

EFFETS DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE ET DE LA DYNAMIQUE DU COUVERT VEGETAL SUR LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE ZOU A L'EXUTOIRE DE DOME.

EFFECTS OF CLIMATE VARIABILITY AND THE DYNAMICS OF VEGETATION COVER ON THE WATER RESOURCES OF THE ZOU RIVER WATERSHED AT THE DOME OUTLET.

Auteur 1 : Asai Akinni Gervais ATCHADE,

Asai Akinni Gervais ATCHADE

Laboratoire Pierre Pagney : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey Calavi, B.P 526, Cotonou République du Bénin.

Déclaration de divulgation : L'auteur n'a pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l'objectivité de cette étude.

Conflit d'intérêts : L'auteur ne signale aucun conflit d'intérêts.

Pour citer cet article : Asai Akinni Gervais ATCHADE (2026) « EFFETS DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE ET DE LA DYNAMIQUE DU COUVERT VEGETAL SUR LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE ZOU A L'EXUTOIRE DE DOME », African Scientific Journal « Volume 03, Num 37 » pp: 1682 – 1705.



DOI : 10.5281/zenodo.21966050

Copyright © 2026 – ASJ



Résumé

L'amenuisement prononcé des ressources en eau constitue de nos jours une menace potentiellement majeure pour l'environnement et ses différentes composantes. L'étude vise à analyser les modifications induites par la variabilité climatique et l'occupation du sol sur le cycle hydrologique pour la gestion optimale des ressources en eau du bassin versant de la rivière Zou (BVRZ). Les méthodes d'étude adoptées ont fait appel à des statistiques descriptives, de diagnostic pour la caractérisation de la variabilité hydroclimatique et celle liée à l'utilisation du modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Les résultats obtenus montrent que le bassin versant de la rivière Zou est soumis à une fluctuation de ses paramètres climatiques qui influence l'écoulement sur l'ensemble du bassin, avec un effet plus important dans le sous-bassin de Atchérigbé. De même, à l'horizon 2030, la variabilité climatique et la dégradation du couvert végétal entraîneront une baisse des ressources en eau de surface d'environ 33,87 % et celle des ressources en eau souterraine d'environ 31,07 %. La production en eau du bassin quant à elle va baisser d'environ 38,25 %. Les ressources en eau du bassin versant de la rivière Zou devraient par conséquent être soumises à une utilisation rationnelle, gage d'une contribution à la gestion intégrée ou durable des ressources en eau du bassin versant de la rivière Zou (BVRZ).

Mot clés : Effets, dynamique, couvert végétal, ressource en eau

Abstract

Nowadays, the dwindling of the water resources has pronounced and constitutes a potentially major threat to the environment and its components. The study aims at analyzing changes induced by climate variability and land use on the hydrological cycle for the optimal management of water resources in the watershed of the River Zou (BVRZ). The Study methods adopted have used descriptive statistics, diagnostics for characterizing variability and hydroclimatic that related to the use of SWAT (Soil and Water Assessment Tool). The results show that the catchment area of the River Zou is subject to fluctuation of climatic parameters that influences the flow across the basin, with a greater effect in the sub-basin Atchérigbé. About the Similarly for 2030, climate variability and degradation of vegetation cover lead to reduced surface water resources of approximately 33.87 % and the groundwater resources of approximately 31.07 %. The water production basin in turn will drop by about 38.25 %. The water resources of the watershed of the River Zou should therefore be subject to a rational, pledge a contribution to the integrated and sustainable management of water resources in the watershed of the River Zou (BVRZ).

Key words: Effects, dynamics, vegetation, water resources

Introduction

La problématique du fonctionnement hydrologique des cours d'eau en rapport avec les modifications de l'occupation des sols et du climat fait l'objet d'une attention croissante, aussi bien au plan national (Beseme, 1995) qu'international (Arnell, 1989). En effet, les conditions climatiques sont le facteur déterminant dans la formation et les caractéristiques quantitatives des ressources en eaux (Telteu, 2012).

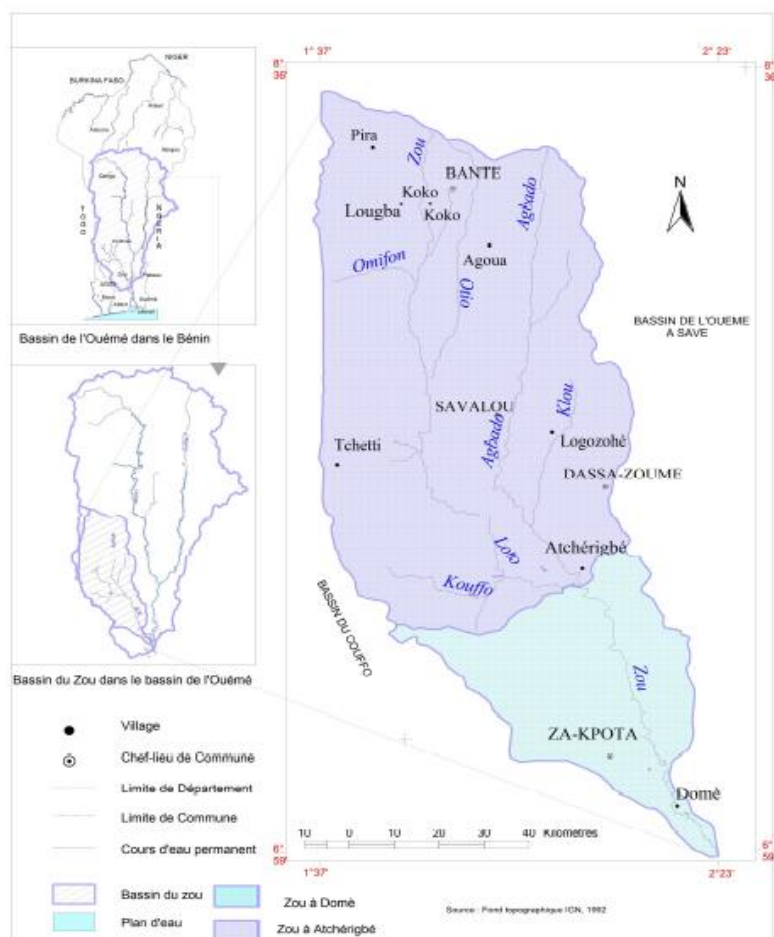
Le régime des paramètres climatiques (principalement, les précipitations, la température de l'air et du sol, l'évapotranspiration potentielle, la couverture de neige), influence l'alimentation en eau et la variabilité temporelle des paramètres hydrologiques spécifiques (hauteurs d'eau, débits solides et liquides, etc.). De même, la végétation dans l'espace joue un rôle important sur le cycle hydrologique et, dans un contexte de changement climatique, est déterminante pour étudier les variations des précipitations. La couverture végétale et les activités anthropiques jouent un rôle important dans le comportement hydrologique des bassins versants (Cosandey *et al.*, 2003, Amoussou, 2010). Elle a une influence mécanique sur le ruissellement superficiel, en plus du fait qu'elle conditionne l'évapotranspiration et donc le bilan hydrologique du bassin (Abdoulaye, 2015).

Pour Cosandey *et al.*, (2003) ; Vissin (2007), toute modification des états et de la structure de la couverture végétale a des répercussions sur les ressources en eau du milieu. Face à ce constat, la compréhension des impacts des modifications du climat et des occupations du sol sur le cycle hydrologique est nécessaire pour la gestion optimale des ressources naturelles (Scanlon *et al.*, 2005) notamment sur les ressources en eau du bassin versant du Zou

1. Secteur d'étude

Le bassin versant du Zou est situé entre 7°15' et 8°33' de latitude nord et entre 1°35' et 2°14' de longitude est (figure 1).

Figure 1. Situation géographique du bassin versant du Zou



Source : Fond topographique, IGN 2018

Une démarche méthodologique a été adoptée aux fins d'obtenir les résultats escomptés.

2. Données et méthodes d'étude

2.1. Données

Les données utilisées dans le cadre de cette étude concernent les chroniques climatologiques, hydrologiques, et celles d'occupation des terres. Les chroniques climatologiques sont entre autre : les hauteurs de pluie (journalière, mensuelle et annuelle) des stations pluviométriques situées dans le bassin du Zou ou dans ses environnements immédiats. Il s'agit des données de Agouna, Bantè, Pira, Gouka, Dassa, Tchètti, Savalou, Bohicon, Abomey, Zagnanado sur la période 1965-2010.

Les données d'évapotranspiration potentielle, de températures maximales et minimales (mensuelles), d'insolation, de la vitesse du vent et de l'humidité relative (1965-2010), des

stations synoptiques de Bohicon et de Savè ont été collectées à la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Enfin les données sur les scénarii futurs du climat (2015 à 2030) mises au point par le programme de recherche IMPETUS sont été utilisées pour estimer les effets des modifications futures du climat et du couvert végétal sur la production en eau du bassin. Les données hydrologiques utilisées proviennent de la station de Atchérigbé, située au niveau du pont de la route inter-états Cotonou-Parakou, sur la rivière Zou, et celle de Domè, située un peu plus en aval du bassin. Le tableau I présente les coordonnées géographiques ainsi que les aires drainées par les différents bassins du Zou.

Tableau I : Coordonnées des stations hydrométriques et aire drainée

Stations hydrométriques	Coordonnées		Aire drainée (km ²)
	Est	Nord	
Zou à Atchérigbé	2°02'	7°32'	6790
Zou à Domè	2°20'	7°07'	8920

Source : DGEau Bénin, 2010

Le sous-bassin de Domè draine la plus grande superficie (8920) du fait de sa position géographique et du nombre d'affluents constituant ce sous réseau. Les chroniques hydrologiques couvrant la période allant de 1965 à 2010 ont été tirées des bases de données du Service d'Hydrologie de la Direction Générale de l'Eau.

➤ Documents planimétriques

Les documents planimétriques dont les données sont extraites et utilisées sont, la carte topographique de la république du Bénin : feuille Abomey-Zagnanado à l'échelle 1/200000e et la carte de végétation au 1/50000e, réalisée par le CENATEL en 1999.

Ces différentes cartes sont complétées par des images LANDSAT ETM 1998 et LANDSAT ETM 2010 (de 30 m de résolution) pour l'élaboration des différentes cartes thématiques et d'occupation de sol dans le bassin versant de la rivière Zou. En effet, ce sont des données fournies sur les types d'occupation du sol de 1998 et 2010. Il s'agit notamment : des forêts et galeries forestières, des forêts claires et savanes boisées, des savanes arborées et arbustives, des mosaïques de cultures et de jachères, des plans d'eau, la prairie et autres.

Et enfin, les données des scénarii futurs sur la dynamique d'occupation des sols des années (2017, 2022 et 2027) mises au point par le projet REVERTUWIN sont utilisées pour estimer les effets des modifications futures du couvert végétal sur les ressources en eau du bassin.

➤ **Elimination des données douteuses**

Une vérification manuelle systématique a été réalisée sur les fichiers de données brutes des hauteurs de pluie et des débits journaliers de l'ensemble du réseau hydro-pluviométrique. Les stations pluviométriques très lacunaires (plusieurs mois ou années de manque de données, supérieures à 5 %) ont été d'abord éliminées par tri visuel ou estimation de la proportion des données manquantes. Cette technique permet d'éviter l'artificialisation des données tout en écartant tout risque d'introduire des chiffres viciés et fantaisistes (Klassou, 1996 cité par Totin, 2010).

➤ **Comblement des données manquantes**

La reconstitution des données manquantes a été effectuée alternativement par le biais de la régression linéaire, de la fonction puissance, des méthodes de Brunet-Moret (1969, 1971, 1979) et de prévision afin de choisir les meilleurs résultats. L'équation de Brunet-Morel a pour expression mathématique :

$$y_i = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} . x_i + \varepsilon_i$$

Où y_i est la valeur manquante à estimer dans la matrice incomplète, x_i la valeur correspondante dans la matrice de référence, $\bar{y}$ et $\bar{x}$ les moyennes respectives des deux matrices sur la sous chronique complète et commune aux deux stations. La valeur ε_i est négligeable et de ce fait n'a pas été considérée dans l'estimation des valeurs manquantes.

Quant à l'équation de la fonction de prévision, elle s'écrit $b + ax$ où x représente l'observation dont la valeur recherchée est sous la forme :

$$a = \frac{\bar{y} - b}{\bar{x}} \text{ et } b = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2}$$

L'équation du modèle permettant l'estimation des données d'une station (1) à partir de celle plus proche (2) est : $1 = a + b \cdot 2$ avec $a > 0$ et $b > 1$. Les séries climatologiques ainsi comblées, vérifiées et validées ont servi de base à l'analyse de l'influence des événements hydroclimatiques sur la disponibilité des ressources en eaux et leur gestion dans le bassin versant de la rivière Zou.

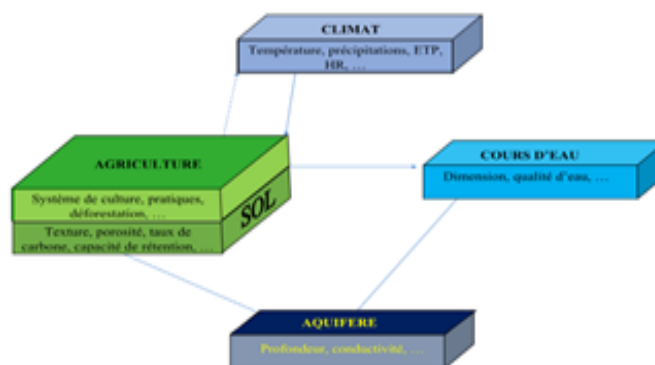
2.2. Approche d'évaluation des effets de la variabilité climatique et de la dynamique de l'occupation des terres sur les ressources en eau à l'horizon 2030

Pour évaluer les effets des modifications observées au niveau du climat et de l'occupation des terres sur les ressources en eau du bassin versant de la rivière Zou, le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a été utilisé.

Le SWAT, est un outil d'évaluation des terres et des eaux développé par le Service de Recherches Agricoles du Département de l'Agriculture des Etats-Unis (Arnold *et al.*, 1998) et testé en Afrique tropicale et particulièrement au Bénin par Sintondji (2005) et Dossou-yovo (2011). C'est un modèle hydrologique physique, semi-distribué à interface SIG (Arc View et Arc GIS) qui dérive les sous-bassins et le réseau de drainage d'un bassin versant à partir des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Il calcule les bilans hydriques journaliers à partir des données météorologiques, pédologiques et d'occupation des terres. Ce modèle a été développé par le Service de Recherches Agricoles du Département de l'Agriculture des Etats-Unis (Arnold *et al.*, 1998) et déjà testé en Afrique tropicale et particulièrement au Bénin par Sintondji (2005) ; Ahouansou (2008) ; Kounou (2009) ; Dossou-yovo (2011) ; Atchadé (2014).

Le fonctionnement du modèle SWAT est structuré en trois modules principaux, qui interagissent avec le climat par la circulation d'eau comme le montre la figure 2.

Figure 2. Fonctionnement schématique de SWAT (d'après DUROS, modifié par Atchadé, 2014)



Source : Mise en place du modèle agro-environnemental SWAT (Renaud, 2004)

L'analyse de la figure 2 révèle que le SWAT est un ensemble de modules correspondant au sol, l'aquifère sous-jacent et le cours d'eau. Il faut remarquer que les eaux météoriques qui arrivent au sol peuvent rejoindre l'aquifère à travers les processus d'infiltrations conditionnés par les propriétés du sol (texture, porosité, etc.). De par la topographie du sol, elles peuvent regagner directement les cours d'eau (par le phénomène de ruissellement). Enfin de l'aquifère, l'eau peut alimenter également le cours d'eau et ceci dépend de la position de la nappe par rapport au

cours d'eau et de la conductivité hydraulique des différentes couches de sol qu'elle traverse. Des différents réservoirs, l'eau peut repartir dans l'atmosphère par évaporation.

➤ **Scénarii des changements d'occupation des sols**

L'étude des effets des scénarii du changement d'occupation des terres sur les ressources en eau a été précédée par celle de la dynamique du couvert végétal dans le bassin en calculant la vitesse de variation des unités d'occupation de sol grâce à la formule :

$$\Delta S = \left[\frac{S_{p2} - S_{p1}}{t_2 - t_1} \right]$$

Avec ΔS : la vitesse de variation (extension ou régression en ha/an) ; S_{p1} : la superficie de l'unité d'occupation du sol considérée au cours de l'année 1 (ha) ; t_1 l'année 1 et t_2 l'année 2.

➤ **Scénarii combinés des modifications dans le climat et dans l'occupation des terres**

Les périodes de simulation choisies étant de 5 ans, la combinaison des scénarii est faite de manière à ce que, pour chaque simulation, l'année de la carte d'occupation des sols considérée soit incluse dans la période de simulation. Ainsi, les combinaisons suivantes ont été faites : Lu17 et climat 2015 à 2020, Lu22 et climat 2020 à 2025, Lu27 et climat 2025 à 2030.

Les étapes de l'exécution du modèle pour chaque combinaison de scénarii sont semblables à celles suivies pour la réalisation des simulations avec les scénarii d'occupation des sols. La seule différence réside dans le choix du climat à considérer pour la réalisation des simulations.

2.3. Approche utilisée pour l'étude de la dynamique de l'occupation des terres

L'exploitation des cartes de base et d'images satellitales (1998 et 2010) couvrant le secteur d'étude et les données des scénarii futurs sur la dynamique d'occupation des sols des années (2017, 2022 et 2027) mises au point par Bormann et al. (2011) pour le compte du projet REVERTUWIN ont permis d'étudier la dynamique de l'occupation et d'utilisation des terres. Les images satellitales ont servi à construire une mosaïque du domaine d'étude à l'aide du logiciel ArcView 3.2, ce qui a rendu plus aisé l'étude de l'évolution des superficies des unités paysagères dans le milieu d'étude.

3. Résultats

3.1. Calage et paramètres d'entrée du modèle

Pour permettre une meilleure concordance entre les variables simulées et observées, il était nécessaire d'adapter certains paramètres du modèle. Cette phase s'appelle le calage. Elle consiste dans un premier temps à ajuster le bilan hydrique qui contrôle l'ensemble des processus hydrologiques sur le bassin. Cet ajustement ne peut se faire sans une modification des paramètres d'occupation des sols qui ont une incidence essentielle sur le bilan hydrologique.

➤ Paramètres ajustés lors du calage du modèle

Le calage du modèle SWAT pour le bassin versant de la rivière Zou à Domè a été obtenu avec des valeurs consignées dans le tableau II pour certains paramètres dont les plus déterminants sont ceux qui influent sur le ruissellement, l'écoulement souterrain et le transfert de l'eau dans les aquifères.

Tableau II: Paramètres ajustés lors du calage hydrologique de SWAT

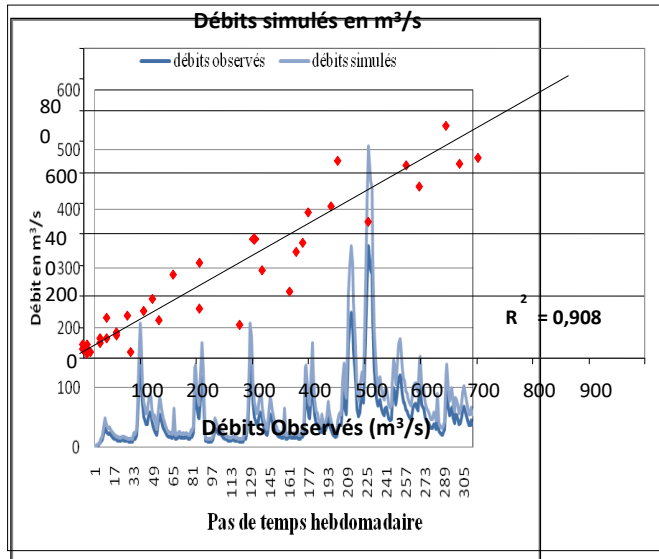
Paramètres	Description	Valeur par défaut	Modification
CN2	Coefficient de ruissellement	75	50
ESCO	Facteur de compensation pour l'évaporation du sol	0.95	0.001
GWREVAP	Le coefficient permettant le transfert de l'aquifère superficiel vers les horizons sus-jacents et non-saturés du sol	De 0.02 à 0.20	0.20
REVAPMN	Hauteur d'eau minimale dans l'aquifère peu profond pour qu'il y ait un mouvement d'eau vers le sol (mm)	—	15 mm
RCHRGDP	Fraction de l'eau de pluie qui percole de la zone racinaire et qui atteint l'aquifère	0 à 1	0.09
GWQMN	Hauteur d'eau minimale pour qu'il y ait un transfert d'eau de l'aquifère superficiel vers le cours d'eau (mm)	—	10 mm
GWDELAY	Délai pour que l'eau souterraine qui transite par l'aquifère atteigne le cours d'eau	—	31 jours
ALPHABF	Constante de récession de l'écoulement de base souterrain	-	0.048
SURLAG	Coefficient traduisant le temps de ruissellement de surface	4	1

Source : Résultat du modèle

3.1.1. Ecoulements simulés/écoulements observés durant la période de calage (2000-2005)

La figure 3 montre le degré de concordance des débits simulés et observés à l'exutoire de Domè pour la période de calage s'étendant du premier janvier 2000 au 31 décembre 2005.

Figure 3 : Evolution et corrélation des débits observés et simulés par le modèle SWAT au pas de temps hebdomadaire à l'exutoire de Domè pour la période de calage (2000-2005)



Source : Traitement de données

Le calage du modèle a été effectué au pas de temps hebdomadaire, afin de tenir compte des variations intra saisonnières que révèlent les coefficients d'évaluation significatifs ; soit 0,80 pour le coefficient de détermination ; 0,79 pour l'indice de Nash et 0,90 pour l'indice d'agrément de Willmot.

Le tableau III présente les coefficients d'évaluation du modèle utilisé.

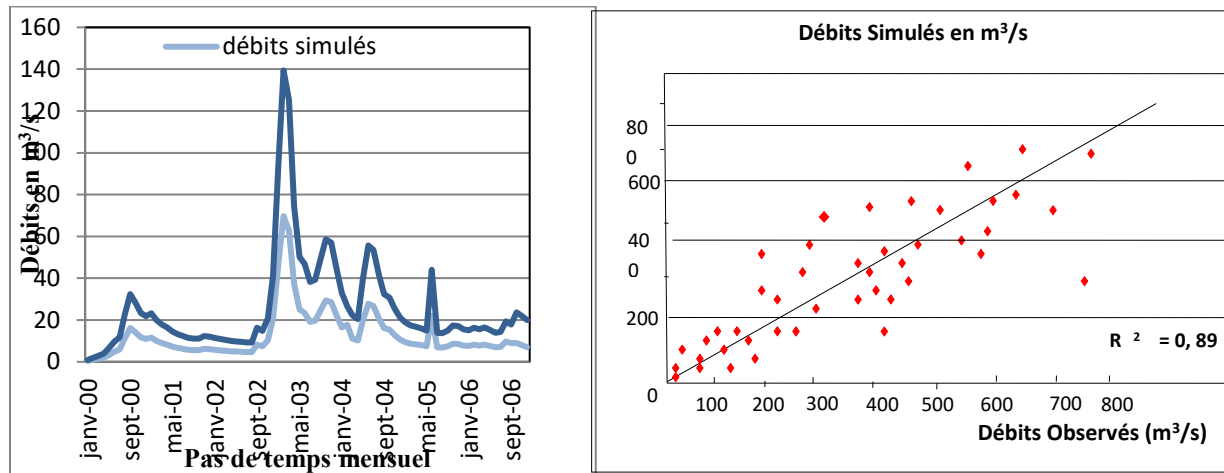
Tableau III : Coefficients d'évaluation du modèle

Moyenne hebdomadaire en m³/s		Coefficient d'évaluation		
Débit observé	Débit simulé	R ²	ME	IA
78,83	83,2	0,80	0,79	0,90

Source : Traitement de données

La figure 3 montre la contribution de l'aquifère libre (mobilisée sous forme de débit de base estimé par le programme baseflow de Arnold *et al.*, (1999) à l'écoulement total mesuré dans le bassin versant de la rivière Zou à Domè.

Figure 4 : Evolution et corrélation des débits observés et simulés par le modèle SWAT au pas de temps mensuel l'exutoire de Domè pour la période de calage



Source : Traitement de données

Le tableau IV présente les coefficients d'évaluation du modèle SWAT

Tableau IV : Coefficients d'évaluation du modèle

Moyenne mensuelle en m³/s		Coefficient d'évaluation		
Débit observé	Débit simulé	R²	ME	IA
26.03	28.20	0.76	0.80	0.85

Source : Traitement de données de la DGEau, 2010

L'analyse des données du tableau IV permet de constater que les valeurs des coefficients d'évaluation sont toutes supérieures à 0,80. Ce qui permet de conclure qu'il y a donc un bon ajustement entre les débits de base et ceux simulés dans le bassin versant de la rivière Zou à l'exutoire de Domè.

➤ Moyenne annuelle du bilan hydrologique

Le tableau V présente les valeurs moyennes annuelles des différents termes du bilan hydrologique du bassin versant du Zou à Domè.

Tableau V : Composantes du bilan hydrologique annuel (2000 – 2005) du BVRZ

Composantes du bilan hydrique	Quantités
Précipitations totales	1096.4 mm
Ruissellement de surface (superficiel)	99.24 mm
Ecoulement latéral	13.83 mm
Contribution de l'eau souterraine (aquifère peu profond) au débit du cours d'eau	81.70 mm
Recharge de l'aquifère profond	27.69 mm
Recharge totale des aquifères (profond et peu profond)	202.40 mm
Perte par transmission	2.12 mm
Evapotranspiration réelle	738.5 mm
Evapotranspiration potentielle	1607 mm
Variation du stock d'eau du sol	-3.14mm
Production d'eau	218,14
Production de sédiments	2.492t/ha/an

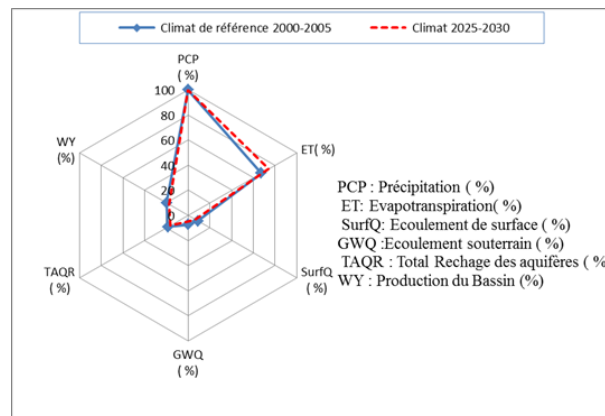
Source : Traitement de données de la DGEau, 2010

Le ruissellement de surface fait environ 9,05 % des précipitations totales reçues dans le bassin, pourcentage calculé par rapport à la précipitation. La recharge totale des aquifères quant à elle est d'environ 18,46 % et l'évapotranspiration réelle environ 67,37 %. Ces résultats montrent que le potentiel de la ressource en eau est important tant au niveau des eaux de surface qu'au niveau des aquifères à l'exutoire de Domè.

3.2. Effets des scénarii de la variabilité climatique sur le bilan hydrologique du bassin du Zou

Les résultats sont présentés pour le bassin versant entier en faisant séparément mention de chaque scénario. Les résultats obtenus montrent que les scénarii des fluctuations climatiques ont eu d'influences perceptibles sur le bilan hydrologique comme l'indique la figure 5.

Figure 5 : Bilan hydrologique, exprimé en pourcentage, sous les effets des climats 2000-2005 et 2025-2030 ; pourcentage calculé par rapport à la précipitation moyenne de chaque climat



Source : Traitement de données

L'analyse de la figure 5 révèle une baisse des composantes du bilan hydrologique comparativement à la période de calage (2000-2005) à l'exception de l'évapotranspiration réelle qui connaît une augmentation, du fait de la hausse des températures. En effet, le coefficient de ruissellement est passé de 14,55 % (climat de référence) à 9,56 % (climat 2025-2030). Les proportions de l'écoulement souterrain, de la recharge totale des aquifères et de la production du bassin sont respectivement passées de 07,04 %, 18,48 % et 19,89 % durant la période de calage à 04,69 %, 17,87 % et 16,49 % pour la période 2025-2030. Par contre, l'évapotranspiration réelle a augmenté de 67,37 % à 72,11 %. Les simulations étant faites en fixant la carte d'occupation des sols utilisée pour le calage du modèle (Lu 2002), les résultats sont aussi comparés aux résultats de référence que constituent ceux du calage du modèle en termes de proportions de variations, exprimées en pourcentage, par rapport aux résultats de référence comme le présente le tableau VI.

Tableau VI : Proportions de variation, exprimées en pourcentages, de certaines composantes du bilan hydrologique sous les influences des scénarii climatiques (2015-2030) par rapport au climat de référence (climat 2000-2005).

Composantes du bilan hydrologique	2000-2005	2015-2020	2020-2025	2025-2030
PCP (mm)	1096,4	1056,6	1058,7	1045,2
Δ PCP (%)	-	-3,62	- 3,43	-4,66
ET (mm)	738,5	772,76	775,03	773,53
Δ ET (%)	-	+ 04,63	+ 04,94	+ 04,74
SurfQ (mm)	99,24	84,54	80,39	68,48
Δ SurfQ (%)	-	-14,70	-18,85	-30,75
GWQ (mm)	81,70	54,52	52 ,03	51,54
Δ GWQ (%)	-	-27,18	-29,67	-30,36
TAQR (mm)	202,40	177,89	172,24	169,03
Δ TAQR (%)	-	-24,51	-30,16	-33,10
WY (mm)	218,14	197,46	185,24	180,87
Δ WY (%)	-	-20,66	- 32,90	- 37,27

PCP=précipitation, SurfQ=écoulement de surface, GwQ=écoulement souterrain, TAQR=recharge totale des aquifères, ET=évapotranspiration réelle, WY=production moyenne d'eau, Δ : Variation

Source : Traitement de données de l'ASECNA, 2010 et IMPETUS ,2000

En se référant à la période de calage du modèle (2000-2005), les précipitations moyennes annuelles vont diminuer de 4,66 % dans le bassin versant de la rivière Zou à Domè à l'horizon 2030. Cette baisse des précipitations a été déjà annoncée par bon nombre d'auteurs surtout en Afrique de l'ouest pour les décennies à venir. Ardoin-Bardin (2004) a remarqué une réduction moyenne de la précipitation de 5,5 % à 8,8 % à l'horizon 2020 pour l'ensemble des bassins du Sénégal et de la Gambie.

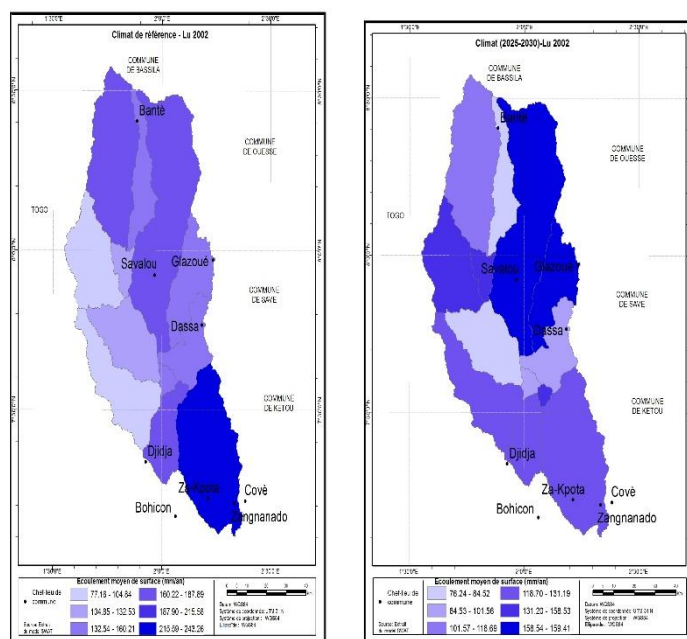
Pour Sintondji (2005), on observera une réduction moyenne de la précipitation de 8,1 % sur la période 2000 à 2025 dans le bassin de Téro. A l'horizon 2050, une diminution de la précipitation de l'ordre de 15 % est signalée à Parakou (Paeth *et al.*, 2005). Pour Dossou-yovo (2011) c'est baisse des précipitations avoisinera les 6,1 % à l'horizon 2025 dans le bassin de l'Okpara à Kaboua. En effet, cette baisse de la disponibilité d'eau dans le bassin versant de la

rivière Zou va entraîner une forte réduction de l'écoulement de surface qui sera accentuée par l'augmentation de la température. Les simulations prévoient, à l'horizon 2030, une diminution de l'écoulement de surface de 30,75 %, une réduction de l'écoulement souterrain de 30,36 %, une réduction de la recharge des aquifères de 33,10 % et une réduction de la production d'eau du bassin de 37,27 %. Par contre, l'évapotranspiration augmentera de 04,74 %.

Les répercussions de cette baisse se feront ressenties sur les différents sous-bassins du milieu d'étude. La figure 6 montre la distribution spatio-temporelle de l'écoulement moyen de surface dans le bassin pour le scénario climatique (2025-2030) comparé au climat de référence.

La baisse de l'écoulement moyen de surface due aux fluctuations climatiques sera observée au niveau de tous les sous-bassins du Zou à Domè sur la base des différents scénarii mais à des intensités différentes. L'écoulement de surface le plus faible sera observé dans la commune de Bantè. Ainsi, l'accès aux ressources en eau de surface à l'horizon 2030 pourra devenir de plus en plus pénible pour les populations.

Figure 6 : Distribution spatio-temporelle de l'écoulement moyen de surface dans le bassin du Zou à Domè sous les influences des climats 2000-2005 et 2025-2030



Source : Traitement de données

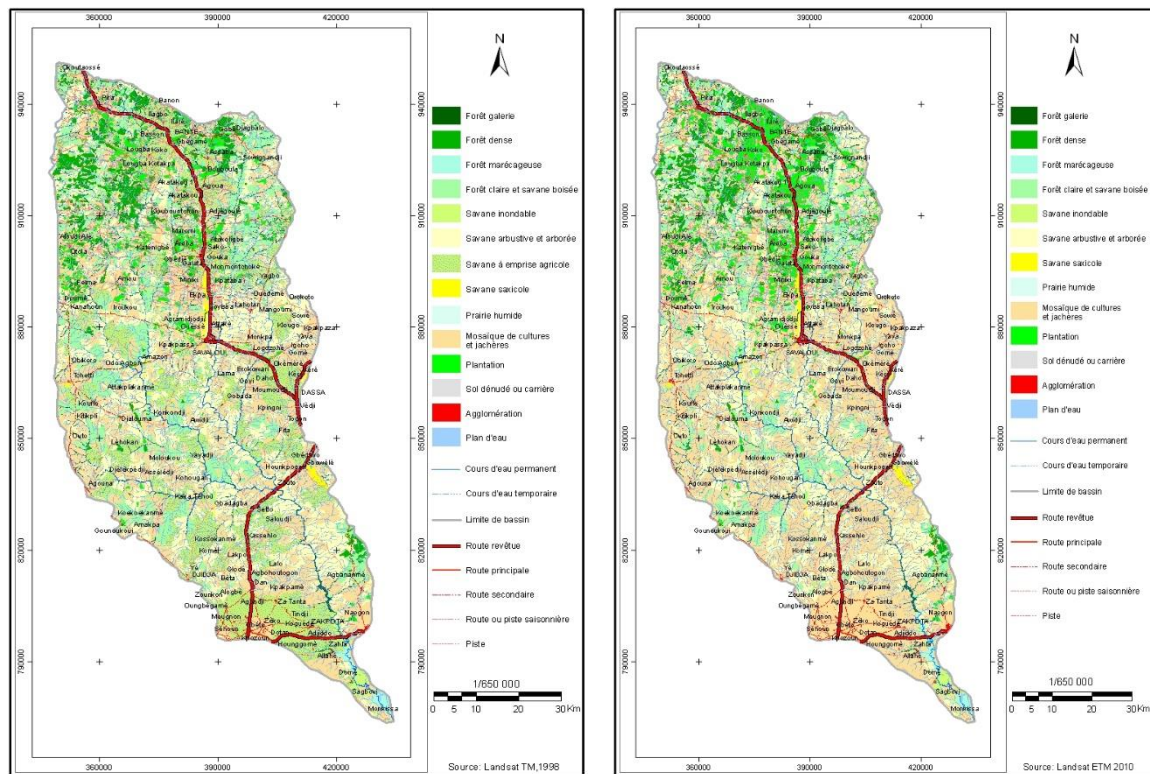
3.3. Effets des scénarii d'occupation des sols sur le bilan hydrologique

➤ Dynamique du couvert végétal entre 1998 et 2010

Les figures 7 et 8 présentent successivement l'évolution de l'occupation des sols dans le bassin versant du Zou à Domè entre les années 1998 et 2010.

Figure 7 : Unités d'occupation des terres du bassin versant du Zou à Domè en 1998

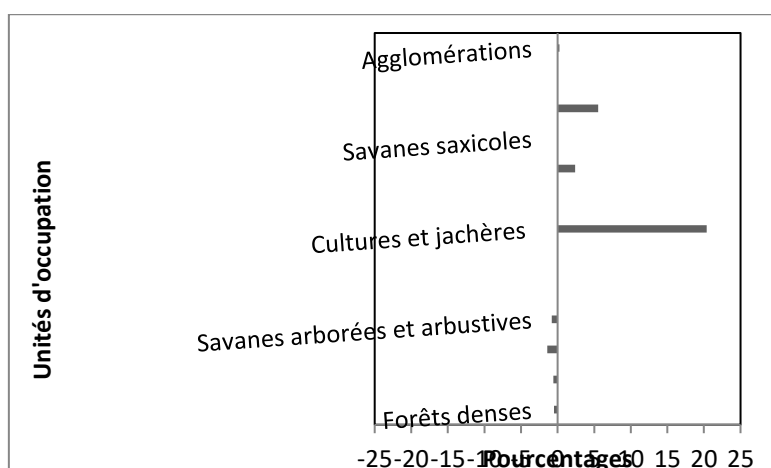
Figure 8 : Unités d'occupation des terres du bassin versant du Zou à Domè en 2010



Source : CENATEL, 2010

De l'analyse de ces figures, il ressort que toutes les grandes unités d'occupation du sol identifiées ont connu une évolution dans le temps dans le milieu d'étude. La figure 9 expose la synthèse des changements observés entre les années 1998 et 2010 au niveau des occupations des terres dans le milieu d'étude.

Figure 9 : Evolution des unités d'occupation des terres entre 1998 et 2010



Source : Traitement de données

L'analyse de la figure 9, montre que les formations végétales naturelles ont connu une régression sensible de leur superficie de 1998 à 2010. La superficie des forêts denses est passée de 32 838ha en 1998 à 28 744 ha en 2010, soit une diminution de 0,48 %. En ce qui concerne les forêts claires et les savanes boisées, leur superficie est passée de 109 630 à 97 434 ha, soit un taux de régression de 1016,33 ha/an. Les savanes arborée et arbustive ont connu également une diminution de leur superficie. Leur taux de régression est de 556,5 ha/an. Par contre, les mosaïques de cultures, de jachères et les agglomérations ont connu respectivement des taux d'extension de 20,37 % et de 0,25 % en. Ce qui permet d'affirmer que les formations végétales sont de plus en plus détruites au profit des terres agricoles. Le cas de régression le plus remarquable est celui des Forêts claires et savanes boisées. Une situation qui serait liée au boum cotonnier à partir des années 1980 et à la récession pluviométrique récurrente observée depuis les années 1970 (Boko *et al.*, 1997). En effet, la production du coton occupe de vastes superficies et nécessite le déboisement et le dessouchage systématique pour la quête de nouvelles parcelles. Cette situation déjà moins confortable sera exacerbée par les activités de production de charbon et de bois d'œuvre observée plus dans la partie amont (Bantè, Pira, Tchèti) du bassin.

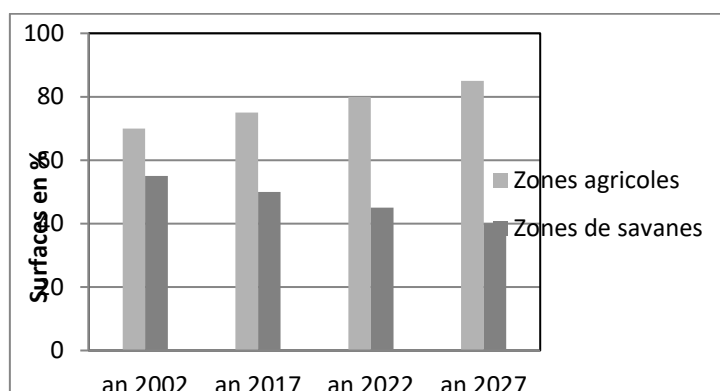
L'extension successive de ces sites de carbonisation contribue à l'émiettement de la forêt. Ces milieux dénudés par la carbonisation sont plus exposés à l'érosion pluviale (photo 1) voire éolienne, ce qui entraîne d'énormes pertes en terres.

En effet, dans le bassin versant de la rivière Zou, ce sont les berges dont les pentes sont relativement fortes ainsi que les pistes qui sont très exposés à l'érosion pluviale.

Les effets des modifications futures d'occupation des sols sur les ressources en eau du bassin du Zou à Domè ont été analysés sur la base des résultats des simulations. Les simulations ont

été faites en maintenant le climat originel (2000-2005) et en variant les cartes d'occupations des sols pour les années 2017, 2022 et 2027. Avant de comparer les résultats, des scénarios d'occupations des sols à ceux de l'occupation des sols de référence (Lu2002), les superficies agricoles, par rapport à celle de l'ensemble du bassin ainsi que celles des savanes, observées au niveau des cartes d'occupation des sols sont d'abord présentées au niveau de la figure 10.

Figure 10 : Superficies agricoles et celles des zones de savanes dans le bassin versant de la rivière Zou après la distribution des HRUs pour les occupations des sols de 2002, 2017 de 2022 et 2027



Source : Traitement de données

L'analyse de la figure 10 montre que les zones agricoles occuperont près de 83 % de la superficie du bassin du Zou à Domè à l'horizon 2027 soit une augmentation de 15,2 % de leur superficie par rapport à 2002. Par contre, les zones de savane occuperont moins de 40 % de la superficie du bassin soit une diminution d'environ 14,8 % de leur superficie par rapport à 2002. Cette distribution temporelle des occupations futures des sols aura des influences perceptibles sur les composantes du bilan hydrologique comme le montre le tableau 4.VI. Sous les influences des occupations futures des terres dans le bassin du Zou à Domè, il est attendu une augmentation de l'écoulement de surface de 07,46 % en 2017, de 11,57 % en 2022 et de 13,09 % en 2027. Par contre, les autres composantes du bilan hydrologique vont connaître une diminution. L'écoulement souterrain connaîtra une baisse de 6,79 %, la recharge totale des aquifères diminuera de 5,92 %, la production d'eau du bassin connaîtra une baisse de l'ordre de 5,52 % et l'évapotranspiration réelle va stagner en 2027 comparativement à la période de calage (2000-2005).

Tableau VII : Proportions de variations, exprimées en pourcentages, de certaines composantes du bilan hydrologique sous les influences des scénarii d'occupation des sols par rapport à la période de référence (2000-2005)

Composantes du bilan hydrologique	Lu 02	Lu 17	Lu 22	Lu27
PCP (mm)	1096,4	1096,4	1096,4	1096,4
Δ PCP (%)	-	0	0	0
ET (mm)	738,5	738,00	738,80	739,2
Δ ET (%)	-	0	0	+0,09
QSurf (mm)	99,24	106,51	110,73	112,23
Δ SurfQ (%)	-	07,46	11,57	13,09
GWQ (mm)	81,70	78,15	78,15	76,15
Δ GWQ (%)	-	-4,34	-4,34	-6,79
TAQR (mm)	202,40	196,00	194,62	190,40
Δ TAQR (%)	-	-3,16	-3,84	-5,92
WY (mm)	218,14	210,00	208,08	206,08
Δ WY (%)	-	-3,73	- 4,61	- 5,52

PCP = précipitation, SurfQ = écoulement de surface, GwQ = écoulement souterrain, TAQR= recharge totale des aquifères, ET= évapotranspiration réelle, WY= production moyenne d'eau, Δ : variation /

Source : Traitement de données du CENATEL, 2010

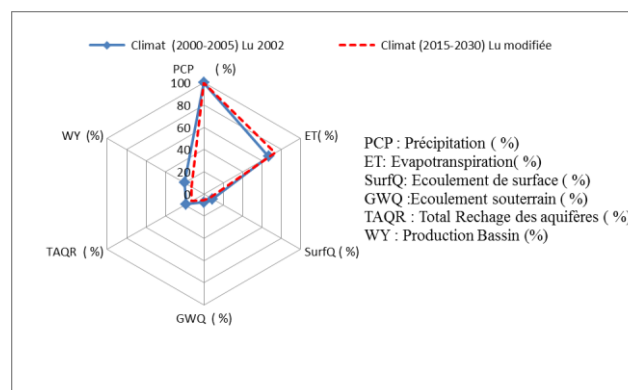
La principale raison qui pourrait expliquer l'augmentation de l'écoulement de surface selon Dossou-yovo (2011) est la réduction de la perméabilité de la surface des sols des champs. Dans le milieu d'étude, la stagnation de l'évapotranspiration et la diminution de la capacité de rétention en eau du sol due à la réduction de l'épaisseur du sol (effet de l'érosion) auraient aussi entraîné l'augmentation de l'écoulement de surface dans le bassin. Dans le bassin de l'Ouémé supérieur, les travaux de Hiepe (2008), ont notifié une augmentation de l'ordre de 10,65 à 22,70 % de l'écoulement de surface à l'horizon 2022 sous l'effet des changements dans l'occupation des sols. Pour Kounou (2010) une augmentation de l'écoulement de surface de l'ordre de 16 % sera observée dans le bassin de l'Ouémé à Savè sous l'effet de l'occupation future des terres. Quant à l'écoulement souterrain et la recharge totale des aquifères, leur baisse serait due aux effets conjugués de la faible perméabilité et de la faible conductivité hydraulique sur les parcelles cultivées (Dossou-yovo, 2011). Mais dans l'ensemble au regard de résultats

obtenus, les occupations des sols utilisés ont eu relativement de faibles influences sur le bilan hydrologique du bassin versant de la rivière Zou à l'exutoire de Domè.

3.4. Effets des scénarii combinés des fluctuations climatiques et de l'occupation des sols sur le bilan hydrologique

L'étude des effets des fluctuations climatiques et des modifications futures du couvert végétal sur les composantes du bilan hydrologique du bassin du Zou à Domè a nécessité la simulation des scénarii combinés de changements observés dans l'occupation des sols et du climat. Les deux scénarii climatiques ont été combinés avec les scénarii d'occupation des sols de 2017 (Lu17) de 2022 (Lu22) et de 2027 (Lu27). Les simulations des scénarii combinés ont été faites séparément et les moyennes des résultats sont présentées sur un diagramme comme l'indique la figure 11.

Figure 11 : Bilan hydrologique, exprimé en pourcentage par rapport à la précipitation moyenne de chaque combinaison sous les effets des scénarii combinés de la variabilité climatique et du changement d'occupation des sols



Source : Traitement de données

On observe une diminution des composantes du bilan hydrologique comparativement à la période de calage à l'exception de l'évapotranspiration réelle qui connaît comme dans le cas des scénarii des fluctuations climatiques seul une augmentation, du fait probablement de la hausse des températures sous les effets des scénarii combinés. En effet, le coefficient de ruissellement est passé de 14,55 % à 9,96 %. Les proportions de l'écoulement souterrain, de la recharge totale des aquifères et de la production du bassin sont respectivement passées de 07,04 %, 18,48 % et 19,89 % durant la période de calage à 04,69 %, 17,87 % et 16,49 % pour la période 2025-2030. Par contre, l'évapotranspiration a augmenté de 67,37 % à 72,11 %. Mais dans l'ensemble, ces résultats permettent de constater que les effets des variabilités climatiques impriment leur pas sur le bilan hydrologique que ceux du changement d'occupation des sols. Les résultats, comparés à ceux du calage, sont présentés dans le tableau VIII.

Tableau VIII : Proportions de variation, exprimées en pourcentages, de certaines composantes du bilan hydrologique sous les effets combinés des changements dans l'occupation des sols et dans le climat par rapport au climat de référence (climat 2000-2005).

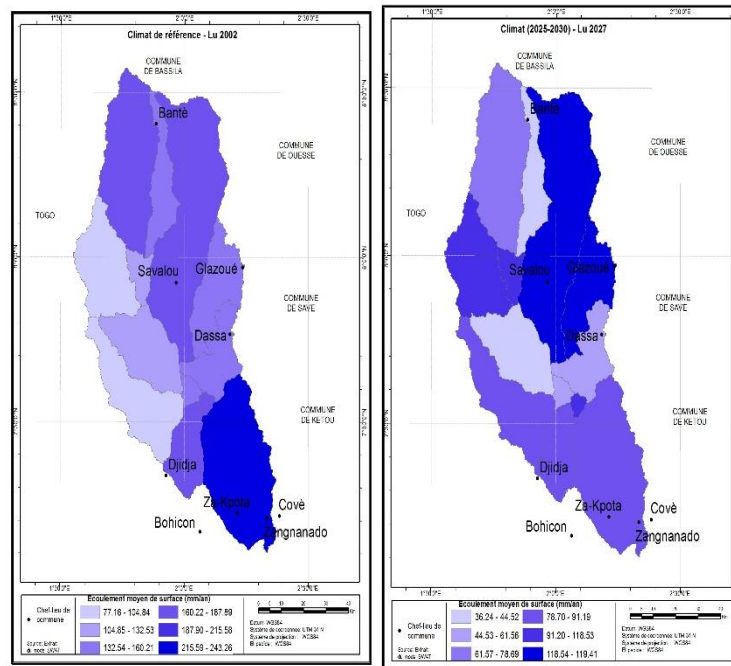
Composantes du bilan hydrologique	2000-2005	2015-2020	2020-2025	2025-2030
PCP (mm)	1096,4	1056,6	1058,7	1045,2
Δ PCP (%)	-	-3,62	- 3,43	-4,66
ET (mm)	738,5	774,1	778,3	771,5
Δ ET (%)	-	+ 4,82	+ 5,38	+ 4,46
SurfQ (mm)	99,24	82,46	76,55	65,11
Δ SurfQ (%)	-	-16,65	-22,51	-33,87
GWQ (mm)	81,70	57,72	57 ,45	56,31
Δ GWQ (%)	-	-29,35	-29,67	-31,07
TAQR (mm)	202,40	150,66	133,03	130,69
Δ TAQR (%)	-	-25,56	-34,27	-35,45
WY (mm)	218,14	169,58	128,47	134,70
Δ WY (%)	-	-22,26	- 33,89	- 38,25

PCP = précipitation, SurfQ = écoulement de surface, GwQ = écoulement souterrain, TAQR= recharge totale des aquifères, ET= évapotranspiration réelle, WY= production moyenne d'eau, Δ : variation

Source : Traitement des données de IMPETUS 2000 et du CENATEL 2010

Du fait de la réduction de la précipitation et de l'augmentation de l'évapotranspiration, les scénarii climatiques combinés avec les différentes occupations du sol ont montré une baisse de l'écoulement de surface de l'ordre de 33,87 %, une baisse l'écoulement souterrain de l'ordre de 31,07 %. La recharge totale des aquifères et la production d'eau du bassin vont également connaître une diminution respective de 35,45 % et de 38,25 % comparativement à la période de référence. La figure 12 montre la distribution spatio-temporelle de l'écoulement de surface sous les influences des scénarii combinés.

Figure 12 : Distribution spatio-temporelle de l'écoulement moyen de surface dans le bassin du Zou à Domè sous les influences des scénarii combinés des changements dans l'occupation des sols et dans le climat



Source : Traitement de données

Sous l'effet des fluctuations climatiques et de la dynamique du couvert végétal, l'écoulement de surface sera faible dans les régions de Za-kpota, Covè, Zagnanado. Par contre, les communes de Dassa-Zoumè, Savalou et autres auront des écoulements de surface relativement élevés.

Conclusion

Il faut retenir que les effets des modifications du climat et des occupations des terres sur les ressources en eau ont été étudiés jusqu'ici dans une portion du bassin versant de la rivière Zou au Bénin. A partir des scénarii climatiques et d'occupation du sol, les effets combinés ou individuels de ces paramètres de l'environnement sur les ressources en eau de l'ensemble du bassin versant de la rivière Zou à Domè ont été mis en évidence.

Ainsi à moyen terme, c'est-à-dire à l'horizon 2030, la variabilité climatique et la dégradation du couvert végétal vont impacter la disponibilité des ressources en eau du milieu d'étude. Ces conséquences se manifesteront à travers une diminution importante des ressources en eau de surface d'environ 33,87 %, des ressources en eau souterraine d'environ 31,07 % et de la production en eau du bassin d'environ 38,25 %. A l'échelle spatiale, les écoulements de surface seront faibles dans les communes de Za-kpota, Covè, Zagnanado. Les communes de (Dassa-Zoumè, Savalou) quant à elles auront des écoulements de surface relativement moins élevés.

Références bibliographiques

- Ahouansou D. M 2008. Modélisation du bilan hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Save : contribution à la gestion intégrée des ressources en eau. Thèse d'Ingénieur Agronome, 115 p.
- Arnell N. 1989. Humain influence on hydrological behavior. In international literature survey. Report IHP-III project 6.1. UNESCO 195 p
- Atchadé A.A. G. 2014. Impacts de la dynamique du climat et de l'occupation des terres sur les ressources en eau du bassin versant de la rivière Zou dans le Bénin Méridional. *Thèse de Doctorat unique FLASH/UAC 235p*
- Arnold, J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S. et Williams J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *J. American Water Resources Association*, 34 (1), pp : 73-89.
- Awoyé, H. 2007. Modélisation du bilan hydrologique du bassin versant du Klou : Contribution à la gestion durable des ressources en eau dans le Zou ; 86p.
- Beseme J. L. 1995. Influence de l'occupation des sols sur les inondations. Compte rendu de la journée d'étude de Risques naturels, dans le cadre des entretiens du GREF. 1 995. 10 p.
- Boko M., 1987. Etude sur la variabilité pluviométrique au Bénin. In. Climat et Climatologie. Volume d'Hommage offert au Professeur Pierre PAGNEY. Centre de Recherches de Climatologie, URA 909 du CNRS, Dijon, pp. 41-50
- Boko, M., Guiwa C., et Pérard J., 1997. Récessions pluviométriques et dynamique des paysages végétaux dans le bassin du Niger au Bénin (Afrique Occidentale). *Publication de l'association Internationale de Climatologie*, 10, pp. 297-303.
- Bormann [H. Bormann](#), [Hartmut M. Holländer](#) Hartmut M., Blume [T. Blume](#), Buytaert [W. Buytaert](#), Chirico [G. B. Chirico](#), Exbrayat [J. F. Exbrayat](#), Gustafsson [D. Gustafsson](#), [Herwig Hölzel](#), Kraft [P. Kraft](#), Krauß [T. Krauß](#), Nazemi [A. Nazemi](#), Stamm [C. Stamm](#), Stoll [S. Stoll](#), Blöschl [G. Blöschl](#), Flühler [H. Flühler](#) 2011 : Comparative discharge prediction from a small artificial catchment without model calibration: representation of initial hydrological catchment development, *Wissenschaftlicher Zeitschriftenartikel referiert Die Bodenkultur* 62-1-4, S. 23-29, 0006-5471
- Cosandey C., Bigot S., Dacharry M., Gille E., Lagarnier R., Salovador P-G., 2003 . Les eaux courantes : Géographie et environnement. Edition Berlin, Paris, 239 pages.
- Dossou-yovo E. R., 2011. Impacts des changements climatiques et de la dynamique du couvert végétal sur les ressources en eau dans le bassin de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua à l'horizon 2025. Mémoire de DEA/FSA /Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 132p.

- Renaud, J., 2004. Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube (Haute-Savoie) : Vers une modélisation des transferts de Phosphore, INRA, 75 p.
- Scanlon, B.R., Levitt D.G., 2005: Ecological controls on water-cycle response to climate variability in deserts. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 102(17), 6033-6038.
- Hiepe, C., 2008. Soil degradation by water erosion in a sub-humid West-African catchment a modelling approach considering land use and climate change in Benin. Thèse de doctorat, Université de Bonn.
- Klassou S.D., 1996. Evolution climato-hydrologique récente et conséquences sur l'environnement : L'exemple du bassin versant du fleuve Mono (Togo-Bénin). Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux III, France, 472 p.
- Kounou, R., 2009. Impacts du changement climatique et de la dynamique du couvert végétal sur les ressources en eau dans le bassin de l'Ouémé à Savè à l'horizon 2025 : Contribution à la gestion intégrée des ressources en eau. Thèse d'Ingénieur Agronome, FSAUAC, 120 p.
- Sintondji, L., 2005. Modelling the rainfall-runoff process in the Upper Ouémé catchment (Terou in Benin republic) in a context of global change: extrapolation from the local to the regional scale. PhD Thesis in Hydrology and Environmental management of the Mathematics and the Natural Sciences Faculty of the University of Bonn.
- Telciu, C. E., 2012. Relations entre les conditions climatiques et les ressources en eaux dans la Dobrogea du sud (Roumanie). Actes du 25^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Grenoble 2012
- Vörösmarty C., Lettenmaier D., Leveque C., Meybeck M., Pahl-Wostl C., Alcamo J., Cosgrove W., Grassl H., Hoff H., Kabat P., Lansigan F., Lawford R., Naiman R., 2004 : Humans transforming the global water system. *Eos*, 85, 509-520.