

## MODELISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA COMOE DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

### [ MODELLING HYDROLOGICAL WATERSHED OF COMOE IN CLIMATE CHANGE CONTEXT ]

*Kouakou Koffi Eugene<sup>1</sup>, Kouassi Amani Michel<sup>1</sup>, Kouadio Zilé Alex<sup>2</sup>, Goula Bi Tie Albert<sup>3</sup>, and Savane Issiaka<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi),  
Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB),  
BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>Unité de Formation et de Recherche en Environnement,  
Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.

<sup>3</sup>Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Gestion de l'Environnement (UFR-SGE),  
Université Nangui Abroguoua, 02 BP 801, Abidjan, Côte d'Ivoire

---

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** This study aims to assess the evolution of water balance parameters watershed Comoe in a context of climate change. Using the GR2M hydrological model, climate data from the climate model RegCM3 under the A2 emission scenario were simulated to get infiltration, runoff and evaporation and plant transpiration for the periods 1991-2000, 2031-2040 and 2091-2100. Similarly, monthly hydrological and climatic data were used to calibrate the parameters of GR2M hydrological model over the period 1961-1990.

The calibration of the hydrological model gave Nash values between 57% to 72%. At validation, Nash criterion varies from 51% to 75%.

The results of projection, revealed a decrease in runoff of 18.8% to 34% in 2031-2040 and 40% to 73% in 2091-2100 horizon in different localities. Refills of sheets that are through infiltration could decrease by 7% to 13% in 2031-2040 horizon and 49.3% to 70% in 2091-2100. The decrease in these two consecutive hydrological parameters is, firstly, to falling precipitation of 7.17% and, secondly, an increase in the evaporation and plant transpiration via the temperature increase of 3.6°C in the 2091-2100 horizon.

These results show the vulnerability of Ivory Coast watersheds and especially the Comoe. Then there allow taking appropriate measures to ensure sustainability of development projects.

**KEYWORDS:** hydrological modeling, watershed, Comoe, climate change, Context.

**RESUME:** Cette étude a pour objectif d'évaluer l'évolution des paramètres du bilan hydrologique du bassin versant de la Comoé dans un contexte de changement climatique. A l'aide du modèle hydrologique GR2M, les données climatiques issues du modèle climatique RegCM3 sous le scénario d'émission A2 ont été simulées pour obtenir l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration réelle (ETR) sur les périodes 1991-2000, 2031-2040 et 2091-2100. De même, des données hydrologiques et climatiques mensuelles observées ont permis de caler des paramètres du modèle hydrologique GR2M sur la période 1961-1990.

Le calage du modèle hydrologique a donné des valeurs de Nash comprises entre 57% à 72%. Au niveau de la validation, le critère de Nash varie de 51% à 75%.

Les résultats des projections ont révélé une diminution des écoulements de 18,8% à 34% en 2031-2040 et de 40% à 73% à l'horizon 2091-2100 selon les localités. Les recharges des nappes qui se font par le biais de l'infiltration pourraient diminuer de 7% à 13% à l'horizon 2031-2040 et de 49,3% à 70% en 2091-2100. La baisse de ces deux paramètres hydrologiques est consécutive, d'une part, à la chute des précipitations de 7,17% et, d'autre part, d'un accroissement de l'ETR via l'augmentation de la température de 3,6 °C à l'horizon 2091-2100.

Ces résultats obtenus montrent le niveau de vulnérabilité des bassins versants de Côte d'Ivoire et particulier celui de la Comoé et permettent de prendre des mesures appropriées pour assurer un développement durable des projets d'aménagement.

**MOTS-CLEFS:** Modélisation hydrologique, bassin versant, Comoé, Contexte, changement climatique.

## **1 INTRODUCTION**

Les changements climatiques ont provoqué la rupture de l'équilibre climatique mondial et des climats régionaux. Ils sont devenus de ce fait une menace quotidienne pour la planète en raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel. Ils ont pour effets le réchauffement de la planète, la perturbation des cycles saisonniers [1], la réduction de la production agricole, la détérioration de la sécurité alimentaire [2], l'incidence accrue des inondations et de la sécheresse, la propagation des maladies et l'augmentation des risques de conflits dus à la raréfaction des terres et de l'eau ainsi que l'avancée des mers sur les continents suite à la fonte des calottes glaciaires [3].

Le cycle de l'eau étant l'une des composantes majeures du climat, tout changement de ce dernier a des implications importantes sur les ressources en eau, [4].

A cet effet, les études menées en Afrique de l'Ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire ont montré que la variabilité et le changement climatique impactent fortement les hydro systèmes [4-6].

En effet, les impacts des variations du climat s'avèrent alarmants au niveau des ressources en eau d'autant plus que les résultats des études menées sur les fluctuations climatiques montrent que la pluviométrie a baissé de 10% à 30% selon les zones [5, 7- 9]. Cette situation a pour conséquence la baisse des débits des grands fleuves de la région de 20% à 60% depuis les années 70 [5- 8] réduisant significativement les superficies des principales zones humides naturelles [10].

De ce fait, analyser et prévoir les paramètres du bilan hydrique d'une zone devient indispensable pour la proposition des solutions adaptées aux projets de développement liés à l'hydrologie, à l'agronomie et à l'aménagement du territoire.

C'est dans cette optique que cette étude a été initiée pour déterminer l'évolution des paramètres hydrologiques dans un contexte de changement climatique.

## **2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

Le bassin versant de la Comoé (**Figure 1**) fait partie des bassins transfrontaliers de l'Afrique de l'Ouest. Il est situé entre les longitudes 2°7W et 5°81W et les latitudes 5°2N et 11°04N. Son cours d'eau prend sa source dans la région de Banfora au Sud du Burkina Faso et se jette dans l'océan atlantique au niveau de Grand-Bassam en Côte d'Ivoire, suivant la direction

Nord-Sud. Son cours d'eau est long de 1160 Km et couvre une superficie d'environ 78 100 Km<sup>2</sup>. Ce bassin est sous l'influence de trois climats : le climat tropical ou soudanais au nord (zone III), le climat équatorial de transition atténué au centre (zone II) et le climat équatorial de transition (zone I).

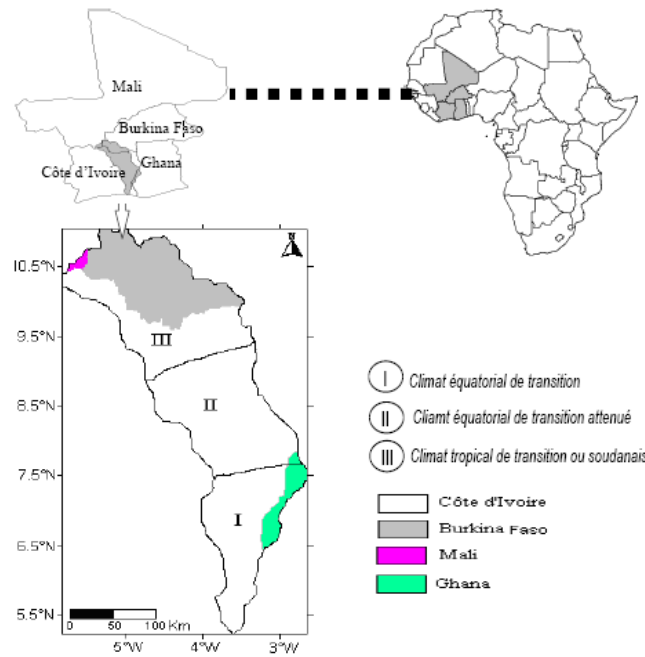


Figure 1 : Présentation du bassin versant de la Comoé et son découpage climatique

### 3 DONNEES, OUTILS ET METHODES

#### 3.1 DONNEES DU MODELE

Deux types de données ont été utilisés dans cette étude. Il ya d'abord les données observées constituées de précipitations, des évapotranspirations et de débits mensuels ayant servi au calage et à la validation du modèle hydrologique GR2M sur la période 1961-2000. Ces données ont été fourni par la météorologie nationale et de l'hydrologie de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso.

Le deuxième type de données concerne les précipitations mensuelles et de l'évapotranspiration potentielle mensuelles simulées par le modèle climatique RegCM3 aux horizons 2031-2040 et 2091-2100 sous le scénario d'émission A2 par rapport à la période de référence 1991-2000.

#### 3.2 DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU MODELE HYDROLOGIQUE GR2M

Le modèle hydrologique GR2M (Génie Rural à deux paramètres Mensuel) est un modèle conceptuel pluie-débit comportant deux réservoirs régulés par deux paramètres ajustables et fonctionnant au pas de temps mensuel (Mouelhi, 2003). C'est un modèle hydrologique qui a été mis en place par le Cemagref [11-12].

C'est un modèle performant et robuste [6, 8, 13-16].

#### 3.3 METHODE D'EVALUATION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU

##### 3.3.1 PRINCIPE

La méthode employée pour étudier les impacts du changement climatique sur les ressources en eau se résume en quatre étapes :

- (a) - la préparation des données d'entrée du modèle ;
- (b) - le calage et la validation du modèle conceptuel GR2M avec les données réellement observées ;
- (c) - la construction de séries climatiques réalistes (pluies et ETP) pour les horizons futurs (2031-2040 et 2091-2100) à partir des données climatiques effectivement observées sur la période de référence (1991-2000) et celles simulées sur les périodes 2031-2040 et 2091-2100.

(d) - Simulation des écoulements à l'aide du modèle conceptuel GR2M à partir des paramètres calés à l'étape (b) et des séries chronologiques construites à l'étape (c).

**3.3.2 PREPARATION DES DONNEES D'ENTREE ET DE SORTIE DU MODELE GR2M**

**3.3.2.1 DONNEES D'ENTREE : PRECIPITATIONS ET ETP MOYENNES MENSUELLES**

Deux types de données sont utilisés à l'entrée du modèle GR2M. Il s'agit des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle. Etant donné que les paramètres du modèle sont très sensibles aux variations de ces données, leur qualité et leur utilisation dans le modèle requiert des traitements appropriés. C'est dans ce sens que la méthode des polygones de Thiessen a été appliquée pour le calcul des précipitations et des évapotranspirations potentielles moyennes mensuelles.

**3.3.2.2 DONNEES DE SORTIE DU MODELE : LAMES D'EAU ECOULEES SUR LES BASSINS**

Les lames d'eau observées, exprimées en millimètre, interviennent aussi comme données d'entrée du modèle. Son utilisation a pour but de la comparer aux lames d'eau calculées par le modèle en phase de calage et de validation. Ainsi, sa superposition avec les lames d'eau simulées par le modèle montre une meilleure adéquation entre les résultats du modèle et les valeurs observées.

Le calcul de la lame d'eau mensuelle (LE) s'obtient par la formule suivante :

$$LE = 86,4 \times N_j \frac{Q (m^3 / s)}{S (Km^2)} \tag{1}$$

Où :

- LE : lame d'eau écoulée sur le bassin versant (mm/mois)
- Q : débit du cours d'eau mesurée à une station donnée (m<sup>3</sup>/s)
- S : surface de la section du bassin versant à une station donnée (Km<sup>2</sup>)
- 86,4 : facteur de conversion
- N<sub>j</sub> : nombre de jours dans un mois donné

**3.3.3 CALAGE ET VALIDATION DU MODELE : CRITERE D'OPTIMISATION DES PARAMETRES**

Une fois la phase de préparation des données terminée, il s'en suit alors le calage et la validation du modèle.

Le but de cette étape consiste à s'assurer que le modèle hydrologique représente le plus adéquatement possible les débits observés. Il consiste de ce fait à ajuster les paramètres du modèle de façon à ce que l'adéquation entre les débits simulés et observés soit maximale. Le critère le plus utilisé est celui de Nash [17]. Ce critère adimensionnel permet de juger de la qualité de l'ajustement et de faciliter la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements ont des ordres de grandeur différents. Les paramètres du modèle retenus sont ceux dont la valeur minimise la fonction critère préalablement choisie. Une fois le modèle «calé», l'on utilise les paramètres issus du calage et un autre jeu de données expérimentales pour effectuer la validation. Ainsi, la comparaison entre modèle et réalité terrain traduite par la valeur de la fonction critère permet alors de valider ou non le modèle. Les périodes de calage et de validation qui donnent les meilleures valeurs de Nash sont choisies de manière à ce qu'elles soient homogènes (sans rupture climatique présumée ni dans les séries de pluie ni dans les séries de débit) [14-15]. L'expression de Nash est :

$$Nash = 100 \times \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{cal,i}})^2} \right] \tag{2}$$

$Q_{obs,i}$  et  $Q_{cal,i}$  sont les débits observés et calculés au pas de temps  $i$ ,  $\overline{Q_{cal,i}}$  est la moyenne des débits observés sur la période considérée.

Les résultats sont d'autant plus meilleurs lorsque la valeur de Nash se rapproche de 1

### 3.3.4 GENERATION DE NOUVELLES SERIES CLIMATIQUES FUTURES A PARTIR DES DONNEES OBSERVEES ET DES SORTIES DU MODELE REGCM3-A1B

La nécessité de générer de nouvelles séries climatiques futures pour simuler les écoulements sur différents bassins trouve son explication à plus d'un titre. En effet, les modèles climatiques en général ont du mal à reproduire la dynamique des variations mensuelles des précipitations au cours d'une année (dynamisme de la saison des pluies). De même, ces modèles présentent une tendance à surestimer ou à sous-estimer les valeurs des paramètres calculés. Dans le cas du modèle RegCM3, la tendance des données est à la surestimation des valeurs des paramètres, notamment les précipitations, les températures et les évapotranspirations potentielles.

Pour combler ces insuffisances, il est important de corriger ces lacunes en créant de nouvelles séries de données climatiques (précipitation et ETP) en établissant un champ de variations entre le climat futur (horizons 2031-2040 et 2091-2100) et la période de référence (1991-2000). La méthode de correction retenue est la méthode des variations aux horizons appelée également scénario climatique "Horizon" (suffixe Hori) utilisée par [14] et [15]. Elle est appliquée sur les données observées par les services de la météorologie nationale (précipitations et ETP) sur la période de référence (1991-200) et les données de prévisions simulées par le modèle RegCM3-A1B.

*Méthode : méthode des variations aux horizons*

La méthode des variations aux horizons prend en compte les variations aux deux horizons définis dans cette étude (2031-2040 et 2091-2100). Il s'agit de calculer les taux de variations des précipitations et d'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelles entre les deux horizons et la période de référence retenue précédemment (1991-2000), et d'appliquer ces taux aux données d'observation. Les taux de variations mensuelles pour les différents horizons sont calculés selon la formule

Les taux de variation sont appliqués sur les séries de données observées pour obtenir les séries correspondantes aux différents horizons (2031-2040 et 2091-2100). En supposant que les observations (de précipitations et d'évapotranspiration potentielle) de la période de référence (1991-2000) peuvent se reproduire à nouveau, un tirage aléatoire de deux séries de dix années chacune est effectué entre 1991 et 2000 pour créer des séries fictives ayant une moyenne identique à celle de la période de référence pour les différentes échéances. Cependant, l'ordre de succession des années dans le tirage peut être différent de celle de la série de 1991-2000. Les taux de variation calculés sont appliqués à la série fictive suivant la formule de l'équation (3) [14] :

$$X_i^c = X_i^{fict} + X_i^{fict} \times \Delta_i^{hor} \quad (3)$$

Avec  $X_i^{fict}$  = valeur mensuelle observée sur la période de référence,

$\Delta_i^{hor}$  = taux de variations mensuel à un horizon déterminé.

De cette manière, de nouvelles séries de données climatiques qui respectent les taux de variations aux deux horizons 2031-2040 et 2091-2100 fournies par le modèle climatique sont ainsi créées, mais avec des valeurs plus réalistes qui respectent la dynamique de la répartition mensuelle du total annuel de chacun des paramètres.

Les jeux de données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle ainsi créés sont utilisés pour la simulation des écoulements sur les sous-bassins versants testés précédemment.

### 3.3.5 SIMULATION DES ECOULEMENTS POUR LE 21<sup>EME</sup> SIECLE

Une fois les nouvelles séries climatiques futures générées, elles sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR2M pour produire les écoulements attendus aux horizons 2031-2040 et 2091-2100. Pour rendre possible la simulation des écoulements futurs, l'on garde constant les paramètres ayant servi au calage et à la validation sur les périodes déjà observées. En effet, le modèle hydrologique nécessite certes des données climatiques, mais aussi les données de capacité en eau du sol. Les données climatiques que sont les précipitations et l'évapotranspiration, proviennent des scénarii climatiques élaborés sur la base des résultats du modèle RegCM3-A1B et des observations sur le terrain. En revanche, nous ne disposons pas d'informations sur l'évolution des données de capacité en eau du sol au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Or selon certains auteurs [18-22], l'état de surface des bassins versant influence les écoulements des cours d'eau. Les modèles hydrologiques utilisés dans les études d'impact devraient en tenir compte. Malheureusement, à l'heure actuelle, il nous est impossible de prévoir l'évolution de la capacité en eau du sol pour les décennies à venir.

Conscients de ce qu'il y a une voie de recherche à explorer pour améliorer les résultats, nous avons été contraints d'utiliser des valeurs de capacité en eau maintenues constant pendant tout le 21<sup>ème</sup> siècle.

### 3.3.6 EVALUATION DES DIFFERENTS TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA COMOË

L'évaluation des termes du bilan s'est faite en se servant de la méthode du bilan hydrologique qui est la méthode la plus utilisée [23].

Le bilan hydrologique consiste à évaluer les flux d'entrée et les flux de sortie d'un système.

Ce bilan est défini dans l'espace et dans le temps. Il est l'outil indispensable qui permet l'analyse du cycle global de l'eau.

Il est admis que les précipitations qui tombent dans une région donnée sont partagées entre l'évapotranspiration, l'écoulement de surface et la recharge des nappes souterraines, de sorte que l'équation du bilan hydrologique s'exprime par :

$$P = (ETR + R) + I + \Delta S \quad (4)$$

Soit :

$$I = P - (ETR + R)$$

I : lame d'eau infiltrée (mm) ;

P : pluviométrie (mm) ;

ETR : évapotranspiration réelle (mm) ;

R : lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin versant (mm) ;

$\Delta S$  : variation du stock d'eau. A l'échelle du cycle hydrologique annuel, les variations de stock s'annulent sur un grand bassin [24].

Dans le cas de cette étude, la détermination de l'ETR est basée sur la modélisation de la relation pluie-débit par le modèle GR2M qui est un modèle à réservoir et de bilan. L'expression de l'ETR, pour un mois considéré, est donnée par la relation suivante :

$$ETR = S_1 - S_2 \quad (5)$$

Où  $S_1$  est le niveau d'eau dans le réservoir sol après une pluie et  $S_2$  le niveau d'eau dans le réservoir après l'évapotranspiration.

## 4 RESULTATS ET DISCUSSION

### 4.1 RESULTATS

#### 4.1.1 CALAGE ET VALIDATION DU MODELE GR2M

Le calage et la validation ont été effectués respectivement sur la période 1971-1990 et 1961-1970 pour cinq sous-bassins de la Comoé notamment les sous bassins de la Comoé à Sérébou, à Akakomoékro, à Aniasué, à M'basso et de la Léraba à Yenderé. Concernant la station de Gansé sur la Comoé, l'absence d'une longue série de débits nous a contraint à effectuer le calage sur la période 1985-2000 et la validation sur la période 1977-1984.

A la fin des tests de calage et de validation du modèle GR2M, nous avons obtenu des résultats présentés dans le tableau 1.

Lors du calage du modèle, les valeurs de Nash obtenues sont comprises entre 56,1% et 72,4%. Les fortes valeurs de Nash sont obtenues à la station de Sérébou et de Gansé avec un peu plus de 72%. Par contre, les plus faibles valeurs de Nash se trouvent à la station de Yenderé et d'Akakomoékro avec des Nash respectifs de 56,1% et de 57,1%.

En phase de validation, les valeurs de Nash oscillent entre 51,4% et 76,4%. Les stations de Sérébou et de Gansé présentent les meilleures valeurs de calage et de validation (Nash > 70%).

Dans l'ensemble, le modèle GR2M donne des valeurs satisfaisantes en calage et en validation avec des valeurs moyennes de Nash supérieures à 60%.

Tableau 1 : Valeurs des paramètres  $X_1$  et  $X_2$  lors du calage du modèle GR2M

	$X_1$	$X_2$	Calage		validation	
			Période	Nash (%)	Période	Nash (%)
Yendéré	808,27	0,59	1971-1990	56,1	1961-1970	56,7
Ganse	1265,33	0,59	1985-2000	72,2	1977-1984	75,6
Sérébou	1088,29	0,62	1971-1990	72,4	1961-1970	76,4
Akakomoékro	1145,70	0,58	1971-1990	57,1	1961-1970	66,9
Aniassué	1113,96	0,49	1971-1990	60,4	1961-1970	59,9
M'basso	1098,43	0,53	1971-1990	68,3	1961-1970	51,4

Les hydrogrammes calculés et observés en calage (Figures 2A et Figure 3A) et en validation (Figures 2B et Figure 3B) pour les différents sous-bassins versants de la Comoé permettent de vérifier visuellement la performance du modèle utilisé. Il ressort des observations que les hydrogrammes calés sont également de bonne qualité. En effet, la dynamique des écoulements est bien respectée et les étiages sont correctement reproduits, tant en calage qu'en validation. Cependant, le modèle a quelques faiblesses. Il ressort qu'en phase de calage et de validation, le modèle n'arrive pas à reproduire correctement les pointes de crues. Des écarts importants entre les deux hydrogrammes s'observent au niveau des pointes de crue. A ce niveau, le modèle sous-estime les volumes écoulés. Mais, l'observation générale montre qu'il existe une meilleure adéquation entre les hydrogrammes observés et calculés en phase de calage et de validation.

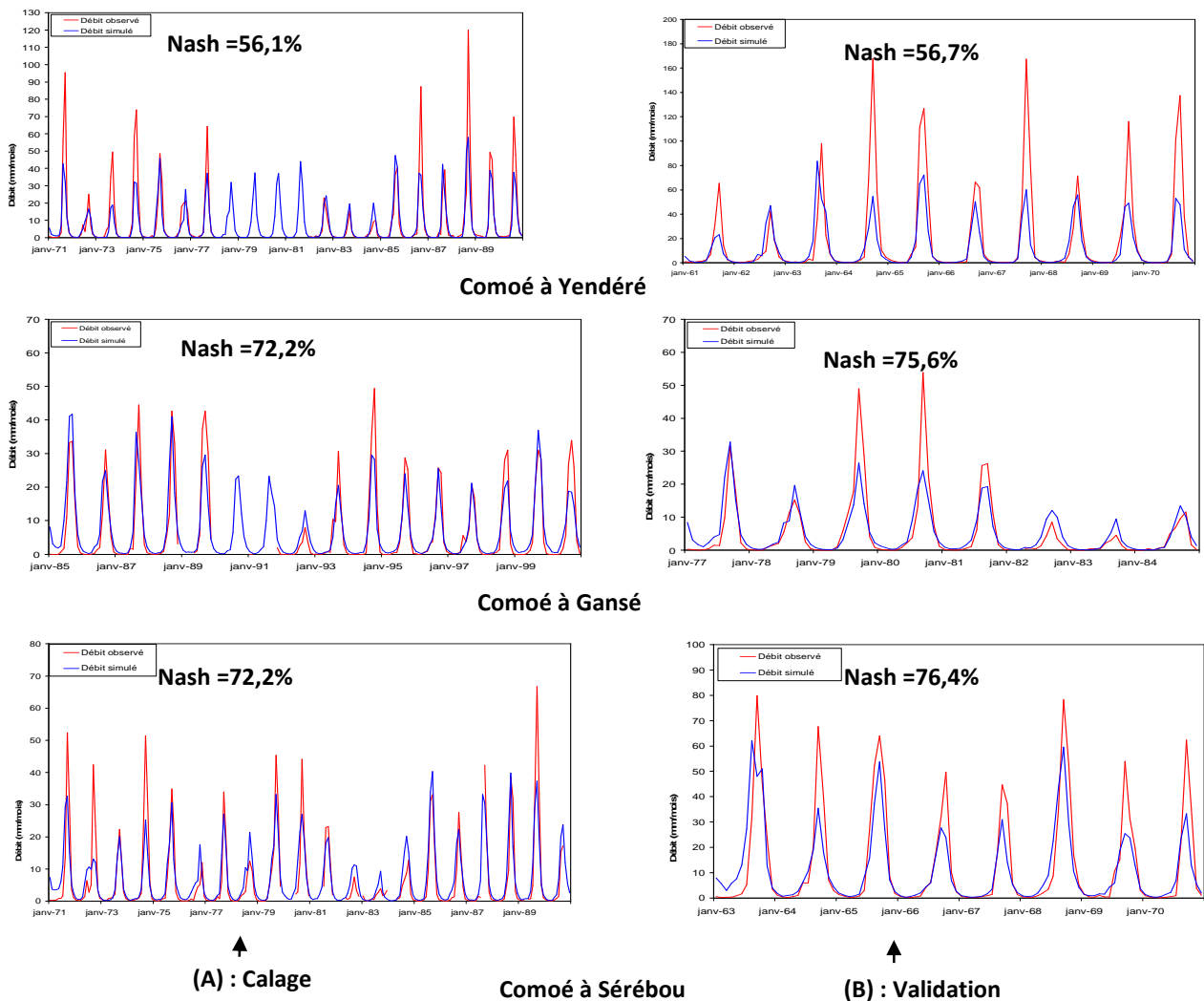


Figure 2 : Représentation des hydrogrammes calculés et simulés lors du calage (A) et de la validation (B)

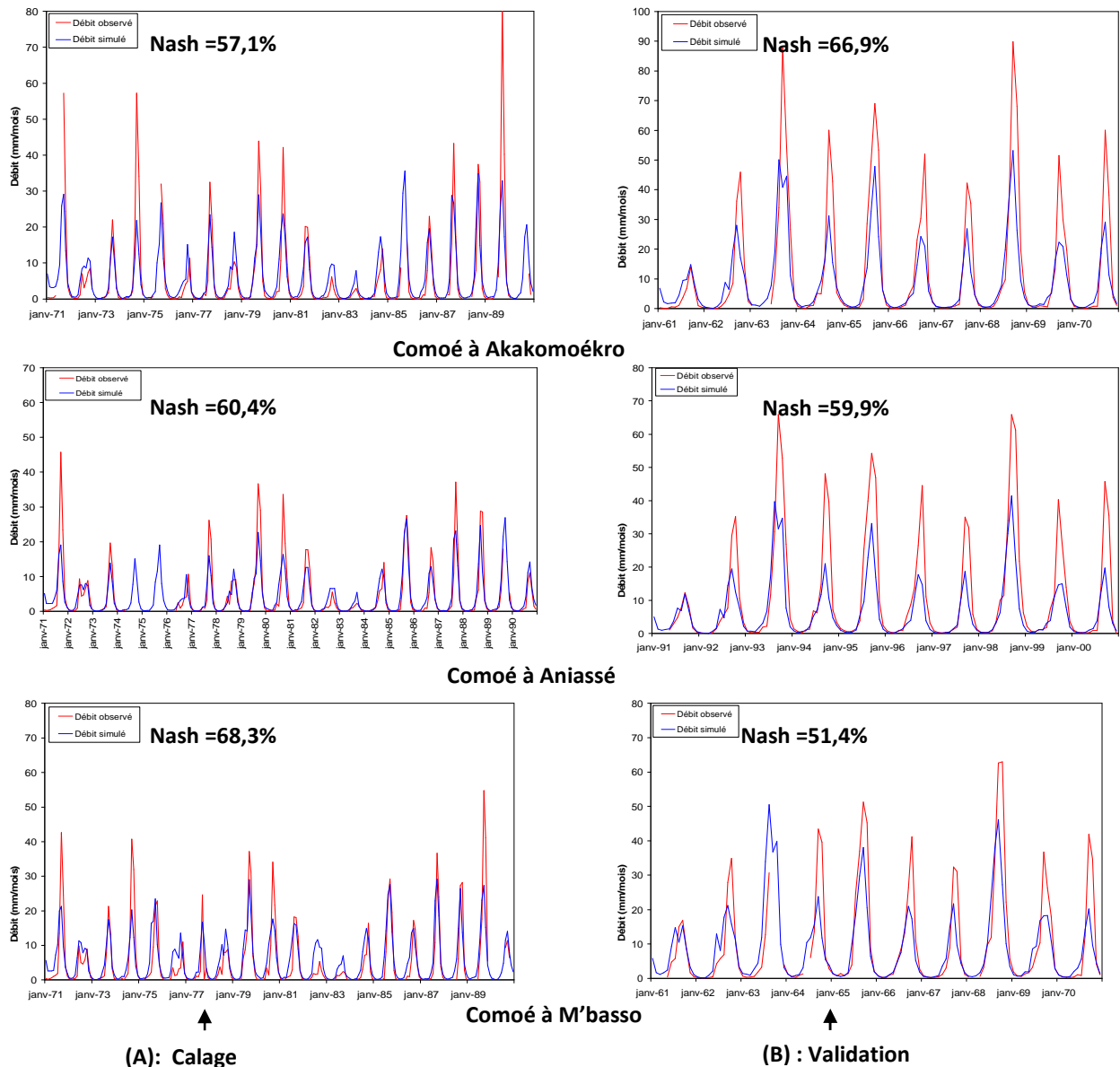


Figure 3 : Représentation des hydrogrammes calculés et simulés lors du calage (A) et de la validation (B)

#### 4.1.2 EVOLUTION DES PARAMETRES DU BILAN HYDROLOGIQUE

Cette section présente l'évolution des paramètres hydrologiques simulés sur les horizons par le modèle.

##### 4.1.2.1 EVOLUTION DES DÉBITS MOYENS ANNUELS

La représentation des débits moyens annuels en fonction des différents horizons (Figure 4) montrent une baisse des écoulements qui pourrait s'effectuer de façon linéaire sur l'ensemble du bassin versant. A cet effet, on constate que les débits de la rivière Léraba (Nord) du bassin pourraient passer de 23,2 à 6,8 m<sup>3</sup>/s soit une diminution de 70,68% à l'horizon 2091-2100. Pendant ce temps, les écoulements sur le reste du bassin versant pourraient baisser entre 40,5% à Akacomóékro et 58,34% à la Station de Gansé.



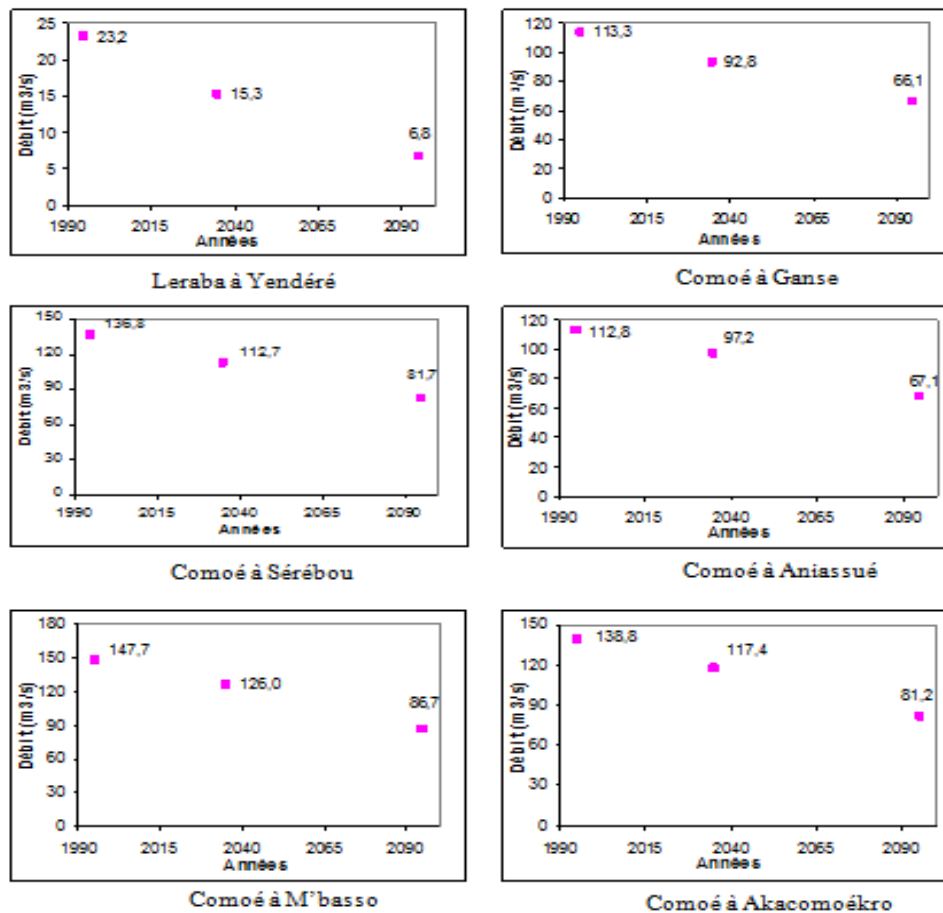


Figure 4 : Evolution des débits moyens annuels sur six sous bassins versants de la Comoé pour les périodes 1991-2000, 2031-2040 et 2091-2100

#### 4.1.2.2 EVOLUTION DE LA RECHARGE SUR LE BASSIN VERSANT

L'étude de la recharge annuelle en eau calculée sur six sous-bassins versants de la Comoé montre que les infiltrations pourraient baisser considérablement comme les écoulements au cours du 21<sup>ème</sup> siècle (Figure 5). En effet, sur la période 1991-2000, les infiltrations sont comprises entre 171,7 mm et 109,6 mm. A l'horizon 2031-2040, elles passent entre 155,5 mm et 97,8 mm ; ce qui correspond à une baisse de 7,44% à 13,73% par rapport à la référence 1991-2000. A l'horizon 2091-2100, les recharges du bassin pourraient fluctuer entre 80,2 mm et 31,7 mm et correspondent également à une baisse de 49,34% à 70% par rapport à la référence 1991-2000. Il apparaît clairement que vers la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, la recharge des nappes via les précipitations sera réduite de moitié sur le bassin versant dans son ensemble.

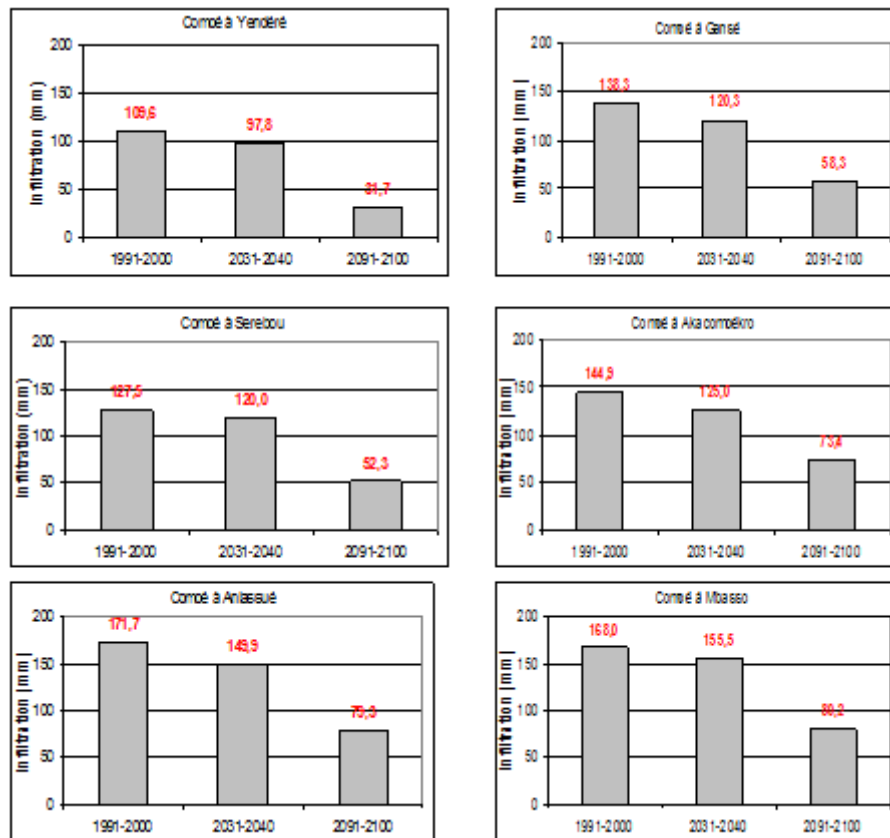


Figure 5 : Evolution de la recharge moyenne annuelle sur le bassin de la Comoé pour les périodes 2031-2040 et 2091-2100, en regard de celle de 1991-2000

#### 4.1.2.3 EVALUATION DU BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL DU BASSIN VERSANT DE LA COMOÉ

Le bilan hydrologique du bassin versant de la Comoé a été estimé (Figure 6). Il concerne les quatre principaux paramètres du bilan hydrologique que sont les hauteurs de pluies annuelles, les évapotranspirations réelles (ETR), les lames d'eau ruisselée et infiltrées.

Les pluies moyennes annuelles qui sont tombées sur le bassin versant de la Comoé au cours de la période 1991-2000 varient de 1024,4 mm (Nord) à 1088,5 mm (Sud). Elles pourront passer entre 945 mm et 1030 mm à l'horizon 2091-2100.

Après la pluie, vient par ordre d'importance l'ETR. Au cours de la période 1991-2000, cette variable hydrologique a varié sur le bassin de 792,9 mm à 858 mm et représente 77,43% à 79,60% des précipitations. L'ETR pourrait augmenter pour atteindre des proportions qui varient entre 869,9 mm et 994,9 mm à l'horizon 2031-2040 soit un accroissement de 0,02% à 3% par rapport à la référence 1991-2000. A l'horizon 2091-2100, elles atteindront les valeurs de 836,9 mm à 912 mm ; ce qui correspond à une augmentation de 4,7% à 7,4% par rapport aux valeurs de 1991-2000. Cependant, l'ETR représente la fraction la plus importante des précipitations qui tombent sur le bassin de la Comoé. Elle varie entre 77,43% et 79,60% au cours de la période 1991-2100. Toutefois, les valeurs d'ETR des zones de forêt et humides sont plus élevées que celles des régions de savanes.

Quant à la lame d'eau infiltrée, elle représente la fraction de la pluie qui est censée alimenter les nappes d'eau souterraine. Elle est plus importante que les écoulements de surface et régresse des régions forestières vers les de savanes. Elle est de 109,6 mm à Yendéré (Nord) à 171,7 mm à Aniassué (Sud) à la période 1991-2000. Aux horizons 2031-2040 et 2091-2100, les lames d'eau infiltrées pourraient connaître une baisse et pourraient varier respectivement de 97,8 mm (Yendéré) à 155,5 mm (Aniassué) et de 31,7 mm à 80,2 mm. Quant aux écoulements, ils occupent la plus petite fraction de la pluie par mis les autres paramètres du bilan. A la suite de ces observations, il apparaît que la disponibilité des ressources en eau surtout en ce qui concerne les eaux de surface et la recharge des nappes pourrait connaître une baisse drastique. En effet, le régime des cours d'eau pourrait baisser de plus de 50% vers la fin du 21<sup>ème</sup> siècle ainsi que l'eau destinée à la recharge dans des proportions similaires (entre 52,30% et 71%).

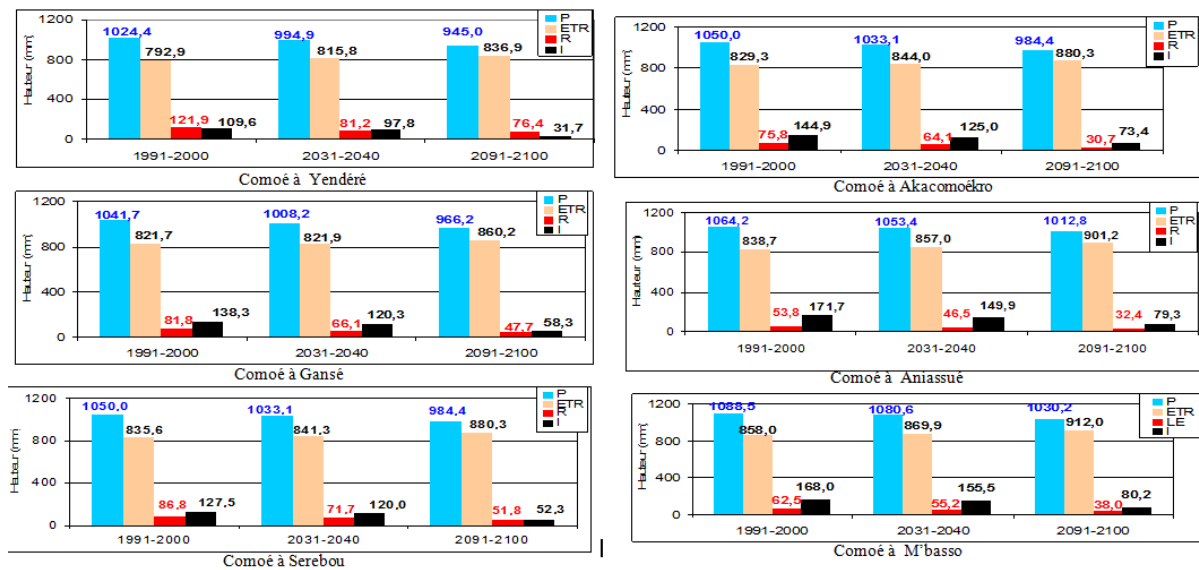


Figure 6 : Evolution des paramètres du bilan hydrologique sur le bassin versant de la Comoé pour les périodes 2031-2040 et 2091-2100, en regard de celle de 1991-2000

#### 4.2 DISCUSSION

A la lumière des résultats présentés, il ressort lors du calage et de la validation que le modèle GR2M sous-estime les débits de crues. Cette contre-performance a deux origines : les contrastes climatiques et la non prise en compte des états de surface du bassin versant (occupation du sol, barrages hydro-agricoles). En effet, de nombreux travaux relatifs à l'aptitude des bassins versants à ruisseler [24-30] ont montré que les principaux facteurs sont la nature géologique du substratum, les grands types de sols qui le constituent, le couvert végétal, la pente et les indices de compacité ainsi que l'occupation du sol. Comme on peut le constater, ces caractéristiques n'ont pas toutes été prises en compte dans le modèle. Cependant, les valeurs de Nash dans cette étude sont similaires à celles obtenues [14] sur les bassins versants de la Gambie et du Sassandra et [16] sur le bassin versant du N'zi. En effet, sur ces bassins, ces deux auteurs ont trouvé des valeurs de Nash en calage et en validation variant en moyenne entre 26,2% à 90,2% sur le bassin versant du Sassandra et de 39% à 81% sur le bassin versant du N'zi.

Le modèle GR2M ainsi validé et calé sur des périodes d'observation a permis d'effectuer les simulations sur la période d'observation (1991-2000) servant de référence à l'étude du changement climatique, et les deux périodes de projection (2031-2040 et 2091-2100). L'étude des impacts du changement climatique sur les ressources en eau a montré d'importantes modifications des principales composantes du cycle de l'eau que sont la pluviométrie, l'ETR, les écoulements de surface et la recharge des nappes d'eau souterraines représentées par les infiltrations. Les deux composantes (écoulements de surface et infiltrations) sont les plus affectées, alors qu'ils constituent les ressources en eau disponibles que les populations utilisent pour satisfaire leurs besoins sur le bassin versant (agriculture, industrie, domestique). Au niveau des écoulements moyens annuels sur le bassin versant, ils pourraient baisser continuellement pour atteindre des déficits d'environ 40% dans le cours d'eau principal et de 71% sur l'un des principaux affluents du Nord (Léraba), vers la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Ces diminutions des écoulements sont consécutives à la baisse des précipitations (7,14%) et un accroissement maximum de 28,2% de l'ETP via l'augmentation des températures. Cette tendance à la baisse des écoulements sur le bassin, malgré sa dépendance au modèle et aux scénarii utilisés, reste conforme aux résultats trouvés par [14] sur les bassins versants du Sénégal, de la Gambie et du Sassandra, et par [31] sur le Bandama.

Les lames d'eau destinées à la recharge, quant à elles, pourraient diminuer de près de 50% sur l'ensemble du bassin versant consécutivement à la chute des précipitations, ce qui suppose que le niveau piézométrique des nappes baissera. Cette tendance à la baisse des niveaux piézométriques des nappes est globalement de 2 m sur l'ensemble du Burkina Faso depuis 1978, du fait de la diminution des précipitations [32]. L'importance des précipitations dans la recharge des nappes est une réalité. En effet, les nappes se rechargent proportionnellement à la précipitation. Les résultats révèlent également que la lame d'eau destinée à la recharge est plus importante que celle écoulee sur le bassin versant. Cela tient à un certain nombre de facteurs qui se résument à la fois à la structure géologique et aux ouvrages de stockage présents sur le bassin versant. La formation géologique majeure du bassin versant est constituée par des schistes. Leur disposition verticale pourrait être un

facteur de bonne perméabilité. La présence d'un grand nombre de barrages hydro-agricoles contribue à affaiblir les ruissellements sur le bassin versant.

## 5 CONCLUSION

L'étude portant sur les impacts du changement climatique sur les ressources en eau a montré que le bassin versant de la Comoé est vulnérable au changement climatique. En effet, par rapport à la période 1991-2000, le scénario utilisé prévoit sur les différents sous bassins versants testés, des baisses de précipitations moyennes annuelles qui pourraient passer de 0,7 à 11% dans le courant du 21<sup>ème</sup> siècle. Contrairement aux précipitations, l'évapotranspiration moyenne annuelle pourrait augmenter graduellement pour atteindre un taux d'accroissement maximum de 28,2% vers 2100 pour les bassins versants situés au Nord, notamment celui de la Léraba à Yendéré.

En ce qui concerne les écoulements annuels au cours de ce siècle, les déficits attendus sont plus importants que ceux des précipitations. Des baisses de 14,8% à 34,4% (9,5 à 41,7 mm/an) à l'horizon 2031-2040 et de 40,3% à 73,3% (26,7 à 88,9 mm/an) à l'horizon 2091-2100 sont prévues.

La recharge des nappes d'eau souterraine pourrait également diminuer considérablement au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, ce qui peut être à l'origine d'un assèchement de certains ouvrages hydrauliques captant l'eau souterraine pendant les périodes sèches de l'année.

L'étude des impacts potentiels du changement climatique sur les ressources en eau a montré que les variations croissantes du climat influencent directement le cycle de l'eau. Elles constituent donc une menace directe pour les moyens de subsistance des populations les plus démunies. Les stratégies d'adaptation aux changements climatiques doivent tenir compte de cette réalité et porter sur l'amélioration d'une exploitation durable des ressources naturelles, afin d'accroître la capacité de résistance des écosystèmes et de réduire leur faiblesse (vulnérabilité) par rapport aux risques et aux dangers.

Les résultats des prévisions effectuées dans cette étude permettent de se faire une idée en termes de moyennes et de tendances des variables climatiques et hydrologiques du bassin versant dans son ensemble. Les résultats constituent une hypothèse valable de travail qu'il conviendrait d'affiner au fur et à mesure que les performances des modèles climatiques vont s'améliorer.

## REFERENCES

- [1] P. L. A. Ouedraogo, prédétermination des séquences sèches et intérêt de l'information climatique sur la production céréalière en zone sahélienne, mémoire pour l'obtention du master en ingénierie, option : eau agricole, 42 p, 2013.
- [2] C. SIMONET, "Changement climatique, chocs pluviométriques et sécurité alimentaire : essais sur l'usage de l'information climatique en économie du développement," Thèse de doctorat en Sciences Économiques, Juridique et de Gestion, Université d'Auvergne, Clermont-Ferrand 1, 2012
- [3] GIEC "Bilan 2007 des changements climatiques" Rapport de synthèse GIEC, Genève, Suisse, 2007.
- [4] K.E. KOUAKOU, B.T. A. GOULA, A. Mi. KOUASSI, "Analyse of climate variability and change impacts on hydro-climate parameters: case study of Côte d'Ivoire," International Journal of Scientific and Engineering Research, Vol.3,no 2 pp. 1-8, 2012.
- [5] B. T. A. Goula, I. Savané, Konan B., V. Fadika and G. B. Kouadio, " Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide)" Vertigo, vol.1, pp. 1-12, 2006.
- [6] K. E. Kouakou, Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Comoé, Thèse de Doctorat, Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 2011.
- [7] Savane I., K. M. Coulibaly and P. Gioan, "Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man," Sécheresse, vol. 12, no. 4, pp. 231-237, 2001.
- [8] M. Ouedraogo, Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale, Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 2001.
- [9] K. E Kouakou., B. T. A Goula and I. Savane, "Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : Cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire - Burkina Faso)," European Journal of Scientific Research, vol.16 no.1, pp. 31-43, 2007.
- [10] N. Madiodio, A. Abe and A. Abou, Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification. UICN – Union mondiale pour la nature, 2004.
- [11] Z. Makhlof and C. Michel, "A two- parameter monthly water balance model for French watersheds," Journal of Hydrology, vol. 162, pp. 299-318, 1994.

- [12] J. Lavabre, P. Arnaud, N., Folton and C. L. Michel, "Les écoulements d'un petit bassin versant méditerranéen après un incendie de forêt," In *Ingénieries - Eau- Agriculture-Territoire*, vol. 7, pp. 21-30, 1996.
- [13] S. Mouehli, Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Cemagref (Antony), Université Paris VI, 2003.
- [14] B. S. Ardoin, Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne, Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, 2004.
- [15] D. Sighomnou, Analyse et redéfinition des régimes climatiques et Hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de Doctorat d'Etat Université de Yaoundé 1, Cameroun, 2004.
- [16] A. M. Kouassi, Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 2007.
- [17] J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models; Part I: a discussion of principles," *Journal of hydrology*, vol.10, pp. 282-290, 1970.
- [18] A. Amani and M. Nguetora, "Evidence d'une modification du régime du fleuve Niger à Niamey," *International Association of Hydrological Sciences*, vol. 274, pp. 449-456, 2002.
- [19] C. Leduc, G. Favreau and P. Schroeter, "Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger," *Journal of Hydrology*, vol. 243, pp. 43-54, 2001.
- [20] G. Mahé, A. Dray, J. E. Paturel, A. Cres, F. Kone, M. Manga, F. N. Cres, J. Djoukam, A. Maiga, M. Ouedraogo and E., Servat, "Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambe River in Burkina Faso," *International Association of Hydrological Sciences*, vol. 274, pp. 69-76, 2002.
- [21] Z. A. Kouadio, "Dynamique de l'occupation du sol et comportement hydrologique. Cas des bassins versants côtiers de l'Agnéby et du Boubo," Thèse Unique de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 2011.
- [22] Z. A. Kouadio, K. E. Kouakou, A. B. Konan-Waidhe, B. T. A. Goula and I. Savane, "Modélisation du comportement hydrologique du bassin versant du Boubo en milieu tropical humide de la Côte d'Ivoire par l'application du modèle hydrologique distribué CEQUEAU," *Afrique SCIENCE*, vol. 11, no. 3, 2015.
- [23] B. Dieng, P. Bazie and A. Schmitt, "Transfert d'eau en milieu poreux non saturé. Recharge des nappes en climat soudano-sahélien. In : Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone," *Actes des journées scientifiques de Thiès, AUPEL-UREF*, 1991.
- [24] G. Mahé, R. Dessouassi, C. Bandia and J. C. Olivry, "Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du Bani à Douna au Mali," *International Association of Hydrological Sciences*, vol. 252, pp. 289-295, 1998.
- [25] B. Pouyaud, "Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'ouest en liaison avec les changements climatiques," *International Association of Hydrology Sciences*, vol. 168, pp. 447-461, 1987.
- [26] B. Kouamé, E. Servat. and A. Dezetter, "Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau en Côte d'Ivoire," *International Association of Hydrological Sciences*, vol. 238, pp. 343- 54, 1995.
- [27] G. T. A. Goula, Modélisation hydrologique de bassins versants équipés d'ouvrage hydraulique en zone soudano-sahélienne : Application au Massili (Burkina Faso), Thèse de Doctorat en hydrologie et hydrogéologie quantitatives, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 1993.
- [29] Y. T. Brou, E. Servat and J. E. Paturel, "Activités humaines et variabilité climatique : cas du Sud forestier ivoirien." *International Association of Hydrological Sciences*, vol. 252, pp.365-373, 1998.
- [30] H. Morot, P.G. Gascuel-Oudou, C., Walter, X. Zhang and J. Molenat, "Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface," *Revue Sciences de l'Eau*, vol. 12, no. 1, pp. 23-44, 1999.
- [31] B. T.A. Goula, V. J. Kouassi and I. Savané, "Impacts du changement climatique sur les ressources en eau en zone tropicale humide : Cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire," *Agronomie Africaine*, vol. 18, no. 1, pp. 1 - 11, 2006.
- [32] MEE, "Gestion Intégrée des Ressources en Eau : État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion", rapport de synthèse, 2001.