



HAL
open science

Tendances et chocs climatiques à La Réunion : utilisation de la base CRU TS version 3.21.

Michaël Goujon, Olivier Santoni, Sosso Feindouno

► To cite this version:

Michaël Goujon, Olivier Santoni, Sosso Feindouno. Tendances et chocs climatiques à La Réunion : utilisation de la base CRU TS version 3.21.. 2015. halshs-01150853

HAL Id: halshs-01150853

<https://shs.hal.science/halshs-01150853v1>

Preprint submitted on 12 May 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



CENTRE D'ETUDES
ET DE RECHERCHES
SUR LE DEVELOPPEMENT
INTERNATIONAL

SERIE ETUDES ET DOCUMENTS

Tendances et chocs climatiques à La Réunion : utilisation de la base CRU TS version 3.21.

Sosso Feindouno

Michaël Goujon

Olivier Santoni

Etudes et Documents n° 10

Mai 2015

To cite this document:

Feindouno S., Goujon M., Santoni O. (2015) "Tendances et chocs climatiques à La Réunion : utilisation de la base CRU TS version 3.21.", *Etudes et Documents*, n° 10, CERDI.

http://cerdi.org/production/show/id/1681/type_production_id/1

CERDI
65 BD. F. MITTERRAND
63000 CLERMONT FERRAND – FRANCE
TEL. + 33 4 73 17 74 00
FAX + 33 4 73 17 74 28
www.cerdi.org

The authors

Sosso Feindouno
Research Assistant
FERDI, 63 Boulevard François Mitterrand, 63000 Clermont-Ferrand
Email : osso.feindouno@ferdi.fr

Michaël Goujon
Associate Professor
Clermont Université, Université d'Auvergne, CNRS, UMR 6587, CERDI, F-63009 Clermont Fd
Email : michael.goujon@udamail.fr

Olivier Santoni
Research Assistant
Clermont Université, Université d'Auvergne, CNRS, UMR 6587, CERDI, F-63009 Clermont Fd
Email : Olivier.SANTONI@ext.udamail.fr

Corresponding author: Michaël Goujon



This work was supported by the LABEX IDGM+ (ANR-10-LABX-14-01) within the program “Investissements d’Avenir” operated by the French National Research Agency (ANR)

Etudes et Documents are available online at: <http://www.cerdi.org/ed>

Director of Publication: Vianney Dequiedt
Editor: Catherine Araujo Bonjean
Publisher: Chantal Brige-Ukpong
ISSN: 2114 - 7957

Disclaimer:

Etudes et Documents is a working papers series. Working Papers are not refereed, they constitute research in progress. Responsibility for the contents and opinions expressed in the working papers rests solely with the authors. Comments and suggestions are welcome and should be addressed to the authors.

Abstract

Nous proposons une analyse statistique de séries mensuelles de précipitations et températures géolocalisées pour la Réunion et trois comparateurs (Maurice, Mayotte et les Comores) couvrant la période 1950-2012. Nous utilisons et traitons des données primaires de la base internationale Climate Research Unit version 3 – University of East Anglia, et calculons différents indicateurs statistiques pour mesurer les tendances, les chocs, l'asymétrie de la distribution, l'occurrence des valeurs extrêmes, les tendances dans l'instabilité. Nos résultats montrent l'existence d'une tendance positive et significative dans les températures. En revanche, aucune tendance significative dans les précipitations n'est observée, exceptée pour Maurice où la tendance semble négative. L'instabilité des températures et de précipitations connaît quant à elle une tendance à la baisse, particulièrement ces dernières années. Une analyse par mois de l'année confirme ces résultats globaux mais met en évidence une forte instabilité des précipitations et des températures pour certains mois.

Key words: températures, précipitations, tendances, chocs, instabilité, petites îles, océan indien

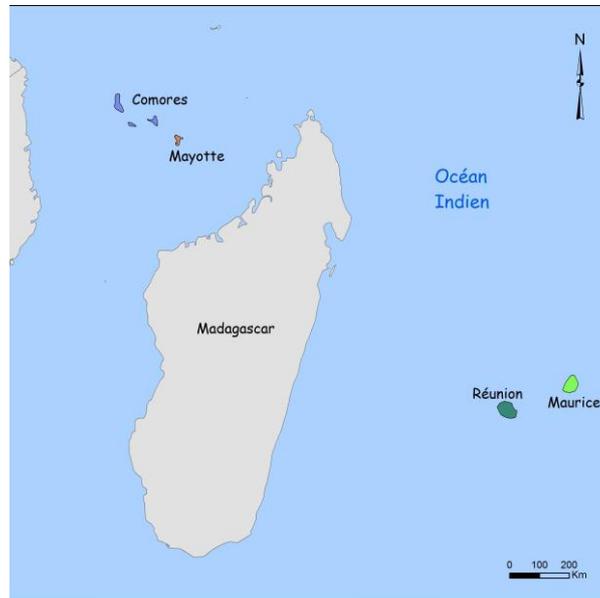
JEL codes: Q54, C22

Acknowledgment

Les auteurs remercient pour leurs commentaires les participants aux Journées Internationales Droit, Economie et Gestion de l'Eau dans la Zone de l'Océan Indien (DEGEZOI) – 30-31 octobre 2014 – Saint-Denis-de-La-Réunion.

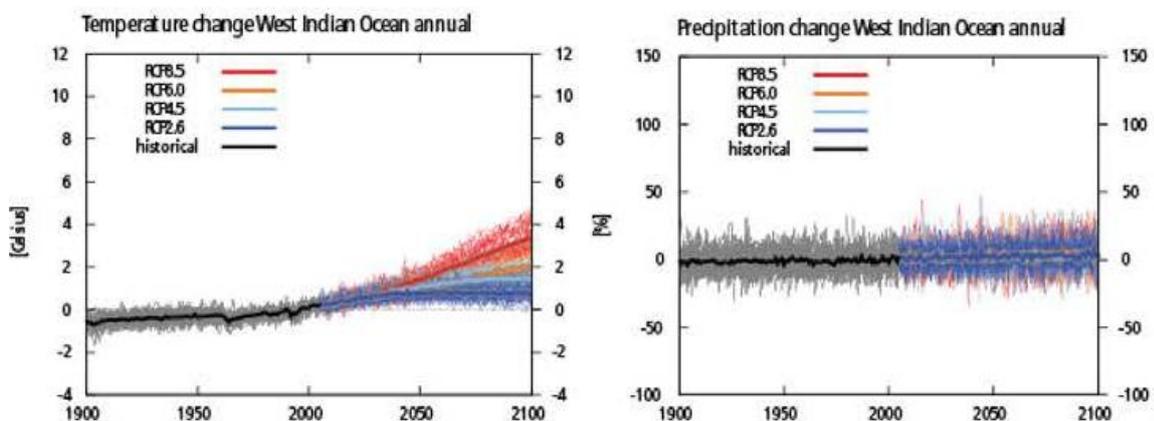
Tendances et chocs climatiques à La Réunion : utilisation de la base CRU TS version 3.21.

Cette version : mai 2015



Introduction

Les rapports internationaux sur l'évolution du climat soulignent que les petites îles sont trop petites pour que les modèles globaux en simulent les évolutions climatiques détaillées. Ces rapports relèvent également que les études locales restent rares. Cependant, il est généralement admis que ces îles ont connu une hausse significative des températures, bien qu'elle ait été, au niveau global, plus élevée sur les continents que sur les océans (GIEC, 2007). Si la hausse des températures ne fait aucun doute, une grande incertitude demeure encore sur la tendance des précipitations, bien qu'il soit attendu que les schémas ou régimes pluviométriques ainsi que les aléas cycloniques soient affectés. Ces résultats valent aussi au niveau régional dans l'Ouest de l'Océan Indien (GIEC, 2014).



Source : GIEC (2014)

Dans les petites îles de l'Océan Indien situées en zone tropicale, les températures moyennes et les précipitations sont élevées avec des variations saisonnières importantes. La géographie et le relief

affectent considérablement les régimes climatiques de ces îles même si d'une île à une autre (et même dans les régions d'une même île) des différences peuvent être observées. De même, ces îles font souvent face à des événements climatiques extrêmes saisonniers (tels que les cyclones), qui peuvent subir des évolutions interannuelles (MEDDE, 2012)¹. Si des tendances climatiques apparaissent (augmentation des températures, chocs de précipitations plus importants), ces rapports relèvent que le manque de données historiques fiables limite l'analyse statistique de ces évolutions.²

Pour La Réunion par exemple, en utilisant des données issues de six stations sur la période 1969-2008, Météo-France (2009) trouve une tendance à la hausse de la température moyenne de l'île de +0,62°C avec une hausse plus marquée sur les mois de mars-avril-mai. Le MEDDE (2012) souligne qu'en tenant compte des années 2009 à 2011 et d'un nouveau travail d'homogénéisation des données, la hausse semble être plus marquée encore (pouvant dépasser + 1 °C dans certaines zones). Cette hausse des températures de 1°C est aussi avancée par Météo-France sur son site internet régional (calcul sur 8 postes météo, sur la période 1969-2012). La baisse des précipitations (données issues d'une cinquantaine de stations) est constatée à La Réunion mais uniquement dans les régions de l'ouest, du sud-ouest et du sud de l'île. Les mois d'hiver austral ont connu une baisse généralisée des précipitations. Enfin, aucune tendance robuste n'apparaît sur la fréquence des épisodes de précipitations extrêmes (Météo-France, 2009).

Goujon et al. (2015) utilisent des données tirées d'une base internationale de données géolocalisées de températures et de précipitations couvrant la période 1950-2011. L'étude porte sur un ensemble de 80 petites îles et les résultats, basés sur des moyennes à l'échelle du territoire, sont présentés pour une vingtaine d'entre elles dont les Départements et Collectivités d'Outre-Mer. Les principaux résultats sont les suivants.

Ces îles ont toutes subi une montée des températures moyennes dans les soixante dernières années, mais l'amplitude est variable, de 0,3°C (Wallis et Futuna) à 2,2°C (Martinique). Les territoires des Antilles sont les plus touchés avec une hausse d'au moins 1°C. Saint-Pierre-et-Miquelon, territoire le plus froid, est celui qui subit le plus fort réchauffement en termes relatifs (+12% de la température moyenne). Les Comores et Mayotte font partie des îles qui connaissent une augmentation des températures faible (+0,3-0,4°C) et la Réunion et Maurice une augmentation moyenne (+0,9 et 1,2°C respectivement). Les territoires diffèrent également en termes de chocs de température subis, mais les résultats ne montrent pas d'évolution évidente de l'instabilité.

¹ S'agissant des travaux nationaux portant sur les Départements et Collectivités d'Outre-Mer, un certain nombre d'éléments, tirés notamment de travaux de Météo-France, sont repris par l'ONERC (Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, 2012 et 2014), et le MEDDE (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2012 et 2014).

² Les données brutes de températures et de précipitations aux stations peuvent être affectées de ruptures méthodologiques. Ces données doivent être homogénéisées et corrigées, et certaines peuvent aussi être écartées (voir discussion dans MEDDE, 2012).

Les DCOM et leurs comparateurs diffèrent quant à la tendance des précipitations sur les 60 dernières années. Les Antilles, qui pour rappel ont subi une hausse importante de températures, apparaissent également parmi les territoires ayant connu les plus importantes augmentations de précipitations. A la différence des Comores, de Mayotte et de la Réunion, Maurice présente une baisse des précipitations significative. Si la Réunion a des résultats modérés en termes de moyenne et de tendance (positive mais non significative) des précipitations, elle présente de loin l'instabilité la plus forte (avec accessoirement un record mensuel de précipitations au-delà du mètre). L'instabilité des précipitations semble croître dans les Antilles, alors qu'aucune tendance significative n'apparaît dans l'Océan Indien.

Nous utilisons ici la version actualisée de la base de données CRU-TS (incluant les données pour l'année 2012) en nous focalisant sur La Réunion et trois comparateurs : Maurice, Mayotte et Comores. Les questions auxquelles nous tentons de répondre sont usuelles : constate-t-on une dégradation des conditions climatiques, sous la forme d'une tendance à la hausse des températures, ou d'une baisse des précipitations, ou d'une amplification de l'instabilité ? Les évolutions constatées pour la Réunion sont-elles semblables ou différentes de celles des autres petites îles de la région ?

Nous voyons deux avantages à l'utilisation de ces données internationales : elles sont disponibles en accès libre (à la différence des données historiques de Météo-France) et permettent une analyse comparative entre territoires. La question est alors de savoir si les conclusions tirées de l'analyse de ces données sont similaires à celles des travaux basés sur des données nationales, comme ceux de Météo-France pour la Réunion par exemple. En effet, si tel était le cas, cela nous rassurerait sur la fiabilité et la pertinence de ces données internationales, et nous amènerait à les considérer avec intérêt pour des territoires moins couverts historiquement par les données nationales, comme Mayotte par exemple.

Les indicateurs statistiques utilisés et les données sont discutés dans Guillaumont et Simonet (2011, 2013) et Goujon et al. (2015). Alors que ces données couvrent la période 1901-2012, nous calculons les statistiques sur la période 1950-2012, 1950 étant considéré comme le début du changement climatique. Dans une première section, nous présentons les données de la base CRU TS et leur traitement. Dans une seconde section, nous détaillons les indicateurs permettant de calculer les tendances et les chocs. Dans une troisième section nous exposons et commentons les résultats obtenus.

1. Le calcul de séries mensuelles territorialisées de températures et précipitations

Dans notre étude nous utilisons des données mensuelles de précipitations et de températures provenant de la base Climate Research Unit (CRU TS version 3.21 – University of East Anglia ; voir Harris et al., 2014, Mitchell et al, 2002 et 2004, Mitchell et Jones, 2005). Cette base de données est l'une des plus utilisées à l'heure actuelle, notamment pour les travaux sur le changement climatique et leurs conséquences économiques (Dell et al., 2014)³. Les données brutes géolocalisées de CRU TS se rapportent à un quadrillage de 0,5° latitude et longitude (environ 50X50 km à l'Equateur). Chaque cellule du quadrillage a une donnée climatique pour chaque mois sur la période 1901-2012 générée par interpolation (géographique, non temporelle).⁴ A partir de ces données par cellule, nous calculons des moyennes pondérées pour obtenir des données par territoires (voir encadré). Les données mensuelles territorialisées de températures et de précipitations que nous obtenons pour La Réunion, Mayotte, Maurice et Comores sont reportées dans le graphique 1.⁵

³ Le CRU travaille étroitement avec le GIEC. Les rapports du GIEC font référence à ces données comme faisant partie de celles qu'il utilise dans ses rapports. Le GIEC utilise aussi CRUTEM qui est une autre version de la base CRU. CRU TS et CRU TEM utilisent les mêmes données brutes. La base CRUTEM a une résolution moins fine de 5X5 ° (500X500 km environ). Les cellules ne sont renseignées que si au moins une station est physiquement présente pour le mois étudié. Ainsi, il y a moins d'interpolations mais le nombre de cellules et leur répartition changent chaque mois. Si cette base est utilisable pour étudier les tendances au niveau global, elle ne peut l'être au niveau des pays. Les précipitations ne sont disponibles que jusqu'en 1998. L'occurrence de *Climate Research Unit (CRU) version 3 – University of East Anglia* est d'environ 3400 résultats dans Google Scholar au 29 septembre 2014.

⁴ Chacune de ces données correspond à une moyenne pondérée des observations de stations situées dans la cellule, et d'observations de stations en dehors mais proches de la cellule. Les poids dans la moyenne des données de stations sont fonctions de la corrélation observée en général entre les données des stations, corrélation qui est une fonction inverse de la distance entre ces stations. Il est défini un seuil (le correlation decay distance, pour laquelle la corrélation estimée entre une station et toutes les autres stations décroît en-dessous de 1/e soit 0,368 ; Briffa and Jones, 1993 ; Jones et al., 1997) au-delà duquel le poids de la station est nul (car elle est trop distante et n'a plus de corrélation significative avec les stations de la cellule). Ce seuil est différent pour les précipitations (450kms) et les températures (1200kms).

⁵ Les données de températures et de précipitations que nous obtenons, reportées dans le graphique 1, sont des moyennes mensuelles et par territoire, et ne rendent donc pas compte parfaitement des événements climatiques infra-mensuels et/ou à une échelle plus petite (sous-régions d'une île).

Encadré : Calculs des données territorialisées à partir des données par cellule de CRU-TS

Une double pondération est appliquée afin d’obtenir les données territorialisées :

1- Le quadrillage du globe étant défini par les latitudes et longitudes, la surface des quadrillages diminue à mesure que l’on s’éloigne de l’Equateur (Fig. 1), devenant de plus en plus étroites. Comme il est usuel de le faire, les données des cellules sont alors pondérées par le cosinus de leur latitude exprimée en radian, de telle manière que les données des cellules plus éloignées de l’Equateur ont un poids moins important dans le calcul de la moyenne pour le territoire (pour une cellule collant à l’équateur, le poids est très proche de 1, et pour une cellule collant au pôle nord ou sud le poids est très proche de zéro). Par exemple, pour les territoires situés dans l’hémisphère sud, les cellules sud ayant une surface moins importante que les cellules nord, on donne un poids moins important aux données des cellules sud.

2- Pour tenir compte précisément des frontières des pays (Fig. 2), les données des cellules sont également pondérées par la proportion qu’occupe le territoire dans la cellule, notée α . Si la cellule s’insère entièrement dans le territoire k alors $\alpha = 1$ (ou 100%) ; α_{ik} est inférieur à 1 si le territoire k ne couvre pas entièrement la cellule. La Réunion par exemple couvre quatre cellules, mais couvre une proportion plus importante de la cellule Sud-Est par rapport aux trois autres ; le poids de la donnée de la cellule Sud-Est sera donc plus important que celui de chacune des trois autres cellules dans la moyenne.

Il est donc défini pour chaque cellule appartenant à un territoire (donnée y_{ik} pour cellule i appartenant au territoire k) un coefficient-poids égal à :

$$\text{Poids}_{ik} = \cosinus(\text{latitude}_i) \times \alpha_{ik}$$

Avec latitude_i la latitude de la cellule i et α_{ik} la proportion du territoire k dans la cellule i.

La donnée pour le territoire k pour la variable d’intérêt y (températures ou précipitations), est alors, pour un territoire k constitué de N cellules i (à chaque cellule i appartenant à k correspond une donnée y_{ik}), la moyenne pondérée suivante :

$$y_k = \frac{\sum_{i=1}^N \text{Poids}_{ik} \cdot y_{ik}}{\sum_{i=1}^N \text{Poids}_{ik}}$$

Fig. 1 : quadrillage 0,5°x0,5° en Europe

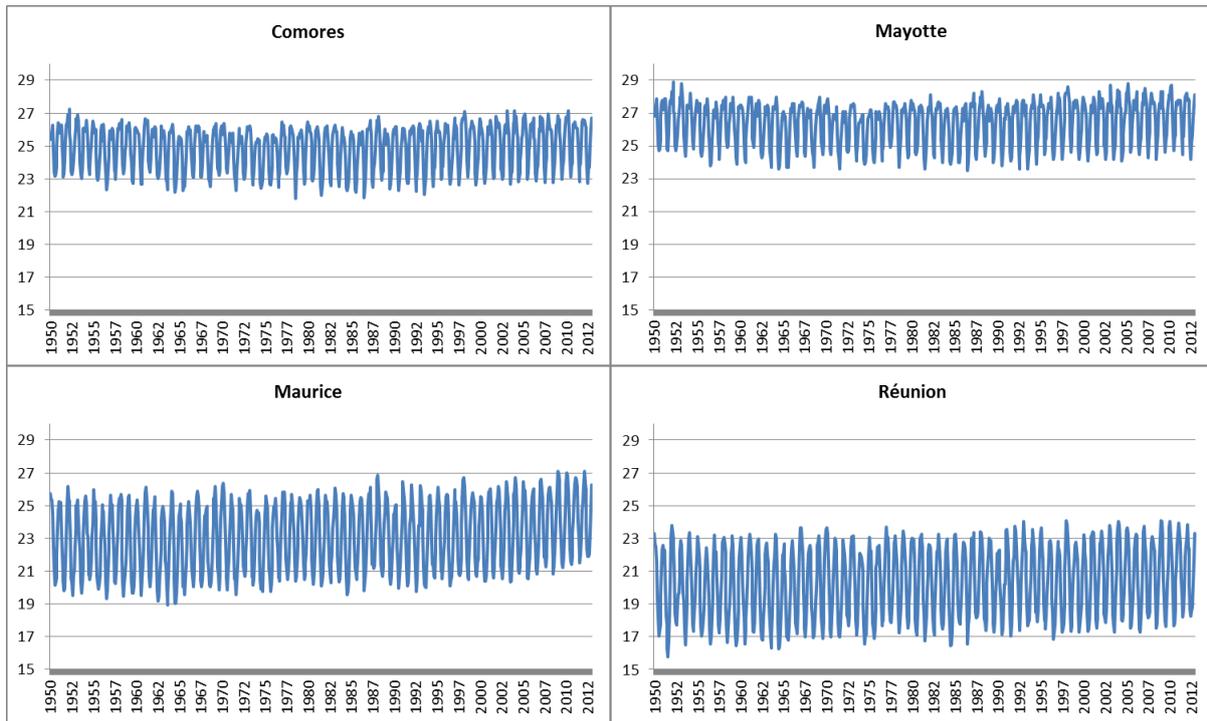


Fig.2 : découpage par les frontières

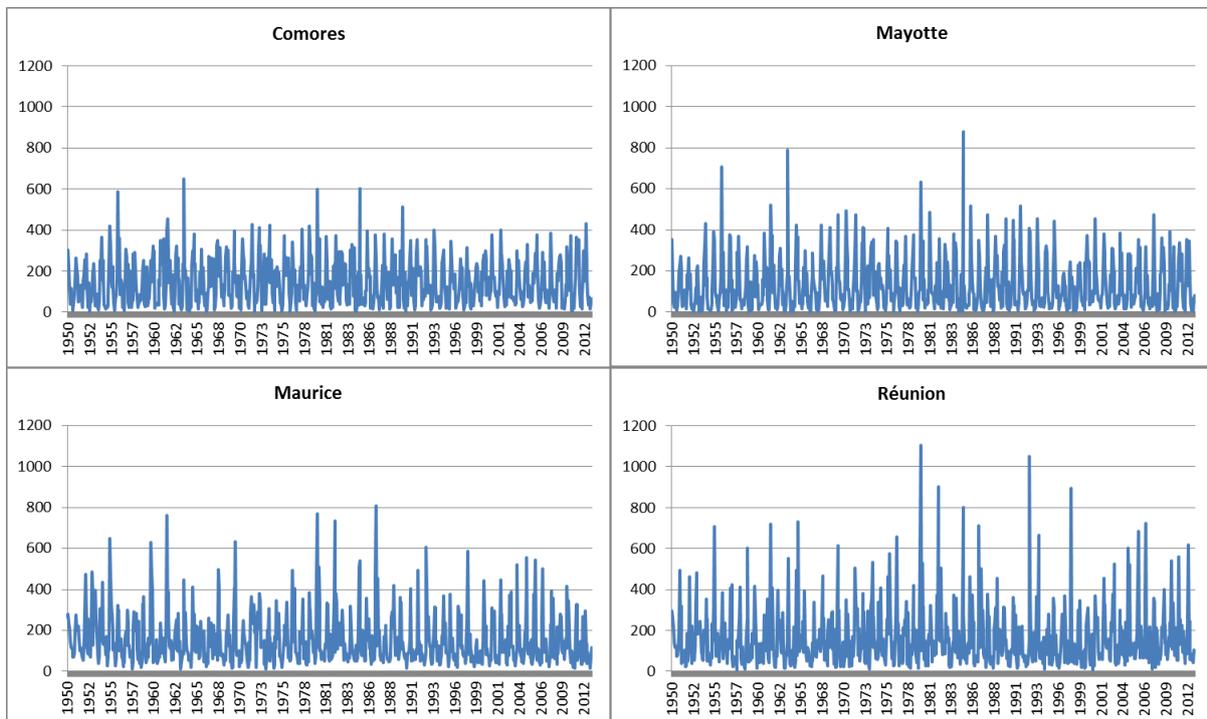


Graphique 1 : Séries mensuelles des températures et précipitations, 1950-2012

Températures en °C



Précipitations en millimètres



Sources : Calculs des auteurs à partir des données CRU TS version 3.21 – University of East Anglia

2. Mesurer les tendances et l'instabilité

Météo-France présente des calculs de tendances et d'écart à la normale saisonnière des précipitations et températures mensuelles (résultats présentés dans ses Bulletins Climatiques, ainsi que dans certains numéros des « Chroniques de l'Eau » de l'Office de l'Eau de La Réunion). Si notre calcul est identique pour les tendances, il diffère s'agissant des instabilités. La « normale » est calculée par Météo-France comme la simple moyenne sur une période passée (1980-2010, ou 1991-2010). Il est également relevé les événements extrêmes ou « anomalies » (écarts à la normale très élevés) et des tendances dans ces écarts. Ici nous employons une mesure de la « normale » ou de l'« attendu » moins restrictive, incluant l'éventuelle tendance linéaire dans les données (qui serait due au changement climatique). Dans les cas où la tendance est nulle (n'est pas significativement différente de zéro), on revient à la mesure de la « normale » par la simple moyenne de Météo-France. Les indicateurs statistiques utilisés sont discutés dans Guillaumont et Simonet (2011, 2013) et Goujon et al. (2015).

Les données CRU TS couvrent la période 1901-2012, mais nous nous restreignons à la période 1950-2012, l'année 1950 étant considéré comme marquant le début du changement climatique (même si une accélération plus marquée du changement climatique est observée à partir des années 1970, ce qui pourrait susciter un intérêt pour des calculs sur la période 1970-2012).

Tendances comparées

Pour chaque territoire, nous isolons la tendance (supposée linéaire) dans les températures et précipitations suivant la formule (sans muette saisonnière dans un premier temps) :

$$y_t = \alpha + \beta \cdot trend + \varepsilon_t$$

Avec y la variable d'intérêt (températures ou précipitations mensuelles), α la constante, $trend$ est la tendance déterministe avec $t = 0, 1, \dots, 755$ (mois de janvier 1950 à décembre 2012), ε le terme d'erreur.

La Tendance est le paramètre $\hat{\beta}$ estimé du trend. Il mesure la variation mensuelle moyenne de y constatée sur la période.

L'Ordonnée à l'origine est \hat{y}_0 la valeur de y estimée quand $t=0$, soit $\hat{\alpha}$. Elle mesure la valeur moyenne en début de période, compte tenu de la tendance.

L'Ordonnée en fin de période est la valeur estimée \widehat{y}_{755} quand $t=755$. Elle mesure la valeur moyenne en fin de période, compte tenu de la tendance.

La Différence = $\widehat{y}_{755} - \hat{y}_0 = \hat{\beta} \times 755$ est la variation de y moyen entre le début et la fin de période. Elle peut également s'exprimer en pourcentage.

Ampleur de l'instabilité

L'écart type est une mesure de la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne (valeur moyenne) :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n}}$$

Asymétrie de l'instabilité

Le coefficient d'asymétrie caractérise le degré d'asymétrie d'une distribution par rapport à sa moyenne. Une asymétrie positive indique une distribution unilatérale décalée vers les valeurs les plus positives (les chocs positifs sont plus nombreux). Une asymétrie négative indique une distribution unilatérale décalée vers les valeurs les plus négatives (la plupart des chocs sont négatifs).

$$\frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s} \right)^3$$

Occurrence des valeurs extrêmes

Le kurtosis caractérise la forme de pic ou l'aplatissement relatif d'une distribution comparée à une distribution normale (le kurtosis d'une loi normale étant égal à 3). Un excès de kurtosis positif indique une distribution relativement pointue (beaucoup d'observations proches de la moyenne), tandis qu'un coefficient d'excès de kurtosis négatif signale une distribution relativement aplatie (observations relativement éloignées de part et d'autre de la moyenne).

$$\left\{ \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s} \right)^4 \right\} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}$$

Chocs et tendances dans l'instabilité

La tendance est calculée sur une série mensuelle, en prenant en compte la saisonnalité :

$$y_t = \alpha + \beta \cdot trend + \gamma \cdot S_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

Avec y_t les données mensuelles (précipitations ou températures), t la tendance déterministe, S un vecteur de muettes saisonnières (γ le vecteur de leurs coefficients), ε_t les résidus. La Tendance est le paramètre $\hat{\beta}$ estimé du *trend*.⁶ Dans les résultats, nous présentons le t-Student et la probabilité associée permettant de tester si la tendance est significativement différente de zéro (la tendance est significativement différente de zéro si la probabilité associée est faible, i.e. inférieure à 0,10).

Les chocs sont définis comme les écarts (en valeur absolue) entre la valeur observée et la valeur attendue selon la régression (1), soit $\hat{\varepsilon}_t = y_t - \hat{y}_t$, s'écartant d'au moins deux écart-types de la moyenne de la série $\hat{\varepsilon}_t$:⁷

$$\text{Choc} = 1 \text{ si valeur absolue } (\hat{\varepsilon}_t) > \text{moyenne } (\hat{\varepsilon}_t) + 2 \text{ écarts-types } (\hat{\varepsilon}_t) \quad (2)$$

Il est ainsi détecté un nombre de chocs pour chaque série.⁸

L'instabilité de la série y_t est mesurée par la série des résidus $\hat{\varepsilon}_t$ en valeur absolue.

⁶ NB : Pour les séries par mois, le terme $\gamma \cdot S_t$ n'apparaît pas dans la régression

⁷ Par définition la moyenne est égale 0

⁸ Le calcul est donc relatif ; le seuil de 2 écart-types est propre à chaque territoire.

La tendance dans l'instabilité est la tendance dans la série des résidus $\hat{\epsilon}_t$ en valeur absolue issus de la régression (1), suivant la régression suivante⁹ :

$$\text{Valeur absolue } (\hat{\epsilon}_t) = \mu + \pi \cdot \text{trend} + \epsilon_t \quad (3)$$

Avec μ la constante, *trend* est la tendance déterministe avec $t = 0, 1, \dots, 755$ (mois de janvier 1950 à décembre 2012), ϵ le terme d'erreur. La Tendance dans l'instabilité est le paramètre $\hat{\pi}$ estimé du trend, dont on présente la probabilité associée (la tendance est significativement différente de zéro si la probabilité associée est faible, i.e. inférieure à 0,10).

3. Résultats des calculs de tendances et d'instabilité

Températures

Les températures sont en moyenne plus élevées à Mayotte et aux Comores, mais sont plus variables à Maurice et à la Réunion. Pour les quatre îles, on distingue une distribution des températures en « double-cloche » traduisant les deux saisons typiques en milieu tropical (graphique 2). Le coefficient d'asymétrie est négatif (et la médiane supérieure à la moyenne) signalant la dominance de chocs négatifs, et est plus élevé à Mayotte et aux Comores (tableau 1). Les séries présentent un kurtosis négatif signalant une distribution relativement aplatie (observations relativement éloignées de part et d'autre de la moyenne, voir graphiques suivants sur les distributions).

Globalement, nous notons la présence d'une tendance positive et significative des températures dans les soixante dernières années pour les quatre îles (tableau 1 et 2). L'amplitude de l'augmentation des températures moyennes est cependant variable, de 0,3°C à Mayotte et aux Comores, de 0,9°C à La Réunion et de 1,2°C à Maurice. Ces résultats sont expliqués principalement par l'augmentation rapide des températures enregistrées depuis le milieu des années 1980. Sur 63 ans, les quatre îles enregistrent à peu près le même nombre de chocs de températures, avec un peu moins de chocs pour Maurice (tableau 3). De façon générale, les tendances dans l'instabilité sont négatives et significatives pour la Réunion et Mayotte. Ces îles subissent moins de chocs ces dernières années (graphique 3). Depuis le début des années 2000, la Réunion n'a en fait connu aucun choc, tels qu'ils sont définis ici.

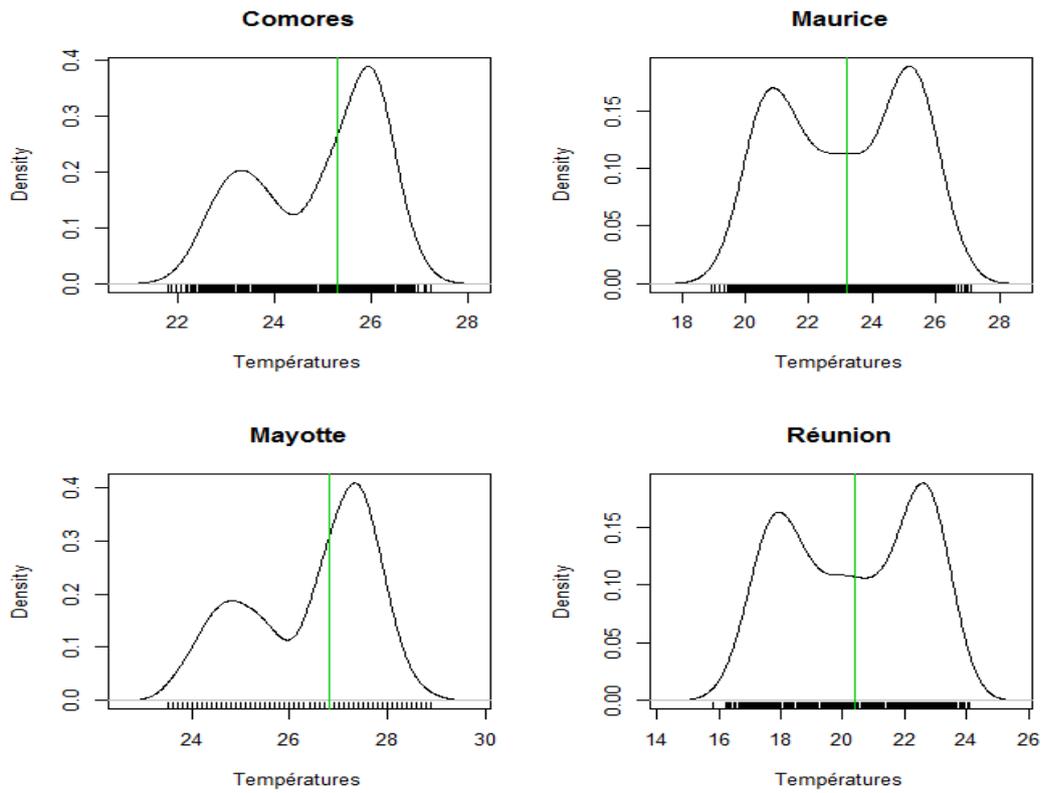
Précipitations

Les précipitations mensuelles sont en moyenne plus fortes à Maurice et à la Réunion (tableau 1). Cette dernière présente la variabilité la plus forte et un record à 1100mm en janvier 1980. Le coefficient d'asymétrie est positif (et la médiane est inférieure à la moyenne), révélant des chocs plutôt positifs.

⁹ Guillaumont et Simonet (2011, 2013) se focalisent sur les pays africains pour lesquels le problème principal est celui de la désertification. Ils ne prennent en compte que les chocs négatifs pour les précipitations et positifs pour les températures. Dans notre étude, suivant Goujon et al. (2013), nous faisons un choix différent en reprenant la formule plus générale ci-dessus où la tendance est calculée sur l'ensemble des chocs (écarts absolus), positifs et négatifs.

Le kurtosis des précipitations est positif ce qui indique une distribution relativement pointue, particulièrement à la Réunion et à Maurice (beaucoup d'observations proches de la moyenne, graphique 2 et tableau 1). Contrairement aux températures, les précipitations mensuelles sont dépourvues de tendance significative, exception faite de Maurice qui connaît une tendance négative des précipitations, surtout marquée à partir du début des années 1990 (tableau 2). Quant aux chocs de pluviométrie, tels que nous les définissons, ils sont moins nombreux à la Réunion par rapport aux trois autres îles (tableau 3 et graphique 3). En outre, les tendances dans l'instabilité des précipitations ne sont significatives pour aucune des quatre îles.

Graphique 2. Distribution des températures mensuelles de 1950 à 2012



Distribution des précipitations mensuelles de 1950 à 2012

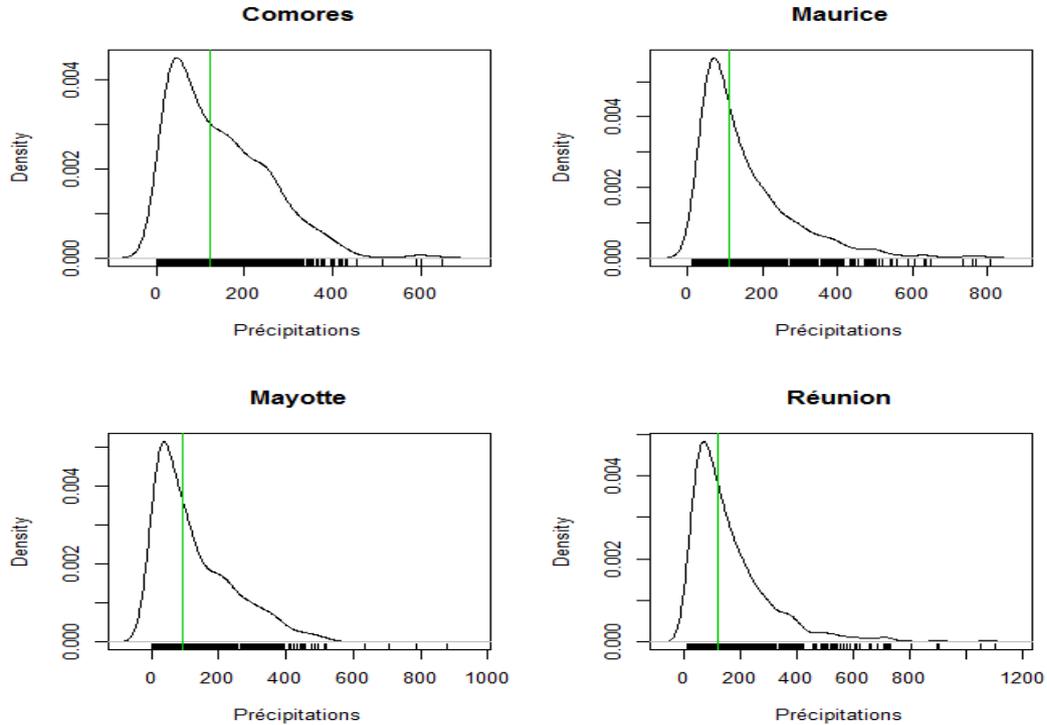


Tableau 1. Statistiques simples, 756 observations

Températures					Précipitations				
	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		Comores	Mayotte	Maurice	Réunion
moyenne	24,9	26,4	23,1	20,3	moyenne	144,6	130,0	153,6	163,8
écart-type	1,31	1,28	2,07	2,17	écart-type	109,3	123,9	123,8	145,6
max	27,2	28,9	27,1	24,1	max	648,1	878,9	808,9	1103,5
min	21,8	23,5	18,9	15,8	min	2,06	0,10	10,93	7,57
médiane	25,3	26,8	23,2	20,4	médiane	122,2	90,8	113,4	119,3
asymétrie	-0,44	-0,51	-0,05	-0,08	asymétrie	0,97	1,55	1,81	2,23
kurtosis	-1,10	-0,97	-1,33	-1,37	kurtosis	0,97	3,39	4,15	7,24
tendance	0,0004	0,0005	0,0017	0,0012	tendance	-0,0036	0,0026	-0,0452	0,0057
origine	24,8	26,2	22,5	19,9	origine	146,0	129,1	170,7	161,6
fin	25,1	26,6	23,8	20,8	fin	143,3	131,0	137,1	165,9
différence	0,29	0,38	1,25	0,92	différence	-2,66	1,93	-33,61	4,26
diff%	1,15	1,45	5,57	4,63	diff%	-1,82	1,49	-19,69	2,64

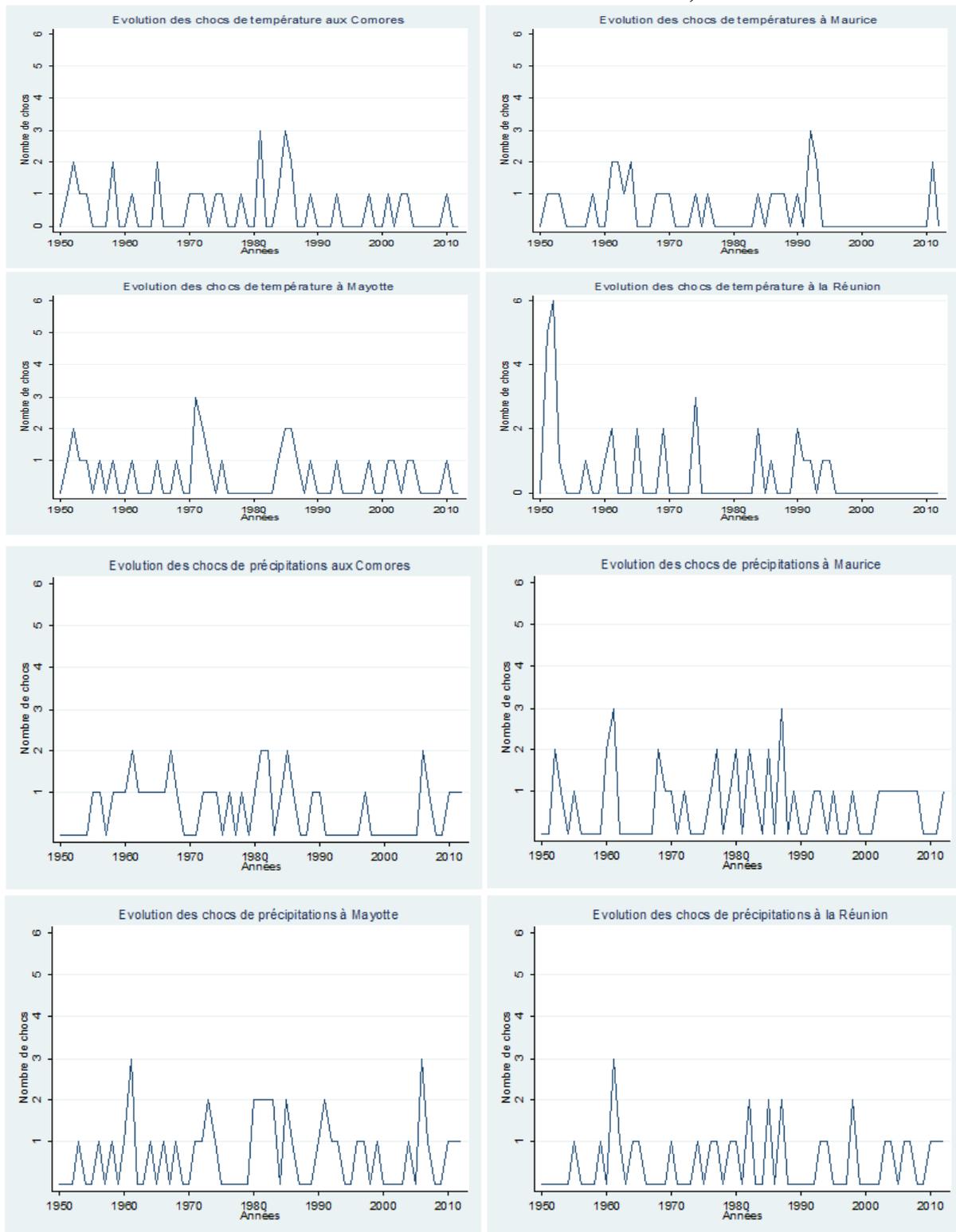
Tableau 2. Tendances (avec saisonnalité) – 756 observations

Températures					Précipitations				
	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		Comores	Mayotte	Maurice	Réunion
Tendance	0,0004	0,0005	0,0017	0,0013	Tendance	0,0008	0,0071	-0,0408	0,0100
t-Student	5,83	7,19	20,63	15,4	t-Student	0,07	0,56	2,71	0,53
proba	0,000	0,000	0,000	0,000	proba	0,945	0,576	0,007	0,594
R ²	0,90	0,89	0,95	0,95	R ²	0,51	0,58	0,40	0,31

Tableau 3. Nombre de chocs et tendances dans l'instabilité – 756 observations

Températures					Précipitations				
	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		Comores	Mayotte	Maurice	Réunion
Nbre chocs	32	31	28	32	Nbre chocs	38	42	41	31
Tendance	-0,0001	-0,0001	0	-0,0002	Tendance	-0,0083	-0,0029	-0,0117	0,002
proba	0,067	0,012	0,381	0	proba	0,33	0,77	0,31	0,89

Graphique 3. Nombre des chocs de températures et de précipitations par année (sur série mensuelle à 756 observations)



4. Résultats selon les mois de l'année

Les études utilisant des données nationales (Météo-France, 2009, MEDDE, 2012) ont identifié des différences notables de résultats selon les mois de l'année, ce que nous cherchons à vérifier ici sur les séries CRU-TS pour chaque mois de l'année de janvier à décembre (Annexe - graphique 5).

Températures

Les courbes des températures selon les mois de l'année transcrivent les variations saisonnières connues en zone tropicale, avec des températures élevées d'octobre à mars, et plus faible en juin, juillet, août (Annexe - graphique 6). Il semble apparaître une plus forte instabilité des températures pendant les premiers mois et au milieu de l'année (une amplitude en moyenne de 2°C). Comme le montre le tableau 5, Maurice présente la plus forte instabilité sur tous les mois avec en moyenne un écart-type de 0,60°C, quelque fois surpassée par la Réunion (en mai-juin, les autres mois l'écart-type est d'environ 0,55°C). Les Comores et Mayotte présentent un écart-type plus faible, de l'ordre de 0,35 à 0,50°C. Les coefficients d'asymétrie sont relativement faibles, ne révélant donc pas de dominance de chocs positifs ou négatifs. Les coefficients d'excès de kurtosis sont la plupart du temps faibles et négatifs, traduisant des distributions (faiblement) aplaties. Les Comores et Mayotte ont des distributions semblables de même que la Réunion et Maurice.

Pour La Réunion et Maurice, la hausse des températures est significative pour l'ensemble des mois de l'année (particulièrement en avril-mai pour La Réunion) alors que pour les Comores et Mayotte, cette hausse n'est clairement significative que dans les mois de novembre à février, ainsi qu'en mai et août.

Le tableau 7 montre que les chocs sont globalement peu nombreux dans ces îles avec des fréquences relativement plus élevées à la Réunion (mois de Juin) et à Mayotte (mois de Mars) et plus faibles pour Maurice et Comores (aucun choc durant les mois d'Août et Octobre pour les deux îles ; 1 seul choc pour les mois de Juillet à Maurice). Toutefois, les tendances dans l'instabilité sont significativement négatives à la Réunion pendant le mois d'avril; et aux Comores, à Mayotte en Mai, Juillet et Septembre.

Précipitations

Les précipitations présentent une variabilité relativement forte, particulièrement dans les premiers mois de l'année. Presque systématiquement, la Réunion présente les écart-types les plus élevés (excepté sur le mois de juillet). Les coefficients d'asymétrie sont positifs quel que soit le mois, mais les mois de juillet, octobre et novembre présentent des coefficients d'asymétrie les plus élevés. La Réunion connaît relativement plus de mois à coefficient d'asymétrie élevé. Les excès de kurtosis sont quant à eux positifs dans la majorité des cas. En outre, la Réunion présente des excès de kurtosis particulièrement élevés pour les mois de janvier, février, avril, juin, juillet, novembre et décembre, signalant des chocs peu fréquents mais extrêmes.

Aucune tendance significative n'apparaît pour les Comores et Mayotte, quel que soit le mois. On note une baisse significative de la tendance dans les précipitations à Maurice pour les mois de juin et juillet. A la Réunion, la baisse des précipitations est significative dans les soixante dernières années au mois de novembre, alors que le mois de février est marqué par une hausse significative. Les tendances dans l'instabilité sont significativement en baisse aux Comores (Juillet, Septembre, Octobre), à Maurice (de Juin à Octobre), et à Mayotte (Août, Septembre, Octobre).

Conclusion

Nos résultats sur données internationales mènent à des conclusions similaires à celles des rapports de Météo-France sur données nationales pour la Réunion (hausse certaine des températures, inégalement réparties dans l'année ; incertitude s'agissant de l'évolution des précipitations). Nous pourrions donc considérer que l'analyse des données internationales CRU TS (renseignées sur une plus longue période que les données nationales disponibles) peut venir compléter les analyses relatives au climat à l'échelle de ces petits territoires. Ceci est particulièrement intéressant pour les petites îles moins couvertes par les données nationales, comme Mayotte.

Les résultats sont différents selon les îles, même si on observe d'évidentes similitudes entre les couples Comores-Mayotte et Réunion-Maurice. Ces différences portent sur les tendances, les chocs et les tendances dans l'instabilité.

Tout en continuant à limiter notre ambition à l'exploration des séries historiques (en écartant toute tentative de prévision), les réflexions à venir pourraient porter sur les estimations de la tendance, qui est ici supposée linéaire, alors que les données, notamment sur les températures, laissent entrevoir des formes plus complexes. En effet, différentes estimations de la tendance peuvent amener à différents résultats sur la mesure de l'instabilité, de l'asymétrie et des chocs extrêmes (Cariolle et Goujon, 2015). La définition des chocs pourrait aussi assez simplement être revue en choisissant un autre seuil, comme par exemple un écart-type (le seuil pouvant être différent entre la série globale et les séries saisonnières). Une analyse de la sensibilité des résultats à ces différents choix pourrait être menée. Certains de nos résultats pouvant être influencés par l'existence de deux saisons distinctes, nous pourrions effectuer des calculs sur des séries constituées de données sur ces deux saisons.

Références :

- Briffa R., Jones P.D. (1993), Global surface air temperature variations during the twentieth century: Part 2, implications for large-scale high-frequency paleoclimatic studies, *Holocene* 3: 77-88.
- Cariolle J. et Goujon M. (2015), Measuring macroeconomic instability: a critical survey illustrated with export series, *Journal of Economic Surveys*, 29(1), pp.1-26.
- CRU - University of East Anglia Climatic Research Unit. [Phil Jones, Ian Harris]. CRU TS3.21: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.21 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate (Jan. 1901 - Dec. 2012), [Internet]. NCAS British Atmospheric Data Centre, 2013. Available from http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__ACTIVITY_0c08abfc-f2d5-11e2a948-00163e251233; doi: 10.5285/D0E1585D-3417-485F-87AE-4FCECF10A992
- Dell M., Jones B. F. and Olken B. A. (2014), What Do We Learn from the Weather? The New Climate–Economy Literature, *Journal of Economic Literature*, 52(3), pp.740–798, <http://dx.doi.org/10.1257/jel.52.3.740>
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J. and Lister D.H. (2014), Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34, pp.623–642. doi: 10.1002/joc.3711
- GIEC (2007), Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.
- GIEC (2007), Résumé à l'intention des décideurs. In: Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation. Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-spm-fr.pdf>
- GIEC (2007), Chapt 16 : Small Islands. Mimura, N., L. Nurse, R.F. McLean, J. Agard, L. Briguglio, P. Lefale, R. Payet and G. Sem, In : *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch16.html
- GIEC (2014), GIEC IPCC Final Draft Report of the Working Group II contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Chapter 29. Small Islands.*
- Goujon M., Hoarau J-F. et Rivière F. (2015), Vulnérabilités économique et environnementale comparées des économies ultramarines françaises. Document de Travail 145, mars.
- Guillaumont P. (2013), Measuring Structural Vulnerability to Allocate Development Assistance and Adaptation Resources, FERDI Working Paper 68.
- Guillaumont P et Simonet C. (2011a), Designing an index of structural vulnerability to climate change, FERDI Working Paper I08 - Mars 2011
- Guillaumont P et Simonet C. (2011b), To What Extent Are African Countries Vulnerable to Climate Change? Lessons from a New Indicator of Physical Vulnerability to Climate Change. FERDI Working Paper / I08 Revised Version - November 2011
- Jones PD, Osborn TJ, Briffa KR (1997), Estimating sampling errors in large-scale temperature averages. *Journal of Climate* 10:2548-2568.

MEDDE - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2014) Le climat de la France au XXI^e siècle - Volume 4 - Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. Rapport, Sous la direction de Jean JOUZEL.

MEDDE - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2012), Explore 2070 – Eau et changement climatique, Hydrologie de surface, B3 – Hydrologie DOM, Octobre 2012
Météo-France (2009), Étude pour l'identification des évolutions du changement climatique à La Réunion, Direction interrégionale de La Réunion, 78 p.

Mitchell, T.D., M. Hulme, and M. New (2002): 'Climate Data for Political Areas', *Area*, 34(1), 109-112.

Mitchell, T.D., T.R. Carter, P.D. Jones, M. Hulme, and M. New (2004): A Comprehensive Set of High-Resolution Grids of Monthly Climate for Europe and the Globe: the observed record 1901-2000 and 16 scenarios 2001-2100', Technical Report Tyndall Working Paper 55, Tyndall Centre for Climate Change Research, UEA, Norwich.

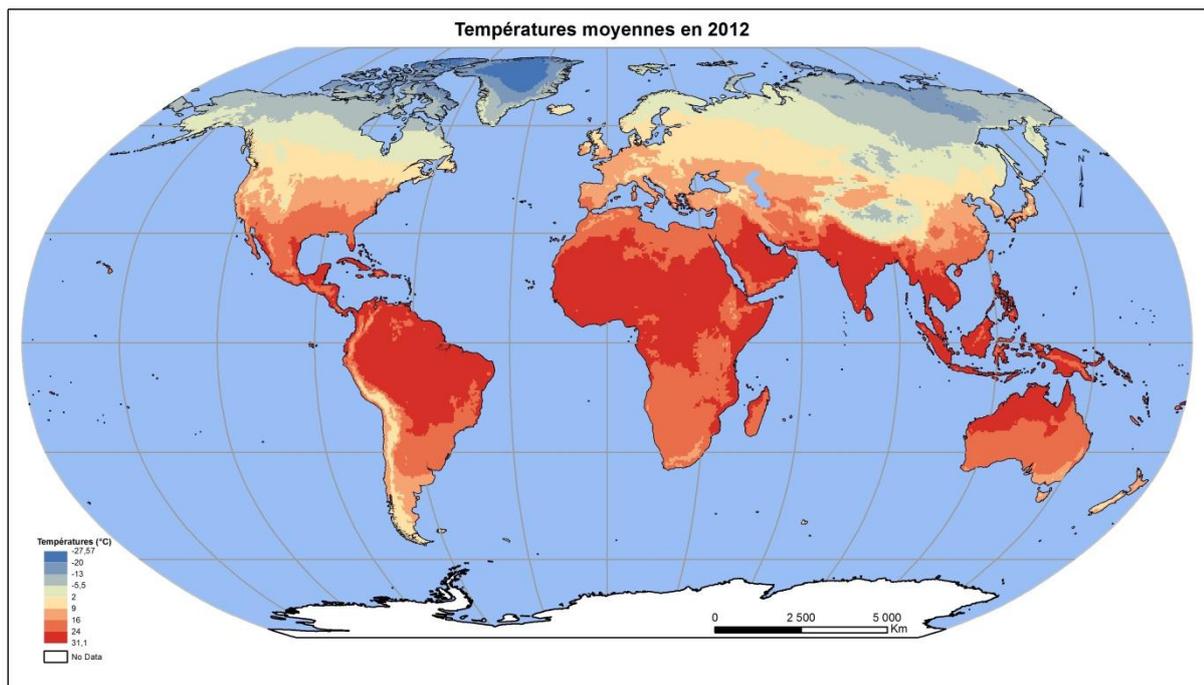
Mitchell, T.D. and Jones, P.D. (2005), An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25, 693-712

ONERC-Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'Outre-mer (2012), Le Climat de la France au XXI^e siècle. Volume 1 : Scénarios régionalisés - janvier 2011, Chapitre 8 sur l'Outre-Mer (cas de La Réunion). <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Scenarios-regionalises-janvier.html>

ONERC Les outre-mer face au défi du changement climatique, Rapport au Premier ministre et au Parlement, décembre 2012

UICN et ONERC (2010), Changement climatique et biodiversité dans l'outre-mer européen. dir. Petit J. et Prudent G.. Gland, Suisse et Bruxelles, Belgique : UICN, 192 pages. <http://www.cbd.int/islands/doc/idr/Climate%20Change%20and%20Biodiversity%20in%20EU%20overseas%20entities/Reunion%20publication-fr.pdf>

ANNEXE 1 : La base CRU-TS v3.21 Historic Climate Database for GIS



Description¹⁰

In September 2013, the University of East Anglia officially released the CRU-TS 3.21 Climate Database (See the official data release at <http://badc.nerc.ac.uk/data/cru>). This new version of database covers from 1901 to 2012, globally at 0.5 degree spatial resolution on land areas.

The database contains following ten variables. Each variable was scaled by the factor described in the table to store as integer.

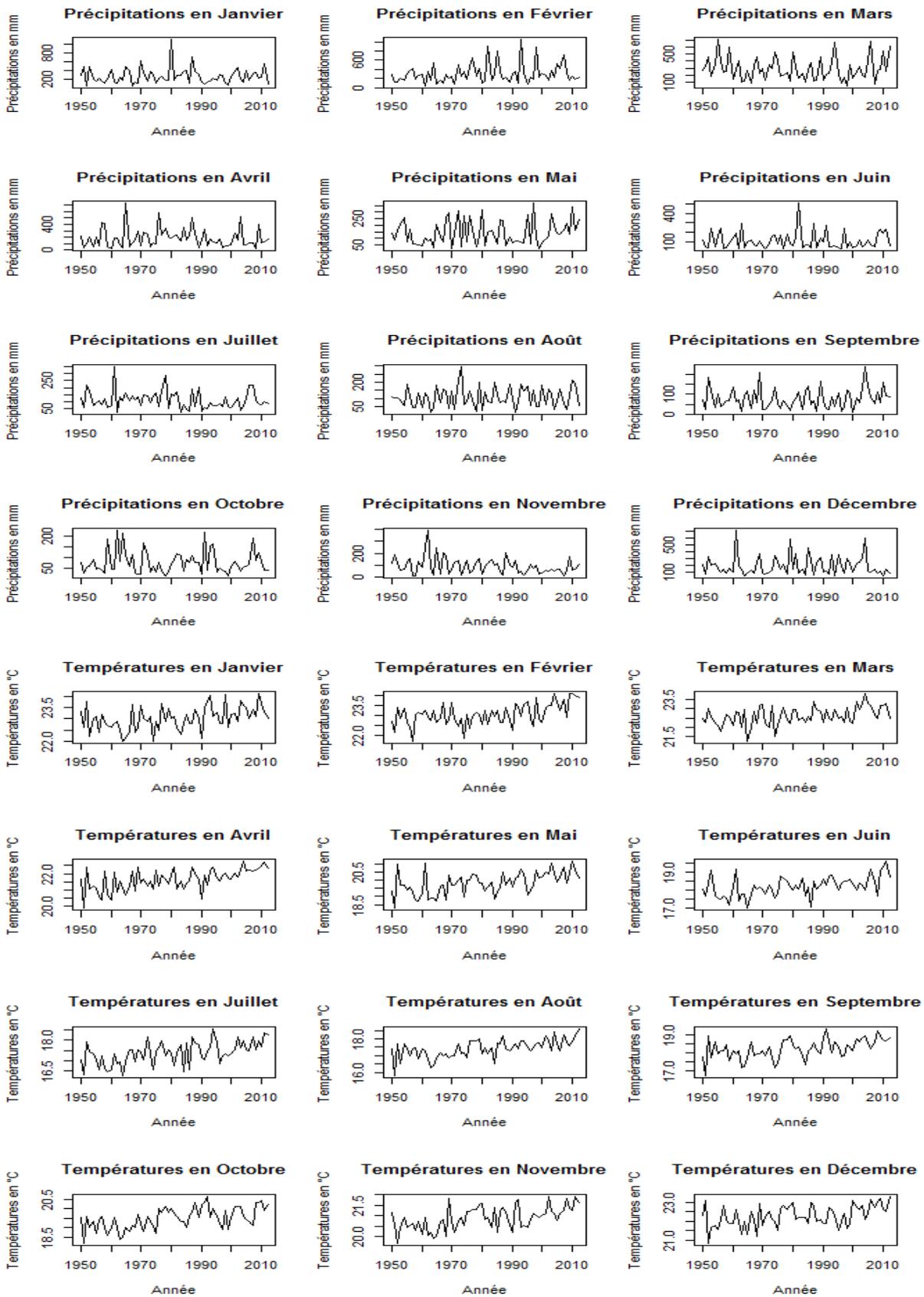
cld	cloud cover (%)
dtr	diurnal temperature range (degree Celcius)
frs	frost day frequency (days)
per	Potential Evapo-Transpiration (Millimetres)
pre	precipitation (mm)
tmp	daily mean temperature (degree Celcius)
tmn	monthly average daily minimum temperature (degree Celcius)
tmx	monthly average daily maximum temperature (degree Celcius)
vap	vapour pressure (hecta-Pascals)
wet	wet day frequency (days)

This work was supported by the Integrated Pest Management Collaborative Research Support Program (IPM CRSP), an initiative of the U.S. Agency for International Development (USAID).

¹⁰ In July 2012, UEA issued a patch on the PRE variable (precipitation) of the v3.10, noting: “A systematic error was discovered in the CRUTS v3.10 process generating the precipitation, wet days and frost frequency data files. New precipitation data files (version 3.10.01) have been generated and are now available in the archive.” The PRE raster layers in the [Download] has been updated accordingly.

ANNEXE 2 : Graphiques et Tableaux des analyses par mois

Graphique 4 : Températures et précipitations à la Réunion selon les mois de l'année



Graphique 5 : Variations saisonnières des températures et des précipitations

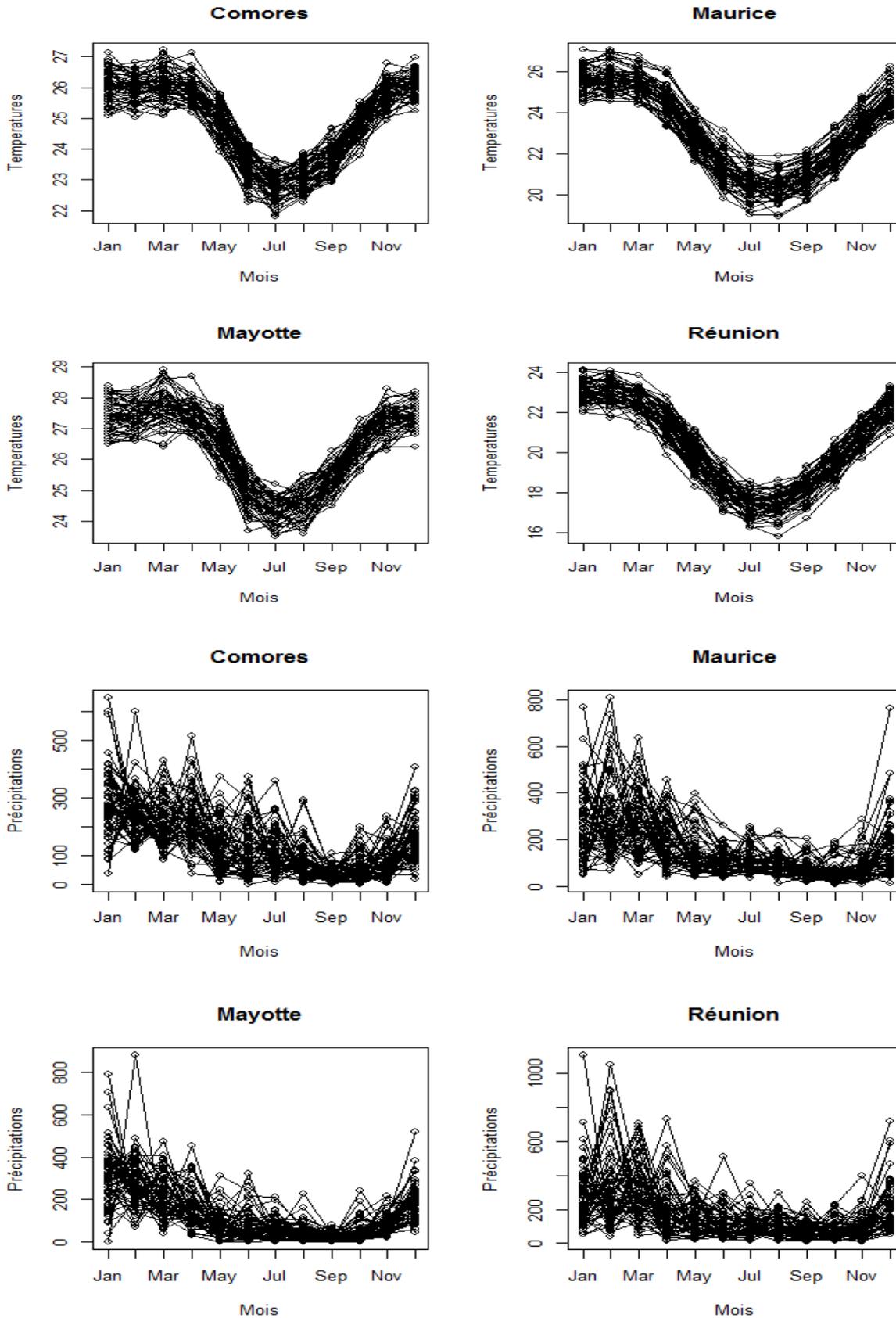


Tableau 1. Températures, statistiques simples selon le mois
 (*significatifs à 10%, ** : 5% ; *** :1%)

janvier	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		février	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		mars	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion
pente	0,012***	0,012***	0,017***	0,011***		pente	0,007***	0,009***	0,021***	0,014***		pente	0,006	0,007	0,017***	0,011***
moyenne	26,06	27,44	25,61	23,02		moyenne	25,95	27,36	25,66	23,06		moyenne	26,16	27,75	25,48	22,62
écart-type	0,49	0,51	0,58	0,51		écart-type	0,39	0,41	0,59	0,52		écart-type	0,47	0,52	0,54	0,50
max	27,14	28,40	27,10	24,11		max	26,83	28,30	27,10	24,06		max	27,24	28,90	26,81	23,82
min	25,08	26,50	24,50	22,00		min	25,04	26,60	24,58	21,72		min	25,09	26,40	24,37	21,24
mediane	26,08	27,40	25,59	23,00		mediane	25,93	27,40	25,50	23,06		mediane	26,20	27,70	25,46	22,58
asymetrie	-0,02	0,04	0,10	0,09		asymetrie	-0,09	0,02	0,64	-0,09		asymetrie	0,06	-0,05	0,13	-0,18
kurtosis	-0,71	-0,83	-0,45	-0,39		kurtosis	-0,52	-0,46	-0,08	-0,20		kurtosis	-0,15	0,29	-0,27	-0,09
origine	25,68	27,07	25,07	22,65		origine	25,72	27,07	24,99	22,60		origine	25,97	27,53	24,95	22,25
fin	26,43	27,80	26,14	23,37		fin	26,17	27,64	26,32	23,50		fin	26,34	27,97	26,00	22,97
différence	0,75	0,73	1,07	0,72		différence	0,45	0,56	1,33	0,90		différence	0,37	0,44	1,05	0,72
avril	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		mai	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		juin	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion
pente	0,002	0,004	0,026***	0,021***		pente	0,012***	0,015***	0,021***	0,019***		pente	0,000	0,001	0,020***	0,015***
moyenne	25,91	27,44	24,58	21,63		moyenne	24,94	26,62	22,88	19,81		moyenne	23,44	24,97	21,28	18,22
écart-type	0,39	0,39	0,65	0,64		écart-type	0,46	0,52	0,62	0,66		écart-type	0,46	0,46	0,66	0,54
max	27,15	28,70	26,15	22,77		max	25,79	27,70	24,22	21,15		max	24,18	25,80	23,16	19,61
min	25,17	26,70	23,29	19,83		min	23,91	25,40	21,59	18,26		min	22,27	23,70	19,80	17,00
mediane	25,89	27,40	24,62	21,63		mediane	25,00	26,60	22,85	19,79		mediane	23,43	25,00	21,23	18,20
asymetrie	0,61	0,44	0,06	-0,52		asymetrie	-0,15	-0,10	0,00	-0,11		asymetrie	-0,46	-0,47	0,38	0,13
kurtosis	0,62	0,26	-0,04	-0,19		kurtosis	-0,56	-0,39	-0,55	-0,49		kurtosis	-0,33	-0,24	0,45	0,06
origine	25,83	27,32	23,76	20,97		origine	24,57	26,15	22,22	19,20		origine	23,42	24,94	20,62	17,75
fin	25,98	27,57	25,38	22,27		fin	25,31	27,07	23,53	20,41		fin	23,45	25,00	21,91	18,68
différence	0,15	0,25	1,61	1,30		différence	0,74	0,92	1,31	1,21		différence	0,03	0,07	1,29	0,92

juillet	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		août	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		septembre	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion
pente	-0,005**	-0,004*	0,020***	0,015***		pente	0,007***	0,012***	0,023***	0,017***		pente	-0,001	0,001	0,022***	0,015***
moyenne	22,81	24,34	20,52	17,38		moyenne	23,11	24,58	20,36	17,42		moyenne	23,72	25,37	20,92	18,21
écart-type	0,42	0,40	0,62	0,53		écart-type	0,42	0,48	0,58	0,53		écart-type	0,40	0,39	0,59	0,53
max	23,65	25,20	21,91	18,56		max	23,87	25,50	21,90	18,60		max	24,68	26,30	22,18	19,34
min	21,81	23,50	19,03	16,25		min	22,28	23,60	18,93	15,79		min	22,93	24,50	19,66	16,68
mediane	22,84	24,30	20,57	17,45		mediane	23,11	24,60	20,38	17,49		mediane	23,75	25,40	20,85	18,22
asymetrie	-0,31	-0,21	-0,03	-0,14		asymetrie	-0,05	-0,08	0,14	-0,47		asymetrie	0,13	-0,02	0,05	-0,40
kurtosis	-0,19	-0,62	0,26	-0,44		kurtosis	-0,99	-0,68	0,25	0,66		kurtosis	-0,27	-0,17	-0,47	0,13
origine	22,97	24,47	19,89	16,89		origine	22,87	24,20	19,63	16,86		origine	23,74	25,34	20,22	17,73
fin	22,66	24,21	21,13	17,85		fin	23,34	24,94	21,07	17,96		fin	23,70	25,40	21,60	18,67
différence	-0,31	-0,26	1,24	0,96		différence	0,47	0,74	1,44	1,09		différence	-0,04	0,06	1,38	0,95
octobre	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		novembre	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion		décembre	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion
pente	0,004	0,004*	0,023***	0,017***		pente	0,007***	0,009***	0,021***	0,016***		pente	0,005**	0,007**	0,019***	0,013***
moyenne	24,83	26,56	22,00	19,50		moyenne	25,84	27,30	23,47	20,89		moyenne	26,08	27,39	24,75	22,28
écart-type	0,36	0,37	0,61	0,55		écart-type	0,38	0,41	0,59	0,54		écart-type	0,36	0,37	0,59	0,54
max	25,55	27,30	23,38	20,66		max	26,81	28,30	24,81	21,94		max	26,98	28,20	26,30	23,31
min	23,79	25,60	20,74	18,19		min	24,94	26,30	22,39	19,68		min	25,24	26,40	23,57	20,85
mediane	24,93	26,60	22,03	19,52		mediane	25,88	27,40	23,47	20,92		mediane	26,08	27,40	24,70	22,20
asymetrie	-0,56	-0,58	0,16	-0,08		asymetrie	-0,23	-0,38	0,36	-0,02		asymetrie	-0,07	0,14	0,48	-0,24
kurtosis	0,02	0,02	-0,45	-0,59		kurtosis	-0,16	-0,03	-0,39	-0,66		kurtosis	-0,11	0,11	0,19	-0,36
origine	24,70	26,42	21,26	18,95		origine	25,61	27,02	22,81	20,38		origine	25,91	27,17	24,13	21,88
fin	24,95	26,70	22,71	20,02		fin	26,05	27,56	24,10	21,38		fin	26,24	27,61	25,35	22,67
différence	0,25	0,28	1,45	1,07		différence	0,44	0,54	1,29	1,00		différence	0,33	0,44	1,21	0,79

Tableau 2. Précipitations, statistiques simples selon le mois
 (*significatifs à 10%, ** : 5% ; *** :1%)

janvier	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion	février	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion	mars	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion
pente	-0,400	0,281	-0,294	0,248	pente	-0,517	-0,645	0,861	2,092*	pente	0,097	0,085	-0,779	-0,295
moyenne	285,41	317,31	263,33	270,27	moyenne	244,38	275,61	281,91	304,80	moyenne	220,26	214,19	268,21	289,46
écart-type	118,27	146,07	148,84	177,79	écart-type	82,50	122,21	160,87	210,88	écart-type	79,02	96,16	130,65	160,81
max	648,10	789,09	768,22	1103,48	max	600,83	878,90	808,86	1049,61	max	428,17	473,45	635,70	706,62
min	36,62	2,70	51,66	50,07	min	120,51	73,61	68,50	39,07	min	87,57	39,90	52,92	47,90
mediane	272,26	308,23	245,67	218,98	mediane	241,94	272,23	229,01	247,45	mediane	218,49	205,42	255,18	260,19
asymetrie	0,66	0,63	0,90	2,01	asymetrie	1,28	1,84	1,34	1,68	asymetrie	0,50	0,48	0,62	0,85
kurtosis	1,18	1,28	0,94	6,61	kurtosis	4,24	8,12	1,53	2,92	kurtosis	-0,27	-0,37	-0,15	0,17
origine	298,22	308,32	272,75	262,33	origine	260,91	296,23	254,36	237,85	origine	217,15	211,47	293,15	298,91
fin	273,01	326,03	254,20	277,95	fin	228,37	255,62	308,60	369,65	fin	223,28	216,82	244,04	280,31
différence	-25,21	17,71	-18,55	15,62	différence	-32,54	-40,61	54,25	131,80	différence	6,13	5,36	-49,10	-18,60
avril	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion	mai	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion	juin	Comores	Mayotte	Maurice	Réunion
pente	0,321	0,634	-0,701	-0,370	pente	0,291	0,136	-0,851	0,813	pente	0,504	0,568	-0,761**	0,093
moyenne	221,29	160,82	194,90	185,92	moyenne	127,55	76,54	141,11	142,66	moyenne	119,52	72,62	110,08	110,81
écart-type	89,73	88,67	96,57	145,21	écart-type	80,72	63,06	83,69	90,38	écart-type	89,38	69,06	50,29	89,77
max	513,04	453,25	455,81	730,25	max	375,43	314,23	398,39	368,50	max	374,05	320,64	260,67	507,28
min	39,40	31,40	42,81	15,16	min	9,26	0,80	42,64	18,52	min	2,42	0,50	39,28	21,60
mediane	211,69	129,11	164,25	154,01	mediane	106,77	59,91	112,24	114,75	mediane	96,85	51,11	103,77	72,72
asymetrie	0,79	1,24	0,63	1,54	asymetrie	0,82	1,48	1,40	0,71	asymetrie	0,96	1,65	0,90	1,82
kurtosis	1,09	1,31	-0,27	2,67	kurtosis	0,22	2,78	1,33	-0,56	kurtosis	0,37	2,79	0,88	4,73
origine	211,01	140,55	217,32	197,76	origine	118,24	72,21	168,35	116,63	origine	103,40	54,44	134,43	107,85
fin	231,26	180,46	173,17	174,45	fin	136,57	80,75	114,73	167,87	fin	135,14	90,23	86,49	113,68
différence	20,25	39,91	-44,15	-23,31	différence	18,33	8,54	-53,61	51,24	différence	31,73	35,78	-47,95	5,83

juillet	Comores	Maurice	Mayotte	Réunion	août	Comores	Maurice	Mayotte	Réunion	septembre	Comores	Maurice	Mayotte	Réunion
pente	-0,266	-0,865**	-0,141	-0,527	pente	-0,185	-0,268	0,034	0,244	pente	0,215	-0,237	0,128	0,347
moyenne	104,43	108,74	61,91	109,17	moyenne	77,60	94,84	43,13	107,38	moyenne	34,23	71,64	24,62	78,48
écart-type	71,13	51,14	45,28	63,70	écart-type	58,75	44,44	40,29	61,11	écart-type	23,61	39,93	19,64	49,78
max	358,00	257,32	210,92	353,48	max	294,24	236,20	225,02	296,93	max	106,85	205,48	81,21	240,21
min	8,13	36,29	0,50	17,92	min	5,77	13,07	0,80	13,60	min	2,33	17,93	0,10	7,94
mediane	85,33	93,31	54,01	91,50	mediane	68,31	84,77	32,90	96,19	mediane	29,31	59,89	17,80	67,87
asymetrie	1,24	1,17	1,07	1,34	asymetrie	1,71	1,30	1,98	0,58	asymetrie	0,93	1,32	0,97	0,96
kurtosis	1,64	0,72	1,53	2,66	kurtosis	3,74	2,15	5,93	-0,08	kurtosis	0,36	1,68	0,15	0,90
origine	112,95	136,44	66,41	126,04	origine	83,53	103,40	42,04	99,58	origine	27,36	79,22	20,51	67,39
fin	96,17	81,91	57,55	92,81	fin	71,86	86,54	44,19	114,94	fin	40,88	64,30	28,60	89,23
différence	-16,79	-54,52	-8,86	-33,23	différence	-11,67	-16,86	2,14	15,36	différence	13,52	-14,92	8,09	21,84
octobre	Comores	Maurice	Mayotte	Réunion	novembre	Comores	Maurice	Mayotte	Réunion	décembre	Comores	Maurice	Mayotte	Réunion
pente	0,453	-0,301	0,439	-0,011	pente	0,179	-0,452	0,036	-1,102**	pente	-0,571	-1,227	-0,533	-0,094
moyenne	56,84	59,70	45,56	76,56	moyenne	75,75	78,17	78,77	93,13	moyenne	168,30	170,12	189,44	196,92
écart-type	44,29	41,86	45,74	52,61	écart-type	53,67	55,48	46,88	70,09	écart-type	78,35	129,21	82,58	138,19
max	199,58	192,66	240,83	230,26	max	237,05	289,66	219,22	397,03	max	405,70	761,56	519,16	718,88
min	2,06	10,97	1,20	13,82	min	5,40	10,93	20,00	7,57	min	19,25	16,49	45,10	50,17
mediane	40,35	51,14	31,30	59,80	mediane	56,70	65,06	67,91	73,32	mediane	158,35	148,33	191,72	149,37
asymetrie	1,45	1,73	2,19	1,36	asymetrie	1,18	1,78	1,22	1,65	asymetrie	0,71	2,02	1,09	1,74
kurtosis	1,81	2,68	5,55	1,29	kurtosis	1,10	3,48	1,29	4,46	kurtosis	0,41	6,17	2,85	3,41
origine	42,34	69,33	31,50	76,89	origine	70,00	92,63	77,63	128,40	origine	186,58	209,40	206,49	199,93
fin	70,89	50,38	59,17	76,23	fin	81,31	64,17	79,87	58,97	fin	150,60	132,08	172,92	194,01
différence	28,55	-18,95	27,67	-0,67	différence	11,31	-28,46	2,25	-69,43	différence	-35,98	-77,32	-33,57	-5,91

Tableau 3. Températures, chocs et tendance dans l'instabilité selon le mois

Janvier				Février				Mars			
Pays	Chocs			Pays	Chocs			Pays	Chocs		
	nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value
Comores	4	-0,0006	0,78	Comores	2	-0,0002	0,92	Comores	4	-0,0008	0,68
Maurice	2	-0,0020	0,55	Maurice	3	0,0018	0,58	Maurice	2	-0,0024	0,41
Mayotte	3	0,0010	0,62	Mayotte	1	0,0002	0,90	Mayotte	5	-0,0018	0,50
Réunion	2	-0,0011	0,72	Réunion	2	0,0010	0,72	Réunion	2	-0,0015	0,54
Avril				Mai				Juin			
Pays	Chocs			Pays	Chocs			Pays	Chocs		
	nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value
Comores	3	0,0005	0,78	Comores	2	-0,0065	0,03	Comores	3	0,0048	0,15
Maurice	3	-0,0035	0,09	Maurice	2	-0,0015	0,66	Maurice	4	-0,0012	0,75
Mayotte	2	-0,0015	0,38	Mayotte	2	-0,0071	0,02	Mayotte	3	0,0060	0,07
Réunion	3	-0,0097	0,00	Réunion	3	-0,0066	0,10	Réunion	5	-0,0021	0,53
Juillet				Août				Septembre			
Pays	Chocs			Pays	Chocs			Pays	Chocs		
	nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value
Comores	3	0,0101	0,00	Comores	0	-0,0022	0,43	Comores	2	0,0059	0,04
Maurice	1	-0,0004	0,92	Maurice	3	-0,0036	0,22	Maurice	4	-0,0026	0,40
Mayotte	1	0,0112	0,00	Mayotte	1	-0,0048	0,12	Mayotte	3	0,0060	0,03
Réunion	3	-0,0026	0,41	Réunion	3	-0,0048	0,11	Réunion	4	-0,0025	0,44
Octobre				Novembre				Décembre			
Pays	Chocs			Pays	Chocs			Pays	Chocs		
	nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value
Comores	2	0,0013	0,62	Comores	3	-0,0014	0,49	Comores	3	0,0000	0,98
Maurice	0	-0,0038	0,24	Maurice	2	-0,0013	0,70	Maurice	1	0,0014	0,45
Mayotte	3	0,0022	0,38	Mayotte	4	-0,0028	0,11	Mayotte	2	0,0007	0,65
Réunion	2	-0,0045	0,16	Réunion	1	-0,0033	0,30	Réunion	2	-0,0017	0,40

Tableau 4. Précipitations, chocs et tendance dans l'instabilité selon le mois

Janvier				Février				Mars			
Pays	Chocs			Pays	Chocs			Pays	Chocs		
	nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value
Comores	4	0,1574	0,83	Comores	1	-0,1783	0,72	Comores	2	0,1297	0,76
Maurice	2	0,4610	0,58	Maurice	4	1,3763	0,18	Maurice	3	0,5334	0,49
Mayotte	4	0,3180	0,71	Mayotte	1	-0,5143	0,48	Mayotte	1	-0,0805	0,85
Réunion	2	-0,0523	0,96	Réunion	4	1,2393	0,33	Réunion	4	0,1665	0,85
Avril				Mai				Juin			
Pays	Chocs			Pays	Chocs			Pays	Chocs		
	nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value
Comores	4	0,3008	0,55	Comores	2	-0,3410	0,32	Comores	4	0,1560	0,67
Maurice	3	0,2132	0,63	Maurice	5	-0,5277	0,11	Maurice	2	-0,5860	0,02
Mayotte	6	-0,1146	0,76	Mayotte	3	-0,4682	0,17	Mayotte	3	-0,2638	0,44
Réunion	4	-0,2819	0,67	Réunion	2	-0,2411	0,47	Réunion	2	-0,1489	0,71
Juillet				Août				Septembre			
Pays	Chocs			Pays	Chocs			Pays	Chocs		
	nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value
Comores	4	-0,8197	0,01	Comores	3	-0,4188	0,15	Comores	3	-0,7858	0,00
Maurice	3	-0,7074	0,01	Maurice	4	-0,9365	0,00	Maurice	3	-0,9724	0,00
Mayotte	3	-0,4168	0,18	Mayotte	2	-0,5909	0,02	Mayotte	4	-0,6611	0,00
Réunion	2	0,1797	0,58	Réunion	1	-0,3682	0,34	Réunion	3	-0,3513	0,27
Octobre				Novembre				Décembre			
Pays	Chocs			Pays	Chocs			Pays	Chocs		
	nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value		nbre	Tend	p-value
Comores	3	-0,8556	0,00	Comores	4	-0,7508	0,01	Comores	2	-0,4253	0,21
Maurice	5	-0,9351	0,00	Maurice	4	-0,6790	0,02	Maurice	3	-0,8153	0,19
Mayotte	2	-0,8601	0,00	Mayotte	5	-0,5439	0,07	Mayotte	2	-0,1818	0,62
Réunion	5	-0,1476	0,66	Réunion	3	0,4686	0,20	Réunion	3	0,1932	0,76