



## **ANALYSE DE PHÉNOMÈNES HYDROLOGIQUES DANS UN BASSIN VERSANT URBANISÉ: CAS DE LA VILLE DE YAMOOUSSOUKRO (CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

**N'GUESSAN KOUAMÉ A.<sup>1-4</sup>, KOUASSI AMANI M.<sup>2</sup>,  
GNABOA R.<sup>3</sup>, TRAORÉ K.S.<sup>1</sup>, HOUENOU P.V.<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Université NANGUI Abrogoua, Unité de Formation et de Recherche (UFR) en Sciences et Gestion de l'Environnement, Laboratoire des Sciences de l'Environnement, 02 BP 801 Abidjan 02

<sup>2</sup>Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) ; Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi); Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques ; BP 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire)

<sup>3</sup>Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP HB) de Yamoussoukro ; Ecole de Formation Continue et de Perfectionnement des Cadres (EFCPC); BP: 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire)

<sup>4</sup>Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement (BNETD), Département Environnement, Assainissement et Hydraulique (DEAH); 04 BP 945 Abidjan 04

nguessandre@yahoo.fr

### **RÉSUMÉ**

Cette étude porte sur l'analyse des phénomènes hydrologiques à l'origine de la pollution des lacs aménagés de la ville de Yamoussoukro (Centre de la Côte d'Ivoire). L'approche méthodologique prend en compte l'analyse de la variabilité climatique (test de Pettitt et représentation graphique), le bilan hydrologique (méthode de Coutagne, méthode de Thornthwaite, méthode de Tixeront-Berkaloff) et l'analyse comparative réalisée à partir des ETP et ETR mensuelles. Les résultats de cette étude ont permis de caractériser les principales manifestations de la variabilité climatique (1975-2009) observée depuis plus de trois décennies au niveau de la région de Yamoussoukro. Il ressort de l'étude que des conditions prolongées de déficits pluviométriques ont été mises en évidence avant 1992. L'après 1992, se caractérise par une reprise des précipitations sans pour autant atteindre les hauteurs pluviométriques

d'avant 1970. La variabilité climatique se manifeste par une croissance monotone des températures de l'air. Le bilan hydrologique montre que la région de Yamoussoukro reçoit en moyenne 1137 mm de pluie chaque année et l'évapotranspiration réelle (ETR) est de 853 mm, soit près de 74,98% de la lame d'eau précipitée. La lame d'eau infiltrée est dans l'ordre de 70 mm, soit 6,15% de la lame d'eau précipitée. La quantité d'eau ruisselée est dans l'ordre de 215 mm, soit 18,87% de la lame d'eau précipitée. La modification constatée sur les cumuls de hauteurs pluviométriques s'est accompagnée d'une modification de la durée des saisons pluvieuses. Une tendance au raccourcissement des saisons des pluies est donc mise en évidence dans la région de Yamoussoukro.

**Mots-clés:** Variabilité climatique, bilan hydrologique, régimes climatiques saisonniers, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire.

## **ABSTRACT**

This study focuses on the analysis of hydrological phenomena causing pollution landscaped lakes of Yamoussoukro city (Center of Ivory Coast). The methodology takes into account the analysis of climate variability (Pettitt test and graphical representation), water balance (Coutagne method, of Thornthwaite method and Tixeront-Berkaloff method) and comparative analysis using from potential evapotranspiration and real evapotranspiration on a monthly time. The results of this study were used to characterize the main manifestations of climate variability (1975-2009) observed for more than three decades in the region of Yamoussoukro. It appears from the study of the conditions of prolonged rainfall deficits have been identified before 1992. The post-1992 is characterized by a resumption of rainfall without reaching the heights of rainfall before 1970. Climate variability is manifested by a monotonic increase of air temperature. The water balance shows that the region receives an average of 1137 mm of rain annually and real evapotranspiration (ETR) is 853 mm, or about 74.98 % of the height of precipitated water. The infiltrated water slide is in the order of 70 mm or 6.15% of the height of precipitated water. The amount of runoff is in the order of 215 mm, or 18.87% of the height of precipitated water. The change observed on the cumulative heights rainfall was accompanied by a change in the duration of the rainy season. A trend towards shorter rainy seasons is demonstrated in the region of Yamoussoukro.

**Key-words:** Climate variability, water balance, seasonal weather patterns, Yamoussoukro, Ivory Coast.

## **INTRODUCTION**

Le développement urbain se fait à proximité des milieux aquatiques. Au rang de ces milieux aquatiques insérés dans les territoires urbains ou péri-urbains, les lacs occupent une place importante en raison de la multiplicité de leurs fonctions pour la ville et ses habitants. Totalement intégrés dans le tissu urbain, ces petits plans d'eau contribuent par leur capacité de stockage à la maîtrise du ruissellement urbain, participent à la qualité du cadre de vie, jouent un rôle primordial pour les activités de loisirs et dans certains cas présentent une valeur patrimoniale essentielle. Ces lacs sont alimentés en partie directement ou indirectement par les eaux de ruissellement issues des précipitations. Or, la Côte d'Ivoire connaît des problèmes de variabilité climatique qui s'inscrivent dans le phénomène général de la sécheresse observée depuis 1970 en Afrique de l'Ouest (Servat et al., 1998 ; Paturel et al., 1998 ; Mahé et al., 2001 ; Ouédraogo, 2001 ; Ardoïn et al., 2003 ; Paturel et al., 2003 ; Ardoïn, 2004 ; Goula et al., 2006 ; Kouassi et al., 2008 ; Kouassi et al., 2010 ; Kouassi et al., 2012a ; Kouakou et al., 2012). Cette variabilité climatique se manifeste par une baisse des précipitations. L'analyse et la caractérisation précise des manifestations de la variabilité du climat, et sa relation avec la variabilité les quantités d'eau ruisselées et les régimes climatiques saisonniers constituent aujourd'hui une problématique de développement, en ce sens qu'elles doivent déboucher sur l'élaboration de scénarii permettant la gestion de la pollution des lacs par les activités anthropiques. En effet, les eaux de ruissellement contiennent plusieurs types de polluants d'origines domestiques, industrielles, agricoles, urbaines, etc . Le déversement de ces polluants dans les lacs constitue le point de départ de la pollution des lacs de Yamoussoukro (Tanoh, 2005 ; N'Guessan et al., 2011).

Aussi, avec l'augmentation de la population et le développement de l'urbanisation, ces milieux aquatiques sont-elles fortement soumis aux pressions urbaines. Celles-ci génèrent des problèmes multiples et complexes qui exercent une influence directe ou indirecte, à long ou à court terme sur l'environnement et la santé publique (Ahoussi et al., 2008). Ainsi, la qualité de ces eaux s'est fortement dégradée en raison des activités anthropiques telles que l'agriculture, le changement des usages du sol, l'imperméabilisation des surfaces à l'origine d'un ruissellement plus important et plus chargé en polluants, les rejets d'eaux usées non traitées dans les milieux récepteurs, et pour une part difficile à évaluer, le changement climatique qui influence la température et les caractéristiques chimiques des plans d'eau (Trolle et al., 2010).

En plus de la pollution, le lit des eaux des lacs fait l'objet de comblement par la mobilisation d'alluvions, de sables et de graviers à la suite des ruissellements. Cette situation favorise le comblement progressif du fond des lacs et réduit considérablement leur durée de vie. Cet état de fait constitue une menace non

seulement pour la qualité de l'eau et de son environnement mais aussi un problème de santé publique. Au vu de la dégradation physique et chimique poussée des lacs, une maîtrise des phénomènes hydrologiques, hydrodynamiques et une caractérisation précise des eaux ainsi qu'une bonne localisation des sources de pollution s'avère nécessaire pour mettre en place des stratégies viables et durables de restauration et un outil de suivi-contrôle de ce milieu efficace. Dans ce contexte, une quantification des eaux ruisselées et infiltrées ainsi qu'une analyse des régimes climatiques saisonniers dans le contexte de variabilité climatique est nécessaire.

L'objectif de cette étude est d'analyser les phénomènes hydrologiques susceptibles d'influencer directement ou indirectement la pollution des lacs de Yamoussoukro. Il s'agit précisément d'évaluer les quantités potentielles d'eaux ruisselées et infiltrées ainsi que l'évolution des régimes climatiques saisonniers dans un contexte de variabilité climatique dans la région de Yamoussoukro dans l'hypothèse que l'apport essentiel en eau est lié au régime climatique de la région.

La méthodologie s'est appuyée d'abord sur une analyse de la variabilité climatique à partir des données de pluie et de température. Le test de Pettitt a été appliqué à la série des précipitations. Quant à la série de température, elle a été analysée à partir d'une représentation graphique au pas de temps annuel. Ensuite, un bilan hydrologique a été établi. L'évapotranspiration a été évaluée à partir de la méthode de Coutagne. En ce qui concerne le ruissellement, il a été calculé à partir de la méthode de Tixeront-Berkaloff. La lame d'eau infiltrée a été déduite à partir de l'équation du bilan hydrologique. L'étude de la variation des saisons des pluies est basée sur une analyse comparative des valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR) au pas de temps mensuel. Les valeurs d'ETP et ETR ont été calculées par la méthode de Thornthwaite.

## **PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE**

La Commune de Yamoussoukro, devenue Commune de plein exercice depuis 1980, a été érigée en capitale politique et administrative de la Côte d'Ivoire depuis le 22 mars 1983 par la loi n° 83-242 du 22 mars 1983, après Grand-Bassam, Bingerville et Abidjan. Du 26 janvier 1996 au 21 janvier 2002, un statut particulier a été conféré à la commune de Yamoussoukro, celui de District Autonome administré par un Ministre Résident. Du 21 janvier 2002 au 28 septembre 2011, en faveur de la politique de décentralisation, le Département de Yamoussoukro fut érigé en District selon la loi n° 2002-44 du 21 janvier 2002 portant statut du District de Yamoussoukro dont le siège est localisé dans la Commune de Yamoussoukro. Depuis le 28 septembre 2011, la Commune de Yamoussoukro est le Chef-lieu du District Autonome de Yamoussoukro.



jouent un rôle structurant dans le plan directeur d'urbanisme particulièrement au niveau du centre ville en formant une ceinture autour des quartiers Habitat, Energie, Thérèse et Assabou.

La population de la zone urbaine de Yamoussoukro est passée de 8 020 habitants en 1965 à 35 585 habitants en 1975 pour atteindre 110 013 habitants en 1988. Le recensement de 1998 a dénombré 176 109 habitants (RGPH, 1998). Cette population peut être aujourd'hui estimée à plus de 242 000 habitants.

La région de Yamoussoukro appartient à la pénéplaine granito-gneissique du socle de l'Afrique de l'Ouest. Le relief est peu accidenté, l'altitude moyenne est de 200 mètres. Il se caractérise par des plateaux aux sols argileux, granitiques et sableux par endroit. Ce relief est arrosé par les affluents du N'zi et le lac de Kossou. Le site urbain comprend deux bas-fonds aménagés en lacs artificiels (tributaires du Bandama) orienté Nord-est et Sud-ouest. L'implantation initiale a évité le fond des deux bas-fonds qui s'étalent au-dessus de 200 m. Le village originel s'est implanté sur une faible pente (200 à 220m) dominant le bras septentrional du bas-fond. L'interfluve a été ensuite occupé. Cette colline qui a une altitude de 208 m est actuellement le cœur de la ville. Dans l'ensemble, le site de la ville est légèrement vallonné (altitudes comprises entre 201 et 248 m) entrecoupé de thalwegs affluents du Bandama. Les pentes moyennes sont modérées (inférieures à 3%) rendant le site facilement urbanisable. Le site de la ville est favorable à l'implantation d'une ville importante. La topographie du site ne présente pas de contraintes majeures à l'urbanisation.

La Commune de Yamoussoukro appartient au régime tropical humide caractérisée par deux saisons sèches (la grande saison sèche court de novembre à mi-mars et la petite saison sèche va de mi-juillet à mi-août) et deux saisons de pluies (la grande saison des pluies va de mi-mars à mi-juillet et la petite saison des pluies court de mi-août à fin octobre). Les hauteurs pluviométriques interannuelles varient de 900 à 1100 mm avec une répartition temporelle très variable d'une année à l'autre. La température moyenne interannuelle de la région de Yamoussoukro est d'environ 26 °C. Les valeurs moyennes mensuelles maximales et minimales de la température sont respectivement de 33,05 °C et de 19,55 °C. La période la plus chaude de l'année à Yamoussoukro est le premier trimestre (janvier à mars) tandis que la période la moins chaude est le bimestre juillet-août. L'humidité relative varie de 75 à 85% avec des chutes à 40% en période d'harmattan et se situe entre 80 et 85% en période pluvieuse. Les vents viennent de la direction Sud-Ouest pendant 10 mois (février à novembre) puis oscillent entre le Sud-Ouest et le Nord-Est en décembre pour se stabiliser au Nord en janvier (harmattan). La vitesse mensuelle moyenne du vent varie de 3,6 km/h (juin) à 8,8 km/h (février). La direction prédominante du vent par temps normal est Sud-Ouest et Nord-Est.

Le paysage végétal de la région est celui d'une zone de contact entre la forêt et la savane. Il s'apparente plutôt à une savane pré forestière c'est-à-dire une forme

de transition entre la forêt et la savane. La trame est faite d'une prairie à hautes herbes piquetées par endroits de quelques arbres (caractéristiques palmiers-rôniers). Cette végétation se transforme en forêt galeries le long des cours d'eau (BNETD, 1997). Sur le plan géotechnique, une couche de graveleux latéritiques gravillonnaires se rencontre de 0,3 m à 1,5 m de profondeur. Ce graveleux devient argileux après 1,5 m de profondeur.

La zone de Yamoussoukro appartient à un vaste domaine du socle cristallin de l'Afrique de l'Ouest appelé le Domaine Baoulé-Mossi. La ville de Yamoussoukro est située sur une ride de granitoïdes. Cette ride du granitoïde est limitée à l'Ouest par le sillon volcano-sédimentaire du Yaouré et à l'Est par celui de Toumodi-Fètèkro. Dans un rayon de 15 km autour de la ville de Yamoussoukro, ce sont les roches granitoïdes qui se rencontrent. Plusieurs faciès se présentent, parmi lesquels les plus abondants sont les granites porphyroïdes (cristaux de feldspath, de quartz et de biotite), les granites homogènes à texture grenue simple (enclaves de granites porphyroïdes, filons de quartz, de pegmatite, et d'aplite) et les granites homogènes à grains fins. Ces formations présentent une certaine perméabilité ( $10^{-8}$  ms<sup>-1</sup> K  $10^{-6}$  ms<sup>-1</sup>) qui permet la formation des nappes aquifères.

La pédologie de la région de Yamoussoukro est marquée par une succession de plusieurs types de sols. Elle comprend principalement:

-38,4% de sols rougeâtres plus ou moins gravillonnaires, de texture fine à moyenne, bien drainant. Ces terres sont d'aptitude assez bonne pour la mécanisation et bonne pour l'agriculture traditionnelle, le pâturage, la foresterie, les cultures pérennes ;

-05,7% de sols jaune-rougeâtre ou brun-rougeâtre plus ou moins gravillonnaires. Ces terres sont d'aptitude passable à médiocre pour la mécanisation et passable à assez bonne pour l'agriculture traditionnelle, le pâturage, la foresterie, les cultures pérennes ou annuelles ;

-11,8% de sols jaunes-brunâtres ou brunâtres, plus ou moins graveleux, de texture moyenne, à drainage rapide. Ces terres sont d'aptitude médiocre pour la mécanisation et passable pour l'agriculture traditionnelle, le pâturage, la foresterie ;

-03,1% de la région est constituée de sols non cultivables ;

-37% de la région est d'aptitude agronomique passable à assez bonne parmi lesquels certains sont situés dans les alentours immédiats des retenues d'eau existantes.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Données

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont la pluviométrie et la température de l'air au pas de temps mensuel. Ces données proviennent du parc météorologique de Yamoussoukro. Elles ont été collectées auprès du service de météorologie nationale (SODEXAM : Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique). Les données pluviométriques couvrent la période 1975-2009. Quant aux données de température, elles s'étendent sur la période 1975-2001. Les données pluviométriques varient de 856,5 à 1438,9 mm avec une moyenne de 1147 mm et un écart-type de 148,1 mm. L'amplitude pluviométrie est de 582,4 mm. La série des données de température de l'air varie entre 25,22°C et 26,48°C avec une moyenne de 25,80°C et un écart-type de 0,38°C. L'amplitude thermique est de 1,27°C. Les valeurs du coefficient de variation évaluées pour les séries de précipitations et de température sont respectivement de 13% et 1,5%. Ces valeurs montrent que la série des précipitations est homogène alors celle des températures est très homogène. Pour l'analyse du bilan hydrologique, les différentes données ont été synchronisées et couvrent la période 1975-2001.

### Méthodologie d'analyse de la variabilité climatique

En vue d'apprécier la variabilité climatique, le test de Pettitt a été utilisé à cause de sa performance et sa robustesse (Lubès-Niel et al., 1998). Une rupture est définie comme un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées (Servat et al., 1998). Le test de Pettitt (1979) a été retenu pour sa puissance et sa robustesse (Lubès-Niel et al., 1998). Ce test a été utilisé dans plusieurs études de changements hydroclimatiques notamment en Afrique de l'Ouest (Servat et al., 1998 ; Lubès-Niel et al., 1998 ; Paturel et al., 1998 ; Goula et al., 2006 ; Kouassi et al., 2008 ; Kouassi et al., 2010 ; Kouassi et al., 2012a ; Kouakou et al., 2012). Il consiste à découper la série principale de  $N$  éléments en deux sous-séries à chaque instant  $t$  compris entre 1 et  $N-1$ . La série principale présente une rupture à l'instant  $t$  si les deux sous-séries ont des distributions différentes. La variable de Pettitt ( $U_{t,N}$ ) est définie par l'équation (1) :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (1)$$

-  $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$  ;



- $\text{sgn}(X)=1$  si  $X>0$ ;
- $\text{sgn}(X)=0$  si  $X=0$  ;
- $\text{sgn}(X)=-1$  si  $X<0$ .

La probabilité de dépassement approximative d'une valeur  $k$  est définie et permet d'apprécier l'importance de la rupture (équation 2):

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp(-6k^2 / (N^3 + N^2)) \quad (2)$$

L'absence de rupture dans la série de taille  $N$  constitue l'hypothèse nulle. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant  $t$  définissant le maximum en valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$ . Le test de Pettitt a été appliqué à partir du programme Kronostat 1.01.

Une analyse graphique des données de température au pas de temps annuel a permis d'apprécier le comportement climatique sous l'angle thermique.

### **Méthode de détermination de l'ETR**

La détermination de l'ETR a été réalisée à partir de la méthode de Coutagne (Alassane, 2004; Houmed-Gaba, 2009; Kouassi et al., 2012b). Elle donne de bons résultats dans l'étude du bilan hydrologique (Kouassi et al., 2012b). L'évapotranspiration réelle (ETR) est donnée par l'expression :

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (3)$$

avec :

$$- \lambda = 1 / (0,8 + 0,145t) \quad (4)$$

-  $t$  : température moyenne annuelle en °C ;

-  $P$  : précipitation moyenne annuelle en m.

Cette méthode n'est applicable que si  $1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$  avec  $P$  en m.

### **Méthode de détermination du ruissellement**

L'estimation du ruissellement ( $R$ ) est faite par la formule de Tixeront-Berkaloff qui utilise la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle calculée par la méthode de Thornthwaite (Alassane, 2004 ; Kouassi et al., 2012b).

La formule de détermination de l'ETP selon Thornthwaite se présente comme suit :

$$ETP(mm) = 16 \left( \frac{10t}{I} \right)^a F \quad (5)$$

$$i_j = \left( \frac{t_j}{5} \right)^{1,514} \quad (6)$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (7)$$

$$a = 0,49239 + 1,79 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 \quad (8)$$

avec :

t: température moyenne mensuelle en °C; I: indice thermique annuel; i: indice thermique mensuel; F: coefficient correcteur, fonction de la latitude et du mois donné. Ses valeurs sont tabulées.

La formule de Tixeront-Berkaloff pour l'évaluation du ruissellement (R) se présente comme suit :

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2} \quad (9)$$

avec:

R : ruissellement en mm; P : précipitation moyenne annuelle en mm; ETP : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculée par la méthode de Thornthwaite en mm.

### Méthodologie de détermination de la lame d'eau infiltrée

La méthode du bilan hydrologique est la méthode la plus utilisée pour la détermination de la lame d'eau infiltrée (Lallahem, 2002; Kouassi et al., 2007; Kouassi et al., 2012b). L'infiltration est évaluée à partir de l'équation 10 :

$$I = P - (ETR + R) + \Delta S \quad (10)$$

avec:

I: lame d'eau infiltrée (mm); P: pluviométrie (mm); ETR: évapotranspiration réelle (mm); R: lame d'eau ruisselée (mm);  $\Delta S$  : variation du stock d'eau. Le

travail a été réalisé à partir de l'hypothèse selon laquelle, à l'échelle du cycle hydrologique annuel, les variations de stock s'annulent sur un grand bassin (Mahé et al., 2005).

### **Méthodologie d'analyse de la variation des saisons climatiques**

L'étude de la variation des saisons des pluies est basée sur une analyse comparative des valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR) au pas de temps mensuel. Les valeurs d'ETP et ETR ont été calculées par la méthode de Thornthwaite. La méthode de calcul de l'ETP selon Thornthwaite a été présentée précédemment.

La méthodologie de calcul de l'ETR selon Thornthwaite peut être décrite ci-dessous. On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (Réserve Utile=RU) et cette eau peut être reprise pour l'évapotranspiration par l'intermédiaire des plantes. La quantité d'eau stockée dans la réserve est comprise entre 0 (la réserve est vide) et 200 mm (la réserve est pleine) avec une moyenne de 100 mm. Cette quantité varie suivant les sols et sous-sols considérées. On admet que la satisfaction de l'ETP a priorité sur l'écoulement. Par ailleurs, la compétition de la réserve utile (RU) est également prioritaire sur l'écoulement. On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle à partir de la pluie (P) du mois, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de la réserve utile (RU) selon les règles suivantes :

-si  $P \geq ETP$  alors :

$$ETR = ETP \quad (11)$$

-si  $P < ETP$  alors :

$$ETR = P + RU. \quad (12)$$

Un modèle a été proposé par Thornthwaite selon une loi exponentielle négative de la forme:

$$RU_t = RU_0 \times e^{-r \sum DP} \quad (13)$$

$RU_t$  : état des réserves à l'instant t;  $RU_0$  : réserve utile du sol atteinte à la fin de la saison humide.

$$DP \text{ (déficit pluviométrique)} = ETP - P \quad (14)$$

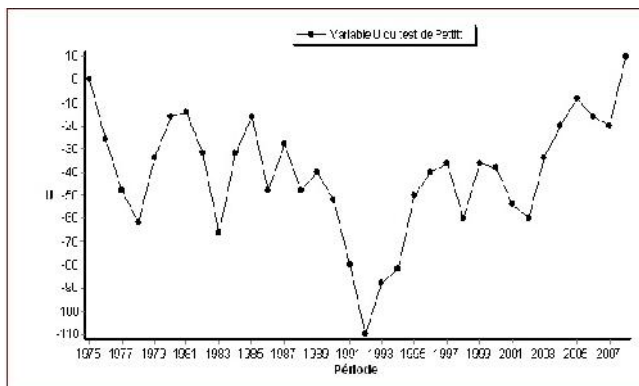
: constante dépendant de RU. Ses valeurs sont tabulées.

Un graphe établi sur une période interannuelle (1975-2001) a mis dans un même référentiel la courbe traduisant l'évolution des ETP mensuelles et celle des ETR mensuelles. Les comportements des deux courbes permettent de définir les différentes périodes pluvieuses ou sèches. La période pluvieuse se définit par une superposition des courbes d'ETP et d'ETR. La période sèche se définit par la position de la courbe des ETP au dessus de la courbe des ETR. L'opération vise à cerner les différentes périodes de l'année hydrologique. Cette étude dans le temps a permis de souligner l'impact de la variabilité climatique sur les régimes saisonniers.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Analyse de la variabilité climatique

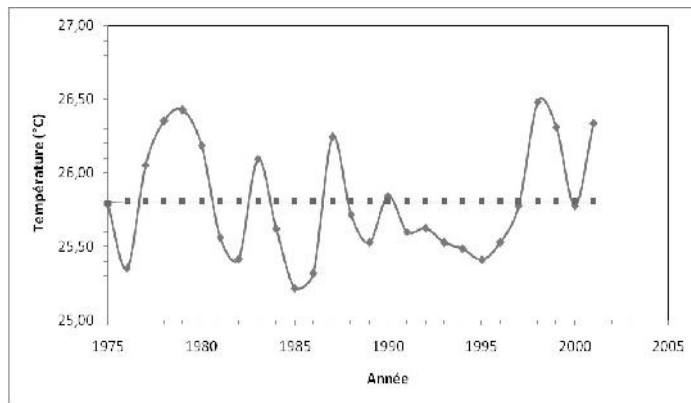
L'application du test de Pettitt série montre que l'hypothèse nulle, absence de rupture, est accepté au seuil de 99% et 95% mais rejeté au seuil de 90%. Une rupture significative a été détectée en 1992 avec une probabilité de dépassement de 1,41%. La rupture détectée correspond à des baisses importantes des précipitations dans la région de Yamoussoukro de 1975 à 1992. Ces résultats révèlent l'hétérogénéité des précipitations et permettent ainsi de confirmer la baisse globale des précipitations constatée autour des années 1970 (Figure 2) et partant mettent en évidence la variabilité climatique qu'a connue la région de Yamoussoukro ces trois dernières décennies.



**Figure 2:** Courbe de la série pluviométrique issue du test de Pettitt (1975-2009).

Les variations interannuelles de la température de l'air montrent que la température de l'air connaît une hausse régulière sur toute la période 1975-2001 (Figure 3).

*Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbanisé :  
Cas de la ville de Yamoussoukro (Centre de la Côte d'Ivoire)*



**Figure 3:** Variations interannuelles de la température de l'air (1975-2001) à la station de Yamoussoukro.

### **Analyse du bilan hydrologique**

Les résultats du bilan hydrologique obtenus dans la région de Yamoussoukro sur la période de 1980-2000 sont consignés dans le tableau 1.

**Tableau 1 :** Bilan hydrologique de la région de Yamoussoukro (1975-2001)

<b>P (mm)</b>	<b>ETP (mm)</b>	<b>ETR (mm)</b>	<b>R (mm)</b>	<b>I (mm)</b>
1137,21	1511,56	852,66	214,56	69,986

L'analyse du tableau 1 montre que la région de Yamoussoukro reçoit en moyenne 1137 mm de pluie chaque année et l'évapotranspiration potentielle (ETP) interannuelle est de 1511 mm. La quantité d'eau ruisselée est dans l'ordre de 215 mm, soit 18,87% de la lame d'eau précipitée et la valeur de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui constitue la frange d'eau qui retourne dans l'atmosphère sous forme de vapeur est de 853 mm, soit près de 74,98% de la lame d'eau précipitée. La lame d'eau infiltrée est dans l'ordre de 70 mm soit 6,15% de la lame d'eau précipitée.

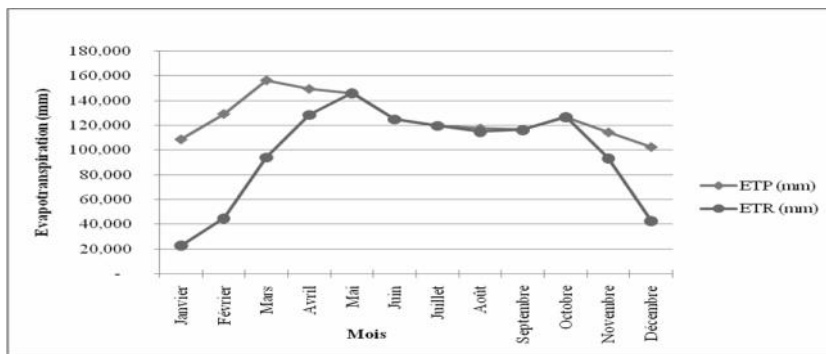
### **Analyse de la variation des saisons climatiques**

L'analyse de l'évolution simultanée de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR) montre quatre phases (Figure 4):

- d'octobre à mai : l'ETP est au-dessus de l'ETR ;
- de mai à juillet : l'ETR est confondue à l'ETP ;

- de juillet à septembre : l'ETP est au-dessus de l'ETR ;
- de septembre à octobre : l'ETR est confondue à l'ETP.

Les périodes au cours desquelles, l'ETP est au-dessus de l'ETR correspondent à des périodes sèches et les périodes au cours desquelles, l'ETR est confondue à l'ETP, correspondent à des périodes humides. On dénombre respectivement sept mois pour le premier cas (périodes sèches) et cinq mois pour le deuxième cas.



**Figure 4:** Evolution de l'ETP et de l'ETR dans la région de Yamoussoukro (1975-2001)

## DISCUSSION

Les résultats obtenus montrent que la période précédant l'année 1992 est caractérisée par une succession de périodes sèches persistantes. Cependant, la période après 1992 est caractérisée par une certaine reprise pluviométrique et les successions d'années sèches sont remplacées par des années normales et humides. Les résultats de la variabilité climatique obtenus dans la région de Yamoussoukro 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). 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 pluviogènes en particulier, d'où la faiblesse des hauteurs pluviométriques annuelles. Dans les régions tropicales forestières où les surfaces forestières sont très étendues et sensibles aux états de surface, et dont l'humidité atmosphérique a une origine continentale marquée (Fontaine et Janicot, 1993 in Kouassi et al., 2010), l'augmentation des surfaces sèches doit provoquer une hausse des températures de l'air par transfert de chaleur. La

diminution de la couverture forestière, qui absorbe naturellement du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère, va contribuer à augmenter la teneur atmosphérique de ce gaz à effet de serre (Sultan et al., 2001 in Kouassi et al., 2010).

Dans la région de Yamoussoukro, les résultats du bilan hydrologique montre que la détermination de l'ETR par la méthode de Coutagne, l'évaluation du ruissellement par la méthode de Tixeront-Berkaloff a été une approche efficace. Les résultats montrent que l'essentiel des eaux précipitées retourne à l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration (75%). L'estimation du ruissellement qui est un vecteur de déplacement des polluants (ordures sur le sol, carburant sur les routes et dans les stations-service, produits phytosanitaires sur les périmètres d'agriculture péri-urbaine, etc.) des quartiers jusqu'aux différents lacs, donne une valeur moyenne de l'ordre de 215 mm, soit 19% des précipitations. Avec un bassin versant du système lacustre d'une superficie de 56,28 Km<sup>2</sup>, le volume d'eau ruisselé mobilisé peut être estimé à 12 075 437 m<sup>3</sup>. La quantité d'eau susceptible de s'infiltrer pour recharger les aquifères est de 70 mm soit 6,15% des précipitations. La recharge exprimée en volume est égale à 3 938 812 m<sup>3</sup>. Des études similaires ont été réalisées en Côte d'Ivoire par l'approche du bilan hydrologique selon Thornthwaite. Les plus récentes de ces études concernent la région d'Odienné (Savané, 1997), l'Ouest montagneux (Man et Danané) (Kouamé, 1999) et l'ex-région du N'zi-Comoé (Kouassi et al., 2012b). Les résultats de ces travaux, ont donné 77 mm à Odienné (5%), 105 dans l'ex-région du N'zi-Comoé (9,15%) et 168 mm à Danané (8%). La valeur de recharge obtenue dans la région de Yamoussoukro s'inscrit dans un intervalle de pourcentage raisonnable (5% et 9%). La valeur de la recharge, dépendant en plus du contexte géologique, des caractéristiques climatiques de la région, est dans un ordre de grandeur acceptable.

La modification constatée sur les cumuls de hauteurs pluviométriques s'est accompagnée d'une modification de la durée des saisons pluvieuses. En effet, le début des saisons de pluie a accusé un retard dont la durée reste variable d'une région à l'autre et une fin précoce. Une tendance au raccourcissement des saisons des pluies est donc mise en évidence dans la région de Yamoussoukro. Adejuwon et al. (1990) cités par Ouedraogo et al. (2001), décrivent aussi un retard dans le début des saisons de pluie et un arrêt précoce de la saison des pluies à partir de l'étude de quelques stations réparties sur différentes zones climatiques du Nigeria (Ouedraogo, 2001). Selon les travaux de Servat et al. (1998) en Afrique de l'Ouest et Centrale, les changements que l'on peut observer ne sont pas très nets: la saison des pluies aurait tendance à durer moins longtemps qu'auparavant. Pour les quelques pays riverains du Golfe de Guinée et qui connaissent un régime à deux saisons des pluies, les résultats sont là encore flous. Une tendance au raccourcissement des saisons des pluies semble quand même se dégager. Plus précisément, en Côte d'Ivoire, la seconde saison des pluies a une durée plus courte qu'auparavant, la première saison des pluies

connaît la même tendance, mais de manière moins importante ; au Togo comme au Bénin, le raccourcissement de la durée touche surtout la première saison des pluies; au Cameroun, c'est l'inverse. Les dates d'occurrence de ces phénomènes sont très différentes d'un pays à l'autre, d'un poste à l'autre. Selon Kouassi et al. (2012), le bassin-versant du N'zi-Bandama connaît une modification de la durée des saisons pluvieuses quelle que soit la zone climatique. Cependant, les régimes pluviométriques saisonniers définissant les régimes climatiques n'ont pas changé. En effet, la partie nord connaît toujours une seule saison pluvieuse et une seule saison sèche. Les parties centre et sud connaissent à leur niveau deux (2) saisons des pluies et deux (2) saisons sèches. L'approche utilisée dans le cadre de cette étude pour analyser la variation des saisons pluvieuses est parvenue aux mêmes conclusions que celles des travaux antérieurs (Houndenou et Hernandez, 1998; Ouédraogo, 2001; Servat et al., 1998; Kouassi et al., 2012a).

## CONCLUSION

Les résultats de cette étude ont permis de caractériser les principales manifestations de la variabilité climatique (1975-2009) observée depuis plus de trois décennies au niveau de la région de Yamoussoukro. Il ressort de l'étude que des conditions prolongées de déficits pluviométriques ont été mises en évidence avant 1992. L'après 1992, se caractérise par une reprise des précipitations sans pour autant atteindre les hauteurs pluviométriques d'avant 1970. La variabilité climatique se manifeste par une croissance monotone des températures de l'air. Le bilan hydrologique montre que la région de Yamoussoukro reçoit en moyenne 1137 mm de pluie chaque année et l'évapotranspiration potentielle (ETP) interannuelle est de 1511 mm. La valeur de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui constitue la frange d'eau qui retourne dans l'atmosphère sous forme de vapeur est de 853 mm, soit près de 74,98% de la lame d'eau précipitée. La lame d'eau infiltrée est dans l'ordre de 70 mm, soit 6,15% de la lame d'eau précipitée. La quantité d'eau ruisselée est dans l'ordre de 215 mm, soit 18,87% de la lame d'eau précipitée. La modification constatée sur les cumuls de hauteurs pluviométriques s'est accompagnée d'une modification de la durée des saisons pluvieuses. Une tendance au raccourcissement des saisons des pluies est donc mise en évidence dans la région de Yamoussoukro



## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- AHOUSSE K.E. (2008). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 270p.
- ALASSANE A. (2004). Etude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin): identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Thèse de Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 145p.
- ARDOIN B.S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 330p.
- 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. *IAHS Publication*, Vol. 278, 223-228.
- 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. *AISH Publication*, Vol. 296, 194-202.
- 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*, Vol.16 (1), 5-13.
- BNETD (Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement) (1997). Plan directeur d'urbanisme de la ville de Yamoussoukro. Rapport technique, 90p.
- BROU Y.T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, 212 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 Côte d'Ivoire. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 3 (2), www.ijser.org.
- GOULA B.T.A., SAVANE I., KONAN B., FADIKA V., KOUADIO G.B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'zo et N'zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*, Vol. 1, 1-12.

- HOUNDENOU C., HERNANDEZ K. (1998). Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au Nord-Ouest du Bénin (Afrique occidentale). *Sécheresse*, Vol. 9 (1), 23-34.
- HOUMED-GABA A. (2009). Hydrogéologie des milieux volcaniques sous climat aride. Caractérisation sur site expérimental et modélisation numérique de l'aquifère basaltique de Djibouti (corne de l'Afrique). Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 194 p.
- KOUAME K.F. (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région sémi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports des données des images satellitaires et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 200p.
- KOUASSI A.M., AHOUSSE K.E., YAO K.A., OUREGA W.E.J.A. YAO K.S.B., BIEMI J. (2012a). Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, Vol. 10, 57-74.
- KOUASSI A.M., N'GUESSAN B.T.M., KOUAME K.F., KOUAME K.A., OKAINGNI J.C., BIEMI J. (2012a). 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 de l'Académie des Sciences, Geoscience*, Tome 344, 288-296.
- 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 des Sciences et Technologie*, Vol. 11, 207-229.
- KOUASSI A.M., KOUAME K.F., SALEY M.B., YAO B.K. (2007). Identification de tendances dans la relation pluie-débit et recharge des aquifères dans un contexte de variabilité hydroclimatique: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 16 (3), 412-427.
- KOUASSI A.M., KOUAMÉ K.F., YAO K.B., DJE K.B., PATUREL J.E., OULARÉ 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 (Cybergeó)*, <http://cybergeó.revues.org/index23388.html>.
- LALLAHEM S. (2002). Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de paris. Thèse de Doctorat, Université de Lille, France, 243p.

- LUBÈS-NIEL H., MASSON J.M., PATUREL J.E., SERVAT E. (1998). Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 3, 383-408.
- MAHÉ G., PATUREL J.E., SERVAT E., CONWAY D., DEZETTER A. (2005). The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina Faso. *Journal of Hydrology*, Vol. 300, 33-43.
- MAHÉ G., L'HÔTE Y., OLIVRY J.C., WOTLING G. (2001). Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa – 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 46 (2), 211-226.
- N'GUESSAN K. A., KONAN K. F., BONY K. Y., EDIA O. E., GNAGNE T., TRAORE S., HOUEYOU P.V. (2011). Prospects for rehabilitation of man-made lake system of Yamoussoukro (Ivory Coast). *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 9, 140-147.
- OUEDRAOGO M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 257p.
- PATUREL J.E., SERVAT E., DELATTRE M.O. (1998). Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 43 (3), 937-945.
- PATUREL J. E., OUEDRAOGO M., SERVAT E., MAHÉ G., DEZETTER A., BOYER J.F. (2003). The concept of hydropluviometric normal in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 48 (1), 125-137.
- SAVANE I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest) de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelle, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 396 p.
- SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., TRAVAGLIO M., OUEDRAOGO M., BOYER J. F., LUBES-NIEL H., FRITSCH J.M., MASSON J.M., MARIEU B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. *IAHS Publication*, Vol. 252, 323-337.
- TANO F. (2005). Evaluation des facteurs de risques consécutifs à l'usage des intrants et des eaux usées dans le système de production intensif des cultures maraîchères dans la ville de Yamoussoukro. Mémoire DESS, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, 67p.

TROLLE D., HAMILTON D. P., PILDITCH C. A., DUGGAN I. C. et JEPPESEN E. (2010). Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: Implications for lake restoration and management. *Environmental Modelling & Software*, 26, (4), 354-370.