



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Dynamique spatio-temporelle des surfaces en eau du bassin du Nakanbé-Mané au Burkina Faso

Wennépingueré Virginie Marie YAMEOGO^{1*}, Oumar KABORE¹, Zézouma SANON¹,
You Lucette AKPA³, Farid TRAORE¹, Boalidia TANKOANO² et Mipro HIEN²

¹Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, Burkina Faso.

²Université Nazi Boni, Ecole doctorale Sciences Naturelles et Agronomie, Burkina Faso.

³Centre Universitaire de Recherche et d'application en Télédétection CURAT, Université Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant, E-mail : kabyamvivi@gmail.com; Tél. : +226 70295994/54650202

Received: 06-11-2022

Accepted: 23-01-2023

Published: 31-01-2023

RÉSUMÉ

Les zones humides sont essentielles à la promotion du développement durable. Elles maintiennent les fonctions des écosystèmes et assurent la croissance économique. Cependant, il est constaté une dégradation continue de ces écosystèmes et des services écosystémiques qu'elles fournissent. L'objectif de la présente étude est d'analyser la dynamique spatio-temporelle des surfaces en eau de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané, au Burkina Faso, de 2000 à 2020 et de déterminer les facteurs climatiques explicatifs. La dynamique des surfaces en eau a été analysée à l'aide d'un algorithme de détection des eaux, basé sur les indices spectraux via la plateforme *Google Earth Engine*. Quant aux facteurs climatiques, ils ont été analysés à l'aide des indices climatiques. Les résultats montrent une tendance significative généralisée à la baisse des surfaces en eau. Les causes climatiques probables en sont (i) la longue période de sécheresse de 1991 à 2005, caractérisée par un déficit pluviométrique de 3,7%, (ii) la hausse de l'évapotranspiration de 8,5%, consécutive à la hausse des températures de 0,03°C/an, (iii) l'augmentation significative de l'intensité des pluies de 0,085 mm/an. Ces résultats constitueront un support scientifique pour orienter les décideurs vers une gestion durable de la zone humide du Nakanbé-Mané. Cela passe nécessairement par l'élaboration d'un plan de gestion intégré de ladite zone humide.

© 2022 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés: Zones humides, Imagerie Landsat, indices d'eau, indices climatiques.

Spatio-temporal dynamics of water surfaces in the Nakanbé-Mané wetland in Burkina Faso

ABSTRACT

Wetlands are essential for promoting sustainable development. They maintain ecosystem functions and ensure economic growth. However, there is a continuous degradation of these ecosystems and the ecosystem services they provide. The objective of the present study is to analyze the spatio-temporal dynamics of the water surfaces of the wetland of the Nakanbé-Mané basin, in Burkina Faso, from 2000 to 2020 and to determine the explanatory climatic factors. The dynamics of water surfaces were analyzed using a water detection algorithm

© 2022 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i1.17>

9328-IJBCS

Special issue; Colloque International, BF & SEN

based on spectral indices via the Google Earth Engine platform. As for the climatic factors, they were analyzed using the climatic indices. The results show a significant generalized trend of decreasing water surfaces. The probable climatic causes are (i) the long period of drought from 1991 to 2005, characterized by a rainfall deficit of 3.7%, (ii) the increase in evapotranspiration of 8.5%, following the rise in temperature of 0.03°C/year, (iii) the significant increase in rainfall intensity of 0.085 mm/year. These results will constitute a scientific support to orient the decision-makers towards a sustainable management of the wetland of Nakanbé-Mané. This will necessarily involve the development of an integrated management plan for the said wetland.

© 2022 *International Formulae Group*. All rights reserved.

Keywords: Wetlands, Landsat imagery, water indices, climate indices.

INTRODUCTION

Le Burkina Faso est un pays sahélien dont plus de 80% de la population active exerce dans le secteur agricole. Mais, ce secteur est tributaire une pluviosité inégalement répartie dans le temps et dans l'espace. Dans ces conditions, la mobilisation et la gestion de l'eau constitue un enjeu de développement. Pour Zougmore et al. (2019) les ressources en eau occupent une place incontournable dans l'économie du pays. Ainsi, elles sont essentielles à la promotion du développement durable, au maintien des fonctions des écosystèmes et à la croissance économique (Rapinel, 2012; Mitsch et al., 2015; Drabo et al., 2016; Gayet et al., 2017).

Cependant, les ressources en eau, particulièrement celles de surface, connaissent des changements remarquables. Il s'agit de la détérioration de leur qualité (Adamou et al., 2015), la forte baisse de leur volume et un rétrécissement de leur surface (Junk et al. 2013, Davidson, 2014; Zhu, 2017). Ces changements dans les eaux de surface affectent fortement le fonctionnement des écosystèmes et même le bien-être humain (Koning, 2005; Robledano et al., 2010; Pekel et al., 2016). Selon Adamou et al. (2015), les zones humides sont l'un des secteurs les plus vulnérables au changement climatique et aux actions anthropiques. C'est pourquoi, dans un souci de gérer durablement ces ressources, le pays a adopté, depuis 2015, une politique nationale de l'eau, qui définit comme objectifs à atteindre d'ici à 2030, conformément aux Objectifs de Développement Durable (ODD) : "Pour 2030, la ressource en eau du pays est connue et gérée efficacement pour réaliser le droit d'accès

universel à l'eau et à l'assainissement, afin de contribuer au développement durable."

Pour ce faire, Il est important de maîtriser la dynamique des ressources en eau afin d'améliorer le processus de gestion de l'eau (Tazen et al., 2013), surtout dans un contexte de rareté de la ressource en eau. La télédétection offre de nombreux avantages pour la surveillance des eaux de surface. Plusieurs études ont fait état du succès de la cartographie des milieux humides à l'aide de la télédétection. (Frohn et al., 2011; Glenn et al., 2016; Kaplan and Avdan, 2018; Xing et al., 2018; De Sousa et al., 2020). Pourtant, dans le bassin versant de la zone humide du Nakanbé-Mané, de telles études sont rares. C'est pourquoi la présente l'étude vise à analyser la dynamique spatio-temporelle des surfaces en eau de la zone humide du Nakanbé-Mané sur la période de 2000 à 2020 et de déterminer les facteurs climatiques explicatifs en vue de sa restauration et sa gestion durable.

MATERIEL ET METHODES

Zone d'étude

Le bassin du Nakanbé-Mané, d'une superficie de 19 477 ha, suit un tronçon du fleuve Nakanbé, deuxième plus grand et plus important cours d'eau du pays, après le fleuve Mouhoun. Elle est intérieure et saisonnière, comprenant un réservoir d'eau artificiel, le barrage de Razinga et une réserve forestière unique. La zone humide est située majoritairement dans la commune de Mané (Figure 1). Elle a été désignée site Ramsar depuis le 02 février 2016.

Son bassin versant appartient au domaine soudano-sahélienne, caractérisé par

une longue saison sèche de novembre à mai et une courte saison pluvieuse de juin à octobre. La pluviométrie est faible et inégalement répartie dans l'espace et dans le temps, avec une moyenne annuelle comprise entre 600 et 900 mm. Les températures moyennes annuelles varient entre 20 à 28°C pendant la saison humide et sont par contre très élevées en saison sèche, 35 à 40°C (Ilboudo et al., 2020). Les plans d'eau sont soumises à une forte évaporation dont la moyenne annuelle est de plus de 2000 mm (AEN, 2015).

Le Bassin du Nakanbé-Mané est caractérisé par une végétation de savane arborée et arbustive et des formations ripicoles. Cette végétation et la disponibilité de l'eau en font un refuge et un lieu d'alimentation pour une faune nombreuse et variée. Le fleuve Nakanbé, dont la zone humide dépend, alimente en eau les principales villes du pays et nourrit des milliers de personnes tributaires du fleuve pour l'agriculture et pour la pêche. La zone humide offre de nombreux biens et services écosystémiques tels que l'approvisionnement en nourriture et en eau douce, la recharge des eaux souterraines, la régulation du climat local, la séquestration du carbone, les loisirs et le tourisme (AEN, 2019).

Collecte de données

Images satellitaires

Les images de réflectance (SR), Landsat 5 « Thematic Mapper » (TM), Landsat 7 « Enhanced Thematic Mapper-plus » (ETM+) et Landsat 8 « Operational Land Imager » (OLI), ont été collectées sur la plateforme Google Earth Engine. Un total de 627 images a été utilisé comme source de données pour la détection de l'eau dans la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané. Les images Landsat ont été choisies pour cette étude, car elles proposent des données de haute résolution spatio-temporelle, disponibles gratuitement et ayant la plus longue série permettant la surveillance des zones humides (Foga et al., 2017).

La plateforme Google Earth Engine (accessible sur <https://code.earthengine.google.com/>), est dédiée au traitement de gros volume de

données de télédétection ((Pekel et al., 2016; Wang et al., 2018; Zhou et al., 2019; Wang et al., 2020b).

Données climatiques

Les séries des données climatiques ont été fournies par l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM) du Burkina Faso. Les variables climatiques les plus pertinentes capables d'influencer la dynamique de la ressource en eau de surface telles que les précipitations, les températures moyennes, et les évapotranspirations potentielles ont été collectées à la station pluvieuse de Mané (précipitations) et à la station synoptique de OuagadougouAéro, (température, évapotranspiration potentielle) sur la période de 1991 à 2020.

Traitement des données

Dynamique des surfaces en eaux de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané

Les indices d'eau sont utilisés pour détecter les surfaces en eaux à l'aide de données satellitaires. L'un de ces indices les plus utilisés est l'indice d'eau par différence normalisé modifié (mNDWI), développé à partir de l'indice d'eau par différence normalisé (NDWI). Cet indice mNDWI a amélioré les performances du NDWI en supprimant les bruits de terrains bâtis (Xu, 2006), mais présente toujours des erreurs dans la distinction entre les plans d'eau et la végétation (Ji et al., 2009; Verpoorter et al., 2012). Or, selon Santoro et al. (2015), la végétation des zones humides est le principal facteur à l'origine des erreurs de classification des masses d'eau de surface. En raison donc de la répartition mixte de l'eau et de la végétation dans les zones humides, et pour pallier ce problème plusieurs études (Zou et al., 2017; Wang et al., 2018; Zou et al., 2018; Wang et al., 2019) ont suggéré la combinaison du mNDWI, à l'indice normalisé de végétation (NDVI) et de l'indice de végétation amélioré (EVI) afin d'améliorer la performance et la stabilité qu'offre un indice individuel pour délimiter l'eau libre. Leurs équations sont les suivantes.

$$NDVI = \frac{(PIR - Rouge)}{(PIR + Rouge)}$$

Eq. 1

$$mNDWI = \frac{(\text{Vert} - \text{MIR})}{(\text{Vert} + \text{MIR})} \quad \text{Eq. 2}$$

$$EVI = 25 \times \frac{(\text{PIR} - \text{Rouge})}{(\text{PIR} + 6 \times \text{Rouge} - 7.5 \times \text{Bleu} + 1) \times 2.5} \quad \text{Eq. 3}$$

Où PIR est la réflectance de la bande « Proche Infrarouge »,

Rouge, Vert, Bleu, les réflectances des bandes « Rouge », « Verte », « Bleue » et MIR est celle de la bande « Moyen Infrarouge »

Afin d'extraire des surfaces en eau, l'algorithme proposé par Zou et al (Zou et al., 2017) et basé sur la combinaison d'indices d'eau et de végétations sus-cité (Eq. 1 à 3) a été adopté pour cette étude. Cet algorithme s'est avéré efficace dans bon nombre d'études (Wang et al., 2018; Deng et al., 2019; Wang et al., 2019; Xia et al., 2019; Zhou et al., 2019; Wang et al., 2020a), avec une précision globale de plus de 96%. Son équation est la suivante :

$$MNDWI > NDVI \text{ ou } MNDWI > EVI \text{ et } EVI < 0,1. \quad \text{Eq. 4}$$

Les pixels répondant aux critères de l'équation 4 (Eq.4) ont été classés comme eau.

Les images Sentinel-2 de l'année 2020 ont été utilisées pour évaluer la précision des résultats du modèle d'extraction des surfaces en eau. Un échantillon aléatoire, composé 750 points repartis en deux classes « eau » et « non-eau » a été constitué, servant de données de références, pour générer la matrice de confusion.

Pour analyser la dynamique spatio-temporelle des eaux de surfaces, l'indice de fréquence d'eau (F_{eau}) a été utilisé. Il est défini comme étant le pourcentage d'observations d'eau de toutes les bonnes observations (Wang et al., 2018; Xu, 2018; Zou et al., 2018). Il permet d'évaluer les variations intra et inter annuelles des eaux de surface et leur distribution spatiale. Son équation est la suivante :

$$F_{\text{eau}} = \frac{\sum N_{\text{eau}}}{\sum N_{\text{total}}} \quad \text{Eq.5}$$

Où F_{eau} , compris entre 0 et 1 est la fréquence d'eau sur une période donnée. N_{eau} représente le nombre de fois qu'un pixel est classé comme eau au cours d'une période donnée, et N_{total}

représente le nombre total de pixel de bonne observation au cours d'une période donnée.

Sur la base de la fréquence de présence d'eau d'une année (F_{eau}), les pixels d'eau ont été classés en masse d'eau saisonnière ($F_{\text{eau}} \in [0,25, 0,75]$), surface en eau permanente ($F_{\text{eau}} \in [0,75, 1]$), surface en eau maximale ($F_{\text{eau}} \in [0,25, 1]$) (Zou et al., 2017). La surface en eau maximale représente le cumul des surfaces en eau saisonnière et permanente.

Impact du changement climatique sur la dynamique des surfaces en eau

Pour appréhender l'impact du climat sur la ressource en eau du bassin du Nakanbé-Mané, les facteurs climatiques tels que la pluviométrie, la température, l'évapotranspiration, ayant des relations directes avec les changements des masses d'eau (Bates et al., 2008; Tao et al., 2015) ont été analysés à l'aide d'indices climatiques, Il s'agit de :

- *Précipitations annuelles totales par jour de pluie (PRCTOT)*

Le cumul annuel total de la précipitation en jours de pluie où la précipitation est supérieure ou égale à 1 ($RR \geq 1 \text{ mm}$).

- *L'indice pluviométrique standardisé (IPS)*

L'indice pluviométrique standardisé, permet d'observer la variabilité interannuelle ainsi que les périodes de déficits et d'excédents pluviométriques. Les valeurs positives représentent les années excédentaires et les valeurs négatives les années déficitaires. Son équation est la suivante (Eq.6):

$$SPI = \frac{(P_i - P_m)}{\sigma} \quad \text{Eq.6}$$

Où P_i est le cumul de la pluie pour une année i ; P_m et σ sont respectivement la moyenne et l'écart type des pluies annuelles observées pour une série donnée.

- *L'indice d'intensité de précipitation simple (SDII)*

L'indice d'intensité de précipitation simple (SDII), de Giorgi and Mearns (2002), indique la moyenne des précipitations quotidiennes pour une période donnée. Son équation est la suivante (Eq.7) :

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W} \quad \text{Eq.7}$$

Où RR_{wj} est la quantité de précipitation journalière les jours de pluie, w ($RR \geq 1\text{mm}$) pendant la période j . Si W représente le nombre de jours humides dans j .

- *La température moyenne annuelle*

La température annuelle moyenne fait référence à la moyenne des températures maximales et minimales d'une année. Le suivi de son évolution est un outil climatologique précieux qui permet de rendre compte de l'ampleur du phénomène actuel de réchauffement climatique. Il est calculé sur une période de référence de 30 ans au moins.

- *Les anomalies standardisées de la température moyenne*

L'anomalie standardisée fait ressortir le niveau d'exceptionnalité de la température. Elle exprime l'anomalie de température en termes d'écart-type par rapport à la normale (Eq.8).

$$\text{Anomalie} = \frac{(T_i - T_m)}{\sigma} \quad \text{Eq.8}$$

Où T_i est la température moyenne de l'année i ; T_m la température moyenne annuelle de la

série; σ est l'écart-type de la température moyenne annuelle de la série.

- *Le cumul annuel de l'évapotranspiration potentiel (ETP)*

L'évapotranspiration est la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère sous forme de vapeur. L'analyse de la variation de son cumul annuel permet d'apprécier son évolution dans le temps.

Analyse statistique

La dynamique des surfaces en eau (saisonnier, permanente et maximale) de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané, ainsi que les données climatiques ont été analysées par une méthode de régression linéaire, celle de Theil-Sen. Recommandé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM), il est considéré comme une méthode de régression de tendance linéaire robuste (Fickas et al., 2016; Nitze et al., 2017; Wang et al., 2019). Cette méthode est largement utilisée en climat et en hydrologie (Manzanas et al., 2014; Jaiswal et al., 2015; Pedron et al., 2017; Hallouz et al., 2019).

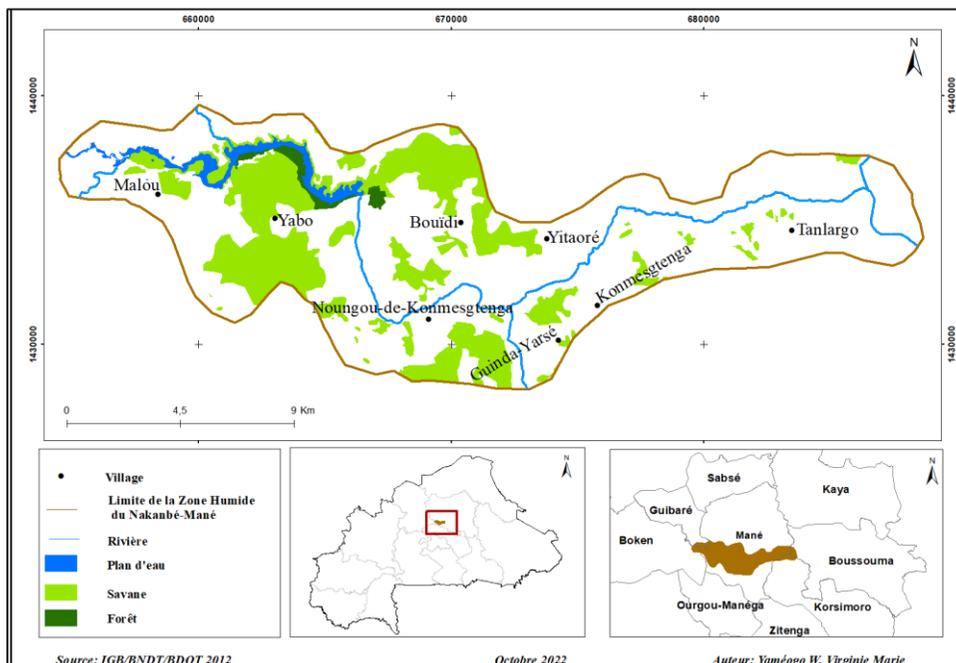


Figure 1 : Situation géographique de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané.

RESULTATS

Evolution spatio-temporelle des surfaces en eau

L'analyse de la variation annuelle des surfaces en eau saisonnière, permanente et maximale du bassin du Nakanbé-Mané a été faite sur chacune des années sur la période de 2000 à 2020. La précision globale est de 98,31% et le coefficient Kappa de 95,88%.

La Figure 2 présente la distribution spatiale des surfaces en eau de la zone humide du « bassin du Nakanbé-Mané ». Il s'agit de l'étendue maximale et minimale de la période de 2000 à 2020, ainsi que la moyenne historique de ladite période.

La fréquence d'eau la plus élevée, correspondant à la probabilité d'avoir une surface d'eau continue tout au long de l'année a diminué drastiquement jusqu'à tendre vers 0 au cours de la période 2000 à 2020, au profit des pixels d'eau saisonnières qui augmentent.

Aussi, au cours de cette période, les surfaces en eau de la zone humide ont également varié en dents de scie d'une année à l'autre (Figure 3). La surface en eau maximale a varié de 493,40 ha (2002) à 291,83 ha (2011), soit un coefficient de variation de 14,96%, celle permanente a varié de 431,5 ha (2002) à 89,80 ha (2020), avec une variation de 39,87% sur ladite période. La surface en eau saisonnière est celle qui a le plus varié. Elle est passée de 33,76 ha (2008) à 281,78 ha (2011), soit un coefficient de variation de 46,52%. Les surfaces moyennes en eau de la période de 2000-2020 représentent 369,09 ha, 247,12 ha et 121,97 ha respectivement pour les surfaces maximales, permanentes et saisonnières. Le résumé des surfaces en eau est présenté dans le Tableau 1

Les analyses statistiques de tendance, mettent en exergue l'existence d'une tendance à la baisse de -5,56 ha/an ($P\text{-value} = 0,00247$) et de -8,30 ha/an ($P\text{-value} = 0,00054$), respectivement pour les surfaces en eau maximale et permanente. Une tendance non significative à l'augmentation de 2,81 ha/an ($P\text{-value} = 0,1751$) est observée pour les surfaces en eau saisonnière.

Dynamique des surfaces en eau et leurs relations avec les facteurs climatiques

La pluviométrie de la zone humide du Nakanbé-Mané a varié en dents de scie au cours de la période de 1991 à 2020. Elle a varié de 458,60 mm à 1110,10 mm avec une moyenne de 674,87 mm et un coefficient de variation de 20%. L'indice de précipitation annuelle total par jour de pluie (PRCPTOT) présente une légère tendance significative à hausse des précipitations annuelles, avec un taux de hausse de 2,1 mm/an et un $P\text{-value}$ de 0,03. (Figure 4).

L'indice pluviométrique standardisé (SPI), a permis de mettre en exergue deux périodes distinctes de régimes pluviaux. D'abord, une succession d'années majoritairement déficitaires de 1991 à 2004, au cours de laquelle le cumul annuel de précipitation a baissé de 3,7% par rapport à la moyenne normale (1991-2020) qui est de 674,87 mm. Ensuite une succession d'années majoritairement humides (avec par moment des années sèches), qui se caractérise par une augmentation de la moyenne annuelle de précipitation de 8,4% de 2004 à 2020 (Figure 5)

L'analyse de tendance de l'indice d'intensité de précipitation simple, montre une tendance à la hausse, avec un taux de hausse de 0,085 mm/an et un $P\text{-Value}$ de 3,00E-06 (Figure 6).

Les températures moyennes annuelles montrent une grande variation de 28,1°C à 29,6°C sur la période de 1991 à 2020. Une tendance à l'augmentation est observée pour la même période, avec un taux de hausse de 0,033°C/an et un $P\text{-value} = 0,013$. Cependant à partir de 2009, la hausse enregistrée reste stationnaire autour de 29,3°C (Figure 7).

L'analyse de l'anomalie standardisée des températures moyennes montre une période de 1991 à 2008 où les années sont majoritairement froides (anomalie négative), suivie par une succession d'années chaudes (anomalie positive) sur la période de 2009 à 2020, traduisant des tendances significatives de réchauffement pour cette période (Figure 8).

L'évapotranspiration a varié en dents de scie au cours de ladite période d'environ 2 m à 2,3 m. Une tendance à la hausse est observée avec un taux de 8,5 mm et un $P\text{-value}$ de 0,001 (Figure 9).

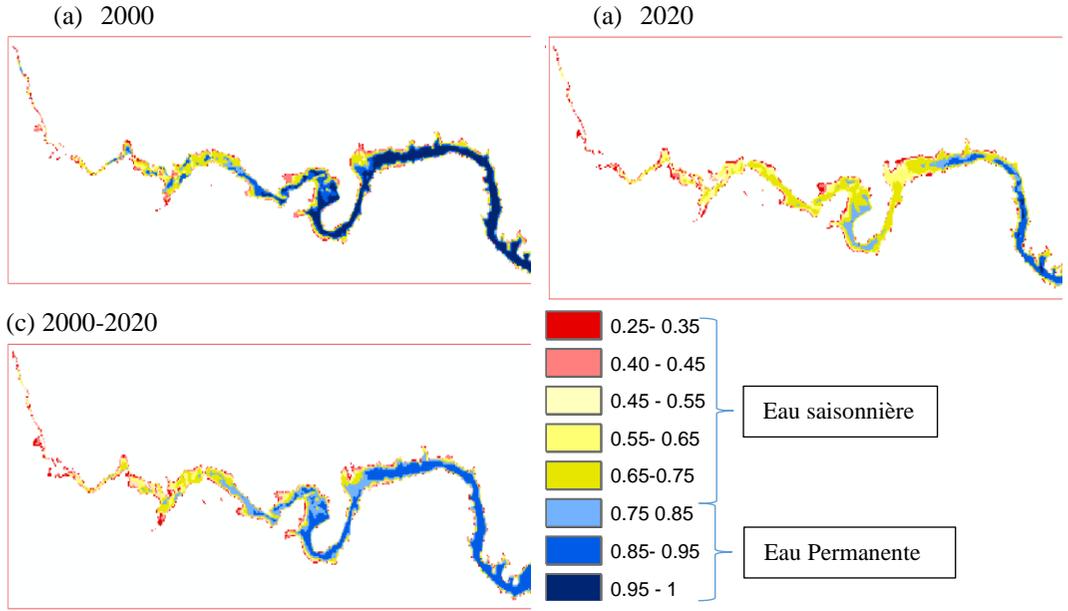


Figure 2 : Distribution spatiale des surfaces en eau de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané de 2000 à 2020 : (a) étendue maximale; (b) étendue minimale; (c) moyenne historique de 2000 à 2020 des surfaces en eau.

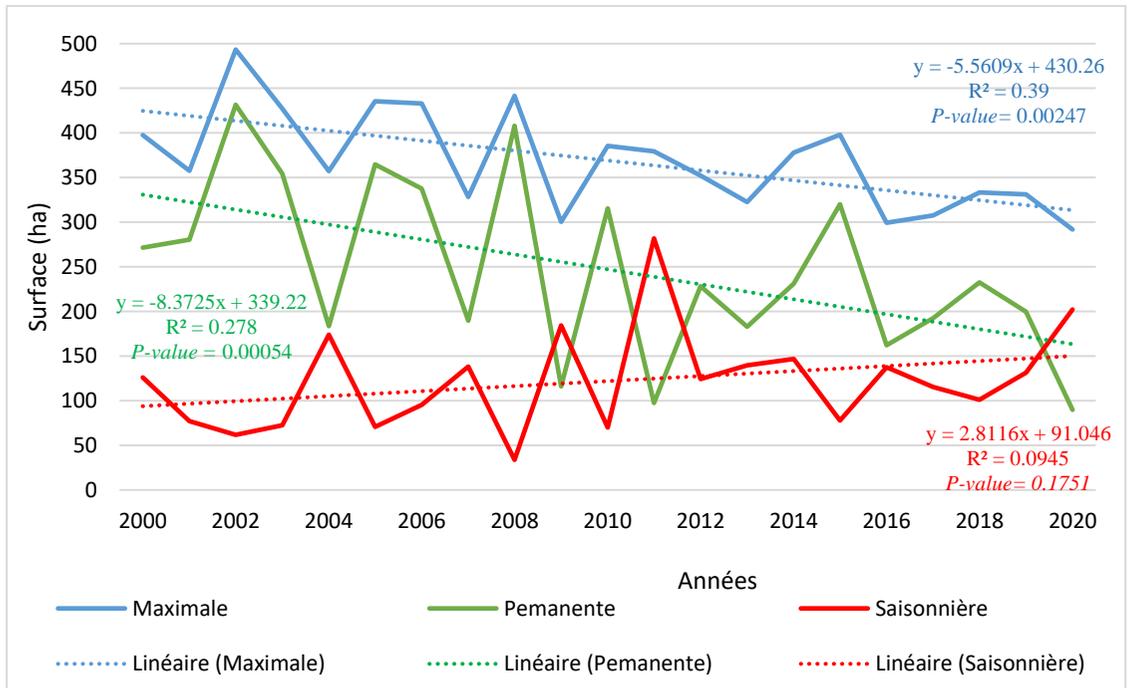


Figure 3 : Evolution des surfaces en eau de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané.

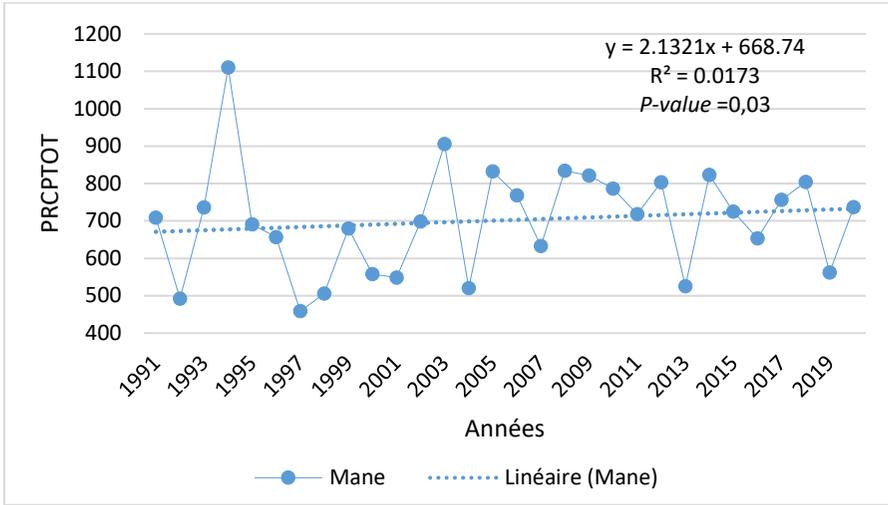


Figure 4 : Précipitations annuelles totales par jour de pluie (PRCPTOT) à la station pluvieuse de Mané.

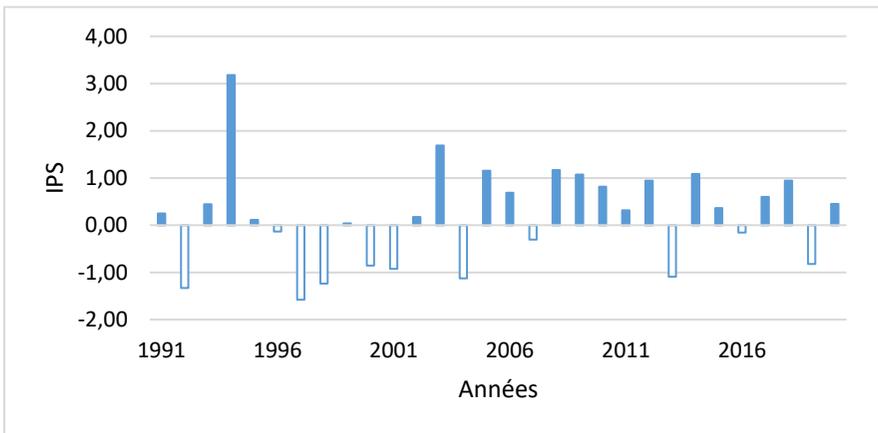


Figure 5: SPI de la station pluvieuse de Mané de 1991 à 2020.

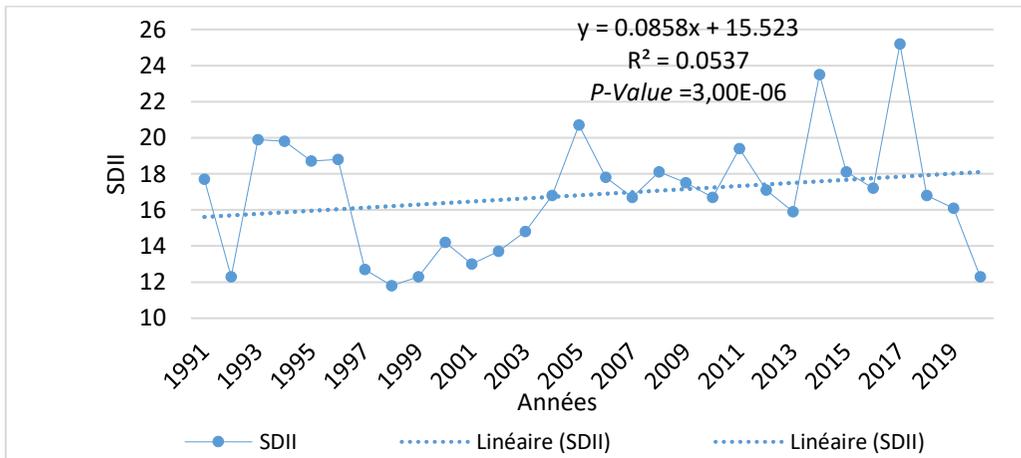


Figure 6: Intensité des pluies 1991-2020 à la station de Mané.

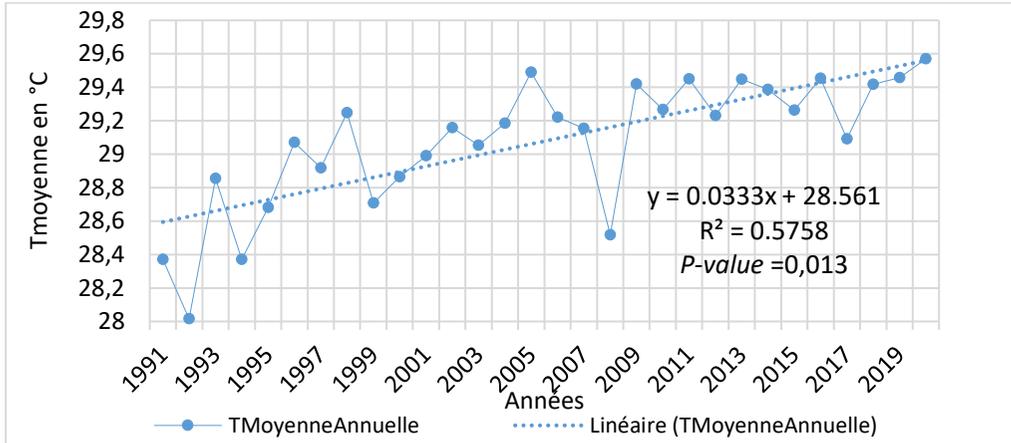


Figure 7: Variation de la température moyenne annuelle de 1991-2020 à la station de OuagadougouAéro.

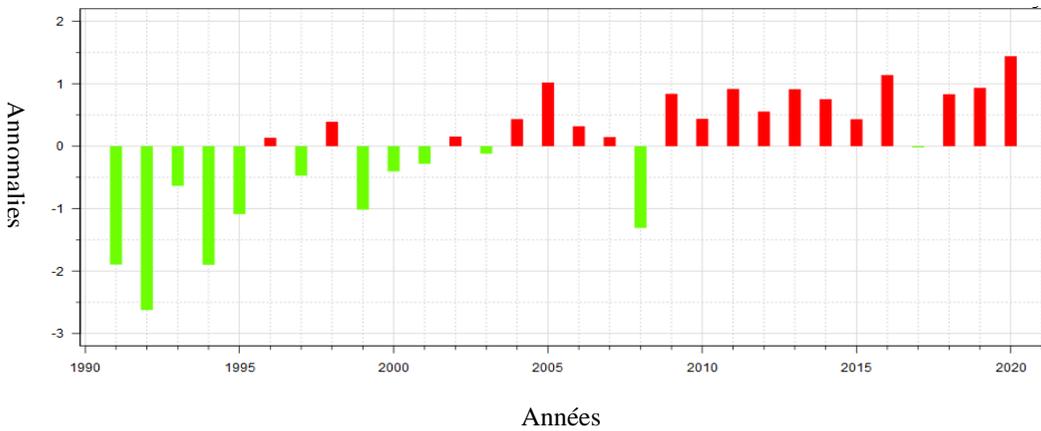


Figure 8: Anomalies standardisés des températures moyennes annuelles 1991 à 2020 à la station de OuagadougouAéro.

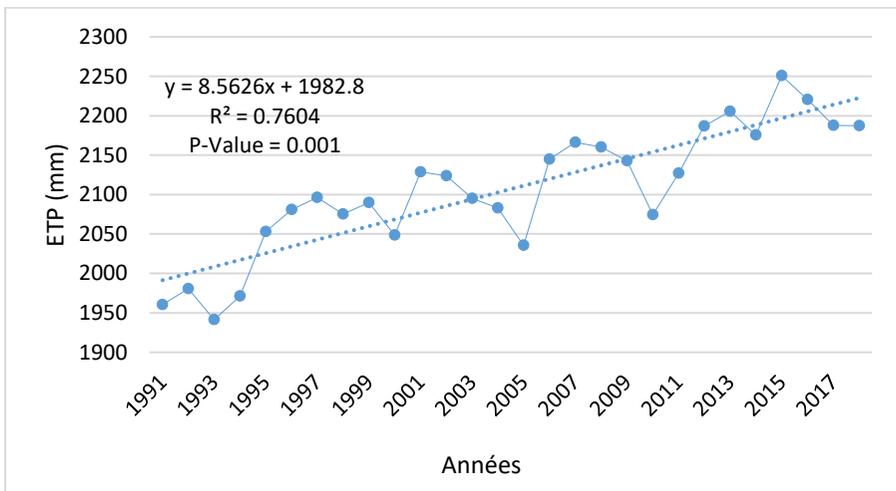


Figure 9: Cumul annuel de l'évapotranspiration 1991-2020 à la station de OuagadougouAéro.

Tableau 1: Résumé des surfaces en eau (en ha) de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané de 2000 à 2020.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation (%)
Superficie maximale	291,83	493,40	369,09	55,25	14,96
Superficie permanente	89,80	431,54	247,12	98,53	39,87
Superficie saisonnière	33,76	281,78	121,97	56,74	46,52

DISCUSSION

L'analyse de la dynamique inter annuelle des surfaces en eau du bassin versant du Nakanbé-Mané a permis d'examiner à long terme, trois classes d'eau. Il s'agit des eaux permanentes, saisonnières et maximales. Les résultats montrent un rétrécissement des eaux maximales (-5,56 ha/an) et permanentes (-8,30 ha/an) et une augmentation non significative des eaux saisonnières (2,81 ha/an), traduisant un passage de régime permanent à saisonnier de la retenue d'eau de la zone humide. Ces résultats auxquels nous sommes parvenus, corroborent les résultats d'études antérieures menées dans le bassin versant du Nakanbé, montrant une diminution des ressources en eau de surface de ce bassin (Moser et al., 2014). Le bassin versant du Nakanbé est le bassin d'appartenance de la zone humide du Nakanbé-Mané.

L'analyse des déterminants climatiques, ayant des relations directes avec les changements des masses d'eau telles que les précipitations, l'évapotranspiration et la température (Bates Bryson, 2008; Tao et al., 2015) a permis d'appréhender l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de surface de la zone humide du Nakanbé-Mané. Les précipitations, l'un des facteurs climatiques ayant un impact important sur les changements des eaux de surface (Tao et al., 2015), ont une légère tendance à augmentation de 2,1 mm/an au cours de la période 1991 à 2020. Cependant, l'indice pluviométrique standardisé a permis de mettre en évidence une période de sécheresse, caractérisée par une baisse de pluviométrie de l'ordre de 3,7% dans le bassin versant du Nakanbé-Mané. Etant

donné que la pluviométrie est la principale source d'alimentation des ressources en eau du Burkina Faso, la longue période de sécheresse a entraîné la diminution des étendues d'eau de surface de ladite zone humide. Aussi, l'augmentation de la température de 0,03°C/an, a induit une augmentation de l'évapotranspiration de 8,5 mm/an. Selon IPCC (2014), dans un climat plus chaud, sous l'effet d'une augmentation de l'énergie disponible en surface, il est très probable (90-100% de probabilité) que l'évapotranspiration potentielle augmente. L'augmentation observée de l'évapotranspiration dans le bassin de la zone humide croît plus rapidement que l'augmentation des précipitations. Or, l'augmentation de l'évapotranspiration traduit une hausse de la fraction des précipitations s'évaporant au lieu de ruisseler en surface (Good et al., 2015), ce qui aggrave ainsi l'aridification du bassin versant de la zone humide. Aussi, l'augmentation des températures entraîne également une augmentation de la demande en eau d'irrigation (Wang et al., 2020a), d'autant plus que les eaux du bassin du Nakanbé-Mané sont principalement utilisées pour l'agriculture irriguée. En outre, l'étude montre une tendance significative à la hausse de l'intensité des précipitations, accentuant l'érosion hydrique, avec pour conséquence l'accélération de la sédimentation des plans d'eau (Hussein et al., 2018).

Cette situation de réduction des surfaces en eau de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané, pose des défis environnemental, social et économique exacerbant la vulnérabilité des populations qui

en dépendent. Aussi, l'eau étant au cœur des stratégies d'adaptation au changement climatique, sa gestion durable s'impose, surtout dans un contexte de raréfaction de la ressource. Cela passe nécessairement par l'élaboration d'un plan de gestion intégré de ladite zone humide.

Conclusion

Cette étude a analysé la dynamique spatio-temporelle des surfaces en eau de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané de 2000 à 2020 en se basant sur toutes les images Landsat TM, ETM+ et OLI disponibles dans la plateforme Google Earth Engine. La précision globale de l'extraction des surfaces en eau de ladite zone humide est de 98,31%, et le coefficient de Kappa est de 95,88%. Les surfaces en eau ont été classées en eau maximale, permanente et saisonnière en fonction de la fréquence de présence d'eau. Une tendance au rétrécissement est observée au niveau des eaux maximales (-5,56 ha/an) et permanentes (-8,30 ha/an) et une augmentation non significative des eaux saisonnières (2,81 ha/an). L'analyse des facteurs climatiques, a permis d'appréhender l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de surface de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané. Les précipitations ont montré une légère tendance à la hausse de 2,1 mm/an. Cependant, une période de sécheresse, caractérisée par une baisse de pluviométrie de l'ordre de 3,7% de 1991 à 2005 est enregistrée dans le bassin versant du Nakanbé-Mané. Aussi, l'augmentation de la température de 0,03°C/an, a induit une augmentation de l'évapotranspiration de 8,5 mm/an qui augmente plus vite que les précipitations, aggravant ainsi l'aridification du bassin versant de la zone humide.

Les résultats de cette étude fournissent une base scientifique pour la protection écologique, la gestion et la planification des ressources en eau de la zone humide du bassin du Nakanbé-Mané. En perspective, dans le but d'appréhender entièrement la problématique des pressions sur la zone humide, cette étude devrait être complétée par une analyse de l'impact des activités humaines.

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas d'intérêt concurrents.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

WVMY a conçu et réalisé la recherche, traité les données et rédigé le manuscrit. Les autres auteurs ont contribué à la définition de la thématique, supervisé les travaux et évalué la qualité des travaux.

REMERCIEMENTS

Nos sincères remerciements à Institut météorologique et hydrologique suédois (SMHI), pour leur collaboration et leur encadrement.

REFERENCES

- Adamou MM, Alhou B, Nazoumou Y, Alloke G. 2015. Impacts des facteurs climatiques et anthropiques sur les ressources et la qualité des eaux de la mare de Tabalak. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 9(3): 1665-1677.
- AEN. 2015. Schema directeur d'aménagement et de gestion des eaux de surface de l'agence de l'eau du Nakanbé: Tome 1 Etat des lieux. Agence de l'Eau du Nakanbé : Burkina Faso, p.163.
- AEN. 2019. Espace de compétence de l'agence de l'eau du Nakanbe (EC-AEN) : Schema directeur d'aménagement et de gestion de l'eau (SDAGE). Agence de l'Eau du Nakanbé: Burkina Faso.
- Bates BC, Kundzewicz ZW, Wu S, Palutikof JP. 2008. *Climate Change and Water*. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat : Geneva.
- Davidson NC. 2014. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10): 934-941. DOI: <https://doi.org/10.1071/MF14173>
- De Sousa C, Fatoyinbo L, Neigh C, Boucka F, Angoue V, Larsen T. 2020. Cloud-computing and machine learning in support of country-level land cover and ecosystem extent mapping in Liberia and Gabon. *PloS one*, 15(1): e0227438. DOI: 10.1371/journal.pone.0227438
- Deng Y, Jiang W, Tang Z, Ling Z, Wu Z. 2019. Long-Term Changes of Open-

- Surface Water Bodies in the Yangtze River Basin Based on the Google Earth Engine Cloud Platform. *Remote Sensing*, **11**(19): 2213.
- Drabo K, Yameogo J, Sawadogo L. 2016. Examen de la gestion et stratégies de protection des berges du Lac Bam à Kongoussi au Centre-Nord du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **10**(3): 944-956.
- Fickas KC, Cohen WB, Yang Z. 2016. Landsat-based monitoring of annual wetland change in the Willamette Valley of Oregon, USA from 1972 to 2012. *Wetlands Ecology and Management*, **24**(1): 73-92. DOI: 10.1007/s11273-015-9452-0
- Foga S, Scaramuzza PL, Guo S, Zhu Z, Dilley RD, Beckmann T, Schmidt GL, Dwyer JL, Joseph Hughes M, Laue B. 2017. Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. *Remote Sensing of Environment*, **194**: 379-390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026>
- Frohn RC, Autrey BC, Lane CR, Reif M. 2011. Segmentation and object-oriented classification of wetlands in a karst Florida landscape using multi-season Landsat-7 ETM+ imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **32**(5): 1471-1489. DOI: 10.1080/01431160903559762
- Gayet G, Touroult J, Barnaud G, Baptist F, Caessteker P, Clement JC, Gaucherand S, Isselin Nondedeu F. 2017. Une méthode nationale pour évaluer les fonctions des zones humides dans le cadre de la compensation écologique des impacts. *Sciences Eaux & Territoires*: 60-65. DOI: 10.14758/set-revue.2017.24.13
- Giorgi F, Mearns LO. 2002. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the "reliability ensemble averaging"(REA) method. *Journal of climate*, **15**(10): 1141-1158.
- Glenn NF, Neuenschwander A, Vierling LA, Spaete L, Li A, Shinneman DJ, Pilliod DS, Arkle RS, McIlroy SK. 2016. Landsat 8 and ICESat-2: Performance and potential synergies for quantifying dryland ecosystem vegetation cover and biomass. *Remote Sensing of Environment*, **185**: 233-242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.039>
- Good SP, Noone D, Bowen G. 2015. Water resources. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science*, **349**(6244): 175-177. DOI: 10.1126/science.aaa5931
- Hallouz F, Meddi M, Mahe G, Karahacane H, Ali Rahmani S. 2019. Tendances des précipitations et évolution des écoulements dans un cadre de changement climatique : bassin versant de l'oued Mina en Algérie. *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, **32**(2): 83-114. DOI: <https://doi.org/10.7202/1065202ar>
- Hussein eHH, Laurence C, Laurent T. 2018. Modélisation de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant du Mhaydssé. Békaa-Liban. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]*, **18** (1). DOI: <https://doi.org/10.4000/vertigo.19804>
- Ilboudo A, Soulama S, Hien E, Zombre P. 2020. Perceptions paysannes de la dégradation des ressources naturelles des bas-fonds en zone soudano-sahélienne: cas du sous bassin versant du Nakanbé-Dem au Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **14**(3): 883-895.
- IPCC. 2014. Africa. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds). Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Jaiswal RK, Lohani AK, Tiwari HL. 2015. Statistical Analysis for Change Detection and Trend Assessment in Climatological

- Parameters. *Environmental Processes*, **2**(4): 729-749. DOI: 10.1007/s40710-015-0105-3
- Ji L, Zhang L, Wylie B. 2009. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **11**: 1307-1317. DOI: 10.14358/PERS.75.11.1307
- Junk W, An S, Finlayson M, Gopal B, Květ J, Mitchell S, Mitsch W, Roberts R. 2013. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: A synthesis. *Aquatic Sciences*, **75**(1): 151-167. DOI: 10.1007/s00027-012-0278-z
- Kaplan G, Avdan U. 2018. Monthly Analysis of Wetlands Dynamics Using Remote Sensing Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **7**(10): 411.
- Koning CO. 2005. Vegetation patterns resulting from spatial and temporal variability in hydrology, soils, and trampling in an isolated basin marsh, New Hampshire, USA. *Wetlands*, **25**(2): 239-251. DOI: 10.1672/1
- Manzanas R, Amekudzi L, Preko K, Herrera S, Gutiérrez JM. 2014. Precipitation variability and trends in Ghana: An intercomparison of observational and reanalysis products. *Climatic change*, **124**(4): 805-819.
- Mitsch WJ, Bernal B, Hernandez ME. 2015. Ecosystem services of wetlands. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, **11**(1): 1-4. DOI: 10.1080/21513732.2015.1006250
- Moser L, Voigt S, Schoepfer E, Palmer S. 2014. Multitemporal Wetland Monitoring in Sub-Saharan West-Africa Using Medium Resolution Optical Satellite Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2336875
- Nitze I, Grosse G, Jones BM, Arp CD, Ulrich M, Fedorov A, Veremeeva A. 2017. Landsat-based trend analysis of lake dynamics across northern permafrost regions. *Remote Sensing*, **9**(7): 640.
- Pedron IT, Silva Dias MA, de Paula Dias S, Carvalho LM, Freitas ED. 2017. Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba–Southern Brazil. *International Journal of Climatology*, **37**(3): 1250-1264.
- Pekel J-F, Cottam A, Gorelick N, Belward AS. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, **540**(7633): 418-422. DOI: 10.1038/nature20584
- Rapinel S. 2012. Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : de l'observation à la modélisation prospective. Thèse de doctorat, Université Rennes 2, p.382.
- Robledano F, Esteve MA, Farinós P, Carreño MF, Martínez-Fernández J. 2010. Terrestrial birds as indicators of agricultural-induced changes and associated loss in conservation value of Mediterranean wetlands. *Ecological Indicators*, **10**(2): 274-286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.05.006>
- Santoro M, Wegmüller U, Lamarche C, Bontemps S, Defourny P, Arino O. 2015. Strengths and weaknesses of multi-year Envisat ASAR backscatter measurements to map permanent open water bodies at global scale. *Remote Sensing of Environment*, **171**: 185-201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.031>
- Tao S, Fang J, Zhao X, Zhao S, Shen H, Hu H, Tang Z, Wang Z, Guo Q. 2015. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau. *Proc Natl Acad Sci U S A*, **112**(7): 2281-2286. DOI: 10.1073/pnas.1411748112
- Tazen F, Fonteh MF, Karambiri H. 2013. Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du lac municipal de Dschang: connaissance et usages. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **7**(2): 840-851.
- Verpoorter C, Kutser T, Tranvik L. 2012. Automated mapping of water bodies using Landsat multispectral data. *The Remote Sensing of Oceans, Estuaries, and Lakes*, **10**(12): 1037-1050. DOI: doi.org/10.4319/lom.2012.10.1037

- Wang C, Jia M, Chen N, Wang W. 2018. Long-Term Surface Water Dynamics Analysis Based on Landsat Imagery and the Google Earth Engine Platform: A Case Study in the Middle Yangtze River Basin. *Remote Sensing*, **10**(10): 1635. DOI: 10.3390/rs10101635
- Wang X, Xiao X, Zou Z, Chen B, Ma J, Dong J, Doughty RB, Zhong Q, Qin Y, Dai S, Li X, Zhao B, Li B. 2020a. Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986–2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, **238**: 110987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.030>
- Wang X, Xiao X, Zou Z, Hou L, Qin Y, Dong J, Doughty RB, Chen B, Zhang X, Chen Y, Ma J, Zhao B, Li B. 2020b. Mapping coastal wetlands of China using time series Landsat images in 2018 and Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **163**: 312-326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.03.014>
- Wang Y, Ma J, Xiao X, Wang X, Dai S, Zhao B. 2019. Long-Term Dynamic of Poyang Lake Surface Water: A Mapping Work Based on the Google Earth Engine Cloud Platform. *Remote Sensing*, **11**(3): 313.
- Xia H, Zhao J, Qin Y, Yang J, Cui Y, Song H, Ma L, Jin N, Meng Q. 2019. Changes in Water Surface Area during 1989–2017 in the Huai River Basin using Landsat Data and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, **11**(15): 1824.
- Xing L, Tang X, Wang H, Fan W, Gao X. 2018. Mapping Wetlands of Dongting Lake in China Using Landsat and Sentinel-1 Time Series at 30M. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLII** (3): 1971-1976. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-1971-2018
- Xu H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **27**(14): 3025-3033. DOI: 10.1080/01431160600589179
- Xu N. 2018. Detecting Coastline Change with All Available Landsat Data over 1986–2015: A Case Study for the State of Texas, USA. *Atmosphere*, **9**(3): 107.
- Zhou Y, Dong J, Xiao X, Liu R, Zou Z, Zhao G, Ge Q. 2019. Continuous monitoring of lake dynamics on the Mongolian Plateau using all available Landsat imagery and Google Earth Engine. *Science of The Total Environment*, **689**: 366-380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.341>
- Zhu Z. 2017. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **130**: 370-384.
- Zou Z, Dong J, Menarguez MA, Xiao X, Qin Y, Doughty RB, Hooker KV, David Hambright K. 2017. Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984–2015. *Science of The Total Environment*, **595**: 451-460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.259>
- Zou Z, Xiao X, Dong J, Qin Y, Doughty RB, Menarguez MA, Zhang G, Wang J. 2018. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **115**(15): 3810-3815. DOI: 10.1073/pnas.1719275115