



Analyse en ondelettes des séries temporelles aux stations de pluies et débits dans le bassin versant de Tortiya amont (Nord de la Côte d'Ivoire)

Marc Auriol Amalaman^{1,5}, Gil Mahé², Béh Ibrahim Diomande³, Armand Zamblé Tra Bi³,
Nathalie Rouché², Zeineddine Nouaceur⁴, and Benoit Laignel⁵

¹Département de géographie, Université Peleforo Gon Coulibaly, Korhogo, Côte d'Ivoire

²Hydrosciences Montpellier, University Montpellier, CNRS, IRD, IMT Alès, Montpellier, France

³Département de géographie, UFR CMS, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire

⁴Université de Rouen Normandie, UMR IDÉES CNRS 6226, Mont – Saint-Aignan CEDEX, France

⁵Université de Rouen Normandie, UMR CNRS 6143 M2C, Mont – Saint-Aignan CEDEX, France

Correspondence: Marc Auriol Amalaman (marcauriol@outlook.com, marcamal@upgc.edu.ci)

Received: 15 June 2022 – Revised: 11 May 2023 – Accepted: 20 July 2023 – Published: 19 April 2024

Résumé. L'objectif de cette étude est d'analyser les liens entre les indices climatiques et la variabilité des séries de précipitations et de débits. Afin de mieux comprendre la non stationnarité des différentes stations, les données de débits et de pluviométries utilisées concernent la station de Tortiya (1960–1996). Les indices climatiques couplés à ces séries sont l'indice NAO (North Atlantic Oscillation) et l'ENSO (El Niño – Southern Oscillation) sur la même période d'étude. La méthodologie a consisté à appliquer l'analyse et la cohérence en ondelettes sur les séries temporelles. Ces méthodes ont mis en évidence les modes de variabilité dans les séries chronologiques : le mode infra annuel, le mode annuel et le mode interannuel (1–2 ans; 2–4 ans; 4–8 ans). D'une part, les résultats montrent que la variabilité du signal est expliquée dans les hautes fréquences (6 mois à 1 an) dans les différentes séries chronologiques. À cette fréquence, c'est le mode annuel (1 an) qui enregistre toute la variabilité du signal comprise entre 30 % et 70 %. D'autre part, ce travail présente aussi des signaux sur d'autres fréquences et périodes assez faibles. L'analyse en ondelette a révélé que le signal dominant est très largement significatif au niveau du cycle annuel. Par ailleurs, l'usage de la cohérence en ondelettes entre les indices climatiques (ENSO, NAO) et les précipitations, indiquent une forte influence du NAO sur les séries pluviométriques et de débits.

Mots clés. Ondelettes continues; cohérence en ondelettes; pluie-débit; bassin versant Tortiya Amont; Côte d'Ivoire

1 Introduction

L'Afrique a été au centre de plusieurs études à cause des effets du changement climatique. L'impact des indices climatiques sur la précipitation et le cycle hydrologique constitue une question fondamentale dans plusieurs débats scientifiques. À cet effet, de nombreux auteurs tels que (Tra Bi et al., 2021; Zamrane et al., 2021; Khedimallah et al., 2020; Nouaceur, 2020; Benoit et al., 2013; Dieppois et al., 2010) ont mis

en relation les variations du régime hydro-pluviométrique et les indices climatiques. Toutefois, ce lien entre les paramètres hydroclimatiques et les indices climatiques suscite maintes préoccupations. Pour certains, la variabilité des précipitations est liée à l'Oscillation Nord Atlantique (NAO : North Atlantic Oscillation); (Zamrane et al., 2021; Laignel et al., 2013). Tandis que d'autres expliquent cette variabilité par l'indice El Niño (Bogning et al., 2021). De manière générale, la variabilité du climat global à court terme est associée à des phases de couplage de phénomènes océaniques et atmosphériques dont El Niño (ENSO) et le NAO, l'Oscillation Nord Atlantique (Laignel et al., 2014). En Côte d'Ivoire, plusieurs travaux menés sur le bassin versant de Tortiya tels

que (Anzoumanan et al., 2019; Soro et al., 2013) ont montré les changements survenus dans les séries hydroclimatiques à partir d'une analyse empirique. L'objectif de cette étude est de mettre en évidence les liens entre les indices climatiques ainsi que les paramètres hydrologiques et climatiques du bassin versant de Tortiya amont par usage de l'analyse spectrale.

1.1 Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de Tortiya amont est un sous-bassin du bassin versant du Bandama Blanc. Il est situé au nord de la Côte d'Ivoire, entre les longitudes 5 et 6°20' Ouest et les latitudes 8°40' et 10°20' Nord, dans les départements de Korhogo, Katiola, Niellé, Tengréla et Boundiali (Fig. 1). Il couvre une superficie estimée à 14 500 km² et est caractérisé dans son ensemble par des surfaces aplanies dont l'altitude varie entre 300 et 400 m. Toutefois, cette monotonie du plateau est interrompue par des dômes granitiques à l'allure d'inselbergs (Soro et al., 2013). Il est drainé par le Bandama et ses principaux affluents (Solomougou, Lopkoho, Yoréloro, Lafigué, Badéno, etc). Le climat du bassin versant est de type soudanien (régime tropical de transition) à deux saisons contrastées : une saison des pluies de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril avec une pluviométrie moyenne annuelle évaluée à 1230 mm (période 1950–2000). Le régime hydrologique est calqué sur celui des précipitations. On y distingue une période de faibles écoulements (étiage) allant de novembre à avril et une période de forts écoulements (crue) allant de mai à octobre. La crue la plus importante est enregistrée en septembre avec un débit de 300 m³ s⁻¹ (Soro et al., 2013).

2 Données et méthodes

2.1 Données

Les données pluviométriques et de débits utilisées dans cette étude proviennent de la station de Tortiya (1960–1996). Ces données de pluviométries ont été obtenues à la SO-DEXAM (*Société d'Exploitation pour le Développement Aéroportuaire et Météorologique de la Côte d'Ivoire*). Quant aux débits, ils résultent de la direction de l'hydrologie. En outre, les indices climatiques ont été téléchargés sur le site de NOAA : <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/> (la date du dernier accès : 15 May 2022). Ces indices climatiques (ENSO et NAO) permettent d'évaluer leur influence sur l'évolution de la pluviométrie et du débit dans le bassin versant. S'agissant de l'image Aster de type SRTM, elle provient du site internet « USGS Earth Explorer » <https://earthexplorer.usgs.gov/> (la date du dernier accès : 20 January 2022). Elle a été utile pour réaliser la cartographie du réseau hydrographique, la carte des altitudes et délimiter le bassin versant. Enfin, l'analyse spectrale a été faite à l'aide du logiciel libre R sous la version 4.1.1. Enfin, les traitements cartographiques ont été effectués sur le logiciel ArcGIS 10.8.

2.2 Méthodes

L'analyse en ondelettes (CWT) est une technique mathématique très utile pour l'analyse numérique et la manipulation de signaux multidimensionnels et discrets. Elle vise à identifier et quantifier les caractéristiques temporelles des principales composantes spectrales de la série temporelle. Ici, les spectres de puissance des ondelettes ont été calculés à l'aide de la transformée en ondelettes de Morlet pour l'analyse du signal. L'ondelette de Morlet introduit un ensemble de fonctions sous forme de petites ondes créées par des dilatations et translations à partir d'une simple fonction génératrice. En pratique, l'ondelette de Morlet est définie comme une onde harmonique dont la fréquence est multipliée par une fenêtre temporelle gaussienne (Zamrane et al., 2021). L'objectif est de percevoir si ces fluctuations sont aléatoires ou suivent un modèle cyclique. Les modes de variabilité détectés ont ensuite été comparés à ceux caractérisant les indices climatiques.

3 Résultats

3.1 Caractérisation de la variabilité pluviométrique dans le bassin versant

L'analyse de la variabilité de la série pluviométrique dans le bassin versant de Tortiya amont indique différents modes de variabilités. D'emblée, la Fig. 2 présente plusieurs modes de variabilités tant dans les hautes que dans les basses fréquences. Dans les hautes fréquences, le cycle saisonnier (6 mois à 1 an) présente une grande énergie de 1960 à 1980 au détriment du reste de la série. À ce niveau, cette variabilité à 6 mois est estimée à 27.55 % de la variabilité saisonnière. S'agissant du cycle annuel (1 an), il indique une significativité tout au long de la série. Ce mode de variabilité représente 67.07 % de la variabilité du signal. Il ressort de cette analyse que les hautes fréquences représentent le total de l'énergie avec 94.62 % de variabilité. Concernant de la variabilité dans les basses fréquences (> 1 an), elle indique un signal estimé à 4.03 %. À ce stade, un signal est plus indiqué au mode (1–2 ans et 2–4 ans) avant la grande sécheresse survenue dans la décennie 1970.

3.2 Caractérisation de la variabilité hydrométrique à la station de Tortiya

Pour cerner le contenu fréquentiel au niveau de la station hydrométrique de Tortiya, l'analyse en ondelettes continues a été appliquée à celle-ci (Fig. 3). L'analyse saisonnière (6 mois–1 an) indique 37 % de la variabilité du signal. Celle-ci (variabilité) est assez significative avant la grande sécheresse survenue dans la décennie 1970. À ce titre, le constat indique une reprise de cette variabilité hydrométrique entre 1975 et 1983. Une significativité est présentée en 1975 et en 1980. Au niveau du mode annuel (1 an), quand bien même

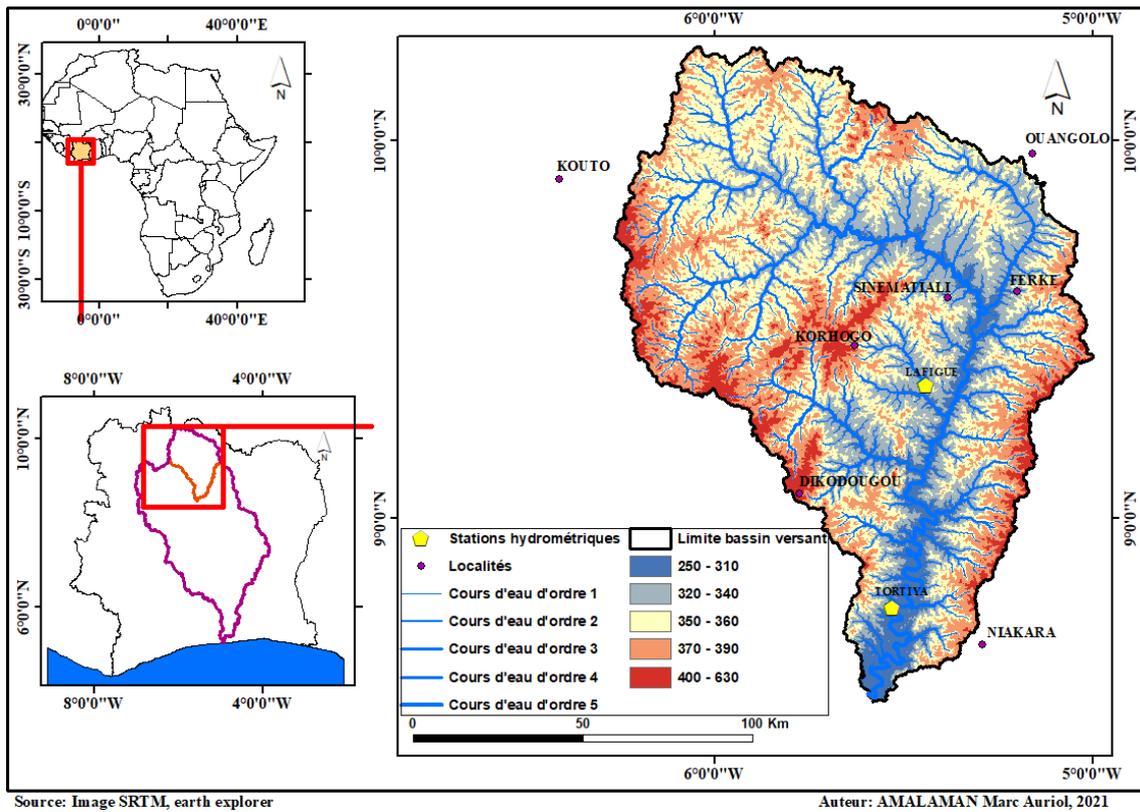


Figure 1. Localisation de la zone d'étude.

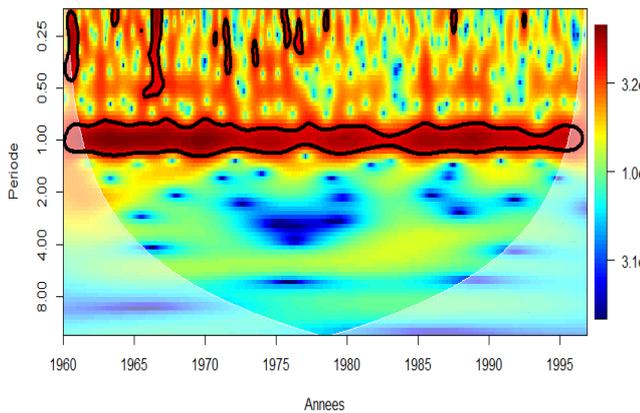


Figure 2. Analyse en ondelettes continues de la pluviométrie à la station de Tortiya.

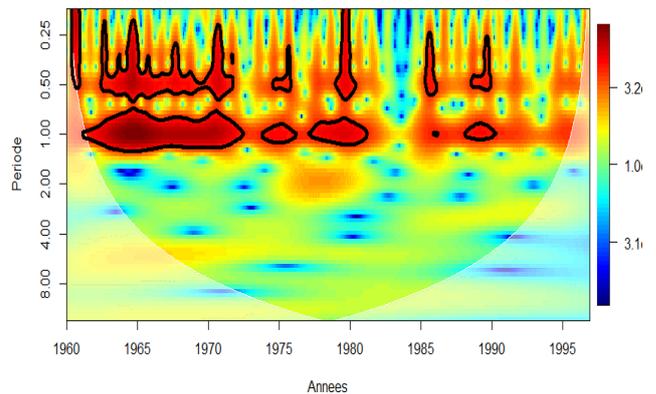


Figure 3. Analyse en ondelettes continues du débit à la station de Tortiya.

la fréquence des variances est estimée à 50.58 %, la tendance représente les mêmes réalités que celle du mode saisonnier. La somme des variabilités est donc plus représentative dans les hautes fréquences (87.58 %) que dans les basses fréquences (6.02 %). Il en ressort que la variabilité s'est ressentie au mode (1–2 ans) entre 1975 et 1980. S'agissant de la périodicité (4–8 ans), la variabilité est visible dans la décennie 1960.

4 Analyse de la cohérence en ondelettes entre les indices climatiques et la variabilité des précipitations et du débit

La compréhension de l'impact des indices climatiques (NAO et ENSO) sur la précipitation et le débit amène à faire une analyse basée sur la cohérence en ondelettes. Il s'agit d'étudier l'impact de ces indices sur la pluviométrie d'une part, et sur le débit d'autre part.

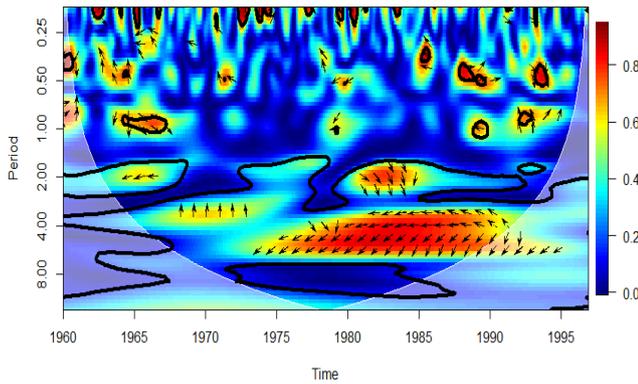


Figure 4. Cohérence en ondelettes entre l'indice ENSO et la pluviométrie à Tortiya.

4.1 Analyse de la cohérence en ondelettes entre les indices climatiques et la précipitation

4.1.1 Relations entre la pluviométrie et l'indice ENSO

Le spectre en ondelettes continues présente une cohérence entre l'indice ENSO et la pluviométrie dans les basses fréquences (Fig. 4). Cette cohérence est plus marquée au niveau des périodicités (2–4 ans et 4–8 ans). Une cohérence en quart de phase entre l'indice ENSO et la pluviométrie à Tortiya est observée à la périodicité (2–4 ans) entre 1980 et 1985. Au niveau de la fréquence (4–8 ans), une antiphasse est remarquée dès la décennie 1970 à la décennie 1990.

4.1.2 Relations entre la pluviométrie et l'indice NAO

À la station de Tortiya, la Fig. 5 présente de manière générale une forte influence de l'indice NAO sur la pluviométrie. Cet impact est perçu tant au niveau annuel (1 an) qu'au niveau pluriannuel (2–4 ans et 4–8 ans). En effet, au niveau de la bande d'énergie annuelle (1 an), une évolution paire entre la pluie et le NAO est constatée de 1960 à 1970. C'est l'effet contraire (une antiphasse) qui s'est produit de 1990 jusqu'à la fin de la série chronologique. À la fréquence (2–4 ans), cette évolution en antiphasse s'observe sur toute la périodicité. Quant à l'échelle (4–8 ans), elle souligne une forte influence du NAO sur la pluviométrie en antiphasse sur toute la série. Au-delà de la fréquence (8 ans), cette cohérence en phase est constatée sur la majorité de la série malgré un faible signal entre 1960 et 1966.

4.2 Analyse de la cohérence en ondelettes entre les indices climatiques (ENSO – NAO) et le débit à la station de Tortiya

Cette analyse consistera à mettre en relation les différents indices climatiques (ENSO et NAO) et les données de débits à la station de Tortiya.

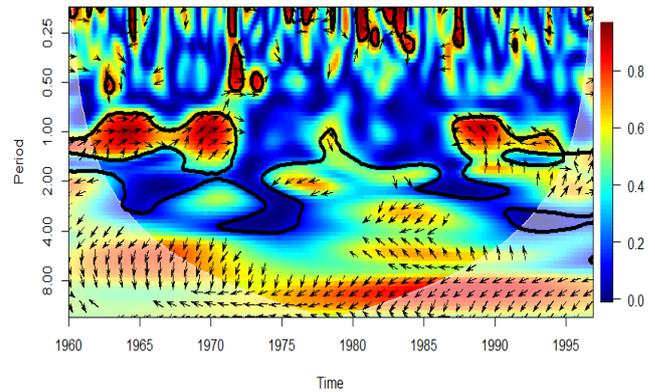


Figure 5. Cohérence en ondelettes entre l'indice NAO et la pluviométrie à Tortiya.

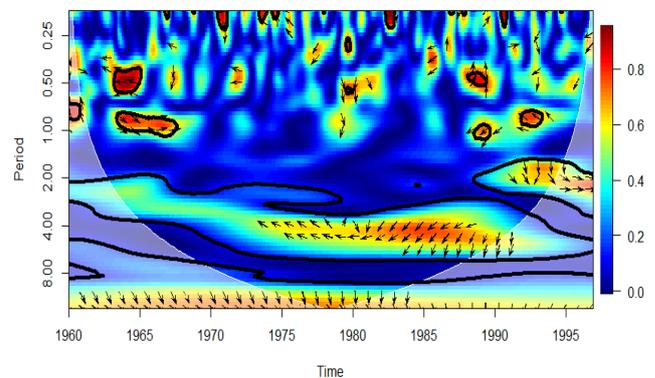


Figure 6. Cohérence en ondelettes entre l'indice ENSO et le débit à Tortiya amont.

4.2.1 Relations entre le débit et l'indice ENSO

L'impact de l'indice ENSO sur le débit est assez faible de manière générale. Dans les hautes fréquences, ce sont les spots de cohérence en antiphasse qui sont visibles dans la décennie 1960 et 1990. C'est le cycle interannuelle (2–4 ans ; >8 ans) qui présente un signal assez marqué. La fréquence du signal (2 ans) indique une cohérence en phase à la fin décennie 1990. Par contre, dans la période (2–4 ans), une cohérence en antiphasse de 1980 à 1991 est constaté. Sur la même fréquence de signal, une cohérence en quart de phase est affichée de 1974 à 1980 par le biais de la Fig. 6.

La présente étude s'est attelée à indiquer l'impact de l'indice ENSO sur le débit à la station de Tortiya. Il convient donc, dans l'analyse qui suit, de montrer l'influence du NAO sur le débit dans ladite station.

4.2.2 Relations entre le débit et l'indice NAO

L'impact de l'indice NAO sur le débit à la station de Tortiya amont est perceptible aux cycles annuels et pluriannuels. À l'échelle annuelle (1 an), une forte cohérence en phase est constatée durant la décennie 1960. S'agissant de la décennie

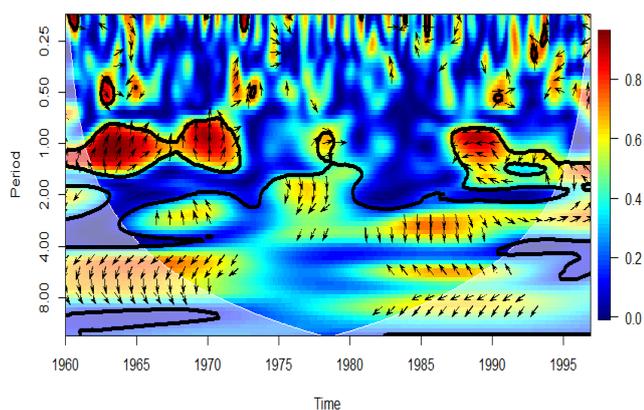


Figure 7. Cohérence en ondelettes entre l'indice NAO et le débit à Tortiya.

1970, c'est plutôt une cohérence en quart de phase qui s'observe. Cette situation s'explique par les modifications des conditions climatiques qui annoncent la grande sécheresse. Toutefois, à la fin de la série, celle de la décennie 1990, le constat montre une opposition entre les données, plus marquée de 1988 à 1991. La perte de signal enregistrée se situe entre 1972 et 1988. Quant à l'échelle pluriannuelle (2–4 ans et 4–8 ans), une évolution en quart de phase se fait remarquer dans ces deux échelles. À la fréquence (2–4 ans), la cohérence en phase se situe entre 1965 et 1970 avant la grande sécheresse. À partir de 1975, une évolution en quart de phase est indiquée jusqu'en 1990. Partant de cette date, une opposition de phase est visible durant la décennie 1990. Enfin, à l'échelle (4–8 ans), une cohérence en antiphase assez prononcée est observée de 1960 à 1970. Après une perte de signal de 1970 à 1983, c'est une antiphase qui continue de 1984 à 1993 comme le démontre la Fig. 7.

5 Discussions et conclusion

L'usage de l'analyse spectrale dans cette étude a permis de montrer les différents modes de variabilités dans les données hydroclimatiques du bassin versant de Tortiya. D'une part, à partir de l'analyse en ondelettes continues, Cette étude souligne que les modes de variabilités situés dans les hautes fréquences indiquent un plus fort taux de signal que ceux des basses fréquences. Il s'agit du cycle saisonnier (6 mois) et du cycle annuel (1 an). À cette périodicité, la variance du signal peut atteindre plus de 90 % au détriment de celle des basses fréquences estimée à environ 10 %. À ce titre, les résultats de l'étude de Tra Bi et al. (2021) abondent dans le même sens. Ils confirment que la variabilité hydrologique à Fêtékro, dans les hautes fréquences, enregistre toute la variance du signal. À ce niveau, le signal est estimé à 93.73 %. S'agissant de l'analyse de la cohérence en ondelettes, cette analyse indique une influence assez marquée par les indices ENSO et NAO sur les données pluviométriques et hydromé-

triques. Cet impact se voit tant dans la périodicité (1 an) qu'à l'échelle située à partir de 2 ans. S'inscrivant dans le même sens, Zamrane et al. (2021) observent que l'indice NAO a une influence sur la précipitation et le ruissellement dans le bassin du Moulouya et Tensift. Selon eux, la contribution au débit varie entre 61 % et 74 %. Les précipitations, pour leur part, peuvent être estimées à 70 %. Quant à l'étude de Bogning et al. (2021) dans le bassin du fleuve Ogooué (ORB), les résultats ont montré le lien entre la variabilité pluviométrique et l'indice ENSO. L'analyse de la cohérence en ondelettes des deux séries temporelles confirme qu'il existe des liens significatifs entre l'indice ENSO et les précipitations dans l'ORB. Ils insinuent que ce lien est visible autour de la fréquence (6 mois) et (1 an). En somme, cette étude indique une forte influence de l'indice NAO sur les données de pluie et de débits à la station de Tortiya.

Disponibilité du code. The software used to analyse and process the data is free (R). It can be downloaded from the CRAN website at <https://cran.rproject.org/bin/windows/base/> (R Core Team, 2021). The ArcGis software was used in the continental and coastal morphodynamics laboratory (M2C) at the University of Rouen Normandy.

Disponibilité des données. The various links proposed above in the methodology of this work give access to the sites from which the data were downloaded. These are the climate index data and satellite images. Flow data was provided by the hydrology department and rainfall data was made possible by SODEXAM in Côte d'Ivoire.

Collaborateurs. La conception de ce travail vient de MAA. La collecte, le traitement et l'analyse des données ont été effectués par MAA. Le projet a été relu et corrigé par GM. L'apport de l'analyse spectrale vient de GM, BL et ZN. L'analyse des données collectées et la lecture du document ont été faites par IBD, AZTB et NR.

Intérêts concurrents. The contact author has declared that none of the authors has any competing interests.

Clause de non-responsabilité. Publisher's note : Copernicus Publications remains neutral with regard to jurisdictional claims made in the text, published maps, institutional affiliations, or any other geographical representation in this paper. While Copernicus Publications makes every effort to include appropriate place names, the final responsibility lies with the authors.

Déclaration du numéro spécial. This article is part of the special issue "IAHS2022 – Hydrological sciences in the Anthropocene : Variability and change across space, time, extremes, and interfaces". It is a result of the XIth Scientific Assembly of the Inter-

national Association of Hydrological Sciences (IAHS 2022), Montpellier, France, 29 May–3 June 2022.

Remerciements. The authors would like to thank the various laboratories (M2C; IDEES; Laboraddys; Hydrosiences Montpellier), the Hydrology Directorate and the Cooperation and Cultural Action Department of the French Embassy in Côte d’Ivoire for their support.

Financement. This research has been supported by the French Embassy’s Department of Cooperation and Cultural Action.

Contrôle par les pairs. This paper was edited by Christophe Cudennec and reviewed by Abdoulaye Faty and Mohammad Merheb.

Références

- Anzoumanan, K., Koffi, Y. B., Kouassi, A. M., Kouakou, B. D., and Seydou, D. : Impact des Évolutions Climatiques sur les Ressources en eau des Petits Bassins en Afrique Sub-Saharienne : Application au Bassin Versant du Bandama à Tortiya (Nord Côte d’Ivoire), *ESJ*, 15, <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n9p84>, 2019.
- Benoit, L., Zeineddine, N., Imen, T., Hiba, J., Habib, A., and Ellouz, M. : North Atlantic Oscillation and Rainfall Variability on the Southern Coast of the Mediterranean 203–210, <https://www.proquest.com/docview/1611002688> (la date du dernier accès : July 2023), 2014.
- Bogning, S., Frappart, F., Mahé, G., Paris, A., Onguene, R., Blarel, F., Niño, F., Etame, J., et Braun, J.-J. : Investigating links between rainfall variations in the Ogooué River basin and ENSO in the Pacific Ocean over the period 1940–1999, *Proc. IAHS*, 384, 181–186, <https://doi.org/10.5194/piahs-384-181-2021>, 2021.
- Dieppois, B., Durand, A., Fournier, M., Massei, N., Sebag, D., et Bouba, H. : Variabilité des précipitations au sahel Central et Recherche du forçage climatique par analyse du signal : la station de Maïne-Soroa (SE Niger) entre 1950 et 2005. *PANGEA, Géosciences et Développement*, 47/48, juin/décembre 2010.
- Khedimallah, A., Meddi, M., et Mahé, G. : Characterization of the interannual variability of precipitation and runoff in the Cheliff and Medjerda basins (Algeria), *J. Earth Syst. Sci.*, 129, 134, <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01385-1>, 2020.
- Laignel, B., Nouaceur, Z., Turki, Imen., Jemai, H., Habib, A., et Ellouz, M. : North atlantic oscillation and rainfall variability on the southern coast of the Mediterranean, in : Conference : Air and water components of the environment, January, <https://www.proquest.com/docview/1611002688> (la date du dernier accès : July 2023), 2014.
- Nouaceur, Z. : La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l’Ouest sahélienne, *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 15, 89–109, <https://doi.org/10.4000/physio-geo.10966>, 2020.
- R Core Team : R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org/> (la date du dernier accès : January 2022), 2021.
- Soro, T. D., Kouakou, B. D., Kouassi, E. A., Soro, G., Kouassi, A. M., Kouadio, K. E., Yéi, M.-S. O., et Soro, N. : Hydroclimatologie et dynamique de l’occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d’Ivoire), *VertigO – la revue électronique en sciences de l’environnement*, 13, 3, <https://doi.org/10.4000/vertigo.14468>, 2013.
- Tra Bi, Z. A., M’Baye, K. A. C., et Amalaman, M. A. : Variabilité hydrologique du bassin versant du N’zi dans la région du Gbêkê (centre de la Côte d’Ivoire), *Actes de colloque international de Géographie*, 10–12 Juin 2021, in *Géovision, Hors – série no. 2*, Décembre 2021.
- Zamrane, Z., Mahé, G., et Laftouhi, N. E. : Wavelet Analysis of Rainfall and Runoff Multidecadal Time Series on Large River Basins in Western North Africa, *Water*, 13, 3243, <https://doi.org/10.3390/w13223243>, 2021.