

Titre : Changement climatique et ressource en eau en Tunisie : Analyse spectrale

Résumé :

Le changement climatique, associé à une mauvaise gestion de l'eau, provoque des sécheresses et des pénuries d'eau dans de nombreuses régions du monde. La Tunisie, est un pays émergent, situé au nord du continent Africain où les réserves en eau sont très limitées. La double identité hydrométéorologique de ce pays, aride à semi-aride sur les trois quarts de sa superficie la place dans une situation de crise.

Dans ce travail, nous nous sommes focalisées sur l'observation chronologique des précipitations, afin d'identifier la présence ou l'absence d'une cyclicité. Nous allons étudier le comportement des précipitations et déterminer s'il existe une périodicité pluviométrique historique, structurelle au bien qu'on assiste à une distribution purement aléatoire sans processus sous-jacent qui pourrait être lié aux effets du changement climatique.

Nos résultats montrent la présence d'une périodicité de sept ans traduisant une alternance entre des années pluvieuses et des années sèches. Cette confirmation nous mène à relativiser l'impact du changement climatique et à nous tourner vers des raisons plus profondes liées à l'efficacité des politiques publiques et de la gouvernance.

Mots clés : changement climatique, pluviométrie, périodicité, ressource eau, Tunisie, analyse spectrale.

Abstract:

Climate change, combined with poor water management, is causing droughts and water shortages in many parts of the world. Tunisia is an emerging country located in northern Africa, where water reserves are very limited. The country's dual hydrometeorological identity, arid to semi-arid over three-quarters of its surface area, places it in a crisis situation.

In this study, we focused on chronological observations of precipitation in order to identify the presence or absence of cyclicity. We will study precipitation patterns and determine whether there is a historical, structural periodicity in rainfall or whether we are seeing a purely random distribution with no underlying process that could be linked to the effects of climate change.

Our results show the presence of a seven-year periodicity reflecting an alternation between wet and dry years. This confirmation leads us to relativize the impact of climate change and to turn to deeper reasons related to the efficiency of public policies and governance.

Keywords: climate change, rainfall, periodicity, water resources, Tunisia, water stress, spectral analysis.

1- Introduction :

L'eau douce, utilisable et disponible sur terre ne représente que 0,5 % de la ressource en eau. Durant ces deux dernières décennies, le stockage de l'eau terrestre par l'humidité du sol, la neige et la glace a diminué d'un centimètre par an, ce qui a induit des répercussions importantes sur la sécurité de l'approvisionnement en eau (OMM, 2021).

Plusieurs organismes internationaux ont tiré la sonnette sur le changement climatique qui a entraîné une intensification et une prolongation des périodes de sécheresse pluriannuelles. Ceci a mis à rude épreuve plusieurs pays face à de sérieux risques de pénurie d'eau, rendant certaines zones inhabitables

Selon les Nations Unies (2020) le lien entre l'eau et les changements climatiques est indissociable. Leurs impacts sur l'eau à travers le monde sont multiples : imprévisibilité des précipitations, rétrécissement des calottes glaciaires, élévation du niveau de la mer, inondations ou sécheresses. De même l'UNICEF (2024) a confirmé que la crise climatique accentue à la fois la pénurie et les dangers associés à la ressource en eau (inondations, sécheresses). La hausse des températures perturbe le cycle des précipitations et l'ensemble du cycle de l'eau.

La Tunisie, un pays émergent, situé en Afrique du Nord est caractérisée par l'irrégularité des précipitations. Cette dernière a affecté la population et plusieurs secteurs dynamiques très dépendants de la disponibilité en eau (tels que l'agriculture). C'est dans ce cadre que le travail a été mené. Il vise l'identification du comportement des précipitations, qui est un principe de base d'une planification efficace aussi bien au niveau National que régional et local. L'irrégularité des précipitations dans les pays à climat semi-aride à aride découle de plusieurs combinaisons complexes de facteurs atmosphériques, océaniques et géographiques, qui pourraient se référer dans la combinaison des processus stochastiques associés et requièrent par conséquent des outils d'analyse avancés. Nous avons eu recours dans cette recherche à l'analyse spectrale, qui puise son origine dans les fondements mathématiques et physiques, qui repose essentiellement sur les travaux menés par Fourier en 1822 et ceux développés par Rayleigh en 1877. Au fil des années, cet outil a été repris par les mathématiciens

et les applications de celui-ci se multiplient. En effet, L'idée simple de Fourier, radicale en son temps, selon laquelle une fonction périodique peut être décomposée en une somme d'ondes sinusoïdales de fréquences différentes pourrait être appliquée à la variabilité d'une série temporelle des précipitations.

La variabilité d'une série temporelle des précipitations pourrait être aussi désagrégée dans ses parties constituantes de fréquences différentes par cette méthode permettant d'identifier des cycles naturels.

L'objectif principal est d'analyser la tendance des précipitations en Tunisie en cherchant à déterminer s'il existe une périodicité pluviométrique historique, structurelle au bien qu'on assiste à une distribution purement aléatoire sans processus sous-jacent ce qui pourrait être lié aux effets du changement climatique. Dans ce qui suit, nous présenterons la démarche méthodologique suivie dans la réalisation de ce travail, nous illustrerons les résultats obtenus après l'application d'une analyse spectrale sur une série de pluviométrie annuelle moyenne de la Tunisie entre 1986 et 2022, aboutiront à la modélisation des prédictions de la pluviométrie à l'horizon 2032.

2- Méthodologie :

Notre démarche empirique est la suivante : Dans un premier temps et après la conception de la base de données, nous avons effectué une analyse statistique descriptive visant à comprendre les caractéristiques fondamentales de la série temporelle de la pluviométrie annuelle moyenne de la Tunisie entre 1986 et 2022. Les résultats graphiques nous ont orienté vers l'utilisation de la méthode d'analyse spectrale afin de confirmer la présence d'une cyclicité au niveau de la série des précipitations. Nous avons enfin appliqué une modélisation avec le modèle SARIMA (Seasonal Autoregressive integrated moving average) pour prédire les tendances de la pluviométrie à l'horizon 2032.

3- Analyse et Résultats

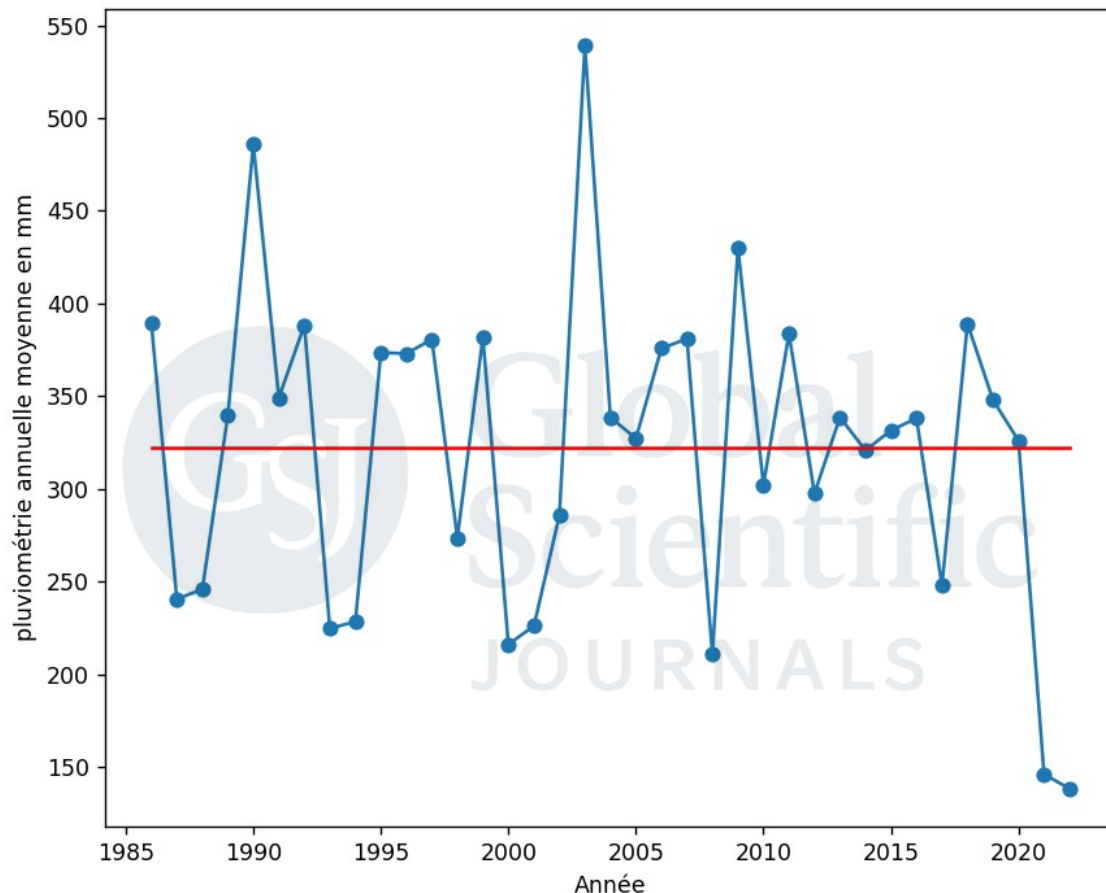
3-1- Conception de la base de données :

Nous avons considéré une série de données collectées sur la moyenne annuelle de précipitations par gouvernorat sur une période qui s'étend de 1986 à 2022 (37 ans). Les données ont été recueillies à partir des organismes internationaux (AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture) et des organismes nationaux (ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche, Institut National de Météorologie, Observatoire National de l'Agriculture). En effet, La multiplicité de ces ressources est justifiée par la non-disponibilité des données détaillées pour la Tunisie. Les seules données disponibles sont relatives à la moyenne des précipitations par gouvernorat.

Ce panel nous a permis d'élaborer la série temporelle de la pluviométrie moyenne annuelle de l'ensemble des gouvernorats (ST1). Cette dernière a été exploitée pour procéder aux analyses graphiques ci-dessous.

3-2- L'analyse graphique de la série Temporelle : Description des données

Le graphique ci-dessous (figure 1) représente l'évolution de la pluviométrie annuelle moyenne entre 1986 et 2022.



Source : auteurs, 2023

Figure 1 : Evolution de la pluviométrie annuelle moyenne entre 1986 et 2022 en Tunisie

Sur l'ensemble de la période d'étude une tendance à la baisse des précipitations annuelles est observée. En effet, la moyenne des précipitations est passée de 389,7 mm au début des années 1986 à environ 138,2 mm vers 2022.

Cette tendance est associée à une forte variabilité interannuelle de la pluviométrie moyenne. Les précipitations varient de 138,2 mm à 539 mm. Certaines années sont caractérisées par des pics importants, tandis que d'autres années connaissent une pluviométrie beaucoup plus faible.

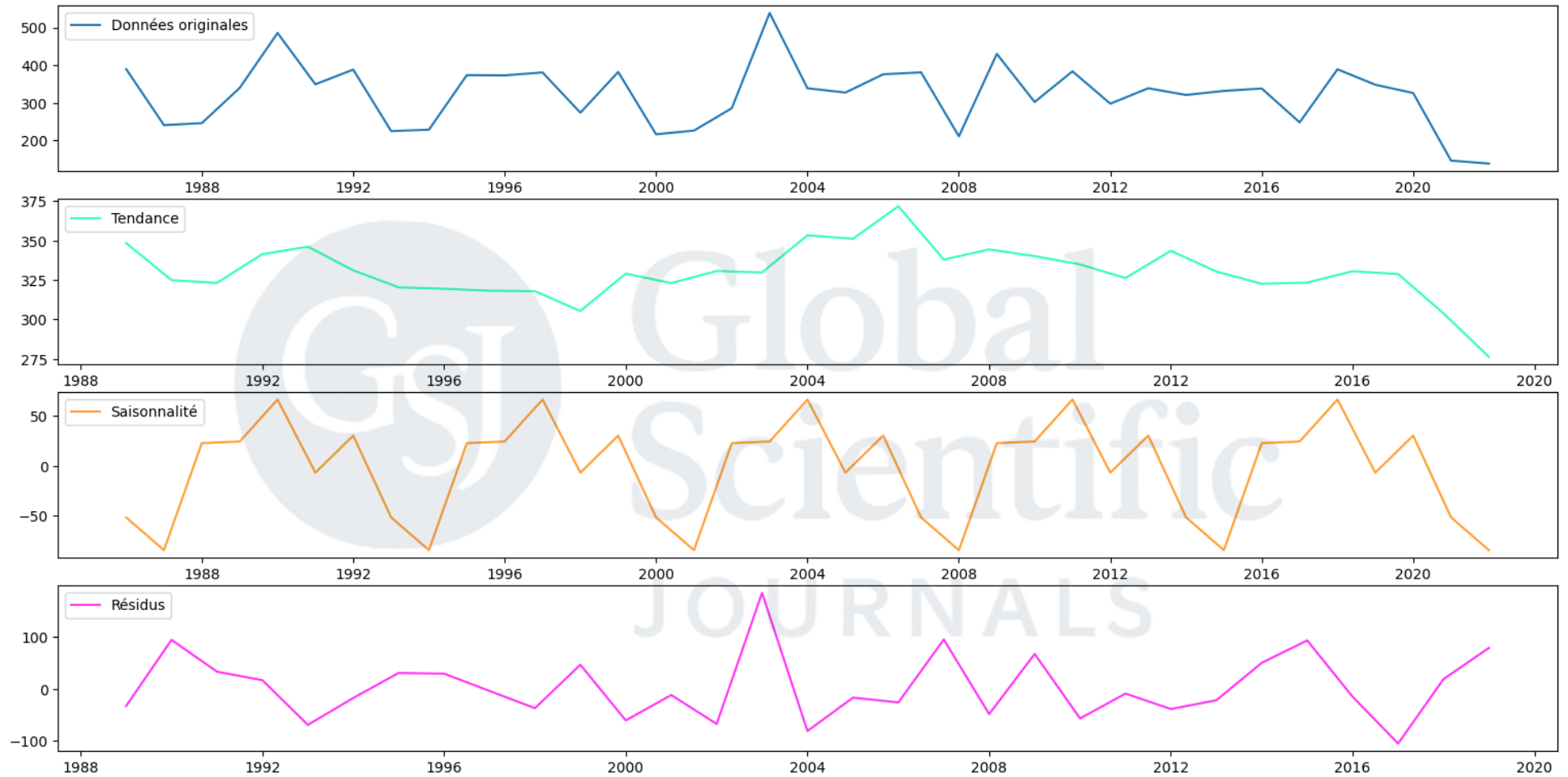
Malgré cette tendance générale à la baisse, il existe des fluctuations importantes d'une année à l'autre. Nous observons des hausses significatives telles que les pics de 1990 et 2003 (voir figure 1) des baisses remarquables des précipitations sont observées en 2008 ou plus récemment en 2022.

Malgré les variations annuelles significatives des précipitations, il n'est pas évident de conclure qu'il existe une saisonnalité ou un cycle régulier. Les fluctuations semblent plutôt irrégulières, avec aucune période de montée ou de descente constante dans la série. Quelques années présentent des événements extrêmes, avec des pics ou des creux significatifs dans la pluviométrie moyenne.

Il y a une tendance à la baisse qui pourrait indiquer un changement climatique local entraînant une baisse des précipitations ou une variabilité naturelle qui mérite une investigation plus approfondie.

Pour conclure, Cette série temporelle montre une variabilité importante de la pluviométrie annuelle moyenne avec quelques pics marqués et une tendance globale à la baisse, surtout vers la fin de la période. L'absence de cyclicité claire et la présence d'événements extrêmes suggèrent une série influencée par des facteurs irréguliers, possiblement climatiques ou environnementaux. Pour confirmer ou rejeter cette hypothèse, une analyse plus approfondie permettent de saisir le mécanisme sous-jacent à cette volatilité. Pour cela nous procédons à une décomposition de le série temporelle en ses composantes (tendancielle, saisonnière et résiduelle), facilitant ainsi une interprétation plus claire et une éventuelle modélisation prédictive.

La courbe 1 de la figure 2 montre la série temporelle brute (non décomposée). Les données varient au fil du temps, avec des fluctuations plus ou moins régulières. Nous observons des pics périodiques et des creux, mais le comportement général semble fluctuer de manière aléatoire.



Source : Auteurs, 2023

Figure 2 : La décomposition de la série temporelle entre 1986 et 2022

La courbe 2 (figure 2.2) représente l'évolution à long terme de la pluviométrie. Elle capte les mouvements lents et réguliers qui se produisent sur une longue période. Elle montre une tendance à la baisse de 1988 jusqu'à 1996. Ensuite, la tendance fluctue autour d'une certaine moyenne jusqu'à environ 2016, où une nouvelle baisse est visible. L'analyse de cette tendance permet de comprendre l'évolution globale sans être distrait par les variations de court terme ou les cycles saisonniers.

La troisième courbe (figure 2.3), montre une certaine saisonnalité qui semble capter des variations périodiques sur une base régulière, avec des pics et des creux qui suivent un cycle graphiquement identifiable. Le constat pourrait correspondre à l'existence d'une composante périodique récurrente dans la série temporelle. L'amplitude de cette saisonnalité varie quelque peu au fil des années, mais elle reste globalement stable en termes de fréquence.

La dernière courbe (figure 2.4) renseigne sur la distribution des résidus après épuration de la série des composantes : saisonnière, cyclique et de tendance. Ces résidus indiquent, a priori des fluctuations irrégulières sans processus sous-adjacent. Ainsi la plupart des variations semblent être capturées par les composantes de tendance et de saisonnalité, laissant les résidus relativement faibles, sauf quelques exceptions telles que les pics de 2004 ou de 2016.

En conclusion, la série des précipitations semble montrer une tendance globale à la baisse, en particulier à partir de 2016. Il est possible que des facteurs sous-jacents influencent cette baisse, ce qui nécessite une analyse plus approfondie des causes possibles (changements climatiques et environnementaux, ...etc.). La composante saisonnière est relativement stable, ce qui montre que, malgré les fluctuations globales, des cycles récurrents persistent à intervalles réguliers. L'absence de motifs clairs dans les résidus montre que les principales sources de variation ont été capturées par la tendance et la saisonnalité. Les pics occasionnels dans les résidus pourraient être dus à des événements uniques ou des anomalies ponctuelles.

Dans ce qui suit, nous allons procéder à une analyse spectrale par le biais de la transformée de fourrier pour confirmer ces résultats graphiques et après déterminer la période dominante du cycle. Cette analyse constituera, un préalable à la modélisation du processus stochastique sous-jacent à la pluviométrie en Tunisie et à la prévision de son évolution.

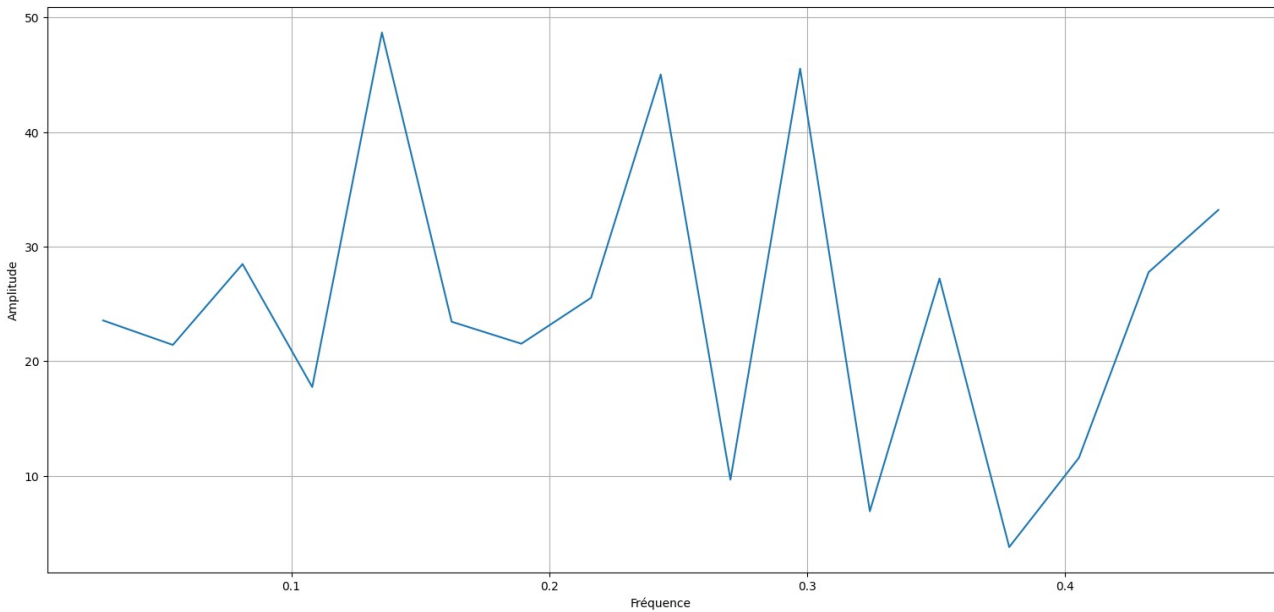
3-3- Détection de la cyclicité : Analyse spatiale

La Transformée de Fourier (1824) fait appel à une fonction sinusoïdale, qui s'applique sur des séries de données chronologiques considérées comme des signaux, afin de transférer l'analyse des données du domaine temporel au domaine fréquentiel, en soulignant des pics qui permettent d'obtenir des informations sur la régularité globale du signal. Dans ce contexte, cette analyse a pour objectif d'abord de mettre en évidence la périodicité d'éventuels phénomènes et sa relation avec la fréquence des épisodes de fortes précipitations à l'aide du spectre de puissance.

L'application de l'analyse spectrale exige la stationnarité (Priestley, 1981) des données. Plusieurs catégories de test de stationnarité sont disponibles dans la littérature tels que le test Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS), le test de Phillips-Perron (PP), le test de Dickey-Fuller et le test augmenté de Dickey-Fuller (ADF) (Dickey & Fuller, 1979 ; Phillips & Perron, 1988 ; Kwiatkowski et al., 1992), qui est particulièrement utile pour des séries temporelles avec des tendances. La stationnarité est exigée pour la modélisation des prévisions.

Après avoir vérifié la stationnarité de la série, nous avons appliqué le fenêtrage de Hamming, une technique utilisée en traitement du signal pour améliorer l'analyse spectrale. Grâce à cette méthode, les valeurs aux extrémités du signal sont progressivement réduites à zéro. Ceci minimise les discontinuités, par conséquent, réduit les fuites spectrales, permettant ainsi une estimation plus précise des fréquences. L'application de cette fenêtre aide à mieux identifier les cycles naturels en facilitant l'identification des fréquences dominantes lors de l'analyse spectrale.

L'application de cet outil nous a permis d'obtenir la figure 3. L'axe des X représente les fréquences, en cycles par an. La fréquence de 0,1 correspond à un cycle complet (une oscillation) tous les 10 ans. L'axe des Y indique la puissance associée à chaque fréquence. Plus la valeur de la densité spectrale de puissance (DSP) est élevée pour une fréquence donnée, plus cette fréquence est dominante dans la série temporelle des précipitations annuelles.



Source : auteurs, 2023

Figure 3 : Densités spectrales de puissance des précipitations annuelles moyennes (FFT)

Les pics sur la figure 3 représentent les fréquences dominantes, ce qui signifie qu'il y a des composantes périodiques importantes associées à ces fréquences spécifiques. La présence de pics prononcés à des fréquences spécifiques confirme que la série présente des composantes cycliques significatives sur la période étudiée.

Nous observons un pic principal aux alentours de 0,135, qui traduit une périodicité importante correspondant à une période d'environ 7,4 ans ($1/0,135 \approx 7,4$ ans). Ce pic suggère qu'il y a une composante cyclique importante tous les 7,4 ans pour les précipitations, nous observons aussi, deux autres pics : le premier est concentré à une fréquence d'environ 0,24 qui suggère l'existence d'un cycle dominant tous les 4 ans ($1/0,24 \approx 4$ ans) et le deuxième à environ 0,29 suggérant l'existence d'un cycle dominant tous les 3,5 ans ($1/0,29 \approx 3,5$ ans). Ces cycles sont moins prononcés que le cycle de 7,4 ans.

Plusieurs périodicités sont fréquemment observées en raison de l'interaction entre divers cycles. On peut considérer que la période de 7,4 ans est la plus importante ou la plus évidente, tandis que les autres périodes peuvent être des cycles secondaires plus faibles.

Nous observons dans le tableau 1, qui représentent les intervalles entre les pics, un espacement régulier, ce qui confirme bien la présence des cycles déjà identifiés.

Tableau 1 : Les intervalles entre les pics (en Hz)

Intervalles entre les pics (en Hz)	0.0540540 5	0.0540540 5	0.0540540 5	0.1081081 1	0.0540540 5	0.0540540 5	0.1081081 1
------------------------------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Source : calculs des auteurs, 2024

La période dominante est significative, elle permet d'identifier des régularités dans les données.

3-4- La modélisation des prédictions des tendances de la pluviométrie

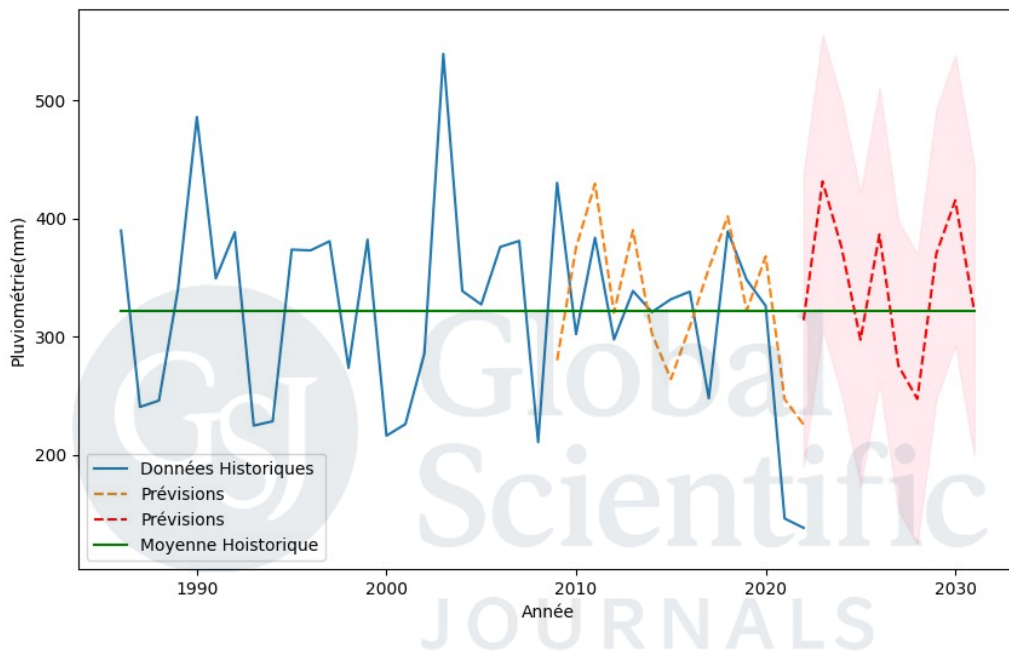
Une modélisation SARIMA (Seasonal Autoregressive integrated moving average) a été réalisée en utilisant les précipitations annuelles moyennes pour prédire les tendances de la pluviométrie à l'horizon 2032. L'analyse a été menée à l'échelle de tout le territoire tunisien, en s'appuyant sur des données couvrant la période 1986-2022.

Le modèle SARIMA appliqué à la série temporelle a été évalué à travers une analyse des résidus. Ils sont globalement distribués de manière aléatoire et respectent les hypothèses d'absence d'autocorrélation et de normalité (test de Ljung-Box, Jarque-Bera). L'hypothèse d'homoscédasticité a également été testée à l'aide d'un test d'ARCH. Ces diagnostics confirment que notre modèle est bien ajusté aux données, avec des résidus normaux et peu de signes d'irrégularités.

Nous avons opté pour l'utilisation du langage de programmation PYTHON, qui se distingue par sa polyvalence et sa puissance. Il est caractérisé par une grande flexibilité qui offre la possibilité de manipuler des données, de mener des analyses statistiques avancées et de concevoir des modèles économétriques tout en intégrant des méthodes d'apprentissage automatique. À la différence d'outils spécialisés tels que STATA ou R, Python est un langage de programmation généraliste qui propose une gamme étendue de bibliothèques adaptées à différents besoins.

Le modèle SARIMA ($p ; d ; q$) ($P ; D ; Q$) s , est adapté aux données présentant à la fois une tendance et une saisonnalité. Après une analyse exploratoire qui nous a permis une visualisation des données et des tests de stationnarité nous avons procédé à une identification et un diagnostic basé sur les fonctions d'autocorrélation (ACF) et d'autocorrélation partielle

(PACF), ainsi que de critères d'information (AIC/BIC). Le modèle retenu, SARIMA (1,0,1) (1,0,1) [7], a été ajusté sur les données annuelles couvrant la période de [1986–2022]. Les résidus ont été analysés pour valider la normalité et l’homoscédasticité (test de Ljung-Box, Jarque-Bera). Le modèle a ensuite été utilisé pour générer des prévisions à court terme, accompagnées d’intervalles de confiance. Nous observons les prévisions de la pluviométrie annuelle moyenne à l’horizon 2032 dans la figure 4 ci-dessous.



Source : Calcul des auteurs à partir de PHYTON, 2023

Figure 4 : Modélisation des prévisions de la pluviométrie annuelle moyenne avec SARIMA

Dans cette figure :

- La courbe en bleu représente la distribution des données observées de la série observée des précipitations enregistrées entre 1986 et 2022.
- La courbe orange (en pointillé) correspond aux estimations issues du modèle SARIMA des valeurs pluviométriques des 12 dernières années de 2011 jusqu'en 2022 (valeurs tests).
- La courbe en rouge (en pointillé) fournie les prévisions ponctuelles par le modèle SARIMA à l'horizon 2032 correspond aux estimations issues du modèle SARIMA représente les prévisions effectuées à l'aide du modèle SARIMA pour les précipitations futures à l'horizon 2032.

- La zone ombrée en rouge autour des prévisions ponctuelles correspond à l'intervalle de confiance à un niveau de 95%.

Les données observées montrent une variabilité importante des précipitations annuelles, avec des pics et des creux accentués.

Le modèle SARIMA prévoit avec un seuil de signification acceptable 5% que cette variabilité se poursuivra à l'avenir, avec une certaine incertitude, comme le montrent les larges intervalles de prévision, en particulier après 2025. Cette incertitude augmente avec le temps, reflétant la confiance du modèle dans ses prédictions.

Le modèle SARIMA ajusté a montré une bonne capacité à capturer la dynamique temporelle et saisonnière des données. Les résidus sont globalement distribués de manière aléatoire et respectent les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité (test de Ljung-Box, Jarque-Bera).

4- Conclusion et discussion :

L'irrégularité des précipitations en Tunisie a affecté la population et plusieurs secteurs dynamiques très dépendant de la disponibilité en eau. Il est nécessaire de mettre les stratégies adéquates pour faire face à la variabilité climatique. C'est dans ce cadre que le présent travail a été mené. Il vise l'étude de la variabilité pluviométrique annuelle sur tout le territoire tunisien où les ressources en eau sont limitées, peu renouvelables et excessivement exploitées. Nous avons exploité des données moyennes annuelles de pluviométrie durant la période 1986-2022 dans le but de déterminer la présence d'une périodicité pluviométrique historique, structurelle ou plutôt une répartition totalement aléatoire sans processus sous-jacent, ce qui pourrait être associé aux conséquences du changement climatique.

Les résultats ont montré que les précipitations durant cette période fluctuent autour d'une moyenne annuelle de 321 mm³ mais la tendance globale de la pluviométrie se manifeste par une baisse. Il y a une périodicité de 7 ans qui implique des années pluvieuses et des années sèches. Il apparaît que ces alternances de périodes sèches et humides ont eu une ampleur spatiale et temporelle ainsi qu'une intensité très variable. Au cours des premières années de notre série étudiée (période comprise entre 1986 et 2003), nous observons des fluctuations avec une tendance qui correspond à une augmentation de la pluviométrie annuelle alors que la tendance s'est inversée à la baisse après la fin de l'année 2003. Les pics sont devenus moins

importants et les creux ont atteint le niveau le plus bas enregistré depuis presque quatre décennies, ceci peut être dû à l'impact relatif du changement climatique qui peut également jouer un rôle perturbateur. Cette diminution de la pluviométrie risque de s'accroître à l'avenir et engendrer des problèmes d'ordre économique (agriculture) environnemental (écosystème) et social (disparité et inégalité dans l'alimentation de l'eau potable).

La portée du changement climatique au niveau de la ressource en eau doit être relativisée, elle se résume au niveau des quotas de la pluviométrie où nous observons une tendance générale à la baisse. Le stress hydrique en Tunisie pourrait être en partie résorbé par une gestion publique efficace et une planification à moyen et à long terme, intégrant la cyclicité notamment à travers des politiques de compensation pour les années de sécheresse. Il est important que les tendances et la variabilité des précipitations soient prises en compte afin de mieux appréhender la résilience face aux événements extrêmes. La capacité à prévoir et à anticiper les années de forte ou de faible pluviométrie constitue un élément déterminant pour l'identification et la mise en œuvre de mesures d'adaptation appropriées.

Bibliographies :

Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(366), pp. 427–431.

Fourier, J.B. (824). Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. 27, pp. 136–167.

Kwiatkowski, D., Phillips, P. C. B., Schmidt, P., & Shin, Y. (1992). Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. *Journal of Econometrics*, 54(1–3), pp. 159–178.

OMM. (2022). Rapport sur l'état des ressources en eau dans le monde renseigne sur les cours d'eau, le stockage des eaux terrestres et les glaciers. 52 pp. <https://library.wmo.int/idurl/4/58262>

ONU. (2020). Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020 : l'eau et les changements climatiques, 243 pp.

Phillips, P. C. B., & Perron, P. (1988). Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika*, 75(2), pp. 335–346.

Priestley, M.B. (1981). *Spectral Analysis and Time Series*, Vol. 1 (653 pp.) & Vol. 2 (660 pp.). Academic Press.

UNICEF. (2024). Rapport annuel de l'UNICEF 2024, 56 pp. <https://www.unicef.org/fr/media/172266/file/unicef-annual-report-2024-fr.pdf>