



APPLICATION DU MODELE DE MAILLET A L'ETUDE DES IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES RESSOURCES EN EAU EN AFRIQUE DE L'OUEST: CAS DU BASSIN VERSANT DU N'ZI-BANDAMA (COTE D'IVOIRE)

Kouassi Amani Michel

Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny ; Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) ; Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques ; Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),

Kouamé Koffi Fernand

Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières ; Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement ; Abidjan

Saley Mahaman Bachir

Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières ; Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, Abidjan

Biemi Jean

Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières ; Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, Abidjan

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the impact of climate change on groundwater resources on the N'zi-Bandama watershed using the model of Maillet. The recession coefficients estimated average between $3.14 \cdot 10^{-2} j^{-1}$ and $3.56 \cdot 10^{-2} j^{-1}$ either side 1968, whether an average increase of 15.26% and highlight a drain much faster aquifers supplying base flow after 1968. Shortening of 1 to 9 days with an average of 5 days of drying time after 1968 was highlighted. The water volume mobilized by the average aquifer fluctuates between 0.84 and 0.42 Km^3 before and after 1968 whether an average decrease of -49.3%. These results show a decrease in the water volume mobilized by groundwater after 1968 and suggest a considerable decline of groundwater resources under the influence of climate change.

Résumé: *L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine du bassin versant du N'zi-Bandama à partir du modèle de Maillet. Les coefficients de tarissement évalués varient en moyenne entre $3,14.10^{-2}$ et $3,56.10^{-2} j^{-1}$ de part et d'autre de 1968, soit une augmentation moyenne de +15,26% et mettent en exergue une vidange beaucoup plus rapide des aquifères alimentant l'écoulement de base après 1968. Un raccourcissement de 1 à 9 jours avec une moyenne de 5 jours de la durée de tarissement après 1968 a été mis en évidence. Les volumes hydriques mobilisés par les aquifères fluctuent en moyenne entre 0,84 et 0,42 Km³ avant et après 1968, soit une baisse moyenne de -49,3%. Ces résultats mettent en évidence une diminution des volumes d'eau mobilisés par les aquifères après 1968 et suggèrent une régression considérable des ressources en eau souterraine sous l'influence des changements climatiques.*

Keywords: Climate change, Water resources, Maillet model, N'zi-Bandama, Ivory Coast.

Mots-clés: Changements climatiques; Ressources en eau; Modèle de Maillet; N'zi-Bandama; Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

L'importance de l'eau pour la vie sur Terre en général et pour les activités de l'homme en particulier fait que les scientifiques et les gestionnaires de l'environnement s'inquiètent désormais des conséquences des changements climatiques sur le cycle hydrologique, la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. En effet, l'un des plus grands défis auxquels l'humanité fait face aujourd'hui est le réchauffement climatique qui correspond à une augmentation progressive, prévue ou observée, de la température à la surface du globe, qui est l'une des conséquences du forçage radiatif provoqué par les émissions anthropiques (Bates *et al.*, 2008). C'est le réchauffement climatique qui entraîne les changements climatiques qui intègrent alors une composante anthropique qui se surimpose à la variabilité naturelle du climat. Selon la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), une distinction est faite entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat due à des causes naturelles qui sont entre autres les changements de l'orbite terrestre et de l'activité solaire, les cycles d'apparition des taches solaires, les éruptions volcaniques et les fluctuations des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols. La variabilité climatique est donc une modification naturelle du climat et indépendante des activités humaines. Contrairement à la Convention, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) considère le «*changement climatique*» comme toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, 2001).

L'Afrique figure au premier rang des régions concernées par la question de l'impact des fluctuations climatiques sur les ressources en eau (Kanohin *et al.*, 2009). Plusieurs études réalisées

en Afrique de l'Ouest et Centrale ont mis en évidence une diminution de l'écoulement souterrain suite à la baisse de la pluviométrie (Briquet *et al.*, 1995; Mahé and Olivry, 1995; Mahé *et al.*, 2000; GIEC., 2007; Vissin, 2007; Bates *et al.*, 2008; Kanohin *et al.*, 2009). L'analyse et la caractérisation précise des manifestations de la variabilité du climat, et sa relation avec la variabilité des ressources en eau constituent aujourd'hui une problématique de développement, en ce sens qu'elles doivent déboucher sur l'élaboration de scénarii permettant la prévision et la gestion durable des ressources en eau. L'ampleur des problèmes climatiques et hydrologiques dans le monde entraîne une globalisation des techniques d'observation et des méthodes d'analyse. Afin d'établir un diagnostic pertinent et de concevoir des stratégies adaptatives opérantes, plusieurs outils pertinents tels que les modèles, les indices centrés réduits, les tests de rupture (segmentation de Hubert, test de Pettitt, etc.), etc. sont utilisés.

La mobilisation et la gestion intégrée et durable des ressources en eau constituent un impératif pressant pour gérer l'impact négatif de la sécheresse et des inondations dans nos régions. Parmi les interrogations que suscitent les changements climatiques actuelles, l'une concerne son impact sur les ressources en eaux souterraines. En d'autres termes, la variabilité climatique actuelle a-t-elle affecté les ressources en eau souterraines? L'analyse quantitative des impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau souterraine constitue un objet de grand intérêt quand on sait que les milieux ruraux en Côte d'Ivoire sont alimentés exclusivement en eau potable à partir des eaux souterraines au moyen de forages et puits captant les nappes phréatiques, soumises aux influences des aléas climatiques. Les résultats d'une telle analyse peuvent s'avérer utiles comme aide à la prise des décisions liées aux impacts des changements climatiques sur les ressources en eau. Les impacts de la variabilité climatique pouvant différer d'une région à une autre, nous avons entrepris notre étude dans le bassin versant du N'zi (Bandama), qui de par sa configuration géographique allongée, est représentatif des grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire.

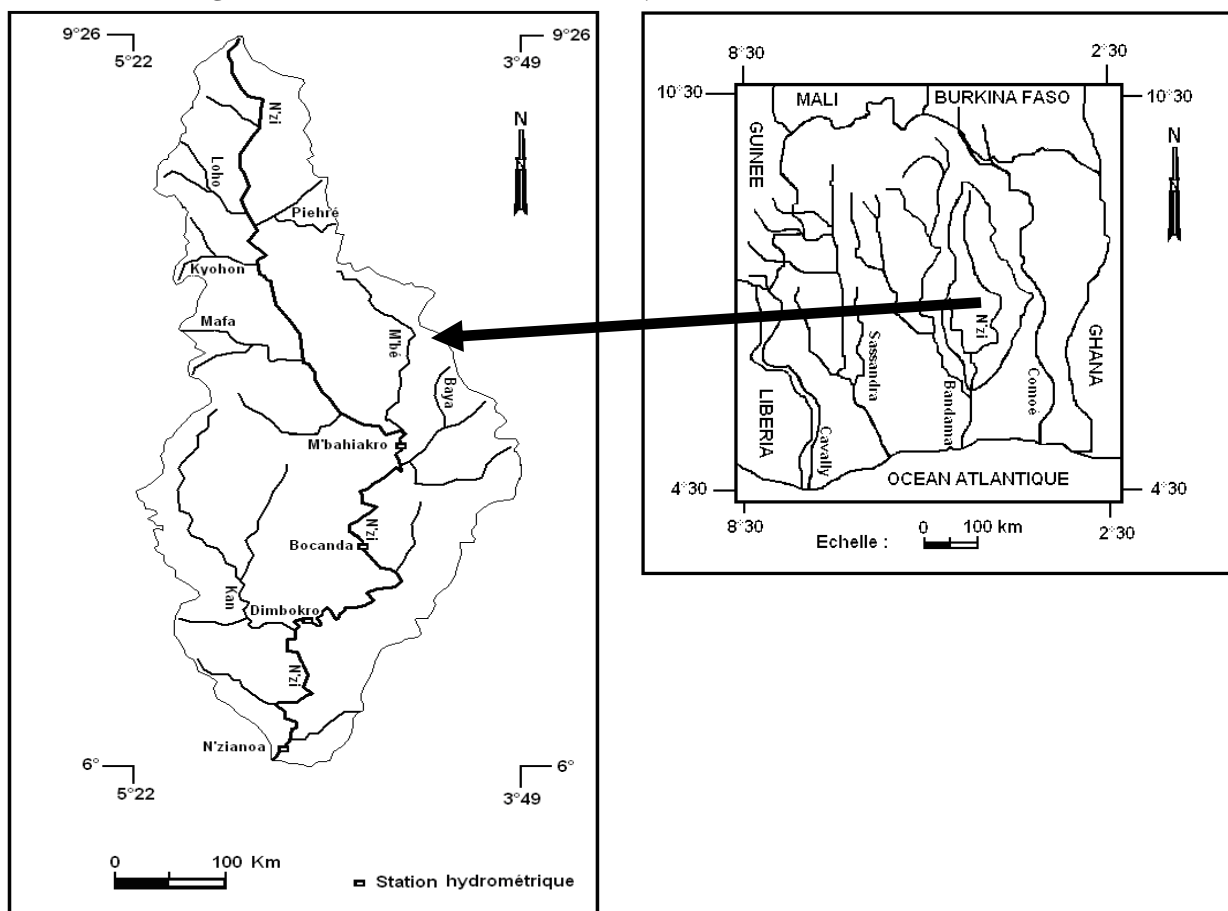
Sur l'ensemble du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire), des conditions prolongées de déficits pluviométriques et hydrométriques depuis les années 1970 ont été mises en évidence (Kouassi *et al.*, 2012). Cette sécheresse s'est amplifiée pendant les années 1980. Si l'amplitude du phénomène, apparu aux alentours des années 1970, n'est pas uniforme, toutes les régions (Nord, Centre et Sud) ont cependant été touchées. Le Nord du bassin a été la partie la plus touchée par le phénomène. Les déficits pluviométriques calculés (1923-2004) fluctuent entre 13% et 24% avec une moyenne de 16%. Les régimes hydrologiques ont également subi de profondes modifications. En effet, la baisse de la pluviométrie a eu pour effet, la diminution des débits des cours d'eau du bassin. Ainsi, depuis les années 1970, un effondrement des débits des cours d'eau est observé. Cette diminution est marquée par une rupture identifiée en 1968 sur l'ensemble des stations. Les déficits d'écoulement fluctuent entre 51 et 55% avec une moyenne de 52%. L'incidence du déficit pluviométrique observé est manifeste sur la disponibilité des ressources en eau. La sécheresse météorologique se trouve ainsi amplifiée dans les écoulements.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine du bassin versant du N'zi-Bandama. Cette étude vise à fournir aux décideurs les éléments nécessaires à la mise en place des politiques de gestion des ressources en eau adaptées au contexte climatique et au développement durable du bassin versant du N'zi-Bandama. Cette étude est basée sur l'hypothèse selon laquelle la forte variabilité climatique observée au cours de ces dernières décennies aurait entraîné une diminution des réserves aquifères. La méthodologie s'est appuyée sur la loi de Maillet et a consisté à analyser les variations des coefficients de tarissement et les volumes d'eau mobilisés par les aquifères de part et d'autre de l'année 1968, qui constitue l'année de rupture des données hydrométriques du bassin versant du N'zi-Bandama (Kouassi *et al.*, 2012).

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude est le bassin versant du N'zi, sous-bassin du bassin du fleuve Bandama. Il est compris entre la longitude 3°49' et 5°22' Ouest et les latitudes 6° et 9°26' Nord et couvre une superficie de 35 500 Km² (**Fig. 1**). Le N'zi prend sa source au Nord de la Côte d'Ivoire dans la région de Ferkessedougou à une altitude de 400 m et coule globalement dans une direction Nord-Sud. La courbe de hauteur d'eau du N'zi a une pente moyenne relativement constante de l'ordre de 0,053%. La densité du réseau hydrographique diminue du Sud au Nord. L'affluent principal du N'zi est le Kan qu'il reçoit à environ 5 Km en aval de Dimbokro. Il existe trois types de climat au niveau du bassin versant du N'zi-Bandama. Au Nord, règne le régime tropical de transition (climat soudano-guinéen) avec des pluies annuelles inférieures à 1200 mm. Le régime tropical humide (climat baouléen) est caractéristique de la partie centrale du bassin avec des pluies annuelles comprises entre 1200 mm et 1600 mm. Le Sud du bassin se caractérise par un régime subéquatorial (climat attiéen) avec des pluviométries supérieures à 1600 mm (**Fig. 1**).

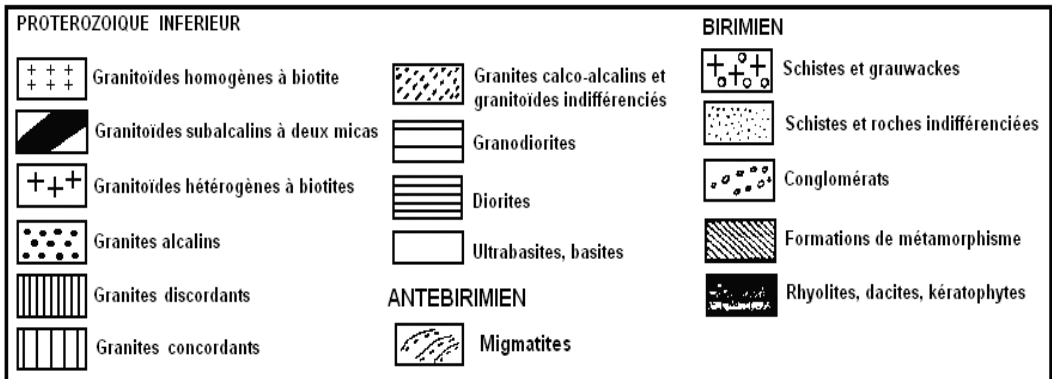
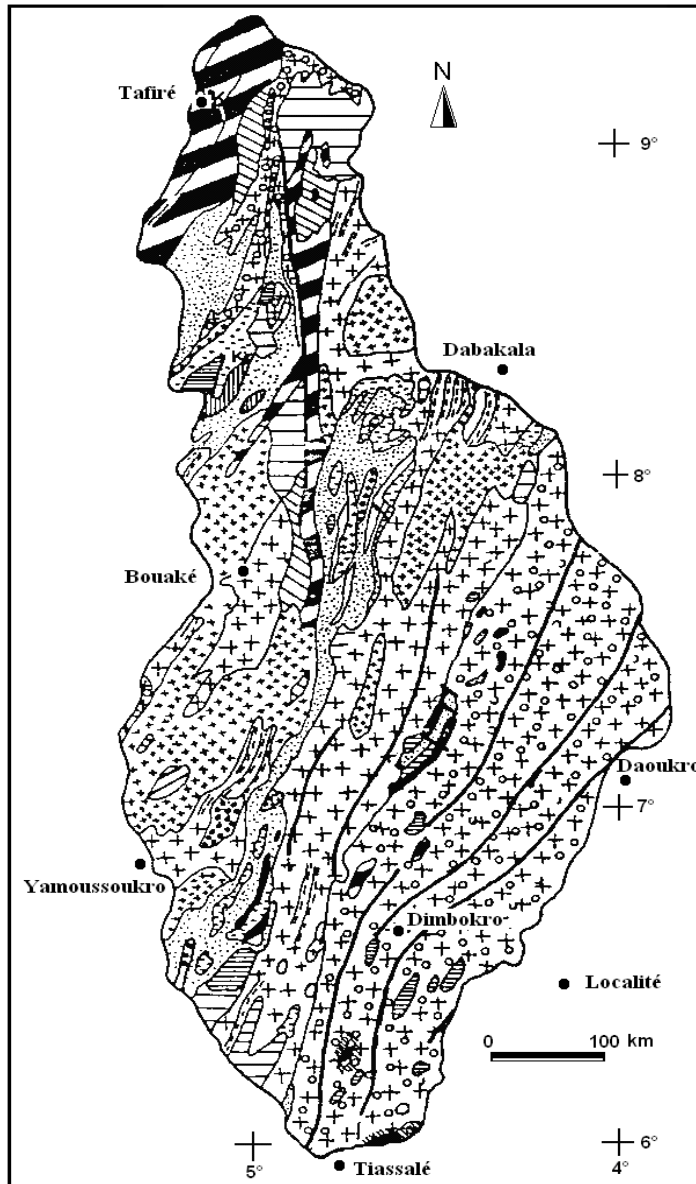
Figure-1. Présentation de la zone d'étude (bassin versant du N'zi-Bandama).



Le bassin versant du N'zi-Bandama se caractérise par une végétation savanicole dans le Centre et le Nord. La partie sud est couverte par la forêt. Le relief du bassin est peu accidenté. Il est généralement constitué de plateaux (100 m à 400 m en moyenne). Cette monotonie est rompue par la chaîne Baoulé. Les principaux types de sol sont les sols ferrallitiques moyennement dessaturés (Nord) et les sols ferrallitiques fortement dessaturés (Centre et Sud).

Les principales formations géologiques du bassin sont les granites, les migmatites et les granodiorites (**Fig. 2**). Bien que correspondant à des formations géologiques diverses, les terrains qui constituent le substratum géologique du bassin versant du N'zi-Bandama représentent au plan des ressources en eau souterraine, un certain nombre de caractéristiques fondamentales communes. L'existence d'aquifère au niveau du bassin du N'zi-Bandama est conditionnée par la présence de fractures et de niveaux altérés. Il existe, à l'image des domaines de socle, deux types de nappes que sont les nappes d'altérites et les nappes de fissures. La recharge de ces nappes se fait essentiellement par les précipitations météoriques. La dynamique des écoulements souterrains est conditionnée par l'existence et l'organisation des fissures et des fractures.

Figure-2. Carte géologique du bassin versant du N'zi-Bandama (Tagini, 1971; Papon, 1973)



DONNEES ET METHODES

Données

Les données hydrométriques ont été fournies par la Direction de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP). Il s'agit des données de débits journaliers concernant les stations de N'zianoa, Dimbokro, Bocanda et M'bahiakro, toutes situées sur le N'zi-Bandama (**Fig. 1**). Ces données s'étendent sur la période 1954-1997. Les stations hydrométriques sélectionnées sont représentatives pour traduire de manière significative le caractère climatique et hydrologique du bassin versant du N'zi-Bandama.

Calcul du coefficient de tarissement et de la durée du tarissement

Le tarissement principal, par les volumes qu'il implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin, constitue une caractéristique importante du régime hydrologique tropical (Briquet *et al.*, 1995). Le calcul du coefficient de tarissement est basé sur le modèle de Maillet qui a déjà été utilisé par d'autres auteurs (El-Ouafi, 1993; Savané *et al.*, 2001; Saley, 2003; Vissin, 2007; Amoussou, 2010). Ces auteurs ont montré la pertinence de ce modèle dans l'étude du tarissement. Dans cette approche, la courbe annuelle de tarissement est l'expression de la vidange du réservoir souterrain. Le modèle de Maillet admet qu'en régime non influencé c'est-à-dire en l'absence de toute précipitation, le tarissement correspond à la décroissance exponentielle du débit en fonction du temps. En effet, on définit le tarissement comme étant la décroissance du débit d'eau souterraine allant aux eaux de surface pendant les périodes sans alimentation, due à la diminution de la réserve d'eau souterraine et exprimée par la courbe de tarissement. En d'autres termes, c'est la période pendant laquelle la vidange des nappes souterraines constitue la seule contribution à l'écoulement des cours d'eau d'un bassin. Selon Olivry *et al.* (1998) cités par Amoussou (2010), le coefficient de tarissement permet d'apprécier l'état des « entrées » d'eau qui contribueraient à la modification apparente des relations pluie/débit observées sur les bassins fluviaux. Il permet ainsi de comparer l'évolution de l'eau de surface et le stockage de l'aquifère afin de mieux cerner le comportement du réservoir de vidange. Le coefficient de tarissement (k) dépend des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère.

L'expression du modèle de Maillet est la suivante (équation 1):

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (1)$$

avec :

- Q_t (m^3/s)=débit à l'instant t ;
- Q_0 (m^3/s)=débit au début du tarissement ;
- k = coefficient de tarissement de Maillet ;
- t =temps en jour.

Le coefficient de tarissement de Maillet (k) a été obtenu par résolution de l'équation 2 qui s'exprime comme suit (Savané *et al.*, 2003):

$$\frac{e^{-kt}}{k} + \frac{V}{Q_0} - \frac{1}{k} = 0 \quad (2)$$

On peut formuler l'expression de la durée de tarissement T (en jours) comme suit (équation 3) (Vissin, 2007; Amoussou, 2010):

$$T = \frac{1}{k} \quad (3)$$

Construction de la courbe de tarissement

Pour la représentation des courbes de tarissement, on part du débit journalier le plus élevé de l'année (Q_0) et on reporte en abscisse les débits mesurés tous les 10 jours, jusqu'à ce qu'ils remontent de façon significative. Le choix du pas de temps de 10 jours a été adopté car, ce pas a déjà donné de bons résultats (Savané *et al.*, 2001; Saley, 2003; Savané *et al.*, 2003). Les courbes de tarissement vont correspondre aux périodes pendant lesquelles le débit décroît de façon plus ou moins régulière (régime non influencé), c'est-à-dire en absence de toute précipitation.

Calcul du volume d'eau mobilisé par les aquifères

Le volume d'eau mobilisé par l'ensemble des aquifères du bassin versant est donné par l'équation 4 (Savané *et al.*, 2001; Savané *et al.*, 2003):

$$V_{mobilisé} = \int_0^{+\infty} Q_0 e^{-kt} dt = \frac{86400 \times Q_0}{k} \quad (4)$$

avec Q_0 exprimé en m^3/s et k en $jours^{-1}$.

Les volumes d'eau mobilisés par les aquifères calculés ont été représentés graphiquement au pas de temps annuel à partir du tableur Excel. Les différents calculs et représentations graphiques, effectués au cours de cette étude, ont été réalisés sous Excel.

Le modèle de Maillet a permis de déterminer sur le bassin versant du N'zi-Bandama l'évolution temporelle des coefficients de tarissement et des volumes d'eau mobilisés par les aquifères et d'apprécier la durée de tarissement des cours d'eau sous l'effet des changements climatiques.

RESULTATS ET DISCUSSION

Analyse des coefficients de tarissement

Les coefficients de tarissement moyens proportionnels à la vitesse de vidange de l'aquifère ont été déterminés avant et après la rupture de 1968, au cours de la période 1954-1997, sur les données des

différentes stations hydrométriques retenues. Les résultats obtenus ont été synthétisés dans le tableau 1.

Tableau-1. Coefficients moyens de tarissement avant et après

Stations	Périodes	Tarissement moyen (j^{-1})	Taux d'augmentation (%)
N'zianoa	1954-1968	$3,91.10^{-2}$	+2,8
	1969-2000	$4,02.10^{-2}$	
Dimbokro	1956-1968	$2,88.10^{-2}$	+34,7
	1969-1997	$3,88.10^{-2}$	
Bocanda	1956-1968	$2,99.10^{-2}$	+6,0
	1969-1997	$3,17.10^{-2}$	
M'bahiakro	1955-1968	$2,78.10^{-2}$	+17,6
	1969-1997	$3,27.10^{-2}$	

Les résultats du tableau 1 montrent que les coefficients moyens de tarissement varient entre $2,78.10^{-2}j^{-1}$ et $3,91.10^{-2}j^{-1}$ avant 1968, identifiée comme l'année de rupture au sein des séries hydrométriques. Après 1968, les coefficients de tarissement fluctuent entre $3,17.10^{-2}j^{-1}$ et $4,02.10^{-2}j^{-1}$. Ces résultats mettent donc en évidence une augmentation du coefficient de tarissement après 1968. Le taux d'augmentation du coefficient de tarissement fluctue entre 2,8% (N'zianoa) et 34,7% (Dimbokro).

Les résultats de calcul de la durée de tarissement sont consignés dans le tableau 2. Ces résultats montrent que la durée de tarissement varie sur les différents sous-bassins et va de 25 à 35 jours. Les durées de tarissement avant 1968 vont de 26 à 36 jours. Après 1968, elles fluctuent entre 25 et 32 jours. Un raccourcissement de la durée de tarissement allant de près d'un jour à 9 jours après 1968 est mis en évidence.

Tableau-2. Durées moyennes de tarissement (jours) avant et après 1968

Stations	Périodes	Durée de tarissement (jour)	Variation de la durée de tarissement (jour)
N'zianoa	1954-1968	25,6	-0,7
	1969-2000	24,9	
Dimbokro	1956-1968	34,7	-8,9
	1969-1997	25,8	
Bocanda	1956-1968	33,4	-1,9
	1969-1997	31,5	
M'bahiakro	1955-1968	36,0	-5,4
	1969-1997	30,6	

Analyse des volumes d'eau mobilisés

Les volumes d'eau mobilisés par les aquifères ont été déterminés au niveau des différentes stations (Tableau 3).

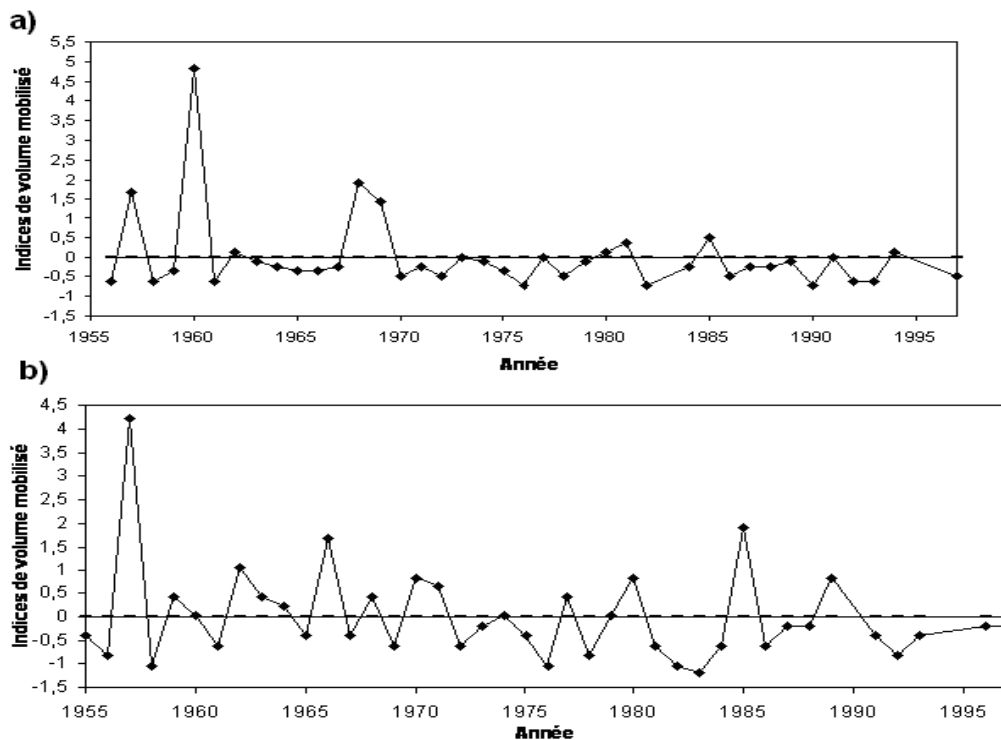
Tableau-3. Volumes d'eau mobilisés par les aquifères avant et après la rupture de.

Stations	Périodes	Volumes d'eau mobilisés (km ³)	Taux de réduction (%)
N'zianoa	1954-1968	0,84	-47,6
	1969-2000	0,44	
Dimbokro	1956-1968	0,85	-57,6
	1969-1997	0,36	
Bocanda	1956-1968	0,79	-38,0
	1969-1997	0,49	
M'bahiakro	1955-1968	0,87	-54,0
	1969-1997	0,40	

Les résultats du tableau 3 montrent que les volumes d'eau mobilisés par les aquifères varient entre 0,79 et 0,87 Km³ avant 1968. Après 1968, les volumes d'eau mobilisés par les aquifères fluctuent entre 0,36 et 0,49 Km³. Le taux de réduction des volumes d'eau mobilisés par les aquifères varie de 38,0% (Bocanda) à 57,6% (Dimbokro). Ces résultats mettent en évidence une diminution des volumes d'eau mobilisés par les aquifères après 1968. Cette baisse a été également mise en évidence par la représentation graphique des indices de volumes d'eau mobilisés par les aquifères au pas de temps annuel (Fig. 3).

Figure 3. Variations interannuelles des indices de volume d'eau mobilisée (1954-1997):

a) à la station de Dimbokro ; b- à la station de Bocanda



DISCUSSION

Les coefficients de tarissement évalués à partir des stations hydrométriques de N'zianoa, Dimbokro, M'bahiakro et Bocanda, au cours de cette étude varient en moyenne entre $2,78.10^{-2}j^{-1}$ et $3,91.10^{-2}j^{-1}$ avant 1968. Après 1968, les coefficients de tarissement fluctuent entre $3,17.10^{-2}j^{-1}$ et $4,02.10^{-2}j^{-1}$. Ces résultats montrent que les coefficients de tarissement connaissent une augmentation notable sur le bassin du N'zi-Bandama après 1968. D'après [Goula et al. \(2006\)](#), la vidange des nappes du N'zi-Bandama suit une loi de tarissement à décroissance exponentielle qu'il est d'autant plus facile d'étudier que la saison sèche est bien marquée ([Briquet et al., 1995](#)). L'analyse de l'évolution des coefficients de tarissement annuels sur la période 1956-1994 a montré qu'ils varient fortement d'une année à l'autre avant 1970. Après 1970, les variations sont plus faibles. Les valeurs moyennes autour desquelles oscillent les coefficients sont de $0,0581j^{-1}$ avant 1970 et $0,0412j^{-1}$ après cette année. Les mêmes auteurs ont obtenu des valeurs de 0,03 à $0,04j^{-1}$ dans le bassin versant du N'zo-Sassandra à la station de Kahin. Plusieurs autres auteurs ont également travaillé sur différents cours d'eau ivoiriens ([Savané et al., 2001](#); [Saley, 2003](#); [Fadika et al., 2008](#)). Des valeurs de l'ordre de $5,7.10^{-2}j^{-1}$ ont été obtenues sur le Cavally à Flampeu et $3,6.10^{-2}j^{-1}$ sur le Drou à Man (Sassandra) par [Savané et al. \(2001\)](#). Les différents résultats sont dans l'ordre de 10^{-2} comme c'est le cas de notre présente étude et convergent vers la mise en évidence d'un tarissement important des réserves souterraines sous l'effet de la variabilité climatique manifestée par une baisse des précipitations et une augmentation de l'évapotranspiration consécutive à l'augmentation monotone de la température dans le bassin versant du N'zi-Bandama depuis la fin de la décennie 1960 ([Kouassi et al., 2008](#); [Kouassi et al., 2010](#); [Kouassi et al., 2012](#)). Cependant, des résultats évoluant dans un sens inverse pour la même zone d'étude ont été obtenus par [Goula et al. \(2006\)](#). La divergence des résultats pourraient être due au choix des phases de tarissement. Nous rejetons les arguments en faveur de la méthode de sélection de Q_0 et de la méthode de calcul du coefficient de tarissement, pour la simple raison que les différentes études ont été menées à partir des mêmes approches méthodologiques.

Le test de Mann Kendal, appliqué aux coefficients de tarissement dans le bassin versant du Niger au Bénin, montre une tendance remarquable à la hausse depuis les années 1970 ([Vissin, 2007](#)). Ce changement sensible s'observe à différentes dates dans les sous-bassins, compte tenu du temps de réponse du système hydrologique aux précipitations. Il faut évoquer aussi l'évolution des états de surface dans l'explication de la tendance à la hausse du coefficient de tarissement, en particulier le couvert végétal ([Amoussou, 2010](#)). En effet, la dégradation du couvert végétal a des répercussions sur les ressources en eau du milieu. Dans le bassin versant du N'zi-Bandama, l'évolution des états de surface soumis à l'action conjuguée de pratiques culturelles traditionnelles (agriculture sur brûlis), des changements d'occupation du sol peut conditionner fortement le tarissement. Le phénomène de tarissement a été également décrit pour d'autres cours d'eau de l'Afrique tropicale par plusieurs auteurs tels que [Mahé et al. \(1998\)](#), [Olivry et al. \(1998\)](#), [Vissin \(2007\)](#), [Amoussou \(2010\)](#). Par exemple, une augmentation du coefficient de tarissement du Bani à Douna à partir de

1969 qui correspond à une vidange précoce et plus rapide des nappes souterraines a été montrée par Olivry *et al.* (1998).

La durée du tarissement dans le bassin versant du N'zi-Bandama varie entre 25 jours et 35 jours de façon générale. Tous les auteurs s'accordent sur un fait: la durée de tarissement varie d'un bassin à un autre mais connaît une réduction sensible depuis la fin de la décennie 1960. La durée variable du tarissement pourrait s'expliquer par la répartition des pluies au cours de l'année et par l'importance des pluies qui arrivent en saison sèche et qui soutiennent l'étiage (Bahiré, 1986 in Goula *et al.*, 2006). En effet, les débits de basses eaux dépendent de l'état de remplissage des nappes en fin de saison pluvieuse et de la loi de tarissement du cours d'eau. La variation de la durée du tarissement pourrait aussi s'expliquer par une baisse du nombre de jours pluvieux. En effet, selon les travaux de Kouassi *et al.* (2010), les résultats de la procédure de segmentation de Hubert appliquée au nombre de jours de pluie sur la période 1951-2000 ont montré que les différentes séries constituées des fréquences de jours pluvieux contiennent des ruptures qui s'observent majoritairement autour des périodes 1965-1974 et 1979-1983. Ces hétérogénéités identifiées traduisent une baisse de la fréquence des jours pluvieux entamée autour des années 1970. Cette baisse de la fréquence des jours pluvieux a été amplifiée au cours des décennies 1980. Ces différents résultats ont permis d'avoir le comportement temporel des fréquences de jours pluvieux qui constituent un facteur dans la tendance d'explication de l'impact de la variabilité climatique sur les régimes pluviométriques.

La rapidité du tarissement et les faibles volumes d'eau mobilisés, amènent à dire que les nappes qui alimentent les cours du N'zi sont dans des aquifères de faible perméabilité et de petite taille (Bahiré, 1986 in Goula *et al.*, 2006). En effet, dans les formations fracturées des départements de Dimbokro-Bongouanou (zone incluse dans le bassin versant du N'zi-Bandama), Koita (2010) a obtenu des valeurs allant de $2,5 \cdot 10^{-8}$ à $3,2 \cdot 10^{-6}$ m/s à partir de la méthode de Théis. Soulignons que le bassin versant du N'zi-Bandama est constitué essentiellement de granites, de migmatites et de granodiorites qui sont des formations très consolidées. De ce fait, la présence d'eau souterraine est conditionnée par l'existence de fractures d'où la présence d'aquifères discontinus qui contiennent de l'eau dans de faibles proportions.

Les volumes d'eau mobilisés par les aquifères varient entre 0,79 et 0,87 Km³ avant 1968. Après 1968, les volumes mobilisés par les aquifères fluctuent entre 0,36 et 0,49 Km³. Les volumes d'eau mobilisés par les aquifères connaissent donc une baisse liée à la réduction pluviométrique constatée à partir de la fin de la décennie 1960. L'appauvrissement durable des apports de l'écoulement de base est lié à une réduction du volume d'eau dans les aquifères. En effet, on assiste à un amenuisement considérable des réserves souterraines qui assurent normalement l'alimentation des cours d'eau en période de tarissement. Ces variations du volume d'eau mobilisé par les aquifères suggèrent une régression considérable des réserves souterraines. Elle expliquerait alors la forte ampleur de la récente sécheresse sur la baisse des écoulements. Les conclusions des travaux de Savané *et al.* (2001), Saley (2003), Goula *et al.* (2006), à partir de la même approche

méthodologique utilisée dans le cadre de cette étude, montrent qu'une baisse marquée des volumes mobilisés par les aquifères a été observée à partir de 1970 sur les cours d'eau ivoiriens. Les résultats obtenus au cours de cette étude concordent donc avec ceux obtenus par les auteurs précédents. Ces résultats montrent la faiblesse des quantités d'eau déversées dans les cours d'eau par les nappes souterraines.

L'analyse du tarissement est réalisée à partir de différentes stations hydrométriques et l'on constate une variabilité du coefficient de tarissement le long du cours d'eau, avec notamment des valeurs plus fortes à l'amont du bassin. Cette variabilité à l'intérieur du bassin pourrait s'expliquer par des prélèvements anthropiques majeurs à certains endroits durant les périodes de tarissement. En effet, le N'zi en particulier et le Bandama en général, porte beaucoup de barrages agropastoraux dans sa partie nord qui coïncide avec la zone la plus défavorable au plan hydroclimatique. Ces barrages affectent donc le comportement hydrologique normal du bassin.

L'étude du tarissement et des volumes mobilisés par les aquifères confirme que la faible contribution des écoulements de base, du fait d'apports réduits des nappes phréatiques, est un phénomène durable. Cet amenuisement croissant des réserves souterraines du bassin versant du N'zi-Bandama résulte des cumuls des déficits pluviométriques constatés, de la dégradation du couvert végétal, ce qui entraîne de façon générale un tarissement rapide des nappes.

CONCLUSION

Les coefficients de tarissement évalués dans le bassin versant du N'zi-Bandama varient entre $2,78.10^{-2}j^{-1}$ et $3,91.10^{-2}j^{-1}$ avant 1968. Après 1968, ils fluctuent entre $3,17.10^{-2}j^{-1}$ et $4,02.10^{-2}j^{-1}$. Ces résultats mettent en évidence une augmentation du coefficient de tarissement après 1968, autrement dit une vidange beaucoup plus rapide des aquifères alimentant l'écoulement de base. Un raccourcissement de 1 à 9 jours avec une moyenne de 5 jours de la durée de tarissement après 1968 a été mis en évidence. Les volumes d'eau mobilisés par les aquifères varient entre 0,79 et 0,87 Km^3 avant 1968. Après 1968, les volumes mobilisés par les aquifères fluctuent entre 0,36 et 0,49 Km^3 . Ces résultats mettent en évidence une diminution des volumes d'eau mobilisés par les aquifères après 1968. Ces variations du volume d'eau mobilisé par les aquifères suggèrent une régression considérable des ressources en eau souterraine sous l'influence des changements climatiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient la Direction de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) pour la mise à disposition des données nécessaires à la réalisation de ce travail. Ils remercient également les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article.

REFERENCES

- Amoussou, E., 2010. Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire mono-ahémé-couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Centre de Recherche de Climatologie
- Bahire, S., 1986. Monographie sur le N'zi, direction de l'hydraulique Humaine
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, 2008. Le changement climatique et l'eau. Document technique iv publié par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, secrétariat du GIEC. Genève, ISBN: 978-92-9169-223-1 236.
- Briquet, J.P., G. Mahé and F. Bamba, 1995. Changements climatiques et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). In: Actes de conférence de Paris. IAHS Publication, Paris: pp: 113-124.
- El-Ouafi, M., 1993. Tarsissement et vidange des réservoirs de la liane (Nord de la France). *Hydrologie Continentale*, 8(2): 103-112.
- Fadika, V., B.T.A. Goula, F.W. Kouassi, I. Doumouya, K. Koffi, B. Kamagate, I. Savané and B. Srohorou, 2008. Variabilité interannuelle et saisonnière de l'écoulement de quatre cours d'eau de l'Ouest côtier de la Côte d'Ivoire (Tabou, Dodo, Néro et San pédro) dans un contexte de baisse de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest. *European Journal of Scientific Research*, 21(3): 406-418.
- GIEC., 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail i, ii et iii au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, Suisse: 103.
- Goula, B.T.A., I. Savané, B. Konan, V. Fadika and G.B. Kouadio, 2006. Etude comparative de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau des bassins du N'zo et du N'zi en Côte d'Ivoire. *Vertigo*, 7(1): 1-12.
- Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, G., 2001. Annexe b : Glossaire. In changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse. Royaume-Uni et New York, NY, États- Unis: Cambridge University Press, Cambridge.
- Kanohin, F., M.B. Saley and I. Savané, 2009. Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les activités humaines en zones tropicale humide: Cas de la région de Daoukro en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 26(2): 209-222.
- Koita, M.M., 2010. Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Montpellier II.
- Kouassi, A.M., B.T.M.N'guessan, K.F. Kouamé, K.A. Kouamé, J.C. Okaingni and J. Biemi, 2012. Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M: Cas du bassin

- versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Comptes Rendus Geoscience*, 344: 288-296.
- Kouassi, A.M., K.F. Kouamé, B.T.A. Goula, T. Lasm, J.E. Paturel and J. Biemi, 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. *Revist*, 11: 207-229.
- Kouassi, A.M., K.F. Kouamé, K.B. Yao, K.B. Dje, J.E. Paturel and S. Oularé, 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)*, décembre 2010. Available from <http://cybergegeo.revues.org/index23388.html>.
- Mahé, G., R. Dessouassi, C. Bandia and J.C. Olivry, 1998. Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du Bani à Douna au Mali. IAHS Publication.
- Mahé, G. and J.-C. Olivry, 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6: 109-117.
- Mahé, G., J.-C. Olivry, R. Dessouassi, D. Orange, F. Bamba and E. Servat, 2000. Relations eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *Comptes rendus. Earth and Planetary Sciences*, 33: 689-692.
- Olivry, J.C., J.P. Bricquet and G. Mahé, 1998. Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. IAHS Publication.
- Papon, A., 1973. Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Paris, France: Mémoire Bureau de Recherche en géologie minière.
- Saley, M.B., 2003. Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire.
- Savane, I., K.M. Coulibaly and P. Gioan, 2001. Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, 4(12): 231-237.
- Savane, I., K.M. Coulibaly and P. Gion, 2003. Etude comparative de trois méthodes de calcul du coefficient de tarissement des cours d'eau. *Sécheresse*, 14(1): 37-42.
- Tagini, B., 1971. Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotechnique régionale. France: Thèse de Doctorat de l'Université de Lausanne.
- Vissin, W.E., 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. France: Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne.