

Modélisation et simulation des tendances climatiques à l'horizon 2040 sur le bassin du fleuve Ouémé en République du Bénin

**Télesphore Cossi NOUNANGNONHOU¹, François-Xavier Nicolas FIFATIN¹
et Emile Adjibadé SANYA^{2*}**

¹ *Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunication et d'Informatique Appliquée (LETIA), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin*

² *Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (LEMA), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin*

* Correspondance, courriel : [easanyao@yahoo.fr](mailto: easanyao@yahoo.fr)

Résumé

Le fleuve Ouémé (République du Bénin) subit une baisse de régime hydrique, en particulier de débit, depuis quelques décennies. Malgré cette situation, il est prévu la mise en œuvre de projets hydroélectriques et hydro-agricoles dans les années à venir. La présente étude analyse le comportement futur des différents paramètres climatiques, déterminants pour l'obtention de débit requis, afin de proposer des solutions pour sa gestion durable. Les données mensuelles de la pluviométrie et la température moyenne de 1955 à 2014 et l'évapotranspiration potentielle (ETP) de 1965 à 2014 ont été collectées sur trois sites représentatifs du bassin dudit fleuve : Bétérou, Savè, Kétou. L'analyse en séries chronologiques, plus précisément celle des tendances, a été utilisée, en première approche, pour décrire l'évolution des différents paramètres dans le temps. Les prévisions ont été ensuite effectuées, à l'aide du modèle Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) sur les 25 années à venir. Les résultats obtenus révèlent une augmentation des températures à l'horizon 2040, de l'ordre de 1,9°C à Bétérou, 1,4°C à Savè et 0,8°C à Kétou. Le modèle a permis de prédire une baisse des précipitations annuelles moyennes sur la même période : 20,37 % à Bétérou; 7,01 % à Savè; 14,96 % à Kétou relativement à celle de la période 1955 - 2014. Les courbes d'ETP révèlent bien que les pertes d'eau annuelles deviennent plus importantes que les lames d'eau précipitées. Ces résultats montrent que la situation n'est pas identique en tous les points du bassin du fleuve. Subséquemment, pour une gestion durable, il faut tenir compte de la spécificité de chaque sous-zone.

Mots-clés : *paramètres climatiques, tendances, prévision, modèle, fleuve Ouémé.*

Abstract

Modelisation and simulation of the climatic trends in prospect 2040 on the Ouémé catchment in Benin Republic

The Ouémé catchment, in Benin Republic, suffers a decline in water regime and in particular in flow, in recent decades. Despite this situation, several hydro-electrical and hydro-agricultural projects are planned for the coming years. This study aims to analyze the future behavior of the required various critical climatic parameters for flow obtention in order to provide sustainable solutions to its water resources management.

Monthly rainfall and mean temperature data (from 1955 to 2014) and Potential Evapo-Transpiration (ETP), from 1965 to 2014, have been used on three representative sites of Ouémé catchment : Bétérou, Savè, Kétou. Time series analysis and more precisely trend analysis was used, at a first step, to describe trend evolution of the climatic parameters in time. A forecast has then been computed, using Auto-Regressive Integrated Moving Average model (ARIMA) on the 25 next years. The results predicted an increase in temperature on the prospect 2040 of about 1.9 °C at Bétérou, 1.4 °C at Savè and 0.8 °C at Kétou. For precipitations' behavior on the same period, the model has allowed predicting reduction of the mean annual rainfall of 20.37 % at Bétérou, 7.01 % at Savè and 14.96 % at Kétou, comparison to that from 1955 to 2040. The ETP fitted curves also revealed that the annual water losses became more important than the precipitated annual water blades. All these results show that, situation is not identical at all points of Ouémé catchment and subsequently, project must take into account specificity of each sub-area for its sustainable management.

Keywords : *climate parameters, tendencies, forecasts, model, Ouémé catchment.*

1. Introduction

Au cours de l'histoire, la terre a connu des changements climatiques remarquables liés aux facteurs naturels comme la radiation et les éruptions volcaniques [1]. Ces facteurs sont connus sous le nom de forçage radiatif naturel. Mais depuis le siècle dernier, on assiste au forçage anthropique lié à l'augmentation des gaz à effets de serre et aux aérosols dans l'atmosphère, du fait des activités humaines [2]. Les recherches ont montré que les concentrations atmosphériques de ces gaz ont fortement augmenté depuis l'avènement de la révolution industrielle, du fait de la demande croissante de l'énergie électrique produite essentiellement à partir du pétrole et ses dérivées. Aujourd'hui, ces concentrations atmosphériques dépassent largement les valeurs préindustrielles [3], induisant les changements climatiques dont les conséquences globales sont le réchauffement climatique, l'élévation du niveau des mers, la diminution de la couverture neigeuse et la réduction de la glace marine. Au niveau de l'Afrique de l'Ouest en général et au Bénin en particulier, on assiste à l'accentuation des événements climatiques extrêmes comme la baisse de la pluviométrie, la perturbation de l'alternance des saisons, l'élévation de la température et la modification des régimes hydrologiques. Depuis plus de deux décennies, la question du réchauffement climatique et des changements climatiques (CC) est au cœur des préoccupations mondiales, en raison des grands enjeux qu'ils suscitent pour toutes les formes de vie sur Terre [4].

Face à cela, presque toutes les nations du monde focalisent leur attention sur les politiques à mettre en œuvre pour réaliser un compromis entre la réduction des émissions de gaz à effets de serre et la disponibilité permanente de l'énergie électrique à moindre coût. Au Bénin, la production hydroélectrique sur le fleuve Ouémé occupe la première place dans les projets de développement énergétique en cours d'élaboration, à cause son potentiel renouvelable, de son meilleur rendement, de sa stabilité, de son coût d'exploitation et de son inoffensivité vis-à-vis de la couche d'ozone [5]. Cependant, cette forme de production d'électricité nécessite un réseau hydrographique bien arrosé et pouvant générer, de manière continue et sur le long terme, un débit moyen ininterrompu. Plusieurs auteurs ont montré qu'en Afrique de l'Ouest, le déficit pluviométrique de 10 à 30 % de la période 1970 - 2000 a entraîné un déficit dans le débit des cours d'eau de 40 % [6]. Entre autres, le rôle joué par l'anthropisation a été mis en relief pour son action sur la modification des conditions d'écoulement (ruissellement ou infiltration) des eaux de pluies, avec un effet négatif pour les régions soudanaises (ruissellement plus important) et positif pour le Sahel avec augmentation de l'infiltration dans des zones privilégiées [7]. Le Bénin a enregistré une baisse relativement brutale de la pluviométrie ; ce qui a entraîné une diminution sensible des ressources en eau et des productions [8]. Ces tendances soulèvent des

questions importantes pour un développement durable, notamment pour ce qui concerne les ressources en eau [9]. Sur cette base, nous émettons l'hypothèse que, d'une part, les changements climatiques ont un impact sur la ressource en eau du fleuve Ouémé et de l'autre, les projections à l'horizon 2040 indiquent une modification significative des paramètres climatiques. Car, il est difficile de prédire comment évoluera le climat et où les effets de cette évolution se feront le plus sentir. Néanmoins, on sait que les impacts cumulatifs et la probabilité accrue de conditions météorologiques extrêmes qui caractérisent les changements climatiques posent des risques plus élevés aux populations, aux économies et aux écosystèmes vulnérables partout dans le monde. Cette étude vise à analyser l'évolution actuelle et future des paramètres climatiques sur la production en eau du fleuve Ouémé, pour la mise en place de stratégies adéquates de gestion.

2. Matériel et méthodes

2-1. Milieu d'étude

Le bassin étudié est celui du fleuve Ouémé au Bénin (*Figure 1*) qui s'étend sur une superficie de 47000 km² environ. Il est caractérisé par une transition, du climat soudanien au Nord avec en moyenne 900 à 1000 mm de précipitation par an, au climat Béninien au Sud avec 1200 mm de pluie en moyenne par an. Au point de vue hydrologique, ce bassin est caractérisé par des débits d'étiage de plus en plus faibles et le tarissement précoce des cours saisonniers [10].

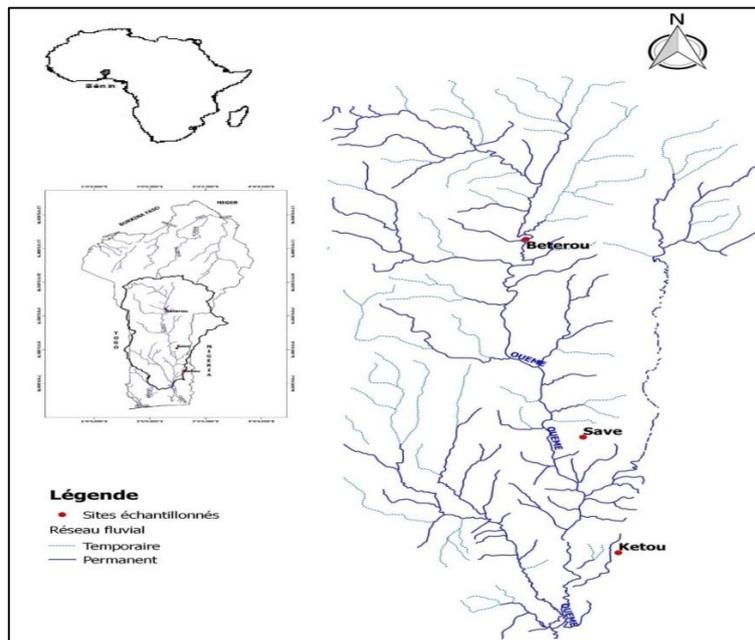


Figure 1 : Localisation du bassin versant du fleuve Ouémé Bénin (sites représentatifs zonaux)

2-2. Données climatiques

Les données utilisées sont celles de la pluviométrie constituées de hauteurs mensuelles de pluie (mm), des températures moyennes mensuelles de 1955 à 2014 et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de 1965 - 2014. Ces données proviennent de la base de données de l'Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) de Cotonou (Bénin) et de celle du Laboratoire de Climat, d'Eau, d'Ecosystèmes et de Développement (LACEEDE) dénommé Pierre Pagney de l'Université d'Abomey-Calavi

(UAC). Ces données s'appuient sur les valeurs quotidiennes enregistrées sur vingt (20) stations localisées aux environs de la zone d'étude dont 3 stations synoptiques. Pour ces 3 dernières stations, il existe des données de pluviométrie par jour et d'évapotranspiration par décennie. Les 17 autres stations sont des postes pluviométriques pour lesquels les données de pluie journalières et mensuelles seulement sont disponibles.

2-3. Méthodes

Pour conduire un bilan hydrologique, il convient d'estimer la pluviométrie sur l'ensemble des points du bassin de l'Ouémé. La caractérisation de la tendance des paramètres climatiques le long du fleuve Ouémé, dans le cadre de cette étude, a été réalisée à partir d'un nombre limité de mesures ponctuelles avec une interpolation des mesures pluviométriques, aux pas de temps respectivement mensuel et annuel. Cette régionalisation des pluies, à l'échelle du bassin, a emprunté l'usage des modèles de régression linéaire construits à partir de trois paramètres des postes de mesure que sont : la latitude, la longitude et l'altitude. La modélisation de la tendance des précipitations et des températures, sur la période allant de 1955 à 2040, sur les sites de Bétérou, Savè et Kétou, a été effectuée à l'aide du logiciel R, à travers l'analyse des séries chronologiques, plus précisément celle des tendances [11]. Ce logiciel R est qualifié de celui de développement scientifique, car il est spécialisé dans le calcul et l'analyse statistique, et fonctionne sous environnement Windows ou Linux. En effet, après la régionalisation des pluies à l'échelle du bassin, tout le bassin a été subdivisé en trois zones représentatives où l'évolution des paramètres climatiques d'un site à un autre semble être approximativement la même. Ainsi, les sites de Bétérou, de Savè et de Kétou ont été identifiés comme étant ceux représentatifs des trois différentes zones caractéristiques du bassin dudit fleuve. Ensuite, un ajustement linéaire ou quadratique des tendances observées a aussi été effectué, en tenant compte des paramètres de précision que sont : l'erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE) et la déviation moyenne absolue (MAE) des séries estimées par rapport aux valeurs réelles observées. Ainsi, une faible valeur de ces erreurs moyennes (MAPE et MAE) atteste du bon ajustement de la série chronologique étudiée. Une modélisation des tendances observées, sur la pluviométrie, la température moyenne et l'évapotranspiration, et sur la période de 1955 à 2040, été réalisée au moyen du modèle Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA). Le meilleur modèle a ensuite été retenu dans chaque cas, en utilisant la fonction « auto.arima » de la bibliothèque intégrée « Forecast » du logiciel R, version 3.2.3 [12]. Ce sont les meilleurs modèles retenus qui nous ont permis de générer les prévisions sur l'évolution de la pluviométrie, la température moyenne et l'évapotranspiration, sur la période de 2015 à 2040. Les estimations respectives effectuées ont été basées sur une valeur de la limite de confiance égale à 95 %, valeur classiquement adoptée en matière de traitement de pareilles données.

3. Résultats et discussion

3-1. Tendance évolutive des paramètres climatiques le long du fleuve Ouémé

3-1-1. Relation entre l'ETP et la pluviométrie de 1965 à 2040

Les évolutions conjointes de la pluviométrie et l'ETP, de 1965 à 2014, avec une projection allant jusqu'en 2040, sont présentées sur la *Figure 2*. L'analyse de cette figure montre que l'ETP est plus élevée que la pluie, quel que soit le site considéré. Cela signifie qu'au niveau du fleuve, sur toute la période, la perte d'eau, est plus importante que les lames d'eau précipitées annuellement. Il en résulte, à cet effet, un assèchement rapide du lit du fleuve du fait que la quantité d'eau précipitée est inférieure à celle évaporée confirmant ainsi le degré de sécheresse dans le bassin, la pression humaine, par les activités agricoles, qui facilitent la fragilisation des sols et de la végétation. Cette préoccupation rejoint aussi celle émise par [13] qui stipulent que la

variation de la disponibilité en eau dans le bassin dépend de la complexité géo-climatique. Ces derniers affirment également que la variation des lames d'eau écoulées dépend du rythme saisonnier des conditions pluviogènes associées à la mousson Ouest africaine. Cette baisse pluviométrique associée à une forte évapotranspiration explique l'assèchement rapide du lit du fleuve par endroits pendant l'étiage.

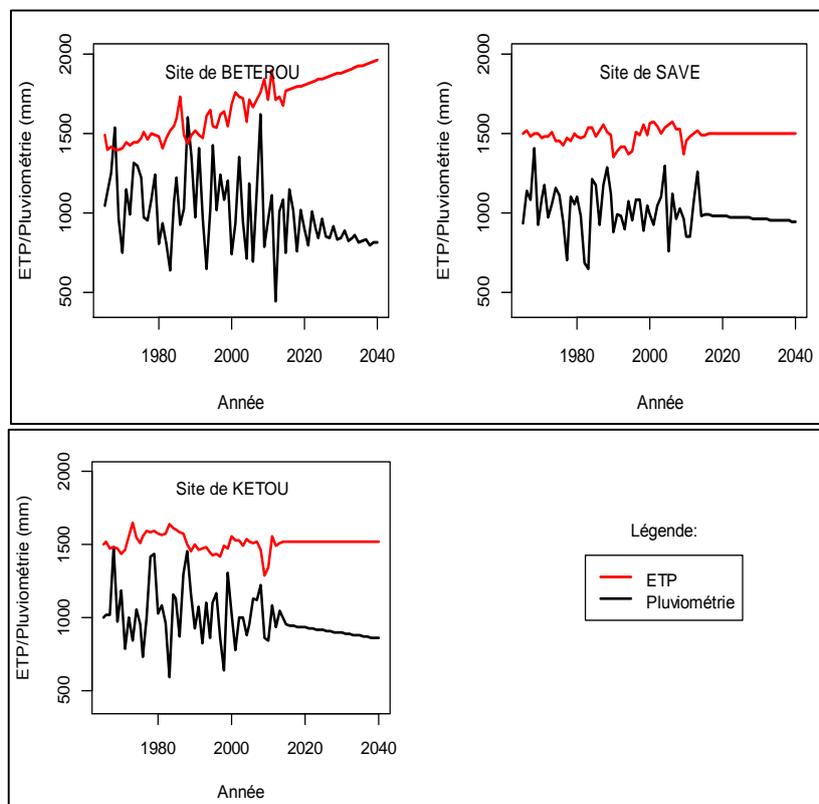


Figure 2 : Relations entre l'ETP et la pluviométrie de 1965 à 2040 le long du fleuve Ouémé

3-1-2. Évolution de la pluviométrie

La tendance d'évolution de la hauteur moyenne de pluie, entre 1955 et 2014, pour les différents sites explorés, affiche de façon générale, une allure décroissante (**Figure 3a**). A Bétérou, la courbe de tendance affiche une évolution quadratique avec une concavité tournée vers le haut. Si cette tendance se maintenait, elle peut amener favorablement à la reprise à la hausse de la pluviométrie contrairement aux sites de Kétou et de Savè qui ont évolué de façon linéaire et décroissante de 1955 à 2014. De plus, on observe que les excédents pluviométriques sont plus significatifs durant la période 1983 à 2008. La période de 1969 à 1983 est marquée par l'occurrence d'années les plus déficitaires. Par ailleurs, la série étudiée montre une tendance parabolique et un point d'inflexion brusque observé en 1983 qui se présente comme l'année charnière entre deux périodes à comportements pluvieux distincts. A Savè et à Kétou, on note deux séries pluviométriques qui présentent approximativement les mêmes comportements pluvieux. Les pics de pluie à Savè et à Kétou, sont respectivement observés en 1962 et en 1963. Les régimes déficitaires de ces séries sont plus constatés de 1990 à 1993 et de 1969 à 1977 pour les stations de Savè et de Kétou respectivement. La modélisation, des prévisions faites sur les années 2015 à 2040, montre de façon générale, une grande variabilité interannuelle avec une diminution substantielle de la quantité des précipitations (**Figure 3b**). Les prévisions, pour les 25 années à venir, indiquent que la moyenne annuelle de la pluviométrie sur la période 2015 à 2040, est en baisse de 20,37 %, 7,01 % et 14,96 % par rapport à celle de la période 1955 à 2014, respectivement à Bétérou, Kétou et Savè. Ces valeurs sont obtenues avec une limite de confiance de 95 %.

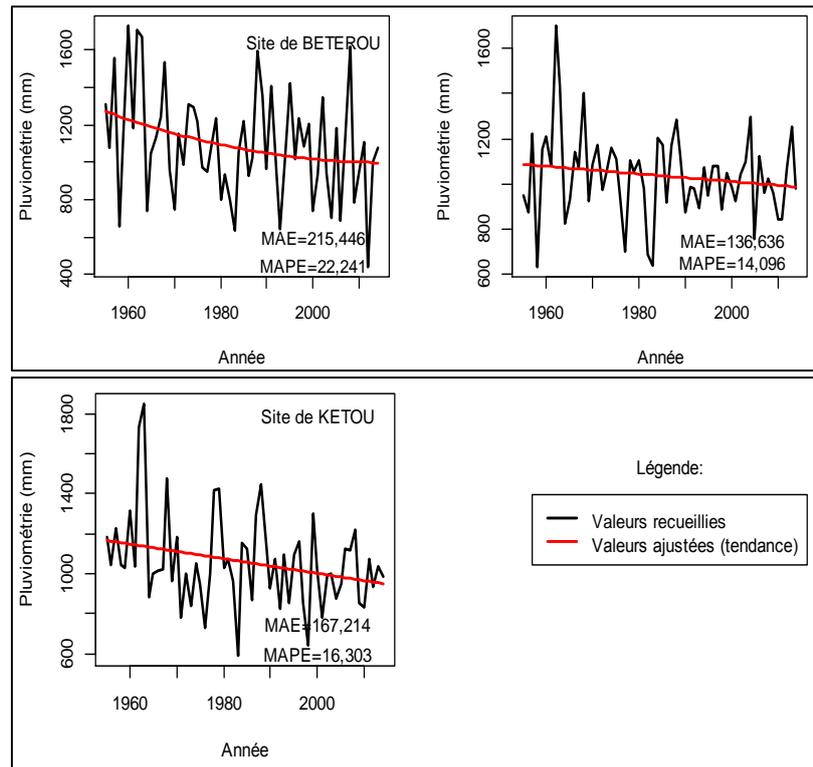
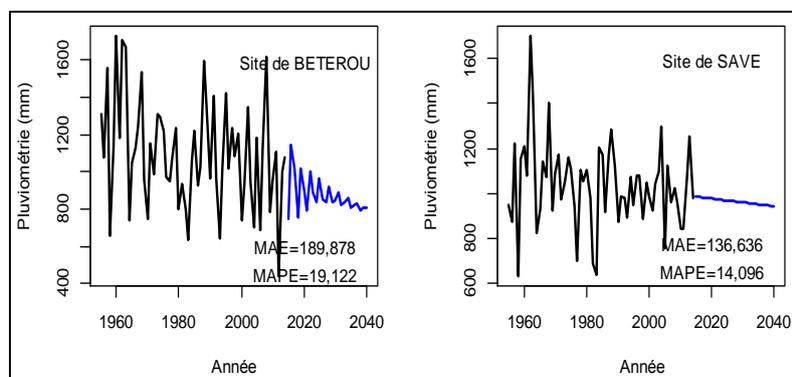


Figure 3a : Tendances de la pluviométrie sur la période 1955 - 2014 à Bétérou, Savè et Kétou

Un, des enjeux majeurs des travaux de recherche sur la variabilité climatique, est la quantification de l'impact de cette variabilité sur le cycle hydrologique et les ressources en eau. Ceci est particulièrement vrai en zone tropicale, notamment en climat semi-aride où le couplage entre l'atmosphère et les surfaces continentales s'avèrerait beaucoup plus étroit que dans les zones tempérées [14]. Les données recueillies et exploitées dans la présente étude montrent clairement que le bassin du fleuve Ouémé est caractérisé, sur le plan pluviométrique, par une baisse considérable des pluies, ce qui impacte négativement son régime du cours d'eau. Les diminutions de précipitations, enregistrées au niveau des différents sites, seront préjudiciables au débit du cours d'eau, du fait que, dans le bassin du fleuve Ouémé, la diminution de la pluviométrie de 15 à 20 % correspond à une baisse de 40 % de débit [15]. Si cette tendance est maintenue, la réalisation d'un barrage hydroélectrique risquerait d'être non rentable, car ce dernier ne pourra pas fonctionner convenablement à pleine charge.



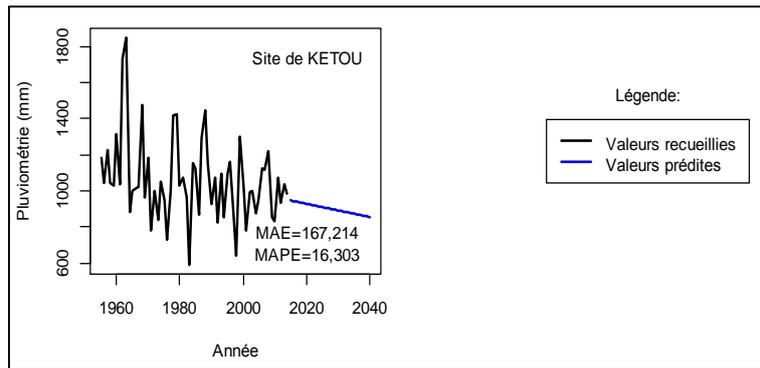


Figure 3b : Évolution prédite de la pluviométrie sur la période 2015 - 2040 à Bétérou, Savè et Kétou

3-1-3. Évolution de la température moyenne annuelle

Les variations temporelles de la température moyenne annuelle sont celles présentées sur les **Figures 4a et 4b** qui nous font globalement observer une tendance à allure croissante. L'analyse de ces résultats montre des valeurs d'accroissement des températures comprises entre 0,8°C et 1,9°C dans tout le bassin versant étudié. Un tel accroissement est l'indication que la probabilité, pour que le bassin de l'Ouémé connaisse un réchauffement important dans le futur, est donc élevée. En effet, ce résultat est en accord avec ceux obtenus par [16, 17]. L'une des conséquences indéniables d'un tel réchauffement sera la forte augmentation de l'évapotranspiration. Si l'augmentation de l'évapotranspiration n'est pas contrebalancée par celle des précipitations, le résultat serait favorable à l'assèchement des cours d'eau.

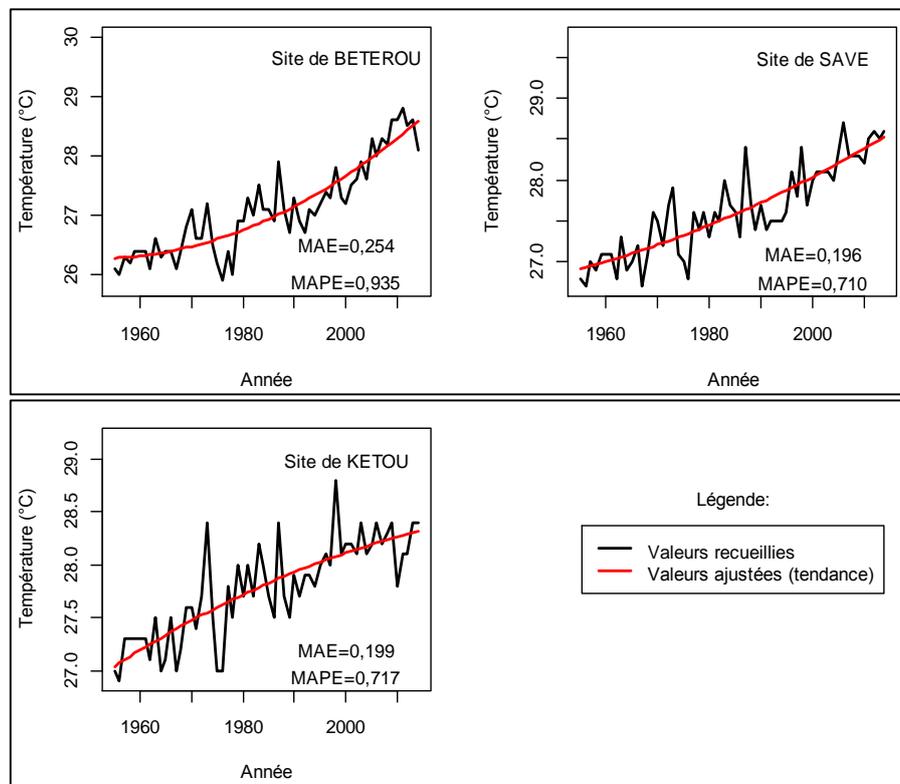


Figure 4a : Tendances évolutives de la température moyenne sur la période 1955 - 2014 à Bétérou, Savè et Kétou

Compte tenu de toutes les variations ainsi prévues pour tous les paramètres climatiques, une baisse de la ressource en eau de surface, en termes de volume disponible, peut être constatée, avec des conséquences préjudiciables aux activités socio-économiques largement dépendantes de cette ressource, tout le long du fleuve Ouémé, telles que l'agriculture, la production d'hydroélectricité et la pêche.

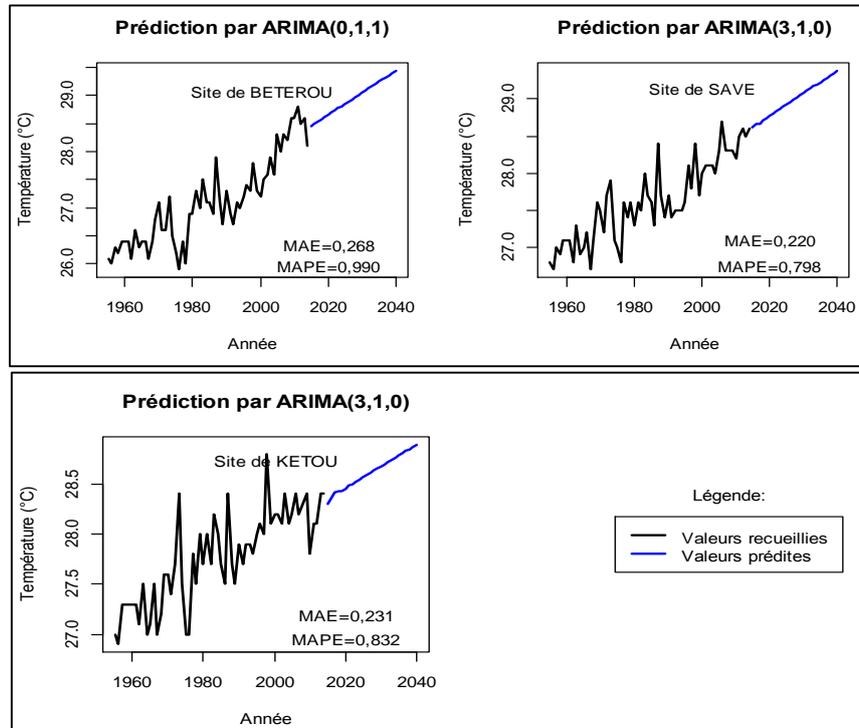


Figure 4b : *Évolution prédite de la température sur la période 2015 - 2040 à Bétérou, Savè et Kétou*

4. Conclusion

L'analyse statistique, des données collectées sur la température de 1955 à 2010, conduit à prévoir une tendance à l'augmentation de la température de plus de $1,1^{\circ}\text{C}$ en moyenne d'ici à l'an 2040 sur le fleuve Ouémé. Pendant ce temps, les prévisions concluent à une diminution substantielle des précipitations pouvant dépasser 12 % de la valeur actuelle. Cette étude anticipe pour prévenir sur les impacts futurs du changement climatique sur le régime hydrologique du fleuve Ouémé au Bénin. Ces prévisions nous permettent de noter que probablement, il y aura un ralentissement de l'activité économique et une réduction de la disponibilité de ressource en eau dans le bassin de l'Ouémé. Cela peut sérieusement affecter les projets de construction de barrages hydroélectriques dans le futur sur le fleuve Ouémé, si des dispositions idoines et urgentes ne sont pas prises pour renverser les tendances actuelles.

Remerciements

Les Auteurs remercient les responsables de l'ASECNA et du Laboratoire Pierre Pagny de l'Université d'Abomey-Calavi pour avoir accepté de mettre à leur disposition des données climatiques. Leurs gratitude vont également à l'endroit de ceux du Laboratoire de Biomathématiques et d'Estimations Forestières (LABEF) de l'Université d'Abomey-Calavi, pour les orientations scientifiques reçues et l'appui à la programmation en logiciel R.

Références

- [1] - GIEC, Bilan 2001 des changements climatiques. Contribution du Groupe de travail au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (OMM : Organisation Météorologique Mondiale), (PNUÉ : Programme des Nations Unies pour l'Environnement), Genève, Suisse, (2001) 97 p.
- [2] - R. J. CHARLSON AND J. H. EINTZENBERG, "Climate Change", Ed. John Wiley and Sons Limited, New York, (1995).
- [3] - GIEC, Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. OMM, PNUÉ, Genève, Suisse, (2007) 103 p.
- [4] - A. N. THIOMBIANO, "Variabilité climatique et impacts sur les ressources en eau au Burkina Faso : étude de cas du bassin hydrographique du fleuve Nakanbé", Thèse de doctorat en études de l'environnement, Université de Moncton, (2011).
- [5] - D. F. ASSOGBA, "Sites humides problématiques du Département de l'Ouémé", Rapport d'Etude, (2008) 48 p.
- [6] - J. E. PATUREL, M. OUÉDRAOGO, E. SERVAT, G. MAHÉ, A. DEZETTER AND J. F. BOYER, "The concept of hydropluviometric normal in West and Central Africa in a context of climatic variability". *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 48, (1) (2003) 125 - 137.
- [7] - O. AMOGU, "La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du fleuve Niger moyen", Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier Grenoble 1, (2009).
- [8] - E. W. VISSIN, "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 de l'Université de Bourgogne, (2007).
- [9] - L. LE BARBÉ, T. LEBEL AND D. TAPSOBA, "Rainfall variability in West Africa during year 1950 - 1990", *J. Clim*, 15 (1) (2002) 187 - 202.
- [10] - A. E. LAWIN, "Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la Haute Vallée de l'Ouémé à partir des données AMMA - CATCH Bénin", Thèse de Doctorat INP Grenoble, France, (2007).
- [11] - L. B. BOWERMAN AND T. R. O'CONNELL, "Forecasting and Time Series : An Applied Approach", Third Edition, The Duxbury Advanced Series in Statistics and Decision Sciences, Duxbury Press, Belmont, CA. ISBN: 0-534-93251-7, (1993).
- [12] - R CORE TEAM., A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <http://www.R-project.org/>
- [13] - V. S. H. TOTIN, C. HOUNDENOU, M. BOKO, ET A. AFOUDA, "Variabilité pluviométrie et bilan climatique dans le bassin de la Volta au Bénin", *Climat et développement*, 8 (2009) 81 - 94.
- [14] - A. AFOUDA, J-M BOUCHEZ., I. BRAUDI, F. CAZENAVE, C. DEPRAETERE, N. DESSAY, A. DIEDHIOU, S. GALLE, H. GALLEE, M. GOSSET, R. HAVERKAMP, H. LAURENT, L. LE BARBE, C. MESSEGER, H. ONIBON ET P. REGGIANI, "Variabilité climatique et variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest : Un système couplé", Atelier sur le Couplage des modèles atmosphériques et hydrologiques, Toulouse, France, (2001).
- [15] - T. LEBEL ET T. VISCHÉL, "Climat et cycle de l'eau en zone tropicale : un problème d'échelle", *C. R. Géosciences*, 337 (1-2) (2005) 29 - 38.
- [16] - M. BOKO, A. NIANG, C. NYONG, A. VOGEL AND M. GITHEKO MEDANY, in "Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment", Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, (2007).
- [17] - G. R. C. ESSOU AND F. BRISSETTE, "Climate Change Impacts on the Ouémé River, Benin, West Africa", *J Earth Sci Clim Change*, 4 (2013) 161.