

# *Analyse Prévisionnel Des Paramètres Climatiques Pour La Modélisation De Conception Architecturale Des Bâtiments Face Au Changement Climatique*

RAMANAMPAMONJY Jean Claude<sup>1</sup>, RAMIANDRA Aina Clarc<sup>2</sup>, HERIPINOANARIMANANA Fenomora Evariste<sup>3</sup>, VELOMISAINA Dorissia<sup>4</sup>, VAVIZARA Sylvie<sup>5</sup>, HARY Jean<sup>6</sup>, MAXWELL Djaffard<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation  
Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
rabotajc@yahoo.fr

<sup>2</sup>Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation  
Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
clarcaina@gmail.com

<sup>3</sup>Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation  
Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
herievariste@gmail.com

<sup>4</sup>Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation  
Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
dorissia.aina@gmail.com

<sup>5</sup>Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation  
Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
vavizarasyvie@yahoo.fr

<sup>6</sup>Institut Supérieur des Sciences et Technologies de Mahajanga  
Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
jjeanhary@yahoo.com

<sup>7</sup>Institut Supérieur des Sciences et Technologies de Mahajanga  
Université de Mahajanga  
Mahajanga-MADAGASCAR  
djafmax@yahoo.fr

Auteur correspondant : RAMANAMPAMONJY Jean Claude. E-mail : rabotajc@yahoo.fr



**Résumé :** Madagascar, exposé aux cyclones tropicaux en raison de sa position dans l’océan Indien, subit une vulnérabilité accrue liée aux aléas climatiques, à la variabilité du climat et à la dégradation de l’environnement. Cette étude porte sur la modélisation architecturale de bâtiments résistants aux aléas climatiques dans la région Boeny. L’analyse de données climatiques de 1979 à 2022, issues de la base ECMWF, a été réalisée à l’aide de plusieurs méthodes telles que la moyenne arithmétique, la régression linéaire, le test de Mann-Kendall et la prévision avec correction des biais. Les résultats révèlent une augmentation progressive des précipitations et des températures, ainsi qu’une forte variabilité de la vitesse du vent. Ces évolutions soulignent la nécessité de concevoir des bâtiments adaptés, intégrant ventilation naturelle et structures renforcées, pour garantir leur résilience face tendance climatique dans la région Boeny.

**Mots-clés :** précipitation, vent, température, résilience, architecture

**Abstract:** Madagascar, due to its location in the Indian Ocean, is highly exposed to tropical cyclones, which increases its vulnerability to climatic hazards, climate variability, and environmental degradation. This study focuses on the architectural modeling of buildings resistant to extreme weather conditions in the Boeny region. The analysis is based on climate data from 1979 to 2022, sourced from the ECMWF database, and employs several assessment methods: arithmetic mean, linear regression, the Mann-Kendall test, and bias-corrected forecasting techniques. The results reveal a gradual increase in precipitation and temperature, as well as high variability in wind speed. These climate trends highlight the urgency of designing buildings that incorporate natural ventilation systems and reinforced structures to ensure their durability in the face of ongoing climate changes in the Boeny region.

**Keywords:** rainfall, wind, temperature, resilience, architecture

## I. INTRODUCTION

L’île de Madagascar est un pays hautement exposé et vulnérable aux catastrophes naturelles. Outre sa forte exposition aux aléas naturels, le niveau de risque de Madagascar est configuré par une vulnérabilité importante dont la pauvreté de la population, la variabilité climatique et la dégradation rapide de l’environnement en sont les causes majeures. Elle est située sur l’axe des trajectoires des cyclones tropicaux du Sud de l’Océan Indien et constitue une proie quasi régulière de ces perturbations atmosphériques accompagnées de vent très puissant et de fortes pluies. L’île figure ainsi au treizième rang mondial des pays les plus fortement exposés aux cyclones tropicaux et au premier rang des pays africains<sup>1</sup>. Particulièrement, les habitations et les divers bâtiments subissent régulièrement des dommages par suite des perturbations atmosphériques et font l’objet de reconstruction après leur passage. La vulnérabilité des bâtiments résulte du fait qu’ils ne sont pas construits pour résister aux cyclones ou qu’ils ne suivent pas tout simplement les prescriptions établies par la réglementation en vigueur relative aux constructions de bâtiment qu’ils soient publics ou privés.

Cette étude s’articule sur la modélisation de la conception architecturale des bâtiments, cas de passage de cyclone à Mahajanga. Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie rigoureuse sera employée, incluant la collecte des données historiques sur la précipitation, vent, température et cyclone par l’intermédiaire des unités agréées (données satellitaires), la prévision par la méthode correction des biais linéaire et la démonstration de réglementation concernant la conception et la construction des bâtiments résistant aux effets cycloniques.

## II. METHODOLOGIE

### A. Zone d’étude

Sur la Fig.1, notre zone d’étude est encadrée en couleur rouge. Elle est délimitée par :

- les longitudes comprises entre 46° E et 47° E
- et les latitudes comprises entre 15° S et 16° S.

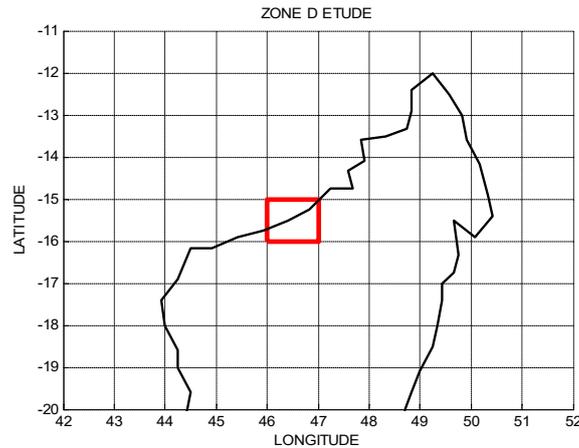


Fig. 1 Zone d'étude

### B. Base de données

Ce sont des données journalières de réanalyses, pour une résolution spatiale de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , couvrant la période du 1er janvier 1979 au 31 décembre 2022, téléchargées dans ECMWF. Les données de précipitation, vents et températures ont été extraites à partir de fichiers NetCDF. L'extraction a été réalisée en utilisant le logiciel MATLAB, permettant d'obtenir les valeurs de ces paramètres climatologiques, ainsi que les coordonnées de latitude et de longitude. Un sous-ensemble spatial correspondant à la zone d'étude a été sélectionné afin d'isoler les données pertinentes. Pour obtenir les données horaires cumulées, les différentes étapes temporelles ont été agrégées en sommant les contributions issues des fichiers correspondants. Cette approche assure une prise en compte complète de la variabilité intra-journalière de ces données et permet de reconstituer un signal journalier consolidé. Les données de prévision de température, de précipitation, et du vent, proviennent du modèle CCCma-CanESM2 sous le scénario RCP4.5. Ce modèle climatique, utilisé pour simuler les effets du changement climatique sous des conditions d'émissions modérées de gaz à effet de serre, permet de fournir des projections détaillées.

### C. Méthodes

#### 1) Moyenne arithmétique

La moyenne arithmétique d'un ensemble de valeurs est la somme de ces valeurs divisée par le nombre total d'éléments. Elle est donnée par la formule :

où :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

- $\bar{x}$  est la moyenne,
- $x_i$  sont les valeurs des données,
- $n$  est le nombre total d'observations.

#### 2) Tendence linéaire

La tendance linéaire des observations désigne une évolution globale des données qui peut être approximée par une droite. Elle est souvent analysée à l'aide de la régression linéaire, qui permet de modéliser la relation entre une variable indépendante ( $x$ ) et une variable dépendante ( $y$ ) sous la forme :

$$y=ax+b \quad (2)$$

où :

- a est le coefficient directeur (pente), indiquant l'augmentation ou la diminution de y lorsque x augmente,
- b est l'ordonnée à l'origine, représentant la valeur de y lorsque x=0.

### 3) Test de Mann-Kendall

Le test de tendance Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) est sur la base de la corrélation entre les rangs d'une série chronologique et leur ordre de temps. Pour une série chronologique  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , l'hypothèse nulle  $H_0$  est l'hypothèse de stationnarité de la série (absence de tendance). L'hypothèse alternative  $H_1$  correspond à la non stationnarité de la série. La statistique de test est donnée par :

$$s = \sum_{i < j} a_{ij} \quad (3)$$

Avec :

$$a_{ij} = \text{sign}(X_j - X_i) = \text{sign}(R_j - R_i) = \begin{cases} 1 \text{ si } X_i < X_j \\ 0 \text{ si } X_i = X_j \\ -1 \text{ si } X_i > X_j \end{cases} \quad (4)$$

Et  $R_i$  et  $R_j$  sont les rangs des observations  $X_i$  et  $X_j$  de la série chronologique, respectivement

### 4) Préviation par la méthode correction des biais

La méthode du delta est une technique couramment utilisée pour la correction des biais dans les modèles climatiques, en particulier pour les variables météorologiques comme la température et les précipitations. Elle repose sur une correction additive ou multiplicative selon la nature des données. L'idée principale est d'ajuster les valeurs biaisées à l'aide d'une différence ( $\Delta$ ) ou d'un facteur d'échelle ( $r$ ), calculés à partir d'une période de référence où l'on dispose à la fois de données observées et de données biaisées (issues d'un modèle). Il existe deux approches selon le type de variable, correction additive pour des variables avec une distribution normale comme la température et correction multiplicative pour des variables strictement positives et asymétriques comme les précipitations.

#### a) Correction additive

Cette approche est utilisée lorsque la distribution des données est relativement symétrique. L'équation de correction est :

$$X_{\text{corrigé}} = X_{\text{biaisé}} + \Delta \quad (5)$$

où

$$\Delta = \mu_{\text{ref}} - \mu_{\text{biaisé}} \quad (6)$$

- $\mu_{\text{ref}}$  est la moyenne des observations de référence (issues des mesures historiques).
- $\mu_{\text{biaisé}}$  est la moyenne des données biaisées issues du modèle.
- $\Delta$  représente le biais moyen observé sur la période de référence.

#### b) Correction multiplicative

Cette approche est utilisée lorsque les valeurs sont strictement positives et que leur distribution est asymétrique (comme les précipitations). L'équation de correction est :

$$X_{\text{corrigé}} = X_{\text{biaisé}} - r \quad (7)$$

où

$$r = \frac{\mu_{\text{réf}}}{\mu_{\text{biaisé}}} \quad (8)$$

- $\mu_{\text{réf}}$  est la moyenne des précipitations observées sur la période de référence.
- $\mu_{\text{biaisé}}$  est la moyenne des précipitations biaisées du modèle.
- $r$  est un facteur d'échelle qui ajuste les valeurs biaisées en fonction du rapport entre les observations et les simulations.

### III. RESULTATS

#### A. Analyse de tendance de la précipitation

La courbe bleue de la Fig.2 montre la variabilité des précipitations annuelles dans la région entre 1979 et 2022, avec une alternance d'années humides et sèches, et des précipitations variant de 154,4 mm (1991) à 319,3 mm (2003). Bien qu'une légère tendance à la hausse des précipitations soit visible, avec une augmentation de 0,623 mm par an, le test Mann-Kendall montre que cette tendance n'est pas statistiquement significative ( $p$ -value = 0.1659). Ce qui suggère que les fluctuations sont davantage dues à des variations naturelles qu'à un changement climatique à long terme. La ligne de tendance rouge, qui reflète cette augmentation moyenne, masque cependant la forte variabilité interannuelle et les événements extrêmes.

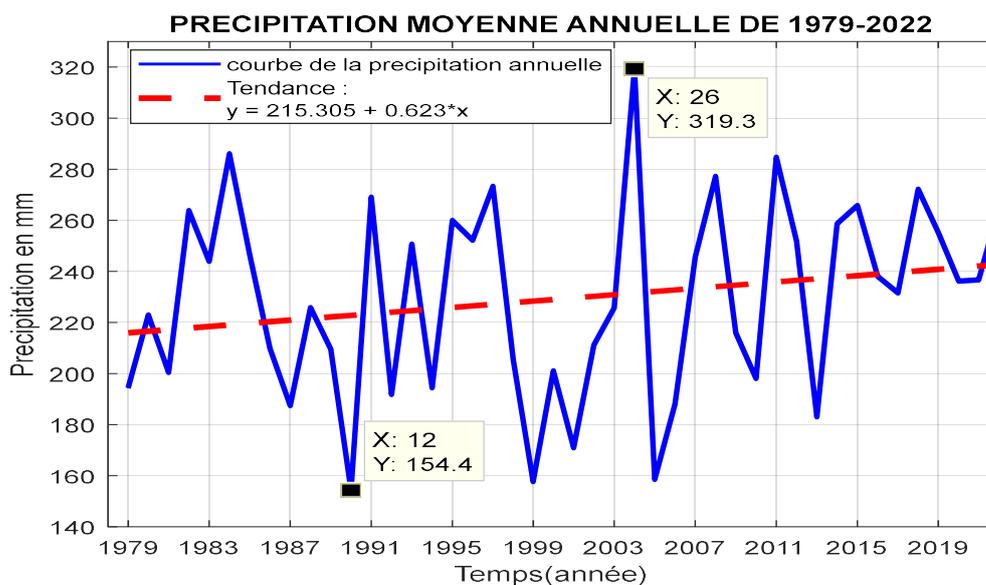


Fig. 2 Précipitation moyenne annuelle de 1979 à 2022

La Fig.3 représente la prévision de la précipitation moyenne annuelle de 2006 à 2100, issue du modèle climatique corrigé de biais CCCma-CanESM2 sous le scénario RCP4.5. L'analyse montre une tendance générale légèrement croissante, avec une augmentation d'environ 9 mm par an, indiquée par la droite de tendance  $y=8,849+0,009x$ . Malgré cette hausse progressive, la variabilité interannuelle reste marquée, avec des alternances prononcées entre années sèches et humides. Des événements extrêmes sont mis en évidence, notamment un minimum de précipitation en 2046 (6,686 m) et un maximum en 2073 (12,55 m), soulignant les risques accrus de sécheresse et d'inondation. Cette évolution s'inscrit dans une dynamique climatique modérée correspondant au scénario RCP4.5, qui suppose une stabilisation du réchauffement. La correction de biais appliquée renforce la fiabilité de ces

projections, permettant une meilleure anticipation des impacts potentiels sur les ressources hydriques et les activités socio-économiques dans les prochaines décennies.

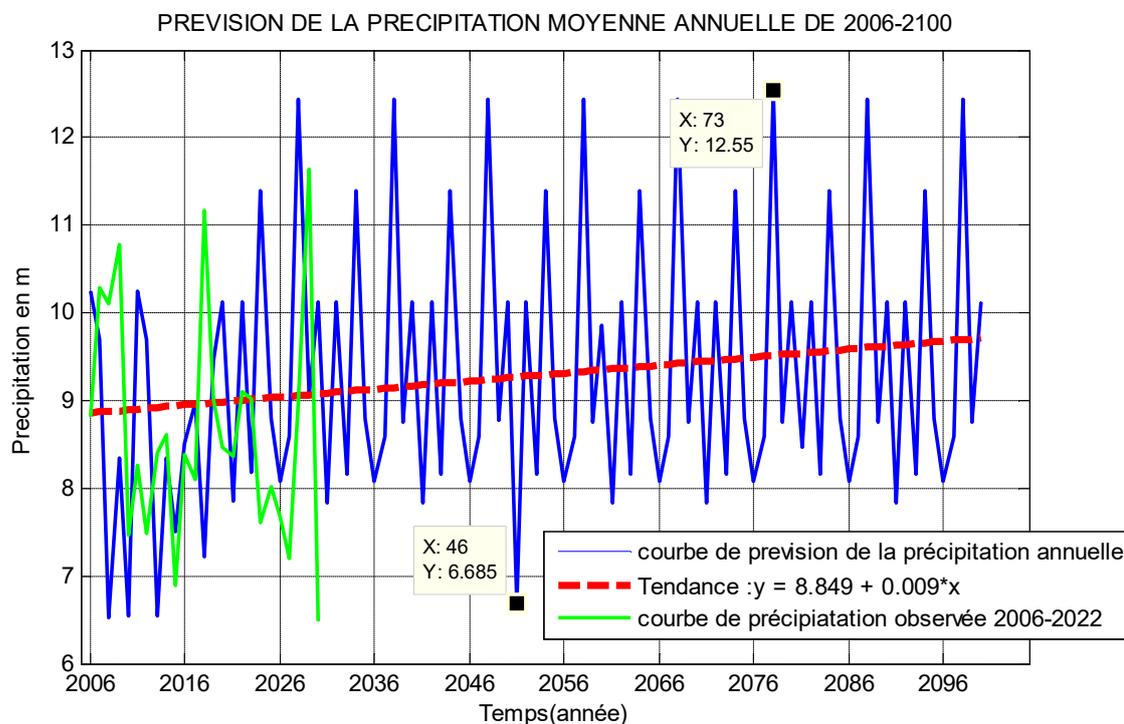


Fig. 3 Courbe de prévision de la précipitation annuelle de 2006 à 2100

*B. Analyse de tendance de la température*

La Fig.4 montre une augmentation significative de la température moyenne annuelle dans la zone d'étude, avec une tendance à la hausse confirmée par une droite de régression à pente positive (0,015°C par an). Le test de Mann-Kendall valide la significativité statistique de cette tendance avec  $p\_value = 0.0000059$  qui est strictement inférieur à 0.05 . La température moyenne annuelle sur la période étudiée est de 26,65°C.

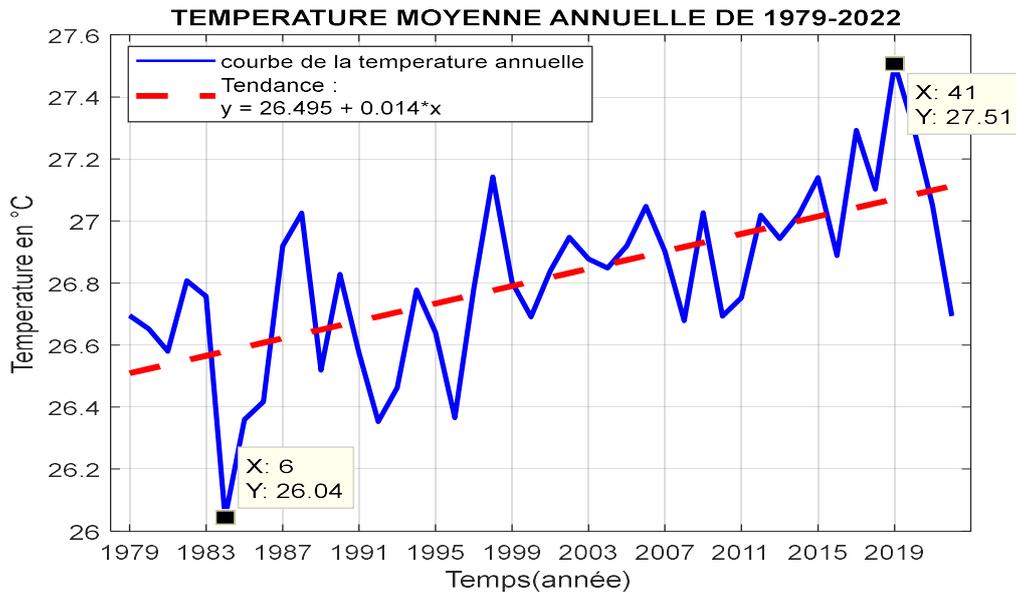


Fig. 4 Courbe et droite de tendance de la température moyenne annuelle de 1979 à 2022

La Fig.5 montre la prévision de la température moyenne annuelle de 2006 à 2100, basée sur le modèle CCCma-CanESM2 corrigé de biais sous le scénario RCP4.5. Elle relève une tendance générale à une légère augmentation de 0,003 °C par an. Toutefois, au-delà de cette hausse progressive, on observe une fluctuation marquée des températures d'une année à l'autre. La température varie entre un minimum de 26,76 °C (en 2006) et un maximum de 28,22 °C (en 2042), traduisant une oscillation régulière autour de la tendance moyenne. Cette variabilité naturelle, bien que relativement stable sur la période, indique que des écarts saisonniers ou interannuels notables pourront continuer à se produire, avec des années plus chaudes ou plus fraîches que la moyenne projetée. Par ailleurs, la courbe en vert représente les températures observées entre 2006 et 2022. Elle se situe légèrement en dessous de la courbe de prévision pour cette période, avec une variabilité marquée et une absence de tendance clairement croissante sur ce court

intervalle. Cette observation suggère que, bien que le modèle projette un réchauffement progressif, les données observées sur la période récente restent soumises à des fluctuations naturelles importantes, sans hausse significative. Apparente.

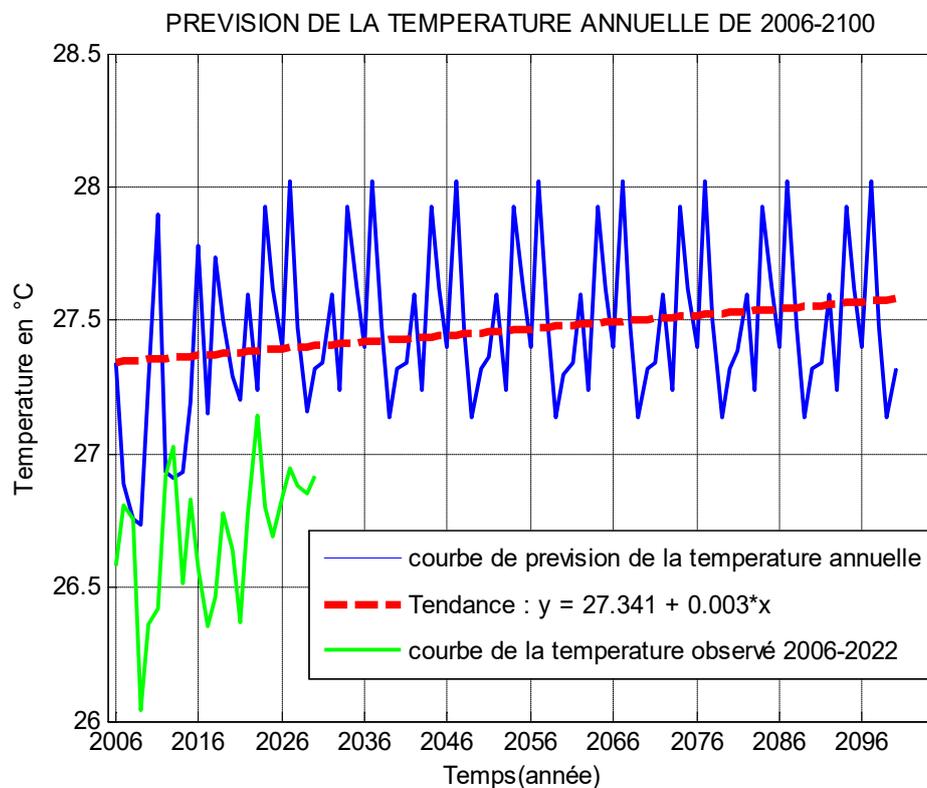


Fig.5 Courbe de prévision de la température annuelle de 2006 à 2100

### C. Analyse de tendance du vent

Le Fig.6 représente l'évolution annuelle de la vitesse moyenne du vent dans la zone d'étude entre 1979 et 2022. La courbe bleue montre une variabilité interannuelle marquée, influencée par des phénomènes climatiques comme El Niño et La Niña, ainsi que par des événements météorologiques extrêmes. La ligne rouge de tendance indique une légère augmentation de la vitesse du vent (0,002 m.s<sup>-1</sup> par an). Les valeurs extrêmes enregistrées sont de 3,489 m.s<sup>-1</sup> en 1984 et de 2,389 m.s<sup>-1</sup> en 1992.

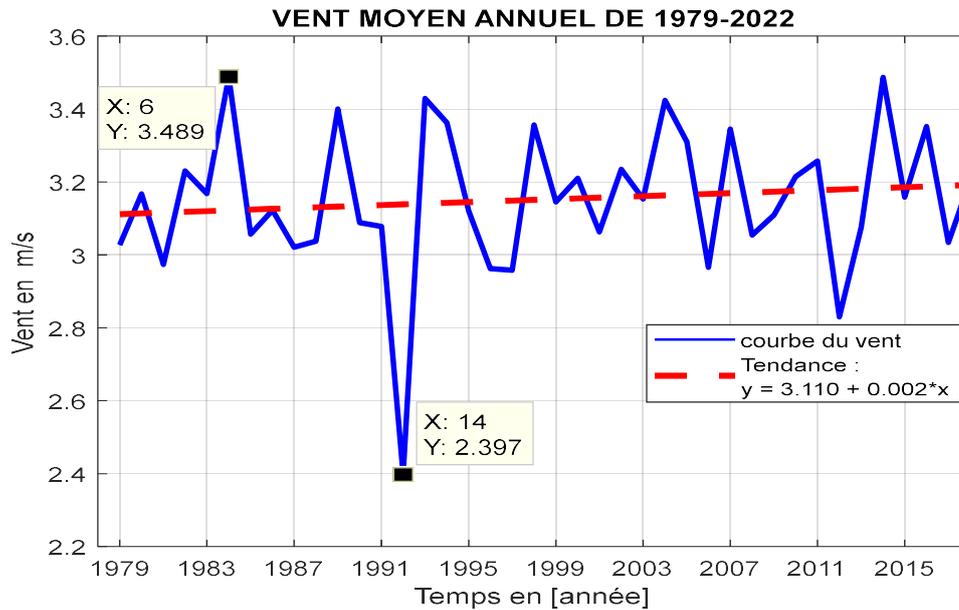


Fig.6 Vent moyen annuel de 1979 à 2022

La Fig.7 représente la prévision de la vitesse moyenne annuelle du vent de 2006 à 2100, basée sur une simulation climatique. La courbe en bleu met en évidence une variabilité interannuelle significative, avec des valeurs oscillantes entre 3.05 m.s<sup>-1</sup> et 3.45 m.s<sup>-1</sup>. La tendance linéaire, représentée par la droite rouge, indique une baisse progressive de la vitesse moyenne, estimée à 0.001 m.s<sup>-1</sup> par an. Sur l'ensemble de la période, cette diminution atteint environ 0.09 m.s<sup>-1</sup>. Cette évolution, bien que modérée, souligne une tendance à la diminution de l'intensité du vent sur le long terme, tout en conservant une dynamique annuelle active. Par ailleurs, la courbe en vert montre les vitesses de vent observées entre 2006 et 2022. Elle présente une variabilité plus marquée que la courbe simulée, avec des écarts plus brusques d'une année à l'autre. Cette courbe ne révèle pas de tendance nette sur la période observée, mais confirme la forte instabilité interannuelle du vent. Ce contraste entre les observations et les prévisions souligne l'importance de prendre en compte la variabilité locale et les incertitudes liées aux données.

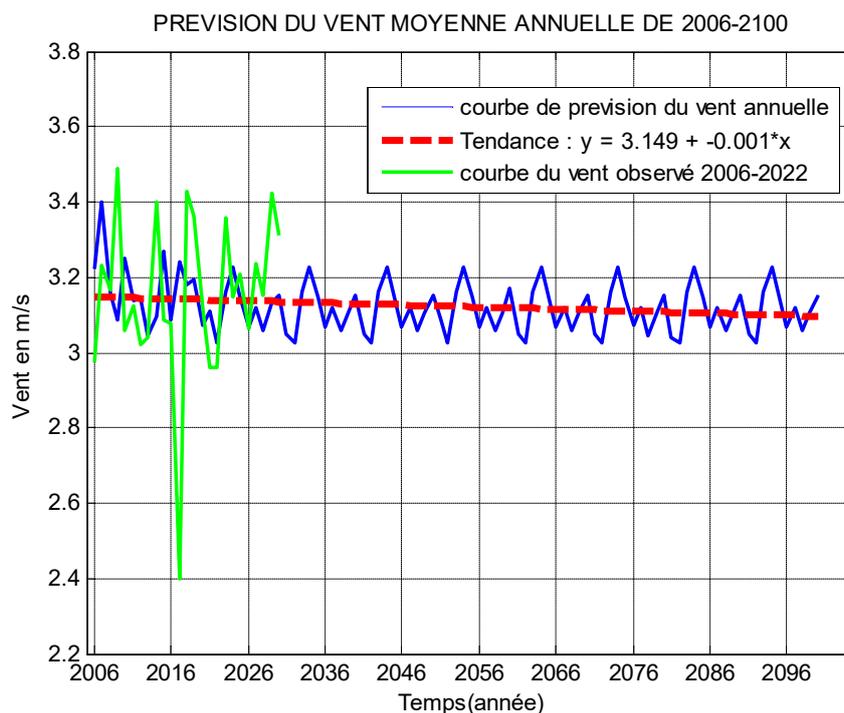


Fig.7 Prévission du vent moyen annuel de 2006 à 2100

#### IV. DISCUSSION

L'analyse conjointe des principales variables climatiques précipitations, température et vent permet de dégager les grandes lignes de l'évolution du climat dans notre zone d'étude au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Les précipitations annuelles montrent une tendance nette à la hausse, estimée à environ 9 mm par an. Cette augmentation, bien que progressive, est marquée par une forte variabilité interannuelle, traduisant une alternance d'épisodes de sécheresse et d'humidité plus intenses. Ce comportement souligne une accentuation possible des extrêmes hydrologiques dans les décennies à venir. En parallèle, la température moyenne annuelle suit une évolution légèrement croissante, avec une tendance de l'ordre de 0,003 °C par an. Cette élévation régulière, bien qu'apparemment modérée, confirme le réchauffement climatique régional. Elle s'accompagne d'une fluctuation interannuelle persistante, suggérant la persistance d'années anormalement chaudes ou plus tempérées que la moyenne projetée. Enfin, la vitesse moyenne annuelle du vent révèle une tendance à la baisse, estimée à 0,001 m/s par an. Bien que cette diminution soit faible, elle reste significative à long terme et pourrait affecter certains processus atmosphériques et énergétiques. Les observations récentes montrent en revanche une variabilité plus marquée, confirmant le caractère instable de cette variable à court terme. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que la région pourrait connaître un réchauffement graduel, accompagné d'une intensification du cycle hydrologique et d'une réduction légère mais continue de l'intensité du vent.

Pour la conception architecturale de bâtiments, ces résultats impliquent la nécessité d'adapter les projets aux risques climatiques futurs. Les bâtiments devront intégrer des dispositifs efficaces de gestion des eaux pluviales, tels que des toitures inclinées favorisant l'évacuation rapide de l'eau, des systèmes de collecte et de stockage d'eau de pluie, ainsi que des fondations renforcées contre les risques d'infiltration. La prise en compte de la ventilation naturelle, du confort hygrothermique et de la résilience structurelle face aux fortes précipitations devra être au cœur de la stratégie architecturale, afin de garantir la durabilité et la qualité de vie dans un climat de plus en plus instable mais modérément évolutif selon les projections RCP4.5. Le réchauffement climatique dans la zone d'étude exige une adaptation de la modélisation de la conception architecturale.

Dans la modélisation de la conception architecturale, cette prévision de l'évolution climatique nécessite des bâtiments optimisés pour minimiser les effets de la chaleur croissante. Il est crucial d'intégrer des dispositifs architecturaux favorisant une ventilation transversale efficace et des espaces intérieurs ombragés, afin d'améliorer le confort thermique tout en réduisant la dépendance aux systèmes de refroidissement artificiels. Ces stratégies contribueront à adapter les infrastructures aux conditions climatiques futures, tout en garantissant leur durabilité et leur efficacité énergétique.

La modélisation de la conception architecturale doit intégrer la résistance au vent, en particulier dans les régions exposées à de fortes fluctuations climatiques. Il est essentiel d'analyser les formes des bâtiments et les configurations les mieux adaptées à la vitesse et à la direction des vents afin de réduire les risques et d'assurer la durabilité des structures. Cette approche permet d'évaluer la résilience des infrastructures face aux impacts des cyclones et aux changements climatiques.

## V. CONCLUSION

L'analyse des précipitations, du vent et des températures dans la région de Boeny entre 1979 et 2022 met en évidence une variabilité interannuelle marquée, influencée par des phénomènes climatiques. Bien qu'une légère augmentation des précipitations et de la vitesse du vent soit observée, ces tendances ne sont pas statistiquement significatives, suggérant que les fluctuations sont principalement dues à des variations naturelles.

Les résultats issus des prévisions climatiques corrigées de biais selon le scénario RCP4.5 mettent en évidence des évolutions notables des paramètres climatiques à l'horizon 2100. Une légère augmentation des précipitations annuelles, combinée à une forte variabilité interannuelle, laisse présager une alternance marquée entre épisodes de sécheresse et précipitations extrêmes, accroissant les risques d'inondation. De même, la hausse progressive des températures, accompagnée de fluctuations annuelles significatives, suggère des périodes de chaleur accentuée susceptibles d'affecter le confort thermique. Enfin, la baisse modérée de la vitesse moyenne du vent indique un changement potentiel dans les régimes de ventilation naturelle.

Ces résultats soulignent l'importance d'adapter les stratégies de conception architecturale aux conditions climatiques locales. L'optimisation de la gestion de l'eau, notamment par des dispositifs de captation des eaux pluviales et des surfaces drainantes, ainsi que la prise en compte des contraintes liées au vent dans le choix des formes et des matériaux des bâtiments, apparaissent comme des solutions clés pour assurer la pérennité des infrastructures.

Ainsi, une approche intégrée combinant analyse climatique et modélisation architecturale permettrait de mieux anticiper les impacts des phénomènes extrêmes et de concevoir des environnements bâtis mieux adaptés aux évolutions climatiques futures.

## REFERENCES

- [1]. Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to Linear Regression Analysis* (6<sup>e</sup> éd.). Wiley.
- [2]. Antoine, Charles. *Les Moyennes*. Paris : Presses Universitaires de France, collection "Que sais-je ?", 1998
- [3]. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
- [4]. Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed., pp. 1–202). London: Charles Griffin
- [5]. Hay, L. E., Wilby, R. L., & Leavesley, G. H. (2000). A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(2), 387–397.
- [6]. Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456–457, 12–29.