



MétéoAlgérie

الديوان الوطني للأرصاد الجوية
Office National de la Météorologie

Journal Algérien de Météorologie Appliquée



ISSN 3088-7925

Volume 8, Novembre 2024.

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère des Transports
Office National de la Météorologie

Journal Algérien de Météorologie Appliquée (JAMA)

Novembre 2024

Contact

Adresse: Office National de la Météorologie
1, Avenue Mohamed Khemisti, BP. 153
Dar El Beida, Alger, Algérie

Courriel: revue.jama@meteo.dz

Site Web: www.meteo.dz

Comité d'édition

Directeur: Mr MOKHTARI Mohamed (Office National de la Météorologie)

Membres: Mme.ABER Nadia (Office National de la Météorologie)

Département de communication (Office National de la Météorologie)

Comité de lecture

Directeur: Mr. MOKHTARI Mohamed

Membres: Mr. ABANE Hakim (Office National de la Météorologie)
Mr. AMBAR Abdenour (Office National de la Météorologie)
Mr. CHELLI Bassem (Office National de la Météorologie)
Mr. HAMMADI Sid Ahmed (Office National de la Météorologie)
Mr. SAHABI ABED Salah (Office National de la Météorologie)
Mr. BERREBIA Mohamed (Institut Hydrométéorologique de Formation et de
Recherches)
Mr. BOURAHLA Mohamed (Office National de la Météorologie)
Mr. ABDELLI Karim (Office National de la Météorologie)
Mr. LAGHA Mohand (Université de BLIDA)
Mr. HEMDANE Yacine (Université des Sciences et de la Technologie Houari
Boumediène)

Mot du Directeur Général

Ce **Numéro 8** de la revue **JAMA** constitue une contribution significative à l'enrichissement de nos connaissances dans le domaine des sciences du climat et des changements climatiques, particulièrement en ce qui concerne l'Algérie.



Les articles présentés dans cette édition offrent une vision globale et détaillée de l'état actuel du climat en Algérie et de ses projections à l'horizon 2100. Deux études se concentrent sur l'évolution des températures selon les scénarios SSP245 et SSP585, ainsi que sur la sécheresse prévue d'ici 2100. Deux autres travaux explorent les variations récentes des températures moyennes et des précipitations dans le pays. Une étude supplémentaire propose une analyse régionale des extrêmes de précipitations.

Le contenu scientifique de ces articles est d'une importance cruciale, en particulier pour les décideurs impliqués dans les domaines de l'environnement et des changements climatiques.

La publication de ce numéro n'aurait pas été possible sans l'engagement et la participation active de l'équipe éditoriale et du comité de lecture, à qui j'adresse mes sincères remerciements. Leur rigueur, leur dynamisme, leur disponibilité et leur esprit d'équipe ont été des atouts majeurs tout au long du processus, depuis la révision des articles jusqu'à la production finale.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers les auteurs, les ingénieurs de l'**ONM**, et les jeunes chercheurs qui ont généreusement partagé leurs travaux et réflexions avec le comité de publication de **JAMA**. Grâce à leur engagement, cette huitième édition a pu voir le jour.

Enfin, j'encourage vivement les cadres de l'**ONM** à poursuivre leurs efforts en matière de recherche et d'innovation. Je rappelle à la communauté scientifique que, comme à l'accoutumée, les articles publiés dans ce numéro seront accessibles via le site internet de **Météo Algérie** (www.meteo.dz).

Bonne lecture à toutes et à tous !

A handwritten signature in black ink, which appears to read 'Brahim. IHADADENE'. The signature is stylized and fluid.

Mr. Brahim. IHADADENE

Directeur Général de l'Office National de la Météorologie

Sommaires des Articles

- **Mahmoud HAOUARI** Evolution récente des températures moyennes en Algérie 09–16
- **Kartouche Fatima** Étude de l'effet des courants de surface sur les caractéristiques des vagues simulées par WW3 17–25
- **KERTALI Fouzia** Analyse fréquentielle des précipitations maximales et Régionalisation des intensités maximales du modèle de Montana en Algérie. 26–34
- **ABANE Hakim** Projections Climatiques en Algérie : Analyse des Évolutions de Températures selon les Scénarios SSP245 et SSP585. 35–41
- **Zakaria BENGHABRIT** Étude des projections climatiques sur l'Algérie à l'horizon 2100 : cas de la sécheresse 42–48
- **Gassi Ahmed** Etude de la variabilité des extrêmes pluviométriques dans la région de Constantine 49–56

Evolution récente des températures moyennes en Algérie

Mahmoud HAOUARI^a

Résumé

Cette étude examine l'évolution récente des températures moyennes en Algérie sur la période la plus récente de 1990 à 2023, coïncidant avec un réseau d'observations plus étendu qu'avant 1990 d'une part, et la période la plus chaude jamais observée sur la planète, d'autre part. Étant donné que l'Algérie est un vaste pays, cette évolution est étudiée dans cinq régions climatiques homogènes du point de vue de la température moyenne. Bien que le réchauffement observé sur la planète soit également observable en Algérie, il ne se produit pas de la même manière dans l'ensemble du pays et à l'intérieur des cinq régions ainsi définies.

Mots-clés : Surveillance du climat, réchauffement, Algérie, période récente.

^aIngénieur en Météorologie

Table des matières

1	Introduction :	1
2	Matériel et Méthodologie	1
2.1	Données utilisées	1
2.2	Pré-traitement des données	2
2.3	Homogénéisation des séries mensuelles	2
2.4	Calcul des normales mensuelles, annuelles et l'anomalie thermique	2
3	Régionalisation des températures mensuelles moyennes	2
4	Résultats et Discussion	4
4.1	Analyse globale	4
4.2	Analyse régionale	5
5	Conclusion	7
	Références	8

1. Introduction :

Le 12 janvier dernier l'OMM (OMM 2024), a officiellement confirmé que 2023 est de loin l'année la plus chaude jamais enregistrée. La température moyenne mondiale de 2023 dépasse les valeurs préindustrielles de 1.45 °C . Les mois de Juillet et août ont été les deux mois les plus chauds jamais enregistrés. Depuis les années 1980, chaque décennie est plus chaude que la précédente. Ces neuf dernières années ont été les plus chaudes jamais observées (figure 1), selon l'OMM (OMM, 2024). L'objectif de cette étude tente d'analyser les séries de température moyennes de l'Algérie sur la période la plus récente (1990-2023) pour pouvoir répondre aux questions suivantes :

- Ce réchauffement est-il observable dans notre pays?
- Est-il en conformité avec la tendance planétaire?
- Toutes les régions du pays se comportent elles de la même manière?

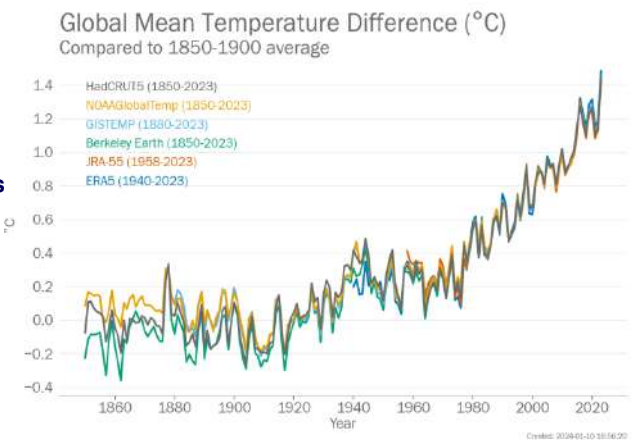


FIGURE 1. Evolution de l'anomalie thermique mondiale en (°C) par rapport à la normale 1850-1900 (source OMM, 2024)

2. Matériel et Méthodologie

2.1 Données utilisées

Les données utilisées proviennent du réseau professionnel de l'ONM, sous formes de séries mensuelles de la température maximale moyenne et de la température minimale moyenne sur la période la plus récente entre 1990 à 2023. Les séries de données ont été sélectionnées suivant le nombre d'années disponibles sur la période 1990-2023. Ces

séries contiennent moins de 5% de données manquantes ou rejetées par le contrôle de qualité.

2.2 Pré-traitement des données

Les données ont été validées par un contrôle de qualité qui identifie les valeurs aberrantes, puis procède à leur correction. Les données manquantes ont été rattrapées par une méthode d'imputation multiple basée sur l'analyse en composante principale (Josse J et al. (2011) et Josse J et al. (2012)) en utilisant le package missMDA (Josse J et al. (2016)) sous le langage R (R Core Team (2023)).

2.3 Homogénéisation des séries mensuelles

Les séries d'observations climatologiques sont souvent contaminées par des événements artificiels (urbanisation, changements de méthodes de mesure...etc.) qui introduisent des erreurs dans l'estimation de la variabilité naturelle du climat d'un lieu ou d'une région donnée. Pour résoudre ce problème, plusieurs méthodes sous forme d'algorithmes ont été développées pour rendre homogène ces séries. Une revue de ces méthodologies sont décrites dans les travaux de Peterson et al. (1998) et Aguilar et al. (2003).

Il existe un ensemble de packages et softwares résumés dans la page web [] disponibles pour les climatologues qui permettent d'appliquer des procédures d'homogénéisation des séries climatologiques.

Pour notre part, nous avons utilisé le package climatol (<https://CRAN.R-project.org/package=climatol>) qui possède des fonctions pour la visualisation graphique, le contrôle de qualité, le comblement des valeurs manquantes et surtout l'homogénéisation des variables climatologiques. Notre choix est motivé par sa simplicité d'utilisation, sa documentation riche et surtout sa maintenance et sa mise à jour régulière. Ces fonctions sont décrites dans Guijaro JA (2023a).

La méthode de climatol est fortement dépendante des séries de différence entre les séries candidates et les séries de références. Elle est basée sur l'application du test SNHT (Standard Normal Homogenization Test (Alexandersson and Moberg, 1997) pour détecter les ruptures d'homogénéités dans les séries d'observations. Les séries des différences sont estimées par une moyenne pondérée par les stations les plus proches et les plus corrélées aux séries de références. La fiabilité de l'homogénéisation et du rattrapage des données manquantes est fortement liée à la corrélation. Le processus débute par la normalisation des séries brutes et la construction des séries de références (jusqu'à dix, si disponible) pour chaque série candidate, mais il n'utilise que quatre pour la correction des séries hétérogènes. Ce processus est itératif, jusqu'à la correction de toutes les ruptures (Guijaro JA (2023b)). Ainsi, les séries mensuelles de température maximales et minimales sur la période 1990-2023, validées et complétées ont été homogénéisées avec les fonctions de climatol.

2.4 Calcul des normales mensuelles, annuelles et l'anomalie thermique

Une fois, les séries ont été complétées (sans lacunes) et homogénéisées, nous avons calculés les normales mensuelles des températures maximales et minimales sur la dernière période de référence 1991-2020, en respectant les recommandations de l'OMM (WMO(2017)). Ces séries ainsi obtenues serviront aux calculs des anomalies de la température moyenne.

Enfin, l'anomalie thermique d'une année donnée est calculée comme la différence entre sa température moyenne et sa normale (1991-2020).

3. Régionalisation des températures mensuelles moyennes

Comme l'Algérie est un vaste pays aux climats contrastés, il était important d'examiner l'évolution des températures moyennes sur les différentes régions climatiquement homogènes du point de vue des températures moyennes mensuelles. A cet effet, la classification hiérarchique ascendante avec le choix d'une distance euclidienne comme mesure de proximité entre les individus (stations) et comme critère d'agrégation, la méthode de Ward qui permet d'obtenir des classes de plus en plus compactes et de plus en plus éloignées entre-elles, c'est à dire qui minimise la distance intra-classe et maximise les distances inter-classes (Everitt.B (1974) et Hartigan.J.A (1975)).

Les résultats (figure 2), montrent que deux types de climat divisant l'Algérie entre le nord et le sud se dégagent d'une façon évidente, confirmée par la majorité des indices statistiques qui mesurent la qualité de la classification.

Par contre, notre choix en tant que climatologue, s'est porté sur une régionalisation plus fine en cinq classes (figure 3). Ce choix est conforté d'une part par la répartition géographique logique des classes (figure 3), et d'autre part, par le tableau N°1 des statistiques de chaque classe.

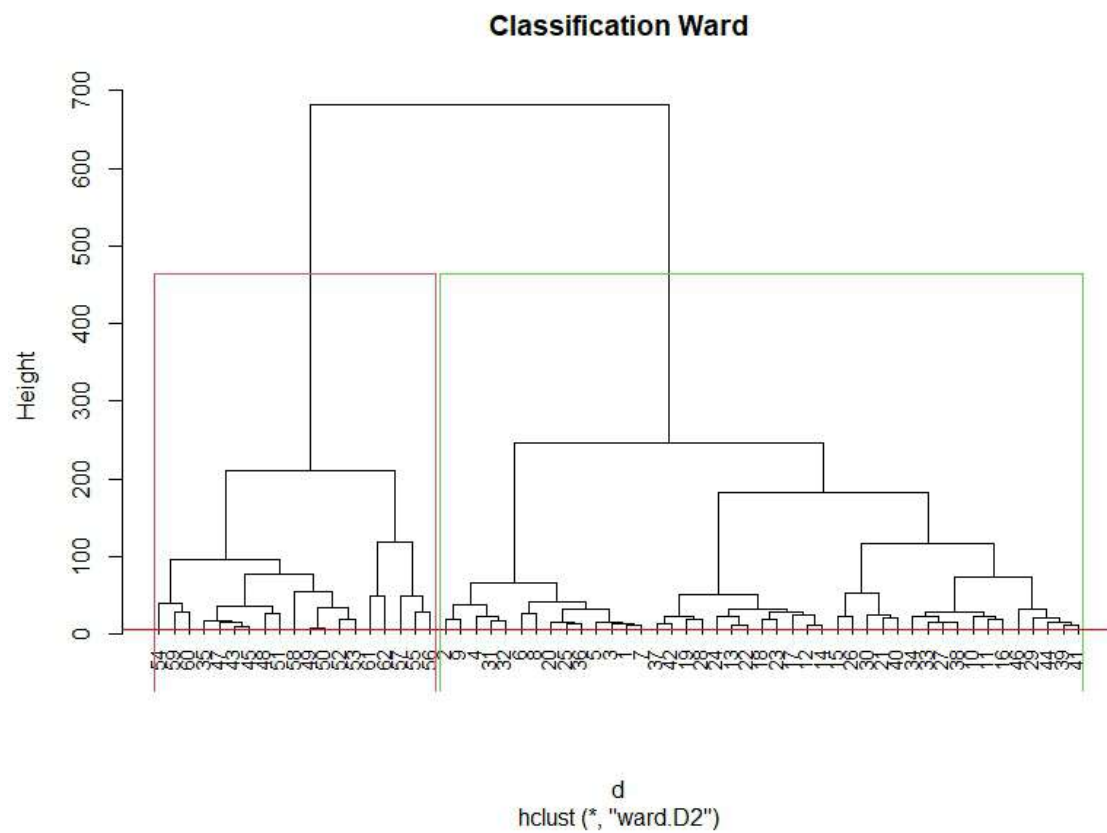


FIGURE 2. Dendrogramme pour 2 classes

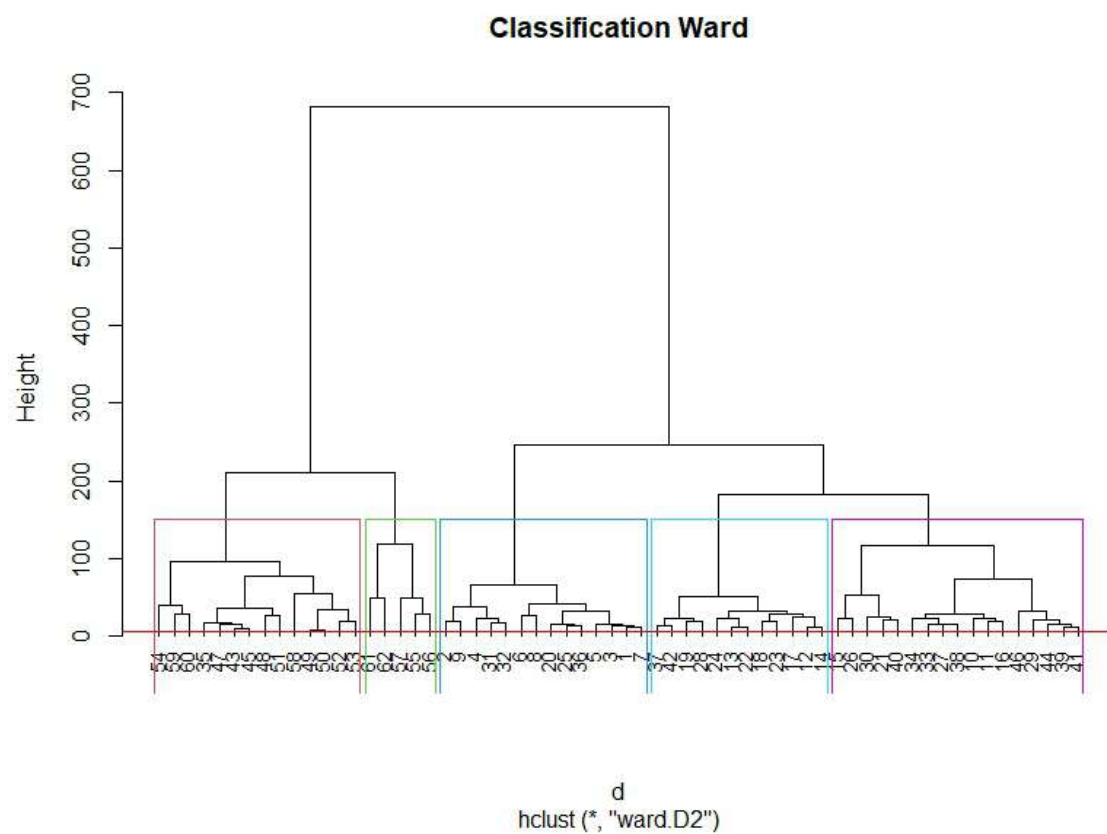


FIGURE 3. Dendrogramme pour 5 classes

Dans la répartition géographique des classes, on remarque que la longitude (ouest-est), la proximité de mer (méditerranée et océan atlantique), la latitude (nord-sud) et l'altitude sont les facteurs déterminant de la variation de la température moyenne en Algérie.

TABLE 1. Moyennes des températures annuelles (°C) des 5 classes.

Région	T maximale (°C)	T minimale (°C)	T moyenne (°C)
Littoral	23,54	13,79	18,67
Intérieur ouest	24,53	11,47	18,00
Intérieur est	21,88	9,38	15,63
Sahara central	30,10	15,87	22,98
Extrême sud	34,75	18,67	26,71

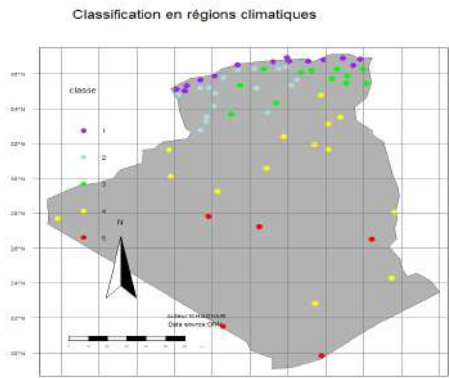


FIGURE 4. Représentation géographique des 5 classes climatiques.

Dans la figure 4, on distingue les cinq régions climatique- ment homogènes dénommées : littoral (en violet), intérieur ouest (en bleu), intérieur est (en vert), sahara central (en jaune) et extrême sud (en rouge). Dans le tableau N°1, les cinq classes ainsi définies ont des moyennes significative- ment différentes sauf entre les classes littoral et intérieur ouest. Dans ce cas, la différence s'explique par l'amplitude thermique (différence entre la température maximale et la température minimale).estimée à plus de 3 °C entre ces deux classes : ainsi le climat intérieur ouest est plus continentale que le climat du littoral. Dans le tableau N°1 , la magnitude de la température moyenne annuelle illustre les climats contrastés sauf peut-être entre le littoral et l'intérieur ouest qui peut s'expliquer par une différence d'amplitude de plus de 3 °C entre les deux climats.

4. Résultats et Discussion

Pour être en conformité avec les centres mondiaux de surveillance du climat, nous analyserons l'évolution an- nuelle et mensuelle de l'anomalie thermique. L'anomalie thermique étant définie comme la différence de la tempéra- ture moyenne d'une année donnée avec sa normale calculée sur la période 1991-2020.

4.1 Analyse globale

L'évolution chronologique de l'anomalie thermique an- nuelle sur tout le pays sur la période 1990-2023 (figure 5) nous montre que :

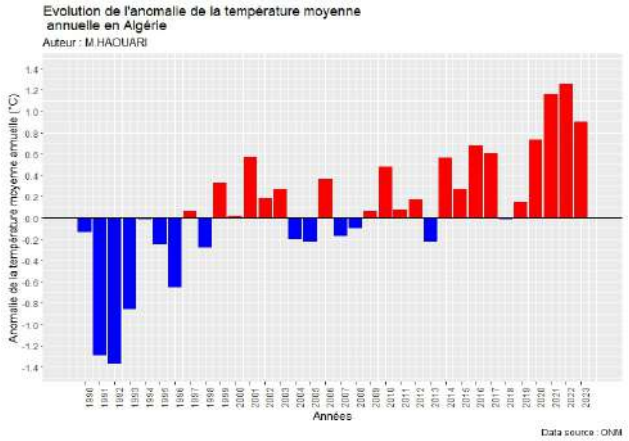


FIGURE 5. Évolution chronologique de l'anomalie thermique moyenne annuelle sur l'Algérie (°C) de 1990 à 2023

- La dernière décennie de 2014-2023 est la décennie la plus chaude jamais observée avec une augmentation moyenne de 0.63 °C par rapport à la normale annuelle nationale estimée à 19.37 °C.
- Les 4 dernières années de 2020-2023 mentionnées dans le tableau 2 sont les plus chaudes jamais obser- vées avec, dans l'ordre, 2022, 2021, 2023 et 2020.
- Les 3 dernières années occupent le podium dans l'ordre suivant : 2022, 2021 et 2023 (tableau 2).
- L'année la plus chaude jamais observée est l'année 2022 avec une augmentation de 1.25 °C par rapport à sa normale.
- L'année la plus récente 2023 occupe la troisième place avec une augmentation de 0.90 °C. Néanmoins, l'aug- mentation de l'anomalie de la température maximale moyenne est du même ordre de grandeur que celle de l'année la plus chaude, 2022, soit 1.36 °C (Tableau 2).

TABLE 2. Anomalie thermique moyenne annuelle sur la période 2020-2023 (°C) des températures maximales, minimales et moyennes.

Année	Tmax anomalie (°C)	Tmin anomalie (°C)	Tmoy anomalie (°C)
2020	0.89	0.57	0.73
2021	1.21	1.10	1.16
2022	1.36	1.14	1.25
2023	1.36	0.45	0.90

Examinons maintenant, la distribution mensuelle de cette anomalie, tout d'abord, pour la décennie 2014-2023, décennie la plus chaude jamais observée : On constate (fi- gure 5) que le réchauffement se distribue sur l'ensemble des

12 mois de l'année, mais pas d'une façon équitable. Ce sont les mois de mars suivi du mois de janvier qui se réchauffent le moins. Du mois d'avril jusqu'à la fin de l'année, soit 9 mois consécutifs, l'augmentation de la température est d'au moins de 0.45 °C pour chaque mois. Le mois de septembre est celui qui se réchauffe le plus (+1.00°C), suivi du mois d'avril (+0.90 °C), du mois de juillet (+0.89 °C) et du mois de décembre (+0.74 °C). Durant la saison estivale, saison la plus chaude de l'année, c'est le mois de juillet qui se réchauffe le plus. .

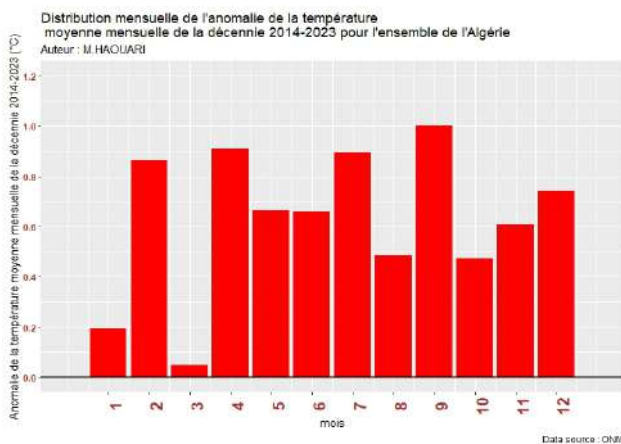


FIGURE 6. Distribution mensuelle de l'anomalie thermique calculée sur la période 2013-2023 sur l'ensemble de l'Algérie

En 2023, on remarque que 10 mois ont été plus chauds que la normale, surtout les mois de juin au mois de décembre avec un mois de juillet très exceptionnel de +2.96 °C sur tout le pays, il devient ainsi le mois le plus chaud jamais observé. Les mois les plus chauds sont dans l'ordre, juillet, (+2.96 °C), octobre (+1.90 °C), novembre (+1.58 °C) et septembre (+1.24 °C). La saison la plus chaude reste l'automne (+1.57 °C) suivi de près de la saison d'été (+1.23 °C). De même en 2022 (figure 6), 10 mois ont été plus chauds que la normale, surtout la période du mois de juin au mois de décembre. Le mois le plus chaud, très exceptionnel, est de loin le mois de décembre devenant ainsi le mois de décembre le plus chaud jamais observé. Les mois les plus chauds sont dans l'ordre, décembre (+3.22 °C), juin (+2.59 °C), septembre (+2.20 °C) et octobre (2.10 °C). La saison d'automne reste la plus chaude (+1.97 °C) suivie de la saison d'été (+1.51 °C).

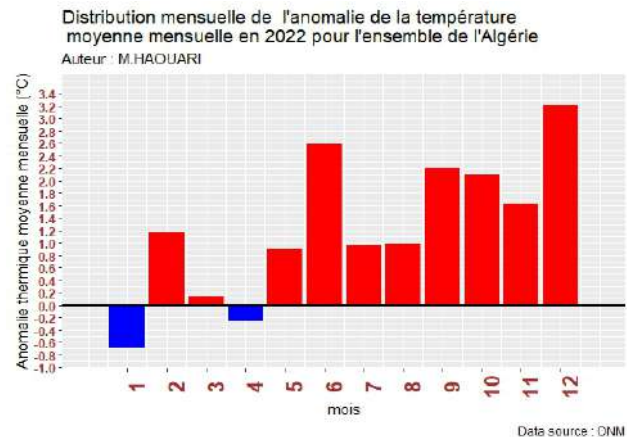
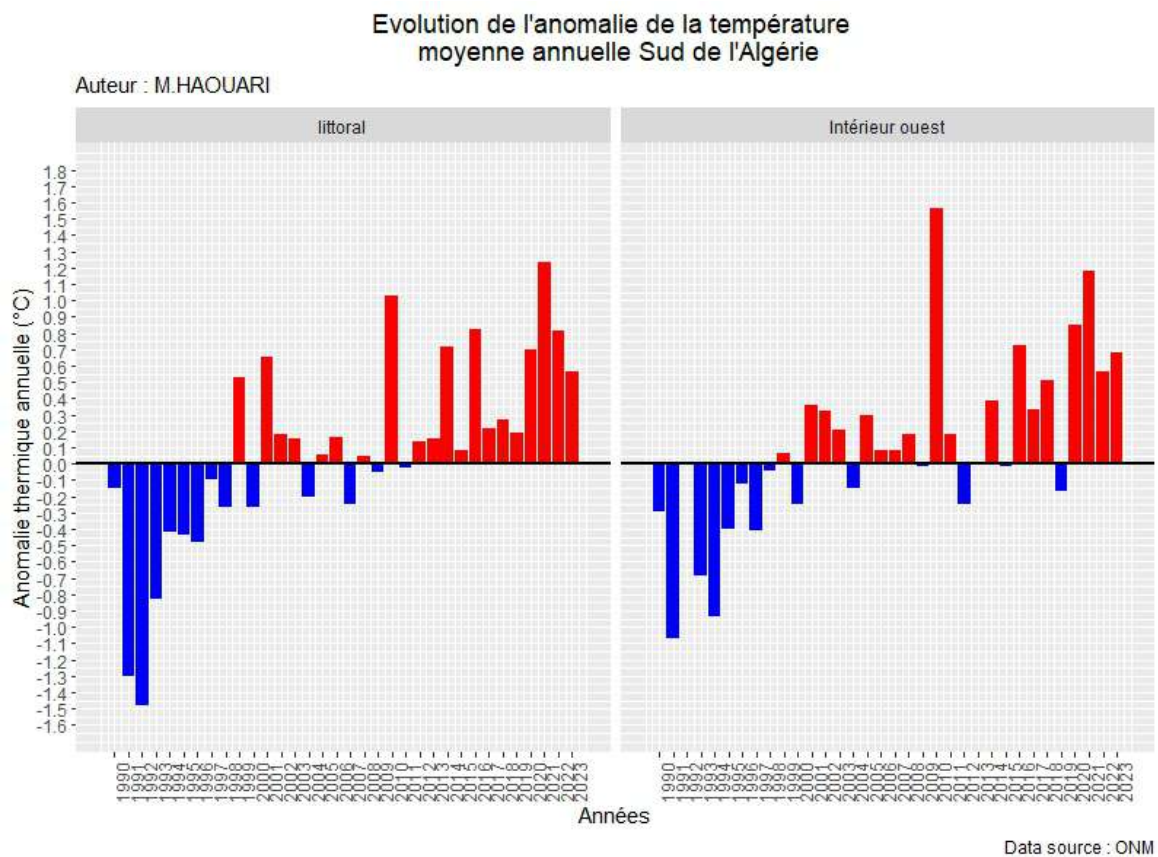


FIGURE 7. Distribution mensuelle de l'anomalie thermique de l'année 2022 sur l'Algérie

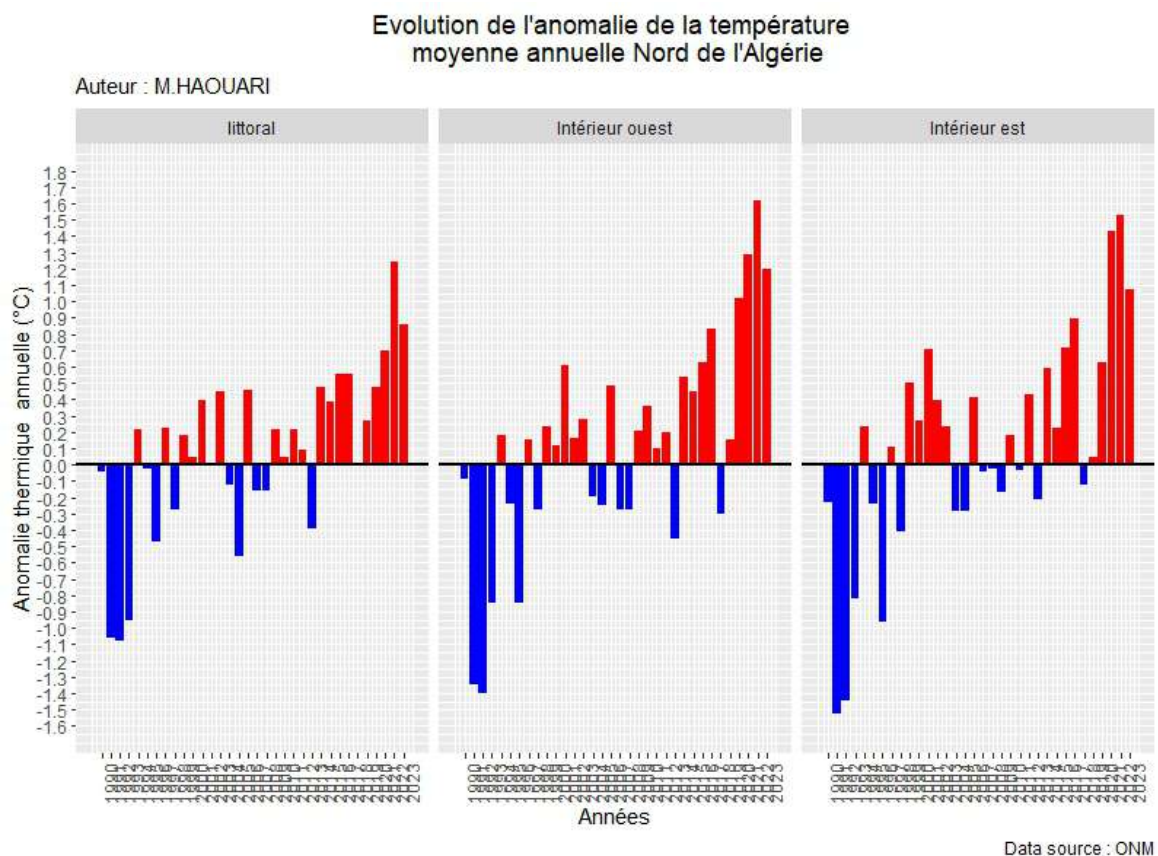
4.2 Analyse régionale

L'évolution de cette anomalie de la température moyenne annuelle ne se distribue pas de la même façon sur l'ensemble du territoire national. Les régions nord au climat méditerranéen (littoral et intérieur) se distinguent des régions sud au climat Saharien à Sahélien (figure 7). Si l'on examine la dernière décennie de 2014 à 2023, décennie la plus chaude jamais observée en Algérie, on remarque que :

- Le nord (+0.66 °C) se réchauffe plus vite que le sud (+0.53 °C).
- Au nord, le littoral (+0.55 °C) se réchauffe moins vite que les régions intérieures (+0.72 °C).



(a) Anomalie thermique pour la partie basse



(b) Anomalie thermique pour la partie haute

FIGURE 8. Evolution de l'anomalie thermique annuelle pour les 5 régions climatiques de l'Algérie sur la période 1990-2023.

Concernant l'année 2022, l'année la plus chaude jamais observée en Algérie, on remarque :

- Le record 2022 de l'année la plus chaude est observé seulement dans les 3 régions du nord, par contre pour le Sahara central, il s'est produit en 2021 (+1.23 °C) et en 2010 pour l'extrême sud (+1.56 °C).
- Le réchauffement a été plus accentué au nord (+1.46 °C) par rapport au sud (+0.69 °C) (figure 8).
- Au nord, la région du littoral (+1.24 °C) s'est réchauffée moins que les régions intérieures avec (+1.62 °C) pour l'intérieur ouest et (+1.53 °C) pour l'intérieur est.
- Au sud, le Sahara central (+0.82 °C) s'est réchauffé plus que l'extrême sud (+0.56°C).

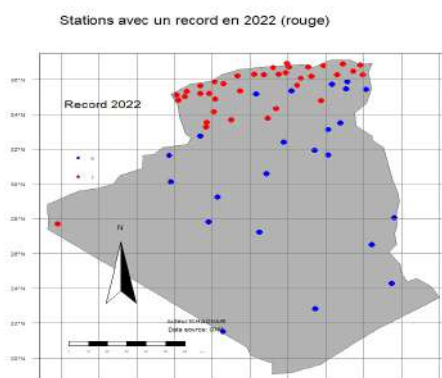


FIGURE 9. Distribution géographique des stations qui ont battu le record de température moyenne annuelle en 2022.

Pour analyser régionalement la distribution mensuelle de ce réchauffement au cours de la dernière décennie 2014-2023, on a calculé les anomalies moyennes mensuelles durant cette période sur l'ensemble des 3 régions du nord et l'ensemble des 2 régions du sud. Les résultats sont illustrés sur la figure 10 et 11.

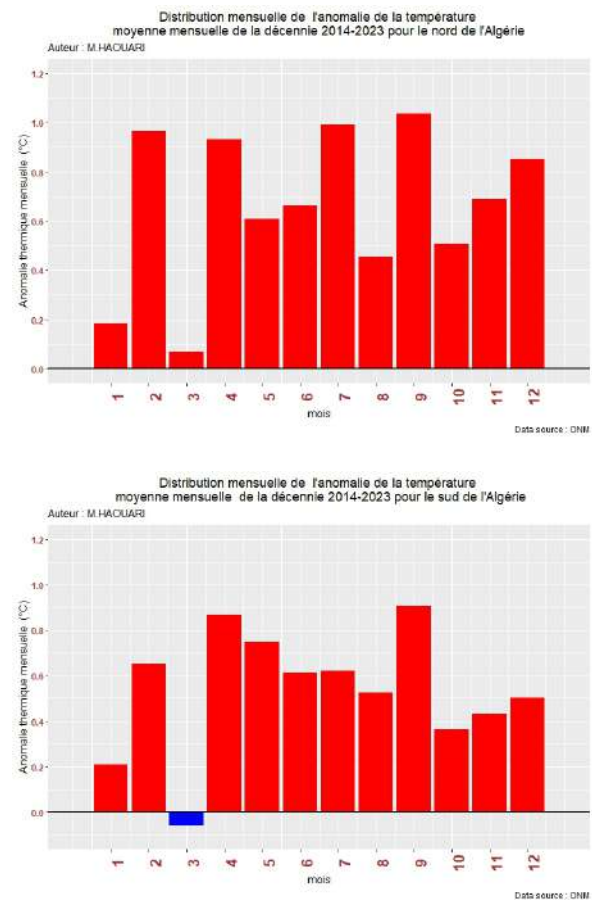


FIGURE 10. Distribution mensuelle de l'anomalie thermique au nord (en haut)et au sud (en bas) calculée sur la décennie 2014-2023

Il apparaît que :

- Toutes les saisons se réchauffent au nord plus qu'au sud;
- Les saisons qui se réchauffent le moins sont le printemps au nord (+0.54 °C) et l'hiver pour le sud (+0.45 °C);
- Les saisons qui se réchauffent le plus sont l'automne et l'été d'environ (0.7 °C) pour le nord et de (0.58 °C) pour le sud;
- Tous les mois se réchauffent sauf pour le mois de mars qui reste proche de la normale;
- Le mois de septembre se réchauffe le plus de (+1.04 °C) pour le nord et de (0.91 °C) pour le sud, suivi du mois de juillet (+0.99 °C) pour le nord et du mois d'avril (+0.87 °C) pour le sud.

5. Conclusion

De ce qui précède, il est clair que :

- La dernière décennie de 2014-2023 est la décennie la plus chaude jamais observée avec une augmentation

moyenne de 0.63 °C par rapport à la normale annuelle nationale estimée à 19.37 °C.

- Les 4 dernières années de 2020-2023 sont les plus chaudes jamais observées avec dans l'ordre 2022, 2021, 2023 et 2020.
- Les 3 dernières années occupent le podium dans l'ordre suivant : 2022, 2021 et 2023.
- L'année la plus chaude jamais observée est l'année 2022 avec une augmentation de 1.25 °C par rapport à sa normale, mais avec une contribution majeure de la partie nord. L'occurrence de ce record ne s'est pas produit en 2022 au sud, avec une différence entre le sahara central (2021) et l'extrême sud (2010).
- L'année la plus récente 2023, occupe la troisième place avec une augmentation de 0.90 °C. Tout porte à croire que le réchauffement s'est accéléré ces dernières années.
- Il apparaît que le nord soumis à un climat méditerranéen se réchauffe plus vite que le sud soumis à un climat saharien à sahélien.
- Les facteurs qui influencent le plus la variation de la température moyenne de l'Algérie sont : la longitude (ouest-est), la proximité de mer (méditerranée et océan atlantique), la latitude (nord-sud) et l'altitude.
- Ce réchauffement affecte toutes les saisons durant 11 mois de l'année, le mois de mars reste un cas particulier.
- La saison d'été commence tôt à partir d'avril et se prolonge durant l'automne et même jusqu'à la fin de l'année.
- Le mois qui se réchauffe le plus est le mois de septembre prorogeant ainsi la saison estivale.
- La saison d'hiver est la saison qui se réchauffe le moins, exception faite pour le mois de décembre.
- Enfin, même si l'évolution des températures moyennes sont en hausse en conformité avec la tendance mondiale, la distribution chronologique des records et l'amplitude de la variation ne sont pas les mêmes. L'Algérie, fait partie des pays qui se réchauffent le plus.

Nous recommandons :

- L'extension de cette étude avec l'analyse des tendances sur de longues séries climatologiques.
- Une surveillance accrue du climat de notre pays par la modernisation et l'extension du réseau d'observations que concrétise progressivement l'ONM et la pérennisation des mesures spéciales (gaz à effets de serre et autres) de la station de l'Assekrem qui fait partie du réseau mondiale de la veille de l'atmosphère globale.

Références

- [1] OMM, 2024. *Rapport annuel sur l'état du climat mondial*. Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse.
- [2] Josse J., Pagès J., Husson F., 2011. *Multiple imputation in principal component analysis*. *Advances in Data Analysis and Classification*, 5(3), pp. 231-246.
- [3] Josse J., Husson F., 2012. *Handling missing values in exploratory multivariate data analysis methods*. *Journal de la Société Française de Statistique*, 153(2), pp. 79-99.
- [4] Josse J., Husson F., 2016. *missMDA : A package for handling missing values in multivariate data analysis*. *Journal of Statistical Software*, 70(1), pp. 1-31.
- [5] Guijarro JA., 2023a. *climatol : Climate Data Tools*. R package version 3.1.1. URL : <https://CRAN.R-project.org/package=climatol>
- [6] Guijarro JA., 2023b. *Homogenization of Climate Data : Theory and Practice*. Springer Climate, Springer Nature.
- [7] Alexandersson H., Moberg A., 1997. *Homogenization of Swedish temperature data. Part I : Homogeneity test for linear trends*. *International Journal of Climatology*, 17(1), pp. 25-34.
- [8] Everitt B.S., 1974. *Cluster Analysis*. Heinemann Educational Books, London.
- [9] Hartigan J.A., 1975. *Clustering Algorithms*. John Wiley Sons, New York.

Étude de l'effet des courants de surface sur les caractéristiques des vagues simulées par WW3

Kartouche Fatima^a

Résumé

Cet article présente une étude comparative visant à évaluer l'effet des courants de surface sur la hauteur significative des vagues (Hs) et la période des vagues (TM02) simulées par le modèle Wavewatch III durant le mois de février 2017. Pour cette étude, nous avons utilisé deux configurations : la première configuration est forcée, simultanément, par les courants de surface et les vents ERA5. La deuxième configuration est forcée, uniquement, par les vents ERA5. Les résultats ont été comparés par rapport aux données observées du réseau de bouées espagnol REDEX. Les résultats montrent que l'effet des courants de surface sur les prévisions des hauteurs et des périodes de vagues est relativement mineur dans les sites d'observation, avec une différence statistique de 0,01 entre les modèles. Cependant, l'analyse de la différence sur l'ensemble du domaine d'intégration pour la situation du 6 février 2017 à 13h révèle un impact notable dans certaines régions, notamment à Gibraltar et dans la partie Est de la Méditerranée.

Mots Clés : Courants de surface, WavewatchIII, WW3, ERA5, REDEX.

^a Direction de l'Exploitation Météorologique (DEM-ONM), Dar El Beida, Alger

Table des matières

1	Introduction :	1
2	Matériel et Méthodologie	2
3	Résultats et Discussion	2
3.1	Évaluation de WW3 par rapport aux observations	2
3.2	Évaluation de la performance du modèle WW3	7
4	Conclusion	9
	Références	9

1. Introduction :

Les courants de surface sont des mouvements horizontaux de l'eau à la surface des océans, des mers et des lacs, résultant de diverses forces telles que les vents, la friction avec la surface, la force de Coriolis due à la rotation de la Terre, les marées, et les gradients de température et de salinité. Ils sont généralement influencés par des facteurs météorologiques et océanographiques locaux et globaux. Ces courants jouent un rôle crucial dans le transport des chaleur et des éléments nutritifs, ainsi que dans la distribution des organismes marins. Ils ont également un impact significatif sur les phénomènes météorologiques et climatique [1]. L'interaction entre les courants de surface et les vagues est un processus dynamique. Les courants peuvent agir comme des forces modifiant la trajectoire et la taille des vagues, les organisant en motifs distincts ou en traînées. Parallèlement, ils peuvent influencer la propagation des vagues, les accélérant ou les ralentissant en fonction de leur propre vitesse

et direction [2]. Des études telles que celle menée par Zodiatis et al. (2015) ont montré que l'impact des courants de surface de la mer est assez significatif dans la modélisation de l'énergie des vagues, et qu'il dépend du temps et de l'espace [3]. De plus, des recherches récentes comme celle de Benetazzo et al. (2013) ont démontré que les variations induites par le courant sur le champ de vagues sont significatives lors de conditions météorologiques extrêmes telles que les tempêtes intenses [4]. Dans ce contexte, notre objectif consiste à étudier l'impact des courants de surface sur les caractéristiques des vagues simulées par le modèle Wavewatch III durant le mois de février 2017, en particulier dans la région occidentale du bassin méditerranéen. Pour ce faire, nous avons utilisé deux configurations du modèle WW3 : la première configuration est forcée par les courants de surface à une résolution de 1/24 degré (environ 4-5 km) et les vents ERA5 du centre Européen (ECMWF Reanalysis 5th Generation) à une résolution de 0.25° désormais appelée WW3 (avec-cour). La seconde configuration, appelée WW3 (sans-cour), est forcée uniquement par les vents ERA5. Dans un premier temps, nous avons comparé les sorties tri-horaires du modèle WW3 pour les deux configurations avec les données tri-horaires des bouées météorologiques du réseau espagnol REDEX. Par la suite, nous avons évalué la performance de ces résultats en utilisant quatre indicateurs d'écart : le coefficient de corrélation linéaire de Pearson (R), le biais, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart type (ECT).

2. Matériel et Méthodologie

Wave Watch III est un modèle de vagues de troisième génération développé par la NOAA/NCEP (National Oceanic and Atmospheric Administration / National Centers for Environmental Prediction). Il est utilisé de manière opérationnelle au sein de l'Office National de la Météorologie depuis 2017. Ce modèle est initialisé par des données de vent d'Arpège et des données bathymétriques contenues dans la base de données ETOPO1, disponibles sur le site du NGDC (National Physicalist Data Center).

La configuration utilisée dans cette étude est forcée par les champs horaires de vent et de courants de surface fournis par ERA5 et le modèle hydrodynamique NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean), respectivement. Les données ERA5, développées par l'ECMWF, fournissent une analyse complète et détaillée du climat à l'échelle du globe [6], avec une résolution spatiale de 0.25 degré et une résolution temporelle horaire. Les données de courants de surface proviennent du produit de réanalyse physique Med MFC généré par NEMO avec un cycle d'assimilation de données variationnelles (OceanVAR) pour les profils verticaux de température et de salinité et les anomalies du niveau de la mer issues des données satellitaires à une résolution de 1/24 degré et 141 niveaux verticaux [7]. (https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1).

Les données de vagues mesurées en février 2017 ont été obtenues du réseau espagnol REDEXT, qui fait partie du service Copernicus Marine. Ces données sont fournies avec une fréquence horaire et sont systématiquement soumises à un contrôle et une évaluation par un coefficient de qualité (QC). Nous avons pris soin de n'utiliser que les données présentant un bon coefficient de qualité (good_data) [8], garantissant ainsi leur fiabilité dans notre analyse. Ces données ont été collectées et mises gratuitement à disposition par le projet Copernicus et ses programmes associés. Pour cette étude, nous avons sélectionné les données de quatre bouées spécifiques : Tarragona, Cabo Bégur, Mahon et Dragonera. Ces bouées ont été choisies pour leur qualité et la disponibilité de leurs données sur l'intervalle de temps étudié. La figure 1 montre le domaine d'intégration du modèle WW3 et la position géographique des bouées utilisées.



FIGURE 1. Domaine d'intégration du modèle WW3 et la position géographique des bouées utilisées)

3.1 Évaluation de WW3 par rapport aux observations

Les simulations des hauteurs de vagues et des périodes moyennes, obtenues à partir du modèle WW3 ont été comparées aux données observées des bouées Tarragona, Dragonera, Cabo Begur et Mahon. Les graphiques de la figure 2 illustrent respectivement les hauteurs de vagues significatives prévues et mesurées par ces bouées. De même, les graphiques de la figure 4 représentent les périodes moyennes observées et prédites par le modèle WW3.

L'analyse des résultats révèle que durant le mois de février 2017, les modèles WW3 (avec-cour) et WW3 (sans-cour) présentent une allure similaire à celle des observations, mais avec une sous-estimation marquée pendant cette période. En ce qui concerne les valeurs maximales, les deux modèles reproduisent des hauteurs généralement supérieures à 2 mètres, atteignant jusqu'à 4 mètres. Pour les périodes moyennes maximales, les deux modèles reproduisent des périodes moyennes atteignant jusqu'à 6 secondes. Cependant, une exception notable se produit le 06/02/2017, où les deux modèles sous-estiment le pic avec une différence remarquable d'environ 1.5 pour les deux paramètres (H_s et $TM02$).

Les figures 3 et 5 illustrent les diagrammes de dispersion représentant les hauteurs de vague significatives et les périodes moyennes des vagues mesurées par les quatre bouées, ainsi que leurs prédictions par les deux configurations.

3. Résultats et Discussion

L'évaluation des performances a été menée en comparant les simulations des deux configurations du modèle WW3 aux mesures des bouées chaque trois heures en calculant les différents indicateurs d'écart : le biais, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le coefficient de corrélation (R) et l'écart-type (ECT) [8].

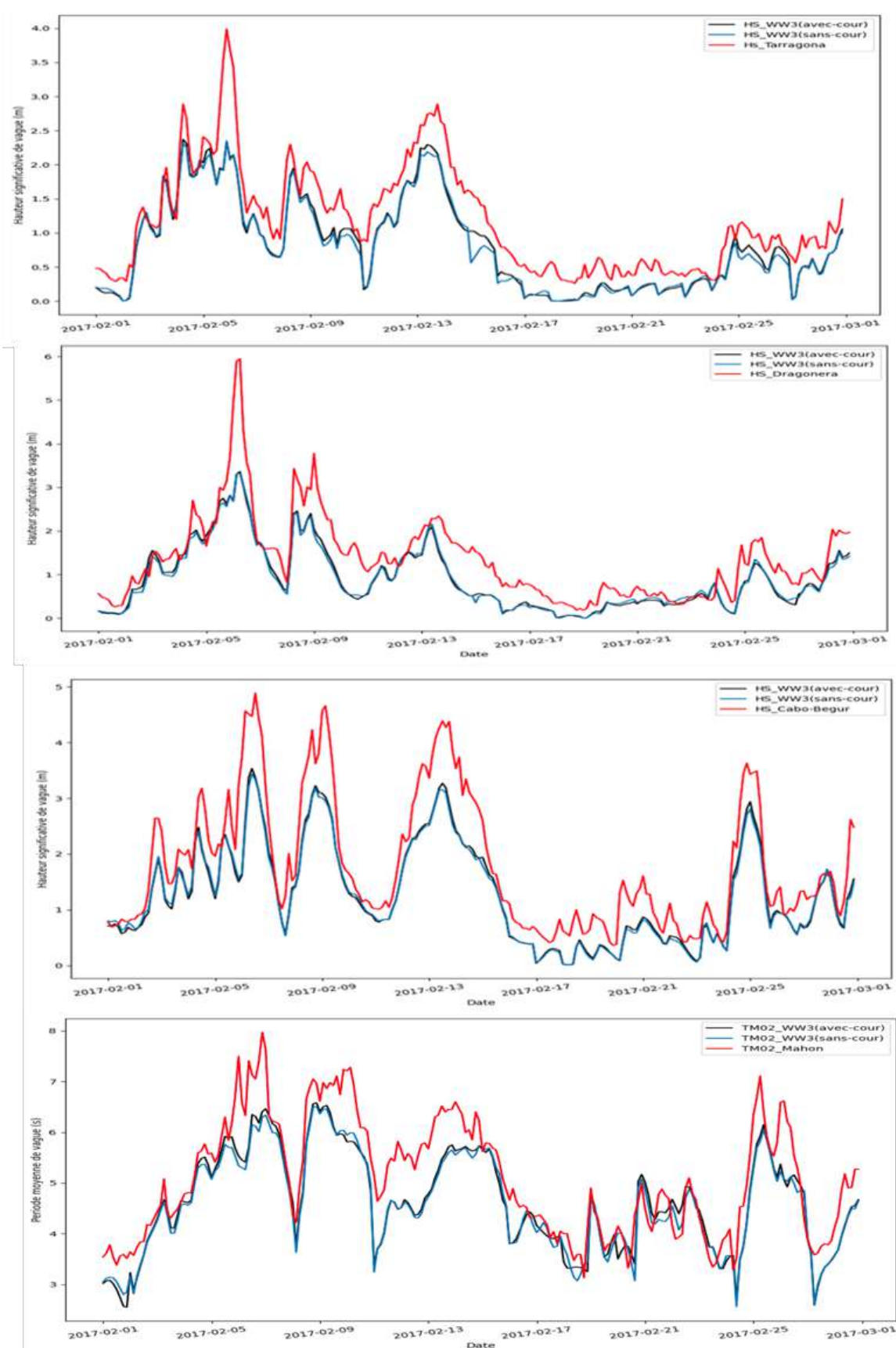


FIGURE 2. Hauteurs de vague significative mesurées et prévues à (du haut en bas) : Tarragona, Dragonera, Cabo Begur et Mahon, respectivement..

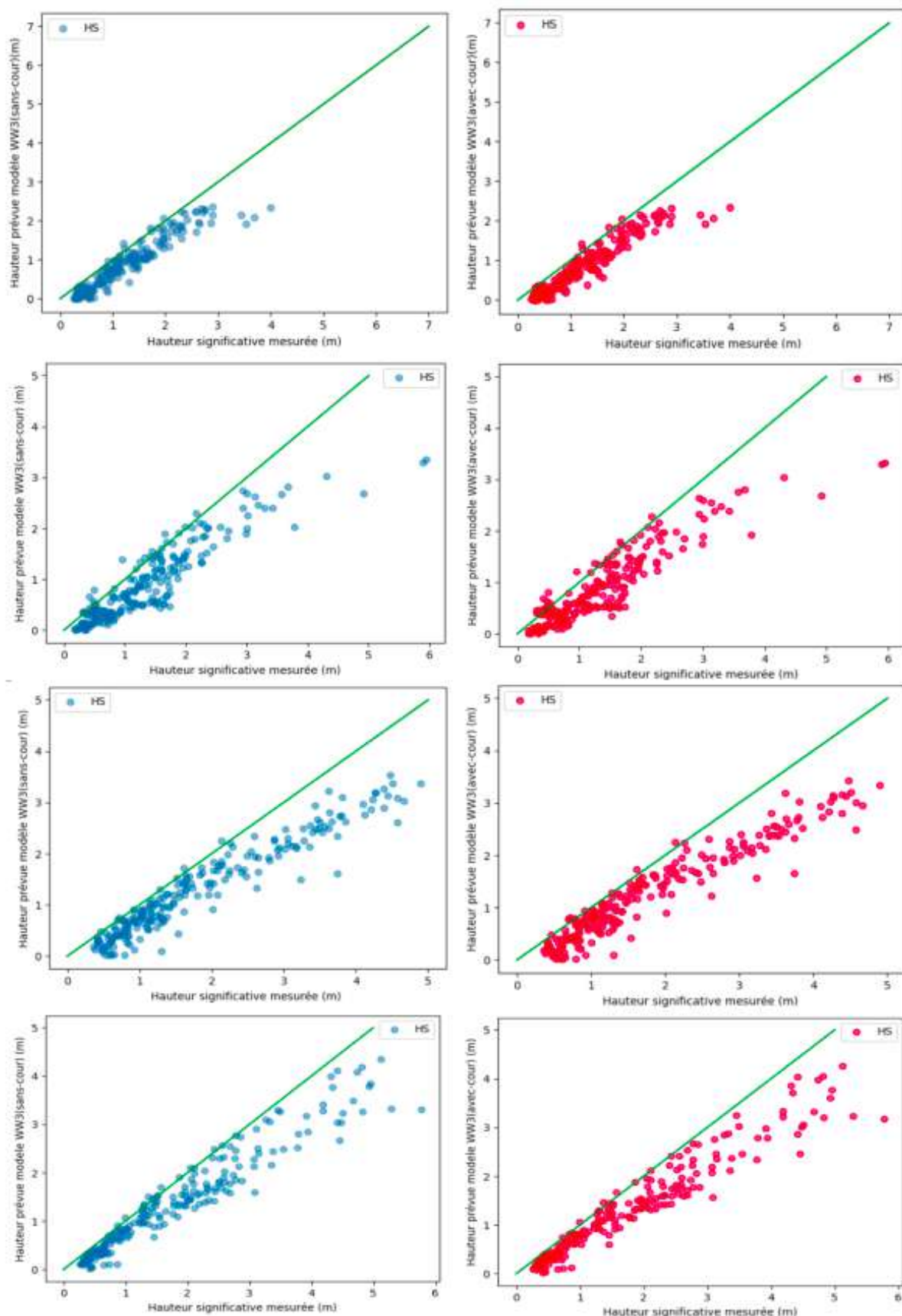


FIGURE 3. Diagrammes de dispersion des hauteurs de vague obtenus par WW3 (sans-cour) à gauche et WW3 (avec-cour) à droite pour les quatre sites, du haut en bas respectivement : Tarragona, Dragonera, Cabo Begur et Mahon.

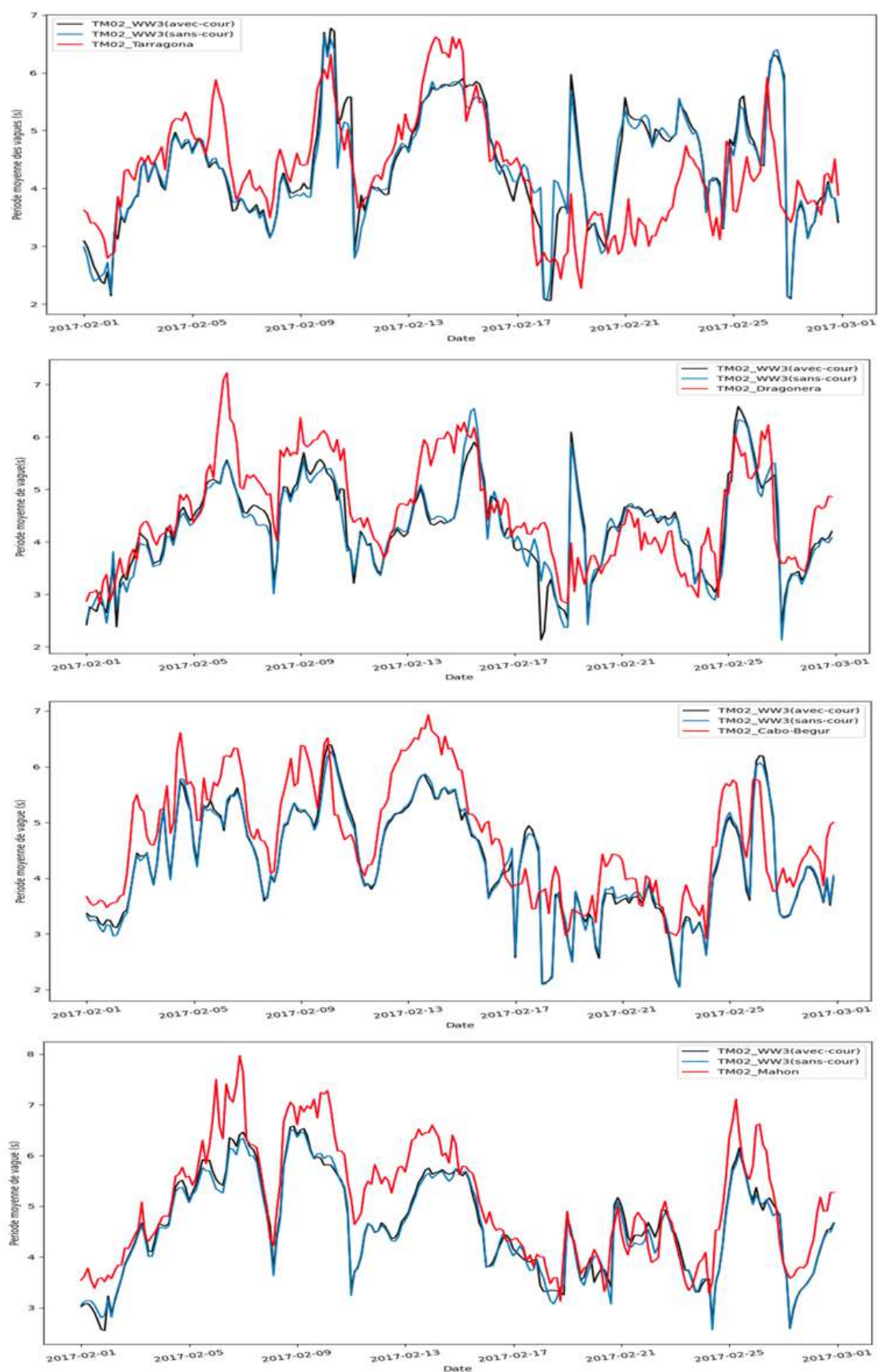


FIGURE 4. Périodes moyennes des vagues mesurées et prévues à (du haut en bas) : Tarragona, Dragonera, Cabo Begur et Mahon, respectivement.

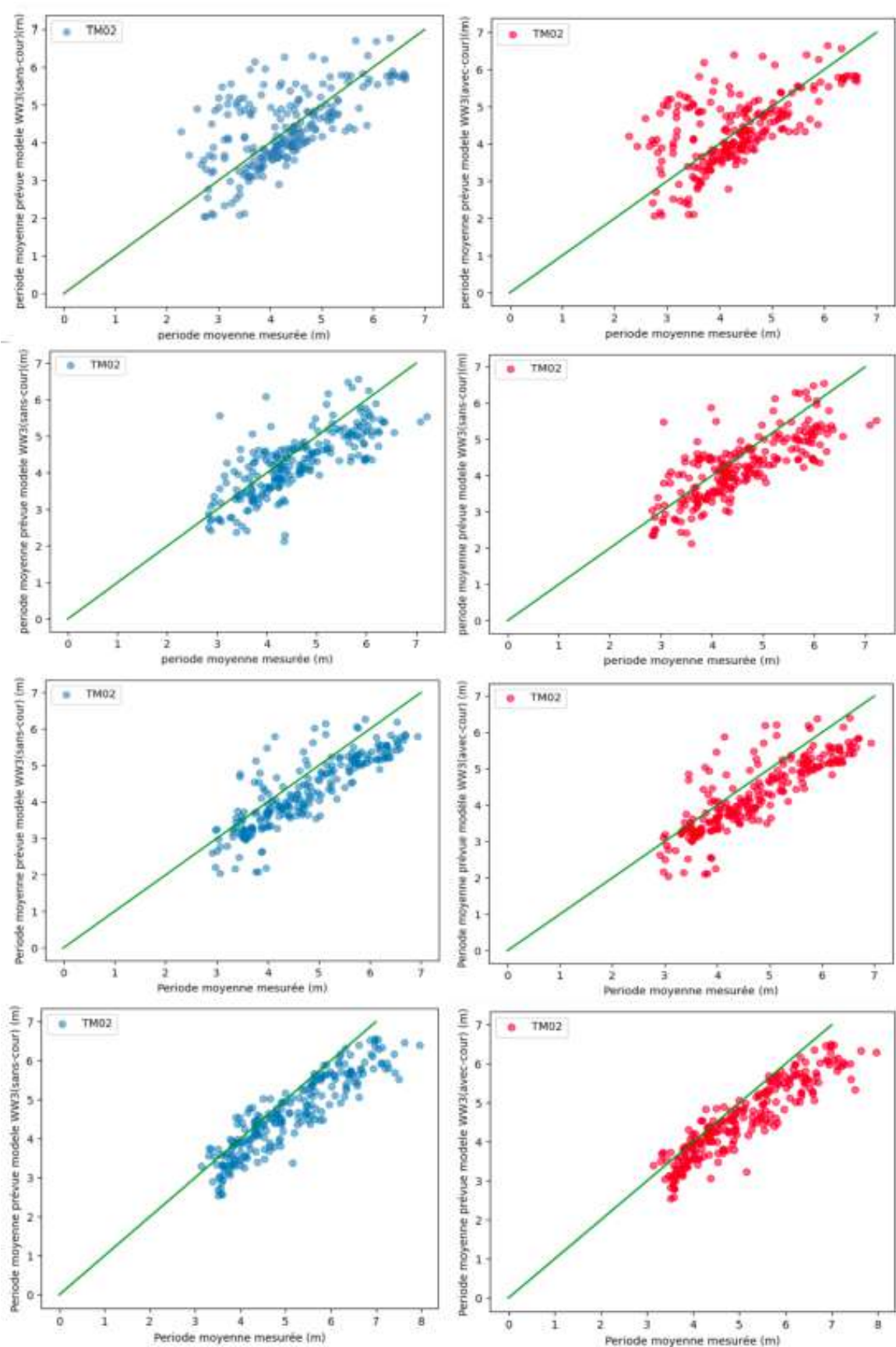


FIGURE 5. Diagrammes de dispersion de la période moyenne obtenus par WW3 (sans-cour) à gauche et WW3 (avec-cour) à droite pour les quatre sites, du haut en bas respectivement : Tarragona, Dragonera, Cabo Begur et Mahon.

3.2 Évaluation de la performance du modèle WW3

Les résultats statistiques du modèle WW3 pour les deux paramètres, hauteur et période de la vague, aux échéances de 12h et 21h, sont présentés dans les Tableaux 1, 2, 3 et 4. Ces résultats indiquent que les deux modèles affichent des coefficients de corrélation moyens élevés. Concernant les hauteurs de vague, les deux modèles présentent des moyennes de corrélation de 0.94 pour l'échéance de 21h. De même, pour l'échéance de 12h, les modèles WW3(sans-cour) et WW3 (avec-cour) affichent des moyennes de corrélation respectives de 0.97 et 0.98.

En outre, le modèle WW3 (sans-cour) présente une erreur quadratique moyenne de 1.38, tandis que le modèle WW3 (avec-cour) montre une erreur quadratique moyenne de 1.37 à l'échéance de 12h. Pour l'échéance de 21h, le modèle WW3 (sans-cour) présente une erreur quadratique moyenne de 1.35, par contre le modèle WW3 (avec-cour) affiche une erreur quadratique moyenne de 1.33.

Pour la période de la vague, les modèles WW3 (sans courant) et WW3 (avec courant) montrent des moyennes de corrélation respectives de 0.81 et 0.82 pour les deux échéances. En outre, les deux modèles présentent une même erreur quadratique moyenne de 1.38 à l'échéance de 12 h et de 1,4 à l'échéance de 21 h.

Les graphiques de la figure 6 présentent la prévision des hauteurs de vagues significatives par le modèle WW3(sans-cour) à gauche, et les courants moyens à droite. En bas, on observe la différence entre les modèles WW3(avec-cour) et WW3(sans-cour) pour la situation du 6 février 2017 à 13h. Ces figures montrent que, dans les sites d'observation, l'effet des courants est faible. En revanche, à Gibraltar et dans la partie est de la Méditerranée, l'effet des courants est significatif et dépasse parfois un mètre. À ces endroits, les différences constatées entre les hauteurs significatives simulées par les deux configurations de WW3 sont de l'ordre de -0.6 mètres.

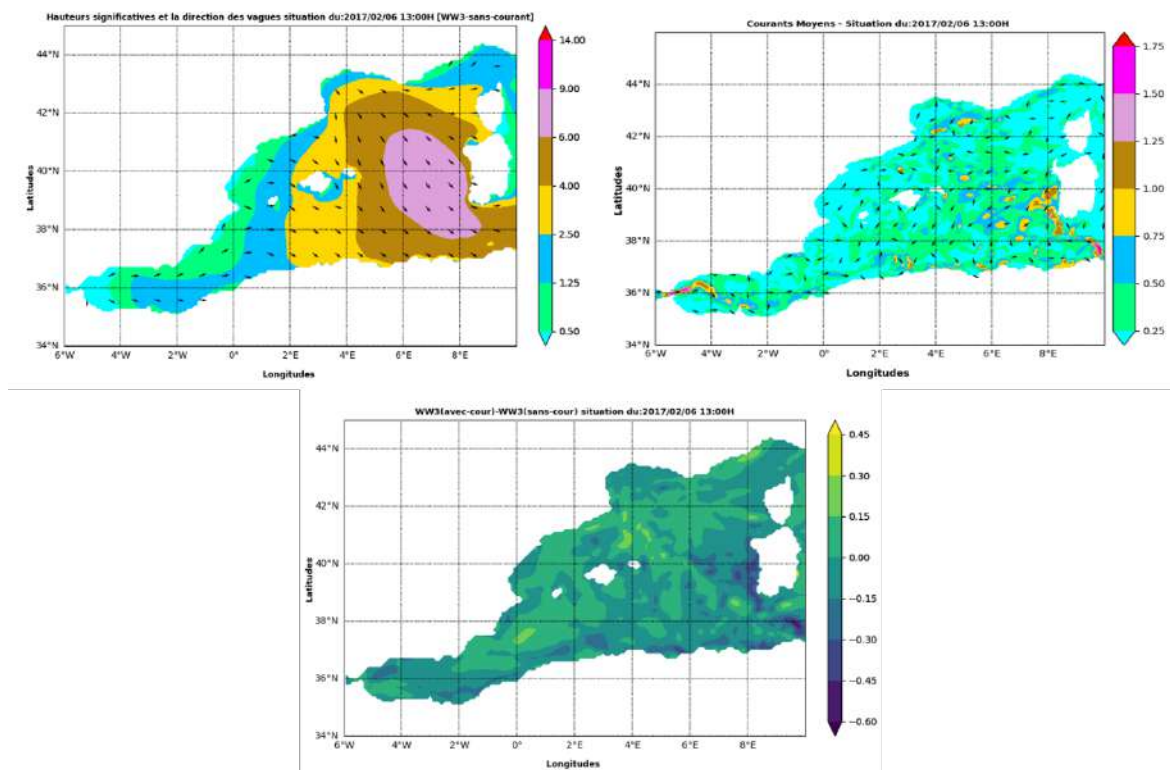


FIGURE 6. Prévision des hauteurs de vagues significatives par le modèle WW3 (sans-cour) à gauche.

Indicateurs d'écart/Observations	Tarragona		Dragonera		Cabo Begur		Mahom		Moyennes	
	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour
Biais	0.32	-0.33	0.38	-0.38	0.53	-0.53	0.44	-0.49	0.42	-0.43
RMSE	1.09	1.09	1.11	1.10	1.49	1.48	1.69	1.67	1.35	1.33
R	0.93	0.94	0.91	0.91	0.95	0.95	0.96	0.96	0.94	0.94
ECT	1.04	1.04	1.04	1.03	1.39	1.38	1.63	1.60	1.28	1.28

(a) Statistiques des deux configurations WW3 à l'échéance 12H pour le paramètre Hs durant le mois de Février 2017.

Indicateurs d'écart/Observations	Tarragona		Dragonera		Cabo Begur		Mahom		Moyennes	
	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour
Biais	0.32	-0.33	0.38	-0.38	0.53	-0.53	0.44	-0.49	0.42	-0.43
RMSE	1.09	1.09	1.11	1.10	1.49	1.48	1.69	1.67	1.35	1.33
R	0.93	0.94	0.91	0.91	0.95	0.95	0.96	0.96	0.94	0.94
ECT	1.04	1.04	1.04	1.03	1.39	1.38	1.63	1.60	1.28	1.28

(b) Statistiques des deux configurations WW3 à l'échéance 21H pour le paramètre Hs durant le mois de Février 2017.

Indicateurs d'écart/Observations	Tarragona		Dragonera		Cabo Begur		Mahom		Moyennes	
	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour
Biais	0.32	-0.33	0.38	-0.38	0.53	-0.53	0.44	-0.49	0.42	-0.43
RMSE	1.09	1.09	1.11	1.10	1.49	1.48	1.69	1.67	1.35	1.33
R	0.93	0.94	0.91	0.91	0.95	0.95	0.96	0.96	0.94	0.94
ECT	1.04	1.04	1.04	1.03	1.39	1.38	1.63	1.60	1.28	1.28

(c) Statistiques des deux configurations WW3 à l'échéance 12H pour le paramètre TM02 durant le mois de Février 2017.

Indicateurs d'écart/Observations	Tarragona		Dragonera		Cabo Begur		Mahom		Moyennes	
	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour	Sans cour	Avec cour
Biais	0.14	-0.09	-0.32	0.28	-0.40	0.39	-0.51	0.49	-0.27	0.27
RMSE	1.41	1.44	1.23	1.21	1.45	1.42	1.51	1.53	1.4	1.4
R	0.60	0.62	0.81	0.83	0.90	0.91	0.92	0.90	0.81	0.82
ECT	1.40	1.44	1.18	1.18	1.39	1.37	1.42	1.45	1.35	1.36

(d) Statistiques des deux configurations WW3 à l'échéance 21H pour le paramètre TM02 durant le mois de Février 2017.

TABLE 1. Comparaison des statistiques des deux configurations WW3 pour les paramètres Hs et TM02 durant le mois de Février 2017.

4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons examiné l'effet des courants de surface sur la qualité de la prévision des hauteurs des vagues par le modèle WW3 durant le mois de février 2017. Nos analyses montrent que les modèles WW3(sans-cour) et WW3(avec-cour) présentent des coefficients de corrélation moyens élevés pour les paramètres de hauteur et de période des vagues. Plus précisément, pour la hauteur des vagues, les deux modèles affichent des corrélations moyennes de 0.94 pour l'échéance de 21h, et de 0.97 et 0.98 à l'échéance de 12h pour les modèles WW3(sans-cour) et WW3(avec-cour), respectivement.

En termes d'erreur quadratique moyenne, le modèle WW3 (sans-cour) présente une erreur moyenne de 1.38 à l'échéance de 12h et de 1.35 à l'échéance de 21h, tandis que le modèle WW3(avec-cour) montre des erreurs moyenne de 1.37 et 1.33 pour les mêmes échéances. Concernant la période des vagues, les deux modèles présentent des corrélations moyennes de 0.81 et 0.82, avec une erreur quadratique moyenne de 1.38 à l'échéance de 12h et de 1.4 à l'échéance de 21h. Concernant la période de la vague, les modèles WW3 (sans-cour) et WW3(avec-cour) montrent des moyennes de corrélation respectives de 0.81 et 0.82 pour les deux échéances. En outre, les deux modèles présentent une même erreur moyenne de 1.38 à l'échéance de 12 h et de 1.4 à l'échéance de 21 h.

Les résultats statistiques montrent une différence de 0.01 entre les deux configurations du modèle WW3 dans les sites d'observation. Cependant, l'analyse de la différence sur l'ensemble du domaine d'intégration pour la situation du 6 février 2017 à 13h révèle une variation plus significative. En effet, les courants de surface ont un impact notable dans certaines régions, notamment à Gibraltar et dans la partie est de la Méditerranée, bien que cet impact soit faible dans les sites d'observation. Cela indique que l'effet des courants de surface sur les prévisions des hauteurs et des périodes de vagues est relativement mineur dans les sites d'observation, mais significatif dans d'autres régions.

Références

- [1] Knauss, J. A., 1996. *Introduction to Physical Oceanography*. Waveland Press.
- [2] Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., Swift, J. H., 2011. *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction* (6th ed.). Academic Press.
- [3] Zodiatis, G., Galanis, G., Kallos, G., et al., 2015. The impact of sea surface currents in wave power potential modeling. *Ocean Dynamics*, 65, 1547–1565. <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0880-4>.
- [4] Tolman, H., et al., 2014. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18.
- [5] Kalverla, P. C., Steeneveld, G., Ronda, R., Holtslag, A. A. M., and M, A. A., 2019. Evaluation of three mainstream numerical weather prediction models with observations from meteorological mast IJmuiden in the North Sea. *Wind Energy*, 22, 34–48.
- [6] Copernicus Marine Service, 2016. *MED-SEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1*. https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1.
- [7] Copernicus Marine In Situ Tac Data Management Team, 2020. *Copernicus In Situ TAC, Real Time Quality Control for WAVES*. <http://doi.org/10.13155/46607>.
- [8] Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., Mazzino, A., 2015. Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. *Ocean Modelling*, 90, 82–94.

Analyse fréquentielle des précipitations maximales et Régionalisation des intensités maximales du modèle de Montana en Algérie.

KERTALI Fouzia^{1a}

Résumé

Les événements de précipitations extrêmes peuvent générer de grandes quantités de pluie sur de courtes périodes. Ces pluies, ainsi que les inondations qui en résultent, peuvent submerger les systèmes de drainage, inonder les sous-sols, emporter des ponts et des routes, et provoquer des glissements de terrain.

Pour réduire les risques liés à ces événements, les ingénieurs, hydrologues, planificateurs et autres décideurs s'appuient sur des données précises concernant les précipitations extrêmes. Les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) constituent une source essentielle de ces données.

L'objectif de cet article est de générer des courbes IDF pour les stations météorologiques réparties à travers l'Algérie. Notre étude, basée sur l'analyse des données pluviométriques et des enregistrements des pluviographes, vise à déterminer les intensités de précipitations pour différentes durées et fréquences rares, et à synthétiser ces résultats à travers les courbes IDF. L'approche repose sur la modélisation des courbes IDF, qui permet de caractériser le régime pluviométrique d'une station et offre un outil adapté pour anticiper les précipitations rares et extrêmes sur des intervalles de retour allant de 2 à 50 ans.

Mots clés : Précipitations extrêmes, Inondations, Courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence), Intervalles de retour, Fréquences rares, Gestion des risques.

^aOffice National de la Météorologie

Correspondance : fouzia.khadidja@yahoo.com.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Données et méthode	2
2.1	Données	2
	Traitement des données manquantes	
2.2	Méthode	2
	Modélisation statistiques des pluies journalières maximales annuelles • Hypothèse de l'analyse fréquentielle • choix et estimation des paramètres des modèles statistiques • Calcul des fréquences empiriques • Caractérisation des périodes de retour • Construction des courbes IDF par le modèle de MONTANA	
3	Résultat et discussion	4
3.1	Vérification des tests d'hypothèses et ajustements des pluies extrêmes à la loi statistique	4
4	Régionalisation des stations météorologiques en fonction de leur niveau d'intensité pluviométrique	7
4.1	Méthode de zonage climatique	7
4.2	RÉSULTATS	7
	Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) appliquée sur les intensités maximales pour T=10 ans : • Résultats de classification K-means appliquée sur les intensités maximales pour T=10 ans	

5	Conclusion	8
	Références	9

1. Introduction

En raison de sa position géographique, l'Algérie est soumise à l'influence de deux climats, Méditerranéen au Nord et saharien au Sud, qui sont à l'origine d'une variabilité spatiotemporelle importante de la pluie. Particulièrement ces dernières années, des pluies brusques et intenses, qui ont eu lieu dans la région étant le facteur déclenchant des phénomènes d'inondation, qui ont provoqué des catastrophes destructrices occasionnant des pertes considérables en vies humaines, d'importants dégâts matériels et de dommages importants à l'économie et de l'environnement. Pour une protection efficace des populations, de leurs biens et des infrastructures hydrauliques des régions les plus exposées de l'Algérie, il est nécessaire d'examiner et de mettre à jour les caractéristiques des précipitations IDF, puisque ces dernières sont souvent utilisées pour concevoir des structures d'eau. La connaissance des courbes IDF est nécessaire pour la mise en œuvre des projets dans le domaine d'estimation des risques d'inondation particulièrement en milieu urbain.

La méthodologie d'établissement des courbes IDF en Algérie est basée généralement sur l'utilisation du modèle statistique de Gumbel (GUMBEL, 1958; BERNARD MOHYMONT GASTON R. DEMARÉE (2006)) Pour décrire les séries du maxima annuel disponibles et du modèle empirique de type Montana.

L'objectif de cette étude est de souligner l'importance cruciale des courbes IDF en Algérie face aux changements climatiques anticipés et à l'accroissement des précipitations intenses récemment observées. Ces courbes jouent un rôle essentiel dans la caractérisation des régimes de pluie, contribuant ainsi à la gestion des ressources hydriques, à la prévision des risques hydrologiques et à la conception d'infrastructures hydrauliques adaptées aux événements extrêmes. En anticipant les variations spatiales des précipitations et en évaluant les fréquences et intensités des événements exceptionnels, les courbes IDF deviennent des outils indispensables pour la gestion des risques d'inondation et l'aménagement urbain face à des pluies plus soutenues et fréquentes. Leur élaboration à partir d'analyses statistiques des données pluviométriques permet une meilleure appréhension des impacts potentiels des changements climatiques sur les précipitations en Algérie. Ainsi, les courbes IDF offrent une base scientifique solide pour anticiper et s'adapter aux conditions météorologiques futures dans le pays. De plus, cette étude nous renseigne sur les régions présentant les précipitations les plus intenses mais de courte durée.

2. Données et méthode

2.1 Données

Les données climatiques utilisées au cours de notre étude sont les données des précipitations de l'office national de la météorologie (ONM). Il s'agit des données de pluviométrie journalière des 50 postes distribuées sur le territoire national. Seules les observations journalières des précipitations sont disponibles pour cette étude et ne permettent pas par conséquent le calcul de durées de retour des cumuls de précipitations maximales sur des pas de temps plus fins.

Les données des précipitations maximales annuelles en 24h, 48h, 72h, 96h et 120h sont calculées à partir des données journalières durant la période 1993 à 2022.

Le choix des stations a été effectué en fonction de la disponibilité des données. Nous avons sélectionné les stations bénéficiant d'une période commune s'étendant de 1993 à 2022 et ne présentant pas plus de 5 pourcent de données manquantes

2.1.1 Traitement des données manquantes

Certaines séries peuvent comporter de nombreuses données manquantes. Il est recommandé de ne pas intégrer une année avec un taux élevé de données manquantes dans la

série temporelle des MA, afin d'éviter l'introduction d'une estimation sous-évaluée. Si, par exemple, le pourcentage de données manquantes pour une année complète est minime, il serait judicieux d'envisager des méthodes d'imputation pour estimer ces valeurs. En revanche, si le taux de données manquantes est significatif, dépassant notamment de 30 pourcent à 50 pourcent dans certains cas, il pourrait être envisagé de procéder à l'exclusion de ladite année.

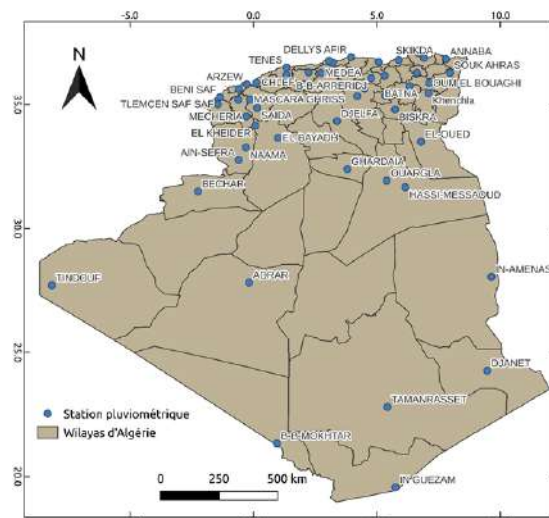


FIGURE 1. Distribution spatiale des 50 stations pluviométriques

2.2 Méthode

2.2.1 Modélisation statistique des pluies journalières maximales annuelles

L'approche méthodologique a consisté d'abord à vérifier un certain nombre d'hypothèses statistiques dans le contexte de l'application de l'analyse fréquentielle, telles que l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité des données. Ensuite, les différentes lois de distribution choisies ont été ajustées aux données de pluies journalières maximales annuelles. Enfin, une évaluation de la validité des modèles adoptés a été réalisée.

2.2.2 Hypothèse de l'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle passe en premier lieu par l'appréciation de la qualité des séries à posséder une fonction de distribution en utilisant les tests de stationnarité de Kendall (YUE ET PILON, 2004,) d'indépendance d'autocorrélation de KENDALL (Kendall M. (1955)) et d'homogénéité de PETTITT (Pettitt, 1979; Servat et al., 1997). Ces tests fonctionnent tous sur le même principe qui consiste à énoncer une hypothèse sur la population mère et à vérifier sur les observations constatées si celles-ci sont vraisemblables dans le cadre de cette hypothèse.

- Le test d'homogénéité de **PETTITT** : le test de PETTITT est un test non paramétrique utilisé pour détecter une rupture dans une série chronologique à un

instant inconnu. Il permet de tester l'hypothèse nulle H_0 de non rupture contre l'hypothèse alternative H_1 d'une rupture dans la série :

- H_0 : les données sont homogènes;
- H_1 : il y a une date à partir de laquelle il y a un changement dans les données.
- Le test de stationnarité de **Kendall** : c'est un test de corrélation sur le rang, qui sert à détecter les tendances dans les séries. Les hypothèses sont les suivantes :
 - H_0 : il n'y a aucune tendance dans les observations;
 - H_1 : il y a une tendance dans les observations.
- Le test d'indépendance : ce test permet d'examiner l'indépendance en calculant la fonction d'autocorrélation pour chaque station. Nous avons employé le test statistique de **Kendall** (Kendall, 1955), une méthode statistique non paramétrique utilisée pour évaluer la dépendance entre deux variables aléatoires. Il est basé sur le taux de Kendall, une mesure de corrélation des rangs qui quantifie l'association entre deux variables :
 - Pour des données continues, le taux de Kendall varie entre -1 et 1 :
 - -1 indique une dépendance négative parfaite;
 - 0 indique une indépendance;
 - 1 indique une dépendance positive parfaite.
- Le test consiste à confronter les hypothèses suivantes :
 - H_0 : les variables sont indépendantes;
 - H_1 : les variables sont dépendantes.
- Sous H_0 , la statistique de test suit asymptotiquement une loi normale centrée réduite. On rejette H_0 au seuil α si la valeur observée du taux de Kendall est trop élevée en valeur absolue.
- En résumé, le test d'indépendance de **Kendall** est un outil robuste pour évaluer la présence de dépendance entre variables, avec des applications dans de nombreux domaines.

2.2.3 choix et estimation des paramètres des modèles statistiques

Les trois distributions de valeurs extrêmes les plus connues sont les lois : de Gumbel (MULLER, 2006), de Fréchet (MULLER, 2006) et de Weibull (MULLER, 2006); la loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV) (MULLER, 2006) combine ces trois lois sous une seule formulation qui se caractérise par un paramètre de forme. Les données auxquelles on adapte notre modèle de distribution de valeurs extrêmes sont des valeurs maximales annuelles observées pendant une longue période, Une période de retour correspond à la fréquence moyenne

à laquelle on s'attend à ce qu'une valeur soit égalisée ou dépassée (une fois tous les vingt ans par exemple).

Les durées de retour de précipitations sont estimées à la Direction de la Climatologie au moyen de la méthode GEV (loi généralisée des extrêmes) et de son cas particulier : la distribution de Gumbel, qui permet d'obtenir des ajustements de niveaux de retour à partir des maximas annuels.

Pour rappel, La fonction de répartition de la loi GEV est donnée par l'expression suivante :

$$DF(x) = \begin{cases} \exp\left(-\left[1 + \eta \frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{-\frac{1}{\eta}}\right), & \eta \neq 0 \\ \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right), & \eta = 0 \end{cases}$$

Les paramètres Mu, sigma, Eta désignent respectivement les paramètres de position, d'échelle et de forme des différentes lois. Le paramètre de position Mu caractérise l'ordre de grandeur de la série des pluies extrêmes. Le paramètre de forme Eta indique le comportement des extrêmes ou la forme de la distribution. Suivant le signe de ce paramètre de forme, on définit trois types de lois GEV :

- $\eta = 0$, loi à queue légère (ou distribution de Gumbel).
- $\eta < 0$, loi à queue lourde (ou distribution de Fréchet).
- $\eta > 0$, loi à queue bornée (ou distribution de Weibull).

2.2.4 Calcul des fréquences empiriques

En pratique, il s'agit essentiellement d'estimer la probabilité de non dépassement $F(x_i)$ qu'il convient d'attribuer à chaque valeur x_i . Il existe de nombreuses formules d'estimation de la fonction de répartition à l'aide de la fréquence empirique. Elles reposent toutes sur un tri de la série par valeurs croissantes permettant d'associer à chaque valeur son rang r . Des simulations ont montré que pour la loi de Gumbel, il faut utiliser la fréquence empirique de Hazen (BENKHALED, 2007; SORO, 2011) :

$$f(x_i) = r - \frac{0.5}{n}$$

Où r est le rang dans la série de données classée par valeurs croissantes, n est la taille de l'échantillon, $x[i]$ la valeur de rang r .

2.2.5 Caractérisation des périodes de retour

La loi identifiée comme ajustant le mieux les pluies extrêmes a été appliquée aux pluies maximales annuelles pour caractériser les périodes de retour des événements pluvieux extrêmes. Le but étant de vérifier si les épisodes pluvieux à la source d'inondations recensées peuvent être qualifiés d'événements extrêmes ou non, la période de retour (ou temps de retour) caractérise le temps statistique entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée. Ce terme est très utilisé pour caractériser les risques naturels. Le calcul des fréquences d'apparition des pluies extrêmes fournit des indications intéressantes pour les gestionnaires de l'aménagement. La période de retour d'un événement

est définie comme étant l'inverse de la probabilité annuelle de dépassement de cet événement

$$T = 1 - \frac{1}{F}$$

Où T : période de retour (année); F : fréquence de non-dépassement.

2.2.6 Construction des courbes IDF par le modèle de MONTANA

- **Définition** : Les courbes IDF (Intensité–Durée–Fréquence) sont des outils utilisés dans l'hydrologie pour représenter l'évolution de l'intensité de la pluie en fonction de la durée et de la fréquence d'occurrence. Ces courbes sont construites à partir d'analyses statistiques des intensités de pluie extrêmes issues de séries de mesures historiques, qui doivent être de bonne qualité et suffisamment longues pour inclure des événements rares. Les IDF servent à déterminer la probabilité que certaines intensités de pluie seront observées pendant des durées spécifiques, ce qui est essentiel pour le dimensionnement d'infrastructures hydrauliques telles que digues et systèmes de drainage.
- Trois principaux éléments sont indiqués dans les courbes IDF :
 - **Durée** : La période de temps d'intérêt. Les courbes IDF comprennent généralement des durées de précipitations extrêmes allant de 5 minutes à 24 heures.
 - **Intensité** : L'intensité moyenne des pluies sur la période spécifique d'intérêt, en unités telles que mm/h.
 - **Fréquence** : Pour prévoir des événements extrêmes d'une durée et d'une intensité donnée, il est important de savoir à quelle fréquence ces événements se produisent.
- **Intensité de la pluie – Formule de MONTANA** : La formule de MONTANA (BERNARD MOHYMONT GAS-TON R. DEMARÉE (2006)) décrit la relation existant entre l'intensité, la durée et la fréquence des pluies.

Elle s'exprime de la manière suivante :

$$i_T(d) = \frac{a}{d^b}$$

It = Intensité durant le temps t en mm/min (ou mm/heure)
d = durée de la pluie équivalente au temps de concentration (en minutes ou en heures).

a et b = coefficients de MONTANA

Cette formule est utilisée pour déterminer la hauteur de pluie maximale sur 24h pour des périodes de retour allant de 5 à 100 ans. Les coefficients a et b sont tabulés pour différentes régions et permettent d'interpoler l'intensité de pluie entre les pas de temps de 6 min à 192h.

Connaissant l'intensité de pluie maximale sur 24h pour une période de retour donnée, il est alors possible de calculer le volume d'eau à stocker pour limiter le débit de fuite d'un projet d'aménagement. La formule de Montana est donc un outil essentiel pour le dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux pluviales.

Dans cet article, nous présenterons les résultats des cas d'étude des quatre stations sélectionnées des régions de l'Algérie, ces stations ont été choisi au hasard : du centre, est, ouest et du sud à savoir : Alger Dar El Beida, Constantine, Oran et Adrar pour la période 1993-2022

3. Résultat et discussion

3.1 Vérification des tests d'hypothèses et ajustements des pluies extrêmes à la loi statistique

Divers tests d'hypothèses ont été réalisés sur les précipitations maximales annuelles RR24h, RR48h, RR72h, RR96h et RR120h, tels que les tests d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité. Les résultats de l'application de ces divers tests d'hypothèses indiquent que les tests d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité demeurent valides pour les cinq séries de pluies extrêmes, pour toutes les stations pluviométriques étudiées, à un niveau de significativité de 5 %. Ces résultats démontrent que la série des valeurs maximales annuelles de précipitations considérée est composée de valeurs indépendantes, homogènes et stationnaires.

TABLE 1. Vérification des tests d'hypothèses et ajustements des pluies extrêmes à la loi statistique

Station	Tests d'hypothèses	P	Résultats
Alger Dar El Beida	Test de PETTITT	0.917	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont homogènes.
	Test de KENDALL	0.916	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont stationnaires.
	Test d'autocorrélation de KENDALL	$R^2 = 0.000$	$r = 0.00$, pas de corrélation, données indépendantes.
Constantine	Test de PETTITT	0.332	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont homogènes.
	Test de KENDALL	0.272	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont stationnaires.
	Test d'autocorrélation de KENDALL	$R^2 = 0.053$	$r = 0.23$, corrélation très faible, données indépendantes.
Oran Es Senia	Test de PETTITT	0.279	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont homogènes.
	Test de KENDALL	0.671	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont stationnaires.
	Test d'autocorrélation de KENDALL	$R^2 = 0.007$	$r = 0.083$, corrélation très faible, données indépendantes.
Adrar	Test de PETTITT	0.985	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont homogènes.
	Test de KENDALL	0.762	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont stationnaires.
	Test d'autocorrélation de KENDALL	$R^2 = 0.03$	$r = 0.17$, corrélation très faible, données indépendantes.

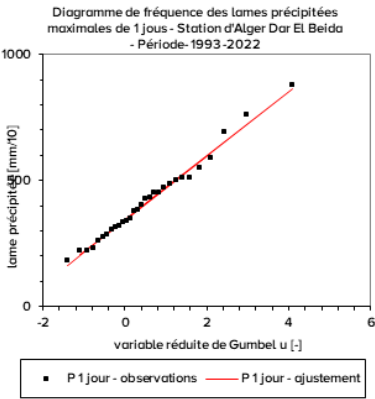


FIGURE 2. RR24 Alger Dar El Beida

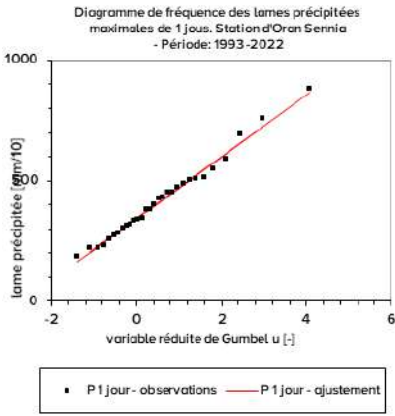


FIGURE 4. RR24 Oran Es Senia

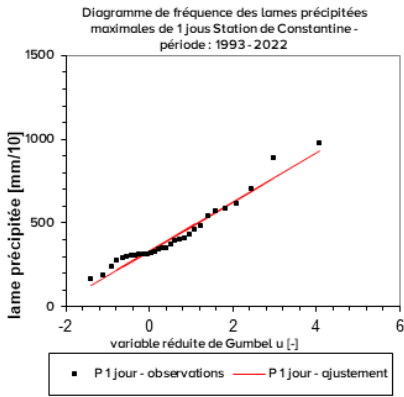


FIGURE 3. RR24 Constantine

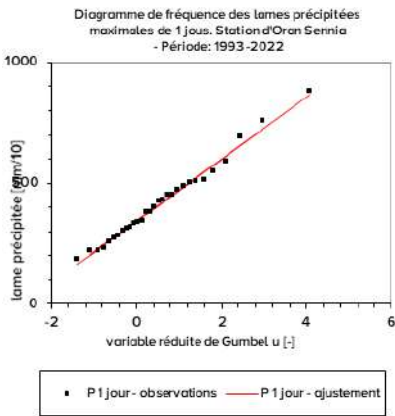


FIGURE 5. RR24 Oran Es Senia

Para- mèt- re	DEB	Cons- tan- tine	Es- Se- nia	Adr- ar
Mu	40.9	33.3	34.4	8.0
Sigma	13.1	14.6	12.7	5.4
Eta	0	0	0	0

TABLE 2. Exemple de résultats des tests d'hypothèses pour l'analyse fréquentielle.

L'analyse des données présentées dans le Tableau N°2 montre que les cumuls maximaux annuels RR24 s'alignent étroitement avec les principes de la théorie de Gumbel. Dans l'ensemble, l'ajustement est satisfaisant, comme en témoigne la corrélation entre les points expérimentaux et la droite d'ajustement. La loi de Gumbel constitue ainsi une méthode prometteuse pour évaluer les probabilités d'occurrence des cumuls et leurs périodes de retour. En se basant sur cette droite d'ajustement, les quantiles des cumuls maximaux ont été déterminés pour différentes périodes de retour. En conclusion, il a été établi que la loi statistique de Gumbel était pertinente dans tous les cas étudiés

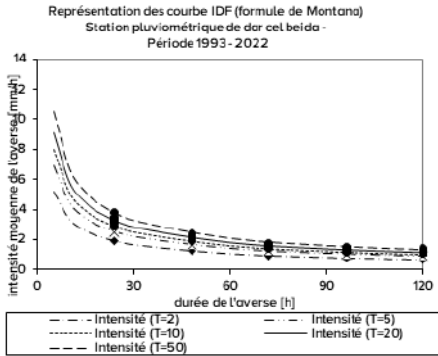


FIGURE 6. représentation IDF de Montana Station Dar El Beida

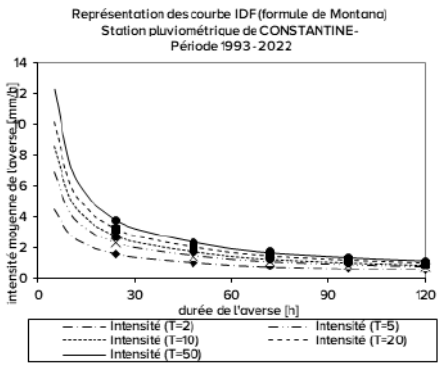


FIGURE 7. représentation IDF de Montana Station Constantine.

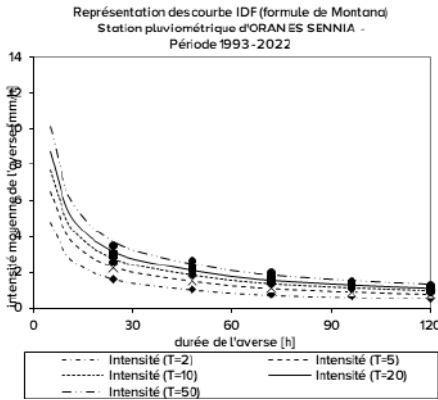


FIGURE 8. représentation IDF de Montana Station Oran Es Senia

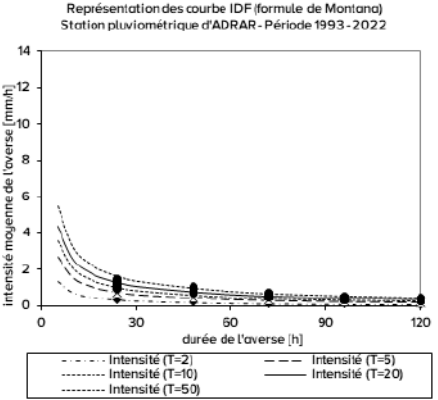


FIGURE 9. Représentation IDF de Montana Station Adrar.

La courbe IDF présente une série de courbes parallèles lorsqu'elle est représentée dans un système d'axes logarithmiques doubles. De manière générale, l'intensité des précipitations diminue avec l'augmentation de la durée d'agréga-tion et augmente avec la période de retour, ce qui implique que les intensités sont proportionnellement plus faibles à mesure que la durée s'allonge. Il est donc impératif que la fonction i soit décroissante. Les coefficients de Montana varient selon les régions et les périodes de retour correspon-

dantes.

4. Régionalisation des stations météorologiques en fonction de leur niveau d'intensité pluviométrique

4.1 Méthode de zonage climatique

Une combinaison de méthodes basées sur l'analyse multivariée a été employée pour étudier la régionalisation climatique en Algérie. Les principaux outils utilisés sont l'Analyse en Composantes Principales (ACP) (Cattell, R. B., 1966; Medjerab et al., 2005) et la classification K-means (Arabie, P., Hubert, L.J., De Soete, G., 1996; Forgey, E., 1965).

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une technique statistique utilisée pour réduire la dimensionnalité d'un ensemble de données tout en préservant le maximum de variance. Elle transforme les variables d'origine en un nouvel ensemble de variables orthogonales appelées composantes principales, qui sont des combinaisons linéaires des variables initiales. L'ACP permet ainsi de simplifier l'analyse en mettant en évidence les directions principales de variabilité dans les données. La classification K-means, quant à elle, est l'un des algorithmes de regroupement les plus couramment utilisés. Il repose sur une mesure de distance explicite pour diviser un ensemble de données en clusters. L'idée clé de l'algorithme K-means est de représenter chaque cluster par un vecteur de valeurs moyennes pour les attributs numériques, et par un vecteur de valeurs modales (les plus fréquentes) pour les attributs nominaux.

La combinaison de l'ACP et de la classification K-means, une stratégie fréquemment adoptée en analyse de données, permet une approche puissante et complémentaire. L'ACP réduit la dimensionnalité des données tout en mettant en évidence les principales sources de variabilité entre les individus et les variables. D'autre part, K-means regroupe les individus en fonction de leurs similitudes. Ensemble, ces deux méthodes offrent un outil puissant pour explorer la structure des données, identifier des clusters pertinents, et simplifier l'interprétation des résultats complexes.

4.2 RÉSULTATS

Dans cette article nous avons effectué l'analyse en composante principale et la classification de K-means sur les intensités maximales pluviométrique : 1 heure, 3 heures, 6 heures, 9 heures, 18 heures et 24 heures (variables colonnes) estimé à partir de la formule de Montana aux 50 stations pluviométrique étudié (individus ou observations lignes) pour un temps de retours T=10 ans.

4.2.1 Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) appliquée sur les intensités maximales pour T=10 ans :

Valeurs propres et variances

Le tableau numéro 4 présente les valeurs propres et les variances des facteurs issus de l'analyse en composantes principales. Seules les composantes dont les valeurs propres

sont supérieures ou égales à 1, et qui expliquent au moins 70 % de la variance cumulée, sont considérées comme significatives. Dans ce cas, seule la première composante répond à ces critères, expliquant 92,66 % de la variance. Cette composante regroupe l'essentiel des informations des matrices de données et corrèle de manière significative avec 42 stations, classées de la plus faible à la plus forte intensité. La deuxième composante, quant à elle, montre une corrélation avec 8 stations, dont Batna, Béchar, Bouira, Chlef et Tindouf, tandis que Bordj Bou Arreridj, El Oued et Oran Es Senia sont modérément corrélées.

	F1	F2
Valeur propre	5,560	0,403
Variabilité (%)	92,667	6,716
% cumulé	92,667	99,383

TABLE 3. Tableau des valeurs propres, variabilité et pourcentage cumulé pour F1 et F2

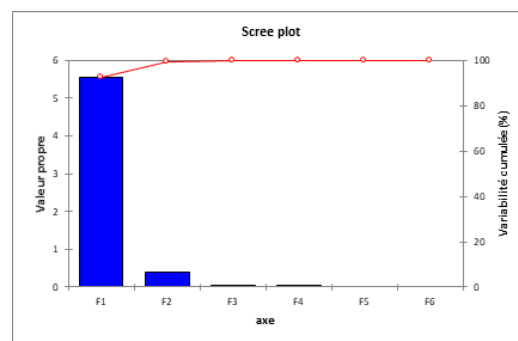


FIGURE 10. diagramme des valeurs propres

Analyse du cercle des variables et individus

Le graphique de la Figure 9 montre que seuls les plans factoriels F1-F2 ont été présentés, car ils reflètent de manière satisfaisante les structures des données. L'analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F2 révèle que ce plan explique 99,38 % de la variance totale, avec le facteur F1 dominant, contribuant à 92,67 % de la variance expliquée.

Le graphique met également en évidence une corrélation significative des variables avec l'axe F1, en particulier la forte corrélation de la variable 6h avec cet axe (voir Tableau N°5). Les individus sont dispersés de part et d'autre de cet axe, positif et négatif : les stations à faible intensité se situent du côté négatif de l'axe F1, tandis que les stations à forte intensité se trouvent du côté positif. Les stations positionnées du côté positif des deux axes présentent une forte intensité de 1h à 6h, comme en témoigne, par exemple, la station de M'sila.

Analyse dans l'espace des individus

La Figure N°10 révèle que le premier axe est un axe d'échelle classant les stations de la plus faible à la plus forte

Variable	F1	F2
1h	0,875	0,482
3h	0,983	0,182
6h	0,999	0,005
12h	0,988	-0,145
18h	0,973	-0,219
24h	0,952	-0,262

TABLE 4. Tableau des variables avec leurs valeurs associées pour F1 et F2

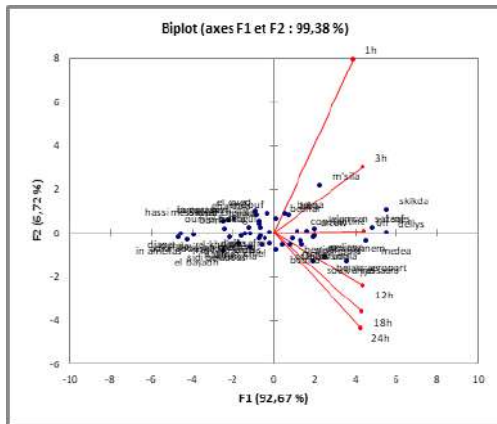


FIGURE 11. représentation graphique des variables-individus

intensité. Nous avons utilisé la dispersion des stations le long de l'axe F1 pour délimiter des zones de pluviométrie distinctes. L'axe F1 divise les stations en deux groupes : un groupe du côté positif et un autre du côté négatif de l'axe. Le plan principal défini par les deux premiers axes nous a permis de procéder à une pré-régionalisation des stations en 4 régions (voir Figure 10), dont les limites ont été établies de manière empirique sur le plan (1-2). Cette classification empirique sera optimisée et validée par une classification ultérieure. Les régions définies par l'Analyse en Composantes Principales serviront de point de départ pour une optimisation maximale de la régionalisation..

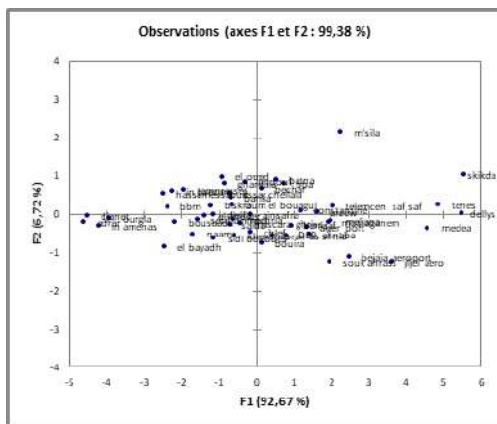


FIGURE 12. Espace des individus.

4.2.2 Résultats de classification K-means appliquée sur les intensités maximales pour T=10 ans

Les résultats de la classification K-means pour la période 1993-2022 permettent de distinguer quatre grandes catégories homogènes de stations pluviométriques en Algérie :

- **Catégorie C1** : Regroupe les stations situées principalement dans le sud du pays, telles qu'Adrar, Djanet, El Bayadh, Ouargla et In Amenas. Ces stations sont caractérisées par de faibles intensités de précipitations, variant entre 10,4 et 12,7 mm/h sur une heure, et entre 2,3 et 4,2 mm/h sur une période de 6 heures, avec un temps de retour T=10.
- **Catégorie C2** : Comprend des stations réparties dans diverses régions du pays, principalement à caractère continental, telles que Ain Sefra, Biskra, Bordj Badji Mokhtar, Boussaâda, Bouira, Chlef, Djelfa, El Kheiter, Khanchla, Mascara Ghriss, Mecheria, Oran Es Senia, Saida, Sétif, Sidi Bel Abbès, Tamanrasset, Oum El Bouaghi, Hassi Messaoud, In Guezzam et Naama. Les intensités y varient entre 16 et 23 mm/h pour une heure, et entre 4 et 6,5 mm/h pour une période de 6 heures, soit l'équivalent de 24 à 39 mm/6h.
- **Catégorie C3** : Englobe les stations principalement situées sur le littoral ainsi qu'à l'ouest, au sud-ouest, à l'est et au sud-est, incluant Benisaf, Alger Port, Arzew, Barika, Batna, Bordj Bou Arreridj, Béchar, Béjaïa Aéroport, Constantine, Dar El Beida, El Oued, Jijel Aéroport, Miliana, Mostaganem, Souk-Ahras, Tlemcen Saf Saf, Tindouf, Ghardaïa, Ksar Chellala et Annaba. Les intensités varient de 23 à 27 mm/h pour une heure, et entre 5,5 et 10 mm/h, soit 33 à 60 mm sur une période de 6 heures.
- **Catégorie C4** : Regroupe les stations aux intensités les plus élevées, avec des précipitations variant de 34 à 43,5 mm/h pour une heure, et une moyenne de 8,5 à 11,5 mm/h sur une période de 6 heures. Cette catégorie comprend les stations de M'sila, Dellys, Médéa, Skikda et Ténès.

5. Conclusion

Le principal intérêt de cette étude réside dans la recherche d'un modèle fréquentiel capable de décrire le régime des pluies journalières maximales annuelles en Algérie. Les modèles de distribution couramment utilisés, tels que les distributions GEV et Gumbel, ont globalement fourni des résultats satisfaisants. Les principaux résultats ont permis de vérifier les différentes hypothèses liées à l'analyse fréquentielle. Ainsi, les séries de valeurs maximales annuelles des précipitations journalières considérées sont composées de valeurs indépendantes, homogènes et stationnaires, ce qui garantit la fiabilité des résultats.

Les résultats de l'analyse graphique visuelle montrent que les séries des pluies journalières maximales annuelles

des stations suivent principalement la distribution de Gumbel. Il est donc recommandé d'utiliser la distribution de Gumbel, qui ne nécessite que deux paramètres et offre une expression mathématique plus simple, pour les études de dimensionnement des ouvrages hydrauliques en général et des systèmes d'évacuation des eaux pluviales en particulier.

L'application de l'analyse fréquentielle aux pluies extrêmes permet de déterminer des quantiles en fonction des périodes de retour, qui sont notamment utilisés pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Les courbes IDF ont été élaborées à partir des données recueillies sur 50 stations pluviométriques, et les coefficients de Montana ont été calculés pour estimer les intensités maximales.

Une fusion de l'analyse en composantes principales et de la classification K-means a été mise en œuvre à partir des données d'intensités maximales estimées. Cette approche a abouti à la segmentation de l'Algérie en quatre zones homogènes, allant de l'intensité la plus faible à la plus élevée.

Les courbes IDF sont cruciales pour évaluer les risques hydrologiques et hydrauliques associés aux inondations. En raison du changement climatique, les modèles météorologiques prédisent une augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes, ce qui pourrait entraîner des événements plus fréquents et plus intenses. Il est donc impératif de réviser et d'ajuster les courbes IDF pour refléter ces nouvelles conditions hydro-climatiques. Cette démarche est essentielle pour une gestion efficace des risques naturels et une planification adéquate des infrastructures. Adapter ces courbes permet non seulement d'anticiper plus précisément les impacts du changement climatique sur les inondations, mais aussi de renforcer la résilience des zones exposées à ces phénomènes météorologiques extrêmes.

Références

- [1] Amani Michel Kouassi, Relwindé Abdoul-Karim Nassa, Koffi Blaise Yao, Koffi Fernand Kouame et Jean Biemi (2018). Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). *Volume 31, numéro 2*, p. 147-160.
- [2] Pettitt A.N. (1979). A non-parametric approach to the change point problem. *Appl. Statist.*, 28(2), 126-135.
- [3] Kendall M. (1955). Rank Correlation Methods, Second Edition. Charles Griffin and Company, London.
- [4] Servat, E., Paturel, J. E., Lubès, H., Kouamé, B., Ouedraogo, M. & Masson, J. M. (1997). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part one : Detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.*, 191, 1-15.
- [5] Yue S. et Pilon P. (2004). A comparison of the power of the t-test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend-detection. *Hydrol. Sci. J.*, 49, 21-37.
- [6] Muller A. (2006). Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France. Thèse de doctorat, Univ. Montpellier 2, France, 214 p.
- [7] Benkhaled A. (2007). Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Cheliff. Comparaison des techniques et des résultats. *Courrier du Savoir*, 8, 83-91.
- [8] Soro G. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Univ. Nangui-Abrogoua, Côte d'Ivoire, 172 p.
- [9] Kouao J.M., Kouassi A.M., Dekoula S.C., Asseufi B.D. (2020). Analyse de la régionalisation climatique de la côte d'Ivoire dans un contexte de climat changeant. *LARHSS Journal*, 41, 233-259.
- [10] Medjerab A., Henia L. (2005). Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale. *Revue Géographique de l'Est*, vol. 45, 2.
- [11] Allam A., El Hassan J., Najem W., Bocquillon C., Moussa R. (2020). Classification climatique méditerranéenne pour l'hydrologie. *La Houille Blanche*, 1, 60-69.
- [12] Gumbel E.J. (1958). Statistics of extremes. Columbia University Press, NY, États-Unis, 375 p.
- [13] Mohymont, B., Demarée, G. R. & Faka, D. N. (2004). Establishment of IDF-curves for precipitation in the tropical area of Central Africa—comparison of techniques and results. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 375-387.
- [14] Mohymont B., Demarée G. R. (2006). Courbes intensité—durée—fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrological Sciences Journal*, 51(2), 239-253.
- [15] Arabie P., Hubert L.J. & De Soete G. (1996). Clustering and Classification. Wold Scientific, Singapore.
- [16] Forgey E. (1965). Cluster analysis of multivariate data : efficiency versus interpretability of classification. *Biometrics*, 21, 768.
- [17] Cattell R.B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, 1, 245-276.
- [18] Kasmi Mouloud (2012). Contribution méthodologique de la modélisation de l'intensité de pluie de courte durée. Projet de fin d'études (Ingéniorat), université Abderrahmane MIRA, BEJAIA.

Projections Climatiques en Algérie : Analyse des Évolutions de Températures selon les Scénarios SSP245 et SSP585.

ABANE Hakim^a

Résumé

Cette étude examine les projections climatiques en Algérie, en se concentrant sur l'évolution des températures minimales et maximales sous les scénarios SSP245 et SSP585. Les résultats montrent une augmentation significative des températures, particulièrement en été, affectant le nord de l'Algérie, les Hautes Plaines, le Sahara central, et l'extrême sud de l'Algérie. Sous le scénario SSP585, les hausses atteignent des niveaux alarmants, dépassant 9 °C d'ici 2100 dans certaines régions. Ce réchauffement extrême pose de graves risques pour l'agriculture, la gestion des ressources en eau, et la biodiversité, et pourrait rendre certaines zones inhabitables. L'étude met en lumière l'importance des stratégies d'adaptation pour atténuer les impacts du changement climatique en Algérie.

Mots clés Projections climatiques, températures minimales et maximales, scénario SSP245, scénario SSP585, réchauffement climatique, Algérie, Hautes Plaines, Sahara central, extrême sud, gestion des ressources, adaptation, impacts climatiques.

^aOffice National de la Météorologie. Algérie
Contact : h.abane@meteo.dz

Table des matières

1	Introduction	1
2	Méthodologie	2
3	Résultats et discussions	2
3.1	Projections Climatiques des Températures sur le Nord de l'Algérie : Scénarios SSP245 et SSP585	2
	Scénario SSP245 • Scénario SSP585	
3.2	Projections Climatiques des Températures sur les Hautes plaines : Scénarios SSP245 et SSP585	3
	Évolution des Températures selon le Scénario SSP245 • Évolution des Températures selon le Scénario SSP585	
3.3	Projections Climatiques des Températures sur le Nord du Sahara : Scénarios SSP245 et SSP585	4
	Scénario SSP 245 • Scénario SSP 585	
3.4	Projections Climatiques des Températures sur le Sahara central : Scénarios SSP245 et SSP585	5
	Scénario SSP 245 • Scénario SSP 585	
3.5	Projections Climatiques des Températures sur l'extrême sud de l'Algérie : Scénarios SSP245 et SSP585	6
	Scénario SSP 245 • Scénario SSP 585	
4	Conclusion	7
	Références	7

1. Introduction

Le changement climatique est l'un des défis les plus pressants auxquels l'humanité est confrontée aujourd'hui, avec des implications profondes pour l'environnement, l'économie et la société. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les activités humaines, notamment la combustion de combustibles fossiles et la déforestation, sont les principales causes de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, entraînant un réchauffement global sans précédent [1]. Les projections climatiques indiquent que, si les émissions continuent d'augmenter, nous pourrions atteindre un réchauffement de 1,5 °C d'ici 2030, avec des conséquences catastrophiques sur les écosystèmes et les sociétés humaines [2].

Les impacts du changement climatique se manifestent par une intensification des événements météorologiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les sécheresses prolongées et les inondations, qui menacent la sécurité alimentaire, la santé publique et la biodiversité [3]. Une étude menée par Coumou et Rahmstorf (2012) souligne que les régions vulnérables, notamment les zones arides et semi-arides, sont particulièrement touchées par ces changements, exacerbant les conditions de vie déjà précaires et entraînant des migrations forcées et des conflits pour les ressources [4].

L'Algérie, pays d'Afrique du Nord, est fortement exposée aux

effets du changement climatique, notamment à travers des modifications significatives des températures et des régimes de précipitations. En raison de sa géographie diversifiée, l'Algérie présente une grande variété de conditions climatiques, allant des zones méditerranéennes au nord, aux vastes étendues désertiques du Sahara au sud. Comprendre l'évolution des températures à travers ses différentes régions est essentiel pour anticiper les défis climatiques à venir et élaborer des stratégies d'adaptation adéquates.

Dans le cadre de cette étude, les projections climatiques pour les températures en Algérie ont été examinées dans cinq régions géographiques distinctes : le Nord de l'Algérie, les Hautes Plaines, le Nord du Sahara, le Sahara central et l'extrême Sud de l'Algérie. Ces analyses, basées sur le modèle climatique du CNRM de Météo-France et les scénarios de concentration de gaz à effet de serre (SSP 245 et SSP 585), visent à évaluer les tendances futures des températures minimales et maximales dans chaque région. L'objectif est de mieux comprendre les disparités régionales face au réchauffement climatique et de proposer des mesures spécifiques pour atténuer ses impacts sur les écosystèmes et les populations locales.

2. Méthodologie

Cette étude utilise une approche par horizons temporels pour analyser les projections climatiques des températures. Les périodes d'analyse sont définies comme suit : 2021-2040 (horizon 2030), 2041-2060 (horizon 2050), 2061-2080 (horizon 2070) et 2081-2100 (horizon 2090). Les taux de variation des paramètres climatiques sont calculés par rapport à la période de référence 1981-2020 (horizon 2000), fournissant ainsi une base pour évaluer les changements futurs.

Pour les températures maximales et minimales, la variation absolue par rapport à la période de référence est exprimée selon la formule suivant :

$$\text{Changement absolu de température} = T_{\text{moy horizon}} - T_{\text{moy réf}}$$

Où $T_{\text{moy horizon}}$ représente la moyenne des températures projetées sur chaque horizon et $T_{\text{moy réf}}$ correspond à la moyenne des températures observées sur la période de référence. Cette méthode permet de quantifier précisément l'évolution des températures dans le contexte du changement climatique.

Le modèle CNRM-CM (Centre National de Recherches Météorologiques - Climat Modèle) de Météo-France est un modèle climatique global utilisé pour simuler les changements climatiques à long terme. Ce modèle est développé en collaboration avec le CERFACS et fait partie des principaux modèles climatiques utilisés dans les évaluations du GIEC.

Le CNRM-CM combine des simulations atmosphériques, océaniques, de surface terrestre et des interactions avec la glace de mer pour prévoir les impacts du changement

climatique. Il prend en compte différents scénarios d'émissions, dont les SSP245 et SSP585, pour simuler les évolutions futures des températures, des précipitations et d'autres paramètres climatiques. Il est particulièrement utilisé pour les études régionales afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur les environnements spécifiques, comme le bassin méditerranéen ou l'Afrique du Nord.

Les scénarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) sont des trajectoires socio-économiques qui décrivent différents futurs possibles en fonction des choix de développement, des politiques et des émissions de gaz à effet de serre. [5] SSP245 Ce scénario représente un avenir où des efforts modérés de mitigation des émissions de gaz à effet de serre sont mis en œuvre. Il suppose une réduction progressive des émissions et l'adoption de politiques de développement durable. Les sociétés s'engagent à limiter le réchauffement climatique à un niveau modéré, ce qui implique des transformations dans les systèmes énergétiques, les infrastructures et les pratiques agricoles. Les impacts climatiques sont atténués par des mesures d'adaptation et de résilience. [6]. SSP585 Ce scénario envisage un avenir où les émissions de gaz à effet de serre continuent de croître sans contrôle, conduisant à un réchauffement global plus intense. Les politiques de mitigation sont faibles ou inexistantes, et les sociétés ne parviennent pas à s'adapter efficacement aux changements climatiques. Ce scénario est associé à des impacts climatiques sévères, tels que des vagues de chaleur extrêmes, des sécheresses prolongées et des événements météorologiques extrêmes, avec des conséquences significatives sur les écosystèmes, la santé humaine et la sécurité alimentaire.

Ces scénarios sont utilisés pour modéliser les impacts potentiels du changement climatique et orienter les stratégies d'adaptation et de gestion des risques climatiques. [6]

3. Résultats et discussions

3.1 Projections Climatiques des Températures sur le Nord de l'Algérie : Scénarios SSP245 et SSP585

Les projections climatiques pour le nord de l'Algérie révèlent une augmentation significative des températures sous les scénarios SSP245 et SSP585, sur particulièrement durant les mois d'été. Cette analyse met en lumière des tendances importantes pour les températures minimales et maximales selon différents horizons temporels.

3.1.1 Scénario SSP245

- **Horizon 2021-2040** : Les températures maximales montrent une augmentation importante en été, avec des hausses de +2.05°C en août et +1.96°C en septembre. Les températures minimales augmentent également, avec des hausses de +1.67°C en août et +1.73°C en septembre, indiquant un réchauffement nocturne significatif.
- **Horizon 2041-2060** : Le réchauffement se poursuit, avec des températures maximales en hausse de +2.91°C

en août et +2.74°C en septembre. Les températures minimales suivent la même tendance, avec une augmentation de +2.43°C en août et +2.42°C en septembre, suggérant un réchauffement accentué tout au long de l'année, particulièrement durant l'été.

- **Horizon 2061-2080** : La tendance au réchauffement s'intensifie, avec des hausses des températures maximales de +3.61°C en août et +3.66°C en septembre. Les températures minimales augmentent également, atteignant +3.08°C en août et +3.18°C en septembre, soulignant une intensification du réchauffement estival, plus que les autres saisons.
- **Horizon 2081-2100** : Les températures maximales continuent d'augmenter, avec des hausses significatives en août (+4.37°C) et septembre (+4.26°C). Les températures minimales suivent cette tendance avec des augmentations de +3.81°C en août et +3.90°C en septembre, indiquant un réchauffement intense des journées et des nuits estivales.

3.1.2 Scénario SSP585

- **Horizon 2021-2040** : Les températures maximales montrent une augmentation continue sur l'ensemble de la période, particulièrement marquée durant l'été, avec des hausses de +2,09 °C en août et de +2,04 °C en septembre. De manière similaire, les températures minimales suivent cette tendance, enregistrant des augmentations notables durant la saison estivale, pouvant atteindre +1,82 °C en septembre.
- **Horizon 2041-2060** : Le réchauffement devient plus prononcé, avec des hausses des températures maximales de +3,26 °C en août et +3,01 °C en juillet. Les températures minimales augmentent également, notamment en août (+2,75 °C) et septembre (+2,71 °C).
- **Horizon 2061-2080** : Les températures maximales continuent de croître, atteignant +5,53 °C en août et +5,69 °C en septembre. Les températures minimales augmentent également de façon marquée en été, avec +4,85 °C en août et +5,15 °C en septembre, reflétant un réchauffement extrême.
- **Horizon 2081-2100** : Ce scénario présente les hausses les plus significatives, avec des augmentations des températures maximales de +7,81 °C en août et +6,87 °C en juillet. Les températures minimales suivent cette tendance, avec des hausses de +6,93 °C en août et +5,94 °C en juillet, confirmant un réchauffement massif au cours de ce siècle.

En résumé, les projections montrent une augmentation significative des températures dans le nord de l'Algérie sous les scénarios SSP245 et SSP585, avec des hausses plus marquées dans le scénario SSP585. Le réchauffement est particulièrement prononcé en été, ce qui pourrait entraîner des impacts importants sur l'agriculture, les écosystèmes et la gestion des ressources en eau.

3.2 Projections Climatiques des Températures sur les Hautes plaines : Scénarios SSP245 et SSP585

3.2.1 Évolution des Températures selon le Scénario SSP245

— Horizon 2021-2040 :

- **Températures minimales** : Les hausses prévues varient entre +0.9°C (février) et +2.5°C (septembre). Les mois d'été (juillet, août, septembre) connaissent les augmentations les plus importantes, atteignant +2.5°C en septembre. Ces augmentations reflètent un réchauffement global modéré, avec une accentuation durant l'été.
- **Températures maximales** : Les hausses varient de +1.14°C en janvier à +2.87°C en août. Les mois d'été sont les plus touchés avec +2.59°C en juillet et +2.87°C en août, suggérant un réchauffement significatif durant la période estivale.

— Horizon 2041-2060 :

- **Températures minimales** : Les hausses s'intensifient, allant de +1.01°C (février) à +3.72°C (août). L'été continue à être la saison la plus chaude, avec des températures minimales en hausse particulièrement en juillet et août (+3.15°C et +3.72°C respectivement).
- **Températures maximales** : Les hausses varient entre +1.63°C (février) et +4.19°C (août). Les mois de juillet et août restent les plus affectés, avec des augmentations dépassant +3.5°C, signalant une élévation marquée des températures maximales en été.

— Horizon 2061-2080 :

- **Températures minimales** : Les hausses prévues sont encore plus prononcées, atteignant +4.65°C en septembre et +4.6°C en août. L'augmentation continue des températures minimales au cours de l'été suggère un réchauffement nocturne important.
- **Températures maximales** : Les hausses atteignent +5.1°C en août et +5.06°C en septembre. La hausse des températures maximales en été dépasse +4°C à partir de juin, signalant un réchauffement important durant toute la saison estivale.

— Horizon 2081-2100 :

- **Températures minimales** : Les hausses atteignent jusqu'à +5.31°C en septembre et +5.28°C en août, signalant un réchauffement nocturne important et continu en fin de siècle.
- **Températures maximales** : Les hausses maximales atteignent +5.72°C en août, avec des augmentations importantes également en juillet et septembre (+5.5°C et +5.45°C respectivement).

3.2.2 Évolution des Températures selon le Scénario SSP585

— Horizon 2021-2040 :

- **Températures minimales** : Les hausses sont plus prononcées que sous le scénario SSP245, atteignant +2.68°C en août et +2.69°C en septembre, indiquant un réchauffement substantiel dès le début du siècle, surtout en été.
- **Températures maximales** : Les hausses des températures maximales atteignent +2.83°C en septembre et +3.08°C en août, signalant un réchauffement marqué durant la période estivale.

— Horizon 2041-2060 :

- **Températures minimales** : Les hausses prévues varient entre +1.41°C (février) et +3.96°C (août). Les mois d'été (juillet, août, septembre) connaissent les augmentations les plus importantes, atteignant +3.96°C en août. L'été devient de plus en plus chaud, avec des températures minimales augmentant de manière significative.
- **Températures maximales** : Les hausses varient de +2°C en février à +4.43°C en juillet. Les mois d'été sont les plus touchés, avec +4.43°C en juillet et +4.39°C en août.

— Horizon 2061-2080 :

- **Températures minimales** : Les augmentations atteignent +6.86°C en septembre et +6.59°C en août, signalant un réchauffement extrême nocturne en été.
- **Températures maximales** : Les hausses atteignent +7.19°C en août, ce qui suggère des vagues de chaleur intenses et prolongées, avec des augmentations de températures maximales très élevées.

— Horizon 2081-2100 :

- **Températures minimales** : Les hausses continuent d'être très élevées, atteignant +9.58°C en septembre et +9.5°C en août, signalant un réchauffement sans précédent en fin de siècle.
- **Températures maximales** : Les hausses atteignent +10.14°C en août et +9.95°C en septembre, confirmant un réchauffement extrême avec des hausses des températures maximales estivales dépassant les +9°C.

— **Températures minimales** : Les augmentations varient de 1,06°C en janvier à 2,42°C en septembre, avec un pic estival. Cela signifie que les nuits deviennent plus chaudes, particulièrement pendant l'été.

— **Températures maximales** : Elles augmentent également, avec une élévation moyenne variant de 1,1°C en janvier à 2,55°C en septembre. L'été semble particulièrement affecté, avec des journées encore plus chaudes qu'auparavant.

Cela suggère un renforcement des vagues de chaleur, rendant l'été plus difficile à supporter et exacerbant le stress thermique dans cette région aride.

— **Horizon 2041-2060** : Pour cette période, l'intensité du réchauffement continue d'augmenter :

— **Températures minimales** : Elles augmentent de 0,98°C en mars à 3,42°C en août, traduisant des nuits de plus en plus chaudes, surtout en été.

— **Températures maximales** : Les hausses atteignent des niveaux élevés avec une augmentation allant jusqu'à 3,73°C en août. Les mois estivaux montrent une tendance vers des chaleurs extrêmes, rendant la région potentiellement invivable pendant certaines périodes de l'année.

Les impacts sur la santé humaine, les écosystèmes et l'agriculture seront critiques.

— **Horizon 2061-2080** : Le réchauffement devient encore plus prononcé à l'horizon 2061-2080 :

— **Températures minimales** : Les augmentations varient de 2,39°C en janvier à 4,42°C en septembre, ce qui montre des nuits étouffantes, même après le coucher du soleil.

— **Températures maximales** : Elles augmentent de façon dramatique, avec des hausses atteignant 4,73°C en août.

— **Horizon 2081-2100** :

— **Températures minimales** : Elles continuent d'augmenter de 2,33°C en avril à 5,15°C en octobre. Les mois estivaux conservent des températures nocturnes très élevées.

— **Températures maximales** : Les hausses maximales atteignent 5,2°C en août, montrant que les journées seront encore plus chaudes.

3.3 Projections Climatiques des Températures sur le Nord du Sahara : Scénarios SSP245 et SSP585

3.3.1 Scénario SSP 245

— **Horizon 2021-2040** : Pendant cette période, les températures minimales et maximales augmentent progressivement, indiquant un réchauffement notable dans la région du Nord du Sahara :

3.3.2 Scénario SSP 585

Le scénario SSP 585, plus pessimiste, montre un réchauffement encore plus important dans cette région :

— **Horizon 2021-2040** :

— **Températures minimales** : Augmentations de 1,31°C en janvier à 2,6°C en septembre.

- **Températures maximales** : Les hausses atteignent 2,75°C en août, montrant une intensification rapide du réchauffement dans les décennies à venir.
- **Horizon 2041-2060** :
 - **Températures minimales** : Des hausses significatives jusqu'à 3,87°C en septembre.
 - **Températures maximales** : Des augmentations maximales de 3,86°C en août, indiquant un été extrêmement chaud.
- **Horizon 2061-2080** :
 - **Températures minimales** : Des hausses pouvant aller jusqu'à 6,62°C en septembre.
 - **Températures maximales** : Les températures maximales augmentent jusqu'à 6,54°C en août, ce qui suggère des vagues de chaleur très fréquentes et intenses.

Le Nord du Sahara est fortement touché par le changement climatique, avec des hausses de température alarmantes, surtout en été. Les nuits chaudes et les journées de plus en plus torrides auront des impacts sérieux sur les populations locales, la biodiversité et les ressources en eau.

3.4 Projections Climatiques des Températures sur le Sahara central : Scénarios SSP245 et SSP585

L'analyse du changement climatique dans le Sahara central, basée sur les projections des températures minimales et maximales issues des modèles CNRM, montre des augmentations notables dans les deux scénarios (SSP 245 et SSP 585).

3.4.1 Scénario SSP 245

- **2021-2040** :
 - **Températures minimales** : Les hausses les plus marquées sont observées en août (+2,45 °C), juillet (+2,34 °C), septembre (+2,41 °C) et octobre (+2,42 °C). Les mois d'hiver montrent des augmentations plus modérées, telles que janvier (+1,08 °C) et février (+1,03 °C).
 - **Températures maximales** : Hausses importantes durant les mois d'été, notamment en juillet (+2,39 °C) et août (+2,35 °C). Les augmentations sont plus faibles en hiver, avec +1,34 °C en janvier et +1,49 °C en février.
- **2041-2060** :
 - **Températures minimales** : Les hausses les plus importantes sont enregistrées en juillet (+3,35 °C) et août (+3,52 °C). Le printemps montre des hausses notables, notamment en mai (+1,94 °C) et juin (+2,53 °C), tandis que les mois d'hiver affichent des augmentations plus modérées, comme janvier (+1,71 °C) et février (+1,36 °C).

- **Températures maximales** : Les mois d'été restent les plus touchés, avec des hausses de +3,24 °C en juillet et +3,38 °C en août. Le printemps montre aussi des augmentations significatives en mai (+2,14 °C) et juin (+2,41 °C). En hiver, des hausses notables de +2,87 °C en décembre, +2,12 °C en janvier et +1,78 °C en février sont observées.

— 2061-2080 :

- **Températures minimales** : Les augmentations sont particulièrement importantes en été, avec +4,07 °C en juillet et +4,32 °C en août. Juin (+3,28 °C) et septembre (+4,25 °C) montrent également des hausses importantes. En hiver, les augmentations sont plus modérées, avec +2,68 °C en janvier et +2,73 °C en février.
- **Températures maximales** : Des hausses significatives sont observées en août (+4,55 °C), juillet (+4,21 °C) et septembre (+4,31 °C), ainsi qu'en mars (+4,03 °C) et juin (+3,63 °C). En hiver, des augmentations plus modérées sont relevées, comme en janvier (+3,29 °C) et février (+3,82 °C).

— 2081-2100 :

- **Températures minimales** : Hausses particulièrement marquées en août (+4,86 °C), juillet (+4,44 °C), septembre (+5,04 °C) et octobre (+5,21 °C). En hiver, les hausses sont plus modérées avec +3,75 °C en décembre et +2,94 °C en janvier.
- **Températures maximales** : Des hausses substantielles en août (+4,83 °C) et juillet (+4,44 °C). Juin affiche également une augmentation notable (+3,82 °C), tandis qu'en hiver, les hausses atteignent +3,44 °C en janvier et +3,70 °C en décembre.

3.4.2 Scénario SSP 585

— 2021-2040 :

- **Températures minimales** : Augmentations marquées avec des pics en septembre (+2,42 °C) et octobre (+2,58 °C). Les mois d'hiver présentent des hausses plus modérées, avec janvier (+1,30 °C) et février (+1,39 °C).
- **Températures maximales** : Augmentations importantes durant les mois d'été et d'automne, notamment en août (+2,54 °C) et octobre (+2,80 °C). Les hausses hivernales sont également plus importantes par rapport au scénario SSP 245, avec janvier (+2,02 °C) et février (+2,33 °C).

— 2041-2060 :

- **Températures minimales** : Les hausses sont les plus significatives en été, avec des valeurs de +3,94 °C en juillet et +3,99 °C en août, et en automne, avec des pics en septembre (+4,11 °C).

et octobre (+4,15 °C). Les hausses hivernales dépassent celles du SSP 245, avec 2,03 °C en janvier et 1,68 °C en février.

- Températures maximales : Les augmentations les plus significatives sont observées durant les mois d'été et d'automne, avec +3,85 °C en juillet, +3,73 °C en août, et environ +3,63 °C à +3,64 °C en septembre et octobre. Les hausses hivernales sont plus modérées mais élevées, avec +2,15 °C en janvier et +1,93 °C en février.
- **2061-2080 :**
 - Températures minimales : Les hausses atteignent des pics de +6,52 °C en septembre et +6,62 °C en octobre. Les mois d'été montrent également des augmentations importantes, avec +5,57 °C en juillet et +6,29 °C en août. Les hausses hivernales restent significatives, avec +5,35 °C en décembre et +4,41 °C en janvier.
 - Températures maximales : Les augmentations sont particulièrement fortes, avec +6,27 °C en août et +5,51 °C en juillet. Les mois d'automne montrent également des hausses substantielles, comme +5,79 °C en octobre et +6,13 °C en septembre. En hiver, les hausses sont moindres comparées à l'été mais restent élevées, avec +4,87 °C en décembre et +4,21 °C en janvier.
- **2081-2100 :**
 - Températures minimales : Augmentations extrêmes durant l'été, avec +8,82 °C en août et +8,98 °C en septembre. L'automne continue cette tendance, avec des hausses significatives en octobre (+9,28 °C) et en novembre (+8,94 °C). Les hausses hivernales sont importantes, notamment en décembre (+7,65 °C) et en janvier (+6,30 °C).
 - Températures maximales : Augmentations marquées, avec un pic en août (+8,73 °C) et en septembre (+8,76 °C). Les mois d'automne montrent également des hausses significatives, avec +8,98 °C en octobre et +8,70 °C en novembre. Les hausses hivernales sont élevées, atteignant +7,60 °C en décembre et +6,56 °C en janvier.

Les températures dans le Sahara central augmentent considérablement tout au long du siècle dans les deux scénarios, avec des augmentations plus marquées dans le scénario SSP 585. Les mois d'été subissent les augmentations les plus sévères, posant des défis importants en termes de stress thermique et d'adaptation pour cette région déjà chaude et aride.

3.5 Projections Climatiques des Températures sur l'extrême sud de l'Algérie : Scénarios SSP245 et SSP585

L'analyse des changements climatiques sur l'extrême sud de l'Algérie, en se concentrant sur les températures

mensuelles minimales et maximales, montre une tendance claire à l'augmentation sous les scénarios SSP 245 et SSP 585.

3.5.1 Scénario SSP 245

- **2021-2040 :**
 - Températures minimales : Les hausses atteignent en moyenne 2,5°C, avec une augmentation modérée durant l'année, particulièrement en juillet.
 - Températures maximales : Les augmentations moyennes sont de 2°C, avec des hausses modérées également en juillet.
- **2041-2060 :**
 - Températures minimales : Les hausses dépassent les 3°C de juin à octobre, indiquant une intensification du réchauffement, surtout durant l'été avec des pics de juillet à septembre.
 - Températures maximales : Les augmentations atteignent 3,2°C en juillet, montrant une intensification marquée durant cette période estivale.
- **2061-2080 :**
 - Températures minimales : Les hausses sont significatives, atteignant plus de 4,1°C en juin, juillet, août, septembre et octobre.
 - Températures maximales : Les augmentations varient de 3,5°C à 4°C, illustrant un réchauffement marqué surtout pendant les mois les plus chauds.
- **2081-2100 :**
 - Températures minimales : Les hausses sont plus prononcées, atteignant environ 5°C durant les saisons estivales et automnales.
 - Températures maximales : Les augmentations dépassent les 4°C durant les mêmes saisons, indiquant des températures de plus en plus élevées.

3.5.2 Scénario SSP 585

- **2021-2040 :**
 - Températures minimales : Les hausses varient de 2°C à 3°C, particulièrement marquées entre juin et août.
 - Températures maximales : Les augmentations sont similaires, de 2°C à 3°C, avec des hausses notables durant les mois d'été.
- **2041-2060 :**
 - Températures minimales : Les hausses atteignent 4,36°C en juillet, août et septembre.
 - Températures maximales : Les augmentations varient de 3°C à 4°C, montrant une tendance croissante similaire aux températures minimales.
- **2061-2080 :**

- Températures minimales : Les hausses dépassent 6,4°C de juin à décembre, indiquant un réchauffement critique.
- Températures maximales : Les augmentations dépassent 5,1°C durant la même période, soulignant un réchauffement alarmant et rapide.
- **2081-2100 :**
 - Températures minimales : Les hausses atteignent près de 9°C, particulièrement affectant les mois d'été et d'automne (juin à octobre).
 - Températures maximales : Les augmentations suivent une tendance similaire, avec des hausses proches de 9°C, suggérant des vagues de chaleur sévères et durables.

L'extrême sud de l'Algérie est exposé à des augmentations soutenues des températures tout au long du siècle. Sous le scénario SSP 245, le réchauffement est modéré mais continu, tandis que le scénario SSP 585 montre un réchauffement bien plus rapide et marqué. Les températures minimales et maximales augmentent drastiquement en été, ce qui pourrait entraîner des impacts significatifs sur les écosystèmes et les activités humaines dans la région.

4. Conclusion

Cette étude souligne la gravité du réchauffement climatique en Algérie, avec des augmentations significatives des températures projetées tout au long du 21^{ème} siècle sous les scénarios SSP245 et SSP585. Que ce soit pour le nord de l'Algérie, les Hautes Plaines, le Nord du Sahara, le Sahara central ou l'extrême sud de l'Algérie, les tendances indiquent un réchauffement intense, surtout durant les mois d'été. Les projections montrent que les scénarios plus pessimistes, tels que le SSP585, entraîneront des hausses de températures beaucoup plus marquées, avec des augmentations de plus de 9°C pour certaines régions, exacerbant les vagues de chaleur et augmentant le stress thermique sur les popu-

lations et les écosystèmes.

Les impacts potentiels sur les ressources en eau, l'agriculture et la biodiversité seront critiques, en particulier dans les régions arides comme le Sahara et l'extrême sud de l'Algérie, où les températures élevées pourraient rendre certaines zones difficilement habitables. Les projections appellent à des stratégies d'adaptation robustes pour atténuer ces impacts, notamment dans la gestion des ressources en eau et l'agriculture, afin de limiter les conséquences économiques et sociales du réchauffement.

En somme, cette étude met en évidence la nécessité urgente d'une action climatique à grande échelle pour limiter l'ampleur du réchauffement futur et pour préparer l'Algérie aux défis climatiques à venir.

Références

- [1] IPCC. (2021). *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- [2] IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report*.
- [3] Coumou, D., & Rahmstorf, S. (2012). A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2(7), 491-496.
- [4] Diffenbaugh, N. S., et al. (2017). Quantifying the influence of global warming on the 2016 California drought. *Science Advances*.
- [5] O'Neill, B. C., et al. (2014). A new scenario framework for climate change research : The Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 22(1), 1-12. DOI : 10.1016/j.gloenvcha.2013.11.003.
- [6] Riahi, K., et al. (2017). Shared Socioeconomic Pathways : A framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 42, 148-153. DOI : 10.1016/j.gloenvcha.2016.02.007.

Étude des projections climatiques sur l'Algérie à l'horizon 2100 : cas de la sécheresse

Zakaria BENGHABRIT^a

Résumé

Cette étude analyse les tendances de la sécheresse dans le nord de l'Algérie jusqu'en 2100, en utilisant l'indice de précipitations normalisé (SPI) calculé à différentes échelles temporelles (3, 6, et 12 mois) et des projections climatiques basées sur le modèle IPSL-CM5 sous le scénario RCP4.5. Les résultats révèlent une augmentation modérée de l'intensité des sécheresses météorologiques à court et moyen terme (3 à 6 mois), particulièrement durant la saison humide d'octobre à mars, indiquant des hivers plus secs susceptibles d'affecter l'agriculture. Cependant, à plus long terme (12 mois), aucune intensification significative des sécheresses n'est observée, suggérant une stabilité relative des conditions climatiques. Bien que les sécheresses agricoles et météorologiques puissent devenir plus fréquentes, les sécheresses hydrologiques ne devraient pas représenter un risque majeur. Il est recommandé de compléter ces résultats par d'autres indices de sécheresse tels que le SPEI et d'explorer les impacts sous des scénarios plus pessimistes comme le RCP8.5.

Mots clés : Sécheresse, Indice SPI, IPSL-CM5, Précipitations, Agriculture, Algérie, RCP4.5, Tendances climatiques.

^a Direction Météorologique Régional Ouest (DMRO-Oran)
Correspondant : benghabritzak@gmail.com

Table des matières

1	Introduction	1
2	Méthodologie	2
2.1	L'indice de précipitation normalisé	2
	Origine • Caractéristiques • Utilité • Limites	
2.2	Modèle climatique IPSL-CM5	2
	Scénario RCP4.5	
2.3	Collecte et traitement des données	3
	Sources de données	
3	Résultats	3
3.1	SPI sur 3 mois	4
3.2	SPI sur 6 mois	5
3.3	SPI sur 12 mois	6
4	Conclusion	6
	Références	7

1. Introduction

La sécheresse est un phénomène insidieux qui résulte d'une diminution des précipitations par rapport à des niveaux considérés comme normaux. Lorsque cette anomalie persiste sur une saison ou sur une période plus longue, les précipitations deviennent insuffisantes pour répondre aux besoins de l'environnement et des activités humaines. La sécheresse doit être appréhendée comme un état relatif,

variant selon les régions, chacune ayant ses propres caractéristiques climatiques. Ainsi, les sécheresses observées dans les Grandes Plaines d'Amérique du Nord diffèrent de celles qui touchent le nord-est du Brésil, l'Afrique australe, l'Europe occidentale, l'Australie orientale ou encore la plaine du nord de la Chine. Ces différences sont liées aux variations de la quantité, du cycle saisonnier et de la nature des précipitations propres à chaque région. [1]
Outre les précipitations, d'autres facteurs comme la température, le vent et l'humidité relative jouent un rôle déterminant dans la caractérisation de la sécheresse. Le suivi de ce phénomène doit également tenir compte des impacts spécifiques à chaque secteur, puisque la sécheresse affecte différemment les gestionnaires de l'eau, les agriculteurs, les opérateurs de centrales hydroélectriques ou les écologistes. Même au sein d'un même secteur, ses effets peuvent être perçus de manière variable. La sécheresse est généralement classée en trois types principaux : météorologique, agricole et hydrologique, et elle varie en fonction de son intensité, de sa durée et de sa couverture spatiale. [1]
Au fil des années, divers indices de sécheresse ont été développés par des météorologues et climatologues à travers le monde, allant des plus simples, comme le pourcentage des normales de précipitations, aux plus complexes, tels que l'indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI, Palmer, 1965) [5]. Aux États-Unis, des experts ont souligné la nécessité d'un indice simple à calculer, statistiquement

pertinent et adapté à différents contextes. Cela a conduit McKee, Doesken et Kleist à développer, en 1993, l'indice de précipitations standardisé (SPI), qui permet une évaluation plus précise des déficits de précipitations en fonction de leurs impacts sur divers aspects hydrologiques, comme les eaux souterraines, les réservoirs, l'humidité du sol ou les écoulements des cours d'eau. [1]

Cet article se structure en trois parties. La première présente une description de l'indice SPI (McKee et al. 1993, 1995) [4] ainsi que du modèle climatique IPSL-CM5. Dans la seconde partie, une analyse des cartes du SPI sera réalisée pour identifier les tendances de la sécheresse. Enfin, une conclusion générale viendra clore cette étude.

2. Méthodologie

2.1 L'indice de précipitation normalisé

2.1.1 Origine

L'indice SPI (Standardized Precipitation Index) a été développé en 1992 par McKee et ses collègues à l'Université d'État du Colorado. Présenté en 1993 lors de la Conférence sur la climatologie appliquée, il a été recommandé par l'OMM en 2009 pour surveiller les sécheresses météorologiques. [2]

2.1.2 Caractéristiques

Le SPI repose sur l'analyse des précipitations historiques et permet de calculer la probabilité de sécheresses sur des périodes allant de 1 à 48 mois. Plus la série de données est longue, plus la distribution est fiable. Le SPI peut être calculé avec un minimum de 20 ans de données, mais une série de 30 ans est préférable. [2]

L'indice quantifie les déficits de précipitations sur différentes échelles de temps pour répondre aux besoins variés des décideurs. Il est utilisé pour identifier des sécheresses météorologiques (1-2 mois), agricoles (1-6 mois) et hydrologiques (6-24 mois). [1]

2.1.3 Utilité

Le SPI est flexible et peut être calculé même en cas de lacunes dans les données. Il est utilisé dans l'agriculture, la gestion des ressources en eau, et d'autres secteurs. Il est simple à calculer, comparé à d'autres indices, car il ne nécessite que des données de précipitations. [2]

2.1.4 Limites

L'indice ne prend pas en compte les températures, qui influencent pourtant le bilan hydrique. Il peut également poser des difficultés d'interprétation lorsque les séries de données sont trop courtes ou incomplètes.

2.2 Modèle climatique IPSL-CM5

L'IPSL-CM5 est la 5e version du modèle climatique de L'IPSL (Institut Pierre-Simon de Laplace). C'est un modèle du système terre global. En plus du modèle physique atmosphère-sol-océan-glace de mer, il inclut une représentation

TABLE 1. Échelle d'intensité SPI

Valeur du SPI	Description
$SPI > 2.0$	Extrêmement humide
$1.5 < SPI < 1.99$	Très humide
$1.0 < SPI < 1.49$	Modérément humide
$-0.99 < SPI < 0.99$	Proche de la normale
$-1.49 < SPI < -1.0$	Modérément sec
$-1.99 < SPI < -1.5$	Très sec
$SPI < -2.0$	Extrêmement sec

du cycle de carbone, la chimie troposphérique et stratosphérique avec les aérosols. [3]

Il existe deux versions de ce modèle : L'IPSL-CM5A qui est une extension de l'IPSL-CM4, tandis que l'IPSL-CM5B est un modèle atmosphérique avec une paramétrisation physique totalement différente. L'IPSL-CM5A est devenu l'IPSL-CM5A2 avec l'objectif d'avoir une version plus rapide pur de longues simulations.

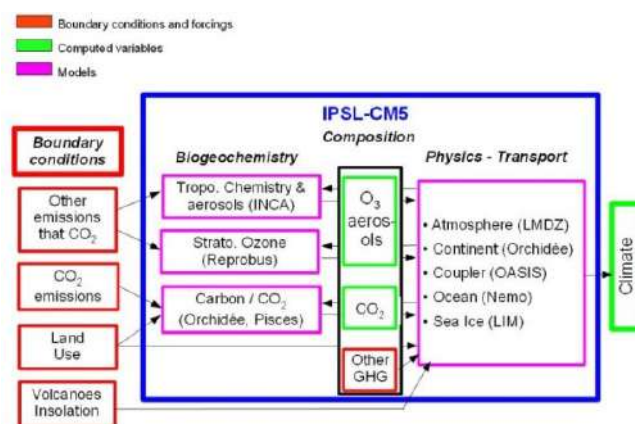


FIGURE 1. Schéma du modèle climatique IPSL-CM5

Le modèle IPSL-CM5 est composé des modèles suivants :

- Le modèle atmosphérique **LMDZ**.
- Le modèle océan **NEMO**, incluant la glace de mer et la biogéochimie marine.
- Le modèle des surfaces continentales **ORCHIDEE**, incluant le cycle de carbone.
- Le modèle de chimie et aérosols **INCA**.
- Le modèle couplé géochimie-climat **LMDz-REPROBUS**.

L'IPSL-CM5 a été utilisé dans le cadre de la 5e phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project), avec une unique résolution pour le modèle océan (2°, avec une résolution méridionale de 0.5° au voisinage de l'équateur), et 2 résolutions différentes pour le modèle atmosphère : une faible résolution de 1.9° x 3.75° (96x96xL39), et moyenne résolution de 1.25° x 2.5° (144x143xL39) . [3]

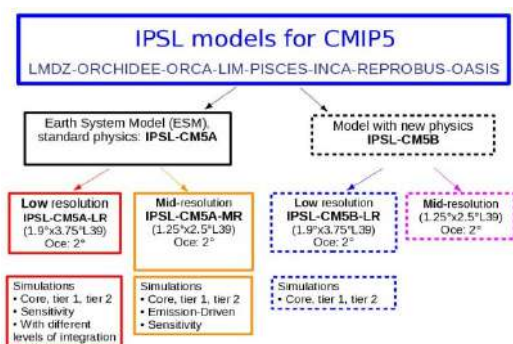


FIGURE 2. Les modèles de l'IPSL pour le CMIP5

2.2.1 Scénario RCP4.5

Le scénario RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) est l'un des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre utilisés dans le cadre du cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Ce scénario représente un avenir où les émissions de gaz à effet de serre augmentent dans un premier temps, puis se stabilisent grâce à des politiques de réduction des émissions.

Caractéristiques du scénario

RCP4.5 suppose une augmentation modérée des concentrations de gaz à effet de serre, avec des efforts significatifs pour atténuer les émissions à partir de 2020. Ce scénario est souvent considéré comme un scénario intermédiaire, où les efforts de réduction des émissions sont mis en œuvre, mais pas de manière suffisamment agressive pour éviter un réchauffement climatique significatif.

Importance pour les projections climatiques

L'utilisation du scénario RCP4.5 dans les simulations climatiques permet d'évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur les systèmes naturels et humains. Il offre une vision réaliste des conditions climatiques futures, en tenant compte des politiques d'atténuation qui pourraient être mises en œuvre. Les résultats obtenus à partir de ce scénario sont cruciaux pour la planification et la gestion des ressources en eau, l'agriculture, et d'autres secteurs sensibles aux variations climatiques.

En résumé, l'IPSL-CM5 est un modèle climatique complet qui intègre divers processus du système terrestre, et l'utilisation du scénario RCP4.5 permet d'explorer les impacts potentiels des changements climatiques dans un contexte de politiques d'atténuation modérées. Ces éléments sont essentiels pour comprendre les tendances climatiques futures et leurs implications pour la gestion des ressources naturelles.

2.3 Collecte et traitement des données

2.3.1 Sources de données

Les données utilisées dans cette étude proviennent des simulations du modèle climatique IPSL-CM5, spécifiquement pour le scénario intermédiaire RCP4.5. Les données

de précipitations quotidiennes ont été extraites des simulations réalisées par l'Institut Pierre-Simon de Laplace (IPSL) pour la période allant du 1er janvier 1970 au 31 décembre 2100. Ces données couvrent le nord de l'Algérie et sont essentielles pour évaluer les tendances de la sécheresse dans cette région.

Les précipitations quotidiennes fournissent une base solide pour l'analyse des épisodes de sécheresse, car elles permettent de calculer des indices de sécheresse tels que l'indice de précipitations normalisé (SPI). L'utilisation de données à haute résolution temporelle est cruciale pour capturer les variations saisonnières et interannuelles des précipitations, ce qui est particulièrement pertinent pour l'étude des sécheresses météorologiques, agricoles et hydrologiques.

Pour analyser les données de précipitations et calculer les indices SPI, plusieurs techniques statistiques et outils ont été utilisés

- **Calcul de l'indice SPI** : L'indice de précipitations normalisé (SPI) a été calculé sur différentes échelles temporelles (3, 6 et 12 mois) afin de couvrir les trois types de sécheresse : météorologique, agricole et hydrologique.
- **Quintiles du SPI** : Les quintiles du SPI ont été calculés pour quatre périodes distinctes (1970-2020, 2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) afin d'évaluer les tendances de la sécheresse au fil du temps. Cette approche permet de comparer les conditions de sécheresse passées avec les projections futures, fournissant ainsi des informations précieuses sur l'évolution des risques de sécheresse.
- **Outils logiciels** : Le logiciel statistique R a été utilisé tout au long du processus, depuis l'extraction des données jusqu'au calcul de l'indice standardisé de précipitations (SPI) et la production des cartes. Grâce à ses bibliothèques spécialisées, R permet de traiter efficacement les données climatiques et de calculer les indices de sécheresse, comme le SPI. De plus, il facilite l'analyse des grandes quantités de données issues des simulations du modèle climatique IPSL-CM5, tout en offrant des fonctions spécifiques pour visualiser et cartographier les résultats de manière claire et précise.

3. Résultats

Pour cette étude, les précipitations quotidiennes issues des simulations du modèle IPSL-CM5 pour le CMIP5, suivant le scénario intermédiaire RCP4.5, ont été utilisées pour la période du 1er janvier 1970 au 31 décembre 2100. Les précipitations mensuelles ont ensuite été déduites à partir de ces données quotidiennes. Afin de couvrir les trois types de sécheresses (météorologique, hydrologique et agricole), les quintiles du SPI ont été calculés sur 3, 6 et 12 mois, pour quatre périodes distinctes (1970-2020, 2021-2050, 2051-2080,

2081-2100), afin de déterminer les tendances.

Pour concentrer l'analyse sur la saison des pluies, seul le mois de février a été pris en considération pour le SPI sur 3 mois (période décembre-janvier-février), et le mois de mars pour le SPI sur 6 mois (période octobre-novembre-décembre-janvier-février-mars).

3.1 SPI sur 3 mois

Les figures 03, 04, 05 et 06 illustrent l'évolution des quintiles SPI (de gauche à droite 20%, 40%, 60% et 80 %) sur 03 mois durant la période allant du 1970 au 2100, l'analyse des données pour la période de 1970 à 2020 révèle que le premier quintile du SPI (Standardized Precipitation Index) se situe autour de -1, tandis que le deuxième quintile est proche de 0. Cela indique que 40 % des hivers durant cette période ont été classés comme météorologiquement secs, avec la moitié de ces hivers étant considérés comme modérément secs. En d'autres termes, une proportion significative des hivers a connu des conditions de sécheresse, ce qui souligne une tendance vers des hivers moins humides.

Pour la période projetée de 2021 à 2100, il est observé que la valeur du premier quintile augmente puis diminue. Cela signifie qu'il y a une légère tendance à l'augmentation de l'intensité des sécheresses météorologiques au cours de cette période. En d'autres termes, les hivers pourraient devenir légèrement plus secs, mais cette intensité ne continuera pas à croître de manière linéaire. La fluctuation de la valeur du premier quintile suggère que, bien qu'il y ait une tendance à la sécheresse, il pourrait y avoir des variations d'intensité au fil du temps, avec des périodes de sécheresse plus marquées suivies de périodes moins sèches. En résumé, cette analyse indique que, bien que la sécheresse météorologique soit une préoccupation croissante, son intensité pourrait connaître des variations plutôt qu'une augmentation constante jusqu'en 2100.

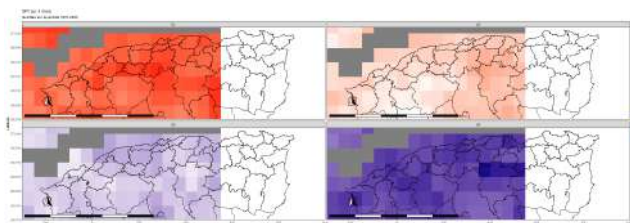


FIGURE 3. Quintiles du SPI sur 3 mois pour la période 1970-2020

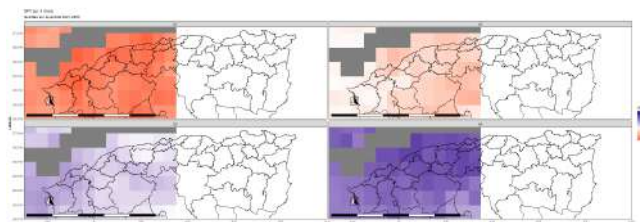


FIGURE 4. Quintiles du SPI sur 3 mois pour la période 2021-2050

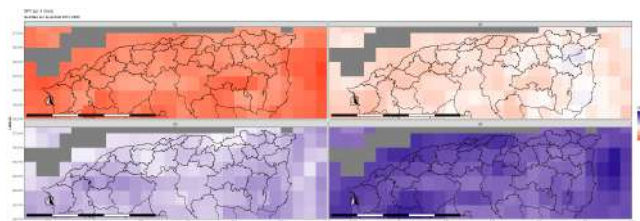


FIGURE 5. Quintiles du SPI sur 3 mois pour la période 2051-2080

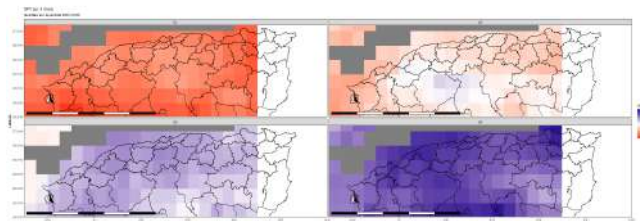


FIGURE 6. Quintiles du SPI sur 3 mois pour la période 2081-2100

3.2 SPI sur 6 mois

Les figures 07, 08, 09 et 10 illustrent l'évolution des quintiles SPI (de gauche à droite 20%,40%,60% et 80 %) sur 06 mois durant la période allant du 1970 au 2100

Le SPI (Standardized Precipitation Index) sur 6 mois indique que les résultats observés pour cette période sont similaires à ceux du SPI sur 3 mois. Cela signifie que la tendance à la sécheresse est également présente sur une période plus longue, de six mois, qui couvre la saison humide d'octobre à mars.

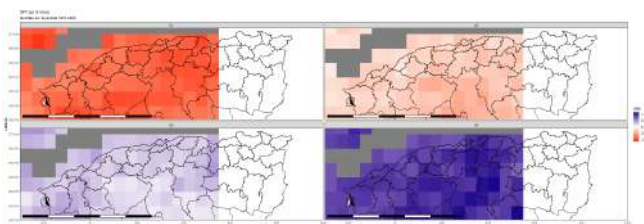


FIGURE 7. Quintiles du SPI sur 6 mois pour la période 1970-2020

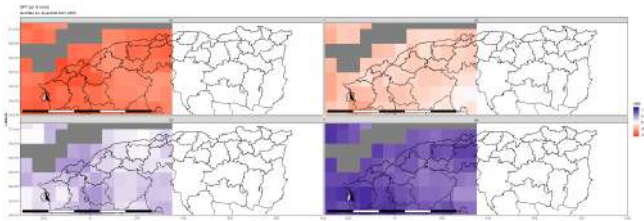


FIGURE 8. Quintiles du SPI sur 6 mois pour la période 2021-2050

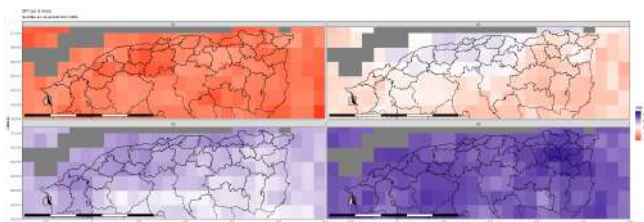


FIGURE 9. Quintiles du SPI sur 6 mois pour la période 2051-2080

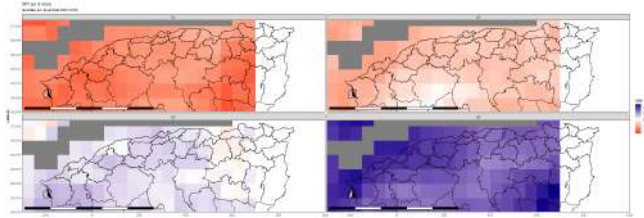


FIGURE 10. Quintiles du SPI sur 6 mois pour la période 2081-2100

L'implication de cette constatation est que, d'ici l'horizon étudié, cette période deviendra de plus en plus sèche. Cette augmentation de la sécheresse aura des conséquences significatives sur l'agriculture, car des sols asséchés peuvent réduire la disponibilité d'eau pour les cultures, affectant ainsi les rendements agricoles. En résumé, la tendance à la sécheresse sur une période de six mois pourrait entraîner des défis majeurs pour l'agriculture dans la région concernée

3.3 SPI sur 12 mois

Les figures 11, 12, 13 et 14 illustrent l'évolution des quintiles SPI (de gauche à droite 20%,40%,60% et 80 %) sur 12 mois durant la période allant du 1970 au 2100

Le SPI (Standardized Precipitation Index) sur 12 mois indique que, pour la période de 1970 à 2020, les observations sont similaires à celles des SPI sur 3 et 6 mois, ce qui suggère une tendance générale à la sécheresse. Cependant, en ce qui concerne les périodes futures, il n'y a pas de changement significatif dans l'intensité des sécheresses sur le long terme.

Cela signifie que, bien que des sécheresses continuent à se produire, leur gravité ou leur intensité ne semble pas augmenter avec le temps. En d'autres termes, même si les sécheresses demeurent une préoccupation, les données ne montrent pas une tendance croissante vers des épisodes de sécheresse plus sévères. Cela pourrait indiquer que les conditions climatiques restent relativement stables en ce qui concerne l'intensité des sécheresses sur une période de 12 mois, malgré les variations à court terme observées dans les SPI sur 3 et 6 mois.

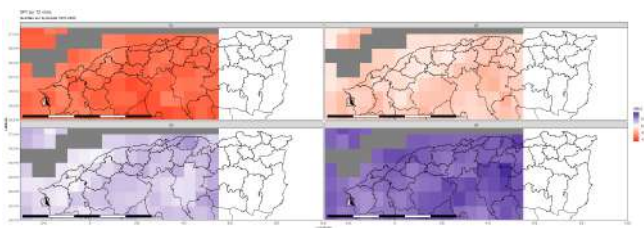


FIGURE 11. Quintiles du SPI sur 12 mois pour la période 1970-2020

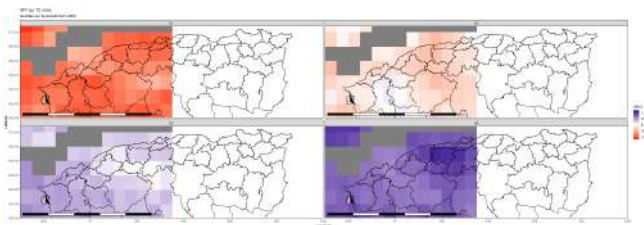


FIGURE 12. Quintiles du SPI sur 12 mois pour la période 2021-2050

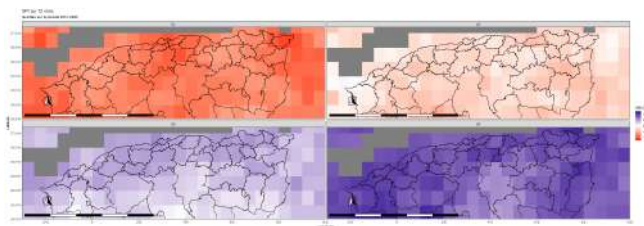


FIGURE 13. Quintiles du SPI sur 12 mois pour la période 2051-2080

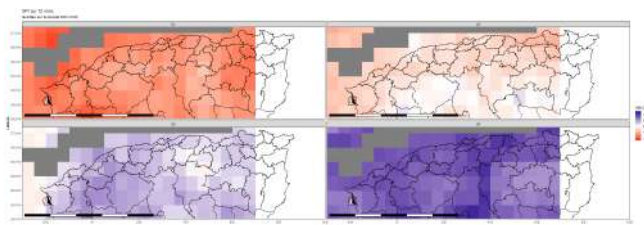


FIGURE 14. Quintiles du SPI sur 12 mois pour la période 2081-2100

4. Conclusion

L'étude vise à résumer les tendances de la sécheresse dans le nord de l'Algérie jusqu'en 2100, en se basant sur le scénario intermédiaire RCP4.5. Les résultats indiquent qu'il existe une légère tendance à l'augmentation de l'intensité des sécheresses à court et moyen terme (sur des périodes de 3 et 6 mois), particulièrement durant la saison humide, qui s'étend d'octobre à mars. Cela signifie que les hivers pourraient devenir plus secs, ce qui affecterait la disponibilité d'eau pour l'agriculture.

Cependant, pour des périodes plus longues (12 mois), l'étude ne prévoit pas de changement significatif dans l'intensité des sécheresses. Cela suggère que, bien que des sécheresses continuent de se produire, leur gravité ne devrait pas augmenter de manière marquée sur le long terme. L'étude conclut que le nord de l'Algérie sera principalement touché par des sécheresses météorologiques (hivers plus secs) et agricoles (sols asséchés), tandis que les sécheresses hydrologiques (affectant les cours d'eau, réservoirs et nappes phréatiques) devraient être moins préoccupantes.

Pour mieux préparer des stratégies d'adaptation face à ces défis, il est recommandé de comparer ces résultats avec d'autres indices de sécheresse, comme le SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index), et d'explorer d'autres scénarios climatiques, notamment le scénario pes-

simiste RCP8.9, qui pourrait offrir une perspective différente sur les impacts futurs.

Références

- [1] World Meteorological Organization, 2012 : *Standardized Precipitation Index User Guide*, (WMO-No. 1090), World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- [2] World Meteorological Organization, 2012 : *Handbook of Drought Indices and Indicators*, (WMO-No. 1173), World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- [3] Dufresne, J.-L. et al., 2013 : Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model : from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 40(9-10), 2123-2165. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00138/24966/>.
- [4] McKee, T.B., N.J. Doesken, and J. Kleist, 1993 : The relationship of drought frequency and duration to time scale. In : *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, January 17-22, 1993. Boston : American Meteorological Society, 179-184.
- [5] Palmer, W.C., 1965 : *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45, US Weather Bureau, Washington, DC.

Etude de la variabilité des extrêmes pluviométriques dans la région de Constantine

Gassi Ahmed^{1*}

Résumé

Une étude de la variabilité des extrêmes pluviométriques dans la région de Constantine a été menée sur 44 ans (1980-2023). Sept indices climatiques pertinents ont été calculés à partir des données d'observation de la station Ain El Bey de Constantine, permettant ainsi de caractériser divers aspects des précipitations extrêmes et de révéler les tendances complexes des extrêmes pluviométriques dans cette région. L'analyse des données montre une légère baisse du cumul annuel des précipitations tandis que les autres indices analysés ne présentent pas de changement significatif. L'étude menée constitue une étape importante, mais il est important d'étendre l'analyse à l'ensemble de l'Est algérien pour généraliser l'évaluation du climat et affiner les connaissances sur les changements pluviométriques et leurs impacts potentiels dans la région.

Mots clés : Changement climatique, indices pluviométriques, précipitations extrêmes, Constantine.

¹ Chef section réseau climatologique Est Constantine, Division Climatologie régionale Est Constantine
^aOffice National Météorologique Algérie
Correspondant : Ahmed Gassi : ahmedgassi@yahoo.fr

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériels et méthode	2
3	Résultats et discussion	3
3.1	Cumul annuel	3
3.2	Nombre Jours pluvieux consécutifs	3
3.3	Nombre Jours secs consécutifs	4
3.4	Hauteur maximale des Précipitations d'un jour	4
3.5	Cumul maximal des Précipitations de 5 jours consécutifs	5
3.6	Indice des Jours très pluvieux	5
3.7	Indice des Jours extrêmement pluvieux	6
4	Conclusion	7
	Références	8

1. Introduction

Toutes les projections futures du climat global (futur proche et lointain) prévoient une intensification du réchauffement moyen dû à l'effet de serre dont l'une des majeures conséquences sur la circulation atmosphérique est la limitation des échanges méridiens et la diminution des flux de mousson à L'équateur (GIEC, 2007). Il s'en suit des répercussions sur les régimes pluviométriques qui se traduisent par des évènements hydro climatiques extrêmes. La récurrence

de ces évènements, depuis ces dernières années, constitue l'un des principaux facteurs qui affecte aussi bien la capacité de production des écosystèmes que la société humaine (GIEC, 2020). Les impacts de cette variabilité climatique varient d'une région du globe à une autre avec des conséquences socio-économiques particulièrement importantes dans les pays en développement. En Afrique, une augmentation de la magnitude et de la fréquence des événements extrêmes est anticipée (SULTAN et al 2015).

L'Algérie est considérée comme l'une des régions les plus vulnérables devant les impacts de changement climatique au cours du 21ème siècle. Le nord de l'Algérie a connu une variabilité à la baisse de la pluviométrie annuelle au cours du 20ème siècle. L'évolution récente du climat montre que sur les 40 dernières années les sécheresses de la même période sont encore plus remarquables compte tenu du déficit pluviométrique enregistré un peu partout sur le territoire. La baisse de la pluviométrie dans cette période est estimée à environ 10% de la moyenne. Ces événements climatiques extrêmes pourraient devenir plus fréquents et avoir des impacts irréversibles sur l'environnement (SID et al 2023).

Dans l'optique de ces points, l'évaluation des extrêmes pluviométriques est nécessaire. C'est dans ce contexte que cette étude s'inscrit. Elle vise à analyser en détail les extrêmes pluviométriques à région de Constantine durant 44 ans (1980 à 2023). Nous avons utilisé les données de précipitation enregistrées par la station professionnelle de Ain

el Bey de Constantine. Le calcul des normales climatiques a été réalisé selon les directives actuelles de l'OMM sur la période 1991-2020 (OMM-N° 1203) édition 2017.

2. Matériels et méthode

Les données de précipitation utilisées dans le cadre de cette étude ont subi un processus de vérification et de contrôle de qualité rigoureux à l'aide de logiciel CLICOM (CLimate COMputing PROject) développé sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Ce processus permet d'identifier les erreurs d'enregistrement qui peuvent affecter les données quotidiennes et horaires. Les contrôles de qualité appliqués aux valeurs observées varient en complexité et portent sur les points suivants :

- **Contrôles syntaxiques** : Vérification de la conformité du format des données aux règles définies (par exemple, la température de l'air doit être exprimée avec au plus un chiffre après la virgule).
- **Plages numériques** : Vérification que les valeurs des données se situent dans des plages raisonnables (par exemple, la température doit se situer entre -90 et +70 degrés Celsius).
- **Cohérence entre les relevés** : Vérification de la cohérence entre les différentes variables mesurées (par exemple, la température de l'air ne doit pas être inférieure au point de rosée).
- **Cohérence des séries chronologiques** : Vérification de la cohérence des données dans le temps (par exemple, la différence entre deux températures observées successivement sur le même site doit être plausible).
- **Cohérence spatiale** : Vérification de la cohérence des données dans l'espace (par exemple, les limites d'une différence plausible entre les températures d'une station et de ses environs ne doivent pas être dépassées).

CLICOM effectue les contrôles de qualité à l'aide de fonctions spécifiques, tels que ELEMCHKS.DLY pour les données quotidiennes et ELEMCHKS.HLY pour les données horaires selon le schéma mentionné par la figure 1.

Dans le but d'évaluer si les indices calculés sur la période d'étude diffèrent significativement des normales climatiques établies, le test de Student, également connu sous le

nom de test t de Student, s'avère être un outil statistique pertinent. Cette approche consiste à comparer la moyenne des indices calculés à la normale climatologique de référence en s'appuyant sur une statistique de test t de Student et sa valeur p associée. Si la valeur p est inférieure à un seuil de signification prédéfini (généralement 0,05), on rejette l'hypothèse nulle selon laquelle les moyennes ne diffèrent pas et on conclut qu'il existe une différence significative entre l'indice calculé et la normale climatologique de référence. L'interprétation des résultats s'accompagne également du calcul de l'effet size, qui permet de quantifier l'ampleur de la différence observée. L'application du test de Student permet ainsi de détecter si les indices calculés sur une période donnée ont subi une variation notable par rapport aux normales climatologiques, fournissant des informations précieuses pour la compréhension des changements climatiques et l'évaluation des extrêmes pluviométriques.

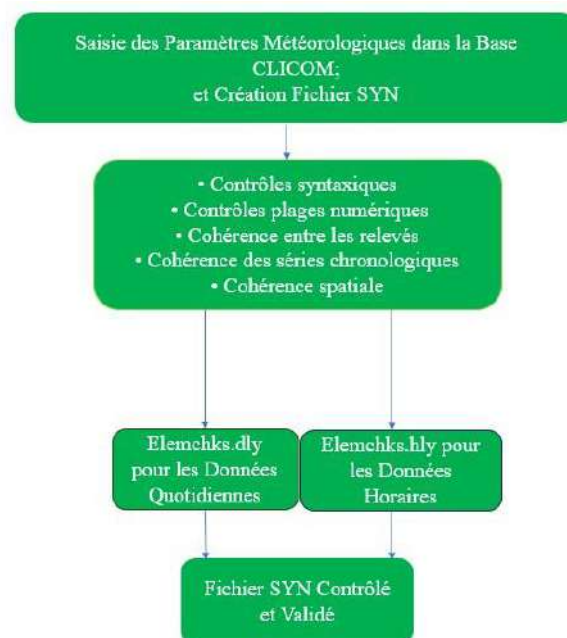


FIGURE 1. Schéma de contrôle CLICOM

Pour analyser les extrêmes de pluie, nous avons procédé par le calcul de sept indices pluviométriques définis dans le tableau 1.

Identification	Noms de l'indice	Définition	Unité
Cumul Annuel	Total annuel des pluies	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux (RR 0,1 mm)	MM
Nmjcp	Jours pluvieux consécutifs	Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières 0.1mm	JOUR
Nmjcs	Jours secs consécutifs	Nombre maximal des jours consécutifs avec précipitations journalières < 0.1 mm	JOUR
Rx1j	Hauteur maximale des précipitations d'un jour	Précipitation totale maximale d'un jour pluvieux	MM
Rx5j	Cumul maximal des précipitations de 5 jours consécutifs	Précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs pendant l'année	MM
R95p	Jours très pluvieux	Précipitation totale annuelle avec précipitation > 95e percentile	MM
R99p	Jours extrêmement pluvieux	Précipitations totales annuelles avec les précipitations > 99e percentile	MM

TABLE 1. Indices des extrêmes des précipitations journalières

3. Résultats et discussion

3.1 Cumul annuel

Les valeurs de l'indice avec la tendance sont présentées ci-dessous.

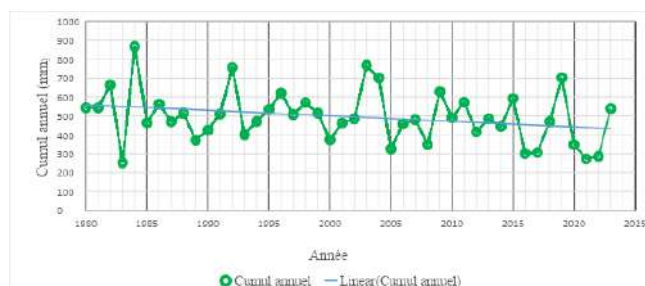


FIGURE 2. Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'Indice Cumul annuel (Total annuel des pluies) : à la station de Constantine

L'analyse de la tendance linéaire des valeurs de l'Indice Cumul annuel (Total annuel des pluies), on peut constater une légère baisse de 1980 à 2023 à la station de Constantine.

Test	Statistique	Valeur p	Interprétation	Effet de taille
Test de Student à un échantillon	$t = -0,4$	$p = 0,69$	La moyenne des cumuls annuels est inférieure à la normale climatologique.	D de Cohen = $-0,4$ (effet petit). La différence entre la moyenne des cumuls annuels et la normale climatologique est relativement petite.

TABLE 2. statique descriptives des cumuls annuels

Interprétation

L'analyse statistique montre que la moyenne des cumuls annuels de précipitations sur la période de 1980 à 2023 est légèrement inférieure à la normale climatologique, mais la différence n'est pas statistiquement significative.

3.2 Nombre Jours pluvieux consécutifs

Les valeurs de l'indice avec la tendance sont présentées ci-dessous.

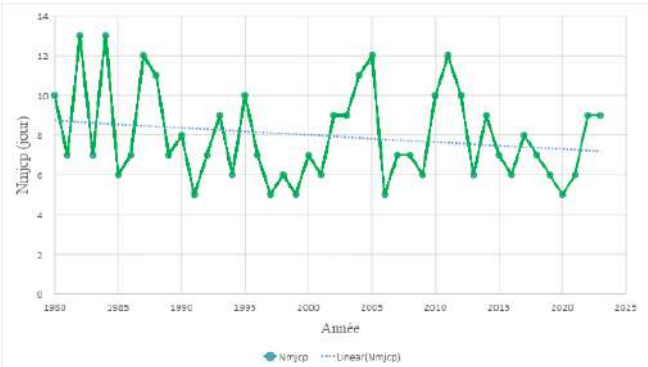


FIGURE 3. Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'Indice Nmjcj (Jours pluvieux consécutifs) à la station de Constantine.

L'analyse de la tendance linéaire des valeurs de l'Indice Nmjcj (Jours pluvieux consécutifs) montre une légère baisse de 1980 à 2023 à la station de Constantine.

Test	Statistique	Valeur p	Interprétation	Effet de taille
Test de Student à un échantillon	$t = 1,55$	$p = 0,128$	Pas de différence significative entre la moyenne des jours pluvieux et la normale climatologique	d de Cohen = 0,19 (faible)

TABLE 3. Statistiques descriptives de Nmjcj

Interprétation : L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre le nombre moyen de jours pluvieux consécutifs observé sur la période de 1980 à 2023 et la normale climatologique de 7,5 jours. L'effet de taille est également faible, ce qui confirme que la différence observée n'est pas d'une grande ampleur pratique.

3.3 Nombre Jours secs consécutifs

Les valeurs de l'indice avec la tendance sont présentées ci-dessous.

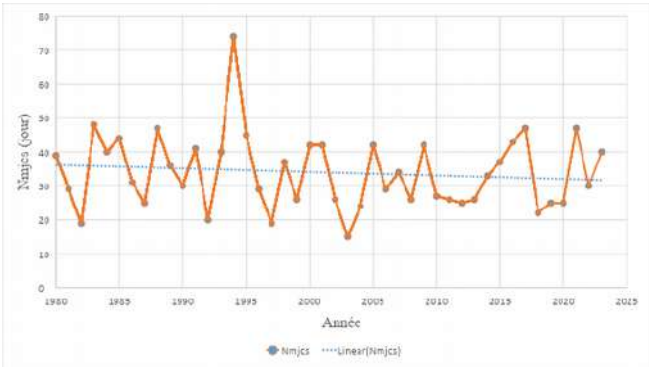


FIGURE 4. Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'Indice Nmjs (Jours secs consécutifs) : à la station de Constantine.

L'analyse de la tendance linéaire des valeurs de l'Indice Nmjs (Jours secs consécutifs) montre une légère baisse de 1980 à 2023 à la station de Constantine.

Test	Statistique	Valeur p	Interprétation	Effet de taille
Test de Student à un échantillon	$t = 0,73$	$p = 0,472$	Pas de différence significative entre la moyenne des jours secs et la normale climatologique	d de Cohen = 0,09 (très faible)

TABLE 4. Statistiques descriptives de Nmjs

Interprétation : L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre le nombre moyen de jours secs consécutifs observé sur la période de 1980 à 2023 et la normale climatologique de 32,97 jours. L'effet de taille est également très faible, ce qui confirme que la différence observée est négligeable d'un point de vue pratique.

3.4 Hauteur maximale des Précipitations d'un jour

Les valeurs de l'indice avec la tendance sont présentées ci-dessous.

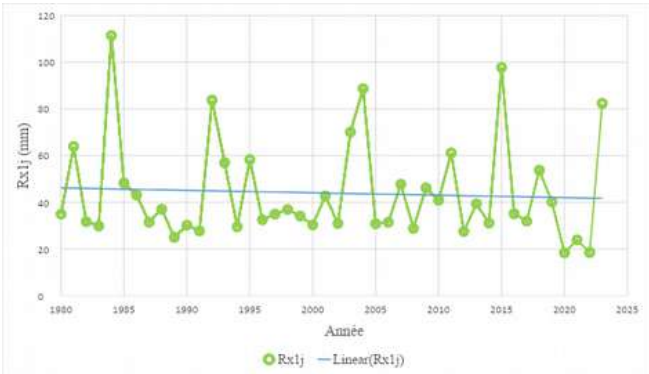


FIGURE 5. Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'Indice Rx1j (Hauteur maximale des Précipitations d'un jour) : à la station de Constantine

L'analyse de la tendance linéaire des valeurs de l'Indice Rx1j montre une légère baisse de 1980 à 2023 à la station de Constantine.

Test	Statis-tique	Valeur p	Interprétation	Effet de taille
Test de Student à un échantillon	$t = -0,04$	$p = 0,970$	Pas de différence significative entre la moyenne des précipitations et la normale climatologique	d de Cohen = $-0,004$ (négligeable)

TABLE 5. statique descriptives de Nmjs

Interprétation : L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre la hauteur maximale moyenne des précipitations d'un jour observé sur la période de 1980 à 2023 et la normale climatologique de 44,05 mm. L'effet de taille est également négligeable, ce qui confirme que la différence observée est pratiquement inexistante.

3.5 Cumul maximal des Précipitations de 5 jours consécutifs

Les valeurs de l'indice avec la tendance sont présentées ci-dessous.

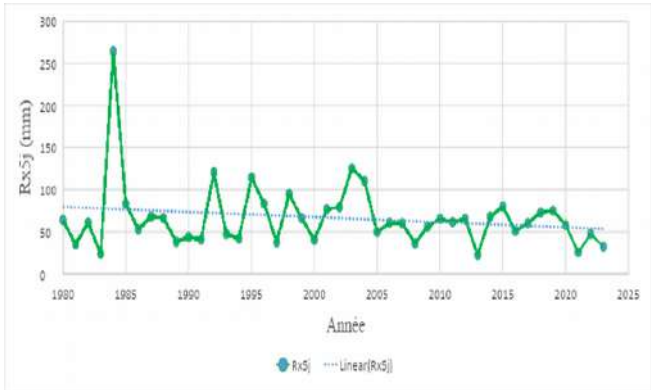


FIGURE 6. Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'Indice Rx5j (Cumul maximal des Précipitations de 5 jours consécutifs) : à la station de Constantine

L'analyse de la tendance linéaire des valeurs de l'Indice Rx5j montre une légère baisse de 1980 à 2023 à la station de Constantine.

Test	Statis-tique	Valeur p	Interprétation	Effet de taille
Test de Student à un échantillon	$t = -0,21$	$p = 0,836$	Pas de différence significative entre la moyenne des précipitations et la normale climatologique	d de Cohen = $-0,02$ (négligeable)

TABLE 6. statique descriptives de Rx5j

Interprétation : L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre le cumul maximal moyen des précipitations de 5 jours consécutifs observé sur la période de 1980 à 2023 et la normale climatologique de 67,36 mm. L'effet de taille est également négligeable, ce qui confirme que la différence observée est pratiquement inexistante.

3.6 Indice des Jours très pluvieux

Les valeurs de l'indice avec la tendance sont présentées ci-dessous.

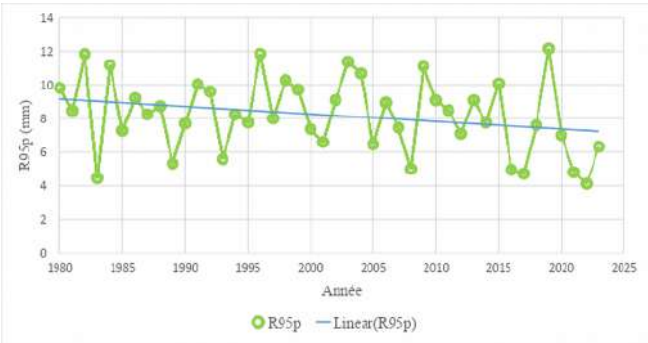


FIGURE 7. Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'Indice R95p (Jours très pluvieux) : à la station de Constantine

L'analyse de la tendance linéaire des valeurs de l'indice R95p (Jours très pluvieux), il est clair qu'il y a eu une baisse de 1980 à 2023 à la station de Constantine.

Test	Statistique	Valeur p	Interprétation	Effet de taille
Test de Student à un échantillon	t = -0,87	p = 0,389	Pas de différence significative entre la moyenne des jours très pluvieux et la normale climatologique	d de Cohen = -0,11 (négligeable)

TABLE 7. statique descriptives de R95p

Interprétation : L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre l'indice moyen des jours très pluvieux observé sur la période de 1980 à 2023 et la normale climatologique de 8,44 jours. L'effet de taille est également négligeable, ce qui confirme que la différence observée est pratiquement inexistante.

3.7 Indice des Jours extrêmement pluvieux

Les valeurs de l'indice avec la tendance sont présentées ci-dessous.

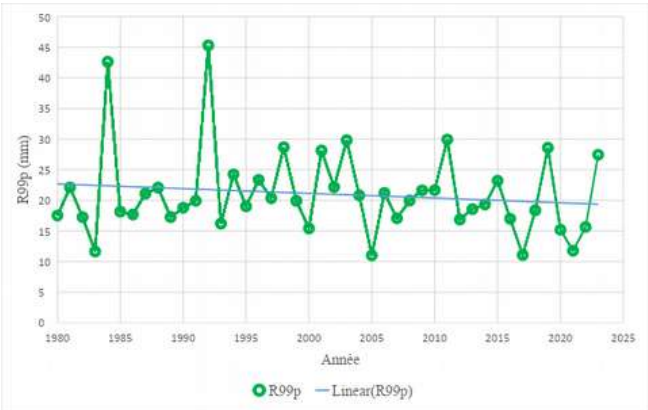


FIGURE 8. Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'indice R99p (Jours extrêmement pluvieux) à la station de Constantine

L'analyse de la tendance linéaire des valeurs de l'indice R99p (Jours extrêmement pluvieux), il est clair qu'il y a eu une baisse de 1980 à 2023 à la station de Constantine.

Test	Statistique	Valeur p	Interprétation	Effet de taille
Test de Student à un échantillon	t = -0,63	p = 0,533	Pas de différence significative entre la moyenne des jours extrêmement pluvieux et la normale climatologique	d de Cohen = -0,06 (négligeable)

TABLE 8. statique descriptives de R95p

Interprétation : L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre l'indice moyen des jours extrêmement pluvieux observé sur la période de 1980 à 2023 et la normale climatologique de 21,47 jours. L'effet de taille est également négligeable, ce qui confirme que la différence observée est pratiquement inexistante.

Indice	Moyenne	Écart-type	Normale climatologique	Valeur p	Interprétation	Effet de taille
Cumul annuel	495,97 mm	138,01 mm	501,58 mm	0,69	Différence significative (baisse)	d de Cohen = -0,040 (faible)
Nombre de jours pluvieux consécutifs	7,95 jours	2,31 jours	7,5 jours	0,128	Pas de différence significative	d de Cohen = 0,19 (faible)
Nombre de jours secs consécutifs	33,95 jours	10,92 jours	32,97 jours	0,472	Pas de différence significative	d de Cohen = 0,09 (très faible)
Hauteur maximale des précipitations d'un jour	43,96 mm	21,41 mm	44,05 mm	0,97	Pas de différence significative	d de Cohen = -0,004 (négligeable)
Cumul maximal des précipitations de 5 jours consécutifs	66,52 mm	39,22 mm	67,36 mm	0,836	Pas de différence significative	d de Cohen = -0,02 (négligeable)
Indice des jours très pluvieux	8,20 jours	2,18 jours	8,44 jours	0,389	Pas de différence significative	d de Cohen = -0,11 (négligeable)
Indice des jours extrêmement pluvieux	21,03 jours	6,94 jours	21,47 jours	0,533	Pas de différence significative	d de Cohen = -0,06 (négligeable)

Table 9 : récapitulatif des indices pluviométriques à Constantine (1980-2023) et de leur évolution par rapport à la normale (1991-2020)

L'analyse statistique des indices pluviométriques à Constantine sur la période de 1980 à 2023 met en évidence des tendances spécifiques pour chaque indice, avec des implications importantes pour la gestion des ressources en eau dans la région.

1. Cumul Annuel des Précipitations : Une Diminution Préoccupante

- **Observation :** Différence significative - Baisse du cumul annuel des précipitations (495,97 mm vs 501,58 mm de normale).

2. Nombre de Jours Pluvieux Consécutifs : Une Stabilité Relative

- **Observation :** Pas de changement significatif dans le nombre de jours pluvieux consécutifs (7,95 jours vs 7,5 jours de normale).

3. Nombre de Jours Secs Consécutifs : Une Stabilité Appréciable

- **Observation :** Absence de changement significatif dans le nombre de jours secs consécutifs (33,95 jours vs 32,97 jours de normale).

4. Hauteur Maximale des Précipitations d'un Jour : Une Stabilité Remarquable

- **Observation :** Pas de changement significatif dans la hauteur maximale des précipitations d'un jour (43,96 mm vs 44,05 mm de normale).

5. Cumul Maximal des Précipitations de 5 Jours Consécutifs : Une Stabilité Rassurante

- **Observation :** Pas de changement significatif dans le cumul maximal des précipitations sur 5 jours consécutifs (66,52 mm vs 67,36 mm).

6. Indice des Jours Très Pluvieux : Une Stabilité Relative

- **Observation :** Pas de changement significatif dans l'indice des jours très pluvieux (8,20 jours vs 8,44 jours de normale).

7. Indice des Jours Extrêmement Pluvieux : Une Stabilité Remarquable

- **Observation :** Absence de changement significatif dans l'indice des jours extrêmement pluvieux (21,03 jours vs 21,47 jours de normale).

4. Conclusion

Afin d'étudier les tendances des extrêmes pluviométriques à Constantine, une analyse statistique rigoureuse a été menée sur une série de données de 44 ans (1980-2023) provenant de la station météorologique Ain el Bey Aéroport de Constantine. Sept indices climatiques pertinents ont été calculés à partir des données de la station de Constantine, permettant de caractériser divers aspects des précipitations extrêmes. Les résultats obtenus de l'analyse statistique révèlent des tendances contrastées. Si l'on observe une légère baisse du cumul annuel des précipitations, les autres indices analysés, à savoir le nombre de jours pluvieux et secs consécutifs, la hauteur maximale des précipitations d'un jour, le cumul maximal des précipitations de 5 jours consécutifs, l'indice des jours très pluvieux et l'indice des jours extrêmement pluvieux, ne présentent pas de changement significatif.

Bien que l'effet de taille pour la plupart des indices soit faible ou négligeable, la baisse du cumul annuel des précipitations est préoccupante et pourrait avoir des conséquences néfastes sur les ressources en eau. L'absence de changement

significatif dans le nombre de jours pluvieux et secs consécutifs suggère une certaine stabilité du régime pluviométrique en termes de fréquence des épisodes pluvieux et secs. De même, la stabilité des précipitations extrêmes indique que les événements pluviométriques les plus intenses ne présentent pas de tendance marquée sur la période étudiée. En conclusion, l'analyse statistique des indices pluviométriques à Constantine fournit des informations précieuses pour comprendre les tendances climatiques locales et guider la prise de décision en matière de gestion des ressources en eau et d'adaptation au changement climatique. Des recherches et des suivis approfondis sont essentiels pour mieux cerner les évolutions futures et mettre en place des stratégies d'adaptation efficaces. Il est important de noter que cette étude se base sur les données d'une seule station pluviométrique et ne peut donc pas être généralisée à l'ensemble de la région. Des analyses plus approfondies, prenant en compte des données provenant de plusieurs stations, seraient nécessaires pour une compréhension plus complète de l'évolution des précipitations dans cette région.

Références

- [1] Directives de l'OMM pour le calcul des normales climatiques (OMM-N° 1203) édition 2017.
- [2] GIEC, (2007). "Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat". Équipe de rédaction principale, PACHAURI, R.K. et REISINGER, A. (publié sous la direction de GIEC, Genève, Suisse, p. 30).
- [3] SULTAN, B., ROUDIER, P., TRAORE, S. (2015). "Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest". In : SULTAN, B. (ED.), LALOU, R. (ED.), AMADOU, S. (ED.), OUMAROU, A. (ED.), SOUMARÉ, M.A. (ED.). Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest. Marseille : IRD, p. 209-225. (Synthèses). ISBN 978-2-7099-2146-6.
- [4] GIEC (2020). Rapport N° 5 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat en janvier 2020.
- [5] SID, K.S. (2023). Étude statistique des précipitations et des températures de la ville de Constantine, Mémoire de Master académique, Filière : Hydraulique, Spécialité : Ressources Hydriques, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des sciences appliquées, Département Génie Civil et Hydraulique.