

IDENTIFICATION DE TENDANCES RÉCENTES ET RUPTURES D'HOMOGENÉITÉ DES TEMPÉRATURES : EXEMPLE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET SUR LE GOLFE DE GUINÉE

ROME S.⁽¹⁾, CANIAUX G.⁽²⁾, RINGARD J.⁽³⁾, DIEPPOIS B.^(4,5), DIEDHIOU A.⁽⁶⁾

(1) Université Grenoble Alpes, LTHE, BP 53, 38041 Grenoble, France (membre du Labex OSUG@2020 [ANR10 LABX56], membre de l'ANR-13-SENV-0007-03 ACASIS) [sandra.rome@ujf-grenoble.fr]

(2) CNRM/GAME, Météo-France/CNRS, 42, Av. G. Coriolis, 31057 Toulouse Cedex, France [guy.caniaux@meteo.fr]

(3) Université de la Guyane, IRD, UMR ESPACE-DEV, F97300 Cayenne, Guyane [justine.ringard@ird.fr]

(4) Centre for Agroecology, Water and Resilience, CAWR, Coventry University, UK

(5) African Climate & Development Initiative, University of Cape Town, RSA [bastien.dieppois@gmail.com]

(6) IRD, LTHE UMR 5564, 38041 Grenoble, France [arona.diedhiou@ird.fr]

Résumé – Dans le contexte actuel de changements climatiques et environnementaux, la tendance des paramètres météorologiques, notamment celle de la température, est souvent discutée. Ce travail propose d'évaluer les tendances et les ruptures d'homogénéités des températures de deux stations météorologiques d'Afrique de l'Ouest (Niamey/ Niger ; Abidjan/ Côte d'Ivoire) et des données in-situ de températures de surface océanique (SST) dans le Golfe de Guinée. L'objectif est d'examiner si les prédictions fournies par les modèles du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (2013) produisent des tendances cohérentes avec les observations et si les gradients nord-sud des températures montrent une évolution susceptible de modifier la mousson sur l'Afrique de l'Ouest. Les résultats mettent en évidence, de manière robuste, différentes ruptures d'homogénéités : une rupture thermique est identifiée en 1983 à Niamey et en 1986 à Abidjan, dates à partir desquelles les températures moyennes subissent un réchauffement accentué. Aucune rupture n'affecte la SST sur la période considérée. Parallèlement, les contrastes océan-continent de large échelle représentés par ces séries indiquent un accroissement de 0.07°C par décennie sur les 30 dernières années.

Mots-clés : Température, tendance, rupture, réchauffement climatique, Afrique de l'Ouest.

Abstract – Identification of recent temperature breaks and trends: example in West Africa and in the Gulf of Guinea. In the present context of environmental and climatic change, any trend in meteorological parameters, especially in temperature, is often discussed. This work aims to evaluate long term temperature trends and break points at two weather stations in West Africa (Niamey / Niger and Abidjan / Ivory Coast) and for sea surface temperatures (SSTs) in the Gulf of Guinea. The objective is to examine whether the model predictions of the fifth IPCC assessment report (2013) are consistent with observations and if the evolution of meridian thermal gradients will impact the West African monsoon in a context of global atmospheric and oceanic warming. Various heterogeneities are detected in the series: thermal break points are clearly identified in Niamey and Abidjan, in 1983 and 1986, respectively. After the mid-1980s, annual temperature anomalies show significant warming trends while equatorial Atlantic SST does not present any significant break point. It is however found that the large scale contrast of temperatures between the ocean and the continent represented by the series have increased by 0.07°C per decade during the last 30 years.

Keywords: Temperature, trends, discontinuities, climate warming, West Africa.

Introduction

Dans le contexte actuel de changements climatiques et environnementaux, la tendance des paramètres météorologiques, notamment celle de la température, est souvent discutée. Alors que les événements de forte chaleur sont bien moins étudiés en domaine tropical qu'en domaine tempéré, cette région connaît régulièrement ces aléas, à l'instar des fortes chaleurs enregistrées à Niamey ($T_{\text{diurne}} \sim 47^{\circ}\text{C}$) en avril 2010 ou en mai 2013. Christidis *et al.* (2005) observent un réchauffement plus rapide des températures minimales depuis les années 1980, particulièrement au Sahel Central durant la saison chaude (*i.e.*, janvier à mars). Ce résultat est conforté par Ringard *et al.* (2015) qui montrent une augmentation des pics de température et des vagues de chaleur en saison chaude en Afrique de l'Ouest. Cette intensification des extrêmes de température, estimée en calculant le nombre de dépassements du centile 95 (T95), est très nette entre les décennies 1961-1970 et 2000-2010. Les plus fortes augmentations sont observées pour les températures minimales à Niamey et les températures maximales à Abidjan, accompagnées d'une augmentation de l'occurrence des pics de chaleur. Ce travail propose une revue des tendances et des ruptures d'homogénéités (*i.e.* changements abrupts des propriétés statistiques) des séries de température de deux stations météorologiques d'Afrique de l'Ouest (Niamey/ Niger : Sahel Central ; Abidjan/ Côte d'Ivoire : zone

guinéenne) et des séries de températures de surface océanique dans le Golfe de Guinée au large d'Abidjan. L'objectif sous-jacent consiste à examiner si les prédictions fournies par les modèles du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (IPCC, 2013) produisent des tendances cohérentes avec les observations. Un second objectif consiste à examiner comment le contraste thermique méridien entre l'océan et le continent pourrait évoluer dans un contexte de réchauffement climatique et affecter la mousson Ouest-africaine. Cette recherche contribue au projet ANR-13-SENV-0007-03 ACASIS (Alerte aux Canicules au Sahel et à leurs Impacts sur la Santé), inscrit dans le cadre de l'appel à projet SOCENV ("Facing Societal, Climate and Environmental Changes"), édition 2013.

1. Données et méthodes statistiques

1.1. Températures de l'air et températures de surface océanique

Les données utilisées sont des observations quotidiennes de température minimale (Tmin), maximale (Tmax) et moyenne (Tmoy) de l'air à Niamey (1961-2012) et Abidjan (1961-2010) (Figure 1). Ces données météorologiques ont été fournies par la *Direction de la Météorologie Nationale* de la Côte d'Ivoire (SODEXAM) et du Niger. Une autre base de données concerne les températures de surface océanique (SSTs pour *Sea Surface Temperatures*) au large des côtes ouest-africaines sur le domaine (12° - 8° O ; 0° - 3° N). Les séries proviennent d'analyses objectives effectuées par la Funceme (*Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Brasil*) sur l'ensemble de l'Atlantique tropical. Ces analyses de type Cressman sont réalisées tous les mois à partir de données mensuelles in-situ collectées par des bateaux d'observation volontaire (VOS) de l'Office Météorologique Mondial (OMM) sur des boîtes de 2° de latitude et de 5° de longitude (Servain *et al.*, 2014). Les séries de SSTs utilisées couvrent la période 1964-2012 (Figure 1a et 1d). La zone est choisie au nord de l'équateur en raison de son homogénéité spatiale sur un domaine marqué par la circulation des eaux équatoriales au nord de la langue d'eau froide (Caniaux *et al.*, 2011). Une période de référence commune est utilisée pour calculer les anomalies annuelles en prenant des anomalies sur 1971-2000 (à l'image des séries de Berkeley).

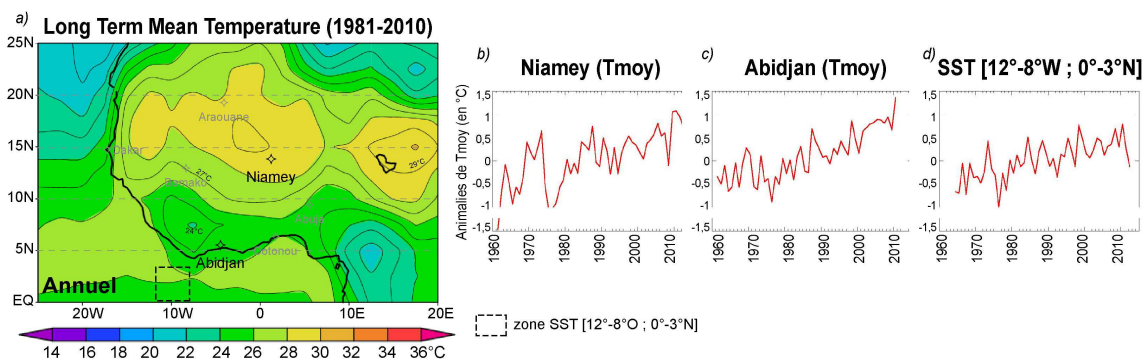


Figure 1. a) Température de l'air (normale 1981-2010) au-dessus de l'Afrique de l'Ouest et localisation des stations d'étude (Niamey et Abidjan) (données des réanalyses du NCEP, grille de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, adapté de Ringard *et al.*, 2015). **b-d)** : évolution des anomalies des températures moyennes annuelles à Niamey, Abidjan et de la SST sur le domaine [12° - 8° O ; 0° - 3° N] calculées par rapport à 1971-2000.

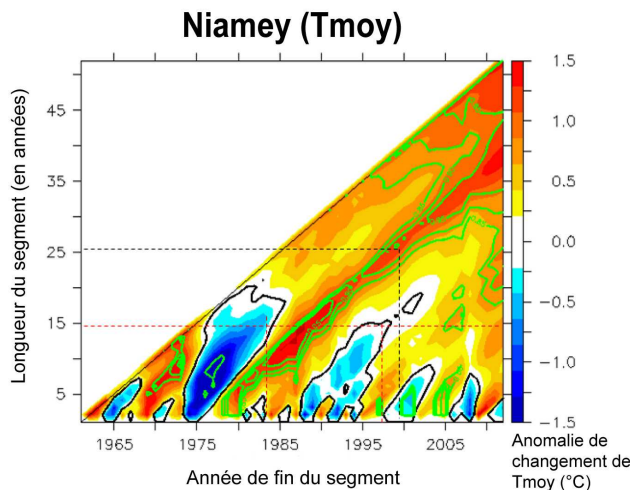
1.2. Tests statistiques détectant tendances et ruptures d'homogénéité

La démarche consiste à tester la pertinence des tendances de température et des ruptures d'homogénéité *via* les différents tests statistiques listés dans le Tableau 1. Ces tests permettent d'identifier objectivement l'occurrence d'éventuelles ruptures, ainsi que les tendances de part et d'autre de celles-ci et leur significativité ; leur utilisation garantit la robustesse de l'analyse

et des résultats présentés. Parmi les tests paramétriques, pour lesquels les données sont sensées suivre des lois de distribution (généralement la loi normale), une étude systématique préalable de l'autocorrélation des données a été effectuée. La méthode de Liebmann *et al.* (2010) est une représentation de l'ensemble des pentes des droites de régression linéaire en fonction de l'année de fin de tous les segments temporels considérés. Elle permet la visualisation d'éventuelles ruptures d'homogénéité selon les échelles temporelles. Un exemple de cette méthode, peut-être moins connue que celles listées dans le Tableau 1, est fourni sur la Figure 2.

Tableau 1. Liste des tests statistiques effectués sur les données de température de l'air à Niamey, Abidjan et de l'océan dans le Golfe de Guinée.

Tests de rupture d'homogénéité		Données utilisées		
Sommes cumulées	Non Paramétrique	Tmin, Tmax, Tmoy Niamey (1961-2012)	Tmin, Tmax, Tmoy Abidjan (1961-2010)	SST Golfe de Guinée (1964-2012)
Pettitt				
Mann-Whitney-Wilcoxon				
Buishand	Paramétrique			
Déviations cumulatives				
Vraisemblance Worsley				
Liebmann <i>et al.</i> (2010)				
Moyenne de Student				
Analyse de la variance (ANOVA)				
Tests de tendance monotone		Données utilisées		
Mann-Kendall	Non Paramétrique	Tmin, Tmax, Tmoy Niamey (1961-2012)	Tmin, Tmax, Tmoy Abidjan (1961-2010)	SST Golfe de Guinée (1964-2012)
Cox-Stuart				
Pente Sen				
Régression linéaire	Paramétrique			



Changement des anomalies de Tmoy (en °C) en fonction de la longueur du segment en ordonnée (en années) et de l'année de fin du segment en abscisse ; signification (en %) en lignes vertes à 85%, 90% et 95%.

Figure 2. Représentation des tendances des Tmoy à Niamey (1961-2012) par la méthode de Liebmann *et al.* (2010).

Pour un segment de 25 ans avant l'année 2000 (pointillés noirs), le changement (tendance de la température multipliée par la longueur du segment temporel) est positif.

Pour des segments inférieurs à 10 ans, l'alternance des changements positifs et négatifs traduit les fluctuations à petite échelle temporelle des anomalies de Tmoy. A l'opposé, le plus long segment (52 ans, qui s'achève en 2012), traduit la tendance globale positive de la série. Pour une période de 15 ans (trait pointillé rouge), certaines années (1983, 1997) ont été précédées par des changements négatifs de la tendance sur 9 et 4 ans respectivement. Ces années correspondent à des ruptures de tendance de la courbe des anomalies de Tmoy de la Figure 1.

2. Résultats : détection des ruptures et tendances dans les séries d'anomalie annuelle des températures

Les tests statistiques effectués mettent ainsi en évidence différentes ruptures d'homogénéités. Seuls les résultats concernant les Tmoy de Niamey sont exposés graphiquement ici, mais toutes les données ont été testées.

Pour Niamey, tous les tests statistiques appliqués à l'ensemble de la série chronologique (1961-2012) détectent une rupture significative aux seuils 0.1, 0.05 et 0.01 en 1983 (Figures 2 et 3). De part et d'autre de cette date, le test de Mann-Whitney-Wilcoxon indique que les médianes avant et après rupture (−0.400°C et +0.338°C) sont significativement différentes au seuil 0.05. Des conclusions similaires sont obtenues suivant le test des moyennes de Student (respectivement −0.374°C et +0.386°C), ainsi qu'avec une analyse de la variance (ANOVA). Lorsqu'appliqués à nouveau sur les segments avant la rupture de 1983, les tests ne détectent aucune nouvelle rupture significative au seuil de 5%. En revanche, après 1983, seuls quelques tests détectent un second changement en 2002, mais à des niveaux de signification élevés (0.1 ou 0.05 ; jamais 0.01) (Tableau 2). Cette seconde date n'a, par conséquent, pas été jugée suffisamment robuste pour être retenue comme une réelle rupture dans la série.

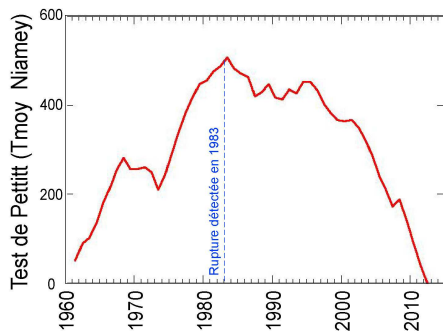


Figure 3 : Exemple de résultats des tests de tendance monotone de la Tmoy à Niamey sur la période 1961-2012. La courbe de la figure 3 représente les variations de la statistique :

$$z = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{signe} (Tmoy (j) - Tmoy (i))$$

du test de Pettitt, où i et j sont les rangs des Tmoy dans la série.

Tableau 2. Résultats des tests de rupture de la Tmoy à Niamey, Abidjan et de la SST. Les dates de ruptures sont mentionnées ainsi que les niveaux de signification (en exposant et italique) aux seuils 10%, 5% et 1%. En gras sont indiquées les ruptures principales détectées sur toute la série ; les autres dates ont été détectées sur les segments de part et d'autre des ruptures principales ou secondaires.

Tmoy	CUSUM	Pettitt	Buishand	Déviatiion cumulative	Vraisemblance de Worsley
Niamey (1961-2012)	1983 ¹²³ 2002 ¹² 2008 ¹	1983 ¹²³ 2002 ¹²	1967 ¹ 1983 ¹²³ 2002 ¹²	1983 ¹²³ 2002 ¹²³ 2008 ¹	1983 ¹²³ 2008 ¹²³
Abidjan (1961-2010)	1986 ¹²³ 2000 ¹²³	1986 ¹²³ 1997 ¹²³	1986 ¹²³ 2000 ¹²³	1986 ¹²³ 2000 ¹²³	1986 ¹²³ 2000 ¹²³ 2009 ¹²³
SST (12°-8°O ; 0°-3°N) (1964-2012)	1986 ¹²³ 1994 ¹	1983 ¹²³	1983 ¹²³ 1997 ¹	1983 ¹²³ 1997 ¹	1980 ¹²³

1: signification au seuil 0.1 ; 2: signification au seuil 0.05 ; 3: signification au seuil 0.01

Sur la Figure 4 sont reportées les pentes de Sen et les droites de régression linéaire sur chaque segment avant et après la rupture de 1983, ainsi que les droites des intervalles de confiance à 95%. Les valeurs des tendances obtenues sont similaires pour l'ensemble de ces méthodes. Alors qu'aucune tendance statistiquement robuste n'est identifiée avant 1983, une augmentation significative est observée après cette date (Tableau 3). Selon l'examen des Tmin et Tmax, cette évolution s'explique par une tendance significative plus marquée dans les Tmax que dans les Tmin sur la période 1984-2012.

La série des anomalies des Tmoy à Abidjan montre une rupture principale en 1986, significative pour tous les tests aux niveaux 0.1, 0.05 et 0.01. La méthode de Liebmann *et al.* (2010) ne permet pas de visualiser clairement cette rupture. Aucune autre rupture n'est détectée avant cette date. Après 1986, il n'y a pas de consensus entre les tests concernant l'existence d'une seconde rupture. Certains situent une rupture en 2000 (significative au seuil 0.01 avec les méthodes des sommes cumulées, de Buishand, de déviatiion cumulative et de

Worsley), alors que le test de Pettitt la situe en 1997 (Tableau 2). Le test de vraisemblance de Worsley appliqué au segment 2001-2010 est le seul à détecter une troisième rupture en 2009. Compte tenu de la disparité de ces résultats, nous ne retiendrons, pour Abidjan, que la rupture principale de 1986. Avant cette date, les pentes de Sen et de régression linéaire indiquent des tendances au réchauffement, mais elles ne sont pas significatives au seuil 0.05 (Tableau 3). Après cette date, les tendances au réchauffement s'accroissent et deviennent significatives au seuil 0.05. Le même comportement qu'à Niamey est noté sur la contribution majeure de la tendance des Tmax à la tendance positive des Tmoy.

Tableau 3. Résultats des tests de tendance monotone (en °C/année) à Niamey, Abidjan et la SST au large d'Abidjan.

Tmoy	Période testée	Mann-Kendall	Cox-Stuart	Pente Sen	Pente de la régression linéaire
Niamey (1961-2012)	1961-1983	Non	Non	0.02267 <i>ns</i>	0.01554 <i>ns</i>
	1984-2012	Oui	Non	0.02379 *	0.02162 *
Abidjan (1961-2010)	1961-1986	Non	Non	0.00900 <i>ns</i>	0.00846 <i>ns</i>
	1987-2010	Oui	Oui	0.07420 *	0.01908 *
SST (12°-8°O ; 0°-3°N) (1964-2012)	1964-2012	Oui	Oui	0.01894 *	0.01906 *

ns: non significatif au seuil 0.05 ; *: significatif au seuil 0.05.

Pour la SST moyenne sur le domaine [12°-8°O ; 0°-3°N], les différents tests ne s'accordent pas sur l'existence d'une date commune de rupture, bien que chaque test pris individuellement détecte une rupture principale significative sur la série complète (1964-2012) (Tableau 2). De plus, la méthode de Liebmann *et al.* (2010) ne permet pas de visualiser de brusques changements d'homogénéité dans la série. On considèrera par conséquent l'absence de rupture sur la période considérée.

Conclusions

Méthodologiquement, les tests utilisés s'accordent pour détecter des changements majeurs dans les séries chronologiques des températures moyennes, maximales et minimales à Niamey et Abidjan, ainsi que dans les SSTs au large d'Abidjan. Pour Niamey, une rupture majeure apparaît en 1983. Pour Abidjan, une rupture se produit à peu près à la même période (1986), ce qui indique que les régions guinéenne et sahélienne ont subi des évolutions comparables depuis les années 1960. En revanche la SST ne présente pas de rupture de tendance nette, mais une tendance positive continue et significative depuis 1964. Ce réchauffement océanique n'a pas une origine locale car il a été mis en évidence sur l'ensemble du bassin Atlantique tropical (Servain *et al.*, 2014). Les raisons ne sont pas clairement établies, mais il pourrait être

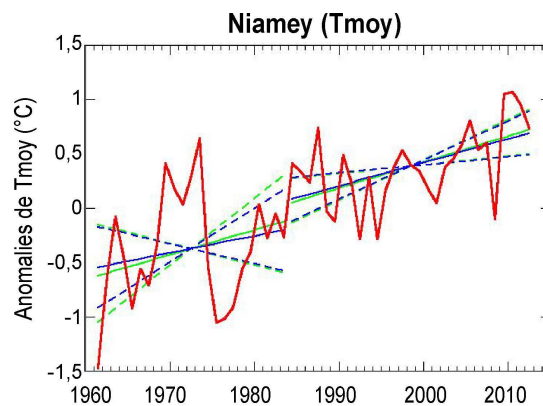


Figure 4. Evolution des anomalies de Tmoy à Niamey : pentes des régressions linéaires (lignes bleues) et pentes de Sen (lignes vertes) avec intervalles de confiance à 95% (pointillés bleus et verts resp.) sur les segments avant et après la rupture détectée en 1983.

associé à un changement de la circulation océanique locale ou de plus grande échelle (Rahmstorf *et al.*, 2013). Après la rupture de 1983 sur Niamey et de 1986 sur Abidjan, les deux stations présentent une tendance accrue au réchauffement. L'évolution des températures moyennes coïncide avec une augmentation plus forte des températures maximales que minimales. Sur la période commune après la rupture principale (1987-2010), les tendances sont, par ordre décroissant, de +0.26°C/décennie sur Niamey, +0.19°C/décennie sur Abidjan et de +0.18°C/décennie sur l'océan. Ces chiffres reflètent l'existence d'un gradient sud-nord positif des tendances, ce qui signifie que les contrastes méridiens entre l'océan et le continent se sont accrus de manière significative au cours des 30 dernières années. L'AR5 du GIEC signale peu de travaux concernant les températures sur l'espace Ouest Africain. Cependant, nos résultats sont cohérents avec les observations homogénéisées de la NOAA et de Berkeley Earth, comme avec les sorties de modèle CMIP5, montrant, sur la période 1901-2012, un réchauffement de la température de surface comparable (Hartmann *et al.*, 2013) : sur le Sahel Central (*e.g.* Niamey) de +1,75 à 2,5°C, sur la côte guinéenne (*e.g.* Abidjan) environ + 1,5 à 1,75 °C et de l'air maritime au large d'Abidjan de 0,8 à 1,25°C. Ce réchauffement est beaucoup plus important depuis 1979.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les collègues ayant mis à disposition les données météorologiques locales : B. DjeKouakou (SODEXAM, Meteorological Dept., Abidjan, Côte d'Ivoire), G. L. Katiellou (Niger Meteorological Office, Niamey, Niger) et S. I. Sanda (Centre Régional AGRHYMET/CILSS, Niamey, Niger). Ils remercient aussi la Funceme (Brésil) pour l'accès aux données de SST.

Références bibliographiques

- Caniaux G., Giordani H., Redelsperger J-L., Guichard F., Key E., Wade M., 2011 : Coupling between the Atlantic cold tongue and the West African monsoon in boreal spring and summer. *Journal of Geophysical Research*, **116**, C04003, doi:10.1029/2010JC006570.
- Christidis N., Stott P. A., Brown S., Hegerl G. C., Caesar J., 2005 : Detection of changes in temperature extremes during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters*, **32**(20).
- IPCC, 2013 : *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Hartmann D.L., Klein Tank A.M.G., Rusticucci M., Alexander L.V., Brönnimann S., Charabi Y., Dentener F.J., Dlugokencky E.J., Easterling D.R., Kaplan A., Soden B.J., Thorne P.W., Wild M. and Zhai P.M., 2013 : *Observations: Atmosphere and Surface*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Liebmann B., Dole R.M., Jones C., Bladé I., Allured D., 2010 : Influence of choice of time period on global surface temperature trends estimates. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **91**, 1485-1491.
- Rahmstorf S., Schaffernicht E., Feulner G., Mann M., 2013 : Evidence for a sudden slowdown in Atlantic overturning around 1970. *Geophysical Research Abstract* 15, EGU 2013-10704, EGU General Assembly 2013, Vienna.
- Ringard J., Dieppois B., Rome S., Pellarin T., Konaré A., Konaté D., DjeKouakou B., Katiellou G. L., Sanda S. I., Hassane B., Lazoumar R. H., Garuma G. F., Mengistu G., Camara M., Diongue A., Vischel T., Gaye A. T., Moussa I. B., Descroix L., Diedhiou A., 2015 : The intensification of thermal extremes in West Africa (en révisions pour *Global and Planetary Change*).
- Servain J., Caniaux G., Kouadio Y.K., McPhaden M.J., Araujo M., 2014 : Recent climatic trends in the tropical Atlantic. *Climate Dynamics, TACE Special Issue*, **43**, 3071-3089, doi 10.1007/s00382-014-2168-7.