni, S. et Servat, E., 2013. *Tendances et variabilité des indices de précipitations extrêmes en Afrique du Nord*. *Risques naturels et sciences du système terrestre*, **13**, 3235 – 3248.
- Thomas R. Karl, Neville Nicholls, and Anver Ghazi. CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. 1999. *In Weather and Climate Extremes*, pages 3–7. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Fatima Driouech. *Evaluation d'impacts potentiels de changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya au Maroc*, 2010.
- Sen, P.K. *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau*. *Journal of the American Statistical Association*, **63**, 1379–1389, 1968.
- GIEC, (IPCC), 2013. Résumé pour les décideurs. Dans: Stocker, TF, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, SK Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et PM Midgley (Eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis : Cambridge University Press.
- Driouech, F., El Rhaz, K., 2017. *ALADIN-Climate projections for the Arab region. Rapport d'évaluation du changement climatique arabe, Commission économique et sociale des Nations Unies pour l'Asie occidentale « ESCWA »*. Rapport principal. E/ESCWA/SDPD/2017/RICCAR/Rapport.
- Alexandersson, H. *Un test d'homogénéité appliqué aux données de précipitations*. *Journal de climatologie*, **6** (6), 661 – 675, 1986.
- GIEC, 2018 : *Résumé à l'intention des décideurs*. Dans : *Réchauffement climatique de 1,5°C. un rapport spécial du GIEC sur les impacts d'un réchauffement climatique de 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels et les voies d'émission mondiales de gaz à effet de serre connexes, dans le contexte du renforcement de la réponse mondiale à la menace du changement climatique, du développement durable et des efforts visant à éradiquer la pauvreté* . Genève, Suisse : Organisation météorologique mondiale, 32 pp.
- Knutti, R., Rogelj, J., Sedláček, J. et Fischer, EM, 2015. *Une critique scientifique de l'objectif de changement climatique de deux degrés*. *Nature Géoscience*, **9**, 13 – 18.
- Fatima Driouech, Hafid S., Abdou K., Sara M., Wafae B., Khalid ElRhaz, Abdelghani C., 2020. *Recent observed country-wide climate trends in Morocco*. *International Journal of Climatology*.