

MODÉLISATION PROSPECTIVE DE LA DISPONIBILITÉ DES RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN DE L'OKPARA, AU BÉNIN

Romaric OGOUWALE^{1*}, Cyriaque AGBON²,
Anseque Coami GOMEZ³ et Maman-Sani ISSA¹

¹ Laboratoire Pierre Pagny, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE),

² Laboratoire de Cartographie (LaCarto), 10 BP 1082 Cotonou, Bénin

³ Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, Bénin

* Correspondance, e-mail : ogou25@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Cet article veut contribuer à une meilleure connaissance de la disponibilité des ressources en eau dans le bassin versant de l'Okpara à l'horizon 2025. Pour atteindre cet objectif, les méthodes de statistique descriptive et de la modélisation hydrologique (CEQUAU), principalement à partir des données climatologiques, hydrologiques et hydrométriques, ont été utilisées. Les résultats obtenus montrent la situation de la disponibilité des ressources en eau future dans le bassin versant. En effet, les résultats de modélisation ont montré, par rapport à ceux obtenus lors du calage du modèle, une réduction importante de l'écoulement de surface (de 35 à 37 %) et de la production moyenne en eau (28 %).

Mots-clés : *Okpara, bassin versant, ressources en eau, disponibilité, modélisation prospective.*

ABSTRACT

Prospective modeling of availability of water resources in the Okpara basin, Benin

This article aims to contribute to a better knowledge on the availability of water resources in the watershed of the Okpara 2025. To achieve this goal, the methods of descriptive statistics and hydrological modeling (CEQUAU), mainly from data climate and water quantity, were used. The results show that the situation of the future availability of water resources in the

watershed. Indeed, modeling results showed, compared to those obtained during the calibration of the model, a significant reduction in surface flow (35 to 37 %) and the average output in water (28 %).

Keywords : *Okpara, watershed, water resources, availability, prospective modeling.*

I - INTRODUCTION

L'importance de l'eau pour la vie sur terre et pour les activités de l'homme en général fait que scientifiques et gestionnaires s'inquiètent désormais des conséquences des changements du climat sur le cycle hydrologique, la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. Plusieurs travaux scientifiques [1, 2] ont confirmé, s'il en était besoin, la relation entre le climat et la disponibilité des ressources en eau. La question émergente, relative aux changements climatiques dus au réchauffement global, est celle de l'incidence d'une conjugaison de fortes températures avec une pluviosité déficitaire et une concentration plus grande de CO₂ atmosphérique. Dans ces différents travaux, il est montré un impact marqué des déficits pluviométriques des dernières décennies sur les écoulements. De façon globale, ces auteurs ont caractérisé la variabilité climatique et leurs impacts sur la disponibilité des ressources en eau. Au-delà de la variabilité spatio-temporelle permanente qu'ils mettent en exergue, selon la référence [3], un climat modifié caractérisé par l'élévation de la température moyenne du globe due à l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère, induira une amplification des phénomènes extrêmes (cyclones, sécheresse, inondations, etc.).

De même, [4] a mis en évidence l'impact des déficits pluviométriques sur l'écoulement du bassin versant du fleuve Niger à Koulikoro au Mali. Les auteurs ont aussi montré qu'une baisse de la pluviométrie entraîne la diminution de l'écoulement et l'augmentation du coefficient de tarissement. Par ailleurs, [5] a montré que les chroniques de la pluviométrie sur le bassin versant béninois du fleuve Niger ont connu une «rupture de stationnarité» en 1972. Dans le bassin versant de l'Okpara, selon [6], la dynamique climatique et ses impacts se caractérisent par une diminution des hauteurs de pluie et une augmentation des températures minimales et maximales. Cette situation contribue à une diminution de la disponibilité des ressources en eau en général dans le bassin versant et spécifiquement, celles qui sont mobilisées au niveau de la retenue d'eau de l'Okpara. Dans ce contexte, il importe d'évaluer la disponibilité des ressources en eau pour les populations et les activités socio-économiques du bassin versant de l'Okpara dans le contexte

d'un changement climatique. C'est ce qui justifie cette étude intitulée " Modélisation prospective de la disponibilité des ressources en eau dans le bassin de l'Okpara ". Le bassin versant de l'Okpara est situé entre 7°30' et 9°54' de latitude Nord d'une part, et 1°30' et 3°18' de longitude Est d'autre part. Il s'étend sur superficie évaluée à environ 12710 km² (Figure 1).

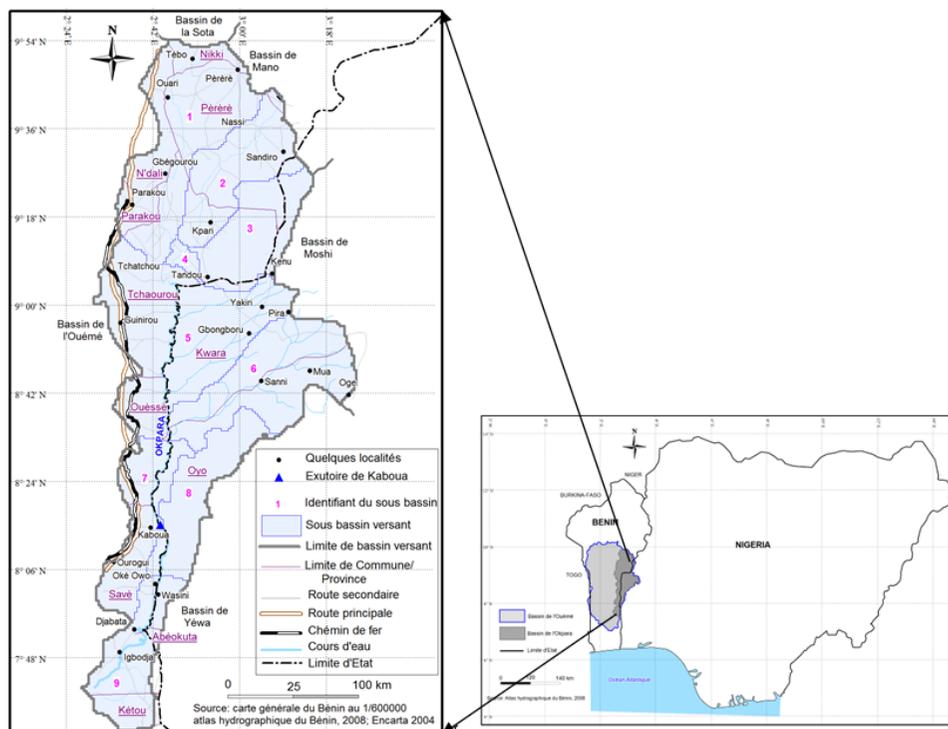


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua

Plusieurs communes sont drainées par les eaux de ce bassin versant. Il s'agit des communes de N'Dali, de Nikki, de Pèrèrè et de Parakou situées au nord du bassin versant et de Tchaourou, de Ouèssè, de Savè et de Kétou situées au sud. Le sud-est du bassin versant est situé en territoire nigérian.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Données utilisées

Les données utilisées dans le cadre de cette étude, sont les données climatologiques hydrologiques et hydrométriques dans le bassin versant de l'Okpara.

II-1-1. Données climatologiques

II-1-1-1. Données climatologiques historiques dans le bassin versant de l'Okpara

Ce sont les données pluviométriques et thermométriques sur la 1971 - 2010. L'analyse des séquences ou des variations climatiques a nécessité la segmentation de cette période à l'aide de la méthode des ruptures, utilisée sur la dynamique du système climatique ouest-africain et béninois [7 - 14].

II-1-1-2. Valeurs climatologiques simulées dans le bassin versant de l'Okpara

Le jugement empirique fondé sur les analogies temporelles et le modèle régional REMO ont été utilisés. Le modèle REMO est considéré comme fiable pour ce qui concerne la reproduction des caractéristiques observées du climat africain en général et au Bénin en particulier [15]. Plusieurs familles de scénarii sont développées par [16] et sont utilisés comme base pour les projections climatiques. Il s'agit de quatre scénarii d'émission (A1, A2, B1, B2), fondés sur les conditions susceptibles de résulter des choix opérés par les populations humaines en matière de politique sociale et économique, de démographie, d'activités professionnelles, d'énergie et d'utilisation des technologies [17].

II-1-1-3. Données hydrométriques et hydrologiques

Les données hydrométriques utilisées dans le cadre de cette recherche sont les débits journaliers et mensuels de la rivière Okpara à Kaboua. Elles ont permis de mettre en évidence le fonctionnement hydrologique du bassin versant. Les chroniques hydrologiques de 1971 à 2010 ont été tirées de la base de données de la Direction Générale de l'Eau. Les données complémentaires ont été collectées dans les résultats des travaux du projet IMPETUS dans le bassin versant de l'Ouémé.

II-2. Collecte des données

Les données ont été collectées dans les institutions de recherche dont les activités sont en liaison avec l'objet de la présente recherche. Elle a été conduite principalement au Laboratoire Pierre PAGNEY "Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement" (LACEEDE), au niveau du projet IMPETUS à la Direction Générale de l'Eau (DGE), à l'ASECNA, au CENATEL, à l'IGN, à la Bibliothèque de la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) et au centre de documentation de la Faculté des Lettres,

Arts et Sciences Humaines (FLASH). Les données collectées au niveau de ces institutions supra mentionnées, ont permis de faire le point des connaissances sur la problématique, de mieux cerner les contours du sujet et de collecter des informations brutes qui sont soumises au traitement. Le pré-traitement a consisté en la reconstitution des données hydrométriques et pluviométriques au niveau des stations qui présentent des données manquantes et de réaliser l'interpolation spatiale des données pour l'obtention des hauteurs de pluie moyenne du bassin versant de l'Okpara.

II-3. Méthodes de traitement et d'analyse de la disponibilité des ressources en eau dans le bassin versant de l'Okpara

L'analyse de l'évolution climatique et hydrologique est faite en utilisant la statistique descriptive et la modélisation. Elle a permis de mieux appréhender le changement hydro-pluviométrique à l'échelle mensuelle et annuelle dans le bassin versant.

II-3-1. Étude de la disponibilité des ressources en eau dans le bassin versant

La disponibilité des ressources en eau appelle à la notion de quantité. Selon [18], cette notion est définie par unité géographique et par des seuils de pénurie d'eau. Dans ce cadre, trois seuils sont définis : pénurie, stress hydrique et vulnérabilité hydrique. La vulnérabilité hydrique est associée à une quantité d'eau de 1700 à 2500 m³ par personne et par an, le stress hydrique à un volume d'eau de 1000 à 1700 m³ par personne et par an et la pénurie d'eau à un volume d'eau de moins de 1000 m³ par personne et par an. Pour [19], la disponibilité en eau est dictée en grande partie par le climat et en particulier par la périodicité et la localisation des pluies ainsi que par la demande évaporatoire largement dominée par la température. Ce qui montre le rôle primordial du climat dans la variation spatio-temporelle des quantités d'eau. L'étude de la disponibilité des ressources en eau et de la dynamique des ressources hydrologiques dans le bassin versant de l'Okpara est faite à partir de certains protocoles statistiques.

II-3-2. Détermination de l'écoulement dans le bassin versant ($L = L_{éc_i}$)

Pour établir un bilan hydrologique et qu'on dispose d'une ou de plusieurs stations hydrométriques bien suivies et bien étalonnées, l'écoulement est connu de manière précise. En effet, c'est le seul terme du bilan dont la mesure est directement faite dans le bassin versant. Les autres nécessitent toujours une régionalisation. Malheureusement, les stations hydrométriques du bassin versant de l'Okpara comportent des lacunes qu'il est nécessaire de combler. Par ailleurs, l'*Équation* du bilan, telle qu'elle a été exprimée plus

bas (**Équation 9**), suppose qu'on détermine les écoulements causés par les pluies tombées au cours de la période considérée. Une partie du volume V_{i-1} écoulé (une partie du volume de l'année précédente) de l'année $i-1$ (année précédente) causé par la pluie P_{i-1} (pluie année précédente) se répercute sur le volume V_i de l'année suivante i causé par la pluie P_i . Suivant, la loi de tarissement de Maillet [20], il peut être appliqué au débit moyen du dernier mois de l'année hydrologique Q_{mars} , pour apporter des corrections aux lames écoulées observées au cours de l'année hydrologique i , selon la démarche suivante :

$$Léc_i = Lem_i + (Q_{mars_i} - Q_{mars_{(i-1)}})x \frac{Tar}{S} \quad (1)$$

$Léc_i$: lame écoulée due aux pluies de l'année i (mm) ;

Lem_i : lame écoulée effectivement mesurée au cours de l'année i (mm) ;

Tar : durée du tarissement (en seconde) ;

S : superficie du bassin versant (km^2) ;

Q_{mars} : débit de mois de mars (m^3).

$$Q_{mars.Tar} = Q_{mars} \int_0^{\infty} \text{Exp}\left(-\frac{t}{Tar}\right) dt \quad (2)$$

dt : volume correspondant à un tarissement complet.

L'évaluation de la recharge constitue le dernier paramètre indispensable à l'étude de la variabilité du bilan hydrologique sur chacun des sous bassin versants.

II-3-3. Estimation de la recharge (I)

La méthode d'estimation de l'infiltration retenue dans cette étude représente le solde du bilan hydrologique. Les autres termes du bilan sont eux-mêmes connus avec une certaine imprécision. Cette imprécision va se répercuter sur l'infiltration estimée. Du fait de ces incertitudes, l'infiltration à la recharge de la nappe ne peut pas être assimilée directement. Mais, l'analyse de ce paramètre peut permettre de reconstituer l'évolution de la recharge sur le bassin versant de l'Okpara. Alors, elle peut être définie suivant la **Formule**.

$$I = P - (L + E) \quad (3)$$

avec, I : infiltration en mm ; P : pluie en mm ; L : écoulement en mm ;

E : évaporation en mm.

II-3-4. Déficit d'écoulement (DE)

Le déficit d'écoulement représente la différence entre les précipitations P tombées dans le bassin versant et le volume d'eau $\int Qdt$ écoulé à l'exutoire :

$$DE = P - \int Qdt \quad (4)$$

Cette valeur, caractéristique du milieu d'étude, varie assez peu dans le temps. Elle est théoriquement égale à l'évapotranspiration à la surface du bassin versant [21, 22]. L'évaluation du déficit hydrique dans le bassin versant de l'Okpara a été faite sur les périodes de 1970 - 1988 ; 1989 - 2009. Ces sous-périodes ont été retenues sur la base de la rupture observée dans la série en 1987. Ce déficit a été calculé de la manière suivante :

$$De = \left(\frac{x_2 - x_1}{x_1} \right) x 100 \quad (5)$$

x_1 , la moyenne de la période 1971 - 1990 ; x_2 , la moyenne de la période 1991 - 2010.

II-3-5. Étude du tarissement par la loi de Maillet

L'observation de l'évolution d'une décrue à partir d'un certain stade de l'hydrogramme annuel, montre la décroissance régulière des débits naturels (ou phase de tarissement). C'est la période pendant laquelle la vidange des nappes souterraines constitue la seule contribution à l'écoulement des cours d'eau d'un bassin versant. Pour évaluer le tarissement dans le bassin versant de l'Okpara, il a été utilisé la loi de la décroissance exponentielle de Maillet [20] suivant la **Formule** :

$$Q_i = Q_o e^{-\alpha(t_i - t_o)} \quad (6)$$

Q_i et Q_o , débits aux instants t_i et t_o exprimés en jours, et α , coefficient de tarissement dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère, dont la valeur est l'inverse du temps :

$$\alpha = \frac{1}{T} \quad (7)$$

L'estimation de α dans le bassin versant de l'Okpara est faite en analysant le faisceau des hydrogrammes observés à la station hydrométrique de Kaboua durant la période des basses eaux. La détermination de Q_o , consiste à repérer

une phase « débit *charnière* » qui puisse servir de départ au tarissement. Ce point se trouve sur la courbe de récession et il ne doit pas être éloigné de la période des hautes eaux de façon que l'on puisse, par corrélation serrée, confronter le débit aux pluies de la période correspondante. Cette méthode, déjà utilisée par [21, 23] a permis de déterminer dans le bassin versant de l'Okpara, l'évolution temporelle des coefficients de tarissement et d'apprécier la durée de tarissement de la rivière Okpara.

II-3-6. Recherche de liaison ou de dépendance statistique entre pluie et lame d'eau écoulée

Le coefficient de corrélation linéaire a été utilisé dans le cadre de cette recherche, pour appréhender le degré de liaison ou de dépendance qui existe entre les lames précipitées et les lames écoulées dans le bassin versant de l'Okpara. Il est défini par :

$$r = \frac{1/N \sum (X_i - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sigma(X) \cdot \sigma(Y)} \quad (8)$$

N est le nombre total d'individus ;

x_i et *y_i* sont les valeurs des séries ;

\bar{X} et \bar{Y} sont les moyennes des variables ;

$\sigma(x)$ et $\sigma(y)$ représentent leurs écart-type respectifs.

II-3-7. Étude du bilan hydrologique dans le bassin versant

Cette étude est indispensable pour estimer les ressources en eau du bassin versant, évaluer l'impact des fluctuations pluviométriques sur les autres termes du bilan et mettre en évidence la relation existant entre la récession pluviométrique observée depuis 1970 et la sécheresse hydrologique de ces quatre dernières décennies. L'**Équation** du bilan hydrologique est exprimée suivant la **Formule** de [23] :

$$P = E + L + I + (S_1 - S_0) \quad (9)$$

P = pluie en mm ; *E* = évaporation en mm ; *L* = écoulement en mm ;

I = recharge (infiltration) en mm ; (*S₁* - *S₀*) = variation du stock d'eau présent dans le bassin versant en mm.

Des cinq termes de cette **Équation**, deux (*I* et *S₁* - *S₀*) ne sont pas quantifiables par des mesures directes. Pour diminuer le nombre d'inconnues, la différence *S₁*-*S₀* est supposée négligeable. Par ailleurs, les analyses ont été

faites en année hydrologique, déterminée par la date des étiages absolus dans ce bassin versant. Aussi, les analyses faites sur une année hydrologique permettent-elles de minimiser des erreurs dans la variation du stock d'eau du bassin versant et cela facilite l'estimation de l'infiltration, qui est déduite à partir des autres termes. Dans le cadre de cette étude, il est utilisé le modèle hydrologique CEQUEAU. Le modèle CEQUEAU est un modèle hydrologique conceptuel spatialisé, développé par l'Institut National de la Recherche Scientifique Eau Terre et Environnement du Canada [24]. CEQUEAU est un modèle déterministe qui tient compte à la fois des caractéristiques physiques du bassin versant et de leur variation dans l'espace. En 1983, ce modèle a été utilisé pour la première fois en Tunisie sur le bassin versant de l'Oued Siliana, qui couvre une superficie de 2059 km². La fonction de production de ce modèle (*Figure 2*), concerne l'écoulement vertical de l'eau, dont les principales composantes sont la pluie, l'évapotranspiration, l'infiltration et les variations des réserves superficielles et profondes.

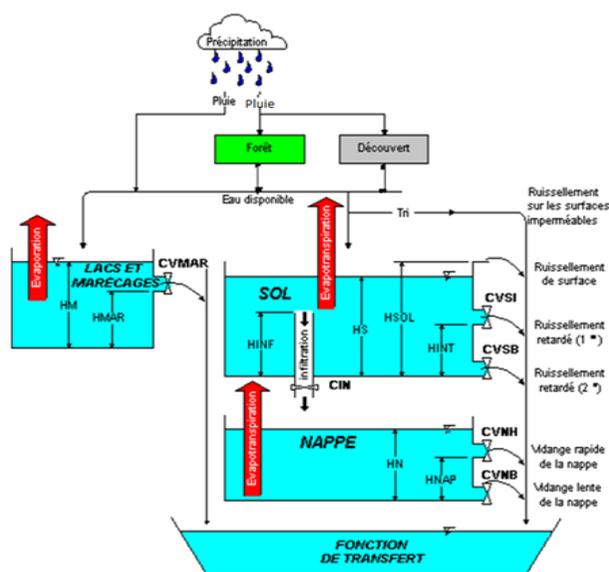


Figure 2 : Schéma conceptuel du modèle hydrologique CEQUEAU
 Source : [25]

III - RÉSULTATS

L'analyse de la dynamique hydrologique est fondée sur la variation du bilan hydrologique sur la période 1971 - 2010, de la disponibilité des ressources en eau à l'horizon 2050.

III-1. Variation des termes du bilan hydrologique dans le bassin versant de l'Okpara

La **Figure 3** traduit les variations des différents termes du bilan hydrologique à Kaboua sur la période 1971 - 2010.

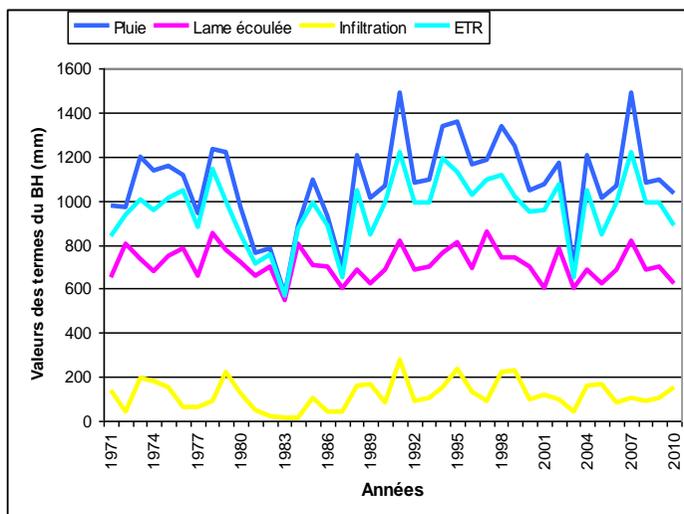


Figure 3 : Variation des termes du bilan hydrologique à Kaboua

La **Figure 3** montre que, sur l'ensemble du bassin versant, la pluie reste le facteur le plus important, conditionnant tous les autres paramètres du bilan hydrologique. Ainsi, des pluies moyennes de 1592,74 mm, 1315,19 mm et 828,90 mm ont entraîné des écoulements moyens respectivement de : 288,03 mm, 202,01 et 14,04 mm au cours des années 1970, 1979 et 2001. De même, pour une hauteur de pluie de 100 % dans le bassin versant de l'Okpara, 83 % sont destinés à l'évaporation, 5 à 7 % à l'infiltration et 12 à 15 % à l'écoulement. A l'échelle des sous bassin versants, la sensibilité des écoulements est variable. En effet, une répartition spatiale de l'écoulement (**Figure 4**) montre que les sous bassin versants de Nikki, N'dali et Kaboua ont un écoulement de 87 à 89 % et 77 à 79 %.

Cette répartition spatiale a des impacts sur la disponibilité des ressources en eau dans le bassin versant. En effet, la rareté et l'insuffisance des pluies obligent les populations à creuser le lit des marigots pour l'approvisionnement en eau.

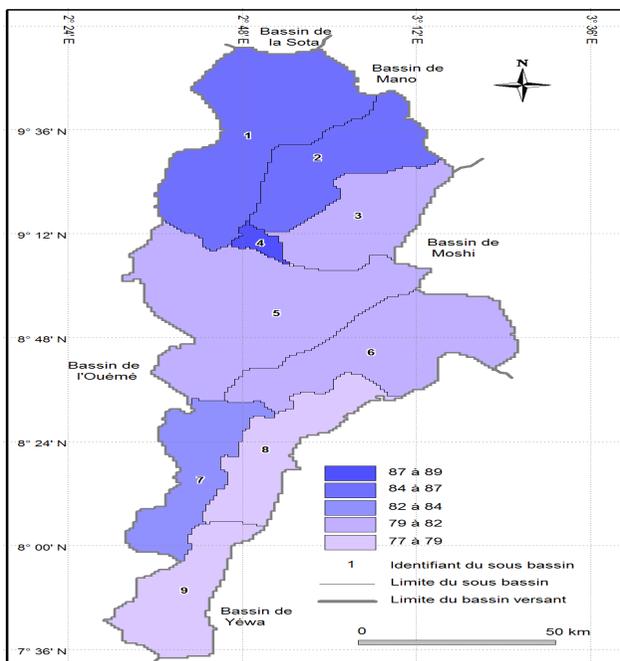


Figure 4 : Répartition spatiale de l'écoulement dans le bassin versant de l'Okpara de 1971 - 2010

III-2. Scénarios de disponibilité des ressources en eau à l'horizon 2050 dans le bassin versant de l'Okpara

III-2-1. Calage et validation du modèle CEQUEAU dans le bassin versant de l'Okpara

Le *Tableau 1* montre les valeurs optimales de « Nash » obtenues dans le bassin versant en calage et en validation.

Tableau 1 : Valeurs optimisées du « Nash » en calage et en validation dans le bassin versant

Périodes de calage	X1	X1	Nash \sqrt{Q}
1971 - 1975	6,83	0,40	77,8
Périodes de validation	X1	X1	Nash \sqrt{Q}
1998 - 2005	7,15	0,38	71,9

Les valeurs du Nash obtenues sur les différentes périodes permettent d'évaluer l'efficacité du modèle CEQUEAU à simuler les écoulements dans le bassin versant de l'Okpara. Le modèle CEQUEAU est robuste en

validation des périodes humides (Nash comprise entre 30 et 60 %), en période sèche, le Nash est compris entre 70 et 80 %. La faible variation des Nash en validation et calage montre la fiabilité des simulations pour cette période. La **Figure 5** montre l'évolution des débits observés et simulés en optimisation sur les sous périodes supra évoquées à Kaboua.

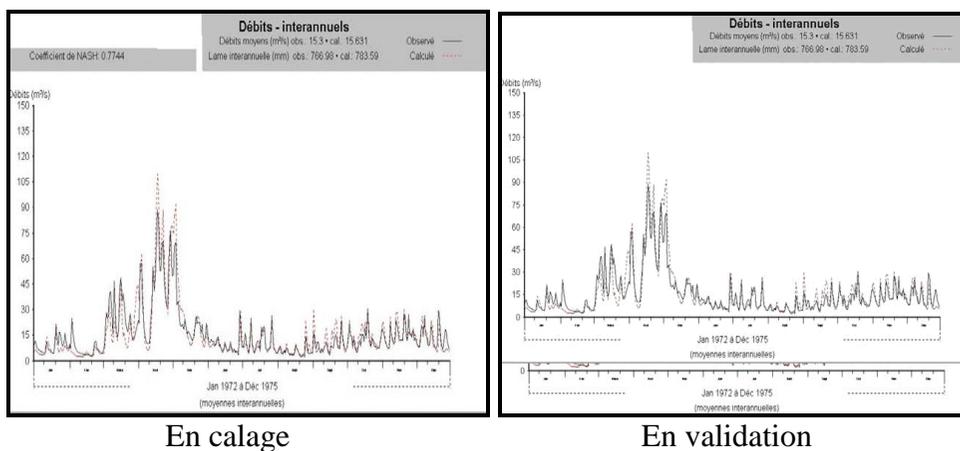


Figure 5 : Variabilité des pluies et débits observés et simulés sur les sous périodes de calage et de validation à Kaboua

La **Figure 5** montre une bonne simulation des débits au cours des deux périodes humides à Kaboua. Ces résultats permettent de confirmer que le modèle CEQUEAU est robuste à simuler les écoulements tant en période sèche qu'en période humide. Cette bonne simulation du modèle est confirmée par les coefficients de corrélation obtenus (**Figures 6**).

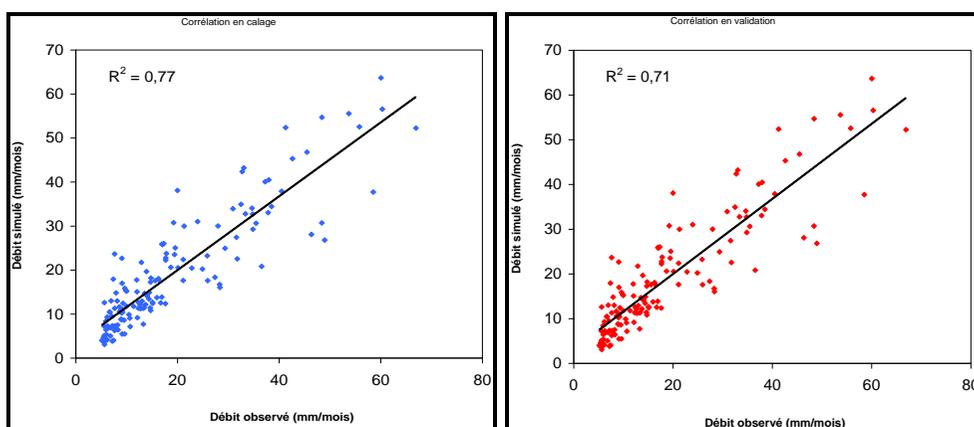


Figure 6 : Corrélation des débits observés et simulés sur les sous périodes de calage et de validation à Kaboua

La **Figure 6** indique une forte relation entre les deux termes avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,60 ; que ce soit en période de calage ou en période de validation. Par ailleurs, le regroupement des points de distribution autour de la droite de tendance indique la forte corrélation que ce soit en calage ou en validation. Les tests de significativité aux seuils 95 % et 99 % et les coefficients de détermination ($R^2 > 50 \%$) confirment la bonne reproduction, par le modèle CEQUAU, des débits observés et simulés dans le bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua.

III-2-2. Disponibilité des ressources en eau future dans le bassin versant de l'Okpara

Les simulations faites avec le modèle hydrologique CEQUEAU, sous les scénarii climatiques A1B et B1 en référence à la normale 1971 - 2000 a permis d'obtenir les résultats des **Figures 7 et 8**.

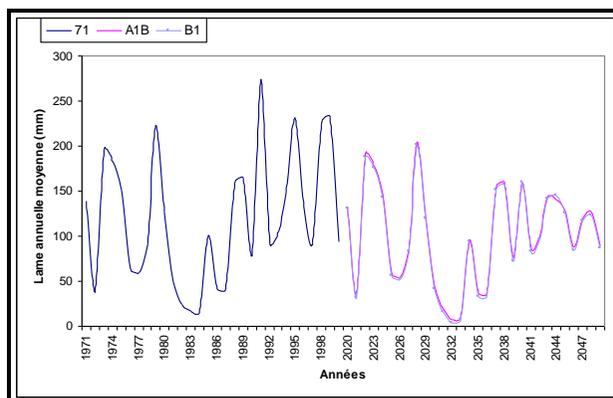


Figure 7 : Lame annuelle moyenne en 2050

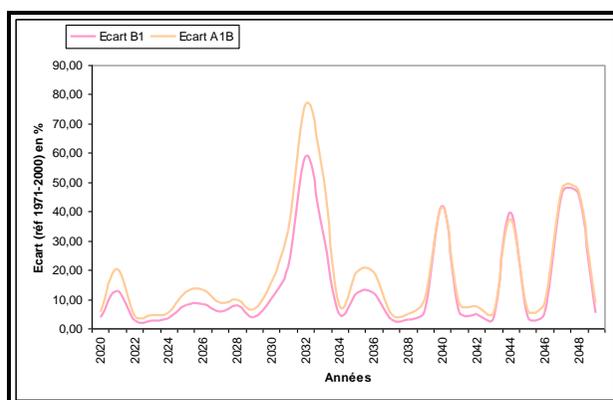


Figure 8 : Ecart de la disponibilité des ressources en eau à l'horizon 2050

Les ressources en eau connaîtraient une baisse à l'horizon 2050 dans le bassin versant quels que soient les scénarii. Mais, cette baisse serait plus significative sous le scénario A1B. En effet, les écarts en référence à la normale 1971 - 2000 seraient d'environ 15 à 60 % sous le scénario B1 et de 20 à 70 % sous le scénario A1B. En rapportant ce déficit, à la retenue de l'Okpara, il résulte que la baisse des hauteurs de pluie induirait des difficultés d'approvisionnement en eau dans cette retenue. En effet, suivant les statistiques obtenues à la SONEB de Parakou, il a été évalué l'évolution du volume d'eau prélevé dans la retenue sur la période 1971 - 2000. A l'horizon 2050, si on considère l'évolution de la population de Parakou et ses environs qui est estimée à 407 024 habitants pour 2050, la quantité d'eau à prélever de la retenue pour satisfaire les besoins en eau potable de cette population est de 7 233 003 m³/an alors que le volume utile de stockage du barrage pour les pratiques d'exploitation recommandées est estimé à 2,65 millions de m³/an, soit un écart d'environ 30,10 %. D'où la nécessité pour la Société Nationale d'Eau du Bénin d'anticiper sur les problèmes qu'engendreraient une surexploitation de la retenue et l'approvisionnement en eau potable de la ville de Parakou et ses environs. Globalement, il est constaté une diminution importante des ressources en eau de surface d'environ 35 % dans le bassin versant de l'Okpara. Les écarts, en référence à la période 1971 - 2010, pour les séries climatiques et 1978 - 2007, seront respectivement de (-32) à (-34) à (-41) à (-43) % pour le scénario A1B et (-24) à (-25) à (-20) à (-21) % pour le scénario B1 (**Figure 9**).

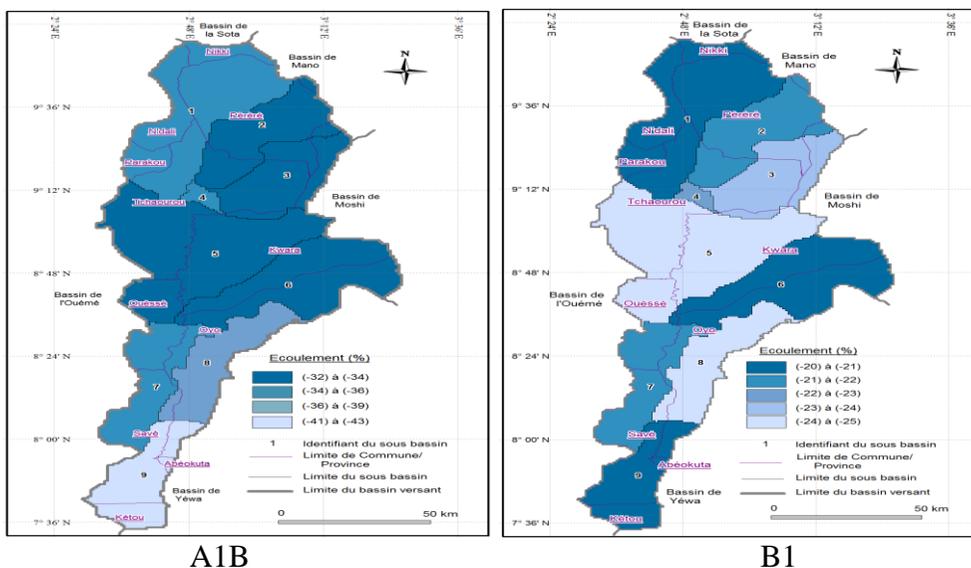


Figure 9 : Ecart de l'écoulement sous le scénario combiné des changements climatiques à l'horizon 2050

L'analyse des conditions hydrologiques dans le bassin versant montre que la forte variabilité des hauteurs de pluie au cours de la période 1971 - 2010 a eu des répercussions considérables sur l'écoulement moyen du bassin versant de l'Okpara.

IV - DISCUSSION

L'utilisation des données sorties du Modèle Régional REMO en vue de l'analyse de la physionomie climatique du bassin versant étudié en référence à la série trentenaire 1971 - 2000 montre des résultats satisfaisants. Et si la période de trente ans est suffisante, il n'en demeure pas moins vrai que les paramètres climatiques sont fondamentalement variables d'une année à une autre [7, 11, 26]. Dans ces conditions, toute projection climatique devient trop théorique et les résultats méritent d'être relativisés. Les ressources en eau dans le bassin versant de l'Okpara sont sensibles à l'évolution du climat. Ceci concorde avec les conclusions de [4, 27] qui ont montré la vulnérabilité des systèmes hydrologiques de l'Afrique de l'Ouest. Entre la période 1971 - 1989 et celle de 1990 - 2010, l'écart pluviométrique s'est élevé à 25 % et a vu son débit augmenté de 55 %. Il est alors mis en évidence une non linéarité dans le transfert entre les écarts pluviométriques et hydrométrique [4].

V - CONCLUSION

Le bilan hydrique potentiel négatif compromettra la disponibilité quantitative des ressources en eau et prédispose le bassin versant de l'Okpara à une diminution constante des eaux pluviales qui constituent plus de 80 % du potentiel d'eau utilisée par les populations, et une réduction progressive des débits moyens pouvant atteindre plus de 50 %. Face à cette situation, les modes de gestion de l'eau seront fondés sur la diversification des points d'approvisionnement, l'utilisation des écosystèmes autrefois abandonnés. L'approche utilisée pour évaluer la disponibilité des ressources en eau dans le bassin versant n'a pas tenu compte de toutes les réalités sociologiques des communautés Bariba et Tchabè qui peuplent le bassin versant et qui ont des usages différents. En effet, les modes de gestion de ces communautés varient en réalité suivant le statut social et les groupes socioculturels.

RÉFÉRENCES

- [1] - J. E. PATUREL et E. SERVAT, Procédure d'identification de «rupture» dans les séries hydrologiques; modification du régime pluviométrique en Afrique de l'ouest non sahélienne. In «L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement ». IAHS, (238) (1996) 99 - 110.

- [2] - FAO, *Global forest resources assessment 2005*. Progress towards sustainable forest management. FAO Forestry Paper, (2006) 147.
- [3] - GIEC, Résumé à l'intention des décideurs (traduction non-officielle). Contribution du groupe de travail 1 au 4ème rapport d'évaluation du GIEC. Bilan 2007 des changements climatiques : les bases scientifiques physiques, (2007) 25 p.
- [4] - J. BRICQUET et G. MAHE, Changements climatiques et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). In : *L'Hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier (Actes de la conférence de Paris, 2-4 Mai 1995) (édité par P. Chevallier & B. Pouyaud), IAHS Publ, (238) (1995) 113 - 124.*
- [5] - W. E. VISSIN, Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin versant béninois du fleuve Niger. Mémoire de DEA, CRC/Université de Bourgogne, Dijon, (1992) 53 p.
- [6] - R. OGOUWALE, J. C. HOUNDAGBA, C. S. HOUSSOU, Dynamique hydro-Climatique et stratégies de gestion des ressources en eau dans le bassin versant du zou. Publié in Actes du 2e colloque de l'UAC des Sciences, Cultures et Technologies, (2001) (2009) 31- 42.
- [7] - M. BOKO, Climats et communautés du Bénin : Rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres et Sciences Humaines. Université de Bourgogne, Dijon. 2 volumes, (1988) 608 p.
- [8] - V. MORON, Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'Equateur (1933-1990) et relation avec les températures de surface océaniques et de la dynamique de l'atmosphère. Thèse de doctorat, CRC/ Université de Bourgogne, Dijon, tome 1, (1994) 225 p
- [9] - S. E. NICHOLSON et I. M. PALAO, A re-evaluation of variability in the sahel. Part I. Characteristics of rainfall fluctuations. *International Journal of Climatology*, (13) (1994) 371 - 389.
- [10] - C. HOUNDENOU, Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide, diagnostic et modélisation : L'exemple du Bénin. Thèse de Doctorat Unique. Université de Bourgogne. Dijon, (1999) 341 p.
- [11] - E. OGOUWALE, Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire. Thèse présentée pour obtenir le Diplôme de Doctorat Unique de l'Université d'Abomey-Calavi, (2006) 302 p.
- [12] - E. W. VISSIN, Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin versant béninois du fleuve Niger. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne. Dijon, France, (2007) 285 p.
- [13] - V. S. H. TOTIN, Tendances hydroclimatiques et scénarios de gestion des ressources en eau sur les plateaux du Sud Bénin. Mémoire de DEA, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, (2005) 83 p.

- [14] - V. S. H. TOTIN, Sensibilité des eaux souterraines du bassin versant sédimentaire côtier du Bénin à l'évolution du climat et aux modes d'exploitation : Stratégies de gestion durable. Thèse de Doctorat Unique de l'Université d'Abomey-Calavi, (2010) 272 p.
- [15] - H. PAETH, K. BORN, R. PODZUN et D. JACOB, Regional dynamic downscaling over West Africa: Model evaluation and comparison of wet and dry years. *Meteorologische Zeitschrift*, (14) (2005) 349 - 367.
- [16] - N. NAKICENOVIC, Global Greenhouse Gas Emissions Scenarios: Five Modelling Approaches. *Technological Forecasting and Social Change*, 63(1-2), (2000) 105 - 371.
- [17] - IPCC, Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Rapport spécial sur l'Evaluation de la vulnérabilité en Afrique. Island Press, Washington, (2001) 53p.
- [18] - M. FALKENMARK et C. WIDSTRAND, *Population and Water Resources, A Delicate Balance*, *Population Bulletin*, 47(3) (1992) 1 - 36.
- [19] - F. GADELLE, *Le monde manquera-t-il bientôt d'eau ? Sécheresse* 1(6), (1995) 9 - 14.
- [20] - F. ROCHE, Hydrologie de surface, OROSTOM, France, (1963) 431 p.
- [21] - E. AMOUSSOU, Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat Unique, Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie (CRC) CNRS – UMR 5210, (2010) 315 p.
- [22] - G. ACHADE, Impacts de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau superficielle du bassin versant du Zou. Mémoire pour l'obtention de DEA, UCA/FLASH/EDP, (2010) 84 p.
- [23] - L. Le BARBE, *Les ressources en eau superficielles de la République du Bénin*. IRD/DH, Cotonou, (1993) 540 p.
- [24] - G. MORIN, Préviation des températures de l'eau en rivière à l'aide d'un modèle conceptuel. *Hydrol. Sci. J.*, 32(1) (1981) 31 - 41.
- [25] - G. MORIN, et P. PAQUET, Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU. Guide de l'utilisation. Version 1, INRS-EAU, Rapport de recherche n° 435, (1995) 54 p.
- [26] - F. AFOUDA, L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de Doctorat nouveau régime, Univ. Paris IV (Sorbonne), Institut de Géographie, (1990) 428 p.
- [27] - E. SERVAT, Various aspects of pluviometry variability in West an central Africa not sahelian. *J. Water Sci.*, (12) (1999) 363 - 387.