

## Montagnes d'Afrique tropicale : marqueurs de la variabilité climatique ou isolats climatiques ?

CAMBERLIN P. <sup>(1)</sup>, WILLIAMSON D. <sup>(2)</sup>, CASTEL T. <sup>(1)</sup>, RICHARD Y. <sup>(1)</sup>

(1) Centre de Recherches de Climatologie, UMR 5210 CNRS / Université de Bourgogne, 6 Bd Gabriel, 21000 Dijon, France - [camber@u-bourgogne.fr](mailto:camber@u-bourgogne.fr), [thierry.castel@u-bourgogne.fr](mailto:thierry.castel@u-bourgogne.fr), [yrichard@u-bourgogne.fr](mailto:yrichard@u-bourgogne.fr)

(2) Institut de Recherche pour le Développement, UMR LOCEAN Université Paris VI / World Agroforestry Centre ICRAF, Gigiri, PO Box 30677, 00100 Nairobi, Kenya - [david.williamson@ird.fr](mailto:david.williamson@ird.fr)

**Résumé :** Les montagnes tropicales sont souvent perçues comme des sentinelles des changements climatiques. Pour autant les variations climatiques interannuelles à décennales y sont-elles le reflet de celles des espaces environnants ? A l'échelle de l'Afrique au sud du Sahara, une analyse de la variabilité des pluies entre 1941 et 2000 montre une cohérence spatiale peu diminuée par les reliefs. Des exemples sont présentés de reliefs constituant même des révélateurs de la dynamique atmosphérique et de la variabilité climatique d'échelles larges.

**Mots-clés :** Variabilité climatique, précipitations, Afrique tropicale, analyse spatiale, relief.

**Abstract :** Tropical mountains are often seen as beacons of past and present-day climate change. However, do they actually reflect interannual and decadal-scale climatic variability of the surrounding areas ? At the scale of Africa South of the Sahara, an analysis of the 1941-2000 rainfall variability shows that spatial coherence is seldom modified by relief. Examples are presented in which mountain climates are even indicators of large-scale atmospheric dynamics and climate variability.

**Keywords :** Climate variability, rainfall, Tropical Africa, spatial analysis, relief.

### Introduction

La riche palette bioclimatique des montagnes et hautes-terres tropicales leur confère une place à part dans la zone tropicale. Ces milieux sont soumis, comme les basses-terres, à une forte variabilité climatique interannuelle à décennale et aux changements résultant des émissions globales de gaz à effet de serre. Mais les variations climatiques dans ces hautes-terres sont-elles en concordance avec celles des espaces environnants ? Si les montagnes sont souvent perçues comme des sentinelles des changements passés et en cours, la validité de cette perception reste incertaine. Aux moyennes latitudes, Diaz et Bradley (1997) montrent, pour les tendances thermiques au XX<sup>e</sup> siècle, des différences parfois importantes selon l'altitude. Dans les Andes tropicales, Urrutia et Vuille (2009), à partir d'un modèle régional, décrivent un réchauffement futur plus marqué à haute altitude. Daly et al. (2010) soulignent le découplage local, lié à la topographie, de la variabilité thermique par rapport au climat régional, et les problèmes induits pour évaluer localement les changements climatiques futurs.

Dans les montagnes d'Afrique tropicale, l'analyse de la variabilité thermique se heurte à un manque relatif de longues séries homogènes. Les températures sont cependant très contraintes par la nébulosité et le cycle de l'eau, et les données de précipitations, plus nombreuses, peuvent apporter des éléments de réponse quant à la représentativité climatique des montagnes. Après un état des lieux bibliographique, une approche à l'échelle continentale est proposée (sections 2 et 3), analysant la cohérence spatiale de la variabilité des précipitations et l'effet du relief sur celle-ci. Enfin, des études de cas (section 4) illustrent, dans les aires à fort contrôle topographique, les liens entre pluies et variabilité climatique de large échelle.

### 1. Variabilité et changements climatiques dans les montagnes africaines : état des lieux

De nombreux travaux s'appuyant sur des marqueurs disponibles à haute altitude (moraines, sédiments de lacs et tourbières...) ont permis de reconstituer les paléo-environnements des montagnes africaines pour la fin du Quaternaire, et de les relier aux changements climatiques

planétaires. Par exemple, Bonnefille et Chalié (2000) ont montré sur les 40 derniers millénaires un bon accord entre les variations climatiques en sites de montagne d'Afrique de l'Est (tourbières du Burundi et du Rwanda) et à plus basse altitude. L'amplitude des variations diffère cependant.

Les travaux utilisant des données climatiques mesurées sont assez rares. Si la caractérisation des conditions moyennes, très contraintes par le relief, a attiré beaucoup d'études, la variabilité interannuelle ou décennale est mal connue. Ceci est notamment dû à un manque, surtout à haute altitude, de relevés réguliers (Grab, 2009). Qui plus est, ces travaux montrent des résultats nuancés. Douguedroit et Bart (1989) notent au Rwanda (1939-1975) une médiocre structuration spatiale des pluies, attribuée aux facteurs orographiques. Le relief accidenté est jugé également responsable de fortes disparités spatiales dans la variabilité interannuelle des pluies en Ethiopie (Segele et Lamb, 2005). Pour l'Afrique du Sud tropicale cependant, la régionalisation des variations interannuelles des précipitations (Dyer, 1975) ne montre pas d'effet de barrière lié au relief. Au Cameroun, le relief module l'amplitude de la variabilité (Suchel, 1988), comme au Mt Kilimandjaro, mais la variabilité des précipitations à haute altitude y reste bien reliée à la circulation atmosphérique de large échelle (Chan et al., 2008). La question de la cohérence spatiale de la variabilité et des changements climatiques en région accidentée n'est donc pas tranchée. Elle est pourtant majeure : en témoigne le débat autour de la recrudescence du paludisme dans les hautes-terres est-africaines dans les années 1990. Hay et al. (2002), notant l'absence de tendance dans les séries de températures, l'attribuent à des facteurs non climatiques. Zhou et al. (2004) contestent cette interprétation fondée sur des fichiers globaux à basse résolution, montrant qu'à échelle locale variabilité et tendances climatiques influencent significativement le nombre de cas de paludisme.

## **2. Analyse comparée de la variabilité des précipitations : données et méthodes**

Pour évaluer la cohérence spatiale de la variabilité des pluies au sein des hautes-terres africaines, et la comparer avec celle des zones de plaine, une base de données stationnelles couvrant l'ensemble de l'Afrique au sud du Sahara est constituée. L'utilisation de données en points de grille est déconseillée, car elles augmentent artificiellement la cohérence spatiale. L'étude utilise donc les précipitations stationnelles du Global Historical Climate Network (Vose et al. 1992), complétées par celles du Centre de Recherches de Climatologie (CRC). Le critère de sélection des stations est la disponibilité d'au moins 30 ans d'observations, entre 1941 et 2000. Au sud du Sahara, 1383 stations répondent à ce critère. Leur densité est inégale, mais la large fenêtre temporelle permet de couvrir toutes les grandes régions du continent.

L'analyse de la cohérence spatiale repose sur le calcul de corrélations linéaires (coefficient de Pearson  $r$ ) entre les précipitations annuelles (janvier-décembre) des 1383 stations, en se limitant aux stations situées à moins de 600 km l'une de l'autre. L'objectif étant de travailler sur un réseau aussi dense que possible, tout en garantissant des séries suffisamment longues pour le calcul de  $r$ , aucune période commune à l'ensemble des stations n'est imposée. Néanmoins, un minimum de 20 années communes est requis. Pour tenir compte de l'inégale longueur des séries, on retient les seuils de confiance et non les valeurs de  $r$ . Les échantillons temporels parfois variables d'un couple de stations à l'autre peuvent créer des biais. Les tests réalisés sur des sous-périodes montrent que les structures spatiales sont conservées.

La cohérence spatiale autour d'une station X est évaluée en exprimant en fonction de la distance les corrélations avec les stations situées dans un rayon de 600 km (exemple d'une station sud-africaine, fig.1). Un ajustement linéaire du nuage de points est réalisé. Une décroissance non linéaire de la corrélation avec la distance est généralement observée dans le proche voisinage (quelques dizaines de km) des stations (Ngongondo et al. 2011), donnant un ajustement suivant une loi exponentielle (Ciach et Krajewski, 2006). Ici, la structure de

l'échantillon et la distance moyenne inter-station supporte l'approximation linéaire. De plus l'ajustement linéaire est satisfaisant dès lors qu'il s'agit d'évaluer une distance de décorrélation, c'est-à-dire une distance moyenne au-delà de laquelle la corrélation avec X n'est plus significative. Celle-ci, tout comme la valeur moyenne de corrélation à une distance  $d$  arbitraire (ci-dessous,  $d=300$  km), peut être cartographiée. L'analyse est réalisée pour l'ensemble des stations, puis des sous-groupes de stations situées à plus de 800 m ou 1800 m d'altitude. La comparaison permet d'évaluer si, dans les régions d'altitude, la cohérence spatiale des pluies diffère de celle des espaces topographiquement moins contrastés.

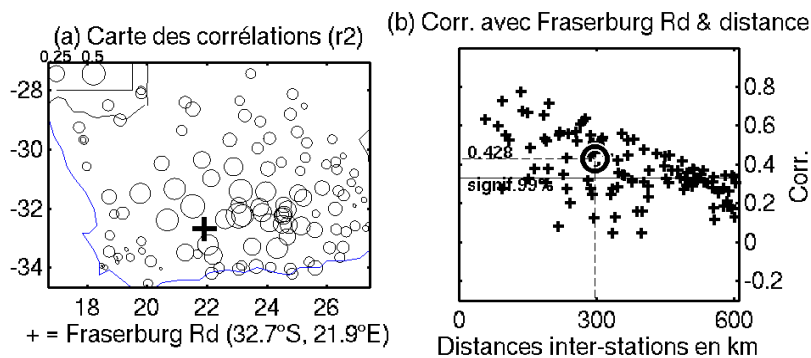
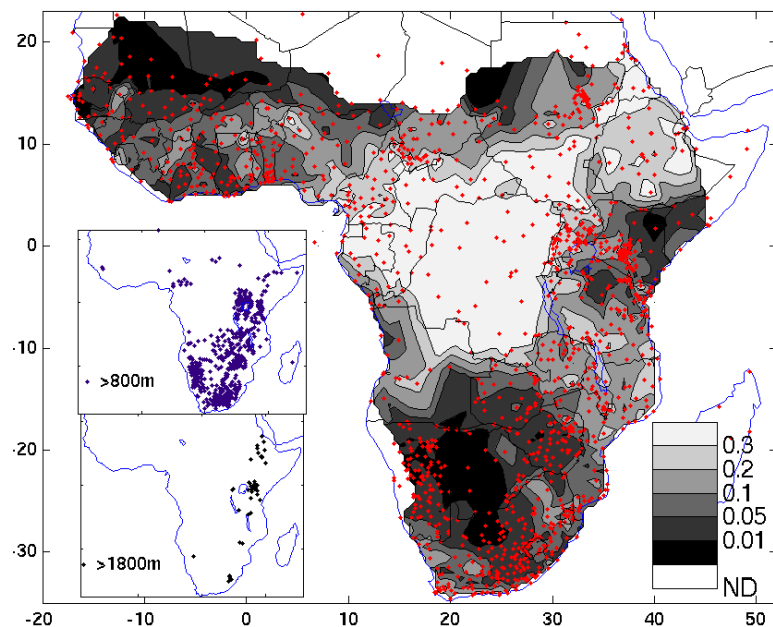


Fig.1 : Méthodologie d'analyse de la cohérence spatiale des variations pluviométriques. Exemple de la station de Fraserburg Road (Afr. du Sud) : (a) Coefficients de détermination ( $r^2$ ) ; (b) Relation entre corrélations et distance. Les corrélations sont réajustées à une période de 60 ans à partir du seuil de signification obtenu sur la période disponible commune à chaque couple de stations.

### 3. L'approche continentale : des reliefs sans effet sur la variabilité interannuelle ?

Pour l'Afrique au sud du Sahara, la fig.2 montre la significativité des corrélations moyennes à 300 km autour de chaque station, décrivant le degré de cohérence spatiale de la variabilité des pluies. Les valeurs sont contrastées, avec de vastes régions (Sahel, majeure partie de l'Afrique Australe, partie du Kenya et de la Tanzanie) où la corrélation à 300 km est significative au seuil de 5%, mais aussi une vaste région congolaise où ce n'est pas le cas. Celle-ci se prolonge vers le nord-est (Ethiopie) et le sud-est (Nord du Mozambique). Quelques régions accidentées (ex : massif éthiopien) apparaissent moins cohérentes que



d'autres. Le Rift occidental ressort comme une limite entre aires de forte et de faible cohérence spatiale. Mais la carte ne singularise pas explicitement les régions d'altitude comme zones de moindre cohérence.

Fig.2 : Significativité des corrélations moyennes à 300 km autour de chaque station. La valeur 0.01 indique que la corrélation entre la station de référence et les stations voisines est, à une distance de 300 km, significative au seuil d'erreur de 1%. Points : stations utilisées. En cartouche, localisation des stations situées entre 800 et 1800 m d'altitude, et au-dessus de 1800 m.

Ceci est confirmé par les diagrammes distance / corrélation (fig.3). La proportion de stations corrélées significativement entre elles décroît régulièrement avec l'augmentation de la distance inter-stations. Ceci vaut quelle que soit l'altitude.

Les stations de référence situées entre 800 et 1800 m sont même légèrement plus nombreuses à être corrélées significativement que celles situées plus bas. A plus de 1800 m, les corrélations sont tout aussi fortes jusqu'à 100 km, mais déclinent à plus grande distance.

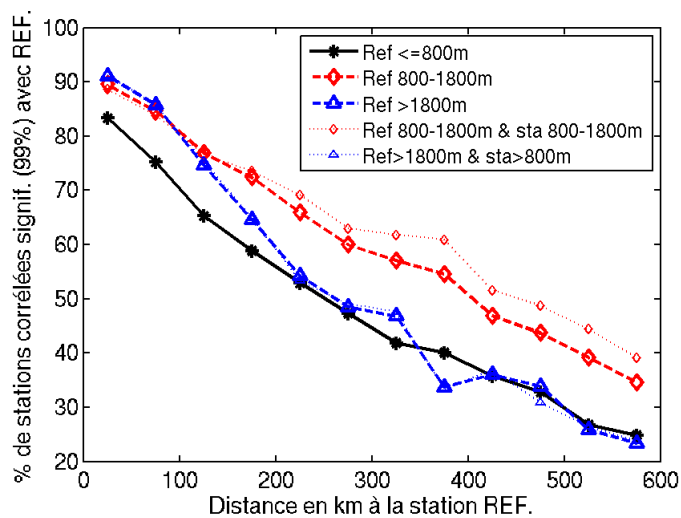


Fig.3 : Pourcentage de stations dont les précipitations sont corrélées significativement entre elles ( $P=99\%$ ) en fonction de la distance séparant les stations, par classes de 50 km, en Afrique au Sud du Sahara. En trait plein : stations de référence (REF) situées à moins de 800 m d'altitude, en tirets entre 800 et 1800 m (losanges) et à plus de 1800 m (triangles). Pointillés fins : idem mais uniquement en considérant les corrélations avec les stations du même étage altitudinal.

Ces observations montrent qu'en moyenne, en Afrique tropicale, l'effet altitude n'affaiblit pas la cohérence spatiale. Indirectement, on peut considérer les stations d'altitude comme généralement représentatives des variations pluviométriques d'aires plus vastes, du moins tout autant que les stations de plaine. Au sein des stations d'altitude, la cohérence spatiale est également forte, même si elle décline plus vite avec la distance.

#### 4. Relief et dynamique atmosphérique : les enseignements de l'échelle locale

L'approche globalisante retenue jusqu'ici masque évidemment des comportements locaux particuliers, en relation avec la géométrie des reliefs, leur taille, et leur localisation en regard des systèmes de vents. Ces singularités locales s'expriment parfois dans les champs moyens par une exacerbation des conditions régionales (augmentation des cumuls), sans affecter la variabilité interannuelle, ou par une modification du régime des pluies. Ces particularités sont assez bien connues (Leroux, 1983 ; Buckle, 1996). Le postulat examiné ici va au-delà : il pose l'hypothèse selon laquelle les spécificités climatiques locales induites par le relief pourraient être des révélateurs de la variabilité aérologique de large échelle, non directement reflétée par les variations climatiques des espaces environnants. Deux cas sont étudiés (fig.4) : les régions du Mt Cameroun et du Mt Rungwe (Tanzanie).

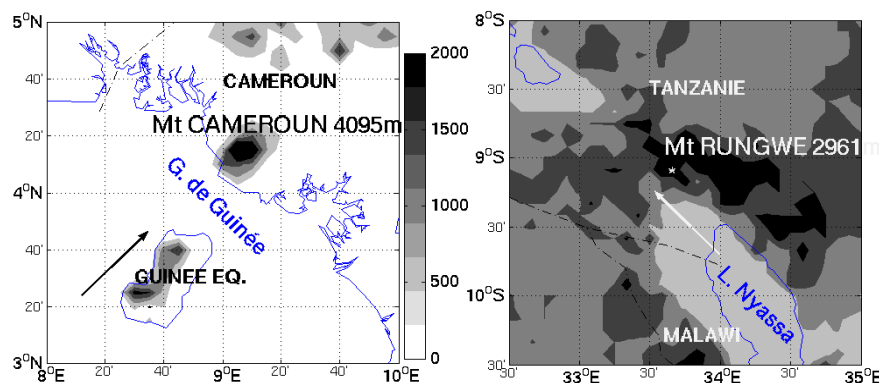


Fig.4 : Cartes de localisation des massifs du Mt Cameroun et du Mt Rungwe. Flèches : vents dominants en basses couches.

La région du Mt Cameroun présente un régime unimodal, à maximum exacerbé de juillet-août (fig.5a), dans un contexte sud-camerounais où domine la bimodalité (Suchel, 1988). Ce maximum correspond au pic d'intensité du flux de mousson, associé à la remontée nord de la ZCIT. Les conditions locales (ascendances orographiques et convergence dans « l'entonnoir » du golfe de Guinée) annihilent les effets dynamiques de la subsidence liée à la cellule de Hadley Sud. Ce faisant le régime s'apparente à ceux de la zone sahélienne. Un point remarquable est, malgré la distance, la bonne corrélation entre les

variations interannuelles des pluies dans la région du Mt Cameroun et dans la zone sahéenne (fig.5b). La corrélation entre les pluies annuelles à Douala (1941-2000) et un indice soudano-sahélien atteint 0,67 (significative à 99,9%), alors que les pluies à Douala ne sont pas corrélées avec celles des régions voisines (fig.5c). Indirectement, cette évolution révélée par le double effet du relief et de la configuration des côtes renseigne sur l'origine de la tendance à la baisse des pluies au Sahel : elle exclut l'hypothèse d'une cause locale, impliquant par exemple le recyclage continental de l'eau, le signal climatique étant présent sur la trajectoire du flux de mousson 1000 km plus au sud.

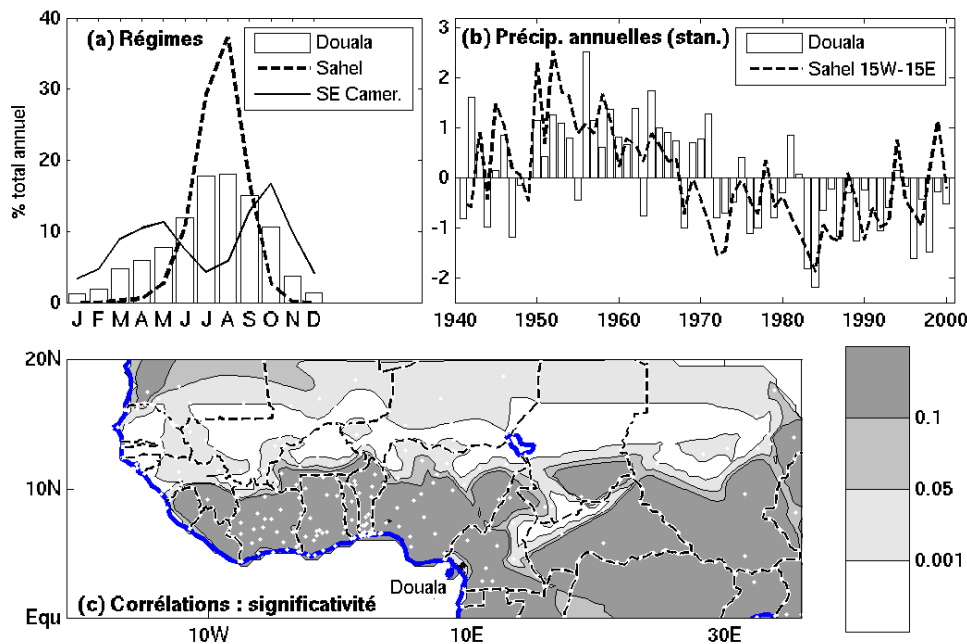


Fig.5 : Précipitations de la région du Mt Cameroun. (a) Régimes pluviométriques comparés de la région de Douala, de la zone sahéenne et du sud-est du Cameroun. (b) Evolution des précipitations annuelles (1941-2000) à Douala et au Sahel. (c) Significativité statistique des corrélations des précipitations annuelles avec celles de la station de Douala.

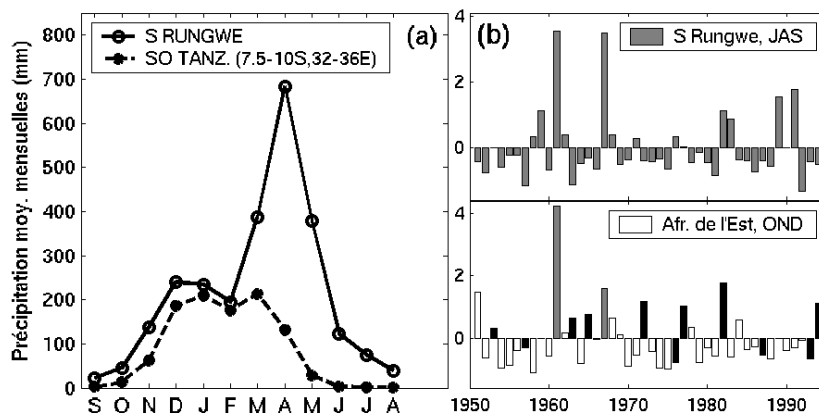


Fig.6 : Précipitations de la région du Mt Rungwe (Tanzanie). (a) Régimes pluviométriques comparés avec les autres stations du sud de la Tanzanie (mm) (b) Evolution des précipitations de Juillet-Septembre (1951-1994) dans la région du Rungwe, et d'Octobre-Décembre en Afrique de l'Est. Barres noires : années El-Nino ; barres grises : années non El-Nino et en même temps anormalement arrosées au Rungwe en juillet-septembre.

Le cas du Mt Rungwe, au sud de la Tanzanie, présente des similitudes avec le Mt Cameroun : au régime « régional » à maximum d'été austral se superposent localement de fortes pluies tardives (avril), se prolongeant jusqu'en juillet (fig.6a). La configuration topographique montre également des massifs au vent (alizés de sud-est), placés dans un « entonnoir topographique » à l'extrémité du lac Nyassa (fig.4). Les pluies post-saison de juin-septembre, habituellement modérées, peuvent être très abondantes (fig.6b), comme en 1961 et 1967. Or ces deux années sont remarquables en Afrique de l'Est : quelques mois plus tard, la saison des « short rains » y a été exceptionnellement arrosée. Si la majorité des années pluvieuses en Afrique de l'Est coïncident avec des événements El-Niño (fig.6b), certaines saisons ne répondent pas à ce forçage. La plupart sont dues à une altération du gradient

thermique zonal dans l'océan Indien (Black et al., 2003). Cependant, il est remarquable que les épisodes les plus pluvieux soient marqués, dès juillet-septembre dans un site topographiquement favorable comme le versant sud du Rungwe, par de fortes anomalies de précipitations, alors que le reste de l'Afrique de l'Est est encore sec.

## Conclusion

En Afrique au Sud du Sahara, la cohérence spatiale des précipitations n'est globalement pas altérée par les reliefs. Les modalités de la variabilité interannuelle ne sont pas significativement différentes dans les régions d'altitude. Dans les cas des monts Cameroun et Rungwe, les reliefs ont même la propriété de « magnifier » ou de révéler les forçages dynamiques de large échelle. Pour évaluer de façon plus systématique les effets différentiels des changements climatiques futurs en zone de montagne, ou de la variabilité naturelle, le recours aux modèles climatiques régionaux est indispensable.

## Références

- Black E., Slingo J., Sperber K.R., 2003 : An observational study of the relationship between excessively strong short rains in Coastal East Africa and Indian Ocean SST. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 74-94.
- Bonnefille R., Chalié F., 2000 : Pollen-inferred precipitation time-series from equatorial mountains, Africa, the last 40 kyr BP. *Global and Planetary Change* **26**, 25-50.
- Buckle C., 1996 : *Weather and climate in Africa*. Longman, Londres, 320 p.
- Chan R.Y., Vuille M., Hardy D.R., Bradley R.S., 2007 : Intraseasonal precipitation variability on Kilimanjaro and the East African region and its relationship to large-scale circulation. *Theor. Appl. Clim.*, **93**, 149-165.
- Ciach G.J., Krajewski W.F., 2006 : Analysis and modeling of spatial correlation structure in small-scale rainfall in Central Oklahoma. *Adv. Water Res.*, **29**, 1450-1463.
- Daly C., Conklin D., Unsworth M., 2010 : Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts. *Int. J. Climatology*, **30**, 12, 1857-1864.
- Diaz H.F., Bradley R.S., 1997 : Temperature variations during the last century at high elevation sites. *Climatic Change*, **36**, 253-279.
- Douguedroit A., Bart F., 1989: Les variations saisonnières des régions pluviométriques du Rwanda. *Public. Association Internationale de Climatologie*, **2**, 133-141.
- Dyer T., 1975 : The assignment of rainfall stations into homogeneous groups : an application of principal component analysis. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **101**, 1005-1013.
- Grab S., 2009 : Climate and Cryospheric Change within the Trans-African Alpine Zone: Scientific advances and future prospects. In: Hirzel, G. (Ed.), *Mountains as Early Indicators of Climate Change*. UNEP, Vienne, p63-73.
- Hay S.I., Cox J., Rogers D.J., Randolph S.E., Stern D.I., Shanks G.D., Myers M.F., Snow R.W. 2002 : Climate change and the resurgence of malaria in the East African highlands. *Nature* **415**, 905-909.
- Leroux M., 1983 : *Le climat de l'Afrique tropicale*. Champion, Paris, 636 p.
- Ngongondo C., Xu C.-U., Gottschalk L., Alemaw B., 2011 : Evaluation of spatial and temporal characteristics of rainfall in Malawi: a case of data scarce region. *Theor. Appl. Climatol.*, DOI 10.1007/s00704-011-0413-0.
- Segele Z.T., Lamb P.J., 2005 : Characterization and variability of Kiremt rainy season over Ethiopia. *Met. and Atmo. Phys.*, **89**, 153-180.
- Suchel J.B., 1988 : *Les climats du Cameroun*. Thèse d'Etat, U. Bordeaux III. 4 vol., 1188 p.
- Urrutia R., Vuille M., 2009 : Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model : temperature and precipitation simulations for the end of the 21<sup>st</sup> century. *J Geophysical Res.*, **114**, D02108.
- Vose R. S., Schmoyer R.L., Steurer P.M., Peterson T.C., Heim R., Karl T.R., Eischeid J., 1992 : *The Global Historical Climatology Network*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, Tennessee, 325 p.
- Zhou G., Minakawa N., Githeko A., Yan G. 2004 : Association between climate variability and malaria epidemics in the East African highlands. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **101**, 2375-80.