

René Ndimag Diouf, Cheikh Faye, Sidy Dieye, Claudette Soumbane Diatta

DISTRIBUTION SPATIALE ET TENDANCES TEMPORELLES DE L'ÉROSIVITE DES PRÉCIPITATIONS DANS DES BASSINS VERSANTS DU SUD DU SÉNÉGAL (GAMBIE ET CASAMANCE)

Résumé

L'érosion hydrique est l'une des principales préoccupations environnementales en Afrique de l'Ouest. Cette étude a pour but d'analyser la distribution spatiale, les tendances temporelles et l'érosivité des pluies dans les bassins de la Gambie et de la Casamance de 1980 à 2016. Les traitements cartographiques sont réalisés par les logiciels Arc Map et Surfer 10.0 et les données statistiques par Excel. Les résultats montrent une diminution des indices de concentration des précipitations et de saisonnalité suivant un gradient Sud-Nord. L'Indice de Fournier Modifié, donne une forte érosivité dans toutes les stations d'étude. Il en résulte donc une forte érosivité hydrique au Sud du pays. Cette étude fournit des données d'érosivité des sols permettant une meilleure gestion durable des ressources pédologiques et hydrique au Sénégal.

Mots-clés : érosivité des pluies, érosion des sols, spatialisation, tendance, bassin.

Abstract

Water erosion is one of the main environmental concerns in West Africa. The purpose of this study is to analyze the spatial distribution, temporal trends and erosivity of rainfall in the Gambia and Casamance basins from 1980 to 2016. Cartographic processing is carried out by Arc Map and Surfer 10.0 software and statistical data by excel. The results show a decrease in the precipitation concentration and seasonality indices following a South-North gradient. The Fournier Index Modified, gives strong erosivity in all the study stations. This therefore results in strong water erosivity in the south of the country. This study provides soil erosivity data for better sustainable management of soil and water resources in Senegal.

Keywords: rainfall erosion, soil erosion, spatIALIZATION, trend, basin.

Introduction

L'érosion hydrique est une menace environnementale majeure et les risques d'érosion pourraient augmenter avec la surexploitation des ressources et les changements climatiques mondiaux (**Ma et al., 2010**). L'évaluation de cette préoccupation nécessite une analyse détaillée des données existantes, pour l'interprétation des futurs scénarios de changement climatique. L'érosivité des précipitations, telle que présentée par **Hudson (1971), Wischmeier et Smith (1978)**, décrit une interaction entre l'énergie cinétique des gouttes de pluie et la surface du sol indiquant la capacité potentielle des précipitations à provoquer une perte de sol.

L'érosion hydrique est le principal problème mondial de dégradation des terres qui menace les moyens de subsistance des populations et l'intégrité de l'écosystème (**Eswaran et al., 2001**). Bien qu'aucune région ne soit épargnée, l'érosion des sols touche plus sévèrement les pays en développement en raison du manque de technologies appropriées pour le réduire (**Lal, 2001**). En Afrique de l'Ouest, l'érosion des sols peut être particulièrement menaçante en raison des pluies intenses, des mauvaises activités de conservation des sols et de l'eau et de la forte dépendance à la qualité du sol (**Okoba et Sterk, 2010**). Ainsi, l'érosion du sol, du fait principalement de l'ensablement des barrages/réservoirs, des lacs et des lits des rivières a entraîné d'importants problèmes socioéconomiques et écologiques qui nuisent à la productivité agricole et la perte de services environnementaux (**Haregeweyn et al., 2008**).

Les multiples conséquences environnementales et socio-économiques de l'érosion des sols sont liées à plusieurs facteurs (**Meshesha et al., 2015, Vrieling et al., 2010**). Les études sur l'érosion utilisent souvent des modèles ou des approches qualitatives pour intégrer les caractéristiques pluviométriques, l'érodabilité des sols, la topographie, la couverture végétale et les pratiques de gestion (**Vrieling, 2006, Nyssen et al., 2005**).

Deux approches sont utilisées pour modéliser cette érosivité des pluies : (a) le calcul du facteur basé sur des données pluviométriques à haute résolution temporelle et (b) le développement des équations corrélant le facteur R avec des données pluviométriques mensuelles et annuelles plus facilement disponibles (**Panagos et al., 2015**). La première approche est la plus utilisée pour quantifier le facteur R de l'équation universelle de perte de sol (**Wischmeier et Smith, 1978**).

Le facteur d'érosivité des pluies, traduisant l'énergie de la pluie, est un élément clé dans la modélisation des pertes en sol. Son estimation actuelle et future est donc importante pour toute action liée à la conservation et la planification des ressources en eau et en sol (**Choukri et al., 2016**). Des formules ont été proposées telles que l'indice de Fournier modifié, IFM, (**Arnoldus, 1980**) pour prévoir le facteur R sur la base des précipitations

moyennes, mensuelles et annuelles. Du fait de sa forte corrélation avec le facteur R (**Diodato et Bellocchi, 2007**), cet indice IFM est couramment appliqué comme facteur d'érosivité d'entrée dans les modèles d'érosion (**Gregori et al., 2006**).

Tableau 1 : Indice de Fournier et Wischmeir, source, Smith 1978.

Auteurs	Formules
Indice de Fournier (IFM)	$C = N^2m / Na$
Indice de Wischmeier	$LS = \frac{\sqrt{f}}{100} 0.76 + 0.53p + 0.76 p^2$

De nombreuses modélisations des processus de transfert de sédiments proposées pour la quantification et la spatialisation de l'érosion des sols sont basées sur des représentations mathématiques des processus hydrologiques et érosifs fondamentaux (**Jah et Paudel, 2010**). L'analyse de l'érosion hydrique des sols doit tenir compte de cette variabilité spatiale et temporelle des précipitations. Malheureusement, l'Afrique a généralement une mauvaise répartition spatiale des stations météorologiques, et les rares, disponibles présentent une durée courte des enregistrements ou des lacunes (**UNCCA-ACPC, 2011**). Face à cette situation, les produits de pluie dérivés des satellites peuvent être considérés pour évaluer le risque d'érosion des sols (**Vrieling et al., 2010**).

L'impact du changement climatique sur le régime des pluies peut engendrer des modifications majeures de l'érosivité des pluies, tant en valeur annuelle qu'en répartition saisonnière. Afin de pouvoir orienter les pratiques agricoles par exemple et les aménagements de protection du sol, il est indispensable d'analyser l'évolution de l'érosivité des précipitations (**Choukri et al., 2016**). La compréhension de la distribution spatiale et des tendances temporelles des précipitations et de l'érosivité peuvent soutenir l'élaboration de politiques pour une planification environnementale régionale durable et la gestion des ressources en sols et en eau (**Fenta et al., 2017**). Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'évaluer la distribution spatiale et les tendances temporelles des précipitations et de l'érosivité au Sud du Sénégal pendant la période 1980-2016.

1. Zone d'étude

Cette étude est réalisée au Sénégal dans les bassins de la Gambie et de la Casamance (Figure 1) drainés par de nombreux cours d'eau (**Faye et al., 2017**). Le bassin de la Gambie couvre une superficie de près de 77100 km² (**Sow, 2007**) et celui de la Casamance 20150 km² (**Dacosta, 1989**).

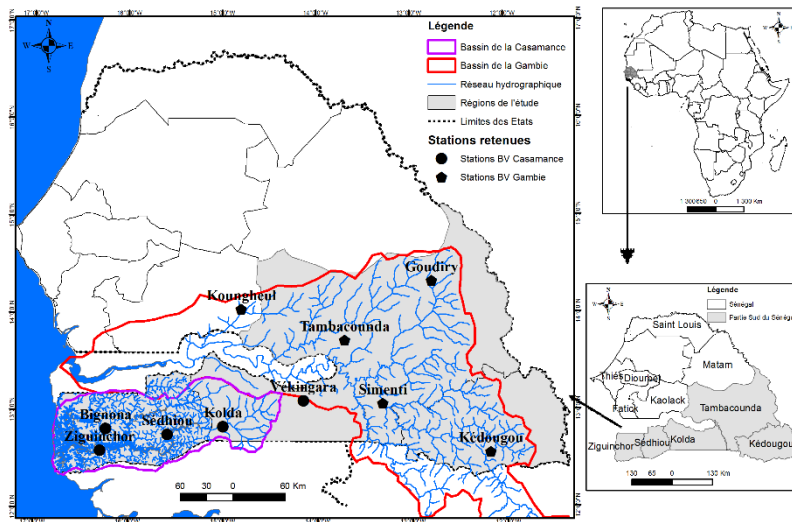


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude, source DTGC.

2. Données et méthodes

2.1. Données

Les données climatiques utilisées dans cette étude ont été mises à notre disposition par l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) du Sénégal. Ces données concernent les pluies annuelles des 10 stations retenues de 1980 à 2016 en raison de cinq stations par bassin (Figure 1 et Tableau 2). Pour caractériser la variabilité et l'agressivité de la pluviométrie au cours de l'année, l'Indice de Concentration des Précipitations (ICP), l'Indice de Saisonnalité (IS) et l'Indice de Fournier Modifié (IFM) ont été calculés.

Tableau 2 : Caractéristiques des stations retenues pour l'étude,

Bassins	Stations	Latitude	Longitude	Période d'étude	Pluie annuelle
Bassin de la Gambie	Ziguinchor	12,58	-16,29	1980-2016	1299
	Kolda	12,82	-15,00	1980-2016	1094
	Bignona	12,80	-16,23	1980-2016	1045
	Sédhiou	12,74	-15,58	1980-2016	1358
	Vélingara	13,09	-14,15	1980-2016	1169
Bassin de la Casamance	Goudiry	14,32	-12,79	1980-2016	572
	Tambacounda	13,71	-13,71	1980-2016	711
	Simenti	13,06	-13,31	1980-2016	892
	Kédougou	12,56	-12,17	1980-2016	1188
	Kounghoul	14,04	-14,80	1980-2016	698

source DGPRE.

2.2. Méthodes

2.2.1. Variabilité et tendance des précipitations

Une série chronologique des précipitations annuelles de 8 stations du Sud du Sénégal pour la période 1980-2016 a été utilisée pour évaluer la variabilité spatiale et temporelle des précipitations et tester ses tendances. Pour calculer les quantités saisonnières de pluie, la période incluse dans chaque saison a suivi le critère climatologique couramment adopté par des chercheurs sur le climat de la région étudiée (**Sagna, 2005 ; Sané, 2017**). Dans l'analyse des tendances des précipitations, deux techniques statistiques complémentaires sont couramment utilisées : les modèles linéaires et les tests non paramétriques (**Fenta et al., 2017**). Pour déterminer l'ampleur de la tendance, la régression par les moindres carrés a été choisie comme modèle linéaire (**Forkel et al., 2013**) et le test de signification de Man Kendall comme modèle non paramétrique (**Fenta et al., 2017**). Le test de Mann-Kendall (**Mann, 1945 ; Kendall, 1975**) permet de détecter d'éventuels changements graduels dans les séries de variables. De plus, nous avons utilisé le coefficient de variation (CV) pour représenter la variation interannuelle dans les séries temporelles des précipitations.

2.2.2. Saisonnalité des précipitations

Pour calculer la saisonnalité des précipitations, deux indices sont utilisés : L'Indice de Concentration des Précipitations (ICP) et l'Indice de Saisonnalité (IS). L'Indice de Concentration des Précipitations (**Oliver, 1980 ; Murugan et al., 2008**) est proposé comme indicateur de la concentration et du pouvoir érosif des pluies (**Iskander et al., 2014**). Il a été développé pour quantifier la variabilité pluviométrique à des échelles de temps multiples. Sa formule mathématique est :

$$ICP = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P_m^2} \times 100$$

Avec P_i la pluie du mois i dans l'année et P_m le total de la pluie annuelle.

Cet indice traduit un excédent ou un déficit hydrologique pour le mois ou l'année considéré. Plusieurs auteurs (**Oliver, 1980 ; Murugan et al., 2008 ; Nastos et al., 2010 ; Vincent et al., 2011**) ont effectué une classification de l'intensité quotidienne et de la distribution de la pluviométrie (Tableau 3).

Tableau 3 : Echelle d'appréciation de la concentration des pluies selon l'indice

Valeurs de l'ICP	Signification de la distribution
$8,3 \leq ICP < 10$	distribution uniforme
$10 \leq ICP < 15$	distribution modéré (ou modérément saisonnière)
$15 \leq ICP < 20$	distribution irrégulière (ou saisonnière)
$20 \leq ICP < 50$	distribution fortement irrégulière (ou fortement saisonnière)
$50 \leq ICP < 100$	distribution extrêmement irrégulière

ICP, source DGPRE

L'Indice de Saisonnalité (IS) proposé par **Walsh et Lawler (1981)** a été largement utilisé dans plusieurs études (**Kumbuyo et al., 2014 ; Fenta et al., 2017**). L'IS a été calculé comme suit :

$$IS = \frac{1}{P_m} \sum_{i=1}^{i=12} \left| P_i - \frac{P_m}{12} \right|$$

Avec P_i la pluie du mois i dans l'année et P_m le total de la pluie annuelle. L'indice varie de 0 à 1,83. **Walsh et Lawler (1981)** indique une classification des degrés de saisonnalité donnée dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Echelle d'appréciation de la saisonnalité des pluies selon l'indice IS

Valeurs de l'IS	Signification de la distribution
$IS \leq 0,19$	distribution très uniforme
$0,19 < IS \leq 0,39$	distribution uniforme avec une saison humide plus nette
$0,39 < IS \leq 0,59$	distribution plutôt saisonnière avec une saison sèche plus courte
$0,59 < IS \leq 0,79$	distribution saisonnière
$0,79 < IS \leq 0,99$	distribution nettement saisonnière avec une longue saison sèche
$0,99 < IS \leq 1,19$	distribution avec le maximum de pluie en trois mois ou moins
$IS \geq 1.20$	distribution avec saisonnalité extrême, presque toute la pluie en 1-2 mois

source Walsh et Lawler, 1981.

2.2.3. Erosivité des précipitations

L'agressivité de la pluviométrie au cours de l'année hydrologique est appréciée par l'Indice de Fournier Modifié (IFM) de et modifié par **Arnoldus (1980)** qui requiert des données mensuelles sur les précipitations. L'IFM a été calculé comme suit :

$$IFM = \sum_{i=1}^{i=12} \frac{P_i^2}{P_m}$$

Où P_i et P_m désignent respectivement la hauteur mensuelle du mois i et la hauteur annuelle de la pluie. Les fourchettes d'érosivité des IFM et les descriptions qualitatives correspondantes sont données dans le tableau 5 (**CEC, 1994**). L'analyse à long terme des séries temporelles de l'IFM est utile pour comprendre les tendances temporelles de l'érosivité annuelle des précipitations (**Fenta et al., 2017**). A l'instar des statistiques de tendance de la pluviométrie, l'analyse des tendances de l'IFM annuelle est faite avec la régression linéaire des moindres carrés et le test de tendance de Mann Kendall. La tendance a été calculée comme la variation en pourcentage par rapport à la moyenne à long terme de l'IFM (1980-2016). Pour la tendance linéaire, la valeur de la pente de Sen a été visualisée.

Tableau 5. Echelle d'appréciation de l'agressivité des pluies selon l'indice IFM

Classes d'érosivité	Valeurs de l'IFM	Risque d'érosivité
R1	IFM < 60	Très faible
R2	60 ≤ IFM < 90	Faible
R3	90 ≤ IFM < 120	Modéré
R4	120 ≤ IFM < 160	Élevé
R5	IFM ≥ 160	Très élevé

Source, CEC 1994.

2.2.4. Calcul du facteur R de USLE et RUSLE

Dans cette étude, l'érosivité annuelle moyenne des précipitations (IFM), a été validée à l'aide des valeurs du facteur R moyen sur plusieurs années (1981-2016) tirées de la littérature. La validation a été effectuée en ajustant une régression linéaire et en évaluant le coefficient de régression (Figure 2).

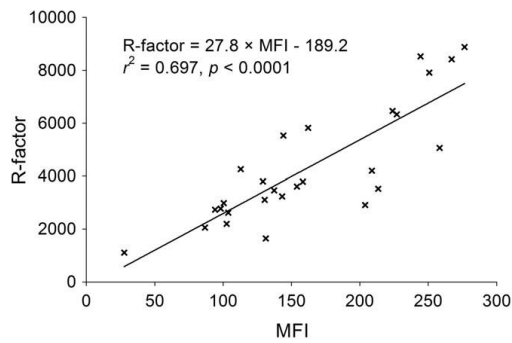


Figure 2: Relation entre le facteur R moyen pluriannuel ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ an^{-1}$)

A partir de la relation établie entre les valeurs du facteur R basées sur la littérature et les IFM CHIRPS (Fenta *et al.*, 2017), le facteur R de USLE (Wischmeier & Smith, 1978) et RUSLE (Renard *et al.*, 1991) a été calculé pour la zone Sud du Sénégal. Pour les données de l'érosivité des pluies, le logiciel Surfer a permis la réalisation des cartes d'isohyètes.

3. Résultats et analyse

3.1. Variabilité spatiale et tendance des précipitations

Dans les bassins de la Gambie et de la Casamance, les précipitations ont une moyenne annuelle de 1003 mm sur la période 1980-2016. La grandeur de l'écart type (271 mm) indique la grande variabilité spatiale des précipitations (Figure 3a). Les régions les plus méridionales du Sénégal reçoivent de fortes précipitations (souvent supérieures à 1400 mm) et sont les plus arrosées du territoire : il s'agit d'une zone au climat Sud soudanien (Faye *et al.*, 2017 ; Sané, 2017).

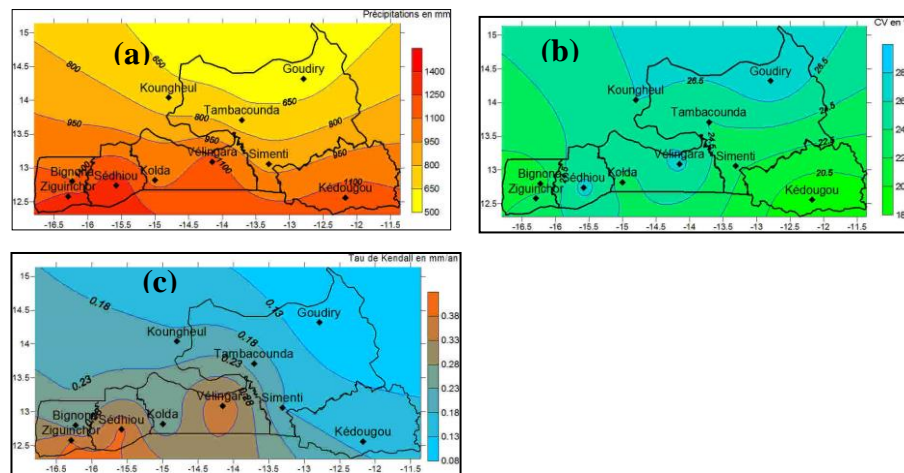


Figure 3 : Répartition spatiale des précipitations annuelles au cours de la période 1980-2016 : (a) pluviométrie moyenne ; (b) coefficient de variation (CV) en % ; (c) tendance (tau de Kendall de la tendance linéaire en mm par année) à un niveau de signification statistique de 95%

Le coefficient de variation (CV) montre la variabilité interannuelle assez importante des précipitations et constitue également un indicateur important de la fiabilité des précipitations dans la zone (Figure 3b). Cette variabilité interannuelle, d'une valeur moyenne de 24,3%, est plus importante dans le Nord où les précipitations annuelles sont faibles (26,5% à Koungheul). La forte variabilité interannuelle dans les zones à faible pluviométrie indique le grand contraste entre les valeurs des précipitations annuelles d'une année à l'autre et suggère le caractère de plus en plus imprévisible de la disponibilité de l'eau dans ces zones (Fenta *et al.*, 2017).

Le résultat des statistiques de tendance (Figure 3c) a révélé qu'à l'échelle annuelle, les précipitations ont augmenté sur la totalité de la zone étudiée avec une hausse d'environ 0,25 mm par an durant la période 1980-2016. Si la hausse la plus importante de la pluviométrie est notée sur les stations au Sud (0,39 mm par an à Sédhiou ; 0,38 mm par an à Ziguinchor et Vélingara), la plus faible apparaît sur des stations du Nord (0,10 mm par an à Goudiry) comme du Sud (0,17 mm par an à Kédougou). Toutefois, il existe une forte variabilité spatiale des tendances observées, et les statistiques de test de tendance n'étaient pas statistiquement significatives ($p < 0,05$) pour la plupart des stations de la zone d'étude (environ 60%). Ainsi, ces tendances n'ont été significatives que dans le bassin de la Casamance, aux stations de Ziguinchor, Kolda, Sédhiou et Vélingara (Figure 3c).

Les régions sud du Sénégal reçoivent la majeure partie de leurs précipitations annuelles durant la saison des pluies qui y dure généralement 5 mois, de juin à octobre (Sané, 2017). Durant ces 5 mois de la saison des pluies qui représentent en moyenne 96,4% de la lame d'eau précipitée (Figure 4a), les bassins de la Casamance et de la Gambie reçoivent la quasi-totalité de leurs débits écoulés. En revanche, la saison sèche qui s'étend de novembre à mai, représente les mois les plus secs dans la zone avec seulement 3,6% de la pluie moyenne annuelle (Figure 4b).

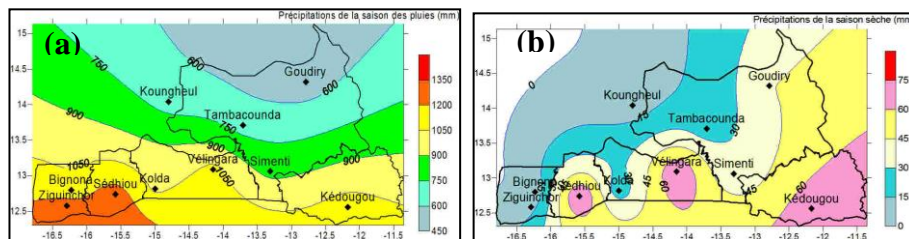


Figure 4 : Répartition spatiale des précipitations saisonnières durant la période 1980-2016 : (a) Saison des pluies (juin-octobre) ; (b) Saison sèche (novembre-mai)

A l'image des totaux pluviométriques annuels, l'analyse des tendances des précipitations saisonnières au cours de la période 1980-2016 a indiqué des tendances à la hausse des précipitations sur la saison des pluies au niveau de

toutes les stations (Figure 5a). Cette hausse des précipitations, d'environ 0,25 mm par an en moyenne, est plus importante sur les stations au Sud (0,39 mm par an à Sédhiou ; 0,38 mm par an à Ziguinchor ; 0,36 mm par an à Vélingara) et plus faible sur des stations du Nord (0,11 mm par an à Goudiry; 0,17 mm par an à Kounghoul).

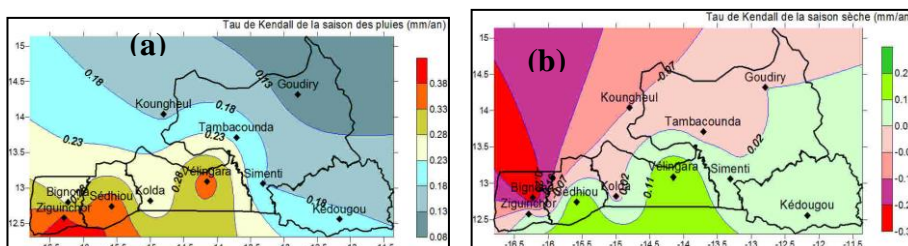


Figure 5 : Répartition spatiale de la tendance des précipitations saisonnières (tau de Kendall de la tendance linéaire en mm par année) durant la période 1980-2016 à un niveau de signification statistique de 95% : (a) Saison des pluies (juin-octobre) ; (b) Saison sèche (novembre-mai)

Ces tendances à la hausse des précipitations pendant l'hivernage observées dans les deux bassins se font avec des différences spatiales importantes. Si les tendances ne sont pas significatives ($p < 0,05$) pour la plupart des stations de la zone d'étude (70% des stations), en revanche, elles le sont au niveau des stations de Ziguinchor, Sédhiou et Vélingara (Figure 5a). Cet excédent en apport pluviométrique a engendré une hausse non négligeable dans les apports en eau drainés par les cours d'eau de la zone (Gambie et Casamance).

3.2. Saisonnalité des précipitations et configuration spatiale

La saisonnalité des précipitations dérivée des indices de concentration ICP et de saisonnalité IS montre des réalités géographiques similaires avec cependant une certaine variabilité spatiale entre stations (Figure 5). Avec un ICP moyen de 26,3 de la zone étudiée pour un minimum de 22,4 noté au Sud de la zone (à Kédougou) et un maximum de 29,2 noté au Nord de la zone (à Goudiry), la distribution est fortement irrégulière (ou fortement saisonnière) et variable au niveau des différentes stations étudiées ($20 \leq \text{ICP} < 50$) (Figure 6a). En revanche, à l'échelle temporelle, de 1980 à 2016, la distribution irrégulière apparaît mais reste relativement faible (11% à Kédougou ; 9% à Simenti ; 6% à Vélingara), Il en est de même pour la distribution extrême où un seul cas est noté à Sédhiou et deux à Goudiry.

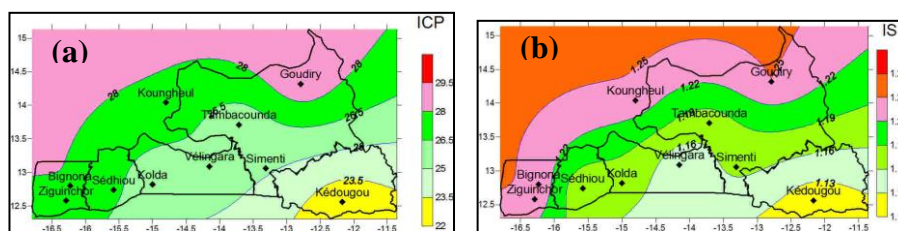


Figure 6 : Répartition spatiale de la saisonnalité des précipitations sur la période 1980-2016 : (a) Indice de Concentration des Précipitations (ICP) ; (b) Indice de Saisonnalité (IS)

Pour l'indice IS, la valeur moyenne de la zone est de 1,19 pour un minimum de 1,11 noté à Kédougou et un maximum de 1,25 à Goudiry, ce qui indique une distribution avec saisonnalité tantôt forte ($0,99 < IS \leq 1,19$), tantôt extrême ($IS \geq 1,20$) (Figure 6b). La distribution de l'indice IS avec forte est notée sur 60% des stations (1,11 à Kédougou ; 1,14 à Vélingara ; 1,17 à Tambacounda et à Simenti). Sur les stations (40%), on note une distribution avec saisonnalité extrême (1,24 à Ziguinchor, à Bignona et à Kounghoul ; 1,25 à Goudiry). A l'échelle temporelle, de 1980 à 2016, la distribution nettement saisonnière apparait avec seulement un cas à Vélingara et à Kédougou et deux cas à Sédhiou, le reste des séries étant de saisonnalité forte ou extrême avec des fréquences qui peuvent dépasser 80% par station.

3.3. Variabilité spatiale de l'érosivité des pluies

Les valeurs de l'indice IFM moyen ont montré une variabilité spatiale élevée allant de 157 et 357 pour une moyenne de 261, et montre que la zone étudiée est soumise à une érosivité annuelle élevée sur seulement une station (Goudiry avec 157) et très élevée sur toutes les autres stations (357 à Ziguinchor et Sédhiou ; 312 à Vélingara ; 306 à Bignona) (Figure 7a). A l'échelle annuelle (de 1980 à 2016), l'analyse au niveau des stations a montré une érosivité modérée à Goudiry (14,8%), Kounghoul (8,6%) et Tambacounda (8%). En outre, environ 32,4% des années à Tambacounda, 25,9% à Goudiry et 25,7% à Kounghoul se caractérisent par une érosivité annuelle des pluies élevée (Figure 8). Les plus forts risques d'érosion hydrique sont notés à Ziguinchor 100% ; 97,3% à Kédougou ; 97,1% à Kolda ; 96,8% à Sédhiou et à Vélingara (Figure 8). De façon générale, l'intensité et le risque d'érosivité diminuent du Sud au Nord et de l'Ouest vers l'Est.

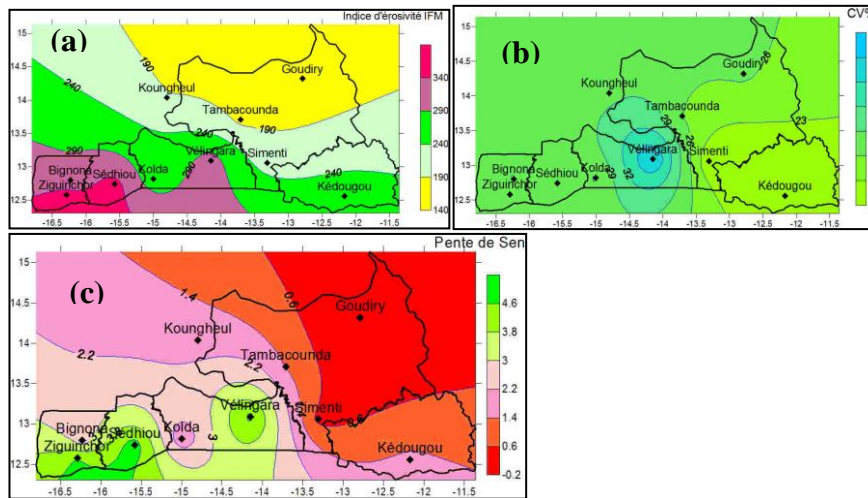


Figure 7 : Distribution spatiale de l'érosivité pluviométrique annuelle basée sur l'indice de Fournier modifié (IFM) durant la période 1980-2016 : (a) risque d'érosion du sol à partir de la valeur moyenne des IFM ; (b) coefficient de variation (CV) de l'IFM ; (c) tendance (pente de Sen de l'IFM pour la période 1980-2016 au niveau de signification statistique est de 95%)

La variation d'une année à l'autre de l'érosivité des précipitations a été évaluée en calculant le CV de l'IFM annuel. En effet, l'amplitude et la répartition spatiale des variations interannuelles des IMF (Figure 7b) est, de façon normale, similaire à celles des précipitations annuelles (Figure 3b). Avec une valeur moyenne de 26,8%, le CV de L'IFM le plus faible (CV=20,6%) est noté à Simenti et le plus élevé (CV=38,3%) est noté à Kédougou.

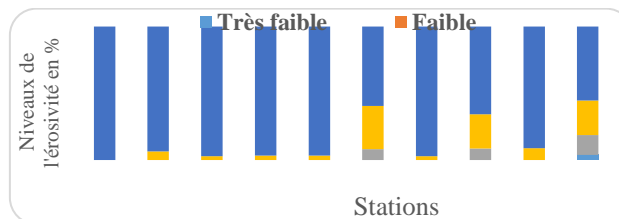


Figure 8 : Couverture par stations (%) du Sud du Sénégal soumis à différents niveaux d'érosivité des précipitations sur la base de la valeur moyenne de l'Indice Fournier Modifié au cours de la période 1980-2016 et du système de classification transmis par la CEC (1994)

Les tendances temporelles de l'érosivité annuelle des précipitations, avec la valeur de la pente de Sen, (Figure 7c) ont montré des schémas spatiaux presque similaires à ceux des tendances des précipitations annuelles (Figure 3c). Des dix stations considérées, seule Goudiry située à l'extrême Nord de la zone d'étude, a enregistré une tendance décroissante de l'érosion pluviométrique annuelle avec une pente de 0,13, ce qui suggère une diminution subséquente du risque potentiel d'érosion des sols. Les tendances

à la hausse du risque potentiel d'érosion des sols les plus élevées sont notées au Sud de la zone (la pente est de 4,98 à Sédhiou, 4,82 à Vélingara et 4,64 à Ziguinchor) et les plus faibles au Nord (la pente est de 0,41 à Simenti; 1,36 à Tambacounda). Il convient de noter que les tendances détectées de l'érosivité annuelle des précipitations n'étaient pas significatives ($p < 0,05$) sur de grandes parties de la région étudiée (figure 6c). Il faut préciser également que les tendances détectées de l'érosivité annuelle des précipitations n'étaient pas significatives ($p < 0,05$) au niveau des trois stations que sont Ziguinchor, Sédhiou et Vélingara (Figure 7c).

La Figure 9 donne la variabilité spatiale du facteur R pluriannuel ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$) de la zone d'étude sur la base de l'application de la relation établie entre le facteur R et l'IFM. Les schémas spatiaux des valeurs d'érosivité (Figure 9) coïncident avec les régimes pluviométriques des bassins de la Gambie et de la Casamance (Figure 3a), les zones les plus pluvieuses correspondant à celles à fortes valeurs d'érosivité.

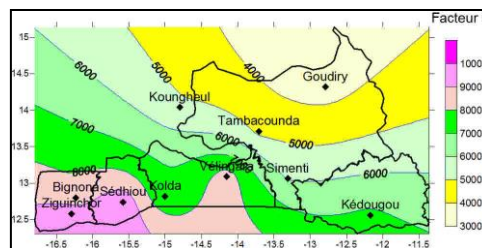


Figure 9 : Distribution spatiale du facteur R ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$) basée sur l'Indice de Fournier Modifié durant la période 1980-2016

A l'échelle annuelle, les statistiques par station et par bassin ont montré que les niveaux les plus élevés d'érosivité pluviométrique moyenne annuelle (facteur R en $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$) ont été notés dans le Bassin de la Casamance à Ziguinchor (entre 5867 et 16810), à Vélingara (entre 4178 et 16999), à Sédhiou (entre 4134 et 16198), à Bignona (entre 3522 et 13688) et à Kolda (entre 4077 et 12760). Dans le bassin de la Gambie, les niveaux les plus élevés d'érosivité pluviométrique moyenne annuelle (facteur R en $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$) ont été noté d'abord au Sud, à la station de Kédougou (entre 4184 et 11210) et les plus faibles au Nord, à la station de Goudiry (entre 1208 et 6283).

4. Discussion

Dans les bassins de la Gambie et de la Casamance, les précipitations annuelles moyennes varient entre 572 mm au Nord et 1358 mm au Sud. Une forte variabilité interannuelle a été observée dans les zones où les précipitations annuelles sont plus faibles (Fenta *et al.*, 2017). En plus, les pluies annuelles et saisonnières ont présenté des tendances à la hausse, avec une variabilité spatiale importante. Les résultats de la variabilité spatiale et temporelle des

précipitations concordent bien avec les études de **Liebmann *et al.* (2014)** et **Nicholson (2017)**.

Dans la zone, l'indice de concentration des pluies et l'indice de saisonnalité ont indiqué un gradient spatial de saisonnalité des précipitations suivant la latitude Sud-Nord. Ce qui confirme les travaux de **Walsh et Lawler (1981)**, selon qui, le degré de saisonnalité des précipitations en Afrique est plus étroitement lié à la latitude et que la saisonnalité est faible dans les zones équatoriales, mais augmente avec la latitude. Il en est de même pour **Nicholson (1996)**, **Kisaka *et al.*, 2015** ; **Sané, 2017**) qui ont montré que la saisonnalité dans le climat de l'Afrique est principalement contrôlée par la migration latitudinale de la ZCIT, et que les précipitations sont principalement unimodales.

L'augmentation de l'érosivité pluviométrique notée concorde avec une hausse du risque d'érosion des sols, bien que d'autres facteurs comme le couvert végétal et le type de sol peuvent également jouer un rôle important (**Panagos *et al.*, 2015**). Comme le risque d'érosion des sols est étroitement lié aux pluies et à la dynamique de la végétation, celles-ci devraient être évaluées conjointement sur une échelle de temps infra-annuelle pour la surveillance de l'érosion des sols (**Fenta *et al.*, 2017**). Dans la présente étude, les mesures d'érosivité mensuelle et saisonnière n'ont, toutefois, pas été présentées en raison du manque de possibilités de validation (**Vrieling *et al.*, 2010**). En plus, selon **Vrieling et al. (2010)**, l'approche de l'indice de Fourier n'est pas efficace pour le continent africain.

La structure spatiale de l'érosivité des précipitations dans les deux bassins a montré un degré élevé de correspondance avec les cartes d'érosivité à l'échelle continentale rapportées par **Diodato *et al.* (2013)** et **Vrieling *et al.* (2010)** qui ont signalé des valeurs d'érosivité très élevées ($> 5000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$) sur les hauts plateaux éthiopiens et kenyans, dans le sud de la Tanzanie et sur le lac Victoria. Il en est de même pour **Panagos *et al.* (2017)** qui ont indiqué une érosivité extrêmement élevée ($> 7000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$) dans les hauts plateaux éthiopiens.

Cependant, le calcul du facteur R moyen pluriannuel utilisé dans cette étude est limité car l'évaluation précise de l'érosivité pluviométrique nécessite des enregistrements de précipitations à grande échelle temporelle ($< 15 \text{ min}$) et les enregistrements continus à long terme ($> 20 \text{ ans}$) (**Panagos *et al.*, 2015**), ce qui n'est pas le cas dans la zone. En plus, l'érosivité des précipitations indique simplement les différences spatiales dans la force érosive des précipitations, ce qui est insuffisant. Ainsi, une meilleure caractérisation de l'érosion du sol devrait combiner l'érosivité des précipitations, les caractéristiques topographiques, la couverture végétale, les propriétés du sol et les pratiques de gestion (**Fenta *et al.*, 2017**). Pour combiner ces facteurs, plusieurs méthodes existent, y compris les modèles d'érosion largement utilisés telles

que USLE (Wischmeier et Smith, 1978) et RUSLE (Renard *et al.*, 1991), qui permettent de prévoir la perte annuelle moyenne de sol.

Conclusion

Dans la partie Sud du Sénégal où l'érosion des sols est l'une des principales préoccupations environnementales, les études sur la distribution spatiale et saisonnière et les tendances temporelles de l'érosivité des pluies font défaut. Ceci est dû à la faible disponibilité des données. Dans cette étude, nous avons analysé la distribution spatiale et les tendances temporelles des précipitations et de l'érosivité dans les bassins de la Gambie et de la Casamance sur la période 1980-2016, à partir des données de pluies mesurées.

Les précipitations annuelles moyennes de cette zone ont été de 1003 mm, pour un maximum de 1358 mm au Sud et un minimum de 572 mm au Nord. L'indice de concentration des précipitations et l'indice de saisonnalité ont indiqué un gradient spatial de saisonnalité des précipitations suivant la latitude, avec une saisonnalité de plus en plus prononcée du Sud au Nord. L'indice de Fournier modifié a montré en moyenne que toute la zone est soumise à une érosivité des pluies très élevée. Le facteur R moyen annuel est estimé à $7009 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$, ce qui implique un risque d'érosion hydrique potentiellement élevé au Sud du pays. De même, une récente hausse des précipitations et de l'érosivité a été notée, en plus de l'augmentation de leur variabilité spatiale. Cette hausse est très préoccupante et le risque d'érosion est très élevé compte tenu de la dégradation de la couverture végétale du sol. La distribution spatiale de l'indice d'érosivité à l'échelle des bassins est d'un grand intérêt car les valeurs obtenues indiquent des stations avec des risques élevés.

La recherche de techniques ou mesures d'atténuation et d'adaptation pour lutter contre cette augmentation probable des flux érosifs, et donc des vitesses de sédimentation des cours d'eau de la zone, doit mobiliser l'ensemble des acteurs. La présente étude offre des informations utiles pour mieux comprendre la distribution spatiale et les tendances temporelles des précipitations et de l'érosivité, ce qui est très important pour une meilleure prévision de l'érosion des sols et peut également soutenir l'élaboration de politiques environnementales régionales durables. En perspective, il serait intéressant de tester des produits de pluie par satellite pour l'évaluation de la variabilité des précipitations et de l'érosivité notamment pour les régions du Sénégal souvent pauvres en données.

Références bibliographiques

ARNOLDUS, H.M.J. (1980). Methodology used to determine the maximum average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *Bull. FAO*, (34), 39-48.

CEC (COMMISSION OF EUROPEAN COMMUNITIES), (1992). Corine Soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community. Brussels, Commission of the European Community EUR 13233 EN, Luxemburg, Office for official Publications of the European Community, 97 p.

CHOUKRI, F. CHIKHAOUI M., NAIMI M., RACLOT D., PEPIN Y. et LAFIA K., (2016). Impact Du Changement Climatique Sur L'évolution De L'érosivité Des Pluies Dans Le Rif Occidental (Nord Du Maroc). *European Scientific Journal*, 12 (32), 79-93.

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.

DEMIRCI A. & KARABURUN A., (2011). Estimation of soil erosion using RUSLE in a GIS framework: a case study in the Buyukcekmece Lake watershed, northwest Turkey. *Environ Earth Sci*, 66, 903-913.

DIODATO N., & BELLOCCHI G., (2007). Estimating monthly (R) USLE climate input in a Mediterranean region using limited data. *Journal of Hydrology*, 345, 224–236.

DIODATO N., KNIGHT J., & BELLOCCHI G., (2013). Reduced complexity model for assessing patterns of rainfall erosivity in Africa. *Global and Planetary Change*, 100, 183–193.

ESWARAN H., LAL R., & REICH P. F., (2001). Land degradation: An overview. In E. M. Bridges, I. D. Hannam, L. R. Oldeman, F. W. T. Penning de Vries, S. J. Scherr, & S. Sombatpanit (Eds.), *Response to land degradation* (pp. 20–35). Enfield, NH, USA: Science Publishers Inc.

FAYE C, NDIAYE A. et MBAYE I., (2017). Une évaluation comparative des séquences de sécheresse météorologique par indices, par échelles de temps et par domaines climatiques au Sénégal. *Journal. wat. env. sci.* 1 (1), 11 à 28.

FENTA A.A., YASUDA H., SHIMIZU K., HAREGEWEYN N., KAWAI T., SULTAN D., EBABU K. and BELAY A. S., (2017). Spatial distribution and temporal trends of rainfall and erosivity in the Eastern Africa region. *Hydrological Processes*.;31:4555–4567.

FORKEL M., CARVALHAIS N., VERBESSELT J., MAHECHA M. D., NEIGH C. S. R., & REICHSTEIN M., (2013). Trend change detection in

NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology. *Remote Sensing*, 5, 2113–2144.

FOURNIER F., (1960). Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Presses universitaires de France. Paris: 201 p.

GREGORI E., COSTANZA M., & ZORN, G., (2006). Assessment and classification of climatic aggressiveness with regard to slope instability phenomena connected to hydrological and morphological processes. *Journal of Hydrology*, 329, 489–499.

HAREGEWEYN N., POESEN J., DECKERS J., NYSSSEN J., HAILE M., & GOVERS G., (2008). Assessment and evaluation of sediment-bound nutrient export and associated costs from micro-dam catchments of northern Ethiopia. *Land Degradation and Development*, 19, 136–152

HUDSON N., (1971). Soil conservation. Cornell University Press, Ithaca, New York, USA.

ISKANDER S.M., RAJIB M.A., RAHMAN M.M., (2014). Trending Regional Precipitation Distribution and Intensity: Use of Climatic Indices. *Atmospheric and Climate Sciences*, 4, 385-393.

JAH M.K. et PAUDEL R.C., (2010). Erosion Predictions by Empirical Models in a Mountainous Watershed », *Journal of Spatial Hydrology*, 10 (1), 1-14.

KENDALL M., (1975). Multivariate Analysis. Charles Griffin & Company, London, 202 p.

KISAKA M. O., MUCHERU-MUNA M., NGETICH F. K., MUGWE J. N., MUGENDI D., & MAIRURA F., (2015). Seasonal rainfall variability and drought characterization: Case of eastern arid region, Kenya. In F. W. Leal A. Esilaba K. Rao & G. Srdhar (Eds.), *Adapting African agriculture to climate change* (pp. 53–71) Springer-Verlag.

KUMBUYO C. P., YASUDA H., KITAMURA Y., & SHIMIZU K., (2014). Fluctuation of rainfall time series in Malawi: An analysis of selected areas. *Geofizika*, 31, 13–28.

LAL R., (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation and Development*, 12, 519–539.

LIEBMANN B., HOERLING M. P., FUNK C., BLADÉ I., DOLE R. M., ALLURED D., ... EISCHEID J. K., (2014). Understanding recent eastern horn of Africa rainfall variability and change. *Journal of Climate*, 27, 8630–8645.

MA X., XU J.C., VAN NOORDWIJK M., (2010). Sensitivity of streamflow from a Himalayan catchment to plausible changes in land-cover and climate. *Hydrol. Process.* 24, 1379–1390.

MAALIOU A., (2010). Contribution à l'étude de l'impact de l'érosivité des pluies sur le transport solide de quelques grands bassins versants. USTHB Thèse de Magister. 75 p.

MANN H.B., (1945). Nonparametric Tests against Trend, *Econometrica*. 13 (3): 245-259.

MESHESHA D. T., TSUNEKAWA A., TSUBO M., HAREGEWEYN N., & ADGO E., (2015). Evaluating spatial and temporal variations of rainfall erosivity, case of Central Rift Valley of Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 119, 515–522.

MURUGAN V., MUKUND R., RAMESH M.B., HIREMATH A., JOSEPH R.K., SHETTY P.K., (2008). Centennial Rainfall Variation in Semi-Arid and Tropical Humid Environments in the Cardamom Hill Slopes, Southern Western Ghats, India. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 6, 31-39.

NASTOS P.T., EVELPIDOU N., VASSILOPOULOS A., (2010). Does Climatic Change in Precipitation Drive Erosion in Naxos Island, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 379-382.

NICHOLSON S. E., (2017). Climate and climatic variability of rainfall over Eastern Africa. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1002/2016RG000544>

NICHOLSON, S. E. (1996). A review of climate dynamics and climate variability in Eastern Africa. In T. C. Johnson, & E. O. Odada (Eds.), *The limnology, climatology, and paleoclimatology of East African lakes* (pp. 25–56). Amsterdam: Gordon and Breach Publishers.

NYSSSEN J., VANDENREYKEN H., POESEN J., MOEYERSONS J., DECKERS J., HAILE M., ... GOVERS G., (2005). Rainfall erosivity and variability in the northern Ethiopian highlands. *Journal of Hydrology*, 311, 172–187.

OKOBA B. O., & STERK G., (2010). Catchment-level evaluation of farmers' estimates of soil erosion and crop yields in the highlands of Kenya. *Land Degradation and Development*, 21, 388–400.

OLIVER J. E., (1980). Monthly precipitation distribution: A comparative index. *The Professional Geographer*, 32, 300–309.

PANAGOS P., BALLABIO C., BORRELLI P., MEUSBURGER K., KLIK A., ROUSSEVA S., ... ALEWELL C., (2015). Rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment*, 511, 801–814.

RENARD K. G., FOSTER G. R., WEESIES G. A., & PORTER J. P., (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 30–33.

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.

SANE T., (2017). *Vulnérabilité et adaptabilité des systèmes agraires à la variabilité climatique et aux changements sociaux en Basse-Casamance (Sud-ouest du Sénégal)*. Thèse de doctorat de Géographie et Environnement, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar et Université Sorbonne Paris, 376 p.

SOW A. A., (2007). *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé*. Thèse (PhD). Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 1232 p.

UNCCA-ACPC (United Nations Economic Commission for Africa-African Climate Policy Center), (2011). An assessment of Africa's climate observing networks and data including strategies for rescuing of climatic data. UNECA-ACPC, Working Paper 3, pp. 32.

VINCENT L.A., AGUILAR M., SAINDOU A., HASSANE G., JUMAUX D., ROY, P., BOONEEADY R., VIRASAMI L.Y.A., RANDRIAMAROLAZA F.R., FANIRIANTSOA V., AMELIE H., MONTFRAIX B., (2011). Observed Trends in Indices of Daily and Extreme Temperature and Precipitation for the Countries of the Western Indian Ocean, 1961-2008. *Journal of Geophysical Research*, **116**, 39-45.

VRIELING A., (2006). Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena*, 65, 2–18.

VRIELING A., STERK G., & de JONG S. M., (2010). Satellite-based estimation of rainfall erosivity for Africa. *Journal of Hydrology*, 395, 235–241.

WALSH R. P. D., & LAWLER D. M., (1981). Rainfall seasonality: Description, spatial patterns and change through time. *Weather*, 36, 201–208.

WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., (1978). *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. US Department of Agriculture, Science and Education Administration, Agriculture Research. Agriculture Handbook No.537, 58 p.