



ETUDE DE LA PLUVIOMETRIE ET DU RUISSELLEMENT EN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU LAC DE BUYO (SUD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)

RAINFALL AND RUNOFF STUDY IN CLIMATE CHANGE CONTEXT IN THE BUYO LAKE WATERSHED (SOUTHWEST CÔTE D'IVOIRE)

***KOUA T.¹, ANOH K.¹, EBLIN S.¹,
KOUASSI K.¹, KOUAME K.², JOURDA J.²***

¹ UFR Environnement, Département des Sciences de la Terre, Université Jean
Lorougnon Guédé de Daloa, BP 150 Daloa (Côte d'Ivoire).

² UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Felix Houphouët
Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire).

kouatanoh7@gmail.com

RESUME

L'objectif de ces travaux est d'analyser l'impact possible des changements climatiques sur la pluviométrie et le ruissellement dans le bassin versant du lac Buyo. Cette étude a été effectuée à partir des simulations du modèle climatique UKMO-HadGEM1 sous le scénario d'émissions A1B dans une simulation continue. Les simulations ont été effectuées après le calage du modèle hydrologique. Les analyses ont porté sur la période 1950-1979 (référence), 2035 à 2064 (horizon 2050) et 2064-2093 (horizon 2080). Les résultats ont montré que l'ensemble du bassin de Buyo pourrait connaître une baisse des précipitations. En effet, les précipitations devraient varier de 1288 à 1653 mm sur la période de référence (1950-1979). Les parties nord-ouest et sud du bassin seront soumises à des précipitations plus fortes atteignant 1653 mm. A l'horizon 2050, les précipitations devraient baisser jusqu'à 1097 mm, soit une variation de -34%. Pendant la période 2064-2093, les précipitations pourraient baisser de 38%. A l'horizon 2050, une baisse du ruissellement sur l'ensemble de la zone d'étude variant entre 158 et 340 mm pourrait être observée. A l'horizon 2080, le

ruissellement devrait également baisser pour se situer entre 132 et 274 mm. Cependant, les zones à fort ruissellement devraient rester les mêmes.

Mots-clés : Changement climatique, Modélisation, Buyo, Côte d'Ivoire, SWAT, UKMO-HadGEM1

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the possible impact of climate change on rainfall and runoff in the Buyo Lake watershed. This study was conducted using simulations of the UKMO-HadGEM1 climate model under the A1B emissions scenario in a continuous simulation. The simulations were performed after calibration of the hydrological model. The analyzes covered the period 1950-1979 (baseline), 2035 to 2064 (horizon 2050) and 2064-2093 (horizon 2080). The results showed that the entire Buyo basin could experience a decrease in rainfall. In fact, precipitation is expected to vary from 1288 to 1653 mm over the reference period (1950-1979). The northwestern and southern parts of the basin will be subject to higher precipitation reaching 1653 mm. By 2050, precipitation is expected to decrease to 1097 mm, a variation of -34%. During the period 2064-2093, precipitation could fall by 38%. By 2050, a drop in runoff over the entire study area of between 158 and 340 mm could be observed. By 2080, runoff is also expected to fall to between 132 and 274 mm. However, areas with high runoff should remain the same.

Key words: Climate change, Modeling, Buyo, Côte d'Ivoire, SWAT, UKMO-HadGEM1

INTRODUCTION

A l'aube de ce nouveau millénaire, l'Afrique se trouve confrontée à de sérieux problèmes socio- économiques nécessitant de mesures correctives urgentes si l'on veut renverser les tendances actuelles vers un état de pauvreté endémique et de sous-développement généralisé. L'eau est l'un des principaux défis actuels et futurs auxquels l'Afrique est confrontée. Le rôle crucial de l'eau dans la réalisation des objectifs de développement socio-économique est largement reconnu. D'une façon générale, l'eau ne saurait constituer un frein au développement de l'Afrique qui semble en regorger de vastes ressources. Cependant, l'approvisionnement en eau des rivières, des lacs et des précipitations n'est pas toujours accessible ; la répartition géographique

naturelle est inégale et la consommation d'eau ne peut être qualifiée de durable. Le changement climatique est susceptible d'imposer des contraintes supplémentaires sur la disponibilité et l'accessibilité de l'eau en termes de quantité et de qualité. Il intervient comme un facteur perturbateur additionnel potentiellement dangereux. Il pourrait en effet, accentuer la variabilité spatiotemporelle et la dégradation quantitative et qualitative des ressources en eau d'une région (Nassopoulos, 2012). En Afrique de l'Ouest, les premières simulations ont laissé entrevoir une légère diminution des précipitations par rapport aux précipitations actuelles. Cette diminution des précipitations annuelles en fonction de la latitude varie de 0,5 à 40% sur la période 1961-1990. Une tendance à la baisse des précipitations a été observée à partir du début des années 1970 jusqu'au début des années 1990 (Hubert et al., 1989 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Bricquet et al., 1997 ; Servat et al., 1999).

Les déficits ont été estimés à 7% dans les années 1970 et 16% dans les années 1980 pour l'Afrique tropicale. La température moyenne et la variabilité du climat devraient augmenter en raison des changements climatiques. Cependant, pour les changements dans les précipitations moyennes, les modèles climatiques ne fournissent pas de résultats cohérents (IPCC, 2008). Il ressort des observations météorologiques et de la modélisation que le total annuel des précipitations pourraient diminuer dans les régions semi-aride de l'Afrique de l'Ouest au cours des prochaines décennies. Cette observation est faite pour les pays ouest africains comme la Côte d'Ivoire. Aux horizons 2080-2099, les débits en Afrique de l'Ouest calculés sur la base du scénario d'émission A1B pourraient chuter jusqu'à 50% (IPCC, 2008). Selon IUCN (2004), bien que les prévisions concernant le ruissellement et la recharge des eaux souterraines varient considérablement suite aux changements prévus dans les précipitations et selon les modèles climatiques, la plupart des scénarios de changements climatiques indiquent une diminution du débit et de la recharge des eaux souterraines dans les zones arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest. Ainsi, l'écoulement en rivière devrait diminuer dans des proportions variant entre 5 et 34% selon les horizons et les pays IUCN (2004). Les régions les plus vulnérables sont principalement les pays limitrophes du golfe de Guinée (Kouakou, 2011). Il est important de noter que ces prédictions donnent un avenir plausible cohérent avec le choix des scénarios d'émission. Cependant, récemment, des études utilisant les modèles du GIEC en l'Afrique de l'Ouest (Sanda, 2009) en comparant le cycle annuel des tendances observées, les précipitations simulées et la moyenne des températures mensuelles concluent que cinq (5) modèles climatiques simulent mieux les observations de précipitations et de température: CGCM3.1, GFDL-CM2.0, GISS-EH, GISS-

ER et UKMO-HadGEM1. En Côte d'Ivoire, les recherches ont mis en évidence les impacts de la variabilité climatique sur l'eau et l'environnement (Paturel et al., 1997 ; Aka, 1997 ; Servat et al., 1998, Servat et al., 1999 ; Savané et al., 2001 ; Péné et Assa, 2003 ; Saley, 2003). Ainsi, une diminution de 21% a été observé dans la pluviométrie (Servat et al., 1999). La diminution du ruissellement peut atteindre plus de 20% (IPCC, 2008). Plus précisément, le régime d'écoulement à l'horizon 2075 du fleuve Sassandra à Piéibly et Kahin (ouest de la Côte d'Ivoire) pourrait diminuer de 8,4% et de 6,9% respectivement (MEEF, 2000 ; Goula et al., 2006 ; Koua et al., 2014a). Ces variations ont des effets négatifs sur la cycle hydrologique, donc sur l'environnement et les activités socio-économiques. L'une des principales questions soulevées par la recherche sur un phénomène complexe tel que le changement climatique est de quantifier son impact sur le cycle hydrologique et les ressources en eau. Ainsi, dans cette étude, il a été question d'évaluer les impacts futurs possibles des changements climatiques sur le ruissellement et la pluviométrie (deux paramètres importants du cycle hydrologique) dans le bassin versant du lac de Buyo avec le modèle SWAT en utilisant les sorties du scénario climatique HadGEM1-A1B de UKMO du projet ENSEMBLE de l'IPCC. Le modèle climatique UKMO HadGEM1 n'a jamais été appliqué au bassin versant du lac Buyo. Cette étude est un premier essai d'évaluation des impacts possibles des changements climatiques sur le ruissellement et la pluviométrie du bassin versant du lac Buyo sous le scénario d'émission A1B.

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de lac Buyo est situé en zone forestière dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°57' et 8°26' Nord et les longitudes 6°45' et 7°51' Ouest (figure 1). Il est situé dans la zone climatique guinéenne et sa surface est estimée à 24 560 km² (Koua et al., 2014a). Cette zone a deux maxima pluviométriques (juin et septembre) et appartient à l'ensemble du bassin versant du fleuve Sassandra. En moyenne, ce bassin versant a entre 2 000 et 2 500 mm de précipitations par an (Brou, 1997). Selon Koua (2014), les températures moyennes mensuelles sont comprises entre 22 et 30,4°C. La température moyenne la plus élevée (30,4°C) est observée en mars tandis que la plus basse (22°C) est observée en août (mois humides en raison de la saison des pluies). Les principaux groupes géologiques sont composés d'amphibolite, d'anorthosite, de gneiss, de granitoïde, l'itabrite, les méta-sédiments, la migmatite, le métavulcanite et les schistes. Le bassin est composé de quatre (4) principaux types de sols: sols bruns, sols ferralitiques hautement désaturés, les

sols ferralitiques hydromorphiques et les sols ferralitiques modérément désaturés. Le bassin Buyo favorise le développement de l'agriculture et de la pêche. L'agriculture pluviale et la pêche constituent les principales sources de revenus des populations. Le développement de l'agriculture a favorisé une forte dégradation des ressources naturelles par la déforestation. En effet, seulement 17% des forêts naturelles représentées par des réserves et des aires protégées sont disponibles contre 90% de la forêt primaire en 1950 (Kouassi, 2001). Les zones dégradées occupent près de 83%. Cette situation influe sur la pluviométrie et le ruissellement en favorisant les processus d'érosion (N'go, 2000; Koua et al., 2013; Koua et al., 2019).

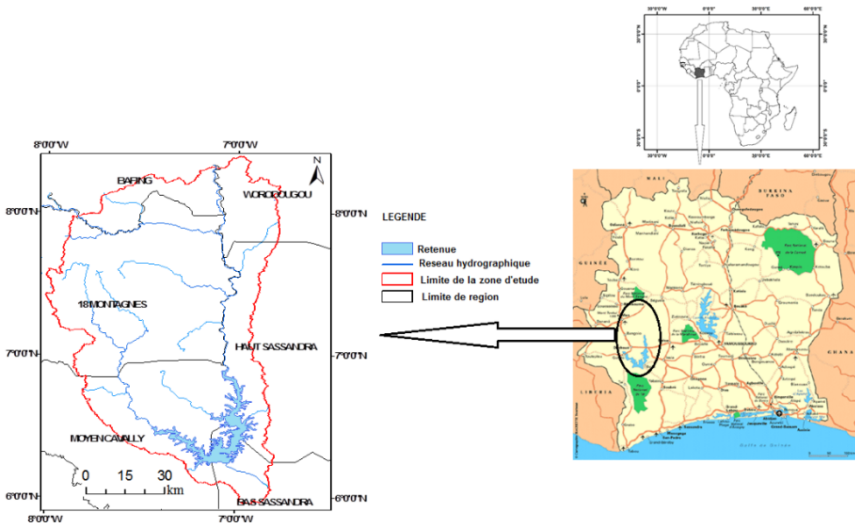


Figure 1 : Bassin versant du lac de Buyo

MATERIELS ET METHODES

Matériels

La première donnée utilisée est le Modèle numérique d'Altitude (MNA) (Figure 2). Il a une résolution de 90 mètres et a été obtenu par téléchargement internet à partir du site web <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>. Il est utilisé pour délimiter le bassin, subdiviser le bassin en sous-bassins et extraire le réseau hydrographique. La carte d'occupation du sol de l'année 2011 à l'échelle 1/200 000 utilisée dans cette étude (Figure 3), a été fournie par le CCT (Centre de Cartographie et de Télédétection). La carte des sols (figure 4) a été obtenue

principalement à partir de la Base de données mondiale harmonisée des sols (HWSD) développé par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO-ONU) (Nachtergaele et al., 2009). Les données hydrométéorologiques utilisées sont la température maximale et minimale, les précipitations, l'humidité relative, le rayonnement solaire et la vitesse du vent avec un pas de temps journalier à la fois pour le calage du débit à l'aide de SWAT et la simulation prospective en utilisant modèle climatique UKMO-HadGEM1 sous le scénario A1B. Les données hydrométéorologiques sont issues de l'Office National de l'Eau potable (ONEP) et du site de SWAT (<http://globalweather.tamu.edu/>) (figure 5). Ces données couvrent la période 1980-2010. Les données pour la simulation prospective avec une résolution de $1.875^\circ \times 1.25^\circ$ issues du modèle climatique UKMO-HadGEM1 ont été obtenus par téléchargement sur le site web: <http://cera-www.dkrz.de/WDC>.

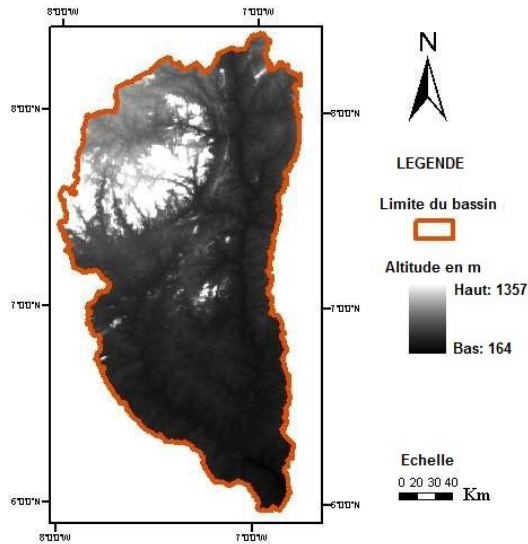


Figure 2 : Modèle numérique d'Altitude du bassin versant de Buyo

Etude de la pluviométrie et du ruissellement en contexte de changement climatique dans le bassin versant du lac de Buyo (sud-ouest de la Côte d'Ivoire)

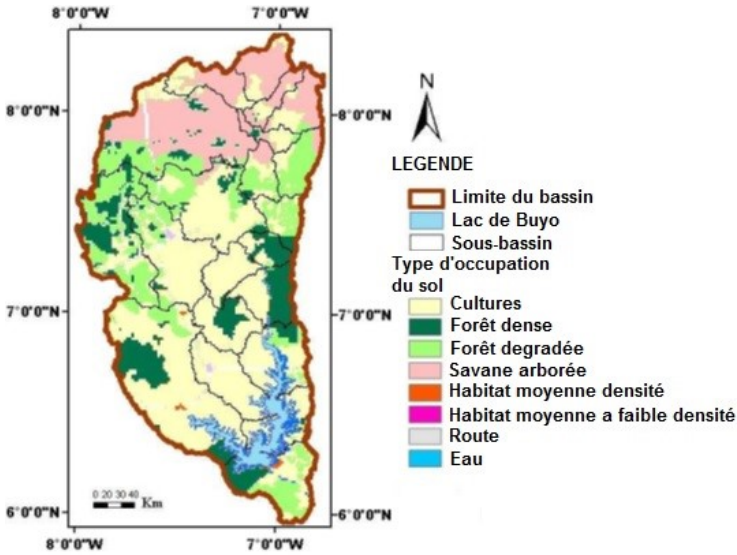


Figure 3 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de Buyo

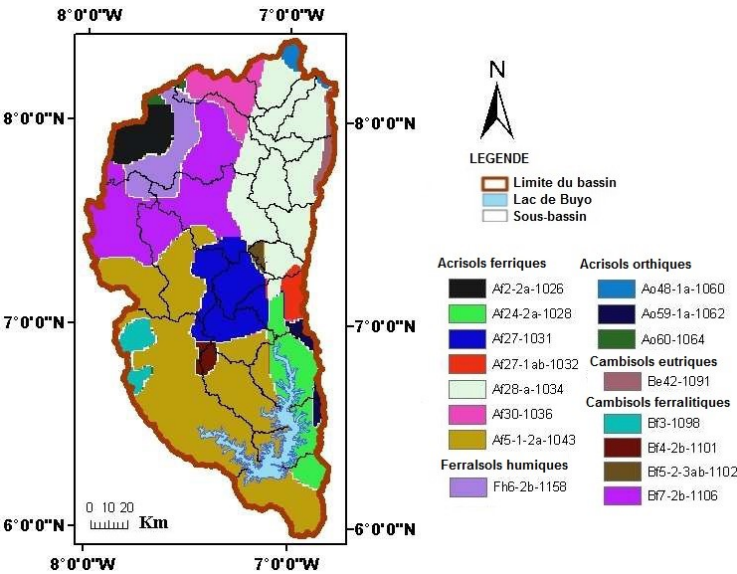


Figure 4 : Carte des sols du bassin versant de Buyo

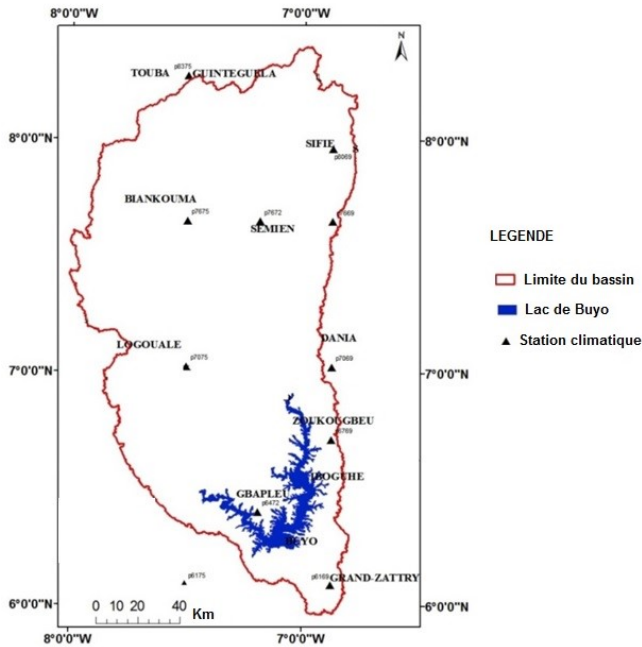


Figure 5 : Réseau de mesures des données hydro climatiques

Méthodes

La méthodologie utilisée est basée sur le modèle hydrologique SWAT qui utilise les données du modèle climatique UKMO-HadGEM1 en entrée. Le modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool en anglais), développé par le Département de l'agriculture des États-Unis, est un outil de gestion de l'eau dans un bassin versant. Il s'agit d'un modèle semi-distribué, semi-physique et semi-empirique qui fonctionne à un pas de temps journalier (Arnold et Fohrer, 2005). Il est couplé à un SIG (Système d'Information Géographique- ArcGIS) et est basé sur l'équation du bilan hydrologique :

$$SWt = SW0 + \sum(Rday - Qsurq - Ea - Wseep - Qgw) \quad (1)$$

avec,

SWt = quantité finale d'eau dans le sol (mm), $SW0$ = quantité initiale d'eau dans le sol (en mm), $Rday$ = précipitation totale (mm), $Qsurq$ = écoulement total (mm), Ea = évapotranspiration totale (mm), $Wseep$ = quantité d'eau dans la zone non saturée (mm), Qgw = quantité d'eau retournant au sol (mm).

La méthodologie est composée du calage et la validation du débit d'écoulement suivi de l'analyse prospective de l'impact des changements climatiques sur la pluviométrie et le ruissellement.

Calage et validation du débit d'eau sous SWAT

Les données hydro climatiques ont été intégrées dans le modèle SWAT afin de simuler l'écoulement. Le calage a été effectué avec le programme SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Program) en utilisant seize (16) paramètres ont été utilisés dans cette étude en tenant compte de la littérature sur l'utilisation du modèle SWAT dans les régions tropicales (Thiébault, 2010). SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting version 2), une méthode intégrée dans le programme SWAT-CUP (Abbaspour, 2015). Les paramètres utilisés concernent ceux de l'écoulement. Ces paramètres sont: CN2 (numéro de courbe 2) ALPHA_BF, GW_DELAY, GW_QMN, GW_REVAP, ESCO, CH_N2, CH_K2, ALPHA_BNK, SOL_AWC, SOL_K, SOL_BD, SURLAG, SLSUBBSN, EPCO et REVAPMN. Ces paramètres sont définis comme suit : CN2: le numéro de courbe 2 de la SCS est fonction de la perméabilité du sol, de l'utilisation du sol et de l'état historique de l'eau du sol. SCS définit trois conditions d'humidité antérieures: I-sèche (point de flétrissement), II-humidité moyenne, et III-humide (capacité au champ du sol). CN2 est la condition d'humidité II (humidité moyenne); ALPHA_BF: facteur de débit de base en jours: constante de récession de flux de base, α_{gw} est un indice direct de la réponse du flux d'eau souterraine dans l'évolution de la recharge (Smedema et Rycroft, 1983); GW_DELAY: le séjour de l'eau souterraine en jours; GW_QMN: Profondeur seuil de l'eau dans l'aquifère peu profond requis pour la résurgence du débit (mm); GW_REVAP: Coefficient d'évaporation des eaux souterraines; ESCO: facteur de compensation de l'évaporation du sol: ce coefficient a été incorporé pour modifier la distribution en profondeur; il est utilisé pour compenser l'évaporation du sol et pour tenir compte de l'effet de la capillarité, des croûtes et des fissures; CH_N2: coefficient de Manning dans la chenal principal; CH_K2: Conductivité hydraulique efficace dans le chenal principal d'alluvion; ALPHA_BNK: coefficient d'épuisement dans les rivières; SOL_AWC: capacité d'emmagasinement de l'eau disponible de la couche de sol; SOL_K: conductivité hydraulique du sol à saturation; SOL_BD: densité du sol; SURLAG: temps de réponse du bassin hydrographique; SLSUBBSN: Longueur de pente moyenne (m); EPCO: facteur de compensation de l'évapotranspiration pour l'absorption des plantes en fonction de la profondeur; REVAPMN: seuil d'évaporation des eaux souterraines (mm).

Après le choix des paramètres, le calage du débit à l'aide SUFI2 a été effectué en plusieurs étapes.

Dans la première étape, une fonction objective $g(b)$ est définie. Les coefficients de Nash-Sutcliffe (NS) et de corrélation (R^2). NS permet d'évaluer la force des prédictions du modèle et R^2 indique la corrélation entre les simulations du modèle et les valeurs observées. Puis, il a été question de choisir les valeurs physiquement significatives des paramètres à optimiser entre une valeur minimale et une valeur maximale. Il n'existe aucune base théorique pour l'exclusion d'une distribution particulière. Cependant, en raison du manque d'informations, l'on suppose que tous les paramètres sont uniformément répartis dans une région délimitée par les valeurs minimale et maximale; ils doivent être aussi larges que possible, mais physiquement significatifs. Les valeurs à attribuer doivent se faire selon la relation (2) :

$$b_j, abs_min \leq b_j \leq b_j, abs_max_j = 1, \dots, m \quad (2)$$

où b_j est le $j^{\text{ème}}$ paramètre et m est le nombre de paramètres à estimer.

Ensuite, l'échantillonnage " Hypercube Latin" (McKay et al., 1979) est réalisé ; ce qui conduit à la combinaison de n simulations. Ce nombre (n) doit être relativement important (500-1500). La simulation est ensuite exécuté n fois et les variables de sortie simulées correspondant aux mesures sont enregistrées. Ainsi, les fonctions objectives et la sensibilité de chaque paramètre sont estimées selon les équations ci-dessous :

$$NS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_o - Y_m)^2 - \sum_{i=1}^n (Y_s - Y_m)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_o - Y_m)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (Y_o - Y_m)(Y_s - Y_{sm}))^2}{\sum_{i=1}^n (Y_o - Y_m)^2 \sum_{i=1}^n (Y_s - Y_{sm})^2} \quad (4)$$

Y_o : valeur observée

Y_m : valeur moyenne observée

Y_s : valeur simulée

Y_{sm} : valeur moyenne simulée.

La sensibilité des paramètres est évaluée en plusieurs étapes. Tout d'abord, la matrice de sensibilité J de $g(b)$ est calculée en utilisant:

$$J_{ij} = \frac{\Delta g_i}{\Delta b_j} \quad (5)$$

Avec $i = 1, \dots, C_2^n$, et $j = 1, \dots, m$

C_2^n étant le nombre de lignes de la matrice de sensibilité (égal à toutes les combinaisons possibles de deux simulations) et j le nombre de colonnes (nombre de paramètres).

Puis, l'équivalent d'une matrice hessienne, H est calculé selon Gauss-Newton et négligeant les dérivés d'ordre supérieur comme suit:

$$H = J^T J \quad (6)$$

Sur la base du théorème de Cramer-Rao (Press et al., 1992), une estimation de la limite inférieure de la matrice de covariance des paramètres, C , est calculée à partir de:

$$C = S_g^2 (J^T J)^{-1} \quad (7)$$

où S_g^2 est la variance des valeurs de la fonction objective résultant de n simulations.

La sensibilité des paramètres a été calculée selon le système de régressions multiples, qui regroupe les paramètres générés par l'échantillonnage "Hypercube Latin" par rapport aux valeurs de la fonction objective:

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (8)$$

avec $\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_m}$, $\beta = \frac{\mu_s}{\mu_m}$; σ_s et σ_m sont les écart-types des données simulées et observées; μ_s et μ_m sont les moyennes des données simulées et observées.

Un test statistique est ensuite appliqué pour identifier l'impact relatif de chaque paramètre b_i . La sensibilité est estimée par la moyenne des variations observées de chaque paramètre au niveau de la fonction objective lorsque tous les autres paramètres changent.

Enfin, les incertitudes sur les paramètres sont calculées. Les calculs concernent d_x et le facteur r . Ils sont calculés à 2,5% (x_l) et 97,5% (x_u) percentile de la répartition cumulative de chaque point simulé. La qualité de l'ajustement est évaluée par la mesure d'incertitude calculée à partir du pourcentage de données mesurées encadré par les valeurs minimales et maximales du "95PPU (95% d'incertitude de prédiction qui représente d_x)" et la distance moyenne entre le haut et le bas de 95PPU déterminé à partir de:

$$dx = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_u - x_l) \quad (9)$$

où k est le nombre de points de données observées.

Le meilleur résultat est que 100% des mesures soient couvertes par 95PPU et proche de zéro. Une mesure raisonnable de d_x est calculée par le facteur r exprimé comme suit:

$$\text{facteur } r = \frac{d_x}{\sigma_x} \tag{10}$$

avec σ_x l'écart-type de la mesure de d_x .

La calibration a été effectuée sur la période 1985-1988. La méthodologie globale est résumée à la figure 6.

Pour utiliser le modèle calé pour évaluer l'impact des changements climatiques, le modèle a été validé en essayant de reproduire sans modification des valeurs des paramètres, les débits mensuels observés sur une période qui n'a pas été utilisée pour le calage. Les périodes choisies pour la validation sont 1989-1992 pour la période humide et 1994-1999 pour la période sèche. La performance du calage a été évaluée à l'aide de NS (3), R^2 (4), d_x (9) et le *facteur* r (10). On dit qu'un modèle est parfait si les valeurs de NS et R^2 sont égales à 1. Cependant, en raison d'erreurs liées aux incertitudes dans les mesures, il est impossible d'atteindre cette valeur. Ainsi, certains auteurs Santhi et al. (2001) et Vanliew et al. (2003) considèrent que les valeurs NS et R^2 supérieures à 0,5 sont acceptables. Les valeurs théoriques de d_x sont comprises entre 0 et 100%, tandis que celles du facteur r sont comprises entre 0 et l'infini. Une valeur de d_x égale à 1 et un facteur r de zéro indiquent que la simulation correspond exactement aux données mesurées. Une valeur de d_x plus grande peut être atteinte contre un *facteur* r élevé. Les résultats de calage et de validation des travaux de Koua et al. (2014a) (tableau 1) ont été utilisés pour la simulation de l'impact des changements climatiques sur la pluviométrie et le ruissellement.

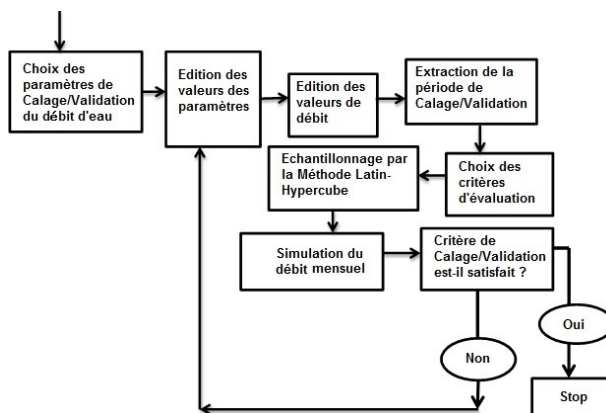


Figure 6 : Procédure de calibration et de validation sur SUFI2

Tableau 1 : Paramètres d'évaluation statistiques (Koua et al., 2014a)

	Stations		N°Zo Kahin				Piébli			
	N°Zo Kahin	Piébli	NS	R ²	d _x	Facteur r	NS	R ²	d _x	Facteur r
Calibration	1985-1988	1985-1988	0,89	0,87	0,32	0,37	0,80	0,82	0,34	0,46
Validation (période humide)	1989-1992	1989-1991	0,79	0,80	0,21	0,39	0,40	0,46	0,31	0,50
Validation (période sèche)	1994-1999	-	0,63	0,65	0,40	0,64	-	-	-	-

Analyse de l'impact des changements climatiques sur la pluviométrie et le ruissellement

Les données hydro climatiques au format netcdf ont été converties en ‘.dbf’ en utilisant l'outil "Multidimension Tool" d'ArcGIS. Les biais du modèle climatique ont été corrigés selon Eisner et al. (2012) :

$$T_{d,m}^{scen} = T_{d,m}^{obs} + (\overline{T_m^{GCMscen}} - \overline{T_m^{GCMcon}}) \tag{11}$$

$$P_{d,m}^{scen} = P_{d,m}^{obs} \cdot \left(\frac{\overline{P_m^{GCMscen}}}{\overline{P_m^{GCMcon}}} \right) \tag{12}$$

$T_{d,m}^{scen}$ et $P_{d,m}^{scen}$ représentent respectivement les températures et les pluies journalières du modèle climatique UKMO-HadGEM1 sous le scénario A1B corrigées ; $T_{d,m}^{obs}$ et $P_{d,m}^{obs}$ sont respectivement les températures et pluies journalières observées ; $\overline{T_m^{GCMscen}}$ et $\overline{P_m^{GCMscen}}$ représentent les températures moyennes et de pluies du modèle climatique dans le futur sous la scénario A1B ; $\overline{T_m^{GCMcon}}$ et $\overline{P_m^{GCMcon}}$ désignent les moyennes mensuelles de température et de pluie du modèle sur la période de référence (1950-1979). D’un point de vue strictement climatique, la communauté scientifique a retenu la période 1961-1990 comme période de référence car elle est considérée comme une période normale (Bourque, 2000 ; Bah et al., 2019). Cependant, sur cette période, l’on ne disposait pas de données d’observation de précipitations et de températures assez suffisantes pour mener une étude de changement climatique. Ainsi, la période 1950-1979 a été choisi comme période de référence.

Après la correction des biais, la prochaine étape de l'étude a été la préparation de la base de données requise pour exécuter le modèle d'impact du changement climatique sur les périodes 1950-1979 (référence), 2035-2064 (horizon 2050) et 2064-2093 (horizon 2080). La nouvelle base de données préparée a aidé à reconfigurer le bassin versant; et le modèle SWAT a été exécuté une fois sur les trois périodes ci-dessus en utilisant les valeurs des paramètres du calage du débit d'eau (tableau 2 et 3).

La figure 7 présente la synthèse de la méthodologie utilisée.



Figure 7 : Principe de l'étude d'impact des changements climatiques dans un bassin versant à l'aide de SWAT

Tableau 2 : Valeurs optimales des paramètres du calage du débit d'eau dans le bassin versant de Buyo (Koua et al., 2014b)

Sensibilité décroissante	Paramètre	Définition	Valeur minimale	Valeur maximale	Paramètre calé
1	CH_N2	Coefficient de Manning pour la canal principal	-0,01	0,3	0,0653
2	SURLAG	Coefficient de délai du ruissellement	0,05	24	0,476
3	CN2	Coefficient du numéro de courbe 2	35	98	37,47
4	REVAPMN	Seuil d'évaporation à partir de la nappe souterraine (mm)	0	500	0,0519
5	ALPHA_BNK	Coefficient de tarissement dans les berges des cours d'eau	0	1	0,062
6	CH_K2	Perméabilité des berges des chenaux principaux en (mm.h ⁻¹)	-0,01	500	19,356
7	GW_REVAP	Coefficient d'évaporation à partir de la nappe souterraine	0,02	0,2	0,0675
8	SLSUBBSN	Longueur des pentes moyenne	10	150	10,285
9	SOL_K	Conductivité hydraulique à saturation	0	2000	0,5139

Tableau 3 : Valeurs optimales des paramètres du calage du débit d'eau dans le bassin versant de Buyo (suite)

Sensibilité décroissante	Paramètre	Définition	Valeur minimale	Valeur maximale	Paramètre calibré
10	ESCO	Facteur sol d'évaporation du sol en fonction de la profondeur	0	1	0,8102
11	EPCO	Facteur végétal d'évaporation du sol en fonction de la profondeur	0	1	0,6065
12	GWQMN	Seuil de contribution de la nappe souterraine à l'écoulement en chenal, écoulement de base (mm)	0	5000	0,4364
13	SOL_AWC	Capacité d'emmagasinement de l'eau disponible de la couche de sol	0	1	0,3531
14	ALPHA_BF	Coefficient de tarissement de la nappe souterraine	0	1	0,0448
15	SOL_BD	Densité apparente humide	0,9	2,5	1,5635
16	GW_Delay	Délai de recharge de l'aquifère (j)	0	500	415,20

RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats

Évolution spatio-temporelle des précipitations du bassin versant du lac de Buyo

L'évolution spatio-temporelle des précipitations sur l'ensemble du bassin versant sur la période de référence (1950-1979) sont illustrées à la figure 8. Elle montre des intensités de pluie qui varient de 1288 à 1653 mm. Les précipitations fortes sont localisées dans la partie nord-ouest et sud du bassin avec des intensités atteignant 1653 mm. A l'horizon 2050 (2035-2064), les précipitations devraient baisser jusqu'à 1097 mm (figure 9).

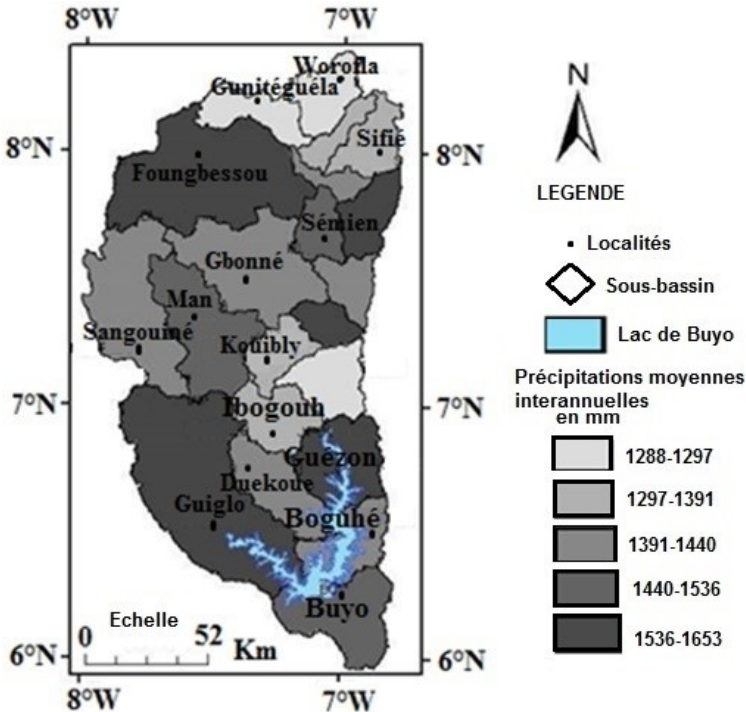


Figure 8 : Évolution spatio-temporelle des précipitations sur la période 1950-1979 dans le bassin versant du lac de Buyo.

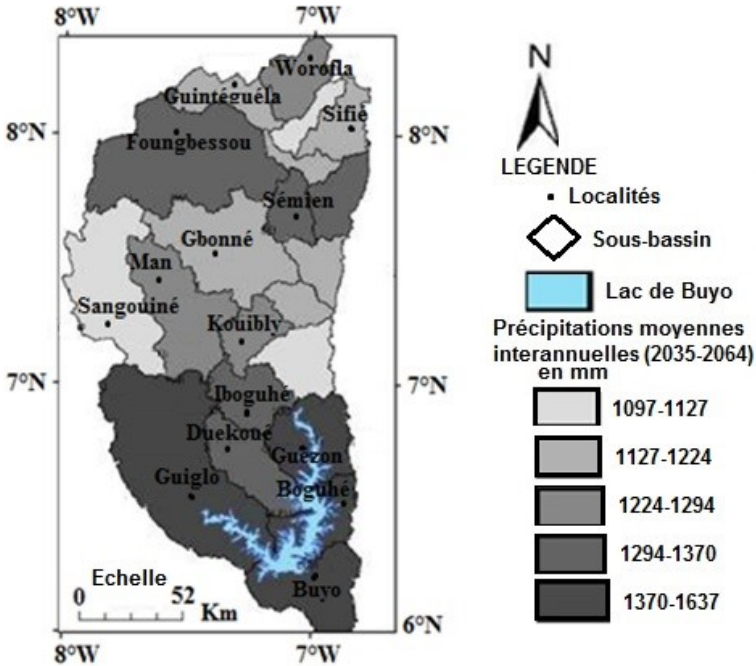


Figure 9 : Évolution spatio-temporelle des précipitations sur la période 2035-2064 dans le bassin versant du lac de Buyo

Les zones les plus touchées sont les localités de Sangouiné, Kouibly, Gbonné et Worofla, Sifié et Guintéguéla. De façon générale, la moitié nord du bassin pourrait être plus sèche, la partie sud étant plus humide avec des précipitations pouvant aller jusqu'à 1637 mm. Pendant la période 2064-2093 (figure 10), plus de 60% du bassin connaîtraient une baisse de précipitations. Ainsi, les précipitations pourraient chuter jusqu'à 1017 mm. On note en général que les parties Sud et Est seront plus humide. La moitié nord du bassin sera plus sèche. Les localités les plus touchées seront Sangouiné, Man, Foubgessou, Guintéguéla, Gbonné, Sémien, Sifié et Worofla. En résumé, on retient que le nord du bassin versant du lac de Buyo serait plus impacté par le changement climatique.

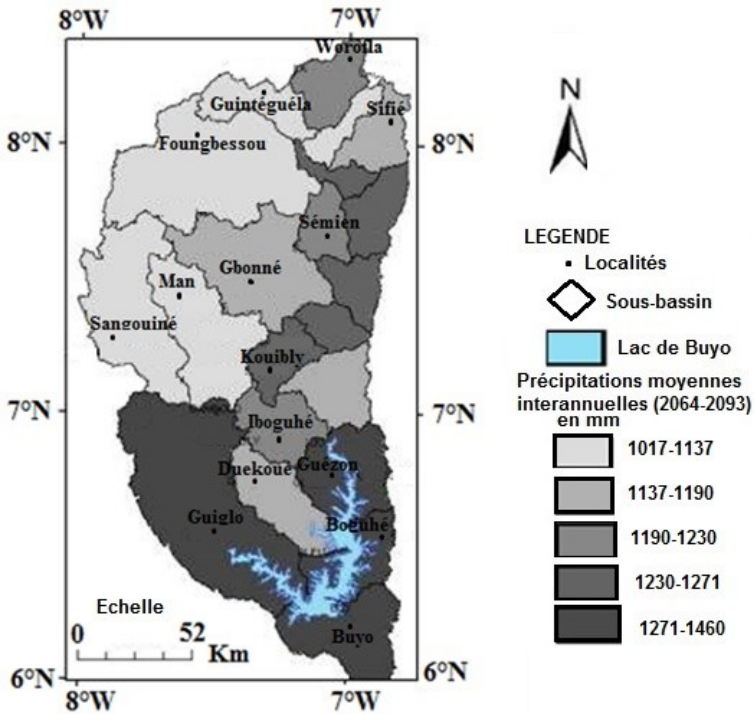


Figure 10 : Évolution spatio-temporelle des précipitations sur la période 2064-2093 dans le bassin versant du lac de Buyo

Évolution spatio-temporelle du ruissellement dans le bassin versant du lac de Buyo

L'évolution spatio-temporelle du ruissellement est présentée à la figure 11. Le ruissellement varie entre 180 et 493 mm selon les sous-bassins. Sur la période de référence (1950-1979), le modèle indique un ruissellement plus important dans le nord que dans le sud du bassin versant. Les quantités d'eau ruisselées sont plus importantes dans les localités de Kouibly, Gbonné et Guintéguéla, Sémien et Sifié. Ce ruissellement important constaté s'explique par la présence de pentes fortes et du couvert végétal en forte régression qui favorisent un écoulement de surface important. Au sud du bassin, le ruissellement est moins important à cause des faibles pentes et de la densité de végétation. A l'horizon 2050 (2035-2064) (figure 12), il y aura une baisse du ruissellement sur l'ensemble de la zone d'étude qui variera entre 158 et 340 mm d'eau, soit une variation de -12% à -31%. De plus, au cours de cette période, les zones à fort ruissellement devront rester en général les mêmes que la période de référence.

Ainsi, le centre et le nord-est présenteront un ruissellement très accru comparés à la partie sud du bassin versant.

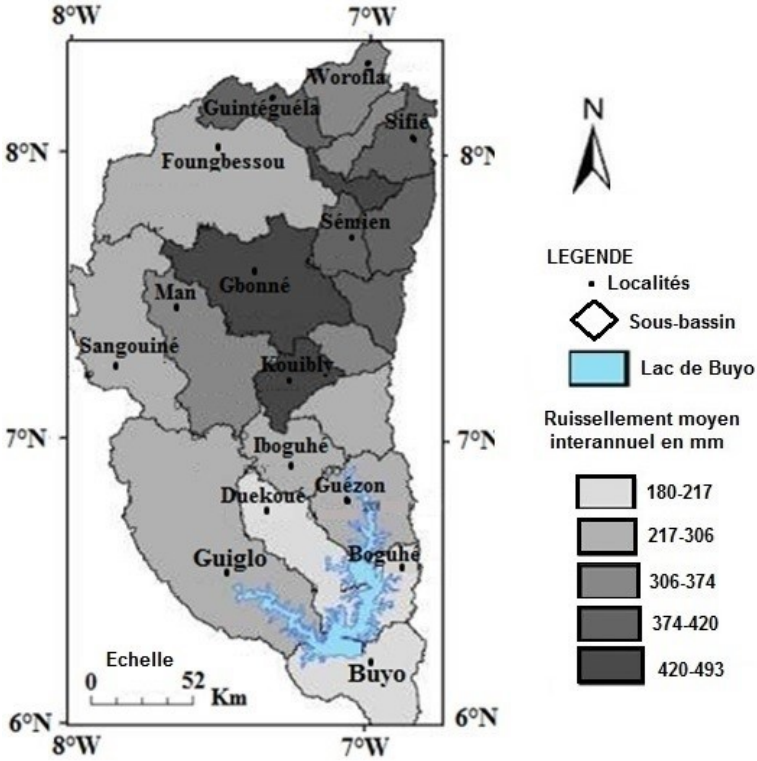


Figure 11 : Évolution spatio-temporelle du ruissellement sur la période 1950-1979 dans le bassin versant du lac de Buyo

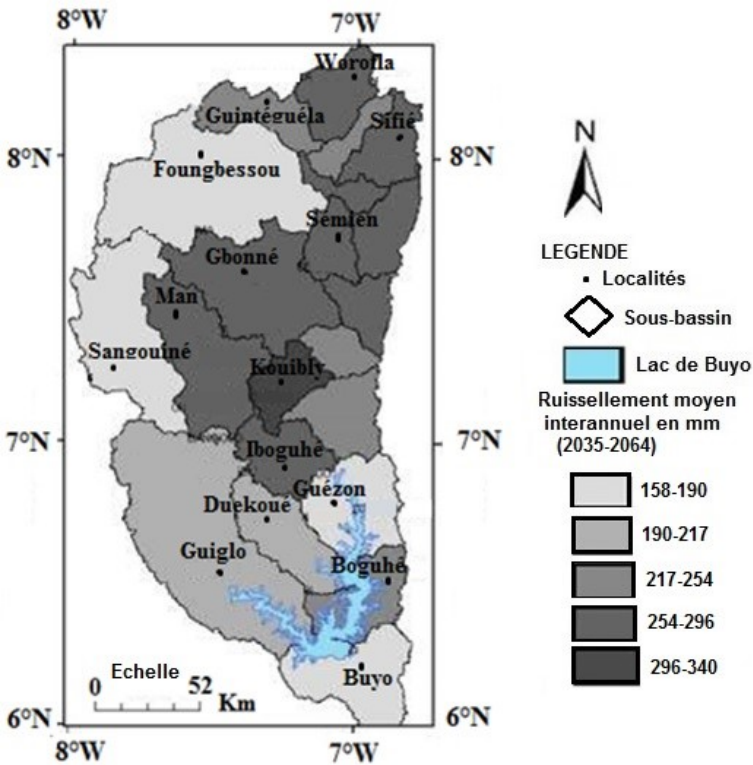


Figure 12 : Évolution spatio-temporelle du ruissellement sur la période 2035-2064 dans le bassin versant du lac de Buyo

Au cours de cette période, dans la localité d'Ibohué, l'on pourrait assister à une hausse du ruissellement qui devrait se situer entre 217 et 254 mm (figure 12) alors qu'il variait entre 180 et 217 mm en période de référence.

A l'horizon 2080 (2064-2093) (figure 13), le ruissellement devrait également baisser pour se situer entre 132 et 274 mm. Cette variation se situe entre -27% et -44%. Cependant, les zones à fort ruissellement devraient rester les mêmes.

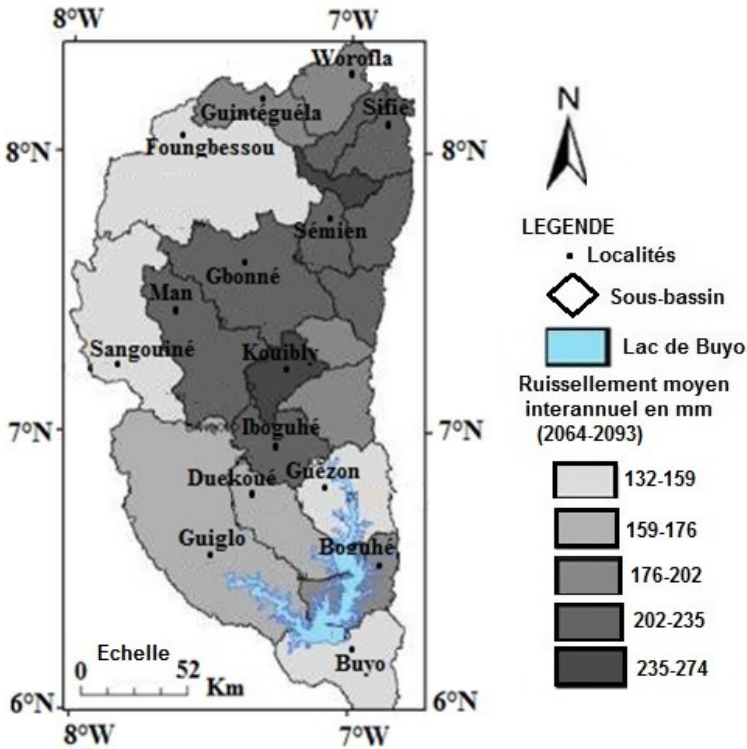


Figure 13 : Évolution spatio-temporelle du ruissellement sur la période 2064-2093 dans le bassin versant du lac de Buyo

DISCUSSION

Cette étude a montré une baisse des pluies et du ruissellement. Les résultats confirment les travaux de l’IPCC (2008) et Koua et al. (2014). En effet, à l’horizon 2080-2099, les écoulements en Afrique de l’Ouest, calculés sur la base du scénario d’émission A1B, pourraient baisser jusqu’à 50% (IPCC, 2008 ; Koua et al., 2014). Selon UICN (2004), bien que les prévisions en ce qui concerne les écoulements varient grandement au plan régional, la plupart des scénarios de changements climatiques font état de baisse des écoulements dans les pays arides et semi-arides de l’Afrique de l’Ouest. Les régions les plus vulnérables sont essentiellement les pays en bordure du Golfe de Guinée (Kouakou, 2011). Les baisses de pluviométrie à l’horizon 2050 seront de l’ordre de 60 à 70 % pour le scénario A1B (Ogouwale et al., 2015). Cette situation

pluviométrique dans le bassin à l'horizon 2050 semble être une extension de la zone climatique humide de l'Afrique centrale vers l'Afrique de l'ouest (Totin, 2010). En Côte d'Ivoire, la baisse dans les écoulements peut atteindre les 20% (IPCC, 2008 ; Koua et al., 2014). Les résultats de cette étude ont montré une variation du ruissellement de -12% à -31%. Ces résultats sont en accord avec les conclusions des travaux antérieurs réalisés sur la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest en général dont les plus récents (Ardoin et al., 2003; Ardoin, 2004; Ardoin et al., 2005) et en Côte d'Ivoire en particulier (Bigot et al., 2005; Brou, 2005; Goula et al., 2006 ; Kouassi et al., 2008; Kouassi et al., 2010; Kouassi et al., 2012; Kouakou et al., 2012). Koua et al. (2014) ont mis en évidence une hausse de la température de +1.34°C à l'horizon 2050 et de +3.87°C à l'horizon 2080. La variabilité climatique se manifeste par une hausse des températures de l'air, ce qui a pour conséquence une affection du cycle hydrologique en général et la formation de nuages pluvio-gènes en particulier, d'où la faiblesse des hauteurs pluviométriques annuelles (Kouamé et al., 2014). Particulièrement, le régime des écoulements à l'horizon 2075 de Sassandra à Piéby et à Kahin baisserait respectivement de 8,4 et 6,9% (MEEF, 2000 ; Goula et al., 2006). Sur le Sassandra dans le bassin versant de la Davo, Kouamé et al. (2014) ont également prouvé une diminution des précipitations. Il est clair que, dans un scénario de climat sec, les difficultés d'approvisionnement en eau s'aggravaient dans le bassin versant de du lac de Buyo. La diminution des précipitations et du ruissellement aura un impact sur les activités humaines. Le bassin versant étant agricole, cette agriculture tributaire de la pluviométrie, une diminution de celle-ci aura sans doute des inconvénients sur la production agricole. Le lac de Buyo s'alimente par les eaux de ruissellement. Ainsi, l'impact du changement climatique sur l'écoulement sera directement ressenti par la production hydro-électrique et halieutique du lac.

Cependant, il y a quelques réserves à émettre sur les résultats des études de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau. En effet, Les projections climatiques du modèle HadCM3-A2 ont montré une augmentation des précipitations et des écoulements sur le bassin versant de Sassandra à Soubré près de Buyo à l'horizon 2050 et 2080 (Ardoin, 2004 ; Ardoin et al., 2005). En revanche, selon les mêmes auteurs, les débits simulés de juin à août sont supérieurs à ceux observés et compensent en partie la diminution des écoulements en septembre-octobre à l'horizon 2080 qui est de -22 %. Cette différence de résultats a plusieurs raisons. En effet, il s'agit d'une modélisation hydrologique, mettant en œuvre un modèle et dans tout travail de modélisation (hydrologique), il existe des incertitudes en entrée (précipitations), dans le modèle conceptuel (en faisant des simplifications ou en ignorant d'importants

processus), dans les paramètres du modèle (non spécifiques) et dans les données mesurées (débits utilisés pour le calage) (Schuol et al., 2008). L'utilisation sous des scénarios de changement climatique de modèles d'impacts calés en climat actuel ou passé repose sur l'hypothèse que les relations entre le climat et les variables étudiées (débits, pluies, ruissellement, etc.) varient peu avec le climat. En plus, pour imaginer le climat du XXI^e siècle, il faut se représenter les possibilités d'évolution de l'humanité. Va-t-elle ou non continuer à émettre des gaz à effet de serre en grandes quantités? La réponse à cette question repose, entre autres sur les changements démographiques à l'échelle mondiale, les choix énergétiques futurs, les développements économiques, l'application de politiques environnementales, etc. Or, au fur et à mesure que l'on s'éloigne dans le temps, l'incertitude associée aux seuls scénarios socio-économiques grandit. Elle n'est pas très importante au cours de la première moitié de ce siècle mais devient prépondérante à la fin. Il y a aussi les incertitudes structurelles des modèles numériques : les simulations climatiques sont réalisées grâce à des outils mathématiques programmés sur de puissants ordinateurs : les modèles numériques. Ils se sont enrichis au fil du temps afin de représenter au plus près la complexité du système climatique. Ils comportent aujourd'hui des variables comme : la température de l'atmosphère, les vents et l'eau qu'elle contient (vapeur, liquide et glace), la température de l'océan, ses courants et sa salinité, la distribution géographique des continents et la végétation ou la neige qui les recouvre, la température, l'étendue et l'épaisseur de la banquise, le débit des fleuves. Ces variables doivent être calculées en tout point d'une grille qui découpe l'atmosphère, l'océan et la banquise en volumes élémentaires, délimités par un maillage horizontal et des niveaux verticaux. Aux dizaines de millions de valeurs des variables qui doivent ainsi être calculées à chaque pas de temps de calcul (toutes les vingt à trente minutes) s'ajoutent un nombre très important de paramètres nécessaires pour décrire des phénomènes de petite échelle dans l'espace et dans le temps (comme les nuages orageux). La description de ces phénomènes et les paramètres correspondants sont les principales sources d'incertitude de la modélisation numérique du climat. Un autre critère est à prendre en compte pour évaluer les incertitudes : la résolution des modèles. En 2013, la taille des mailles des projections climatiques globales est d'environ 150 km, mais elle était plutôt de l'ordre de 300 km (GIEC, 2007). Plus cette taille est petite, plus les calculs sont précis en particulier parce que le relief peut être mieux décrit. C'est d'ailleurs ce qui motive la réalisation de simulations climatiques aux échelles régionales permettant d'atteindre des résolutions d'environ 10 km sur la région d'intérêt. Mais diviser par 2 la taille de la maille nécessite 8 à 16 fois plus de calculs, donc des ordinateurs 8 à 16 fois plus puissants. De plus on note les incertitudes sur la variabilité interne du climat.

Certains phénomènes climatiques se produisent de façon irrégulière, à l'instar d'El Niño ou la NAO (« North Atlantic Oscillation »). Ils participent aux grandes oscillations observées à l'échelle décennale. Le climat peut ainsi être plutôt chaud ou plutôt froid pendant dix années ou plus. Dans une simulation sur 100 ans, les modèles vont bien représenter ces grandes oscillations mais seront incapables de prévoir exactement leurs dates de début et de fin. Cette incertitude due à la variabilité intrinsèque du climat est imprévisible au-delà des dix prochaines années. Reprenant l'exemple de l'évolution de la température moyenne globale au XXI^e siècle, l'incertitude associée à la variabilité interne du climat est prépondérante pour les toutes prochaines décennies. En revanche, au-delà, les incertitudes liées aux scénarios socio-économiques d'une part et aux incertitudes structurelles des modèles d'autre part reprennent le dessus. En considérant ces différentes sources d'incertitude, on comprend que les projections de climat et d'impacts ne peuvent être lues sans certaines précautions. C'est pourquoi il faut considérer la tendance simulée. Dans notre cas une tendance à la baisse des précipitations et du ruissellement a été observée aux horizons d'étude. Cette tendance devrait être prise en compte dans toute politique en matière de planification et de gestion des ressources en eau du bassin de Buyo.

CONCLUSION

Cette étude a été réalisée à l'aide du modèle climatique de circulation générale UKMO-HadGEM1 dont les sorties ont servi de données d'entrée du modèle hydrologique SWAT. Les simulations ont été réalisées après le calage et la validation du débit d'eau mensuel sur la période 1985-1999. Les analyses ont porté sur la période 1950-1979 (référence), 2035 à 2064 (horizon 2050) et 2064-2093 (horizon 2080). Les résultats indiquent que l'ensemble du bassin versant du lac de Buyo connaîtra une baisse de la pluviométrie. Les précipitations devraient ainsi varier de 1288 à 1653 mm sur la période contemporaine (1950-1979). Les parties nord-ouest et sud du bassin subiront des précipitations plus fortes pouvant atteindre 1653 mm. A l'horizon 2050, les précipitations devraient baisser jusqu'à 1097 mm, avec une variation de -34%. Pendant la période 2064-2093, les précipitations pourraient baisser de 38%. Le ruissellement évoluera dans le même sens que les pluies. En effet, à l'horizon 2050, une baisse du ruissellement sur l'ensemble du bassin variant entre 158 et 340 mm pourrait être observée. A l'horizon 2080, le ruissellement devrait également baisser pour se situer entre 132 et 274 mm. Cependant, les zones à fort ruissellement devraient rester les mêmes. L'étude des impacts potentiels du changement climatique sur

les précipitations et le ruissellement dans le bassin versant du lac de Buyo a mis en évidence les variations croissantes du climat influençant directement le cycle de l'eau. Ces variations constituent une menace réelle pour les populations les plus défavorisées. Ainsi, les stratégies d'adaptation aux changements climatiques doivent tenir compte de cette réalité.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier le PASRES (Programme d'Appui Stratégique à la Recherche Scientifique en Côte d'Ivoire) et la Confédération Suisse qui ont financé en partie cette étude.

REFERENCES

- ABBASPOUR K.C. (2015). SWAT- Calibration and uncertainty programs, a user manual, https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf (Consulté en Août 2018).
- AKA A.A., LUBES H., MASSON M., SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B. (1997). Analyse de l'évolution temporelle des écoulements en Côte d'Ivoire. Approche statistique et caractérisation des phénomènes. Programme d'Hydrologie Internationale, Vol.16, pp. 49-63.
- ARDOIN B. S., DEZETTER A., SERVAT E., MAHE G., PATUREL J.E., DIEULIN C., CASENAVE L. (2005). Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale. International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication, 296, pp. 194-202.
- ARDOIN B.S. (2004). Variabilité hydro climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, France, 440 p.
- ARDOIN B.S., LUBES-NIEL H., SERVAT E., DEZETTER A., BOYER J.F. (2003). Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la situation de la décennie 1990. International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication, 278, pp. 223-228.
- ARNOLD J.G., FOHRER N. (2005). Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. Hydrological Processes, 19, pp. 563-572, <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- BAH A., CAMARA I., NOBLET M. (2019). Évaluation de la vulnérabilité du secteur ressources en eau à la variabilité et aux changements climatiques dans la région de

- Fatick. Rapport d'activités sous le Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne, Climate Analytics gGmbH, Berlin. 120 p.
- BIGOT S., BROU Y.T., OSZWAID J., DIEDHOU A. (2005). Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, 16, Issue 1, pp. 5-13.
- BOURQUE A. (2000). Les changements climatiques et leurs impacts, *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement, Vol.1, No.2, en ligne. DOI:10.4000/vertigo.4042 (consulté le 07 août 2019).
- BRICQUET J.P., BAMBA F., MAHE G., TOURE M., OLIVRY J.C. (1997). Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *Revue des Sciences de l'Eau*, Issue 3, pp. 321-337.
- BROU T.Y. (1997). Analyse et dynamique de la pluviométrie en milieu forestier ivoirien : recherche de corrélations entre les variables climatiques et les variables liées aux activités anthropiques. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 210 p.
- BROU Y.T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, 212 p.
- EISNER S., VOSS F., KYNAST E. (2012). Statistical bias correction of global climate projections—consequences for large scale modeling of flood flows. *Advances in Geosciences*, www.advgeosci.net/31/75/2012/ (Consulté en Octobre 2013).
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III. GIEC, Genève, Suisse. Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Équipe de rédaction principale), 103 p.
- GOULA B.T.A., KOUASSI V.J., SAVANE I. (2006). Impacts du changement climatique sur les ressources en eau en zone tropicale humide : cas du Bandama en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 18, pp. 1-11.
- HUBERT P., CARBONEL J.P., CHAUCHE A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol.110, Issues 3-4, pp. 349-367, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90197-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90197-2)
- IPCC (2008). *Climate Change and Water*. Rapport Technique IV, 214 p.
- IUCN (2004). Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et désertification, éléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation, <http://www.iucn.org/bookstore>. (Consulté en Février 2014).

- KOUA T.J. , ANOH K.A., SORO T.D., KOUAME K.J., JOURDA J.P. (2019) Evaluation of Agricultural Practices Scenarios for Reducing Erosion in Buyo Lake Catchment (Sassandra; Côte d'Ivoire) by Use of GIS. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol.7, pp. 154-171. doi: 10.4236/gep.2019.77011.
- KOUA T.J. (2014). Apport de la modélisation hydrologique et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans l'étude du transfert des polluants et des impacts climatiques sur les ressources en eau: cas du bassin versant du lac de Buyo (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, 166 p.
- KOUA T.J., JOURDA J.P., KOUAME K.J., ANOH K.A. (2013). Assessment of Sediment and Pollutants in Buyo Lake, Ivory Coast, Using SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Model. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Issue 11, pp. 1054-1059. DOI:10.17265/1934-7375/2013.11.008
- KOUA T.J., JOURDA J.P., KOUAMÉ K.J., ANOH K.A., N'DRI W.K., LAZAR G., LANE S. (2014a). Effectiveness of soil and water assessment tool model to simulate water flow in a large agricultural complex watershed: case of Buyo lake basin, West of Côte d'Ivoire. *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol.13, Issue 7, pp. 1735-1742. <https://doi.org/10.30638/eenj.2014.193>
- KOUA T.J., JOURDA J.P., KOUAME K.J., ANOH K.A., BALIN D., LANE S. (2014b). Potential climate change impacts on water resources in the Buyo Lake Basin (Southwest of Ivory Coast). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol.8, Issue 3, pp. 1094-1111.
- KOUAKOU K.E. (2011). 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 Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 186 p.
- KOUAKOU K.E., GOULA B.T.A., KOUASSI A.M. (2012). Analyze of climate variability and change impacts on hydro-climate parameters: case study of Cote d'Ivoire. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol.3, Issue 2, pp. 1-8.
- KOUAME Y.M., SORO G.E., KOUAKOU K.E., KOUADIO Z.A., MELEDJE N.E.H., GOULA B.T.A., SAVANE I. (2014). Scenarios des changements climatiques pour les précipitations et les températures en Afrique subsaharienne tropicale humide : cas du bassin versant de Davo, Cote d'Ivoire. *Larhyss Journal*, No.18, pp. 197-213.
- KOUASSI A. (2001). Pressions anthropiques et impacts socio-économiques et spatioécologiques dans l'espace Buyo (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 425 p.
- KOUASSI A.M., KOUAME K.F., GOULA B.T.A., LASM T., PATUREL J.E., BIEMI J. (2008). Influence de la variabilité climatique et de la modification de

l'occupation du sol sur la relation pluie débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne de Sciences et Technologie*, Vol.11, pp. 207-229.

- KOUASSI A.M., KOUAMÉ K.F., KOFFI Y.B., DJE K.B., PATUREL J.E., OULARE S. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Revue Européenne de Géographie (Cybergéo)*, <http://cybergeo.revues.org/index23388.html>. (Consulté en Aout 2018).
- KOUASSI A.M., AHOUSI K.E., YAO K.A., OUREGA W.E.J.A., YAO K.S.B., J. BIEMI (2012). Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Cote d'Ivoire). *Larhyss Journal*, No.10, pp. 57-74.
- MCKAY M.D., BECKMAN R.J., CONOVER W.J. (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, pp. 55-61.
- MAHE G., OLIVRY J.C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, Vol.6, pp. 109-117.
- MEEF (2000). Communication nationale initiale de la Côte d'Ivoire préparée en application de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. Rapport, 97 p.
- N'GO Y.A. (2000). Contribution à l'étude de l'érosion des sols du bassin versant du Sassandra (Région de Buyo) : Analyse des facteurs et essai d'évaluation des risques par télédétection et les systèmes d'information géographique. Thèse de doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 164 p.
- NACHTERGAELE F., VELTHUIZEN H.V., VERELST L. (2009). Harmonized World Soil Database (HWSD), http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/documents/HWSD/HWSD_Documentation.pdf (Consulté en Octobre 2010).
- NASSOPOULOS H. (2012). Les impacts du changement climatique sur les ressources en eaux en Méditerranée. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France, 174 p.
- OGOUWALE R., GOMEZ A.C., VISSIN E.W., BOKO M. (2015). Changements climatiques et modélisation hydro climatique dans le bassin versant de l'Okpara (Afrique de l'ouest). XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège, Belgique, pp. 579-584.
- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B., LUBES H., MASSON J.M., BOYER J.F., TRAVAGLIO M., MARIEU M. (1997). Variabilité pluviométrique en Afrique humide le long du Golfe de Guinée, Approche régionale intégrée. *Programme Hydrologie International*, Vol.16, pp. 1-31.

- PENE C.B., ASSA D.A. (2003). Variations interannuelles de la pluviométrie et de l'alimentation hydrique de la canne à sucre en Côte d'Ivoire. *Sécheresse*, Vol.14, pp. 43-52.
- SALEY M.B. (2003). Système d'Informations Hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région sémi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 209 p.
- SANDA I.S. (2009). Scénarios climatiques en Afrique de l'Ouest: performance des modèles de l'IPCC en Afrique de l'Ouest. Symposium International, Niamey, Mai, 2009.
- SANTHI C., ARNOLD J.G., WILLIAMS J.R., DUGAS W.A., SRINIVASAN R., HAUCK L.M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of the American Water Resources Association**, Vol.37, pp. 1169-1188.
- SAVANE I., COULIBALY K., GIOAN P. (2001). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, Vol.12, pp. 231-237.
- SCHUOL J., ABBASPOUR K.C., SRINIVASAN R., YANG H. (2008). Estimation of freshwater availability in the west African Sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology*, Vol.352, Issue 1-2, pp. 30-49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.025>
- SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., TRAVAGLIO M., OUEDRAOGO M., LUBES-NIEL H., FRISTCH J.M., MASSON J.M., MARIEU B. (1998). Identification, caractérisation et conséquence d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In : *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*, IAHS Publication, Vol.252, pp. 323-337.
- SERVAT E., PATUREL J.-E., LUBES-NIEL H., KOUAME B., MASSON J.M., TRAVAGLIO M., MARIEU B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol.12, pp. 363-387. <https://doi.org/10.7202/705356ar>
- SMEDEMA L.K., RYCROFT D.W. (1983). *Land drainage-Planning and design of agricultural drainage systems*. Cornell University Press, Ithaca, NY, U.S.A, 376p.
- THIEBUALT M. (2010). Modélisation hydrologique d'un scénario de changement climatique sur le bassin versant du Bani avec SWAT. Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, France, 55 p.
- TOTIN V.S.H. (2010). 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, Benin, 272 p.

- VANLIEW M.W., ARNOLD J.G., GARBRECHT J.D. (2003). Hydrology simulation on agricultural watersheds: choosing between two models. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol.46, Issue6, pp. 1539-1551. doi: 10.13031/2013.15643
- PRESS W.H., FLANNERY B.P., TEUKOLSKY S.A., VETTERLING W.T. (1992). Numerical Recipe in C, the Art of Scientific Computation, 2e edition., Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, 994p.