



## RESEARCH ARTICLE

### RELATION DE CAUSALITE ENTRE LES QUATRE VARIABLES CLIMATIQUES ANNUELLES : *TEMPERATURE, PRECIPITATION, EVAPORATION ET HUMIDITE SPECIFIQUE* » DANS LA VILLE DE MAINTIRANO SUR LA PARTIE OUEST DE MADAGASCAR.

Antoine RABENDRINA<sup>1\*</sup>, J. Y. RAKOTOMALALA<sup>2</sup>, Eliharinivo RAJAONARITININA<sup>3</sup> et  
Veroarisinina RATSIMBAZAFY<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Laboratoire de Physique du Solide, BP 101, Madagascar ;  
<sup>2</sup>Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Laboratoire de Chimie Minérale, BP 906, Madagascar ;  
<sup>3</sup>Université d'Antananarivo, Faculté des sciences, Laboratoire de Biotechnologie et Amélioration des Plantes, BP 906, Madagascar ; <sup>4</sup>Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Laboratoire de Physique du Solide, BP 101.Madagascar

#### ARTICLE INFO

##### Article History:

Received 25<sup>th</sup> November, 2025  
Received in revised form  
20<sup>th</sup> December, 2025  
Accepted 18<sup>th</sup> January, 2026  
Published online 27<sup>th</sup> February, 2026

##### Keywords:

Causalité, Variables Endogène, Variables Exogènes.

\*Corresponding author:  
Seraphin Agre DJOMO

#### ABSTRACT

Le présent article examine la relation de causalité entre les quatre variables climatiques annuelles : *Température, Précipitations, Evaporation et Humidité spécifique* dans la ville de Maintirano, sur la partie ouest de Madagascar, à une longitude de 44°1'37''EST et une latitude de 18°34' Sud. L'analyse porte sur une période de 37 années. Les données sont issues de relevées locaux, complétées par des données climatiques extraites de l'ECMWF allant de 1979 à 2015. L'objectif de la présente étude est de mettre en évidence les relations de causalité existant entre ces quatre variables et les équations reliant les variables endogènes et exogènes. Pour mener à bien ce travail, l'analyse s'appuie sur la méthodologie de causalité au sens de Granger, suivi des tests statistiques et des probabilités associées aux coefficients. L'ensemble des traitements a été réalisé à l'aide du logiciel Eviews, qui a permis d'estimer avec précision les paramètres des équations reliant les différentes variables et le choix de Lags. Les résultats obtenus à l'échelle annuelle présentent généralement des relations d'indépendance significative sauf entre les variables température et humidité spécifique. Les interactions entre les quatre variables climatiques annuelles sont globalement faibles, et permettant de visualiser la gestion hydrologique aux variations climatiques.

Copyright©2026, Antoine RABENDRINA et al. 2026. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Citation:** Antoine RABENDRINA, J. Y. RAKOTOMALALA, Eliharinivo RAJAONARITININA et Veroarisinina RATSIMBAZAFY. 2026. "Relation de causalité entre les quatre variables climatiques annuelles: « Température, précipitation, évaporation et humidité spécifique » dans la ville de Maintirano sur la partie ouest de Madagascar." *International Journal of Current Research*, 18, (02), 36395-36404.

## INTRODUCTION

L'analyse des interrelations entre les variables climatiques annuelles constitue une étape fondamentale pour comprendre les mécanismes qui gouvernent la dynamique atmosphériques et l'équilibre hydrologique (1-3). Les interactions entre les quatre variables : Température, Précipitation, l'Evaporation et l'Humidité spécifique déterminent en grande partie, l'équilibre énergétique et hydrologiques de l'atmosphère et conditionnent à différentes échelles, le fonctionnement des écosystèmes. (4-7) Ces variables interagissent selon des mécanismes physiques et temporelles étroitement couplés dont la direction causale demeure souvent incertaine. En effet, les corrélations observées entre ces paramètres ne suffisent pas à établir le sens réel des influences, car la corrélation ne traduit pas nécessairement la causalité (8-10). Cette ambiguïté constitue la problématique centrale du présent travail. Quelle variable influence statistiquement les autres dans l'évolution annuelle du système climatique (11). Pour répondre à cette question, la relation de causalité de Granger en 1969 offre un cadre analytique rigoureux permettant de tester, à partir de séries temporelles, si les valeurs passées d'une variable contiennent une information significative pour la prévision d'une autre. (12,13). La compréhension scientifique de cette étude réside dans la compréhension quantitative des interactions énergétiques et hydriques au sein du climat, et dans la possibilité d'améliorer les modèles prédictif face aux changement climatiques actuels. L'analyse causale proposée vise ainsi à clarifier la structure temporelle du cycle hydrologique et à renforcer la cohérence entre théorie physique et observation statistique du climat (14). Dans les régions tropicales telles que Madagascar, la production agricole et la stabilité environnementale, l'examen approfondi de ces interactions revêt une importance scientifique et socio-économique considérable.

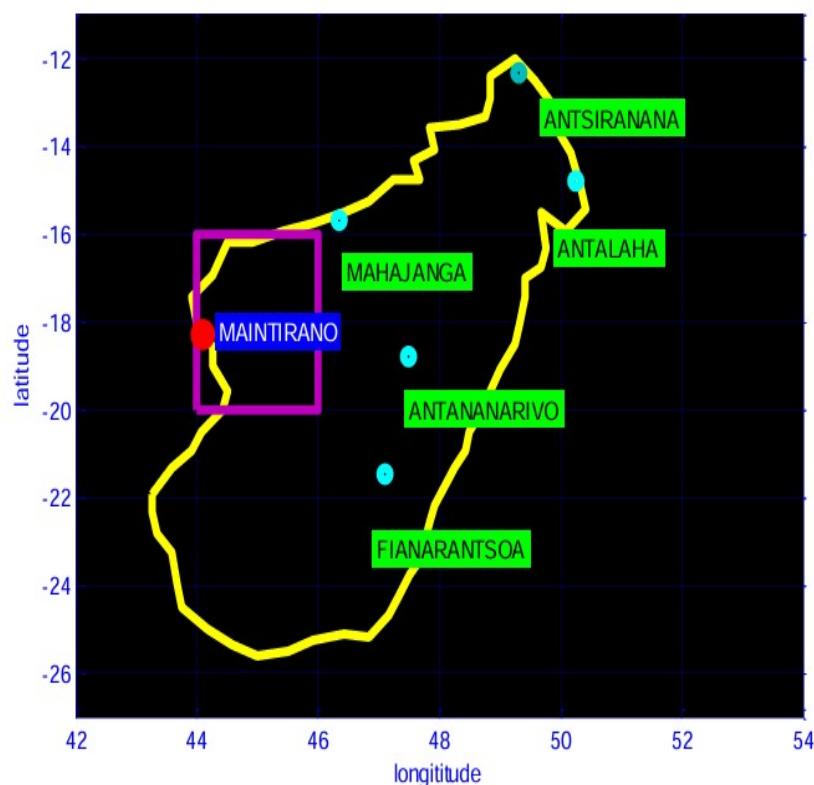


Figure 1. Ville de Maintirano de Madagascar

## METHODOLOGIE

Pour déterminer les relations entre les quatre variables climatiques, le Logiciels Eviews (15,16) a été utilisé pour l'étude. Cette méthode s'est opérée principalement sur trois étapes. La première étape consiste à réaliser les tests de stationnarité pour analyser dans quelle mesure les données utilisées ne sont pas influencées par le temps. La deuxième étape a été le test de causalité de Granger en choisissant le Lag convenable correspondant à la valeur d'AIC minimale et les équations, puis nous terminons en troisième étape sur le choc impulsionnel (17).

**Stationnarité de la Série temporelle :** Une série temporelle est stationnaire si elle admet une moyenne, une variance et une covariance finies indépendantes du temps. De plus, cette série ( $X_t$ ) est stationnaire si l'inverse des racines du polynôme caractéristique est à l'intérieur du disque unité. (18)

**Test de causalité :** Les tests statistiques sur la probabilité des données a permis de prendre une décision si une Variable « X » cause une variable « Y ». Dans ce cas si la probabilité est inférieure à 5 % alors la variable X cause la variable Y, sinon X ne cause pas Y au sens de Granger, Donc nous allons faire une à une un test de causalité pour chaque variable.

### Choix du Lag

Le logiciel Eviews nous donne des valeurs de « Lags » mais il faut choisir les valeurs minimales convenables aux cinq paramètres suivants (19-21):

- AIC (Akaike Information Criterion),
- (SC) (Schwartz Bayesian Information Criterion)
- HQ) (Hannan-Quinn Criterion),
- (LR) (Log likelihood Ratio)
- (FPE) (Prédiction finale de l'erreur)

### Équation des variables

D'une manière générale, une variable endogène peut s'exprimer en fonction des variables exogènes et est donnée par les quatre Équations suivantes (22,23). Une variable endogène peut s'exprimer en fonction des variables exogènes avec des valeurs des coefficients dont les systèmes d'équations entre les quatre variables X, Y, Z, U sont telles que :

$$X_t = \sum_{i=1}^m a_i x_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j y_{t-j} + \sum_{k=1}^m c_k z_{t-k} + \sum_{l=1}^m d_l u_{t-l} + \varepsilon_{tx}$$

$$Y_t = \sum_{i=1}^m a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j x_{t-j} + \sum_{k=1}^m c_k z_{t-k} + \sum_{l=1}^m d_l u_{t-l} + \varepsilon_{ty}$$

$$Z_t = \sum_{i=1}^m a_i z_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j x_{t-j} + \sum_{k=1}^m c_k y_{t-k} + \sum_{l=1}^m d_l u_{t-l} + \varepsilon_{tz}$$

$$U_t = \sum_{i=1}^m a_i u_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j x_{t-j} + \sum_{k=1}^m c_k y_{t-k} + \sum_{l=1}^m d_l z_{t-l} + \varepsilon_{tu}$$

avec  $a_i, b_j, c_k, d_l$  sont des coefficients et  $\varepsilon_{tx}, \varepsilon_{ty}, \varepsilon_{tz}, \varepsilon_{tu}$  sont des résidus.

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Stationnarités des variables :** La condition de stationnarité constitue une exigence préalable essentielle à analyser des données, car une variable stationnaire indique une stabilité qui permet d'éviter les problèmes de régression trompeuse. La transformation utilisée peut prendre une fonction logarithme, d'une dérivée d'une fonction logarithme, ou d'autres types de transformations en fonction des variables considérées. Les quatre variables ont été transformées à l'aide du Logiciel Eviews et à l'issue de ces transformations, chaque variable a été rendue stationnaires et suit le modèle ARIMA.

Les quatre transformations des variables sont telles que :

1. L'EVAPORATION annuelle (EVA) en EVA1=DLOG(EVA).
2. L'HUMIDITE annuelle (HUA) en HUA1=LOG(HUA).
3. La PRECIPITATION annuelle (PRA) en PRA1=DLOG(PRA)
4. La TEMPERATURE (TPA) en TPA1=D(TPA).

### Modèle ARMA des quatre variables

**Variable évaporation annuelle :** La variable évaporation annuelle suit le modèle ARMA (0,1) (0,0) appartient à la famille des modèles autorégressifs et à moyenne mobile (24), utilisée pour la modélisation et la prévision des série temporelles stationnaires. Dans cette notation les deux premiers indices (p,q.) désignent respectivement les ordre des composantes autorégressive (AR) et moyenne mobile (MA), tandis que les deux derniers (P,Q) correspondent aux ordre des composantes saisonnières autorégressive et moyenne mobile

**Ainsi : un modèle ARMA (0,1) (0,0) se caractérise par :**

- Une absence de composante autorégressive (p=0).
- Une composante de moyenne mobile d'ordre 1(q=1)
- Et aucune structure saisonnière (P=0 et Q=0).

D'après le *Tableau 1* ci-dessous. Le terme (0,1) est la combinaison d'Autorégressifs (AR) et un terme de moyenne mobile (MA), et ensuite le terme (0,0) indique qu'un modèle sans composante saisonnière et sans terme de différentiation. Du point de vue physique, la vapeur d'eau accumulée au cours de la journée peut exercer une influence limitée sur la valeur mesurée le jour suivant, traduisant une persistance météorologique d'une seule période. Cependant, lorsque l'on considère des échelles temporelles plus longue, notamment sur une année, cet effet devient nul, ce qui signifie que les fluctuations observées ne présentent aucune corrélation significative à long terme. Sur le plan statistique, le modèle ARMA (0,1) (0,0) satisfait les conditions de stationnarité, dans la mesure où la moyenne et la variance du processus demeurent constantes dans le temps.

**Tableau 1. Modèle ARMA (0,1) (0,0) de la variable Evaporation annuelle**

Dependent Variable: EVA1				
Method: ARMA Maximum Likelihood (BFGS)				
Date: 10/28/25 Time: 12:52				
Sample: 1980 2015				
Included observations: 36				
Convergence achieved after 7 iterations				
Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.001015	0.000699	-1.452067	0.1559
MA(1)	-0.533193	0.188591	-2.827241	0.0079
SIGMASQ	5.69E-05	1.64E-05	3.475824	0.0014
R-squared	0.239857	Mean dependent var		-0.001158
Adjusted R-squared	0.193788	S.D. dependent var		0.008775
S.E. of regression	0.007879	Akaike info criterion		-6.760199
Sum squared resid	0.002049	Schwarz criterion		-6.628239
Log likelihood	124.6836	Hannan-Quinn criter.		-6.714141
F-statistic	5.206452	Durbin-Watson stat		1.954749
Prob(F-statistic)	0.010834			
Inverted MA Roots	.53			

**Variable Humidité spécifique annuelle (25,26) :** L'analyse de la série temporelle de l'humidité spécifique annuelle a conduit à l'ajustement d'un modèle ARMA (0,0) (2,1) pour cette variable *Tableau 2*. Ce modèle dépourvu de composante autorégressives (AR) et de moyenne mobile ordinaire (MA), mais incluant une structure saisonnière d'ordre (2,1), traduit principalement une influence périodique (ou cyclique) dans le comportement de cette variable. Ce modèle fait référence aux valeurs des composantes autorégressives AR, ainsi qu'aux moyennes mobiles MA basée sur l'analyse des données pendant une période de 37 ans. Ainsi, le modèle ARMA (0,0) (2,1) met en évidence un processus climatique à faible persistance et dominé par des composantes aléatoires de courte terme, traduisant la nature instable et transitoire des phénomènes atmosphériques dans la région étudiée. Il constitue une représentation appropriée pour décrire les fluctuations irrégulières de variables évaporation.

**Tableau 2. Modèle ARMA (0,0) (2,1) de la variable Humidité spécifique annuelle**

Dependent Variable: LOG(HUA)				
Method: ARMA Maximum Likelihood (BFGS)				
Date: 10/20/25 Time: 12:14				
Sample: 1979 2015				
Included observations: 37				
Convergence achieved after 36 iterations				
Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	1.492581	0.013435	111.0994	0.0000
AR(1)	-0.621377	0.193996	-3.203036	0.0031
AR(2)	0.377070	0.185869	2.028683	0.0509
MA(1)	0.974224	0.298752	3.260984	0.0026
SIGMASQ	0.002164	0.000644	3.360609	0.0020
R-squared	0.226180	Mean dependent var		1.492662
Adjusted R-squared	0.129452	S.D. dependent var		0.053606
S.E. of regression	0.050016	Akaike info criterion		-2.977947
Sum squared resid	0.080052	Schwarz criterion		-2.760256
Log likelihood	60.09203	Hannan-Quinn criter.		-2.901201
F-statistic	2.338318	Durbin-Watson stat		1.975265
Prob(F-statistic)	0.076345			

**Variable précipitation annuelle (27-29) :** L'analyse du modèle ARMA (0,1) (0,0) de la variable précipitation met en évidence le caractère non causal de précipitation (PRA1). Elle ne détermine pas directement leur évolution future. Il ne contient aucune partie autorégressive (AR), donc la valeur actuelle d'une série ne dépend pas de ses valeurs passées mais il contient une partie de moyenne mobile MA (1) d'ordre 1 *Tableau 3*. Cependant, sur une échelle annuelle, la mémoire temporelle de la précipitation devient nulle. En revanche, des variables telle que la température et l'humidité spécifique peuvent exercer un effet sur la formation et l'intensité des précipitations, ce qui constitue la seule exception à cette non-causalité. Ce modèle ARMA (0,1) (0,0) constitue une spécification particulière de la classe des modèles ARMA de Box-Jenkins. Il se caractérise par l'absence de composante autorégressive et par la présence d'une unique composante de moyenne mobile d'ordre 1 sans structure saisonnière.

**Tableau 3. Modèle ARMA (0,1) (0,0) de la variable Précipitation annuelle**

Dependent Variable: DLOG(PRA)				
Method: ARMA Maximum Likelihood (BFGS)				
Date: 10/20/25 Time: 12:17				
, donc la valeur actuelles Sample: 1980 2015				
Included observations: 36				
Convergence achieved after 92 iterations				
Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.011411	0.003662	-3.116327	0.0038
MA(1)	-0.999999	2432.084	-0.000411	0.9997
SIGMASQ	0.048157	3.012374	0.015987	0.9873
R-squared	0.518707	Mean dependent var		-0.004845
Adjusted R-squared	0.489537	S.D. dependent var		0.320807
S.E. of regression	0.229206	Akaike info criterion		0.071564
Sum squared resid	1.733664	Schwarz criterion		0.203524
Log likelihood	1.711840	Hannan-Quinn criter.		0.117622
F-statistic	17.78262	Durbin-Watson stat		2.064660
Prob(F-statistic)	0.000006			

**Variable température annuelle :** Les résultats statistiques de la variable température annuelle est donnée par le *Tableau 4* ci-dessous et notée TPA1. Afin d'assurer la stationnarité de cette variable, il est nécessaire de procéder à une transformation pour que les propriétés statiques des variables telles que la variance et la moyenne ne changent pas au cours du temps, qui s'exprime par l'équation suivante :  $TPA1 = D(TPA)$  Par suite, cette variable est modélisée selon un modèle ARMA (0,1) (0,0). *Tableau 4* : Ce modèle équivalent à un processus MA (1), représente un système linéaire stationnaire indique que la dépendance temporelle est strictement limitée à court terme. L'absence de composante autorégressives et saisonnière indique que la dépendance temporelle est strictement limitée. Cependant ce traduit modèle admettant des relations non causales avec des variable exogènes (évaporation, précipitation,) sauf sur la variable humidité spécifique.

Tableau 4. Modèle ARMA (0,1) (0,0) de la variable Température annuelle

Dependent Variable: D(TPA)				
Method: ARMA Maximum Likelihood (BFGS)				
Date: 10/20/25 Time: 12:25				
Sample: 1980 2015				
Included observations: 36				
Failure to improve objective (non-zero gradients) after 97 iterations				
Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.020444	0.004547	4.496332	0.0001
MA(1)	-0.999999	2786.042	-0.000359	0.9997
SIGMASQ	0.031100	2.169588	0.014334	0.9886
R-squared	0.468510	Mean dependent var		0.017852
Adjusted R-squared	0.436299	S.D. dependent var		0.245328
S.E. of regression	0.184193	Akaike info criterion		-0.365711
Sum squared resid	1.119589	Schwarz criterion		-0.233751
Log likelihood	9.582803	Hannan-Quinn criter.		-0.319654
F-statistic	14.54481	Durbin-Watson stat		1.867600
Prob(F-statistic)	0.000030			
Inverted MA Roots	1.00			

**Choix de Lag :** On a constaté qu'il est très important de choisir un nombre de retard optimal à intégrer dans ce modèle. Pour ce faire, nous allons utiliser les critères (Likelihood), FPE (Final Prédiction Error), AIC (Aviaire Information Criteria), SIC (Schwarz Information Criteria), HQ (Hannan-Quinn Information Criteria). Le logiciel Eviews donne les résultats répondant aux valeurs convenables (30-31).

Tableau 5. Tableau de choix de Lag et les six paramètres de critères de sélections

Exogenous variables: C						
Date: 09/20/25 Time: 14:14						
Sample: 1979 2015						
Included observations: 31						
Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	45.08655	NA	8.30e-07	-2.650745	-2.465715	-2.590430
1	62.49948	29.20879	7.66e-07	-2.741902	-1.816749	-2.440325
2	78.44350	22.63021	8.14e-07	-2.738290	-1.073015	-2.195452
3	96.19935	20.61970	8.46e-07	-2.851571	-0.446173	-2.067472
4	122.8731	24.09244	5.86e-07	-3.540202	-0.394681	-2.514840
5	147.2041	15.69740	6.45e-07	-4.077684	-0.192041	-2.811061
6	237.2088	34.84053*	2.01e-08*	-8.852180*	-4.226415*	-7.344296*
* indicates lag order selected by the criterion						
LR: sequential modified LR test statistic (each test at 5% level)						
FPE: Final prediction error						
AIC: Akaike information criterion						
SC: Schwarz information criterion						
HQ: Hannan-Quinn information criterion						

**Critère de sélection de Lag :** Le Tableau 5 donne les 6 valeurs sur lesquelles on peut choisir une valeur de Lag convenable aux 4 variables. On a choisi le « Lag 6 » car sa valeur AIC est minimale.

#### Tests de causalités

##### Relation de causalité annuelle

Le test de causalité est formulé sous les deux hypothèses suivantes :

Soient deux variables Y1 et Y2 admettant deux hypothèses  $H_0$  et  $H_1$ .

$H_0$ : Y2 cause Y1 au sens de Granger

$H_1$ : Y2 ne cause pas Y1 au sens de Granger

##### Règle de décision:

- Si Probabilité < 0.05 on accepte  $H_0$
- Si Probabilité > 0.05 on accepte  $H_1$

L'analyse du *Tableau 6* a permis de mettre en évidence les résultats des tests de causalité réalisés entre les quatre variables climatiques. Ces résultats montrent que certaines variables exercent une influence directe sur d'autres. Par exemple, la Température (TPA1) apparaît comme un facteur causal majeur influençant l'humidité spécifique (HUA1), les rétroactions observées indiquent que l'humidité spécifique peut également influencer la température à travers les processus de condensation et de libération de chaleur latente (32,33). Les tests de causalité au sens de Granger indiquent que l'Humidité spécifique (HUA1) ne sont pas causalement liée aux autres variables climatiques considérées, car les probabilités sont toutes supérieures à 5 %, mais les variables précipitation admettant des impacts sur la variable température (TPA1) car la Probabilité = 0,0269 < 5% (on accepte H0) alors « (PRA1) cause (TPA1) ». Cette interaction particulière s'explique par la relation thermodynamique entre l'humidité (HUA1) de l'air, la température (TPA1) et la pression qui gouverne la capacité de l'atmosphère à contenir de la vapeur d'eau.

En effet, plus la température de l'air augmente plus la pression de vapeur saturante croît, permettant à une plus grande quantité de vapeur d'eau de se maintenir à l'état gazeux, ce qui élève l'humidité spécifique. A l'inverse, lorsque la température diminue, la pression de vapeur saturante aussi diminue au rythme de la température, entraînant la condensation d'une partie de la vapeur d'eau, par conséquent, une diminution de l'humidité spécifique (HUA1). Donc, la causalité de la variable humidité (HUA1) n'est pas unidirectionnelle mais c'est une relation biunivoque. Non seulement entre la température et la pression mais aussi des variations de la structure complexe thermique et dynamique de l'atmosphère.

### De plus.

L'humidité spécifique journalière (HUA1) ne cause pas l'évaporation (EVA1) car la Probabilité = 0,0817 > 0,05 (2ème ligne du *Tableau 6*), donc on accepte  $H_1$ , donc l'humidité annuelle (HUA1) n'a pas d'influence sur l'évaporation (EVA1), et inversement (entre EVA1 et HUA1) car la Probabilité = 0,9963 > 0,05. De même, la Précipitation (PRA1) n'a pas d'influence sur l'humidité (HUA1) car la Probabilité = 0,2512 > 0,05, et inversement. (5ème ligne du *Tableau 6*).

**Tableau 6**

Pairwise Granger Causality Tests			
Date: 10/20/25 Time: 07:25			
Sample: 1979 2025			
Lags: 6			
Null Hypothesis:	Obs	F-Statistic	Prob.
HUA1 does not Granger Cause EVA1	40	2.13620	0.0817
EVA1 does not Granger Cause HUA1		0.22176	0.9663
PRA1 does not Granger Cause EVA1	40	1.16124	0.3556
EVA1 does not Granger Cause PRA1		1.77643	0.1418
TPA1 does not Granger Cause EVA1	40	1.10337	0.3861
EVA1 does not Granger Cause TPA1		0.62941	0.7054
PRA1 does not Granger Cause HUA1	40	1.39885	0.2512
HUA1 does not Granger Cause PRA1		0.16695	0.9835
TPA1 does not Granger Cause HUA1	40	5.38531	0.0009
HUA1 does not Granger Cause TPA1		2.42588	0.0526
TPA1 does not Granger Cause PRA1	40	2.15570	0.0793
PRA1 does not Granger Cause TPA1		2.87383	0.0269

L'analyse du *Tableau 7* ci-dessous permet de déterminer les caractéristiques des quatre variables. Nous avons trois chiffres sur les lignes de paramètre EVA1, HUA1, PRA1, TPA1 et les chiffres après la virgule dans le *Tableau 7* s'arrête au six chiffres près, mais dans les équations, les valeurs des coefficients après la virgule peuvent prendre jusqu'à 12 chiffres.

Prenons le cas de l'évaporation admettant les trois chiffres de la première colonne suivante.

- Le chiffre 0.144232 de la première ligne représente l'estimation marquée
- Le chiffre 0.29018 de la seconde ligne représente l'écart type
- Le chiffre 0.49704 de la troisième ligne la statistique de Student

Dans ce cas, les tests de Student,  $0.49704 < 1.96$  alors EV (-1) ne sont pas significatifs, ce qui veut dire que l'évaporation n'a pas d'influence sur l'évaporation future EV (-1). Dans le cas des trois variables HUA1, PRA1, TPA1 de la 2ème 3ème 4ème colonne, nous avons les valeurs  $2.14843 > 1.96$ ;  $-2.99264 < 1.96$  et  $1.32734 < 1.96$ , ce qui explique que l'humidité a une influence sur EV (-1), tandis que la précipitation et la température ne le sont pas. Dans le cas de (EV (-2)), sont significatifs car  $2.71827 > 1.96$  alors l'humidité (HA1) cause (EV (-2)). Les coefficients qui se trouvent dans ce *Tableau 7* sont figurés sur les équations des variables ci-dessous par exemple dans le *Tableau 7*, les coordonnées de (EVA1 (-1), EVA1) donne 0.144232 ; ((EVA1 (-1), (HA1)) donne 5.040107 et ((HA1 (-1), (HA1)) donne 0.897954.

Tableau 7

Vector Autoregression Estimates

Date: 10/20/25 Time: 07:16

Sample (adjusted): 1986 2025

Included observations: 40 after adjustments

Standard errors in ( ) &amp; t-statistics in ( )

	EVA1	HUA1	PRA1	TPA1
EVA1(-1)	<b>0.144232</b> (0.29018) <b>( 0.49704)</b>	<b>5.040107</b> (2.34595) <b>( 2.14843)</b>	<b>-35.58750</b> (11.8917) <b>(-2.99264)</b>	<b>3.987295</b> (3.00397) <b>( 1.32734)</b>
EVA1(-2)	0.802922 (0.28965) ( 2.77208)	6.365139 (2.34162) ( 2.71827)	29.95690 (11.8697) ( 2.52381)	-6.213936 (2.99842) (-2.07240)
EVA1(-3)	0.093949 (0.29481) ( 0.31867)	-6.435934 (2.38339) (-2.70033)	32.39036 (12.0815) ( 2.68100)	-5.403975 (3.05191) (-1.77068)
EVA1(-4)	-0.339910 (0.27231) (-1.24823)	-5.668953 (2.20150) (-2.57504)	15.53431 (11.1595) ( 1.39203)	4.602941 (2.81901) ( 1.63282)
EVA1(-5)	0.041048 (0.24349) ( 0.16859)	1.270877 (1.96843) ( 0.64563)	-27.37220 (9.97803) (-2.74325)	4.332887 (2.52057) ( 1.71901)
EVA1(-6)	0.075609 (0.22297) ( 0.33909)	0.556058 (1.80261) ( 0.30847)	-14.11816 (9.13748) (-1.54508)	-2.217291 (2.30823) (-0.96060)
HUA1(-1)	0.007372 (0.02413) ( 0.30555)	<b>0.897954</b> (0.19507) ( 4.60335)	-0.070292 (0.98879) (-0.07109)	0.495856 (0.24978) ( 1.98517)
HUA1(-2)	-0.053141 (0.02603) (-2.04174)	-0.770022 (0.21042) (-3.65951)	-0.788647 (1.06661) (-0.73940)	-0.567511 (0.26944) (-2.10628)
HUA1(-3)	0.005397 (0.02751) ( 0.19616)	0.447294 (0.22242) ( 2.01108)	-1.559473 (1.12743) (-1.38321)	0.766428 (0.28480) ( 2.69110)
HUA1(-4)	0.036319 (0.01821) ( 1.99498)	0.753652 (0.14718) ( 5.12071)	1.394545 (0.74604) ( 1.86925)	-0.027521 (0.18846) (-0.14603)
HUA1(-5)	-0.033022 (0.02553) (-1.29357)	-1.160702 (0.20638) (-5.62419)	1.602740 (1.04613) ( 1.53207)	-0.796808 (0.26426) (-3.01520)
HUA1(-6)	-0.003722 (0.02333) (-0.15953)	0.442638 (0.18860) ( 2.34696)	-1.337273 (0.95602) (-1.39879)	0.791994 (0.24150) ( 3.27946)
PRA1(-1)	0.004403 (0.00473) ( 0.93072)	-0.030378 (0.03825) (-0.79426)	-0.256731 (0.19388) (-1.32419)	-0.077826 (0.04898) (-1.58908)
PRA1(-2)	0.005720 (0.00454) ( 1.26111)	0.098674 (0.03667) ( 2.69114)	0.001692 (0.18586) ( 0.00910)	-0.048322 (0.04695) (-1.02920)
PRA1(-3)	0.004243 (0.00447) ( 0.94872)	-0.069333 (0.03615) (-1.91782)	0.408231 (0.18326) ( 2.22766)	-0.069261 (0.04629) (-1.49616)
PRA1(-4)	0.003859 (0.00446) ( 0.86510)	0.013100 (0.03607) ( 0.36322)	0.145331 (0.18282) ( 0.79495)	0.003521 (0.04618) ( 0.07624)
PRA1(-5)	0.000664 (0.00387) ( 0.17162)	-0.039027 (0.03127) (-1.24824)	-0.227618 (0.15849) (-1.43619)	0.012053 (0.04004) ( 0.30105)
PRA1(-6)	0.001573 (0.00337) ( 0.46691)	0.010253 (0.02723) ( 0.37653)	-0.226057 (0.13803) (-1.63769)	0.090769 (0.03487) ( 2.60314)
TPA1(-1)	0.005354	-0.372045	-1.330772	0.308887

Continue...

	(0.02098)	(0.16964)	(0.85990)	(0.21722)
	( 0.25514)	(-2.19315)	(-1.54758)	( 1.42199)
TPA1(-2)	0.046230	1.180384	2.535386	0.328727
	(0.02528)	(0.20439)	(1.03606)	(0.26172)
	( 1.82858)	( 5.77515)	( 2.44715)	( 1.25603)
TPA1(-3)	-0.027147	-1.669366	0.111080	-0.698229
	(0.03219)	(0.26021)	(1.31899)	(0.33319)
	(-0.84345)	(-6.41554)	( 0.08422)	(-2.09557)
TPA1(-4)	-0.012415	0.596622	-2.754063	0.938054
	(0.02910)	(0.23522)	(1.19235)	(0.30120)
	(-0.42668)	( 2.53641)	(-2.30978)	( 3.11438)
TPA1(-5)	-0.013903	-0.140533	-2.278142	-0.034460
	(0.01900)	(0.15364)	(0.77880)	(0.19673)
	(-0.73155)	(-0.91469)	(-2.92518)	(-0.17516)
TPA1(-6)	0.017657	0.601799	1.364515	-0.144693
	(0.02061)	(0.16660)	(0.84451)	(0.21333)
	( 0.85679)	( 3.61218)	( 1.61574)	(-0.67825)
C	0.096996	-5.389619	63.85707	6.786412
	(0.86129)	(6.96305)	(35.2959)	(8.91614)
	( 0.11262)	(-0.77403)	( 1.80919)	( 0.76114)
R-squared	0.927724	0.895579	0.863251	0.909216
Adj. R-squared	0.812082	0.728505	0.644453	0.763962
Sum sq. resids	0.002551	0.166729	4.284096	0.273379
S.E. equation	0.013041	0.105429	0.534422	0.135001
F-statistic	8.022380	5.360377	3.945427	6.259487
Log likelihood	136.4452	52.84778	-12.07814	42.95797
Akaike AIC	-5.572262	-1.392389	1.853907	-0.897899
Schwarz SC	-4.516712	-0.336839	2.909457	0.157651
Mean dependent	2.116477	4.414320	3.675180	24.67755
S.D. dependent	0.030083	0.202339	0.896263	0.277873
Determinant resid covariance (dof adj.)		4.58E-09		
Determinant resid covariance		9.06E-11		
Log likelihood		235.4675		
Akaike information criterion		-6.773376		
Schwarz criterion		-2.551177		
Number of coefficients		100		

**Equations de la variable Evaporation en fonction des variables exogènes dont les coefficients varient de C (1) au C (25).**

$$\text{EVA1} = \text{C}(1)*\text{EVA1}(-1) + \text{C}(2)*\text{EVA1}(-2) + \text{C}(3)*\text{EVA1}(-3) + \text{C}(4)*\text{EVA1}(-4) + \text{C}(5)*\text{EVA1}(-5) + \text{C}(6)*\text{EVA1}(-6) + \text{C}(7)*\text{HUA1}(-1) + \text{C}(8)*\text{HUA1}(-2) + \text{C}(9)*\text{HUA1}(-3) + \text{C}(10)*\text{HUA1}(-4) + \text{C}(11)*\text{HUA1}(-5) + \text{C}(12)*\text{HUA1}(-6) + \text{C}(13)*\text{PRA1}(-1) + \text{C}(14)*\text{PRA1}(-2) + \text{C}(15)*\text{PRA1}(-3) + \text{C}(16)*\text{PRA1}(-4) + \text{C}(17)*\text{PRA1}(-5) + \text{C}(18)*\text{PRA1}(-6) + \text{C}(19)*\text{TPA1}(-1) + \text{C}(20)*\text{TPA1}(-2) + \text{C}(21)*\text{TPA1}(-3) + \text{C}(22)*\text{TPA1}(-4) + \text{C}(23)*\text{TPA1}(-5) + \text{C}(24)*\text{TPA1}(-6) + \text{C}(25)$$

**Equations de la variable Humidité spécifique en fonction des variables exogènes dont les coefficients varient de C (1) au C (25).**

$$\text{HUA1} = \text{C}(26)*\text{EVA1}(-1) + \text{C}(27)*\text{EVA1}(-2) + \text{C}(28)*\text{EVA1}(-3) + \text{C}(29)*\text{EVA1}(-4) + \text{C}(30)*\text{EVA1}(-5) + \text{C}(31)*\text{EVA1}(-6) + \text{C}(32)*\text{HUA1}(-1) + \text{C}(33)*\text{HUA1}(-2) + \text{C}(34)*\text{HUA1}(-3) + \text{C}(35)*\text{HUA1}(-4) + \text{C}(36)*\text{HUA1}(-5) + \text{C}(37)*\text{HUA1}(-6) + \text{C}(38)*\text{PRA1}(-1) + \text{C}(39)*\text{PRA1}(-2) + \text{C}(40)*\text{PRA1}(-3) + \text{C}(41)*\text{PRA1}(-4) + \text{C}(42)*\text{PRA1}(-5) + \text{C}(43)*\text{PRA1}(-6) + \text{C}(44)*\text{TPA1}(-1) + \text{C}(45)*\text{TPA1}(-2) + \text{C}(46)*\text{TPA1}(-3) + \text{C}(47)*\text{TPA1}(-4) + \text{C}(48)*\text{TPA1}(-5) + \text{C}(49)*\text{TPA1}(-6) + \text{C}(50)$$

**Equations de la variable Précipitation en fonction des variables exogènes dont les coefficients varient de C(1) au C(25).**

$$\text{PRA1} = \text{C}(51)*\text{EVA1}(-1) + \text{C}(52)*\text{EVA1}(-2) + \text{C}(53)*\text{EVA1}(-3) + \text{C}(54)*\text{EVA1}(-4) + \text{C}(55)*\text{EVA1}(-5) + \text{C}(56)*\text{EVA1}(-6) + \text{C}(57)*\text{HUA1}(-1) + \text{C}(58)*\text{HUA1}(-2) + \text{C}(59)*\text{HUA1}(-3) + \text{C}(60)*\text{HUA1}(-4) + \text{C}(61)*\text{HUA1}(-5) + \text{C}(62)*\text{HUA1}(-6) + \text{C}(63)*\text{PRA1}(-1) + \text{C}(64)*\text{PRA1}(-2) + \text{C}(65)*\text{PRA1}(-3) + \text{C}(66)*\text{PRA1}(-4) + \text{C}(67)*\text{PRA1}(-5) + \text{C}(68)*\text{PRA1}(-6) + \text{C}(69)*\text{TPA1}(-1) + \text{C}(70)*\text{TPA1}(-2) + \text{C}(71)*\text{TPA1}(-3) + \text{C}(72)*\text{TPA1}(-4) + \text{C}(73)*\text{TPA1}(-5) + \text{C}(74)*\text{TPA1}(-6) + \text{C}(75)$$

**Equations de la variable Température en fonction des variables exogènes dont les coefficients varient de C(1) au C(25).**

$$\text{TPA1} = \text{C}(76)*\text{EVA1}(-1) + \text{C}(77)*\text{EVA1}(-2) + \text{C}(78)*\text{EVA1}(-3) + \text{C}(79)*\text{EVA1}(-4) + \text{C}(80)*\text{EVA1}(-5) + \text{C}(81)*\text{EVA1}(-6) +$$

$$C(82) *HUA1(-1) + C(83) *HUA1(-2) + C(84) *HUA1(-3) + C(85) *HUA1(-4) + C(86) *HUA1(-5) + C(87) *HUA1(-6) + C(88) *PRA1(-1) + C(89) *PRA1(-2) + C(90) *PRA1(-3) + C(91) *PRA1(-4) + C(92) *PRA1(-5) + C(93) *PRA1(-6) + C(94) *TPA1(-1) + C(95) *TPA1(-2) + C(96) *TPA1(-3) + C(97) *TPA1(-4) + C(98) *TPA1(-5) + C(99) *TPA1(-6) + C(100)$$

**Coefficients de l'équation d'une variable Evaporation variant de C(1) au C(25).**

$$EVA1 = 0.144231644065 *EVA1(-1) + 0.802922430006 *EVA1(-2) + 0.0939486619392 *EVA1(-3) - 0.339910338475 *EVA1(-4) + 0.0410483226496 *EVA1(-5) + 0.075609081584 *EVA1(-6) + 0.00737239916077 *HUA1(-1) - 0.0531413935324 *HUA1(-2) + 0.00539672059798 *HUA1(-3) + 0.0363187077075 *HUA1(-4) - 0.0330219363946 *HUA1(-5) - 0.00372170224296 *HUA1(-6) + 0.00440326427914 *PRA1(-1) + 0.00571966274178 *PRA1(-2) + 0.00424251514653 *PRA1(-3) + 0.00385933945548 *PRA1(-4) + 0.000663716239785 *PRA1(-5) + 0.00157270524034 *PRA1(-6) + 0.00535366571645 *TPA1(-1) + 0.0462303164728 *TPA1(-2) - 0.027147380337 *TPA1(-3) - 0.0124145304414 *TPA1(-4) - 0.0139027057351 *TPA1(-5) + 0.0176567037358 *TPA1(-6) + 0.096995675814$$

**Coefficients de l'équation d'une variable Humidité Spécifique variant de C(1) au C(25).**

$$HUA1 = 5.04010685932 *EVA1(-1) + 6.36513939426 *EVA1(-2) - 6.43593375563 *EVA1(-3) - 5.66895345447 *EVA1(-4) + 1.27087739464 *EVA1(-5) + 0.556057821705 *EVA1(-6) + 0.897954141716 *HUA1(-1) - 0.770021524918 *HUA1(-2) + 0.447294111728 *HUA1(-3) + 0.7536519739 *HUA1(-4) - 1.16070218351 *HUA1(-5) + 0.442638339566 *HUA1(-6) - 0.0303783899484 *PRA1(-1) + 0.0986738216419 *PRA1(-2) - 0.0693329941254 *PRA1(-3) + 0.0130999159719 *PRA1(-4) - 0.0390272381238 *PRA1(-5) + 0.010253184121 *PRA1(-6) - 0.372044892147 *TPA1(-1) + 1.1803836505 *TPA1(-2) - 1.66936555837 *TPA1(-3) + 0.596622331931 *TPA1(-4) - 0.140532808203 *TPA1(-5) + 0.601799020008 *TPA1(-6) - 5.38961896803$$

**Coefficients de l'équation d'une variable Précipitation variant de C(1) au C(25).**

$$PRA1 = -35.58749955 *EVA1(-1) + 29.9569031747 *EVA1(-2) + 32.3903553577 *EVA1(-3) + 15.5343146608 *EVA1(-4) - 27.372195326 *EVA1(-5) - 14.1181618663 *EVA1(-6) - 0.0702921864032 *HUA1(-1) - 0.788646771823 *HUA1(-2) - 1.55947315438 *HUA1(-3) + 1.39454490606 *HUA1(-4) + 1.60273969869 *HUA1(-5) - 1.33727335207 *HUA1(-6) - 0.25673127885 *PRA1(-1) + 0.00169189868024 *PRA1(-2) + 0.408230971481 *PRA1(-3) + 0.145331172747 *PRA1(-4) - 0.227618066699 *PRA1(-5) - 0.226057224508 *PRA1(-6) - 1.33077159627 *TPA1(-1) + 2.53538583921 *TPA1(-2) + 0.111079665164 *TPA1(-3) - 2.7540627771 *TPA1(-4) - 2.27814205 *TPA1(-5) + 1.36451532298 *TPA1(-6) + 63.8570692134$$

**Coefficients de l'équation d'une variable Température variant de C(1) au C(25).**

$$TPA1 = 3.9872954444 *EVA1(-1) - 6.21393589517 *EVA1(-2) - 5.40397514336 *EVA1(-3) + 4.60294135446 *EVA1(-4) + 4.33288677251 *EVA1(-5) - 2.21729092019 *EVA1(-6) + 0.495855621433 *HUA1(-1) - 0.567510878163 *HUA1(-2) + 0.766427581344 *HUA1(-3) - 0.0275212696435 *HUA1(-4) - 0.796807561106 *HUA1(-5) + 0.791993691097 *HUA1(-6) - 0.0778264463098 *PRA1(-1) - 0.0483218120959 *PRA1(-2) - 0.0692607757081 *PRA1(-3) + 0.00352089933539 *PRA1(-4) + 0.0120528405786 *PRA1(-5) + 0.0907690613589 *PRA1(-6) + 0.308887105279 *TPA1(-1) + 0.328727048019 *TPA1(-2) - 0.698228924021 *TPA1(-3) + 0.938054384323 *TPA1(-4) - 0.0344600781101 *TPA1(-5) - 0.14469309622 *TPA1(-6) + 6.78641163045$$

## CONCLUSION

L'analyse statistique des relations causales annuelles entre Température, Précipitation, Evaporation et Humidité spécifique sur la côte ouest de Madagascar révèle des dynamiques distinctes de celles observées à l'échelles journalières et mensuelle. La méthode de Granger permet d'analyser la relation causale entre ces quatre variables climatiques. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'intégrer l'effet mémoire des variables clés dans les modèles climatiques annuelles. La plupart des variables climatiques à court terme perdent leur effet mémoire sur des périodes annuelles, apparaissant ainsi comme non causales à long terme. Cette distinction souligne l'importance cruciale de l'échelle temporelle dans l'analyse de la causalité climatique. La plupart des variables à court terme perdent leur effet mémoire lorsqu'on considère des périodes longues, apparaissent alors comme non causale. Cette observation souligne l'importance de l'échelle temporelle dans la compréhension des interactions climatiques. Cependant, l'humidité spécifique et la température se distinguent par effet mémoire persistant, capable d'accumuler des influences sur plusieurs années. Cette accumulation progressive d'énergie thermique et d'humidité latente amplifie les déséquilibres atmosphériques régionaux. Lorsque l'humidité s'accumule au-delà d'un certain seuil, elle favorise la condensation et l'intensification des précipitations entraînant des inondations. Ces mécanismes traduisent un cycle complexe où la mémoire thermique et hydrique contrôle la fréquence et l'intensité des extrêmes climatiques.

## REFERENCES

- EVA MONTEIRO, « Microphysique des nuages » Partie 2, (2007). AUBE D, « Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse », (2016)
- BOUREMA SOULEYMANE TRAORE, SOULEYMANE SANOGO, MARCEL BAWINDSOM KEBRE, KEVIN LANDRY OUEDRAOGO, HAMIDOU KONARE, FRANÇOIS OUEDRAOGO, ABDRAMANE BA, ET FRANÇOIS ZOUGMORE. « Etude de corrélation entre l'humidité, LA température mesure in-situ et simulé avec hydrus-1d: CAS de NEGUELA au Mali. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences.* »,2017 ; 5(4) : 282-29
- FREDERIC ELIE,« Humidité Atmosphérique et précipitation » (2006) LAMRI NACEF & NOUR EL ISLAM BACHARI, « Influence, des flux de chaleur latente et sensible à l'interface air-mer en Méditerranée sur la pluviométrie et la température dans le nord de l'Algérie », *ATMOSPHERE-OCEAN* 50 (3) 2012, 334–351 <http://dx.doi.org/10.1080/07055900.2012.668851>. *La Société canadienne de météorologie et d'océanographie*
- DELMAS, R. G. MEGIE, V-H. PEUCH : « Physique et chimie de l'atmosphère – éd. Belin », (2005) (7)- C. EL RHZOUÏ & M.KHARISS, « Etude de la relation de Causalité entre l'inflation et les dépenses publiques », Cas du Maroc *Revue Française d'Economie et de Gestion, Vol.2.N°1 (2021)52-69p.*
- REGIS BOURBONNAIS, « Econométrie, cours et exercices corrigées », 9<sup>ème</sup> Edition Dunod,5 rue Laromiguière,75005 Paris, (2005). ARTHUR CHARPENTIER, « Modèle linéaire multivariées »,Var et cointégration introductions aux modèles ARCH et GARCH, Vol 2,(2003)
- GILBERT SAPORTA, “Probabilité Analyse des Données et Statistiques »,2ème Edition, (2006). RMAN » KOZHAN, « Financial Econometrics », (2009)
- ALLAL, N.&BENILLES, B., « Question of causality Between Financial Development and Economic Growth, The case of Algeria (1980-2017) *Dirassat Journal Economic Issue,11(2) (2020)473-489 p.*
- MAREK JAROCINSKI AND BARTOSZ MACKOWIAK, « Granger-causal-Priority and choice of Variables in Vector autoregressions”,(2013)
- WOILLEZ, M.-N. (2019), “*Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : observations, projections et impacts*”, Papiers de Recherche AFD, n° 2019-108, Juillet. RICHARD STARTZ, “Eviews Illustrated”, (2015))
- REGIS BOURBONNAIS, « LOGICIELEIEWS »,.(2012) NOUR WEHBE, BASSAM ASSAF, SALEM DARWICH. *Étude de causalité entre la consommation d'électricité et la croissance économique au Liban. Lebanese Science Journal, National Council for Scientific Research in Lebanon, (2018), 19, 10.22453/LSJ-019.3.432452.*
- WILLIAM H. GREENE, “ECONOMETRIC Analysis New York University International », (2012) GILBERT COLLETAZ : « LESPROCESSUSVAR notes du cours de séries temporelles multivariées » (2017).
- EMMANUEL DUGUET, « Statistique et économétrie appliquées des variables de durée », (2014) Konstantin PROTASSOV, ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES EXPERIMENTALE (2002)
- ONAS KIBALA KUMA ; « Le Modèle VAR Structurel: Eléments de théorie et pratiques sur logiciels »,.(2018)
- EMMANUEL DUGUET, « ÉCONOMÉTRIE APPLIQUÉE DES DONNÉES DE PANEL, » Version 9, (2014). S. OULIARIS1, A.R. PAGAN2 AND J. RESTREPO Quantitative Macroeconomic Modeling with Structural Vector Autoregressions An EViews Implementation 3 September 19, 2016 Cours de séries temporelles théorie et applications, Volume2 ,(2012)
- ARTHUR CHARPENTIER, Arthur Charpentier ; « Modèles de prévision Séries temporelle », Volume 1,(2011)
- OSHUA M. TEBBS, “Forecasting and time series”, (2013)
- RICHARD STARTZ, “EViews Illustrated for Version 9 “,(2015)
- BEN VOGEJVANG, Theory and applications with Eviews,2005,
- JEREY M. WOOLDRIDGE, “Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data”, (1991)
- EL RHZAOUÏ C. & M. KHARISS, « Étude de la relation de Causalité entre l'inflation et les dépenses publiques Cas du Maroc », *Revue Française d'Economie et de Gestion, Vol. 2, N° 1 (2021) 52 - 69 p.*
- ROMER C. D. and D. H. ROMER, « The Macroeconomic Effects of Tax Changes: *Estimates Based on a New Measure of Fiscal Shocks* », *American Economic Review, 100 (2010) 763 – 801*
- NANSHA, KEVIN, “Interaction between economic growth, inflation and exchange rate in Kenya”, Online at <https://mpr.aub.uni-muenchen.de/109299/MPPA Paper No. 109299, posted 22 Aug 2021 11:44 UTC>, (2021)

\*\*\*\*\*