

L'atelier scientifique « *Eau et sociétés face au changement climatique dans le bassin de la Casamance* » est organisé par le Conseil National des Recherches d'Italie en collaboration avec le LMI (Laboratoire Mixte International IRD/UGB) PATEO (Patrimoines et Territoires de l'Eau), ISRA (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles) et l'Université Assane Seck de Ziguinchor. Il se veut une occasion d'échange entre les institutions de recherche actives dans la région pour faire le point sur les recherches récentes sur les changements climatiques et hydrologiques et leurs impacts environnementaux, agricoles et sociaux, y compris les stratégies d'adaptation et de minimisation des risques.

Les premiers deux jours de l'atelier scientifique visent à faire le point sur les recherches récentes ou en cours sur les problèmes d'environnement et de sociétés causés par le Changement Climatique et ses effets hydrologiques, avec un focus sur mangrove, riziculture, érosion côtière, salinisation des eaux et des sols, dans le bassin du fleuve Casamance.

Le troisième jour, une table ronde est organisée pour lancer l'Initiative Casamance « *Un réseau scientifique au service du développement en Casamance* » qui vise à harmoniser la demande et l'offre de produits scientifiques au service du développement dans la Région.

Organisateurs : IBIMET-CNR (Institut de Biométéorologie - Conseil National de la Recherche d'Italie), PATEO (LMI-Patrimoines et Territoires de l'Eau, France-Sénégal), Université Assane Seck de Ziguinchor, ISRA (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles).

Auteurs :

Adama MBAYE, Amadou Hamath DIA, Amadou Tahirou DIAW, Andrea Di VECCHIA, Ansoumana BODIAN, Cheikh FAYE, E. ZUCCHINI, Eduardo FIORILLO, El Hadji Balla DIÈYE, Françoise BRETTON, Honoré DACOSTA, I. SEPPOLONI, Jean-Claude MARUT, Luc DESCROIX, M. Manzelli, Marc BAETA, Marie-Christine CORMIER-SALEM, Maurizio BACCI, Mbaye DIOP, Olivier RUË, Oumar SY, Tidiane SANÉ, Vieri TARCHIANI.

Illustration de couverture : Caterina Ricci (IBIMET - CNR), que nous tenons à remercier chaleureusement ici.

ISBN : 978-2-343-07690-4
25,50 €



L'Harmattan

Eaux et sociétés face au changement climatique dans le bassin de la Casamance

Luc Descroix, Saliou Djiba, Tidiane Sané, Vieri Tarchiani (eds)



**Luc Descroix,
Saliou Djiba,
Tidiane Sané,
Vieri Tarchiani (eds)**

Eaux et sociétés face au changement climatique dans le bassin de la Casamance

Actes de l'Atelier scientifique et du lancement de l'initiative « **Casamance : un réseau scientifique au service du développement en Casamance** » du 15-17 juin 2015 à l'Hôtel Kadiandoumagne de Ziguinchor, Sénégal



Programme d'Appui au Programme National d'Investissement dans l'Agriculture au Sénégal

- Origny, J. 2006. « Les migrations climatiques générées par la hausse inégale du niveau de la mer » - *Perspectives géopolitiques*. Vol. Collège Interarmées de Défense.
- Paskoff, R. 1998a. « Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies ». In: *Annales de Géographie*. 1998, t. 107, n°600. pp. 233-248. doi : 10.3406/geo.1998.20847
- Paskoff, R., 1998b. « Impacts à attendre d'une élévation du niveau de la mer sur les côtes françaises) ». In : *Impacts potentiels du changement climatique en France au 21^{ème} siècle* Ministère de l'Aménagement du Territoire, p. 46-53.
- Paskoff, R., 2001. *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers ; Le mythe et la réalité*. Collection « Propos », Institut Océanographique, Paris, 191 p., 70 fig.
- Planton, S., A. Cazenave, P. Delecluse, Dorfliger, N., P. Gaufrès, D. Idier, M. Jamous, G. Le Cozannet, H. Le Treut, Y. Peings, Évolution du niveau de la mer Sous la direction de J. Jouzel Février 2012 (Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement ; L'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC).
- Strove, J., M.K. Holland, W. Meier, T. Scambos, and M. Serreze, 2007, *Arctic sea ice decline: faster than forecast*, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09501, doi: 10.1029/2007/GL029703.
- Sy, A.A. ;2013. Dynamique sédimentaire et risques actuels dans l'axe Saint-Louis-Gandioul, littoral Nord du Sénégal, littoral Nord du Sénégal, Thèse de Doctorat, UGB, 293p.
- Velicogna, I., 2009: *Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE*, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19503, doi:10.1029/2009GL040222.
- Watson T.A., A.D. Werner et C.T. Simmons (2010): "Transience of seawater intrusion in response to sea level rise", *Water Resources Research*, 46, W12533, 10p, doi:10.1029/2010WR009564.
- Werner A.D. et C.T. Simmons (2009), "Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers", *Ground Water*, 47, 197-204, doi:10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x.

**LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT
DE LA CASAMANCE : ÉVOLUTION ET TENDANCES
DU CLIMAT, IMPACTS SUR LES RESSOURCES EN EAU
ET STRATÉGIES D'ADAPTATION**

Cheikh Faye¹ et Tidiane Sané¹

*¹Département de Géographie / U.F.R. des Sciences et Technologies /
UASZ / Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, BP 523
Ziguinchor (Sénégal). cheikh.faye@univ-zig.sn, tsane@univ-zig.sn*

Résumé

Le changement climatique, une des plus grandes préoccupations actuelles de la planète, est caractérisé par une augmentation de la température moyenne au cours du 20^{ème} siècle de l'ordre de 0,6°C, une pluviométrie plus irrégulière, l'accentuation des catastrophes naturelles... Dans ce contexte, la fréquence et l'intensité des événements extrêmes tels que les inondations et les sécheresses augmenteraient et pourraient entraîner d'énormes défis en matière de gestion des ressources en eau des bassins fluviaux de l'Afrique de l'Ouest. C'est dans cette perspective que se situe le présent travail qui a pour objectif la caractérisation de l'évolution et des tendances du climat en Casamance. Il est basé sur une analyse de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques comme les températures et la pluviométrie, deux variables fondamentales de détection du changement climatique, de leurs impacts sur les ressources en eau et des stratégies d'adaptation. Les résultats de l'analyse indiquent une tendance quasi-stable de 1960 à 1982 sur les températures minimales et de 1960 à 1995 sur les températures maximales. Après la rupture, l'augmentation des températures devient très significative. Cette augmentation, en moyenne de 0,75 °C/an n'a pas été constante durant toute la période et, est plus importante en saison des pluies. Pour les précipitations, la tendance observée indique clairement une baisse entre 1970 et 1994 et une légère hausse, non significative, à partir de 1995.

Mots clés : changement climatique, température, pluviométrie, tendance, rupture, adaptation

Abstract : The climate change, one of the biggest current concerns of the planet, is characterized by an increase of the average temperature during the 20th century by 0,6°C, the decrease of the rainfall in quantity and in duration, the accentuation of natural disasters ... In this context, frequency and intensity of extreme events such as floods and droughts would increase and could cause enormous challenges regarding water resource management in West African basins. This is the context of the present work which objective is to characterize the climate evolution and trends in Casamance. It is based on an analysis of climatic parameters spatiotemporal variability, such as temperatures and rainfall, two main variables of climate change detection, their impacts on water resources and adaptation strategies. Results of the analysis indicate a quasi-stable trend from 1960 to 1982 for minimal temperatures and from 1960 to 1995 for maximal temperatures. After the break, the increase of the temperatures becomes very significant. This increase, on average of 0,75° C / year was not constant during the whole period and, is more important in rainy season (0,67°C / year). Concerning precipitations, observed trend indicates clearly a reduction between 1970 and 1994 and a no significant increase after 1995.

Keywords: climate change, temperature, rainfall, trend, rupture, adaptation

INTRODUCTION

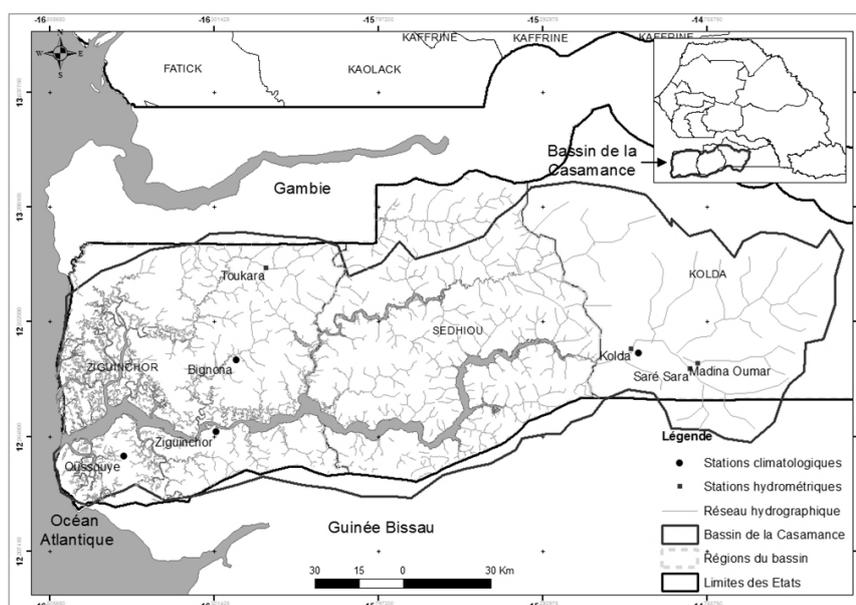
Le changement climatique désigne le phénomène d'augmentation, à l'échelle mondiale et sur plusieurs années, de la température moyenne des océans et de l'atmosphère, souvent accompagné d'une pluviométrie plus irrégulière en quantité et en durée, et de l'accentuation des catastrophes naturelles... (GIEC, 2007). L'augmentation globale de la température de la surface du globe au cours du siècle dernier est de l'ordre de 0,6 (+/-0,2°C) (Deneux, 2002). Les prévisions pour les 50 années à venir vont de 2 à 6°C. Le changement climatique est donc une importante question environnementale, sociale et économique qui menace la réalisation des Objectifs du Millénaire pour le Développement (UNDP, 1998).

De récents rapports produits par le GIEC prévoient des événements météorologiques extrêmes, notamment les inondations, les sécheresses et les tempêtes tropicales qui vont augmenter en fréquence et en intensité, surtout sur le continent africain. Les changements climatiques sont devenus une grande menace quotidienne pour la

Le changement climatique dans le bassin versant de la Casamance...

planète en raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel. Ils contribuent à l'incidence accrue des inondations et de la sécheresse, à la propagation des maladies et à l'augmentation des risques de conflits dus à la raréfaction des terres, de l'eau et à l'avancée des mers sur les continents suite à la fonte des calottes glaciaires (GIEC, 2007).

Figure 14. Localisation du bassin de la Casamance et des stations de l'étude



L'étude de l'évolution climatique à l'échelle d'un territoire est une préoccupation croissante tant pour la communauté scientifique que pour les acteurs territoriaux. Elle vise à caractériser les variations climatiques récentes et à définir les évolutions futures afin de mettre en place des stratégies d'adaptation sur des échelles spatiales opérationnelles comme la région. Ces stratégies cherchent à réduire la vulnérabilité du territoire étudié face aux changements climatiques (Rome *et al.*, 2010). La présente étude s'inscrit dans cette démarche qui a pour objectif d'étudier certains impacts liés aux changements climatiques et de proposer des mesures d'adaptation nécessaires. Ce présent article fait ainsi un diagnostic des variations climatiques récentes dans le bassin de la Casamance (Figure 14).

Le bassin de la Casamance, situé entre 12°20' et 13°21' de latitude Nord et entre 14°17' et 16°47' de longitude Ouest couvre une surface

d'environ 20150 km² et s'étire d'Ouest en Est sur 270 km, et du Nord au Sud sur 100 km (Dacosta, 1989). Le climat de la Casamance, de type sud-soudanien côtier et sud soudanien continental (Sané *et al.*, 2011), subit fortement l'influence des facteurs géographiques et atmosphériques (Sagna, 2005). La pluviométrie est caractérisée par un hivernage qui dure de 5 à 6 mois (généralement de juin en octobre).

1. Données et méthodes

Les données utilisées concernent les températures (minimales, maximales, et moyennes) et les cumuls de pluies, et sont recueillies auprès de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal (ANACIM). Les données de températures proviennent de la station de Ziguinchor et celles de pluies des stations de Ziguinchor, Kolda, Bignona et d'Oussouye. La taille de l'échantillon (1960-2012) est basée sur les recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale qui préconise l'utilisation d'une période minimale d'observation de 30 ans pour toute étude sur l'évolution du climat (OMM, 1994).

Le test de Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975 ; Hirsch *et al.*, 1984) a été utilisé pour analyser les tendances de l'évolution des températures et des précipitations. En outre, la méthode de la pente de Sen (Sen, 1968) a été appliquée pour déterminer l'ampleur du changement et le test de Pettitt (1979) pour examiner l'existence d'une rupture dans les séries des variables. L'hypothèse nulle des tests (Mann-Kendall et Pettitt) rejetée à un seuil de significativité de 0,01, signifie l'absence de tendance ou de changement brusque sur les séries.

2. Résultats

2.1. Variabilité des températures et des précipitations en Casamance

Les moyennes annuelles des températures minimales (TN) et maximales (TX) sont calculées à partir des données de la station de Ziguinchor. La tendance globale est la variation annuelle des températures. Le coefficient de variation est légèrement plus élevé sur les températures minimales (TN) et moyennes (TM) avec respectivement 0,04 et 0,03 que sur les températures maximales (TX) avec 0,02. Ces trois variables ont subi une légère augmentation de 1960 à 2012. En conformité à la variation planétaire (IPCC, 2007), ce réchauffement de 1960 à 2012 semble avoir été plus important pour

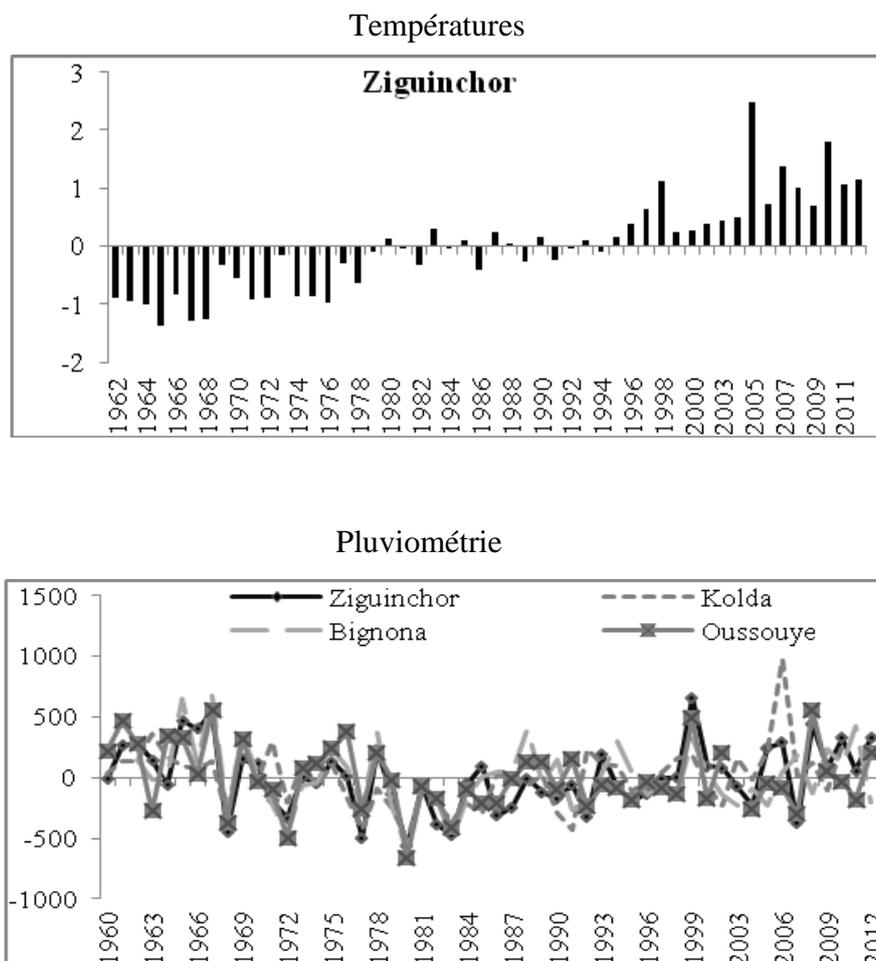
Le changement climatique dans le bassin versant de la Casamance...

les températures minimales (avec $0,73^{\circ}\text{C}/\text{an}$) que pour les températures maximales (avec $0,59^{\circ}\text{C}/\text{an}$), bien que la différence entre les deux soit très faible (0,14). La température moyenne à Ziguinchor a connu comme extrêmes un minimum en 1965 avec $26,1^{\circ}\text{C}$ et un maximum en 2005 avec $30,0^{\circ}\text{C}$. Durant l'année 2005, la température maximale a atteint $37,5^{\circ}\text{C}$ et la température minimale $22,2^{\circ}\text{C}$. Quant à l'année 1965, sa température maximale n'a pas dépassé $33,0^{\circ}\text{C}$ et sa température minimale a été de seulement $19,2^{\circ}\text{C}$.

A Ziguinchor, les totaux annuels de précipitations varient entre une valeur maximale de 1946,1 mm (en 1999) et une valeur minimale de 723,9 mm (en 1980). L'écart entre le maximum et le minimum de la série est très élevé (1222 mm). Ce qui témoigne de la très forte variabilité de la pluviométrie avec un coefficient de variation de 0,22. Toutefois, les rares pluies de *heug* en saison sèche sont plus aléatoires et variables ($\text{CV} = 1,69$) que celle de la saison des pluies ($\text{CV} = 0,22$). Les stations de Kolda avec un CV de 0,23), de Bignona (avec un CV de 0,24) et d'Oussouye (avec un CV de 0,21) confirment cette variabilité de la pluviométrie notée à Ziguinchor.

Pour les températures moyennes annuelles, on distingue une première partie où les anomalies sont majoritairement négatives (le minimum étant de $-1,4^{\circ}\text{C}$) et une seconde partie où les anomalies sont majoritairement positives (le maximum étant de $2,5^{\circ}\text{C}$). De plus, les anomalies négatives paraissent moins élevées par rapport à la moyenne que les anomalies positives qui seraient de plus en plus élevées à la fin de la série. Cela traduirait une non homogénéité dans le réchauffement. La Figure 15 permet de retenir l'année 1965 comme étant exceptionnellement « froide » sur laquelle la TN est de $19,2^{\circ}\text{C}$, alors que la valeur moyenne de la série des TN est de $20,7^{\circ}\text{C}$. Elle permet également de retenir 2005 comme une année exceptionnellement « chaude » sur laquelle la TX est de $37,5^{\circ}\text{C}$ par rapport à une valeur moyenne de $34,2^{\circ}\text{C}$.

Figure 15. Anomalies de températures moyennes à Ziguinchor et de cumuls annuels de pluies pour 4 stations casamançaises par rapport à la moyenne de la période 1960-2012



Par rapport aux précipitations, les anomalies des cumuls annuels moyens de pluies de la période 1960-2012 ne sont pas clairement réparties en fonction du temps comme pour les températures moyennes. Elles changent de signe d'une année sur l'autre et le maximum d'années successives de même signe atteint rarement 5 années, ce qui confirme l'idée qu'il n'y a pas de tendance significative de l'évolution des précipitations aux quatre stations. Néanmoins, les trois décennies 1970, 80 et 90 restent la période la plus déficitaire. A la station de Ziguinchor (Figure 15), l'année 1980 apparaît comme

Le changement climatique dans le bassin versant de la Casamance...

étant exceptionnellement « sèche » avec une anomalie de – 563,8 mm et l'année 1999 comme une année exceptionnellement « pluvieuse » dont l'anomalie positive est de 658,4 mm. Ce changement de tendance noté à Ziguinchor est aussi mis en évidence aux stations de Kolda, Bignona et d'Oussouye.

2.2. Tendances des températures et des précipitations

Les résultats précédents montrent que la tendance au réchauffement ne semble pas régulière durant toute la période. Notre idée a été de chercher des changements de tendances ou la présence d'une éventuelle rupture dans les séries de températures et de précipitations aux échelles mensuelle, annuelle et saisonnière, par l'utilisation de deux tests : Pettitt et Mann-Kendall. Le Tableau 1 indique les résultats des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les températures et les précipitations à l'échelle annuelle à la station de Ziguinchor sur la période 1960-2012. Sur les températures minimales, maximales et moyennes, les deux tests (Pettitt et Mann-Kendall) indiquent la présence d'une rupture et/ou tendance. Le test de Pettitt indique comme date de rupture 1995 pour les TX et 1982 pour les TN. Ces ruptures sont confirmées par le test de Mann-Kendall qui présente des τ de Kendall positifs avec 0,59 pour le TX, 0,73 pour le TN et 0,75 pour le TM.

La tendance des températures est à la hausse. Elle est plus significative pour les TN que pour les TX. Pour quantifier la variation des températures à travers la date de rupture, nous avons découpé la série temporelle en deux sous-périodes de part et d'autre des dates de rupture. La comparaison des deux sous-périodes montre que celle après rupture enregistre, par rapport celle avant rupture, un excédent de 1,2°C pour les TX, de 1,1 °C pour les TM et de 1,4°C pour les TN. Pour confirmer la non-stationnarité des séries de températures à partir de 1995 (pour les TX) et 1982 (pour les TN), la Figure 16 des températures annuelles sur la Casamance a été scindée en deux parties. Leurs droites de moyennes respectives confirment clairement la stabilité de la première période et l'évidence du réchauffement moyen pendant la deuxième période.

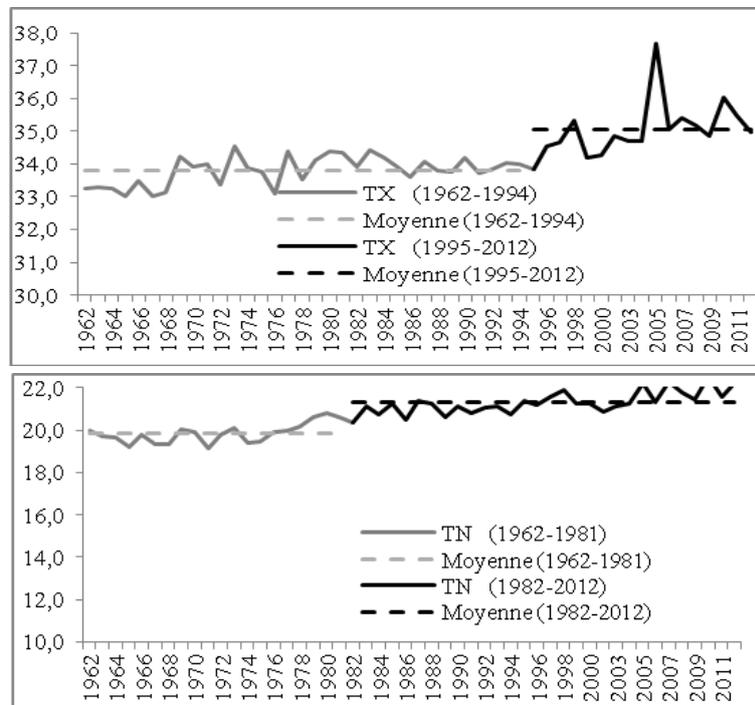
Tableau 1. Résultats des tests sur les températures et les précipitations annuelles (1960-2012)

Test de Mann-Kendall	Descripteurs	Températures à Ziguinchor			Pluviométrie annuelle			
		TX	TN	TM	Ziguinchor	Kolda	Bignona	Oussouye
	τ de Kendall	+0,59*	+0,73*	+0,75*	+0,004	-0,004	-0,01	-0,13
Pente de Sen	+0,04	+0,05	+0,05	+0,17	-0,12	-0,27	-4,02	

Test de Pettitt	Descripteurs	Températures à Ziguinchor			Pluviométrie annuelle			
		TX	TN	TM	Ziguinchor	Kolda	Bignona	Oussouye
	Date de rupture	1995	1982	1982	1970	1970	1970	1970

(-): tendance négative ; (+): tendance positive ;(*) : tendance significative ; (Exc.): Excédent ; (Défi.): Décicit ; TX = températures maximales ; TN = températures minimales ; TM = températures moyennes

Figure 16. Mise en évidence du changement de tendance à partir de 1995 (pour les TX) et 1982 (pour les TN) sur les températures annuelles à la station de Ziguinchor (1962-2012)



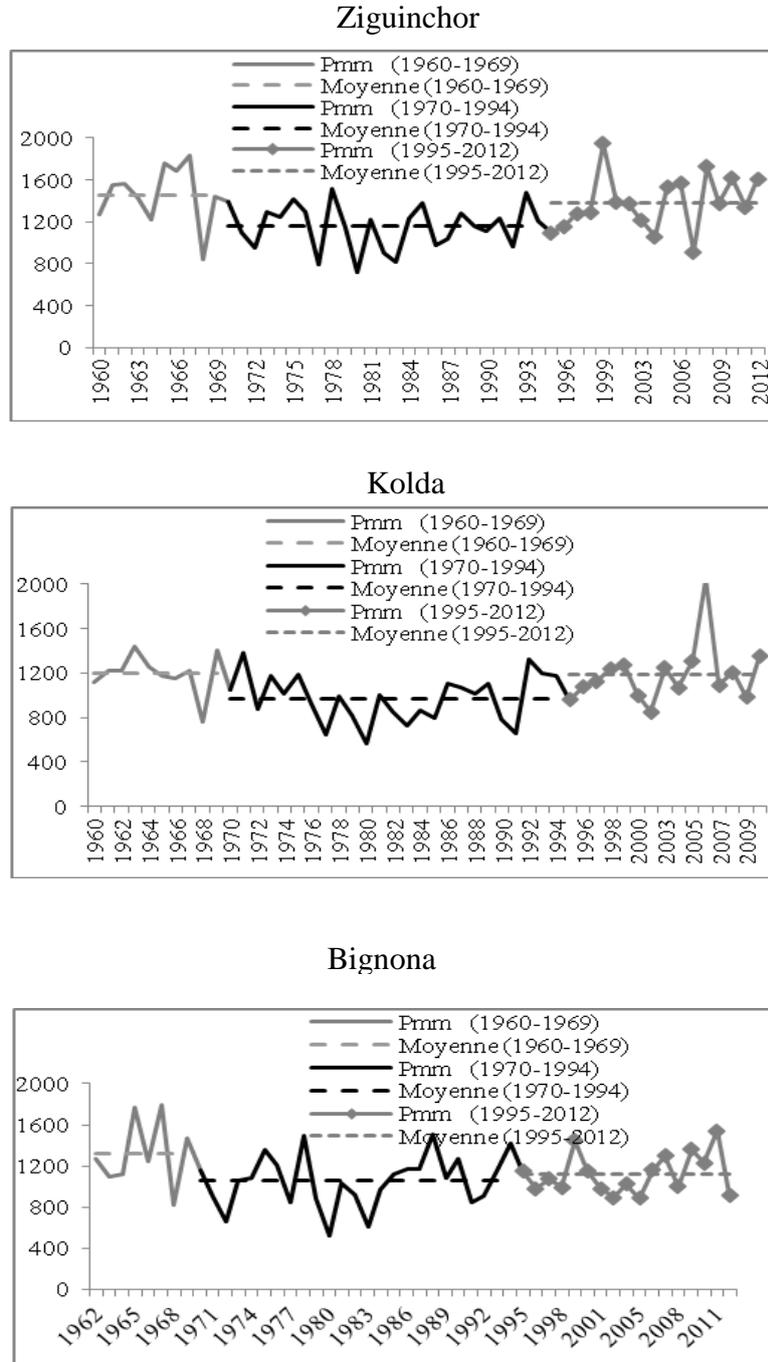
Le changement climatique dans le bassin versant de la Casamance...

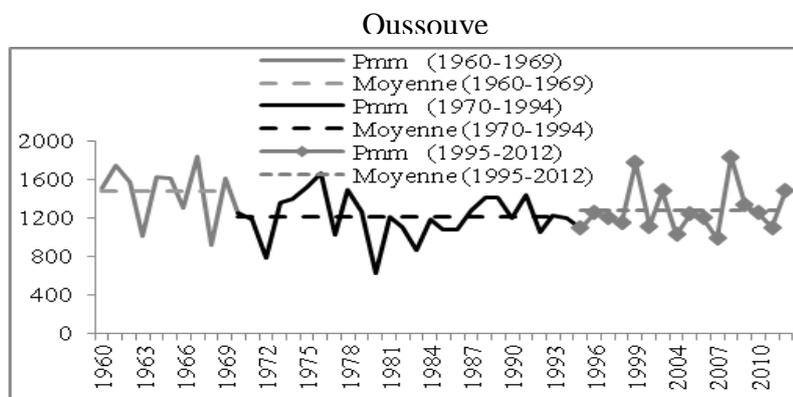
Pour les précipitations, les deux tests de Pettitt et de Mann-Kendall n'ont indiqué ni une rupture ni une tendance significative, les p des deux tests étant supérieurs au seuil de significativité qui égal à 0,01. La Figure 17 des totaux annuels de pluies détermine une tendance presque stable entre 1960-2013. Néanmoins, la courbe d'évolution montre d'abord une baisse des valeurs surtout à partir des années 1970, ce que montrent les τ de Kendall négatifs avec -0,004 mm à Kolda, -0,01 mm à Bignona et -0,13 mm à Oussouye ; puis une hausse aux environs de 1995 (les τ de Kendall étant de 0,23 mm à Ziguinchor, 0,23 mm à Kolda, 0,14 mm à Bignona et 0,05 mm à Oussouye). Cela laisse à penser, qu'au-delà de la sécheresse des années 1970, décrite dans divers travaux (Dacosta, 1989 ; Sané *et al.*, 2011 ; Faye *et al.*, 2015), un nouveau changement important du régime pluviométrique s'est encore produit au tournant du siècle comme indiqué par des certains travaux (Niang, 2008 ; Ali et Lebel, 2009 ; Ozer *et al.*, 2009 ; Ouoba, 2013 ; Panthou *et al.*, 2014 ; Bodian, 2014) qui suggèrent que durant les années 1990 intervient la fin de la sécheresse qu'a connu l'Afrique de l'Ouest.

Les résultats des tests aux échelles mensuelles et saisonnières n'ont fait que confirmer ceux réalisés à l'échelle annuelle. Le Tableau 2 indique les résultats des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les températures et les précipitations à l'échelle mensuelle sur la période 1960-2012.

Sur les températures, les ruptures (et/ou tendances) sont répertoriées à l'échelle mensuelle. Cependant, elles ne sont pas généralisées sur les douze mois de l'année. En effet, l'analyse des résultats des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les TX permet de diviser l'année en deux sous-périodes : une sous-période sur laquelle la rupture est notée (75 % des mois) et une autre sur laquelle il n'y a pas de rupture (25 % des mois : il s'agit des mois de janvier, février et avril). Pour ce qui est de la tendance à la hausse, elle est significative de mars à décembre (soit 10 mois), seuls janvier et février ont enregistré des tendances à la hausse non significative. Par contre pour les TN, les résultats sont homogènes, une tendance significative et une rupture sont notées sur tous les mois. A l'échelle mensuelle, le réchauffement est donc plus largement noté sur les TN que sur les TX.

Figure 17. Mise en évidence du changement de tendance à partir de 1970 et 1994 sur l'évolution des précipitations (1960-2012)





La comparaison des régimes thermiques mensuels avant et après rupture montre clairement une tendance à l'augmentation des températures tout au long de l'année. Cette augmentation atteint son paroxysme pendant l'été et spécialement au mois de septembre pour les TX ($\tau = 0,62^{\circ}\text{C}$) et au mois d'août pour les TN ($\tau = 0,62^{\circ}\text{C}$). De façon générale, lorsqu'une rupture est présente (test de Pettitt), une tendance (test de Mann-Kendall) est également repérée et inversement. Toutefois, le mois d'avril pour les TX présente un résultat atypique, car malgré une tendance significative détectée par le test de Mann-Kendall, aucune rupture n'a été décelée par le test de Pettitt. De plus, même les mois qui ne présentent pas de rupture ont des τ et des pentes de Kendall positifs, ce qui indique une tendance à un réchauffement.

Tableau 2. Résultats des tests sur les températures mensuelles à Ziguinchor (1960-2012)

Températures maximales (TX)		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Test de Mann-Kendall	τ de Kendall	+0,05	+0,24	+0,37*	+0,33*	+0,4*	+0,49*	+0,54*	+0,59*	+0,62*	+0,49*	+0,34*	+0,41*
	Pente de Sen	0	+0,03	+0,04	+0,03	+0,04	+0,05	+0,05	+0,05	+0,05	+0,04	+0,03	+0,05
Test de Pettitt	Date de rupture			1997		1992	1988	1992	1992	1994	1994	1993	1995
Températures minimales (TN)		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Test de Mann-Kendall	τ de Kendall	+0,57*	+0,6*	+0,58*	+0,52*	+0,3*	+0,51*	+0,47*	+0,62*	+0,54*	+0,7*	+0,56*	+0,66*
	Pente de Sen	+0,09	+0,08	+0,07	+0,05	+0,04	+0,03	+0,03	+0,03	+0,03	+0,04	+0,06	+0,09
Test de Pettitt	Date de rupture	1983	1987	1982	1979	1982	1997	1976	1981	1984	1985	1986	1986

Le changement climatique dans le bassin versant de la Casamance...

A l'échelle mensuelle, les dates de rupture sont variables et interviennent généralement plutôt pour les TN (1981 à 1986) que pour les TX (1992 à 1995). L'excédent le plus élevé, de part et d'autre de la date de rupture, est noté au mois de juin (rupture en 1988) pour les TX et au mois de janvier (rupture en 1983) pour les TN.

Tableau 3. Résultats des tests sur les précipitations mensuelles (1960-2012)

Station de Ziguinchor		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Test de Mann-Kendall	τ de Kendall	-0,01	+0,01	+0,05	-0,23	-0,03	-0,01	+0,06	-0,05	-0,01	+0,04	-0,02	-0,06
	Pente de Sen	0	0	0	0	0	-0,04	+0,59	-0,70	-0,08	+0,24	0	0
Test de Pettitt	Date de rupture	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970
Station de Kolda		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Test de Mann-Kendall	τ de Kendall	-0,02	+0,06	+0,10	-0,07	+0,04	+0,11	+0,08	+0,04	+0,01	-0,08	+0,05	-0,02
	Pente de Sen	0	0	0	0	+0,02	+0,89	+0,89	+0,34	+0,1	-0,48	0	0
Test de Pettitt	Date de rupture	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970
Station de Bignona		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Test de Mann-Kendall	τ de Kendall	-0,21	-0,25	-0,07	-0,09	-0,10	0	-0,09	+0,03	+0,07	-0,17	-0,23	-0,19
	Pente de Sen	0	0	0	0	0	-0,01	-0,8	+0,3	+0,69	-0,7	0	0
Test de Pettitt	Date de rupture	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970
Station d'Oussouye		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Test de Mann-Kendall	τ de Kendall	-0,05	-0,05	-0,07	-	+0,04	-0,05	-0,11	-0,11	+0,07	-0,09	-0,34	-0,10
	Pente de Sen	0	0	0	-	0	-0,28	-1,05	-1,38	0,72	-0,49	0	0
Test de Pettitt	Date de rupture	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970	1970

Le changement climatique dans le bassin versant de la Casamance...

Les totaux mensuels de pluies n'ont connu, à l'image des cumuls annuels, aucune rupture ou tendance significative car les p des tests sont supérieurs au seuil de significativité. Toutefois, la tendance générale est à la baisse à partir des années 1970 mais une baisse non significative. Cette tendance à la baisse n'est pas non seulement généralisée sur tous les mois mais en plus, elle est très variable sur les stations : 8 mois à Ziguinchor (janvier, avril à juin, août, novembre et décembre) ; 9 mois à Oussouye (janvier à mars, juin à août, octobre à décembre), 7 mois à Kolda (février, avril, août à novembre) ; 9 mois à Bignona (mars, avril, juin à novembre). Sur les mois pluvieux, la baisse la plus importante est notée aux mois de juillet à Bignona (-0,09 mm), d'août à Ziguinchor (-0,05 mm), de juillet et août à Oussouye (-0,11 mm). A la station de Kolda, ces mois pluvieux (juin à septembre) enregistrent une tendance à la hausse avec un maximum noté au mois de juin (0,11 mm). Il en est souvent de même sur des mois comme juillet et septembre aux autres stations comme Ziguinchor et Bignona.

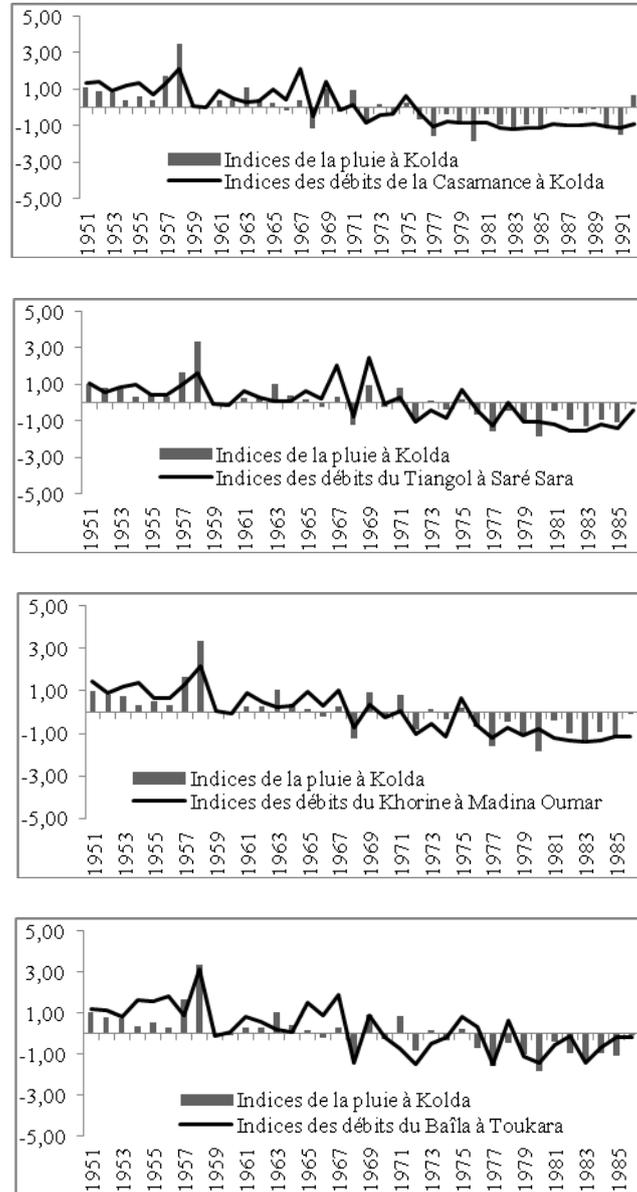
A l'échelle saisonnière, les variables de températures connaissent des ruptures suivies de tendances à la hausse significatives sur la saison des pluies. Ces tendances sont plus significatives sur les TX, le τ et la pente de Kendall étant respectivement de 0,66°C et de 0,05. La rupture est notée en 1992 pour les TX et 1978 pour les TN.. Par rapport à la saison sèche, la date de rupture change et intervient en 1995 pour les TX et 1982 pour les TN suivie d'une tendance significative à la hausse. Ici contrairement à la saison des pluies, les TN enregistrent la tendance la plus significative ($\tau = 0,60^\circ\text{C}$).

2.3. Impacts sur les ressources en eau et stratégies d'adaptation

2.3.1. Impacts sur les ressources en eau

La pluie de la station de Kolda, du fait de sa position, a été utilisée et comparée à l'écoulement de quatre sous-bassins : la Casamance à Kolda ; le Tiangol Dianguima à Saré Sara ; le Khorine à Madina Oumar ; le Baïla à Toukara (Figure 14 et Figure 18).

Figure 18. Fonctions de corrélations croisées entre la pluie moyenne des bassins et leurs débits écoulés de 1951 à 1992



Le changement climatique dans le bassin versant de la Casamance...

La Figure 18 montre le signal quasi-identique entre la pluie et le débit, et donc les effets de la variabilité climatique sur l'écoulement. Ainsi la baisse des débits est foncièrement liée à la pluviométrie. Quel que soit la partie du cours d'eau non influencé par la mer, les débits sont calqués sur la pluviométrie. En effet, avant 1970, la tendance générale des indices des pluies et des débits est au-dessus des valeurs positives, ce qui permet de dire que cette période est humide. Après 1970, les valeurs des indices des deux paramètres sont quasiment toujours négatives. De bonnes corrélations précipitations/débits sont notées aux différents sous-bassins : 0,67 sur la Casamance à Kolda ; 0,62 sur le Tiangol Dianguima à Saré Sara ; 0,70 sur le Khorine à Madina Oumar ; 0,60 sur le Baïla à Toukara. Les réponses plus ou moins correctes des débits des sous-bassins par rapport aux pluies traduisent l'alimentation pluviale du bassin du fleuve Casamance. Les temps de réponse entre les précipitations et les débits sont très faibles. Du fait du déficit pluviométrique, une baisse des écoulements est notée dans le bassin supérieur de la Casamance.

2.3.2 Réponses aux changements climatiques ou stratégies d'adaptation

Avec le changement climatique, l'avancée de la langue salée a augmenté la salinisation et l'acidification des terres, notamment celles des vasières et de certains bas-fonds. Conjuguées aux dynamiques démographiques et aux conditions sociopolitiques, les effets de la sécheresse des dernières décennies ont modifié profondément les socio-agro-écosystèmes de la Casamance. Le changement climatique affecte non seulement le cycle hydrologique mais également des domaines étroitement liés à l'eau. En application de la politique de maîtrise et de gestion des ressources en eau, les pouvoirs publics ont initié de grands projets d'aménagements hydro-agricoles (31 barrages anti-sel au total dont ceux de Guidel et Affiniam) avec comme objectif de récupérer des terres salées et de garantir une lame d'eau douce dans toutes les sous-vallées intéressées (PADERCA, 2008). Dans le secteur agricole, les stratégies d'adaptation mises en œuvre consistent à : rechercher des systèmes de culture plus économes en eau ; caler au mieux le cycle cultural par l'utilisation de la culture attelée et par le choix de variétés adaptées ; développer les techniques qui permettent de concentrer l'eau de pluie là où elle est le plus utile ; entretenir la fertilité des sols à un coût acceptable.

CONCLUSION

Cet article a analysé l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes, et des précipitations dans le bassin de la Casamance. Les températures montrent une tendance à la hausse sur la période 1960-2012 illustrée par une rupture pendant la décennie 1990. Les précipitations connaissent d'abord une diminution durant les décennies 1970 et 80, et ensuite une légère augmentation depuis la fin des années 1990. Cette amélioration pluviométrique contraste avec les années précédentes de sécheresse pluviométrique. La réalité statistique des séries présentées rompt légèrement avec l'idée d'une baisse à venir des précipitations sur le continent africain. Le tournant climatique des années 1970 (pour les précipitations), mais aussi des années 1980 et 1990 (pour les températures) est donc confirmé à la lumière des résultats présentés dans cet article. Néanmoins, devant la difficulté à saisir toute la complexité de la dimension temporelle du signal climatique, l'étude devra être étendue à d'autres dimensions (spatiale), d'autres phénomènes (*upwelling* côtier) et d'autres variables (événements extrêmes, séquences sèches, longueur et date de démarrage et fin de la mousson, évapotranspiration potentielle et réelle, directions de vents, nombre d'orages ou encore variations de types de temps depuis 1960) pour mieux caractériser le changement climatique dans le bassin de la Casamance.

RÉFÉRENCES

- Ali A., Lebel T. et Amami A., 2008 : « Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel ». *Sécheresse*, 19 (4), 227-235.
- Bodian A., 2011. *Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau: Application au haut bassin du fleuve Sénégal*. Thèse de doctorat, UCAD, 288 p.
- CILSS, 2008. *Climate and Climate Change. The Atlas on Regional Integration in West Africa*. Environment Series. CEDEAO-Club /Sahel/OCDE Disponible sur : « www.atlas-westafrica.org ».
- Dacosta H., 1989. Précipitations et écoulements sur le bassin de la Casamance. Dakar : ORSTOM, multigr. Thèse 3e cycle, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 278 p.
- Deneux M., 2002. *Rapport sur l'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et*

Le changement climatique dans le bassin versant de la Casamance...

2100. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2, 296-329.
- Faye C., Sow A. A. et Ndong J.B., 2015. « Étude des sècheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sècheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal ». *Physio-Géo-Géographie Physique et Environnement*, 9, 17-35.
- 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*. Genève, Suisse, 103 p.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., and Miller H.L. (Eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K. and New York, U.S.A., 996 p.
- Kendall M. G. 1975. *Rank correlation methods*. Griffin, London, 202 p.
- Mann H. B. 1945. "Non parametric tests against trend". *Econometrica*, 13, 245 - 259.
- OMM. 1994. *Guide des pratiques hydrologiques: acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications*. Organisation Météorologique Mondiale- N°168, Genève, 829 p.
- Pettitt, A. N., 1979. "A non-parametric approach to the change-point problem". *Appl. Statist.*, 28 (2), 126-135.
- Ouoba A.P., 2013. *Changements climatiques, dynamique de la végétation et perception paysanne dans le Sahel burkinabè*. Thèse de Doctorat Unique, Université de Ouagadougou (Burkina Faso), 305 p.
- Ozer P., Hountondji Y.C. et Laminou Manzo O., 2009. « Évolution des caractéristiques pluviométriques dans l'Est du Niger de 1940 à 2007 ». *Geo-Eco-Trop, Revue de Géographie et d'Écologie Tropicale*, 33, 11 - 30.
- Panthou G., Vischel T. et Lebel T., 2014. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatometry*. Disponible sur : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3984/abstract> .

- Projet d'Appui au Développement Rural en Casamance (PADERCA), 2008. Établissement de la situation de référence du milieu naturel en basse et moyenne Casamance. République du Sénégal Ministère de l'Agriculture Rapport final, 201 p.
- Rome S., Bigot S., Dubus N. et Anquetin S., 2010. "Climate Change's impacts in the Drôme department (southeastern France): the GICC-DECLIC Project (2010-2012)". *European Geoscience Union, Geophysical Research Abstracts*, Vienne, Autriche [halshs-00484628 - version 1].
- Sagna P., 2005. Dynamique du climat et de son évolution récente dans la partie ouest de l'Afrique occidentale. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 786 p.
- Sagna P., 2008. *L'évolution du climat au Sénégal*. Forum régional sur les changements climatiques en Afrique de l'Ouest. Dakar, 6 et 7 septembre 2008, 15 p.
- Sane T., Sy O. et Dieye E. H. B., 2011. Changement climatique et vulnérabilité de la ville de Ziguinchor. *Actes du colloque "Renforcer la résilience au changement climatique des villes : du diagnostic spatialisé aux mesures d'adaptation" (2R2CV) 07 et 08 juillet 2011*, Université Paul Verlaine - Metz, France, 1-14.
- Sen P.K., 1968. "Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau". *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
- UNDP, 1998. "Climate Change and the Millennium Development Goals". Disponible sur http://www.undp.org/climatechange/cc_mdgs.shtml.
- Yanda P. Z. 2010. "Climate change impacts, vulnerability and adaptation in Southern Africa". *Sarua Leadership Dialogue Series*, 2 (4), 11-30.