

Contribution à la Réévaluation des Ressources en eau de Surface du Bénin par une Analyse des Séries Hydrométriques Récentes

Zevounou Crépin

Corresponding Author, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi

E-mail: zevounoucrepin@gmail.com

Tél: (+229) 97646062

Zannou Arnaud

Direction Générale de l'Eau

Dahodo Médard

Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi

Resume

Cette étude porte sur la recherche de tendance dans les séries hydrométriques et la réévaluation des ressources en eaux de surface du Bénin pour servir à des fins d'ingénierie dans la mise en place des ouvrages d'assainissement, de franchissement, d'art et d'implantation de barrages. Les résultats issus du test d'analyse de tendance ont permis d'observer des tendances à la baisse sur la station de Porga au Nord-Ouest suivant les périodes de l'étude. La station de Coubéri au Nord affiche des tendances à la hausse suivant la récente période. Au Sud, nous avons obtenu des tendances positives dans toutes les séries. L'estimation desdites ressources a permis de montrer que par rapport à la période allant de 1952 à 1984, les écoulements ont augmenté de l'ordre de 8% sur la période récente allant de 1985 à 2009. Aussi les ressources en eau de surface du Bénin s'évaluent actuellement à 13,88 milliards de mètre cube par an contre 13,106 milliards de mètre cube par an sur la période 1952-1984. Au nord, il y a une baisse et au Sud une hausse. Ces modifications de la disponibilité globale des ressources en eau peuvent être la conséquence de la dynamique des états de surface d'une part, et d'autre part, la traduction des changements et variabilités climatiques.

Motsclés: Ingénierie, eaux de surface, tendance, Bénin

1. Introduction

La République du Bénin est un pays de l'Afrique de l'Ouest situé entre les latitudes 6° et 12°30' Nord et les longitudes 0°45' et 3°50' Est. Elle couvre une superficie de 114763 Km² et s'étend sur 670 Km de la côte Atlantique au sud vers le fleuve Niger au Nord [1].

Le substratum géologique du Bénin est constitué essentiellement de formations métamorphiques et magmatiques précambriennes (80% du territoire) constituant la zone de socle et seulement 20% du territoire constituant les séries sédimentaires [2].

Il existe quatre catégories de sol au Bénin dont les sols minéraux bruts et peu évolués, des vertisols, les sols alluviaux hydromorphes, les sols ferrugineux tropicaux plus ou moins sableux.

Cinq unités de relief [3] caractérisent son paysage, à savoir : La dépression de l'Oti-Pendjari, Le massif de l'Atacora, le plateau gréseux de Kandi, la pénéplaine Dahomeyenne, le bassin sédimentaire côtier constitué de deux séries de plateaux séparés par la dépression de la Lama.

Le découpage hydrographique du Bénin peut être présenté suivant quatre bassins versants à savoir : le bassin de la Pendjari, le bassin du Niger (trois affluents), le bassin de l'Ouémé, le bassin du Mono-Couffo.

Les ressources en eau de surface du Bénin ont subi plus ou moins de modification à l'échelle temporelle et des disparités en matière des pluies et des écoulements s'observent. On évoque les changements et variabilités climatiques pour donner une explication à tous ces phénomènes [4]. Dans toute la zone intertropicale d'ailleurs, on note une exacerbation des conditions extrêmes telles que les sécheresses et les inondations en ces dernières années. La végétation, les sols, le relief étant affectés, il en découle des modifications importantes des ressources en eau de surface. En considérant les anciennes périodes par rapport aux périodes récentes, les estimations ne peuvent plus se faire par une simple extrapolation. Il faudrait effectuer des analyses des séries pluviométriques et hydrométriques récentes pour servir de bases aux différentes décisions politico-techniques relatives à la gestion des ressources en eau dans le pays surtout en ce qui concerne le dimensionnement des barrages, ponts, caniveaux et autres infrastructures de génie civil. Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'actualisation de l'évaluation des ressources en eau de surface du Bénin. Elle concerne les séries de débits moyens annuels de certaines stations hydrométriques.

2. Matériel et Methodes

2.1 Matériel: Données de L'étude

Pour mener cette étude, nous avons sélectionné sur les grands cours d'eau à savoir l'Ouémé, le Mono, le Couffo, le Mékrou, l'Alibori, la Sota et la Pendjari les stations hydrométriques les plus situées en aval. Les stations hydrométriques de l'étude sont donc : la station de Bonou sur l'Ouémé, Lanta sur le Couffo, Athiéme sur le Mono, Yankin sur l'Alibori, Kompongou sur le Mékrou, Porga sur la Pendjari et Coubéri sur la Sota. Nous avons mené les investigations sur les séries de débits moyens annuels en tolérant jusqu'à un seuil de 20% de jours de lacune. Les données collectées et traités disponibles dans la base de données du Service de l'Hydrologie sont ceux de la période 1952-2009. Quatre des sept stations ont permis d'avoir des données satisfaisantes pour faire les analyses de tendance : il s'agit des stations d'Athiéme, Bonou, Coubéri et Porga. Les autres sont rajoutées dans le cadre de l'estimation des ressources en eau du pays.

Méthodes: Analyse de Tendance par la Méthode de Mann-Kendall

Le test utilisé est un test non-paramétrique pour l'analyse de tendance dans les séries chronologiques comme les séries hydrométriques [5]. Ce test est préféré lorsque plusieurs stations sont testées dans une même étude [6]. Il nécessite une indépendance dans les séries [7]. Dans cette étude, nous testons cette indépendance avec le coefficient d'autocorrélation de décalage 1. Ce coefficient s'exprime comme suit:

$$\rho_1 = \frac{\sum_{t=1}^{N-1} (x_t - \bar{x})(x_{t+1} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2} \text{ où } \bar{x} \text{ désigne la moyenne de la série temporelle supposée égale aux}$$

moyennes des sous-séries obtenues par le décalage.

L'hypothèse d'indépendance de la série est testée par ce coefficient comme suit : $H_0: \rho_1 = 0$ vs $H_1: |\rho_1| > 0$; en utilisant :

$$t = |\rho_1| \sqrt{\frac{n-2}{1-\rho_1^2}}$$

où t suit une distribution de student, avec $(n-2)$ degré de liberté [5]; [8]. Si $|t| > t_{\alpha/2}$, l'hypothèse nulle d'indépendance de la série est rejetée avec un risque d'erreur de α .

La recherche de tendance dans les différentes séries est rendue possible grâce à la statistique S définie comme suit :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i)$$

Où : x_i est rangé de 1 à $n-1$ et x_j rangé de $i+1$ à n ;

$$\text{Sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & 0 < (x_j - x_i) \\ 0, & 0 = (x_j - x_i) \\ -1, & 0 > (x_j - x_i) \end{cases} ;$$

Une valeur positive de S indique une tendance à la hausse. De même, une valeur négative de S indique une tendance à la baisse [9]. Pour $S=0$, on conclut quant à la non-existence d'une tendance claire dans la série analysée

Nous calculons :

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \text{ puis } Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} .$$

Si $|Z_c| > 1,96$, alors nous rejetons l'hypothèse nulle de non significativité de la tendance au risque de 5% et si $|Z_c| > 2,57$ alors nous rejetons l'hypothèse nulle et nous concluons que la tendance est hautement significatif au seuil de 1% [10].

2.3 Estimation des Ressources en eau

Nous calculons les moyennes annuelles de débits journaliers observés sur les stations sélectionnées pour la présente étude. Dans un premier temps, nous additionnons ces moyennes suivant chaque période de l'étude. Ainsi, nous avons une image des débits totaux écoulés pendant cette période dans le pays. Nous procédons par la suite à une intégration sur une année de 365 jours. Nous faisons les mêmes calculs sur les trois stations du Sud prises ensemble et les quatre stations du Nord. Ainsi, nous avons les formulations suivantes:

Soit $X_m = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ la série des débits moyens mesurés à une station donnée et suivant une période ; \bar{X}_m , la moyenne de cette série ; D_a , la somme de ces moyennes sur les 7 stations de l'étude et enfin D_t le volume en $m^3 \cdot \text{année}^{-1}$:

$$\bar{X}_m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} (m^3 \cdot s^{-1}) ;$$

$$D_a = \sum_{j=1}^7 \bar{X}_{m_j} (m^3 \cdot s^{-1}) ;$$

$$D_t = 365 * 24 * 60 * 60 * D_a (m^3 \cdot \text{année}^{-1}).$$

3. Resultats et Discussion

3.1 Analyses de Tendance

L'analyse de tendance par le test non paramétrique de Mann-Kendall a été faite sur les séries de deux stations hydrométriques du Sud à savoir Bonou et Athiémié ; et deux stations du Nord à savoir : la station de Porga et de Coubéri.

Le tableau I ci-dessous regroupe les résultats obtenus pour le coefficient ρ_1 et les statistiques t de Student correspondantes. En observant ces valeurs, nous remarquons qu'à l'exception de la série analysée sur la station de Coubéri suivant la période 1985-2009, toutes les autres séries de cette étude présentent des $|t|$ inférieurs à 1,96.

Tableau 1: Valeurs de la statistique t de Student

	1952-1984		1985-2009	
	ro	ltl	Ro	ltl
Athiémé	-0,22	0,94	0,11	0,42
Bonou	0,08	0,36	-0,04	0,14
Coubéri	0,001	0,004	-0,59	2,19
Porga	0,10	0,42	0,01	0,04

Ce résultat implique que toutes ces séries sont indépendantes avec un risque d'erreur de 5%. Par contre, la seule série de Coubéri ne l'est pas.

Le tableau II ci-dessous donne les valeurs obtenues pour la statistique S de Mann-Kendall ainsi que les valeurs de la statistique Z_c permettant de juger la significativité de la tendance annoncée par S. Ces différentes valeurs sont présentées pour les périodes en colonne et suivant les stations en ligne.

Tableau 2: Statistiques de Mann-Kendall et de Fisher

	1952-1984		1985-2009	
	S	Zc	S	Zc
Athiémé	-43	0,02	8	0,08
Bonou	-118	0,04	38	0,02
Coubéri	-48	0,06	Non testé	Non testé
Porga	9	0,02	38	0,02

Nos résultats permettent d'observer que les deux stations du Sud Bénin affichent des tendances à la hausse suivant la période totale de cette étude allant de 1952 à 2009. Les deux stations du Nord Bénin affichent des tendances à la baisse. Ces tendances observées ne sont pas statistiquement significatives avec des valeurs absolues de Z_c inférieures à 1,96. En effet, il est montré [11],[12] que des ruptures de stationnarité ont été détectées dans les indices pluviométriques régionaux des sous bassins de la Sota, de l'Alibori et du Mékrou au Nord Bénin, suivant les années 1970-1972 en analysant les séries de 1955-1992. Ces remarques ont permis de conclure quant à une tendance décroissante significative au seuil de 5 % dans chacun des sous bassins. De même, il est montré que les débits sont en baisse au cours des deux dernières décennies de la série 1955-1992 à savoir : 1971-1980 et 1981-1990 sur les stations des sous-bassins ci-dessus cités [13]. Par ailleurs, la recrudescence des phénomènes d'inondation ces dernières années serait en phase avec la hausse des tendances observée aux stations du Sud.

Nos résultats relatifs aux deux sous-périodes de l'étude à savoir 1952-1984 et 1985-2009 montrent que les stations du Sud avaient enregistré des tendances à la baisse sur la période 1952-1984 et enregistrent pour la récente période des tendances à la hausse.

3.2 Estimation des Ressources en Eau

L'estimation des ressources en eau par la méthode décrite ci-dessus nous conduit aux résultats que nous présentons ici. Les moyennes par station sont présentées, ainsi de même que leurs sommes et les volumes obtenues pour chacune d'elles. Le tableau III ci-dessous résume les principaux résultats :

Tableau 3: Moyennes des débits et volumes annuels

Stations	1952-1984	1985-2009
Athiémé	101	151
Bonou	172	180
Kompongou	18,5	16,92
Coubéri	32,3	30,32

Stations	1952-1984	1985-2009
Porga	59	39,92
Alibori	28	16,73
Lanta	4,8	5,14
D_a (m^3/s)	415,6	440,03
D_t (m^3/an)	13,106E+9	13,88E+9

En observant les chiffres du Tableau III, on observe que la période récente a enregistré plus d'eau ruisselée que l'ancienne période. En effet, on enregistre un potentiel de 13,106 Milliards m^3/an sur l'ancienne période (1952-1984) contre un potentiel de 13,88 Milliards m^3/an pour la nouvelle période (1985-2009) soit un accroissement de 5,58%.

Soulignons également que les estimations faites ici reposent presque sur les mêmes approximations et adoptent les mêmes hypothèses que les études antérieures ayant abordé le sujet :

- Les stations hydrométriques les plus en aval des cours d'eau ont été considérées ;
- Les apports du cours d'eau principal du fleuve Niger ainsi que ceux de la Sazué et des hauts bassins de la Kéran et de la Kara n'ont pas été prises en compte ;

Suite à ces résultats, nous avons cherché à comprendre si les tendances non significatives à la baisse annoncées par le test de Mann- Kendall pour les stations du Nord et celles à la hausse pour les stations du Sud se justifient dans les résultats de la quantification des ressources en eau faite avec cette méthode. Ainsi, nous avons repris les mêmes calculs que précédemment, mais en utilisant cette fois-ci les seuls stations du Nord d'une part et les stations du Sud de l'autre. Les résultats sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau 4: Moyennes et volumes annuels du Sud

Stations	1952-1984	1985-2009
Athiémé	101	151
Bonou	172	180
Lanta	4,8	5,14
D_a (m^3/s)	277,8	336,14
volume D_t (m^3/an)	8,76 E+9	10,60E+9

Tableau V: Moyennes et volumes annuels du Nord

Stations Kompongou	1952-1984	1985-2009
	18,5	16,92
Coubéri	32,3	30,32
porga	59	44,56
Alibori	28	16,73
D_a (m^3/s)	137,8	108,53
volume D_t (m^3/an)	4,346E+09	3,423E+09

Les résultats issus de ces calculs nous montrent que les ressources en eau écoulées ont augmenté au niveau des stations du Sud (Bonou, Lanta, Athiémé) prises dans leur ensemble d'une part. Les volumes obtenus passent de 8,76 Milliards de m^3/an sur la période 1952-1984 à 10,60 Milliards de m^3/an sur la période 1985-2009, soit un accroissement de 17,36 %. Ce phénomène peut se déduire de l'évolution des précipitations au Sud du Bénin depuis plusieurs années, montrant que dans la partie méridionale du pays, on pourrait assister jusqu'à l'horizon 2050 à une pluviométrie annuelle pratiquement stable, les variations observées tous les cinq ans n'excédant guère 0,2% avec un maximum de 0,2% dans le secteur Ouest (accroissement).

D'autre part, nous nous rendons compte que sur les stations du Nord Bénin, également considérées dans leur ensemble, les ressources en eau ont baissé en passant de 4,346 Milliards m^3/an d'eau écoulées sur suivant la période 1952-1984 à 3,423 Milliards m^3/an sur la période 1985-2009. Il

est en effet prouvé que la région septentrionale du pays est sujette à sécheresse comme l'ensemble du sahel.

En observant les effectifs des échantillons, nous nous rendons compte que les valeurs (33 années pour l'ancienne période contre 25 années pour la nouvelle période) sont proches et permettent de valider de telles conclusions. Ainsi, en considérant les ressources en eau de surface du Bénin dans leur ensemble, nous nous rendons compte qu'il y a une augmentation générale entre les deux périodes. En effet, la baisse constatée au Nord est compensée par l'excédent observé au Sud.

En se contentant de ces seuls résultats, nous pouvons tenter d'avancer qu'au Bénin, les écoulements des récentes périodes sont plus importants que ceux des anciennes périodes. Les quantités d'eau ainsi écoulées ne sont pas uniformément réparties dans l'espace sur toute l'étendue du territoire national. Notons quand même qu'il faudrait approfondir et expliquer les tendances obtenues ici avec une analyse des séries pluviométriques en considérant les deux différentes régions de cette étude.

Avant tout, les hypothèses suivantes peuvent être posées pour appuyer ces résultats obtenus :

- Les états de surface ont subi des modifications dans le temps, augmentant ainsi les processus d'écoulement ;
- L'effet des changements climatiques a engendré une certaine sévérité des sécheresses à partir du Sahel. Le Nord Bénin ayant un climat se rapprochant plus de celle des zones arides, on y aboutit à une diminution des ressources en eau.

Notons que cette dernière hypothèse peut être vérifiée en procédant à des études d'évolution du climat par utilisation d'indicateurs comme par exemple la recherche dans le sens Nord-Sud, des espèces végétales caractéristiques des régions arides, l'évolution des températures.

4. Conclusion

De cette étude, il ressort que les écoulements au Bénin en ces dernières périodes sont en général plus importants que suivant les anciennes périodes. Les analyses de tendance ont été faites sur les séries de débits moyens annuels collectés aux stations hydrométriques situées les plus en aval des principaux grands cours d'eau du pays. Il révèle que suivant la période relativement récente allant de 1985 à 2009, les stations hydrométriques du Sud affichent des tendances à la hausse. Ces stations ont montré des tendances négatives suivant l'ancienne période. De l'autre côté, on continue d'observer sur la station de Porga au Nord des tendances négatives sur la récente période comme sur l'ancienne allant de 1952 à 1984. Notre étude évalue les ressources en eau de surface du Bénin à environ 13,88 Milliards de mètre cube par an suivant la nouvelle période contre 13,106 Milliards pour l'ancienne période. De l'analyse de la dynamique spatiale des écoulements dans le pays, nous avons montré que les ressources en eau de surface ont augmenté au Sud et ont baissé au Nord. Cette étude a donc lié ce phénomène au changement des états de surface et du climat. En conséquence, cette situation décrite engendrerait des risques d'erreur d'ingénierie surtout les mauvais dimensionnements des ouvrages d'assainissement (Caniveaux et collecteurs), des ouvrages de franchissement (ponts) et autres infrastructures d'art (barrages) de même que la gestion des questions d'inondations faiblement prévisibles et maîtrisables dans le pays. Une analyse fine des précipitations à l'échelle du pays permettra d'expliquer efficacement les disparités observées suivant les grandes régions.

References Bibliographiques

- [1] **DGH**, 2009. Projet de renforcement des capacités nationales de suivi des ressources en eau axe sur la gestion de l'eau agricole. 75 pages
- [2] **AZONTONDE H.A.**, 1991. Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin. Soil Water Balance in the Sudano Sahelian Zone (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publ. no. 199, 1991. 10 pages.

- [3] **LE BARBE, G.ALE, B.M., H., Y, B., R, G.,** 1993. Les ressources en eau superficielles de la République du Bénin. Edition de l'ORSTOM, 543 pages
- [4] **Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu et J. P. Palutikof, éd., 2008.** *Le changement climatique et l'eau*, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.
- [5] **Hirsh R.M., Alexander RB., Smith R.A.,** 1991, Selection of methods for the detection and estimation of trends in water quality. *Water resources research* 27, 803-8013.
- [6] **Hirsch R.M., Slack, J.R., Smith R.A.,** 1982. Techniques of trends accesssment from monthly water quality data. *Water resources research*, 18(1), 107-121
- [7] **Cunderlik JM and Burn DH,** 2004. Linkages between regional trend monthly maximum flows and selected climate variables. *ASCE journal of Hydrologic engineering*: 9(4): 246-256.
- [8] **Souhaib B. T.,** 2009. Prévission des séries temporelles à long terme par apprentissage automatique. Mémoire de master, université libre de Bruxelles, PP 150.
- [9] **Lawin A. Emmanuel, A. F., L.T.,** 2011. Analyse de la variabilité du régime pluviométrique dans la région agricole d'Ina au Bénin. *European Journal of Scientific research* ISSN 1450-2016X vol 50 N°3(2011), pp.425-439.
- [11] **HOUNDENOU C., VISSIN E.W., PERARD J.,** 2005. Mise en évidence du poids des "mois humides" dans la péjoration pluviométrique du bassin de la Sota (Bénin, Afrique de l'Ouest)», Actes du XVIIIème Colloque International de Climatologie, Gênes (Italie), pp. 333-336.
- [12] **VISSIN E. W., AMOUSSOU E., HOUSSOU C.S.,** 2007. Variabilité de la pluviométrie et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. *Climat et Développement*, vol 3, LECREDE, Université d'Abomey-Calavi, pp. 22-32.
- [13] **VISSIN W. Expédit,** 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 310 pages.