

## **Relation de causalité entre les quatre variables climatiques mensuelles : « Température, précipitation, évaporation et humidité spécifique » sur la ville de Maintirano dans la partie ouest de Madagascar**

**Antoine RABENDRINA<sup>1\*</sup>, Niry Havana RAZANATOMPOHARIMANGA<sup>2</sup>,  
Veroarisinina RATSIMBAZAFY<sup>1</sup>, J. Y. RAKOTOMALALA<sup>3</sup> et Eliharinivo RAJAONARITININA<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 la Dynamique de l'Atmosphère du Climat et des Océans (DYACO), BP 101, Madagascar

<sup>3</sup> Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Laboratoire de Chimie Minérale, BP 906, Madagascar

<sup>4</sup> Université d'Antananarivo, Faculté des sciences, Laboratoire de Biotechnologie et Amélioration des Plantes, BP 906, Madagascar

(Reçu le 25 Novembre 2022 ; Accepté le 19 Janvier 2023)

---

\* Correspondance, courriel : [randrianasolohanitriaina@gmail.com](mailto:randrianasolohanitriaina@gmail.com)

### **Résumé**

Le présent article porte sur la relation de causalité entre les quatre variables climatiques « *Température, précipitation, évaporation et humidité spécifique* » sur la ville de Maintirano pendant 444 mois (ou 37ans) à la longitude de 44°1'37" EST et à la latitude de 18°3'41"SUD. Les données utilisées sont des données locales complétées par des données téléchargées dans le site ECMWF allant 1979 à 2015. L'objectif de l'étude consiste donc à déterminer les relations causales et les équations reliant les variables endogènes et les variables exogènes. Pour réaliser ce travail, la méthode de Granger a été utilisée en faisant les tests statistiques et les probabilités des coefficients, puis l'analyse des mécanismes des chocs impulsionsnels. Le logiciel Eviews a permis de déterminer tous les paramètres reliant les équations de ces variables et le choix de « Lag » correspondant. D'après les résultats trouvés, les quatre variables n'ont pas été indépendantes, mais il y a une liaison de cause à effet ou relation biunivoque entre elles. La température à la hausse (ou à la baisse) est la cause de la variation de l'évaporation, la diminution de la quantité de la précipitation modifie la quantité d'humidité. Ainsi, cette analyse nous a permis donc de dire que la relation causale d'une variable climatique est considérée parmi les facteurs entraînant la cause du changement climatique.

**Mots-clés :** *causalité, variables exogènes, variables endogènes, volatilité, choc impulsionsnels.*

### **Abstract**

**Causal relationship between the four monthly climate variables: "Temperature, precipitation, evaporation and specific humidity" in the city of Maintirano for 37 years**

This article is dedicated to the causal relationship between four climate variables : the temperature, the precipitation, the evaporation and the specific humidity over "Maintirano" during 444 months (37years), specifically at the longitude 44°1'37"E and the latitude 18°3'41"S. Local data combined with the down loaded

data from the site of the ECMWF from 1979 to 2015 were used here. This purpose aims to determine the causal relationship and the equations which link the endogenous and exogenous variables. (To reach the goal of this work, the Granger method was used by the mean of statistical test and probabilities of the coefficients, then the analysis of the mechanisms of impulse shocks. The Eviews software was used to determine all the parameters of the equations which link the variables and to choose the corresponding «Lag». The findings show that the four variables were not independent, but, there is cause and effect relationship or one-to-one relationship between them.) (the rise(drop)in temperature is the result from the variation of the evaporation. The decrease of the amount of the precipitation change the amount of the specific humidity. Thus, these analyses lead us to conclude that the relationship between climate variables is considered to be among the factors causing the climate change.

**Keywords :** *causality, exogenous variables, endogenous variables, volatility, impulse stocks.*

## 1. Introduction

L'analyse des variables climatiques sont des outils couramment utilisés dans les domaines scientifiques. Ce domaine possède beaucoup d'applications surtout en climatologie pour la prédiction des données futures, par exemple pour modéliser la tendance et la saisonnalité des cycles temporels. Mais la question qui nous pose maintenant est la cohérence entre ces quatre variables. Est-ce que ces variables sont-elles indépendantes ou non ? L'une des tâches les plus importantes est de découvrir les relations causales entre ces variables [1 - 3]. La causalité de Granger est jusqu'à maintenant la plus connue et la plus utilisée notamment dans le domaine de recherche [4 - 7], c'est-à-dire les mouvements passés d'une variable  $y_i$  entraînant une information corrélée avec les mouvements futurs d'autre variable  $y_j$  Selon Granger " " $y_i$  cause  $y_j$  /ou " $y_i$  ne cause pas  $y_j$ ". Cette causalité nous permet de mettre en évidence une liaison entre les variables climatiques qui a été introduite en 1969 par Granger et elle évalue l'influence entre séries temporelles dans un système et détermine si elles sont liées ou pas, [8 - 12]. L'objectif de l'étude était de déterminer les relations de causalité entre les quatre variables climatiques mensuelles « *Température, précipitation, évaporation et humidité spécifique* ». Elle consiste également de visualiser à partir de cet analyse statistique l'influence de chacune des variables endogènes sur les variables exogènes [13]. Pour mener à bien notre raisonnement nous avons éclaté les problématiques en sous questions : Existe-t-il un lien de causalité entre les variables susmentionnées ? et dans quelle mesure peut-on déterminer l'influence et les liaisons entre ces quatre variables et ensuite quelles sont les équations déterminant les rétroactions (feedback) entre-elles, [14]. Le présent article consiste à résoudre ces problèmes en faisant les tests statistiques, [15, 16] et la présentation des relations d'interdépendances entre ces quatre variables qui provoque chacune des impacts les unes sur les autres.

## 2. Méthodologie

Pour déterminer les relations entre les quatre variables climatiques, le Logiciels Eviews 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 impulsif.

### 2-1. 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.

### 2-2. 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 » [17]. 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.

### 2-3. Choix du Lag

Le logiciel EvIEWS nous donne des valeurs de « Lags » mais il faut choisir les valeurs minimales convenables aux cinq paramètres suivants :

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

### 2-4. Équation des variables

Une variable endogène peut s'exprimer en fonction des variables exogènes [18 - 22] avec des valeurs des coefficients dont les systèmes **d'Équations** entre les quatre variables X, Y, Z, U sont telles que :

$$\begin{aligned}
 X_t &= \sum_i^m a_i x_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j y_{t-j} + \sum_{k=1}^m c_k z_{t-k} + \sum_{l=1}^m d_l u_{t-l} + \varepsilon_{tx} \\
 Y_t &= \sum_i^m a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j x_{t-j} + \sum_{k=1}^m c_k z_{t-k} + \sum_{l=1}^m d_l u_{t-l} + \varepsilon_{ty} \\
 Z_t &= \sum_i^m a_i z_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j x_{t-j} + \sum_{k=1}^m c_k y_{t-k} + \sum_{l=1}^m d_l u_{t-l} + \varepsilon_{tz} \\
 U_t &= \sum_i^m a_i u_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j x_{t-j} + \sum_{k=1}^m c_k y_{t-k} + \sum_{l=1}^m d_l z_{t-l} + \varepsilon_{tu}
 \end{aligned} \tag{1}$$

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

### 2-5. Test des coefficients

Si la Prob > 5% , les coefficients  $a_i = b_j = c_k = d_l = 0$  , alors la variable  $X_t$  ne cause pas les trois autres variables  $Y_{t-j}, Z_{t-k}, U_{t-l}$ , de même pour les autre variables. Si la Prob < 5% et  $a_i \neq b_j \neq c_k \neq d_l \neq 0$ , la variable  $X_t$  ne cause pas les trois autres variables  $Y_{t-j}, Z_{t-k}, U_{t-l}$ , de même pour les autre variables.

- **Modèle VAR**

Les équations du système de **l'Équation (1)** peuvent s'écrire sous une autre forme en utilisant le modèle VAR de **l'Équation (2)** qui est sous forme matricielle [23], et nous avons **l'Équation** suivante :

$$= \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ c_0 \\ d_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1^1 & b_1^1 & c_1^1 & d_1^1 \\ a_1^2 & b_1^2 & c_1^2 & d_1^2 \\ a_1^3 & b_1^3 & c_1^3 & d_1^3 \\ a_1^4 & b_1^4 & c_1^4 & d_1^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1t-1} \\ x_{2t-1} \\ x_{3t-1} \\ x_{4t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_2^1 & b_2^1 & c_2^1 & d_2^1 \\ a_2^2 & b_2^2 & c_2^2 & d_2^2 \\ a_2^3 & b_2^3 & c_2^3 & d_2^3 \\ a_2^4 & b_2^4 & c_2^4 & d_2^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1t-2} \\ x_{2t-2} \\ x_{3t-2} \\ x_{4t-2} \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} a_k^1 & b_k^1 & c_k^1 & d_k^1 \\ a_k^2 & b_k^2 & c_k^2 & d_k^2 \\ a_k^3 & b_k^3 & c_k^3 & d_k^3 \\ a_k^4 & b_k^4 & c_k^4 & d_k^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1t-k} \\ x_{2t-k} \\ x_{3t-k} \\ x_{4t-k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{1t} \\ \varepsilon_{2t} \\ \varepsilon_{3t} \\ \varepsilon_{4t} \end{bmatrix} \quad (2)$$

On peut en déduire le système **d'Équation** linéaire de la manière suivante

$$\begin{aligned} X_{1t} &= a_0 + \sum_{i=1}^m a_i^1 x_{1t-i} + \sum_{i=1}^m b_i^1 x_{2t-i} + \sum_{i=1}^m c_i^1 x_{3t-i} + \sum_{i=1}^m d_i^1 x_{4t-i} + \varepsilon_{1t} \\ X_{2t} &= a_0 + \sum_{i=1}^m a_i^2 x_{1t-i} + \sum_{i=1}^m b_i^2 x_{2t-i} + \sum_{i=1}^m c_i^2 x_{3t-i} + \sum_{i=1}^m d_i^2 x_{4t-i} + \varepsilon_{2t} \\ X_{3t} &= a_0 + \sum_{i=1}^m a_i^3 x_{1t-i} + \sum_{i=1}^m b_i^3 x_{2t-i} + \sum_{i=1}^m c_i^3 x_{3t-i} + \sum_{i=1}^m d_i^3 x_{4t-i} + \varepsilon_{3t} \\ X_{4t} &= a_0 + \sum_{i=1}^m a_i^4 x_{1t-i} + \sum_{i=1}^m b_i^4 x_{2t-i} + \sum_{i=1}^m c_i^4 x_{3t-i} + \sum_{i=1}^m d_i^4 x_{4t-i} + \varepsilon_{4t} \end{aligned} \quad (3)$$

$X_{1t}$  ne cause pas  $X_{2t}$  si  $b_1^1 = b_2^1 = \dots, = b_k^1 = 0$  et  $X_{2t}$  ne cause pas  $X_{1t}$  si  $a_1^1 = a_2^1 = \dots, = a_k^1 = 0$

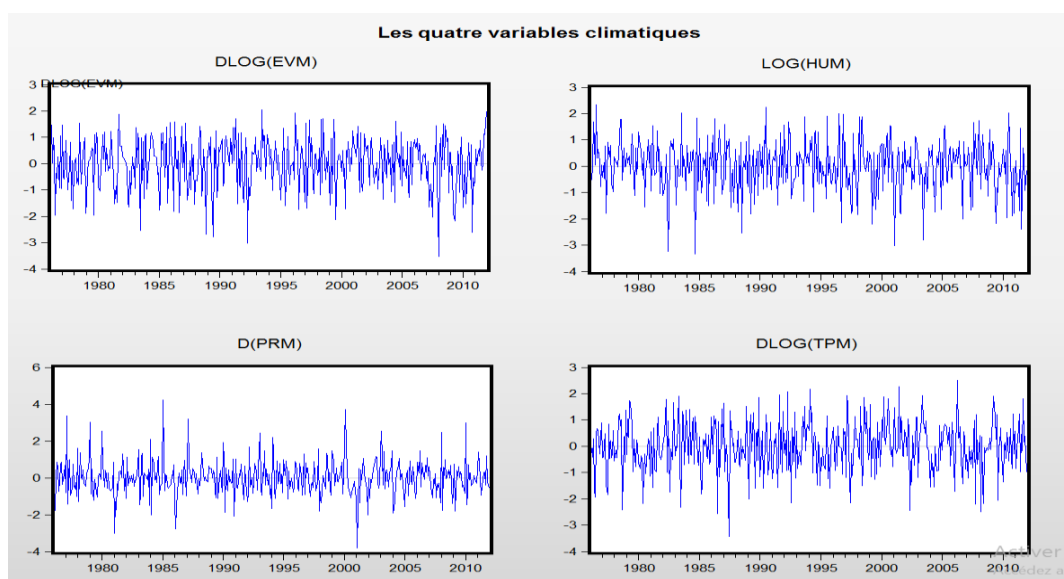
## 2-6. Choc impulsionnel

L'analyse graphique sur les chocs impulsionnels de la série temporelle permet de constater un amortissement ou non sur les autres variables [24, 25]. Ce mécanisme aura lieu dans un certain temps. L'effet du choc se trouve sur les graphes des variables dans une période considérée.

## 3. Résultats et discussion

### 3-1. Stationnarités des variables

Avant toute estimation, il est nécessaire de vérifier la stationnarité des variables étudiées sur le même niveau afin d'éviter les problèmes de régressions fallacieuses, donc on est maintenant obligés de transformer les quatre variables « EVAPORATION (EVM) en DLOG(EVM), HUMIDITE(HUM) en LOG(HUM), PRECIPITATION (PRM) en D(PRM) et la TEMPERATURE (TPM) en DLOG(TPM) » pour les rendre stationnaires grâce au Logiciel EViews, donc les quatre figures transformées ci-dessous sont représentées sur la **Figure 1**. On a remarqué que l'introduction des fonctions logarithmes et des dérivées sont des moyens nécessaires pour les rendre stationnaires pour avoir des stabilités de ces variables.



**Figure 1** : Quatre variables climatiques mensuelle de (1979 à 2010) : Evaporation (Dlog (EVM), Humidité spécifique (Log (HUM), Précipitation (PRM), Température (Dlog (TPM))

### 3-2. 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 Ratio), FPE (Final Prediction Error), AIC (Akaike Information Criteria), SC (Schwarz Information Criteria), HQ (Hannan-Quinn Information Criteria). Le logiciel Eviews donne les résultats répondant aux valeurs convenables. D'après les résultats dans le **Tableau 1** ci-dessous, tous les critères nous conseillent qu'un nombre de retard optimal à intégrer dans le modèle correspond au  $Lag = 12$ .

### 3-3. Critère de sélection de Lag

Le **Tableau 1** donne les 20 valeurs sur lesquelles on peut choisir une valeur de Lag convenable aux 4 variables. On a choisi le « Lag 12 » parmi les 20 proposées dans le **Tableau 1** ci-dessous [26, 27], car sa valeur AIC est minimale et marquée par (\*\*).

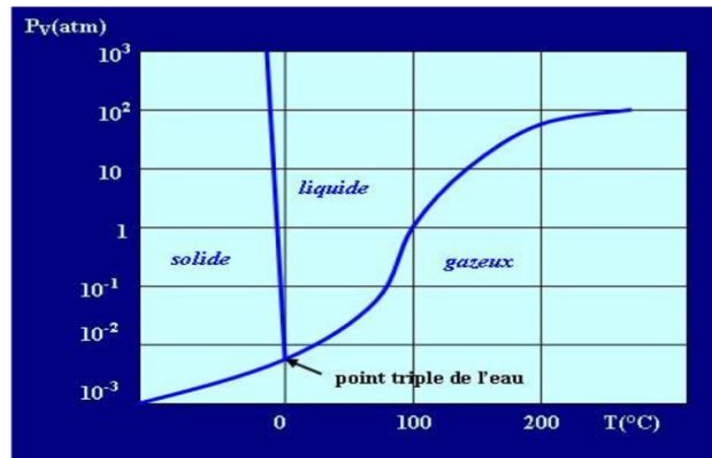
**Tableau 1 : Tableau de choix de Lag et les six paramètres de critères de sélections**

Critère de sélection de l'ordre de Lag						
Variables Endogène : DLOG (EVM) LOG (HUM) D (PRM) DLOG (TPM)						
Variables Exogène : C						
Date : 06/28/22 Time : 08:34						
Echantillons : 1979 : 01 2015 : 12						
Observations : 423						
Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	1260,555	NA	3,09e-08	-5,941158	-5,902885	-5,926035
1	1807,388	1080,738	2,51e-09	-8,451005	-8,259640	-8,375391
2	1975,380	328,8363	1,22e-09	-9,169646	-8,825189	-9,033540
3	2107,195	255,5283	7,08e-10	-9,717236	-9,219686	-9,520638
4	2181,824	143,2592	5,37e-10	-9,994441	-9,343799	-9,737351
5	2230,225	91,99513	4,60e-10	-10,14763	-9,343901	-9,830053
6	2272,338	79,24858	4,07e-10	-10,27110	-9,314275	-9,893028
7	2323,907	96,06728	3,44e-10	-10,43928	-9,329359	-10,00071
8	2383,784	110,4110	2,80e-10	-10,64673	-9,383722*	-10,14768
9	2408,192	44,54741	2,69e-10	-10,68649	-9,270387	-10,12694
10	2447,393	70,80232	2,41e-10	-10,79619	-9,226992	-10,17615*
11	2473,013	45,78769	2,31e-10	-10,84167	-9,119381	-10,16114
12	2495,375	39,54324	2,24e-10*	-10,87175*	-8,996369	-10,13072
13	2506,590	19,62094	2,29e-10	-10,84913	-8,820657	-10,04761
14	2516,120	16,49140	2,37e-10	-10,81854	-8,636973	-9,956529
15	2526,323	17,46362	2,44e-10	-10,79113	-8,456473	-9,868630
16	2540,616	24,19222	2,46e-10	-10,78305	-8,295307	-9,800064
17	2559,305	31,28075*	2,44e-10	-10,79577	-8,154928	-9,752286
18	2566,882	12,53905	2,54e-10	-10,75594	-7,962012	-9,651970
19	2582,920	26,23770	2,55e-10	-10,75612	-7,809101	-9,591660
20	2595,466	20,28763	2,60e-10	-10,73979	-7,639679	-9,514839
LR : sequential modified LR test statistic (each test at 5% level)						
FPE : Final predictionerror						
AIC : Akaike information criterion						
SC : Schwarz information criterion						
HQ : Hannan-Quinn information criterion						

### 3-4. Tests de causalités

#### 3-4-1. Propriétés physiques de l'eau

Avant de faire les tests des causalités, nous allons voir les mécanismes reliant les quatre variables climatiques suite à des courants d'air ascendants lors du changement d'états. L'eau peut prendre trois propriétés physiques particulières sous formes des trois états : Etat liquide, état solide et état gazeux. Ce processus de changement d'état s'accompagne d'une variation de la pression partielle de vapeur d'eau en fonction de la température représentée par le diagramme  $P_V = f(T)$  de la **Figure 2** [28].



**Figure 2 :** Diagramme des états de l'eau : état liquide, état solide et état gazeux

La Physique des nuages [29] nous montre que ces quatre variables sont liées par la relation de Clausius-Clapeyron fixant le rapport de mélange saturant en fonction de la température et de la pression. Elle se détend alors de façon plus ou moins adiabatique, sa température diminue et son humidité relative augmente. L'air qui s'élève et atteint le niveau saturant, la condensation se produit et ceci constitue la base des nuages cumuliformes et la suite du mécanisme peuvent conduire la formation de la précipitation à cause du refroidissement du mélange d'air chaud et humide et d'air froid et sec. Les gouttes d'eau peuvent alors se congeler et des cristaux de glace peuvent se former directement par déposition sur des noyaux glycoliques, sa température diminue et son humidité relative augmente.

#### 3-4-2. Période sèche et humide à Maintirano

A Maintirano, la période sèche et la période humide sont représentées par le diagramme ombrothermique de la **Figure 3**. La période humide a eu lieu pendant 5 mois, c'est-à-dire du mois de décembre au mois avril se trouvant au-dessus de la courbe de la température (colorée en rouge), c'est l'abondance de pluie. La période sèche débute le mois de mai jusqu'au mois de juillet se trouvant au-dessous de la courbe de la température (courbe en rouge). Pendant la période sèche, la température diminue et atteint la valeur minimale, par conséquent l'évaporation est à la baisse, ce qui entraîne une diminution de la quantité de l'humidité atmosphérique.

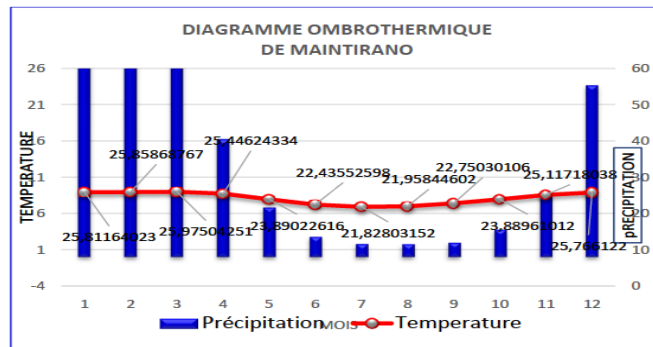


Figure 3 : Diagramme ombrothermique de la ville de Maintirano

Les quatre figures ci-dessous : **Figure 4, Figure 5, Figure 6 et Figure 7** donnent l'allure de la courbe climatologique mensuelle pour chaque variable relative au *Diagramme ombrothermique* de la **Figure 3**. L'analyse de ces quatre variables permet de visualiser la cohérence et la liaison entre elles. Ces valeurs diminuent à partir du mois de mars et atteignent la valeur minimale le mois de juillet sauf courbe de l'évaporation qui tombe sur le mois de juin. Contrairement, l'allure de la courbe à la hausse de chaque variable entraîne aussi la montée des autres. Ces phénomènes montrent l'existence des liaisons, les cohérences et les interdépendances entre ces quatre variables, et ces interdépendances peuvent tester à l'aide de la causalité de Granger [30, 31]. Les deux figures (**Figure 4 et la Figure 5**) représentent l'Humidité et l'évaporation climatologique mensuelle. Ces deux courbes diminuent à partir du mois de mars jusqu'au mois de juin qui est le point minimum jusqu'au mois de juillet pour la variable humidité. Dans ce cas, la ville de Maintirano passe donc dans une période sèche. La température est considérée comme la source d'évaporation atmosphérique. D'où, plus l'évaporation est faible plus l'humidité est minimale.

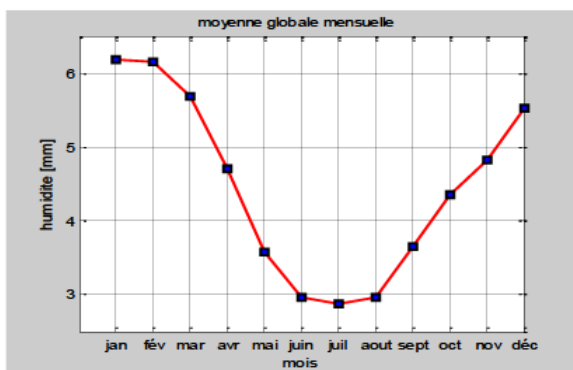


Figure 4 : Humidité climatologique mensuelle

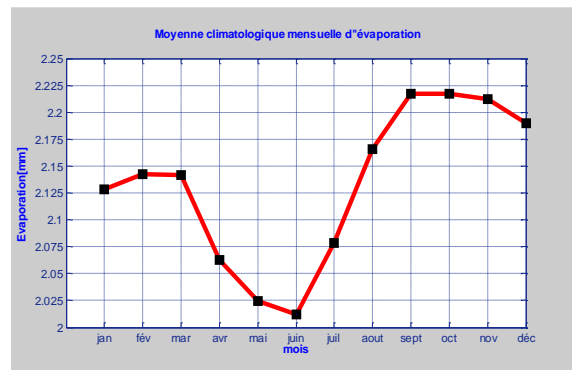


Figure 5 : Évaporation climatologique mensuelle

Les deux courbes *températures* et *précipitations* sont représentées par les **Figures 6 et Figure 7** présentant des paraboles et admettant des points communs presque similaires aux courbes précédentes. Les deux variables décroissent et elles atteignent la valeur minimale le mois de juin pour la variable température, mais la précipitation a trois mois des valeurs minimales (juillet, août, septembre) et continue jusqu'au mois de septembre. Donc, en tenant compte de l'allure de ces deux courbes, on peut conclure que la variation d'une variable entraîne une manifestation de causalité sur les autres variables.

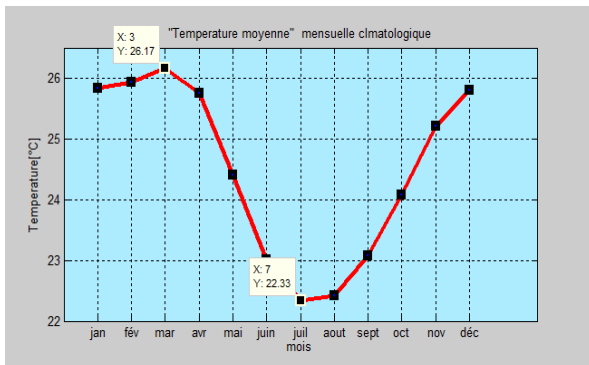


Figure 6 : Température climatologique mensuelle

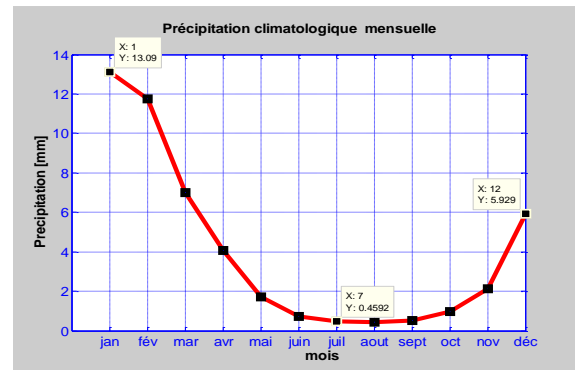


Figure 7 : Précipitation climatologique mensuelle

L'interprétation des résultats des tests de causalités de Granger au seuil de 5 % est donnée par le **Tableau 2**. Le test de ce phénomène est réalisé par le test de causalité (biunivoque) au sens de Granger [32]. La variable *humidité* cause l'*évaporation* est donnée par la valeur de la probabilité. Donc l'*humidité* cause l'*évaporation* car la  $Prob = 2.E-07 < 0,05$  (respectivement  $0,2.E-06 < 0,05$ ), (avec E est l'exposant de puissance de dix). Dans le cas contraire on a remarqué que l'*humidité* ne cause pas la *température* car la valeur de  $Prob = 0,2182 > 0,05$ , ce qui nous montre que la quantité d'*humidité* atmosphérique n'a pas d'influence sur la variation de la température, cela peut être due à la longue durée de l'intervalle de temps mensuelle durant 30 jours. Dans ce cas, la période très longue durée n'entraîne pas la causalité, mais elle pourrait avoir la causalité, dans le cas de la période journalière. Ainsi donc, la relation causale dépend de la durée de l'intervalle de temps. De même, il y a une relation causale entre les variables *Précipitation* et *Evaporation*. Le test montre qu'il y a une relation causale car la  $Prob = 0,003 < 5 \%$  (respectivement  $Prob = 1.E-06 < 5 \%$ ) d'après le **Tableau 2**. Ce qui montre que la précipitation mensuelle a un impact sur l'évaporation mensuelle. La température cause l'évaporation car la  $Prob = 4E-12 < 0,05$ . Donc la température a été considérée comme la source de la variation de la quantité d'évaporation et cette influence est donnée par résultat de test de probabilité, En revanche l'évaporation ne cause pas la température car la Probabilité =  $0,1514 > 0,05$ . Donc l'évaporation mensuelle n'a pas d'influence sur la variation de la température mensuelle, du fait de la longue durée de l'intervalle de temps. La variable *température* admettant aussi pour cause de la variable *humidité* en tenant compte de la valeur de la  $Prob = 2E-06 < 0,05$ . Mais dans le cas contraire, l'*humidité* ne cause pas la *température* car la probabilité =  $0,2182 > 0,05$ , ce qui prouve que la température mensuelle n'a pas d'influence sur l'*humidité* spécifique. De plus, la *température* mensuelle cause (causalité biunivoque) la variable *précipitation* car la probabilité est,  $1.E-12 < 5 \%$ , ce qui nous montre que l'abondance (ou diminution) de pluie dépend de la température. Finalement, les précipitations ont obligatoirement besoin de la vapeur d'eau dans l'atmosphère pour que ceci se produise, alors il faut avoir un mélange d'air sec et d'eau sous forme gazeuse. Ce phénomène d'*humidité* et de *précipitation* sont admis au sens de causalité biunivoque car la *probabilité critique est inférieure à 5 %*. Ainsi, les résumés des tests de causalités entre les quatre variables sont donnés par le **Tableau 2** suivant.



**Tableau 2 : Test de causalité des quatre**

Date : 06/30/22 Time : 07 : 13			
Echantillons : 1979 : 01 2015 : 12			
Lags : 12			
Hypothèse Nul :	Obs	F-Statistic	Prob
LOG(HUM) does not Granger Cause DLOG (EVM)	431	4,88214	2. E-07
DLOG(EVM) does not Granger Cause LOG (HUM)		4,29518	2. E-06
D(PRM) does not Granger Cause DLOG (EVM)	431	3,11282	0,0003
DLOG(EVM) does not Granger Cause D (PRM)		4,40062	1. E-06
DLOG(TPM) does not Granger Cause DLOG (EVM)	431	7,25532	4.E-12
DLOG(EVM) does not Granger Cause DLOG (TPM)		1,42469	0,1514
D(PRM) does not Granger Cause LOG (HUM)	431	2,66073	0,0019
LOG(HUM) does not Granger Cause D (PRM)		2,21909	0,0104
DLOG(TPM) does not Granger Cause LOG (HUM)	431	4,35963	2. E-06
LOG(HUM) does not Granger Cause DLOG (TPM)		1,29538	0,2182
DLOG(TPM) does not Granger Cause D (PRM)	431	7,56512	1. E-12
D(PRM) does not Granger Cause DLOG (TPM)		3,17778	0,0002

**3-5. Présentation des équations des variables et Tests des coefficients**

La présentation des équations reliant les variables endogènes en fonction des variables exogènes [33] sont représentées par les *Équations (2 à 9)*, et les coefficients de ces quatre équations sont données par le *Tableau 3* suivant le choix de *Lag = 12*.

- Si la valeur de probabilité est < 5 % alors l'hypothèse nulle n'est pas vérifiée, c'est-à-dire, les coefficients ne sont pas nuls.
  - Si la valeur de probabilité est > 5 % alors l'hypothèse nulle est vérifiée, c'est-à-dire les coefficients sont nuls.
- Le *Tableau 03* donne les valeurs de probabilité inférieure à 5 % et admettant les valeurs des coefficients différents de zéro. Dans le cas contraire tous les coefficients sont nuls.

**Tableau 3 : Tableau 03 montre le test de coefficients de C(1) à C(12)**

Wald Test :			
Test Statistic	Value	df	Probability
Chi-square	301,2770	12	0,0000
Null Hypothesis	C(1) = C(2) = C(3) = C(4) = C(5) = C(6) = C(7) = C(8) = C(9) = C(10) = C(11) = C(12) = 0		
NullHypothesisSummary :			
Normalized Restriction (= 0)	Value	Std, Err,	
C(1)	-0,982032	0,058139	
C(2)	-0,847514	0,079796	
C(3)	-0,735886	0,090713	
C(4)	-0,712266	0,096786	
C(5)	-0,656593	0,100174	
C(6)	-0,548114	0,101161	
C(7)	-0,400891	0,100287	
C(8)	-0,357562	0,097713	
C(9)	-0,380092	0,092332	
C(10)	-0,339656	0,084631	
C(11)	-0,307931	0,072151	
C(12)	-0,131567	0,051110	

La Prob=0,00 < 0,05 alors les coefficients C(1)=C(2)=C(3)=C(4)=C(5)=C(6)=C(7)= C(8)=C(9)=C(10)=C(11)=C(12)= 0

### 3-5-1. Évaporation en fonction des trois autres variables exogènes : humidité, précipitation et température

L'Équation (4) nous a donnée l'équation de la variable évaporation DLOG (EVM) en fonction des trois autres variables. Ici l'évaporation est considérée comme variable endogène et les autres variables comme exogènes. On a 49 constantes variant de C(1) à C(49). Ces valeurs ont été nulles si la variable endogène ne cause pas les variables exogènes, c'est-à-dire la valeur de la Prob > 5 %.

$$\begin{aligned}
 \text{DLOG(EVM)} = & C(1)*\text{DLOG(EVM(-1))} + C(2)*\text{DLOG(EVM(-2))} + C(3)*\text{DLOG(EVM(-3))} + C(4)*\text{DLOG(EVM(-4))} \\
 & + C(5)*\text{DLOG(EVM(-5))} + C(6)*\text{DLOG(EVM(-6))} + C(7)*\text{DLOG(EVM(-7))} + C(8)*\text{DLOG(EVM(-8))} + \\
 & C(9)*\text{DLOG(EVM(-9))} + C(10)*\text{DLOG(EVM(-10))} + C(11)*\text{DLOG(EVM(-11))} + C(12)*\text{DLOG(EVM(-12))} + \\
 & C(13)*\text{LOG(HUM(-1))} + C(14)*\text{LOG(HUM(-2))} + C(15)*\text{LOG(HUM(-3))} + C(16)*\text{LOG(HUM(-4))} + \\
 & C(17)*\text{LOG(HUM(-5))} + C(18)*\text{LOG(HUM(-6))} + C(19)*\text{LOG(HUM(-7))} + C(20)*\text{LOG(HUM(-8))} + \\
 & C(21)*\text{LOG(HUM(-9))} + C(22)*\text{LOG(HUM(-10))} + C(23)*\text{LOG(HUM(-11))} + C(24)*\text{LOG(HUM(-12))} + \\
 & C(25)*\text{D(PRM(-1))} + C(26)*\text{D(PRM(-2))} + C(27)*\text{D(PRM(-3))} + C(28)*\text{D(PRM(-4))} + C(29)*\text{D(PRM(-5))} + \\
 & C(30)*\text{D(PRM(-6))} + C(31)*\text{D(PRM(-7))} + C(32)*\text{D(PRM(-8))} + C(33)*\text{D(PRM(-9))} + C(34)*\text{D(PRM(-10))} + \\
 & C(35)*\text{D(PRM(-11))} + C(36)*\text{D(PRM(-12))} + C(37)*\text{DLOG(TPM(-1))} + C(38)*\text{DLOG(TPM(-2))} + \\
 & C(39)*\text{DLOG(TPM(-3))} + C(40)*\text{DLOG(TPM(-4))} + C(41)*\text{DLOG(TPM(-5))} + C(42)*\text{DLOG(TPM(-6))} + \\
 & C(43)*\text{DLOG(TPM(-7))} + C(44)*\text{DLOG(TPM(-8))} + C(45)*\text{DLOG(TPM(-9))} + C(46)*\text{DLOG(TPM(-10))} + \\
 & C(47)*\text{DLOG(TPM(-11))} + C(48)*\text{DLOG(TPM(-12))} + C(49)
 \end{aligned} \tag{4}$$

### 3-5-2. Humidité en fonction des trois autres variables : précipitation et température, évaporation 2

L'Équation (5) nous a présentée l'équation LOG(HUM) en fonction des variables exogènes, et les 49 constante variant de C (50) à C(98). Ces constantes prennent les valeurs nulles si la variable endogène ne cause pas les variables exogènes, c'est-à-dire si la Prob > 5 %.

$$\begin{aligned}
 \text{LOG(HUM)} = & C(50)*\text{DLOG(EVM(-1))} + C(51)*\text{DLOG(EVM(-2))} + C(52)*\text{DLOG(EVM(-3))} + \\
 & C(53)*\text{DLOG(EVM(-4))} + C(54)*\text{DLOG(EVM(-5))} + C(55)*\text{DLOG(EVM(-6))} + C(56)*\text{DLOG(EVM(-7))} + \\
 & C(57)*\text{DLOG(EVM(-8))} + C(58)*\text{DLOG(EVM(-9))} + C(59)*\text{DLOG(EVM(-10))} + C(60)*\text{DLOG(EVM(-11))} + \\
 & C(61)*\text{DLOG(EVM(-12))} + C(62)*\text{LOG(HUM(-1))} + C(63)*\text{LOG(HUM(-2))} + C(64)*\text{LOG(HUM(-3))} + \\
 & C(65)*\text{LOG(HUM(-4))} + C(66)*\text{LOG(HUM(-5))} + C(67)*\text{LOG(HUM(-6))} + C(68)*\text{LOG(HUM(-7))} + \\
 & C(69)*\text{LOG(HUM(-8))} + C(70)*\text{LOG(HUM(-9))} + C(71)*\text{LOG(HUM(-10))} + C(72)*\text{LOG(HUM(-11))} + \\
 & C(73)*\text{LOG(HUM(-12))} + C(74)*\text{D(PRM(-1))} + C(75)*\text{D(PRM(-2))} + C(76)*\text{D(PRM(-3))} + C(77)*\text{D(PRM(-4))} \\
 & + C(78)*\text{D(PRM(-5))} + C(79)*\text{D(PRM(-6))} + C(80)*\text{D(PRM(-7))} + C(81)*\text{D(PRM(-8))} + C(82)*\text{D(PRM(-9))} + \\
 & C(83)*\text{D(PRM(-10))} + C(84)*\text{D(PRM(-11))} + C(85)*\text{D(PRM(-12))} + C(86)*\text{DLOG(TPM(-1))} + \\
 & C(87)*\text{DLOG(TPM(-2))} + C(88)*\text{DLOG(TPM(-3))} + C(89)*\text{DLOG(TPM(-4))} + C(90)*\text{DLOG(TPM(-5))} + \\
 & C(91)*\text{DLOG(TPM(-6))} + C(92)*\text{DLOG(TPM(-7))} + C(93)*\text{DLOG(TPM(-8))} + C(94)*\text{DLOG(TPM(-9))} + \\
 & C(95)*\text{DLOG(TPM(-10))} + C(96)*\text{DLOG(TPM(-11))} + C(97)*\text{DLOG(TPM(-12))} + C(98)
 \end{aligned} \tag{5}$$

### 3-5-3. Précipitation en fonction des trois autres variables : humidité, température, et évaporation

L'Équation (6) nous a présenté l'équation D(PRM) en fonction des variables exogènes dont les constantes ont varié de C(99) à C(147). Ces constantes sont nulles si la variable endogène ne cause pas les variables exogènes, c'est-à-dire si la Prob > 5 %.

$$\begin{aligned}
 D(\text{PRM}) = & C(99)*DLOG(\text{EVM}(-1)) + C(100)*DLOG(\text{EVM}(-2)) + C(101)*DLOG(\text{EVM}(-3)) + \\
 & C(102)*DLOG(\text{EVM}(-4)) + C(103)*DLOG(\text{EVM}(-5)) + C(104)*DLOG(\text{EVM}(-6)) + C(105)*DLOG(\text{EVM}(-7)) + \\
 & C(106)*DLOG(\text{EVM}(-8)) + C(107)*DLOG(\text{EVM}(-9)) + C(108)*DLOG(\text{EVM}(-10)) + C(109)*DLOG(\text{EVM}(-11)) + \\
 & C(110)*DLOG(\text{EVM}(-12)) + C(111)*LOG(\text{HUM}(-1)) + C(112)*LOG(\text{HUM}(-2)) + C(113)*LOG(\text{HUM}(-3)) + \\
 & C(114)*LOG(\text{HUM}(-4)) + C(115)*LOG(\text{HUM}(-5)) + C(116)*LOG(\text{HUM}(-6)) + C(117)*LOG(\text{HUM}(-7)) + \\
 & C(118)*LOG(\text{HUM}(-8)) + C(119)*LOG(\text{HUM}(-9)) + C(120)*LOG(\text{HUM}(-10)) + C(121)*LOG(\text{HUM}(-11)) + \\
 & C(122)*LOG(\text{HUM}(-12)) + C(123)*D(\text{PRM}(-1)) + C(124)*D(\text{PRM}(-2)) + C(125)*D(\text{PRM}(-3)) + C(126)*D(\text{PRM}(-4)) + \\
 & C(127)*D(\text{PRM}(-5)) + C(128)*D(\text{PRM}(-6)) + C(129)*D(\text{PRM}(-7)) + C(130)*D(\text{PRM}(-8)) + C(131)*D(\text{PRM}(-9)) + \\
 & C(132)*D(\text{PRM}(-10)) + C(133)*D(\text{PRM}(-11)) + C(134)*D(\text{PRM}(-12)) + C(135)*DLOG(\text{TPM}(-1)) + \\
 & C(136)*DLOG(\text{TPM}(-2)) + C(137)*DLOG(\text{TPM}(-3)) + C(138)*DLOG(\text{TPM}(-4)) + C(139)*DLOG(\text{TPM}(-5)) + \\
 & C(140)*DLOG(\text{TPM}(-6)) + C(141)*DLOG(\text{TPM}(-7)) + C(142)*DLOG(\text{TPM}(-8)) + C(143)*DLOG(\text{TPM}(-9)) + \\
 & C(144)*DLOG(\text{TPM}(-10)) + C(145)*DLOG(\text{TPM}(-11)) + C(146)*DLOG(\text{TPM}(-12)) + C(147)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

**3-5-4. Température en fonction des trois autres variables : humidité, évaporation et précipitation**

L'Équation (7) nous présente l'Équation DLOG(TPM) en fonction des variables exogènes dont les constantes varient de C(148) à C(196), Ces constantes sont nulles si la variable endogène ne cause pas les variables exogènes, c'est-à-dire si la Prob > 5 %.

$$\begin{aligned}
 DLOG(\text{TPM}) = & C(148)*DLOG(\text{EVM}(-1)) + C(149)*DLOG(\text{EVM}(-2)) + C(150)*DLOG(\text{EVM}(-3)) + \\
 & C(151)*DLOG(\text{EVM}(-4)) + C(152)*DLOG(\text{EVM}(-5)) + C(153)*DLOG(\text{EVM}(-6)) + C(154)*DLOG(\text{EVM}(-7)) + \\
 & C(155)*DLOG(\text{EVM}(-8)) + C(156)*DLOG(\text{EVM}(-9)) + C(157)*DLOG(\text{EVM}(-10)) + C(158)*DLOG(\text{EVM}(-11)) + \\
 & C(159)*DLOG(\text{EVM}(-12)) + C(160)*LOG(\text{HUM}(-1)) + C(161)*LOG(\text{HUM}(-2)) + C(162)*LOG(\text{HUM}(-3)) + \\
 & C(163)*LOG(\text{HUM}(-4)) + C(164)*LOG(\text{HUM}(-5)) + C(165)*LOG(\text{HUM}(-6)) + C(166)*LOG(\text{HUM}(-7)) + \\
 & C(167)*LOG(\text{HUM}(-8)) + C(168)*LOG(\text{HUM}(-9)) + C(169)*LOG(\text{HUM}(-10)) + C(170)*LOG(\text{HUM}(-11)) + \\
 & C(171)*LOG(\text{HUM}(-12)) + C(172)*D(\text{PRM}(-1)) + C(173)*D(\text{PRM}(-2)) + C(174)*D(\text{PRM}(-3)) + C(175)*D(\text{PRM}(-4)) + \\
 & C(176)*D(\text{PRM}(-5)) + C(177)*D(\text{PRM}(-6)) + C(178)*D(\text{PRM}(-7)) + C(179)*D(\text{PRM}(-8)) + C(180)*D(\text{PRM}(-9)) + \\
 & C(181)*D(\text{PRM}(-10)) + C(182)*D(\text{PRM}(-11)) + C(183)*D(\text{PRM}(-12)) + C(184)*DLOG(\text{TPM}(-1)) + \\
 & C(185)*DLOG(\text{TPM}(-2)) + C(186)*DLOG(\text{TPM}(-3)) + C(187)*DLOG(\text{TPM}(-4)) + C(188)*DLOG(\text{TPM}(-5)) + \\
 & C(189)*DLOG(\text{TPM}(-6)) + C(190)*DLOG(\text{TPM}(-7)) + C(191)*DLOG(\text{TPM}(-8)) + C(192)*DLOG(\text{TPM}(-9)) + \\
 & C(193)*DLOG(\text{TPM}(-10)) + C(194)*DLOG(\text{TPM}(-11)) + C(195)*DLOG(\text{TPM}(-12)) + C(196)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

**3-5-5. Équations avec les valeurs numériques des coefficients**

Pour chaque variable endogène correspond 49 constantes, et en remplaçant ces constantes par ses valeurs, Les Équations (8 à 11) ont donné l'Équation suivante.

•  $DLOG(\text{EVM}) = f(Dlog(\text{EVM}, \text{Log}(\text{HUM}, \text{log}(\text{TPM}))$  (8)

$$\begin{aligned}
 DLOG(\text{EVM}) = & -0,982032432162*DLOG(\text{EVM}(-1)) - 0,847514015317*DLOG(\text{EVM}(-2)) - \\
 & 0,735885996083*DLOG(\text{EVM}(-3)) - 0,712265622981*DLOG(\text{EVM}(-4)) - 0,656593134354*DLOG(\text{EVM}(-5)) - \\
 & 0,548113885483*DLOG(\text{EVM}(-6)) - 0,40089140183*DLOG(\text{EVM}(-7)) - 0,357562162982*DLOG(\text{EVM}(-8)) - \\
 & 0,380091741015*DLOG(\text{EVM}(-9)) - 0,339655730965*DLOG(\text{EVM}(-10)) - 0,307930747353*DLOG(\text{EVM}(-11)) - \\
 & 0,131567424263*DLOG(\text{EVM}(-12)) - 0,00920407840902*LOG(\text{HUM}(-1)) - 0,0128808551833*LOG(\text{HUM}(-2)) - \\
 & 0,0264100619145*LOG(\text{HUM}(-3)) + 0,00940104083125*LOG(\text{HUM}(-4)) + 0,00242544124688*LOG(\text{HUM}(-5)) - \\
 & 0,00214669910917*LOG(\text{HUM}(-6)) - 0,0101813725725*LOG(\text{HUM}(-7)) + 0,0149088811672*LOG(\text{HUM}(-8)) - \\
 & 0,00859800310855*LOG(\text{HUM}(-9)) + 0,0310775328743*LOG(\text{HUM}(-10)) + 0,015126702655*LOG(\text{HUM}(-11)) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 0,00890830153062*\text{LOG}(\text{HUM}(-12)) + 0,00900530685626*\text{D}(\text{PRM}(-1)) + 0,0214991194457*\text{D}(\text{PRM}(-2)) + \\
& 0,01642284256*\text{D}(\text{PRM}(-3)) + 0,012263783235*\text{D}(\text{PRM}(-4)) + 0,0150890657522*\text{D}(\text{PRM}(-5)) + \\
& 0,0126757301489*\text{D}(\text{PRM}(-6)) + 0,01836300967*\text{D}(\text{PRM}(-7)) + 0,0191469266635*\text{D}(\text{PRM}(-8)) + \\
& 0,0217621495778*\text{D}(\text{PRM}(-9)) + 0,0118298162338*\text{D}(\text{PRM}(-10)) + 0,00974459294303*\text{D}(\text{PRM}(-11)) + \\
& 0,00166213039444*\text{D}(\text{PRM}(-12)) - 0,102573872982*\text{DLOG}(\text{TPM}(-1)) - 0,443130564536*\text{DLOG}(\text{TPM}(-2)) - \\
& 0,328177911187*\text{DLOG}(\text{TPM}(-3)) - 0,256466441513*\text{DLOG}(\text{TPM}(-4)) - 0,314626286077*\text{DLOG}(\text{TPM}(-5)) - \\
& 0,403679255406*\text{DLOG}(\text{TPM}(-6)) - 0,415165039935*\text{DLOG}(\text{TPM}(-7)) - 0,354132128242*\text{DLOG}(\text{TPM}(-8)) - \\
& 0,239183758624*\text{DLOG}(\text{TPM}(-9)) - 0,320569639801*\text{DLOG}(\text{TPM}(-10)) - 0,217771073099*\text{DLOG}(\text{TPM}(-11)) - \\
& 0,268214577985*\text{DLOG}(\text{TPM}(-12)) + 0,00745022325401
\end{aligned}$$

**L'Équation (9)** a donné l'équation de l'Humidité en fonction de la Précipitation, évaporation et la température qui sont considérées comme variables exogènes.

$$\bullet \text{Log}(\text{HUM}) = f(\text{D}(\text{PRM}), \text{DLOG}(\text{EVM}), \text{log}(\text{TPM})) \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
\text{LOG}(\text{HUM}) &= 0,220434482749*\text{DLOG}(\text{EVM}(-1)) - 0,0392723643823*\text{DLOG}(\text{EVM}(-2)) - \\
& 0,298279384596*\text{DLOG}(\text{EVM}(-3)) + 0,15009574985*\text{DLOG}(\text{EVM}(-4)) + 0,359205980014*\text{DLOG}(\text{EVM}(-5)) + \\
& 0,468433714288*\text{DLOG}(\text{EVM}(-6)) + 0,950731321774*\text{DLOG}(\text{EVM}(-7)) + 0,0541906226056*\text{DLOG}(\text{EVM}(-8)) - \\
& 0,754399945563*\text{DLOG}(\text{EVM}(-9)) - 0,820474902371*\text{DLOG}(\text{EVM}(-10)) - 0,538494802874*\text{DLOG}(\text{EVM}(-11)) - \\
& 0,319793739441*\text{DLOG}(\text{EVM}(-12)) + 0,213373893276*\text{LOG}(\text{HUM}(-1)) + 0,0486690186056*\text{LOG}(\text{HUM}(-2)) - \\
& 0,0504052444242*\text{LOG}(\text{HUM}(-3)) + 0,111590556536*\text{LOG}(\text{HUM}(-4)) - 0,00923307954927*\text{LOG}(\text{HUM}(-5)) - \\
& 0,126923435716*\text{LOG}(\text{HUM}(-6)) + 0,0440460890874*\text{LOG}(\text{HUM}(-7)) + 0,0703385236437*\text{LOG}(\text{HUM}(-8)) - \\
& 0,02952554382*\text{LOG}(\text{HUM}(-9)) + 0,0633165379368*\text{LOG}(\text{HUM}(-10)) + 0,162822498855*\text{LOG}(\text{HUM}(-11)) + \\
& 0,0422028660409*\text{LOG}(\text{HUM}(-12)) + 0,0170928381289*\text{D}(\text{PRM}(-1)) + 0,0432952209918*\text{D}(\text{PRM}(-2)) + \\
& 0,0215832696394*\text{D}(\text{PRM}(-3)) - 0,0257347905697*\text{D}(\text{PRM}(-4)) - 0,0488543377991*\text{D}(\text{PRM}(-5)) + \\
& 0,000229174597605*\text{D}(\text{PRM}(-6)) + 0,00797452811256*\text{D}(\text{PRM}(-7)) + 0,0096267777534*\text{D}(\text{PRM}(-8)) + \\
& 0,043793704156*\text{D}(\text{PRM}(-9)) + 0,0186177869077*\text{D}(\text{PRM}(-10)) + 0,00266111463301*\text{D}(\text{PRM}(-11)) - \\
& 0,00763148176437*\text{D}(\text{PRM}(-12)) + 0,530982232835*\text{DLOG}(\text{TPM}(-1)) + 0,0995739042198*\text{DLOG}(\text{TPM}(-2)) - \\
& 0,263082689202*\text{DLOG}(\text{TPM}(-3)) - 0,996087976269*\text{DLOG}(\text{TPM}(-4)) - 0,797455190427*\text{DLOG}(\text{TPM}(-5)) - \\
& 1,21081768901*\text{DLOG}(\text{TPM}(-6)) - 1,02651790623*\text{DLOG}(\text{TPM}(-7)) - 1,23344465893*\text{DLOG}(\text{TPM}(-8)) - \\
& 1,17185442154*\text{DLOG}(\text{TPM}(-9)) - 0,911205009898*\text{DLOG}(\text{TPM}(-10)) - 1,54024218462*\text{DLOG}(\text{TPM}(-11)) - \\
& 1,48264014361*\text{DLOG}(\text{TPM}(-12)) + 0,663709443995
\end{aligned}$$

**L'Équation (10)** de la variable endogène en fonction de la variable exogène est **L'Équation** de la Précipitation en fonction de l'Humidité, évaporation et la température.

$$\bullet \text{D}(\text{PRM}), = f(\text{Dlog}(\text{EVM}), \text{Log}(\text{HUM}), \text{log}(\text{TPM})) \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
\text{D}(\text{PRM}) &= 1,05155842614*\text{DLOG}(\text{EVM}(-1)) + 1,02130530991*\text{DLOG}(\text{EVM}(-2)) + 0,269687756747*\text{DLOG}(\text{EVM}(-3)) + \\
& 0,613861126319*\text{DLOG}(\text{EVM}(-4)) + 1,06503377831*\text{DLOG}(\text{EVM}(-5)) + 0,967366266289*\text{DLOG}(\text{EVM}(-6)) + \\
& 0,241886722403*\text{DLOG}(\text{EVM}(-7)) + 1,15715446724*\text{DLOG}(\text{EVM}(-8)) - 0,0418762800865*\text{DLOG}(\text{EVM}(-9)) + \\
& 0,46573251806*\text{DLOG}(\text{EVM}(-10)) + 0,934636389402*\text{DLOG}(\text{EVM}(-11)) + 0,604716942847*\text{DLOG}(\text{EVM}(-12)) - \\
& 0,0999047806049*\text{LOG}(\text{HUM}(-1)) - 0,0662674023749*\text{LOG}(\text{HUM}(-2)) + 0,0822947145645*\text{LOG}(\text{HUM}(-3)) - \\
& 0,151362021476*\text{LOG}(\text{HUM}(-4)) + 0,00561827241049*\text{LOG}(\text{HUM}(-5)) - 0,0371148146323*\text{LOG}(\text{HUM}(-6)) + \\
& 0,0988392028399*\text{LOG}(\text{HUM}(-7)) + 0,0206974584231*\text{LOG}(\text{HUM}(-8)) - 0,0840418319394*\text{LOG}(\text{HUM}(-9)) + \\
& 0,071723498496*\text{LOG}(\text{HUM}(-10)) - 0,112362721063*\text{LOG}(\text{HUM}(-11)) + 0,170364475917*\text{LOG}(\text{HUM}(-12)) - \\
& 0,778557234842*\text{D}(\text{PRM}(-1)) - 0,76832410396*\text{D}(\text{PRM}(-2)) - 0,744964279687*\text{D}(\text{PRM}(-3)) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &0,680354873853 * D(PRM(-4)) - 0,57312208178 * D(PRM(-5)) - 0,508666606726 * D(PRM(-6)) - \\
 &0,469164737882 * D(PRM(-7)) - 0,408781629128 * D(PRM(-8)) - 0,433104563232 * D(PRM(-9)) - \\
 &0,387338835441 * D(PRM(-10)) - 0,249469005309 * D(PRM(-11)) - 0,142623524823 * D(PRM(-12)) + \\
 &0,739458873095 * DLOG(TPM(-1)) + 1,99957660087 * DLOG(TPM(-2)) + 1,58844663635 * DLOG(TPM(-3)) + \\
 &1,70565650153 * DLOG(TPM(-4)) + 1,05542739872 * DLOG(TPM(-5)) - 0,125868496471 * DLOG(TPM(-6)) - \\
 &0,919212929803 * DLOG(TPM(-7)) - 3,56044267048 * DLOG(TPM(-8)) + 0,134235318312 * DLOG(TPM(-9)) + \\
 &1,419052609 * DLOG(TPM(-10)) + 0,00409359385092 * DLOG(TPM(-11)) - 1,30074443917 * DLOG(TPM(-12)) + \\
 &0,14564984807
 \end{aligned}$$

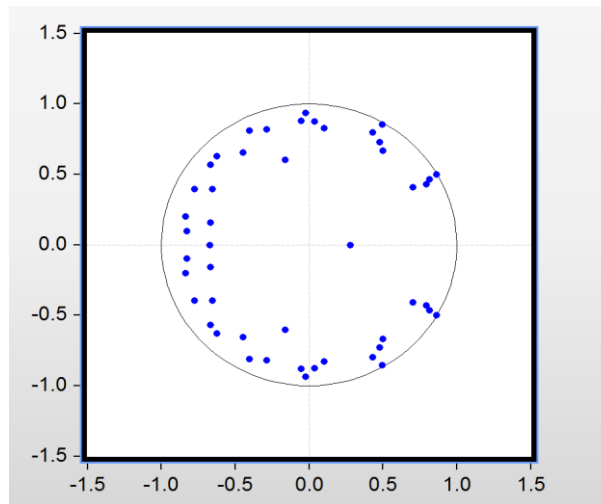
La dernière *Équation (11)* a été l'*Équation* de la Température en fonction de l'Humidité, Evaporation, Précipitation donnée par le *Tableau*.

- $DLOG(TPM) = f(Dlog(EVM), Log(HUM), D(PRM))$  (11)

$$\begin{aligned}
 DLOG(TPM) = &-0,00542273063127 * DLOG(EVM(-1)) - 0,0431624713633 * DLOG(EVM(-2)) - \\
 &0,0197409162343 * DLOG(EVM(-3)) - 0,0731260754659 * DLOG(EVM(-4)) - 0,0940024786772 * DLOG(EVM(-5)) - \\
 &0,0471093934842 * DLOG(EVM(-6)) + 0,0335815522213 * DLOG(EVM(-7)) - 0,0283883303423 * DLOG(EVM(-8)) - \\
 &0,0400572165675 * DLOG(EVM(-9)) - 0,010948036507 * DLOG(EVM(-10)) - 0,0664103502335 * DLOG(EVM(-11)) - \\
 &0,0599936759908 * DLOG(EVM(-12)) - 0,00159138614034 * LOG(HUM(-1)) + 0,00462017255597 * LOG(HUM(-2)) - \\
 &0,0124843213068 * LOG(HUM(-3)) + 0,0105323368397 * LOG(HUM(-4)) + 0,000568684804535 * LOG(HUM(-5)) + \\
 &0,00087660038174 * LOG(HUM(-6)) - 0,0130283417173 * LOG(HUM(-7)) + 0,0076176198651 * LOG(HUM(-8)) + \\
 &0,00308213159877 * LOG(HUM(-9)) + 0,00392266456395 * LOG(HUM(-10)) + 0,0136252579254 * LOG(HUM(-11)) - \\
 &0,00695663522249 * LOG(HUM(-12)) - 0,00101056703804 * D(PRM(-1)) + 0,0065073604321 * D(PRM(-2)) + \\
 &0,0105939293389 * D(PRM(-3)) - 0,00248594933855 * D(PRM(-4)) - 0,00930484109913 * D(PRM(-5)) - \\
 &0,00741074173049 * D(PRM(-6)) - 0,00175078519167 * D(PRM(-7)) - 0,0025921572902 * D(PRM(-8)) + \\
 &0,00513361558399 * D(PRM(-9)) + 0,00600137161984 * D(PRM(-10)) - 0,00138336529817 * D(PRM(-11)) + \\
 &0,000402086492006 * D(PRM(-12)) - 0,325678542514 * DLOG(TPM(-1)) - 0,43439015679 * DLOG(TPM(-2)) - \\
 &0,433376513213 * DLOG(TPM(-3)) - 0,396803587541 * DLOG(TPM(-4)) - 0,506308177707 * DLOG(TPM(-5)) - \\
 &0,495008508104 * DLOG(TPM(-6)) - 0,466030084451 * DLOG(TPM(-7)) - 0,406718257418 * DLOG(TPM(-8)) - \\
 &0,448128293683 * DLOG(TPM(-9)) - 0,431852792695 * DLOG(TPM(-10)) - 0,217600214848 * DLOG(TPM(-11)) - \\
 &0,0880209866498 * DLOG(TPM(-12)) - 0,0153067129987
 \end{aligned}$$

### 3-5-6. Tests de stationnarités

La *Figure 8* ci-dessous montre que les quatre variables sont stationnaires car ses racines des polynômes caractéristiques des variables se trouvent dans un cercle unité.



**Figure 8 :** *Tous les racines de polynômes caractéristiques se trouvent dans un cercle unité ce qui marque que le processus est stationnaires*

### 3-5-7. Test de volatilité

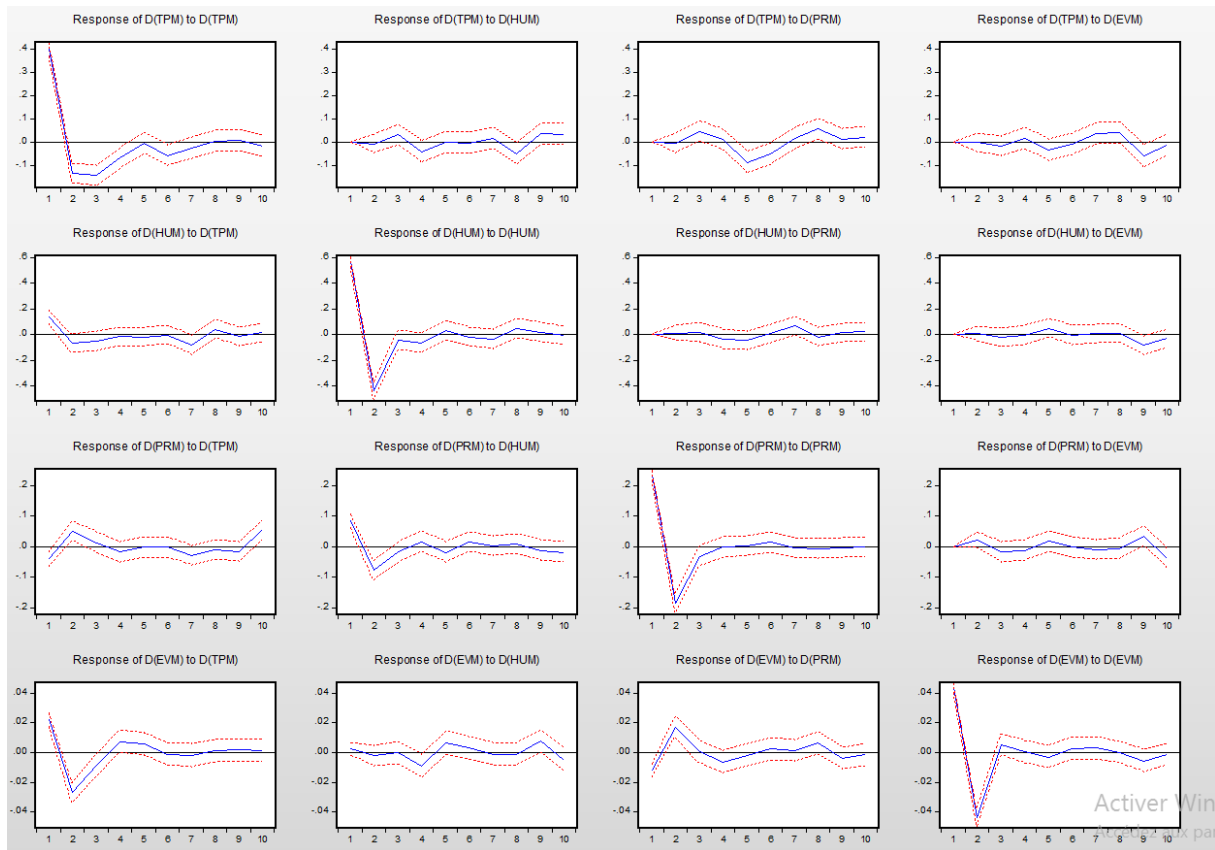
Le **Tableau 4** ci-dessous donnant la probabilité =  $0,00 < 5\%$  alors un processus est homoscedaste, c'est-à-dire la variance est constante.

**Tableau 4 : Probabilité**

Heteroskedasticity Test : ARCH			
F-statistic	51,13479	Prob F (12,418)	0,0000
Obs*R-squared	256,3636	Prob Chi-Square (12)	0,0000

### 3-5-8. Choc impulsif

L'analyse graphique des chocs impulsifs de la série temporelle peut produire un amortissement ou non sur les autres variables [33 - 38]. On a visualisé l'impact d'une variable sur les autres pendant une période déterminée sur les figures ci-dessous. On peut remarquer sur les 16 figures de la **Figure 9** ci-dessous que les conséquences du choc ne sont pas diminuées, ce qui implique que la causalité de chaque variable continue pendant une période mensuelle. Les trois variables exogènes reçoivent le flux sortant de la variable endogène. Par exemple si la température est à la hausse (ou à la baisse) les autres variables exogènes varient aussi au rythme de la variation de la variable endogène. Généralement, d'après la courbe ci-dessous, on constate que la variable endogène donne naissance un choc sur les variables exogènes. De plus on a remarqué sur les 16 figures que chaque courbe donne un pic accentué sur lui-même qui pointe dans le sens négatif au début, après quoi cette courbe subit une montée et varie périodiquement. La forme sinusoïde est donc la conséquence de la variation de la variable endogène.



**Figure 9 : Réponses impulsionnelles des quatre variables**

#### 4. Conclusion

Il a été analysé dans cette étude la liaison causale entre les quatre variables climatiques : Température, précipitation, humidité, évaporation sur la côte ouest de Madagascar. Il a été constaté que les résultats d'analyse statistique des données ont montré l'interdépendance de ces 4 variables mensuelles et l'existence d'une cohérence et la relation causale entre elles, De plus, la méthode de Granger a été vérifiée après le test de chaque couple de variable, ce qui a permis de déterminer les systèmes d'équations de la variable endogène est fonction des variables exogènes, Par exemple, l'augmentation de la température (TPM) peut être considérée comme une source de la sécheresse, et l'augmentation de la précipitation (PRM) entraîne une augmentation l'humidité spécifique (HUM), etc. Cette vision nous a montrée donc que la variation d'une variable est considérée comme un facteur d'un changement climatique, L'impact de cette influence d'une variable aux autres est marqué par le choc impulsionnel pendant une période déterminée.

## Références

- [1] - N. WEHBE, B. ASSAF and S. DARWICH, « Étude de causalité entre la consommation d'électricité et la croissance économique au Liban », *Lebanese Science Journal*, Vol. 19 (3) (2018) 432 - 452
- [2] - P. UGO, « La finance et le développement économique, International Development Policy », *Revue internationale de politique de développement*, World Development, 23 (3) (2012) 433 - 448 p.
- [3] - BARNETT, LIONEL, SETH and K. ANIL, « The MVGC multivariate Granger causality toolbox: a new approach to Granger-causal inference », *Journal of Neuroscience Methods*, 223 (2014) 50 - 68 p., ISSN 0165 - 0270
- [4] - JEAN-FRANÇOIS VERNE, « Brussels Economic Review-Cahiers Economiques de Bruxelles », Vol. 50, N° 3 AUTUMN (2007)
- [5] - C. W. J. GRANGER, « Investigating Causal Relations by Econometric Models, and Cross-Spectral Methods », *Econometrica*, 37 (3) (1969) 424 - 438 p.
- [6] - ARTHUR CHARPENTIER, « COURS DE SERIES TEMPORELLES Théorie et Applications, Modèles linéaires multivariés : VAR et cointégration Introduction aux modèles ARCH et GARCH Introduction à la notion de mémoire longue, Exercices corrigés et compléments informatiques », (2001)
- [7] - M. EL YETTEFTI et O. TAOUAB, « L'Ultime force du Maroc contre la Pandémie », *Revue internationale du Chercheur*, Vol. 1, N° 2 (2020) 435 - 455 p.
- [8] - REGIS BOURBONNAIS, « Économétrie Cours et exercices corrigés », 5 rue Laromiguière, 75005 Paris, www.dunod.com, ISBN 978-2-10-072151-1 © Dunod, (2015)
- [9] - BOUREMA SOULEYMANE TRAORE, SOULEYMANE SANOGO, MARCE, 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*, 5 (4) (2017) 282 - 291
- [10] - LAU, E, CHYE, XIAO-HUI, CHOONG and CHEE-KEONG, « Energy-Growth Causality : Asian Countries Revisited » *International Journal of Energy Economics and Policy*, 1 (4) (2011) 140 - 149
- [11] - J. DLAMINI, M. BALCILAR, R. GUPTA and R. INGLES-LOTZ, « Revisiting the causality between electricity consumption and economic growth in South Africa : a bootstrap rolling window approach » *Int J Econ Policy EmergEcon*, 8 (2) (2015) 169 - 90
- [12] - BERNARD HAUDEVILLE, « Econométrie appliquée », ISBN 2-909455-50-5, ESTEM Éditions Scientifiques, Techniques et Médicales, 5 rue Rousselet, 75007 Paris, (1996)
- [13] - J. GREENWOOD, JOVANOVIĆ, « Financial Development, Growth and the Distribution of Income » *Journal of Political Economy*, Vol. 18, N°5 (1990) 1076 - 1107 p.
- [14] - C. W. J. GRANGER, « Some Aspects of Causal Relationships », *Journal of Econometrics*, 112, (2003) 69 - 71 p.
- [15] - J. DURBIN, « Testing for serial correlation in least-squares regression when some of the regressors are lagged dependent variables », *Econometrica*, 38 (1970) 410 - 421
- [16] - E. L. FEIGE et D. K. PEARCE, « The casual causal relationship between money and income : Some caveats for time series analysis », *Review of Economics and Statistics*, 61 (1979) 521 - 533
- [17] - C. HURLIN, « Testing Granger Causality in Heterogeneous Panel Data Models With Fixed Coefficients », Document de Recherche LEO, (2004)
- [18] - KHALIL FADI, « Causalité entre le taux de change réel et la croissance économique : Application à un panel de pays en développement », Univ, Orléans, CNRS, UMR 7322, LEO, F45067, Orléans, France, (2013)
- [19] - H. Y. TODA and P. C. B. PHILLIPS, « Vector Autoregressions and Causality : A Theoretical Overview and Simulation Study », *Econometric Reviews*, 13 (1994) 259 - 285



- [20] - BARNETT, LIONEL and SETH, K. ANIL, « The MVGC multivariate Granger causality toolbox : a new approach to Granger-causal inference », *Journal of Neuroscience Methods*, 223 (2014) 50 - 68 p., ISSN 0165-0270, This version is available from Sussex Research Online : <http://sro.sussex.ac.uk/id/eprint/49358/>
- [21] - JEAN-FRANÇOIS VERNE, « La Causalité entre la Croissance Economique, le Chômage et les Impôts : une Analyse Revisitée de la Loi d'Okun », BRUSSELS ECONOMIC REVIEW - CAHIERS ECONOMIQUES DE BRUXELLESVOL, Université Saint-Esprit de KASLIK, 50 (3) (2007)
- [22] - L. KONYA, « Exports and growth : Granger causality analysis on OECD countries with a panel data approach, Economic Modelling », Konya, L, Exports and growth : Granger causality analysis on OECD countries with a panel data approach, *Economic Modelling*, 23 (6) (2006) 978 - 992
- [23] - M. LIPPI and L. REICHLIN, « VAR Analysis, Nonfundamental, Representations, Blaschke Matrices », *Journal of Econometrics*, 63 (1994) 644 - 52
- [24] - M. H. PESARAN and Y. SHIN, « Generalized Impulse Response Analysis in Linear Multivariate Models », *Economics Letters*, 58 (1998) 17 - 29
- [25] - S. OULIARIS, A. R. PAGAN and J. RESTREPO, « Quantitative Macroeconomic Modeling with Structural Vector Autoregressions an Eviews Implementation », (2016)
- [26] - C. HAN, P. C. PHILLIPS and D. SUL, « Lag length selection in panel autoregression, Technical report, Working paper, Yale University, (2012)
- [27] - C. EL RHZAOUI et 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.
- [28] - FREDERIC ELIE, « Humidité atmosphérique et précipitations », (2010)
- [29] - EVA MONTEIRO, Météorologie physique, Partie 2 : *Microphysique des nuages*, (2007)
- [30] - JEAN-MARIE DUFOUR et DAVID TESSIER, « La causalité entre la monnaie et le revenu : une analyse fondée sur un modèle VARMA-échelon », *L'Actualité économique*, Vol. 73, N° (1-2-3) (1997) 351 - 366
- [31] - CHRISTOPHE HURLIN, « Un test simple de l'hypothèse de non-causalité dans un modèle de panel hétérogène », *Presses de Sciences Po / « Revue économique »*, Vol. 56, (2005) 799 - 809 p. ISSN 0035-2764, ISBN 2724630084, DOI10.3917/reco.563.0799
- [32] - N. BOURAS & H. FEKIR, « Question de causalité entre le développement financier et la croissance économique » : Cas de l'Algérie (1980 - 2017), *Dirassat Journal Economic Issue*, 11 (2) (2020) 473 - 489 p.
- [33] - JONAS KIB ALAKUMA, « Le Modèle VAR Structurel : Eléments de théorie et pratiques sur logiciels », (2018)
- [34] - S. OULIARIS, A. R. PAGAN and J. RESTREPO, « Quantitative Macroeconomic Modeling with Structural Vector Autoregressions {An Eviews Implementation} », (2016)
- [35] - L. KILIAN, « Small-Sample Confidence Intervals For Impulse Response Functions, » *The Review of Economics and Statistics*, 80 (1998) 218 - 230
- [36] - L. KILIAN, « Exogenous Oil Supply Shocks : How Big Are They and How Much Do They Matter for the U, S, Economy », *Review of Economics and Statistics*, 90 (2008) 216 - 240
- [37] - C. D. ROMER 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
- [38] - SIRIKI COULIBALY, « Energie, croissance et environnement dans l'UEMOA ». (Union Economique et Monétaire Ouest Africaine), Université de Rennes 1, (2014)