



HAL
open science

Élasticité des débits aux précipitations en Afrique sub-saharienne

Pierre-Yves Bourgin, Vazken Andréassian, Marine Riffard-Chenet

► **To cite this version:**

Pierre-Yves Bourgin, Vazken Andréassian, Marine Riffard-Chenet. Élasticité des débits aux précipitations en Afrique sub-saharienne. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2020, 106 (6), pp.97-104. 10.1051/lhb/2021005 . hal-03266292

HAL Id: hal-03266292

<https://hal.inrae.fr/hal-03266292>

Submitted on 21 Jun 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Élasticité des débits aux précipitations en Afrique sub-saharienne

Pierre-Yves Bourgin^{1,2,*}, Vazken Andreassian³ et Marine Riffard-Chenet¹

¹ Tractebel, 5 rue du 19 mars 1962, 92622 Gennevilliers Cedex, France

² Artelia, 6 avenue de Lorraine, 38130 Echirolles, France

³ INRAE, Unité de Recherche HYCAR, Antony, France

Reçu le 6 juillet 2020 / Accepté le 5 janvier 2021

Résumé – L'estimation de l'élasticité des débits aux précipitations est présentée pour un ensemble d'une cinquantaine de bassins versants situés en Afrique sub-saharienne. L'élasticité des débits aux précipitations est définie ici comme le changement proportionnel de l'écoulement moyen annuel divisé par le changement proportionnel de la précipitation moyenne annuelle. Elle décrit donc la sensibilité des débits à des changements de précipitations et s'avère un outil utile pour évaluer de manière simple, mais non simpliste, l'impact du changement climatique dans des projets relatifs à l'utilisation des ressources en eau. L'élasticité des débits aux précipitations est évaluée ici de manière empirique grâce à des estimateurs non-paramétriques et des séries historiques de débit observé et de précipitation. Les résultats indiquent que l'élasticité des débits aux précipitations est de l'ordre de 1 à 3 sur les bassins versants étudiés. Les anomalies des précipitations sont donc amplifiées au niveau des écoulements avec un facteur de 1 à 3. L'élasticité des débits aux précipitations diminue lorsqu'augmentent l'écoulement moyen interannuel et le coefficient de ruissellement. En revanche, il ne semble pas exister de relation directe entre élasticité des débits et superficie de bassin versant. La cartographie des résultats ne révèle pas non plus de facteurs physiques pouvant expliquer la variabilité des valeurs d'élasticité. De même le type de climat ne semble pas un facteur explicatif de premier ordre.

Mots clés : Élasticité / précipitations / débits / sensibilité / anomalies / Afrique sub-saharienne

Abstract – Rainfall elasticity of streamflow in sub-Saharan Africa. The rainfall elasticity of streamflow is estimated for about 50 catchments in sub-Saharan Africa. The rainfall elasticity of streamflow is defined as the proportional change in mean annual streamflow divided by the proportional change in mean annual rainfall. It is a measure of the sensitivity of streamflow to rainfall and has been found to be a simple tool able to provide robust estimates of the impact of climate change on water resources and support policy and planning decisions. In this paper, the rainfall elasticity of streamflow is estimated by non-parametric estimators and an empirical approach: the estimators are calculated directly from concurrent historical records of catchment precipitation and streamflow data. The results indicate that the rainfall elasticity of streamflow generally range from 1 to 3 over the catchments under study. This means that the change in rainfall is amplified in streamflow with a factor from 1 to 3. There is a strong inverse relationship between the rainfall elasticity of streamflow and the mean annual runoff or the runoff coefficient. It was not possible to identify any relationship between rainfall elasticity of streamflow and catchment area. From the mapping of the results, it was found difficult to identify physical reasons for the spatial variations in elasticity values. The climate classification seems to be a second-hand factor for variations in elasticity values.

Keywords: Elasticity / precipitation / runoff / sensitivity / change / sub-Saharan Africa

1 Introduction

La variabilité des pluies et des débits en Afrique sub-saharienne continue de faire l'objet d'un nombre très

significatif de travaux de recherches. La longue période de sécheresse des années 1970 à 1990 en Afrique de l'Ouest et Centrale a mis en lumière la sensibilité de l'écoulement aux déficits pluviométriques cumulés et la vulnérabilité des populations aux aléas climatiques. Mahé (2006) distingue trois conséquences majeures et durables de cette période de sécheresse : (i) la modification des régimes saisonniers de

*Auteur correspondant :

pierre-yves.bourgin@arteliagroup.com

l'écoulement en surface pour la région équatoriale, (ii) l'abaissement du niveau d'eau des nappes pour les régions tropicales humides, et (iii) la dégradation de la couverture végétale pour les régions sahéliennes (désertification).

Les modifications observées dans les conditions d'écoulement pourraient être encore exacerbées par les changements climatiques et l'influence anthropique (construction de nouveaux barrages-réservoir, utilisation des sols). Dans un contexte d'incertitude exacerbée par les conséquences du changement climatique, la planification et la gestion des ressources en eau en climat futur doivent pouvoir s'appuyer sur des outils simples et robustes. La notion d'élasticité des débits est l'un de ces outils. Elle permet de décrire de manière simple la sensibilité des débits aux changements des forçages climatiques qui contrôlent les écoulements.

Un exemple d'application de la notion d'élasticité des débits est donné par l'étude *Understanding the Impacts of Climate Change on Hydropower – the Case of Cameroon*, préparée par Johan Grijzen en 2014 pour le compte de la Banque Mondiale et d'*Electricity Development Corporation* (EDC) (Grijzen, 2014). La notion d'élasticité des débits aux précipitations est par ailleurs citée comme un outil d'analyse quantitative des effets du changement climatique sur les écoulements et donc in fine sur les performances d'un aménagement hydroélectrique dans le *Climate Resilience Guide* produit par l'Association Internationale de l'Hydroélectricité en 2019 (IHA, 2019).

La plupart des travaux portant sur l'élasticité des débits sont « théoriques » dans le sens où ils sont basés sur des débits simulés grâce à des modèles hydrologiques forcés par des données climatiques différentes, typiquement des données climatiques représentatives du temps présent d'une part, et du temps futur d'autre part. Il existe de nombreux exemples de ces études parmi lesquelles Sankarasubramaniam *et al.* (2001) qui ont utilisé le modèle abcd, Chiew (2006) avec les modèles SIMHYD et AWBM, ainsi que celles utilisant comme modèle hydrologique la formule du bilan de Turc-Mezentsev (par exemple Potter et Zhang (2009)).

Dans cet article, une approche alternative est développée, dans laquelle l'élasticité des débits aux précipitations est calculée de manière empirique grâce à des estimateurs non-paramétriques et des séries historiques concomitantes de pluies spatiales et de débits observés. L'élasticité est définie ici comme le changement proportionnel de l'écoulement moyen annuel divisé par le changement proportionnel de la précipitation moyenne annuelle. Une élasticité égale à 2 signifie donc qu'un changement de précipitation de 1 % a pour effet un changement de débit de 2 %. L'étude porte sur une cinquantaine de bassins versants situés en Afrique sub-saharienne.

L'article présente d'abord les estimateurs non-paramétriques, puis donne une description des bassins versants et des données hydro-climatiques utilisées. Enfin, l'article présente les résultats et tente d'établir une relation entre l'élasticité des débits aux précipitations et les caractéristiques climatiques et physiques des bassins versants.

2 Estimateurs de l'élasticité des débits

Deux estimateurs non-paramétriques différents \mathcal{E}_{p1} et \mathcal{E}_{p2} sont utilisés pour évaluer l'élasticité des débits aux précipitations.

\mathcal{E}_{p1} est pris égal à la pente de la droite de régression linéaire de l'ensemble des anomalies relatives du débit moyen annuel de l'année n en fonction de l'anomalie relative de la précipitation annuelle. Le coefficient de détermination de la régression linéaire (R^2) permet d'évaluer la robustesse de la régression linéaire. Une illustration graphique du calcul du terme \mathcal{E}_{p1} est présentée à la figure 1. Le nuage de points est formé par l'ensemble des n paires des anomalies relatives du débit moyen annuel $\left(\frac{Q_n - \bar{Q}}{\bar{Q}}\right)$ et de la pluviométrie annuelle $\left(\frac{P_n - \bar{P}}{\bar{P}}\right)$ où \bar{P} et \bar{Q} sont respectivement la pluviométrie moyenne interannuelle et le débit moyen interannuel calculés sur l'ensemble de la période concomitante des données de pluies et de débits observés.

\mathcal{E}_{p2} est l'estimateur proposé initialement par Sankarasubramaniam *et al.* (2001) :

$$\varepsilon_{p2} = \text{médiane} \left(\frac{Q_n - \bar{Q} \bar{P}}{P_n - \bar{P} \bar{Q}} \right). \quad (1)$$

L'estimation de \mathcal{E}_{p2} pour chaque bassin versant implique le calcul de l'ensemble des n rapports des anomalies relatives $\left(\frac{Q_n - \bar{Q} \bar{P}}{P_n - \bar{P} \bar{Q}}\right)$ de pluviométrie annuelle (P_n) et débit moyen annuel (Q_n) de l'année n . L'estimateur \mathcal{E}_{p2} est alors pris égal à la médiane de ces valeurs.

3 Données

La figure 2 présente l'ensemble des bassins versants étudiés. Ils appartiennent aux ensembles géographiques de l'Afrique de l'Ouest, l'Afrique Centrale et l'Afrique de l'Est.

Les données de pluie proviennent de la version v.4.02 de la base de données du *Climate Research Unit* (CRU) de l'Université d'East Anglia à Norwich (Harris *et al.*, 2014). Il s'agit des grilles de pluies mensuelles à la résolution d'un demi-degré carré pour la période 1951–2016. Leurs principales sources de données sont les agences météorologiques nationales, le *National Climatic Data Center* (NCDC), l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) et d'autres sources publiées. Les grilles de pluie ont été obtenues par interpolation selon la longitude et la latitude (fonction Spline) des données aux stations pluviométriques retenues pour la qualité et la longueur des séries d'observation. Les séries mensuelles complètes 1951–2016 des pluies spatiales des bassins versants sont déduites par intersection du tracé du bassin versant avec la grille des données du CRU. Le tracé des bassins versants est obtenu par analyse spatiale du produit de topographie globale ALOS Global Digital Surface Model *ALOS World 3D – 30 m* produit par l'agence spatiale japonaise (JAXA).

À des fins de comparaison, l'estimation de l'élasticité des bassins versants est aussi réalisée en utilisant comme données pluviométriques une version corrigée du produit de réanalyse climatique ERA-Interim (Lebecherel *et al.*, 2019). Le produit ERA-Interim produit par le Centre Européen de la Météorologie (ECMWF) fournit une description numérique du climat

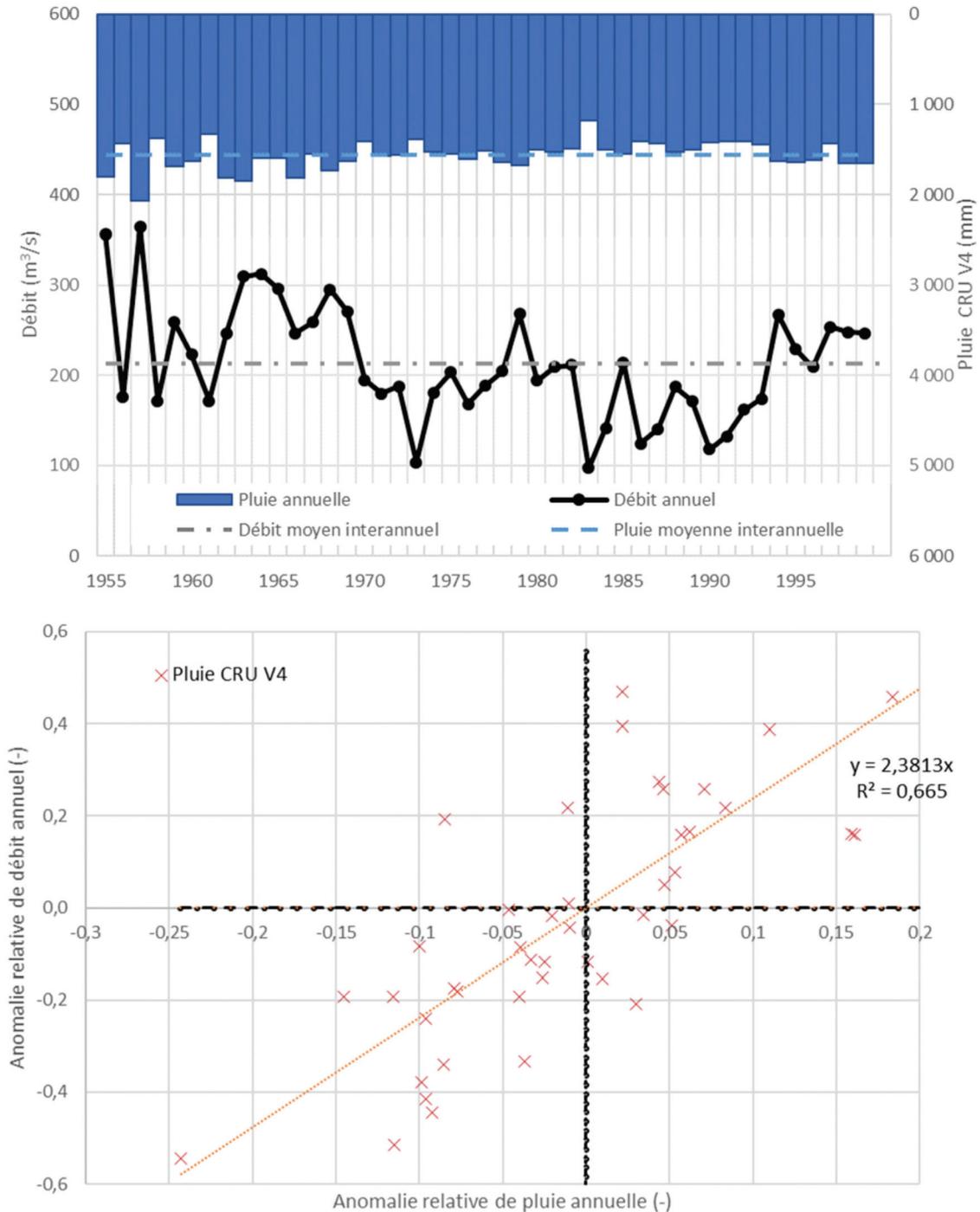


Fig. 1. Calcul de l'élasticité des débits ϵ_{p1} . Illustration du calcul de l'estimateur de l'élasticité des débits ϵ_{p1} pour la station hydrométrique du Sassandra à Sémien (29 760 km²) en Côte d'Ivoire. Le graphique du haut présente les séries des pluies annuelles et des débits annuels calculées sur la période de disponibilité commune (1954–1999). La pluie moyenne interannuelle et le débit moyen interannuel, respectivement \bar{P} et \bar{Q} , calculés sur cette période, sont également représentés. Le graphique du bas illustre la dépendance de l'anomalie relative du débit moyen annuel par rapport à l'anomalie relative de pluviométrie annuelle. ϵ_{p1} est pris égal à la pente de la droite de régression linéaire du nuage de points. Ici, ϵ_{p1} est obtenu sur la base de 45 années complètes et vaut 2,38.

récent grâce à une modélisation climatique intégrant une procédure d'assimilation de données d'observations satellitaires. Aucune mesure au sol de la pluie n'est utilisée pour contraindre le modèle climatique. La version corrigée

proposée par [Lebecherel et al. \(2019\)](#) vise donc à améliorer la justesse du produit ERA-Interim grâce à la valorisation d'un ensemble de données pluviométriques historiques d'observation au sol.

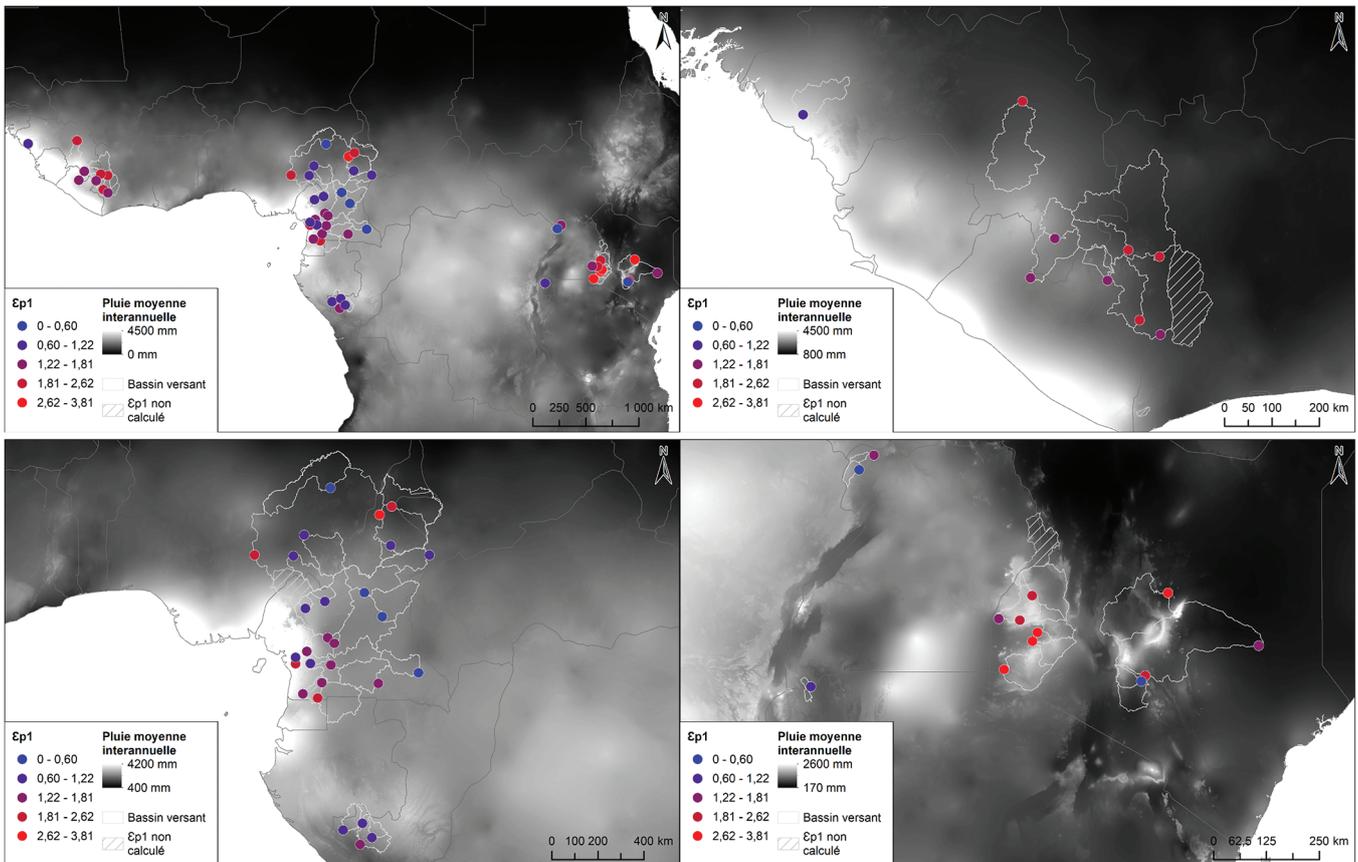


Fig. 2. Analyse régionale de l'élasticité des débits aux précipitations. Chaque cercle représente l'exutoire d'un bassin versant, la couleur représente la valeur de l'estimateur E_{p1} . La figure en haut en gauche illustre l'ensemble des bassins étudiés tandis que les autres figures présentent des détails régionaux : Afrique de l'Ouest, Centrale et de l'Est.

La résolution spatiale de la version corrigée est de $0,25^\circ$ et la période de disponibilité des données est 1979–2016.

Les données de débit observé proviennent de la base de données compilée par Tractebel au fur et à mesure de la réalisation d'études hydrologiques dans le cadre de ses activités d'ingénierie-conseil. Elles sont collectées directement auprès des services hydrologiques nationaux ou par l'intermédiaire des portails de données hydrologiques comme le Global Runoff Data Centre (GRDC). Une vérification de la qualité des données est réalisée par la visualisation systématique et concomitante des chroniques de débits et de précipitations. Les données manifestement erronées, comme les données issues d'un calcul d'interpolation linéaire, sont éliminées. Pour certaines stations, plusieurs années d'observation ont été écartées suite au constat d'une non-homogénéité des débits sur la période (probablement détarage de la station). Cette procédure de contrôle qualité n'a cependant pas vocation à se substituer au travail rigoureux du producteur de la donnée et les incertitudes de mesure des débits observés peuvent être importantes sur certains bassins. Les données disponibles au pas de temps journalier ont été agrégées au pas de temps mensuel lorsqu'au moins 20 données journalières étaient disponibles. Ce critère a pu être assoupli certaines années pour les mois de saison sèche afin de tirer un meilleur parti des séries de données observées. Puis, le débit moyen annuel de l'année n

a été calculé pour chaque année complète (12 mois). Les périodes d'observation varient d'une station à l'autre. Les plus anciennes observations existent depuis 1951 et les plus récentes jusqu'en 2018.

Quatre des 55 bassins versants étudiés présentent une disponibilité concomitante des pluies et des débits inférieure à 5 ans et sont exclus de l'analyse. Les bassins retenus disposent d'une période d'analyse comprise entre 5 et 49 ans, ont une superficie comprise entre 432 et 304 150 km² et couvrent une diversité assez représentative des contextes hydro-climatiques rencontrés en Afrique sub-saharienne.

4 Résultats et discussion

Les principales caractéristiques des bassins versants étudiés et les résultats obtenus sont présentés dans le [tableau 1](#) et représentés à la [figure 2](#).

Un seul bassin versant présente des valeurs aberrantes pour les estimateurs E_{p1} et E_{p2} c'est-à-dire des valeurs négatives : La Lobo à Loboville, un affluent en rive gauche du fleuve Sassandra en Côte d'Ivoire et soumis à un régime équatorial de transition atténué. Ce bassin avait révélé des difficultés importantes de modélisation hydrologique lors d'un exercice précédent (Bourgin, 2019), attribuées à la qualité des données hydrométriques et la difficulté du modèle utilisé (GR2M)

Tableau 1. Caractéristiques principales des bassins versants étudiés. Superficie du bassin versant, pluie moyenne interannuelle \bar{P} , débit moyen interannuel \bar{Q} , coefficient de ruissellement $\left(\frac{\bar{Q}}{\bar{P}}\right)$, nombre d'années de concomitance des données de pluie et de débits, estimateurs de l'élasticité ϵ_{p1} et ϵ_{p2} et coefficient de détermination R^2 .

ID	Bassin	Aire (km ²)	\bar{P} (CRU)(mm/an)	\bar{Q} (mm/an)	\bar{Q}/\bar{P} (-)(%)	Années	ϵ_{p1}	R^2	ϵ_{p2}
1	Apports Naturels Reconstitués Sanaga@Edea	131 500	1646	417	25	41	0,75	0,17	0,93
2	Apports@Bamendjin	2190	1937	747	39	39	0,85	0,24	1,28
3	Apports@Barrage Buyo	46 250	1568	231	15	33	1,40	0,34	2,72
4	Apports@LaMape	3760	1736	794	46	39	0,74	0,13	1,20
5	Apports@LomPangar	19 800	1484	391	26	41	0,08	0,00	0,49
6	Apports@Mbakaou	20 381	1501	544	36	39	0,47	0,11	0,86
7	Athi River@Munyu	5675	886	123	14	40	2,57	0,71	3,11
8	Bafing@Bafingdala	6195	1746	315	18	39	1,92	0,36	3,32
9	Bénoué@Buffle Noir	3220	1371	439	32	15	0,67	0,11	0,98
10	Bénoué@Garoua aval Lagdo	60 500	1049	161	15	27	3,16	0,66	2,89
11	Bénoué@Makurdi	304 150	1232	350	28	24	1,94	0,57	1,96
12	Boumba@Bewala	10 335	1549	325	21	26	0,60	0,07	1,10
13	Cavally@Flampleu	2496	1803	466	26	32	1,55	0,45	1,92
14	Diani@BacDiani	4023	2013	784	39	33	1,38	0,12	2,42
15	Dja@Bi	19 500	1590	347	22	18	1,70	0,31	1,86
16	Donga@Donga Town	11 480	1762	1238	70	5	1,18	0,89	1,11
17	EwasoNgiroRiver@Archers Post	15 341	1084	41	4	42	2,82	0,48	2,45
18	Fatala@Bindan	5156	1949	897	46	15	0,79	0,52	0,77
19	GongolaRiver@DadinKowa	32 150	897	101	11	26	0,27	0,02	-0,15
20	GuchaMigoriRiver@WathOnger	6544	1479	258	17	19	3,10	0,63	2,62
21	KatsinaAla@Katsina Ala Town	16 796	1993	1346	68	4			
22	Lekana@Mpoukou	3910	1641	734	45	11	0,93	0,62	1,88
23	Lobo@Loboville	12 693	1455	92	6	9	-1,17	0,14	-2,97
24	Louessé@Biyamba	1950	1820	971	53	24	1,16	0,78	1,15
25	Louessé@Makabana	15 630	1653	629	38	13	1,38	0,89	1,54
26	Mayo Kebi@Cossi	25 000	935	128	14	22	2,33	0,47	2,78
27	Mbam@Bac de Goura	42 300	1878	516	27	25	1,75	0,64	1,37
28	Nairobi River@3BA32	1900	1101	214	19	23	0,12	0,00	0,19
29	Ndjoo@Abem	923	2002	737	37	1			
30	Niandan@Baro	12 770	1934	634	33	27	1,93	0,60	1,77
31	Ntem@Bac de Ngoazik	18 500	1713	429	25	35	2,28	0,62	2,51
32	Ntem@Nyabessan	26 350	1760	466	26	44	1,31	0,38	1,85
33	NyandoRiver@Ahero bridge	2695	1499	180	12	22	2,87	0,72	2,60
34	Nyanga@Donguila	6650	1745	1039	60	21	1,18	0,90	1,00
35	Nyong@Dehane	26 400	1841	507	28	25	2,16	0,74	2,21
36	Nyong@Eseka	21 600	1720	378	22	49	0,96	0,21	1,36
37	Nyong@Mbalmayo	13 555	1634	334	20	45	1,27	0,31	1,27
38	Nzo@Guiglo	6983	1730	327	19	20	2,62	0,71	3,08
39	NzoiaRiver@Ruambwa Ferry	12 650	1318	311	24	18	1,42	0,20	3,32
40	NzoiaRiver@Webuye	8330	1250	167	13	41	2,23	0,50	2,42
41	Saint Paul River@Walker Bridge	9485	2145	854	40	20	1,59	0,51	1,47
42	Sanaga@Nachtigal	77093	1601	431	27	28	1,31	0,31	1,13
43	Sanaga@Songmbengue	129 500	1690	474	2	18	1,54	0,54	0,96
44	Sassandra@Sémien	29 757	1564	225	14	43	2,44	0,66	2,52
45	Seng@Sassosseng	432	1888	550	29	19	1,34	0,32	1,95
46	SonduMiri River@1JG04	3425	1516	533	35	10	3,81	0,79	2,80
47	SuamRiver@Turkwel Gorge Dam	5900	924	77	8	1			

Tableau 1. (suite).

ID	Bassin	Aire (km ²)	\bar{P} (CRU)(mm/an)	\bar{Q} (mm/an)	\bar{Q}/\bar{P} (-)(%)	Années	ϵ_{p1}	R ²	ϵ_{p2}
48	Tabou@Olodio	303	1839	841	46	3			
49	Tana River@Garissa	32 550	953	174	18	25	1,67	0,77	1,48
50	Taraba@Gassol	21 477	1401	481	34	6	1,17	0,44	1,10
51	Vina du Nord@Touboro	12 200	1415	375	26	7	1,19	0,84	1,00
52	Yala River@Kaptis	2288	1622	383	24	39	2,00	0,51	2,33
53	Nyakizumba river@Maziba	721	1106	211	19	37	1,22	0,20	2,06
54	Kochi River@87205	840	1209	204	17	16	1,81	0,13	3,47
55	Anyau River@87206	749	1343	222	17	34	0,11	0,03	0,08

à reproduire les débits des bassins dont le régime hydrologique présente deux maxima annuels (régime bi-modal). Par ailleurs, les 5 bassins présentant les valeurs d'élasticité (ϵ_{p1}) les plus faibles sont aussi ceux dont la régression linéaire n'est pas significative (coefficient R² inférieur à 0,03). L'analyse individuelle des données hydro-climatiques de ces bassins révèle des incohérences manifestes et répétées entre pluviométrie et débits observés, ce qui permet de douter de la qualité des données de ces bassins.

Calculés sur le reste de l'ensemble des bassins, les quantiles 10 %, 50 % et 90 % de l'estimateur ϵ_{p1} sont respectivement 0,77, 1,48 et 2,72 et 0,99, 1,87 et 2,98 pour l'estimateur ϵ_{p2} .

Il existe une relation assez bien établie (R² = 0,63) entre les estimateurs ϵ_{p1} et ϵ_{p2} (Fig. 3).

La figure 3 permet d'illustrer une relation bien établie entre l'élasticité des débits aux précipitations et l'écoulement moyen interannuel. L'élasticité tend à décroître avec l'écoulement moyen interannuel, passant de valeurs comprises entre 2 et 3,5 pour un écoulement inférieur à 200 mm/an, à des valeurs proches de 1 pour les bassins dont l'écoulement dépasse 900 mm/an. Une relation explicite de décroissance entre l'élasticité et le coefficient de ruissellement peut également être observée sur la figure 3. Les valeurs d'élasticité les plus élevées sont en majorité associées aux coefficients de ruissellement les plus faibles, inférieurs à 20 %.

La relation entre l'élasticité des débits aux précipitations et la pluviométrie moyenne interannuelle est moins explicite. Ceci pouvait être attendu car entre l'élasticité des débits aux précipitations et la pluviométrie moyenne annuelle, il y a toute la complexité de la fonction de transfert pluie-débit, et sa grande variabilité d'un bassin versant à l'autre.

L'analyse cartographique des résultats ne permet pas d'identifier formellement des facteurs physiques qui expliqueraient la variabilité spatiale des valeurs d'élasticité. On peut néanmoins faire un certain nombre d'observations. L'Afrique de l'Ouest dessine un ensemble assez cohérent avec des élasticités comprises entre 1,5 et 2,5. Les plus fortes valeurs sont observées pour les bassins du Haut-Sassandra (Bafingdala et Sémien) et de son affluent (Nzo). Les plus faibles valeurs sont observées pour les bassins du Niandan, du haut-bassin du fleuve Saint-Paul et du haut-bassin du fleuve Cavally, situés à l'ouest des bassins précédemment cités, donc en moyenne un

peu plus arrosés. Enfin, l'exception du fleuve Fatala (0,79) s'explique facilement par la pluviométrie plus forte de la bande côtière (et sans doute sous-estimée par les données CRU).

Ces résultats sont assez bien alignés avec des résultats antérieurs sur le bassin du Sassandra en Côte d'Ivoire. Ainsi, Bourgin (2019) rapporte qu'entre les périodes 1951–1969 et 1970–1999, le déficit d'écoulement est plus élevé que le déficit pluviométrique. Alors que les déficits de pluie sont de l'ordre de 10 %, les déficits d'écoulement sont respectivement de 30 %, 34 % et 42 % à Bafingdala, Sémien et Soubré.

Les bassins du sud-ouest de la République du Congo (Louessé, Nyanga) forment un ensemble homogène avec des élasticités plutôt faibles, de l'ordre de 1 à 1,5. Ils présentent des conditions favorables aux écoulements : régime équatorial de transition austral, couverture forestière et pluviométrie annuelle (P) supérieure à 1 600 mm. Les autres bassins d'Afrique Centrale autour du golfe de Guinée couvrent une large diversité de climats et de caractéristiques physiques, depuis les bassins du sud Cameroun couverts de forêt tropicale humide (Nyong, Ntem, Boumba, Dja) aux bassins des affluents septentrionaux de la Bénoué (Gongola, Mayo Kébi) soumis à des conditions soudano-sahéliennes (P < 1000 mm, prédominance de la savane). Les variations spatiales de l'élasticité des débits aux précipitations sont marquées, comprises entre 0,5 et 3,2. Aucune cohérence spatiale n'apparaît, si ce n'est que les bassins les plus arides (Mayo Kébi et Bénoué à Garoua) présentent les valeurs d'élasticité les plus élevées (respectivement 2,33 et 3,16).

À condition d'exclure ceux dont la régression linéaire entre les anomalies de pluie et de débit n'est pas établie, les bassins de l'Afrique de l'Est forment un ensemble assez homogène en termes d'élasticité des débits et de coefficient de ruissellement, en dépit des conditions climatiques contrastées entre ceux du lac Victoria (pluviométrie de l'ordre de 1,400 mm/an assez homogène au cours de l'année) et ceux de l'océan indien soumis à un climat plus aride (P < 1000 mm/an et saisonnalité marquée). L'élasticité est comprise entre 1,7 et 3,8.

Enfin, il n'existe pas de relation explicite entre l'élasticité des débits aux précipitations et la superficie des bassins versants.

Les résultats obtenus sont conformes aux résultats présentés par Chiew *et al.* (2006) dans une étude portant

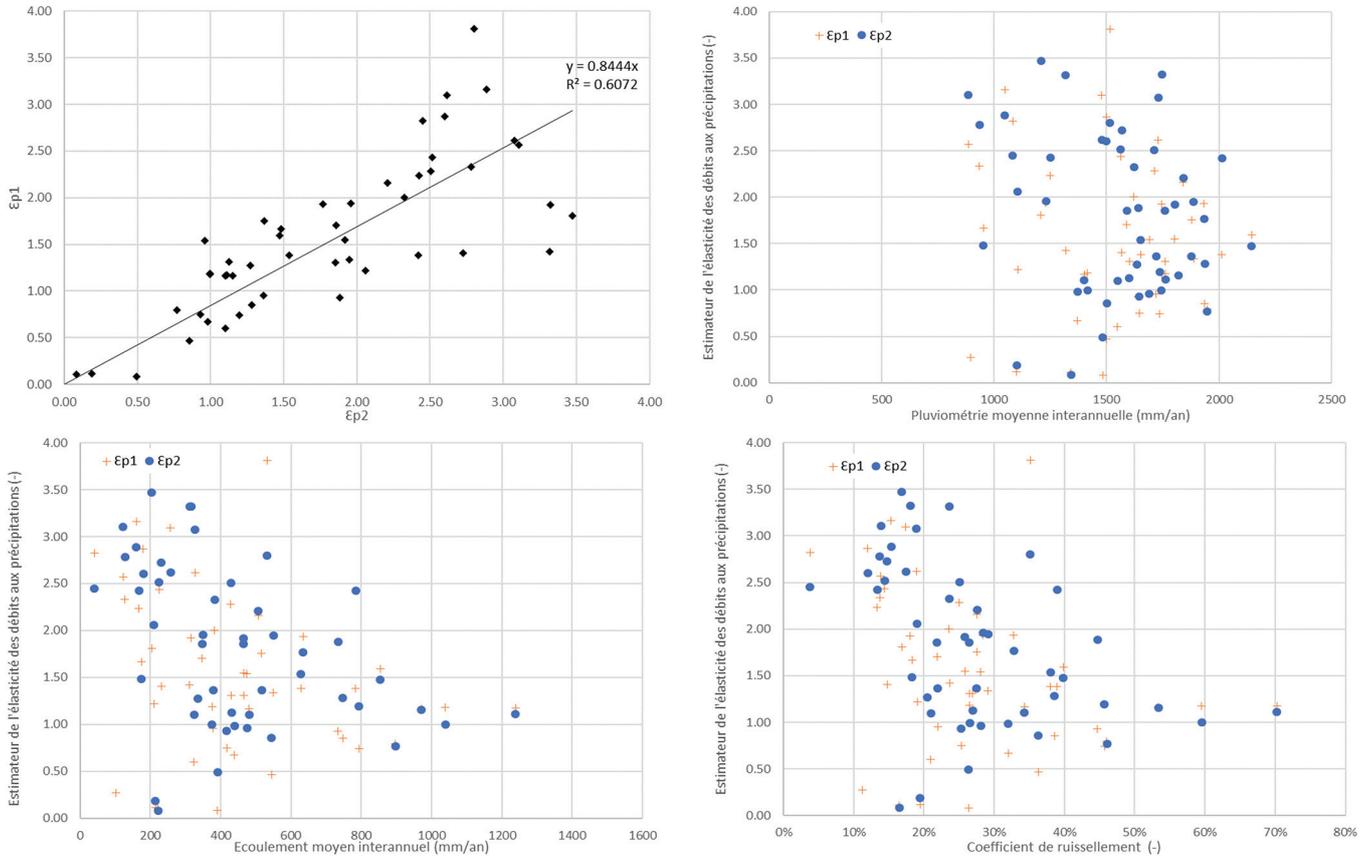


Fig. 3. Élasticité et lien de corrélation avec les paramètres hydro-climatiques. Relations entre les estimateurs ϵ_{p1} et ϵ_{p2} (graphique en haut à gauche) et relations entre les estimateurs et les caractéristiques hydro-climatiques, respectivement la pluie moyenne interannuelle, l'écoulement moyen interannuel et le coefficient de ruissellement.

sur plus de 500 bassins à travers le monde, dont certains en Afrique de l'Ouest et Centrale présentant des valeurs d'élasticité comprises entre 1,5 et 2,5 pour la plupart d'entre eux. Les auteurs avaient mis en lumière une relation de décroissance entre élasticité des débits aux précipitations et écoulement (ou coefficient de ruissellement) et attribué cette relation à la non-linéarité de la transformation pluie-débit.

À l'échelle plus locale, les résultats obtenus dans le bassin versant du fleuve Sassandra peuvent être comparés à certains travaux antérieurs. Les fortes valeurs d'élasticité des bassins du Bafing à Bafingdala et du Sassandra à Sémien, $\epsilon_{p1}=1,92$ et $\epsilon_{p2}=3,32$ et $\epsilon_{p1}=2,44$ et $\epsilon_{p2}=2,52$ respectivement, sont à rapprocher des observations des déficits d'écoulement jusqu'à trois fois plus élevés que les déficits pluviométriques entre les périodes contrastées 1951–1969 et 1970–1990 (Niel *et al.*, 2003 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; Bourgin, 2019).

L'utilisation de la pluie ERA-Interim aboutit à des conclusions similaires en matière de relations entre élasticité des débits aux précipitations et caractéristiques hydro-climatiques, mais l'établissement de ces relations est moins robuste. En effet, le nombre de bassins présentant au moins 5 années concomitantes de données de pluie et de débit est de 31 contre 41 dans le cas du produit de pluie CRU et 10 d'entre eux présentent des valeurs d'élasticité incohérentes (inférieures à 0). Enfin, les coefficients de détermination (R^2) des régressions linéaires sont en moyenne très inférieurs à ceux obtenus avec la

pluie CRU, respectivement 0,18 et 0,48. Il semble donc que les anomalies de débits sont moins bien expliquées par les anomalies de pluviométrie lorsqu'on utilise le produit ERA-Interim plutôt que le produit CRU.

5 Conclusion

L'élasticité des débits aux précipitations est déterminée de façon empirique pour une cinquantaine de bassins versants en Afrique sub-saharienne. Elle est de l'ordre de 1 à 3, ce qui signifie que les anomalies de précipitation sont amplifiées sur les débits avec un facteur de 1 à 3. Ce résultat est conforme avec les observations réalisées en Afrique de l'Ouest suite à la période de sécheresse des années 1970 à 1990. Par ailleurs, les résultats montrent que l'élasticité des débits aux précipitations diminue lorsqu'augmentent l'écoulement moyen interannuel et le coefficient de ruissellement. La poursuite des travaux pourrait s'orienter vers le choix d'un estimateur plus pertinent à l'image des travaux d'Andréassian *et al.* (2016) et l'amélioration de la base des données hydrologiques qualitativement et quantitativement. Il conviendrait par exemple d'utiliser un estimateur tenant compte à la fois des anomalies de précipitations mais aussi des anomalies de température donc d'évapotranspiration potentielle. La base de données hydrologiques a vocation à être alimentée continuellement pour

augmenter l'échantillon des bassins versants et enrichir la connaissance de l'élasticité des débits aux forçages climatiques en Afrique sub-saharienne, voir au-delà. Par ailleurs, une procédure stricte de contrôle de l'homogénéité des séries hydrométriques utilisées pourrait être introduite dans le cadre de la poursuite de ces travaux. Celle-ci pourrait reposer sur l'utilisation de la modélisation hydrologique (pluie-débit) et des données homogénéisées et globales de champs de précipitation et de température (par exemple CRU, CHIRPS, GPCC).

Même sous la forme simple déclinée dans cet article, le concept de l'élasticité des débits aux précipitations se révèle un outil efficace pour une évaluation préliminaire des impacts du changement climatique sur le régime moyen des écoulements des bassins versants d'Afrique sub-saharienne. Il peut être particulièrement adapté dans le cadre d'études globales, à forte extension spatiale, pour lesquelles les approches traditionnelles de type « top-down » faisant appel à la régionalisation et le débiaisage de résultats de modèles climatiques nécessiteraient un effort de recherche disproportionné par rapport aux objectifs et aux moyens consacrés de l'étude. Ainsi, et à titre d'exemple, il s'inscrit tout à fait dans la proposition des bonnes pratiques du Guide IHA pour la construction de la résilience climatiques des infrastructures hydroélectriques existantes et en projet.

Références

- Andréassian V, Coron L, Lerat J, Le Moine N. 2016. Climate elasticity of streamflow revisited – An elasticity index based on long-term hydrometeorological records. *Hydrol Earth Syst Sci* 20: 4503–4524.
- Ardoin-Bardin S. 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier, France.
- Bourgin PY. 2019. Modèle intégré du fonctionnement hydrologique du bassin versant du Sassandra. *La Houille Blanche* 5-6: 124–139.
- Chiew FHS. 2006. Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Hydrol Sci J* 51: 613–625.
- Chiew FHS, Peel MC, McMahon TA, Siriwardena LW. 2006. Precipitation elasticity of streamflow in catchments across the world. In: *Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference, November 2006*, Havana, Cuba, IAHS Publ. *Clim Var Change – Hydrol Impacts* 308.
- Grijsen J. 2014. Understanding the impact of climate change on hydropower: The case of Cameroon. Climate Risk Assessment for hydropower generation in Cameroon. Report No. 87913 Africa Energy Practice – The World Bank Group.
- Harris I, Jones P, Osborn D, Lister DH. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – The CRU TS3.10 Dataset. *Int J Climatol* 34: 623–642.
- International Hydropower Association. 2019. Hydropower Sector Climate Resilience Guide.
- Lebecherel L, Riffard-Chenet M, Andréassian V, Delaigue O. 2019. Using historical ground rainfall data to adjust a global rainfall reanalysis database over Africa. In: *Proceedings of the Africa 2019 Conference & Exhibition held at Windhoek, 2–4 April 2019*, Namibia.
- Mahé G. 2006. Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20^e siècle : changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. Mémoire Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Montpellier II, Montpellier, France.
- Niel H, Paturel JE, Servat E. 2003. Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. *J Hydrol* 278: 213–230.
- Potter NJ, Zhang L. 2009. Interannual variability of catchment water balance in Australia. *J Hydrol* 369: 120–129.
- Sankarasubramaniam A, Vogel RM, Limbrunner JF. 2001. Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resour Res* 37: 1771–1781.
- The Global Runoff Data Centre, Koblenz, Germany.

Citation de l'article : Bourgin P-Y, Andréassian V, Riffard-Chenet M. 2020. Élasticité des débits aux précipitations en Afrique sub-saharienne. *La Houille Blanche* 6: 97–104.