

## Relation entre couvert végétal et les termes du bilan hydrologique dans le bassin versant forestier de la Hana au sud-ouest de la Côte d'Ivoire

### [ Relationship between plant cover and the terms of the hydrological balance in the forest watershed of Hana in the south-west of Côte d'Ivoire ]

Siaka Bakayoko<sup>1</sup>, Ismaïla Ouattara<sup>2</sup>, Amidou Dao<sup>1</sup>, Seydou Diallo<sup>1</sup>, and Bamory Kamagaté<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Géosciences et Environnement (LGE), UFR Sciences et Gestion de L'environnement (SGE), Université Nangui Abrogoua (UNA), 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>UFR des Sciences Géologiques et Minières (UFR-SGM), Université de Man, BP 20 Man, Côte d'Ivoire

Copyright © 2020 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** This study aims to understand the influence of vegetation cover on the hydrological response of the Hana forest watershed. Using the GR2M hydrological model, hydroclimatic data over the 2000-2018 period were simulated to obtain real evapotranspiration (ETR), infiltration (I), and runoff (R). These different water balance terms were then correlated with a time series of NDVI extracted from MODIS-Terra (MOD13Q1) images over the period 2000-2018. The calibration of the hydrological model over the periods 1984-1989 and 2000-2018, respectively gave good Nash values of 74.1% and 64.6%. The validation, on the whole, gives satisfactory Nash values, except for the 1990-1999 one which is 56.4%. Cusum and t-student tests confirmed a significant break at  $\alpha=5\%$  in 2009 in the NDVI time series. Statistical analysis around this break date reveals a good correlation between NDVI and rainfall on the one hand and between NDVI and real evapotranspiration on the other hand, with respective correlation coefficients of 0.68, 0.66 for the sub-period 2000-2009. The relationship between NDVI and runoff is relatively weak there with a value of 0.38. Very high correlation coefficient values were obtained over the period 2010-2018 between NDVI and rainfall (0.78), between NDVI and real evapotranspiration (0.72) and between NDVI and runoff (0.68). However, low correlation coefficients of the order of 0.53 and -0.07 were recorded between the NDVI and infiltration respectively before and after 2009.

**KEYWORDS:** Water balance, NDVI, Taï National Park, Hana basin.

**RESUME:** Cette étude vise à comprendre l'influence du couvert végétal sur la réponse hydrologique du bassin versant forestier de la Hana. À l'aide du modèle hydrologique GR2M, les données hydroclimatiques sur la période 2000-2018, ont été simulées pour obtenir l'évapotranspiration réelle (ETR), l'infiltration (I), et le ruissellement (R). Ces différents termes du bilan hydrologique ont été ensuite mis en corrélation avec une série temporelle de NDVI extraite des images MODIS-Terra (MOD13Q1) sur la période 2000-2018. Le calage du modèle hydrologique sur les périodes 1984-1989 et 2000-2018, a respectivement donné de bonnes valeurs de Nash de 74,1% et 64,6 %. La validation, dans l'ensemble donne de valeurs satisfaisantes de Nash, exceptée de celle de 1990-1999 qui est de 56,4%. Les tests de Cusum et de t-student ont confirmé une rupture significative à  $\alpha=5\%$  en 2009 dans la série temporelle de NDVI. L'analyse statistique autour de cette date de rupture révèle sur la sous période 2000-2009, une bonne corrélation entre le NDVI et la pluie d'une part et entre le NDVI et l'évapotranspiration réelle d'autre part, avec des coefficients de corrélation respectifs de 0,68, 0,66. La relation entre NDVI et écoulement y est relativement faible avec une valeur de 0,38. De très fortes valeurs de coefficient de corrélation ont été obtenues sur la période 2010-2018 entre le NDVI et la pluie (0,78) entre le NDVI et l'évapotranspiration réelle (0,72) et entre le NDVI et l'écoulement (0,68). Cependant, de faibles coefficients de corrélation de l'ordre de 0,53 et -0,07 ont été enregistré entre le NDVI et l'infiltration respectivement avant et après 2009.

**MOTS-CLEFS:** Bilan hydrologique, NDVI, Parc National de Taï, bassin Hana.

## 1 INTRODUCTION

En Côte d'Ivoire, le choix d'un développement basé sur l'agriculture, au lendemain de son indépendance a eu pour conséquence la perte de l'essentiel de ses ressources forestières en l'espace de trois décennies. En effet, les surfaces forestières du pays sont passées de 7,85 millions d'hectares en 1986 à 5,09 millions d'hectares en 2000, puis à 3,6 millions d'hectares en 2015 (SEP-REDD+ et FAO, 2017). Ces modifications, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, affectant la couverture végétale, ont une influence plus ou moins directe sur la relation existant entre les précipitations et les écoulements de surface (Vissin, 2007, Rim, 2013). La nature de la couverture végétale intervient en effet, sur l'intensité des cinq processus fondamentaux dans le cycle de l'eau à la surface: interception, évaporation directe après interception, infiltration dans le sol, évapotranspiration et écoulement de surface (Grégoire *et al.*, 1990). Selon Paturel *et al.* (2006), ce recul de la forêt couplé à la variabilité climatique constatée ces dernières décennies en Afrique de l'Ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire, ont eu pour conséquence la baisse de la pluviométrie et de l'écoulement. Dès lors, connaître le comportement hydrologique d'un bassin versant devient une priorité dans la gestion des ressources en eau.

Le bassin versant de la Hana, notre zone d'intérêt est le principal cours d'eau du massif forestier protégé du parc national de Taï. Ce parc fait partie des aires protégées de l'Afrique de l'ouest et constitue le fer de lance de la politique de conservation des écosystèmes forestiers de la Côte d'Ivoire. Des menaces objectives pèsent sur cet écosystème nonobstant son état exceptionnel de conservation. En effet, la fonction de régulateur climatique de cette aire permet à la région du Sud-ouest de la Côte d'Ivoire d'être le pool agricole, en matière de productions pérennes, à savoir: le cacao, le palmier à huile, l'hévéa et le cocotier. Ainsi, cette situation engendre-t-elle l'attractivité du parc du Taï et une démographie galopante dans la région (Coulibaly, 2018). Outre, ces empiètements agricoles, on note aussi le braconnage et surtout l'orpaillage artisanal pratiqué le long de la rivière Hana (OIPR, 2015). Il est question dans la présente étude de montrer l'influence de la dynamique de la végétation sur les paramètres du bilan hydrologique du bassin versant de la Hana. Pour ce faire, cette étude se propose d'établir une relation entre une série temporelle des termes du bilan hydrologique et d'indices de végétation normalisé (NDVI) issus d'images MODIS (MOD13Q1).

## 2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant de la Hana est un sous bassin du fleuve Cavally. Il est situé au Sud-ouest de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°08' et 6°24' Nord et les longitudes 6°47' et 7°25' Ouest (figure 1). Les deux tiers du bassin sont inscrits dans le parc national de Taï. Il constitue ainsi, avec ses affluents Méno et Moumo, le principal cours d'eau du parc national de Taï. Toutes ces rivières ont une orientation générale Nord-est/Sud-ouest et se jettent dans le fleuve Cavally à Niébé. Le bassin versant de la Hana a une superficie de 4210 km<sup>2</sup> avec un périmètre de 442 km dont la longueur et la largeur équivalentes mesurent respectivement 199,9 m et 21,05 m.

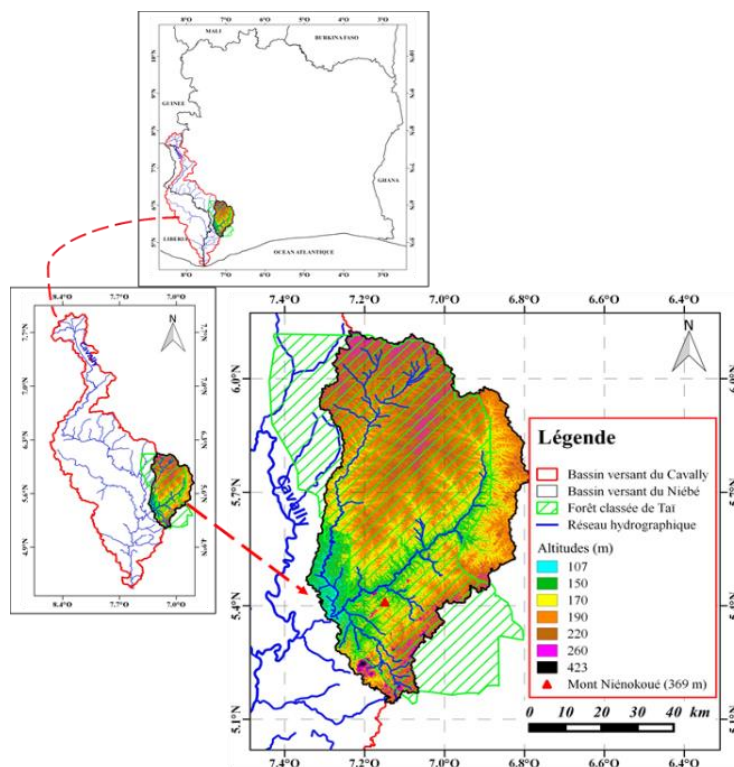


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

Le climat est de type subéquatorial, chaud et humide, caractérisé par une pluviométrie moyenne mensuelle supérieure à 250 mm (figure 2). Les précipitations annuelles sur le bassin du Cavally avoisinent, ou même dépassent, 2000 mm. Les précipitations sont réparties en quatre saisons: Avénard J.M. (1971).

- Grande saison des pluies: mars – avril – mai – juin;
- Petite saison sèche: juillet – août;
- Petite saison des pluies: septembre – octobre - novembre
- Grande saison sèche: décembre à février.

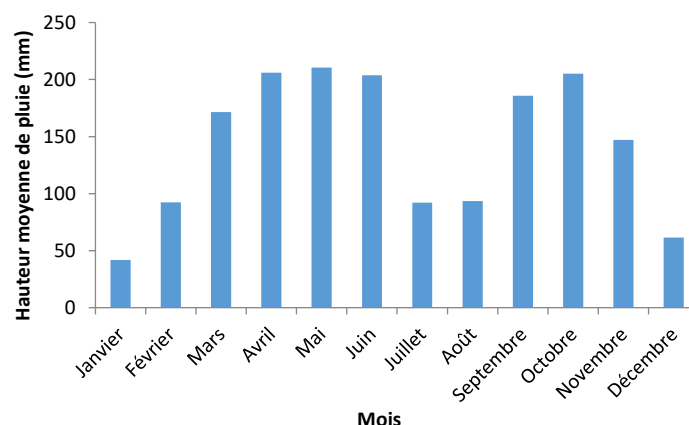


Fig. 2. Régime pluviométrique du bassin versant de la Hana à Niébé (1983-1999)

Ces conditions éco-climatiques (précipitation supérieure à 1600 mm, saisons sèches inférieures à 4 mois) placent le bassin versant dans le secteur ombrophile du domaine guinéen caractérisé par la forêt dense humide sempervirente. Au regard de son importance et de sa situation géographique, cette aire est victime d'intenses pressions anthropiques. Parmi celles-ci, l'agriculture se positionne en pôle position avec le développement des cultures pérennes, à savoir: le cacao, le café, l'hévéa, le coco et le palmier à huile. De plus, la crise post-électorale survenue de décembre 2010 à avril 2011 en Côte d'Ivoire a exacerbé les pressions sur le Parc national de Taï (Coulibaly, 2018). Ainsi, le braconnage s'est intensifié, les défrichements à des fins agricoles se sont étendus et de nouveaux sites d'orpaillage ont fait leur apparition. La population des villages autour du PNT est estimée à 458 439 habitants en 2013 (PAG, 2015).

### 3 MATERIEL ET METHODES

#### 3.1 DONNEES DE L'ETUDE

##### 3.1.1 DONNEES CLIMATIQUES

Les données climatiques sont composées de données satellitaires et de données observées au sol. Les données satellitaires sont journalières et sont issues de la base de données du projet Prediction of Worldwide Energy Resource (NASA POWER) de la National Aeronautics and Space Administration<sup>1</sup>. Les données climatiques au sol sont journalières et mensuelles et ont été fournies par la SODEXAM (Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM)). Il s'agit des hauteurs de pluies, de l'humidité relative, de la vitesse du vent, du rayonnement solaire et des températures minimales et maximales. Les données satellitaires ont été choisies car la région souffre d'un manque de données climatiques *in situ* dû à l'insuffisance des postes de mesures.

<sup>1</sup> <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

### 3.1.2 DONNEES HYDROMETRIQUES

Les données hydrométriques utilisées proviennent de la Direction des Normes, de l'Hydrologie, de la Réglementation et de la Qualité (DNHRQ), structure sous tutelle de la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH). Ces données concernent les débits journaliers de la seule et unique station hydrométrique de Niébé. Elles couvrent la période de 1970 à 2018 et comportent des lacunes qui ont été comblées.

### 3.1.3 DONNEES DE NDVI

Les données satellitaires de l'étude sont des indices normalisés de végétation (NDVI) issus de la série d'images Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra (MOD13Q1) de 250 m de résolution sur la période février 2000 à décembre 2018. L'intérêt de ces images est qu'elles sont des synthèses de 16 jours. Cela signifie que les données journalières dans un intervalle de 16 jours, ont été analysées afin de ne retenir qu'une seule valeur (la moins bruitée) pour chaque pixel individuellement. De plus, la résolution de 250 m efface les microstructures parcellaires mais révèle les structures locales à micro-régionales. Il s'agit, à l'heure actuelle, en terme de série temporelle de NDVI de la plus haute résolution spatiale (Andrieu, 2018).

## 3.2 METHODOLOGIE

### 3.2.1 CORRECTION DE BIAIS DES DONNEES DE PLUIES SATELLITAIRES

Dans ce travail, des corrections de biais ont été appliquées aux données de pluies satellitaires selon les équations 1 et 2 proposées par Shrestha (2015).

$$P_{cor,m,d} = P_{sat,m,d} \times [\mu\{P_{obs,m}\}/\mu\{P_{sat,m}\}] \quad (1)$$

$$P_{cor,m,d} = P_{sat,m,d} + \mu(P_{obs,m}) - \mu(P_{sat,m}) \quad (2)$$

où  $P_{cor,m,d}$  sont les précipitations corrigées du jour du mois, et  $P_{sat,m,d}$  sont les précipitations satellites du jour du mois.  $\mu$  (.) représente l'opérateur d'espérance (par exemple,  $\mu P_{obs,m}$  représente la valeur moyenne des précipitations observées au mois m donné).

La première équation est multiplicative et s'applique aux valeurs de pluie positives, mais elle est incapable de corriger un éventuel biais sur les valeurs de pluie satellite nulles. Pour pallier à cette insuffisance Brochart et Andréassian (2014) proposent une correction additive selon l'équation 2 quand la pluie satellite est nulle.

### 3.2.2 COMPLEMENT DES DONNEES DE DEBITS

L'utilisation des données de débits à l'état brute sans traitement est une source d'erreur. Donc, des compléments ont été effectués par la méthode du critère de proportionnalité analogue. Les valeurs manquantes à la station de Niébé (4210 km<sup>2</sup>) ont été comblées par les valeurs de la station de Sahibly (4670 km<sup>2</sup>) selon les rapports ci-dessous.

$$\frac{Q_{Niébé}}{S_{Niébé}} = \frac{Q_{Sahibly}}{S_{Sahibly}} \quad (3)$$

$$Q_{Niébé} = 0,9 Q_{Sahibly} \quad (4)$$

En régime tropical, les débits d'étiage sont très faibles, voire nuls, et peuvent être remplacés, très souvent, par les moyennes interannuelles sans avoir recours à des corrélations mensuelles ou aux débits journaliers (Ardoin, 2004). Cette méthode a été utilisée en complément de la première.

### 3.2.3 TESTS DE DÉTECTION DE RUPTURE DANS LES SÉRIES TEMPORELLES DE NDVI

#### 3.2.3.1 TEST DE CUSUM

Le test de Cusum permet de vérifier la stationnarité des séries temporelles d'NDVI. Cette méthode consiste à diviser en deux échantillons chaque série étudiée avant d'examiner si les moyennes dans deux échantillons de la série de données sont différentes. C'est un test non paramétrique suivant les données d'une série chronologique ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ). Le test statistique est défini comme suit:

$$V_k = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(x_i - x_{\text{médian}}) \quad (5)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{pour } x > 0 \\ 0 & \text{pour } x = 0 \\ -1 & \text{pour } x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$x_{\text{médian}}$  est la valeur médiane de l'ensemble de la série de données. La distribution de  $V_k$  suit la loi de Kolmogorov-Smirnov à deux échantillons ( $K_s = (2/n) \max |V_k|$ ) avec la valeur seuil du maximum  $|V_k|$  donnée par:

$$a = \begin{cases} 0,1 & 1,22\sqrt{n} \\ 0,05 & 1,36\sqrt{n} \\ 0,01 & 1,63\sqrt{n} \end{cases} \quad (7)$$

Une valeur négative de  $V_k$  indique que la dernière partie de la chronique a une moyenne plus élevée que la partie précédente et vice versa.

### 3.2.3.2 TEST DE T-STUDENT

Ce test vient en appoint au test de Cusum qui est un test de détection de rupture. Il est utilisé dans le cadre d'une étude de stationnarité lorsque la date de rupture présumée est connue.

Dans ce cas, il divise et compare la série en deux sous-échantillons (de part et d'autre de cette date). Le test suppose aussi que les données sont normalement distribuées. La formule statistique de t-Student est la suivante:

$$t = \frac{(\bar{X} - \bar{Y})}{S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} \quad (8)$$

Où  $\bar{X}$  et  $\bar{Y}$  sont les moyennes de la première et de la seconde période;  $m$  et  $n$  sont les nombres d'observations respectifs de ces périodes et  $S$  est l'écart type de l'échantillon.

### 3.2.4 FONCTIONNEMENT DU MODELE GR2M ET EVALUATION DES PARAMETRES DU BILAN HYDROLOGIQUE

Le but de l'utilisation du modèle GR2M dans cette étude est de faire la répartition des lames d'eau précipitées entre les différents termes du cycle hydrologique. Le choix d'estimer le bilan hydrologique à partir des données modélisées repose sur la capacité du modèle à reproduire l'évapotranspiration réelle (ETR) à partir des données d'entrée du modèle. C'est la méthode la plus utilisée (Dieng *et al.*, 1991). Ce modèle est connu pour sa performance et sa robustesse.

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

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuels) est un modèle conceptuel pluie-débit comportant deux réservoirs régulés par deux paramètres ajustables (Mouelhi, 2003). Ce modèle a été mis en place par le Cemagref (Makhlouf *et al.*, 1994; Lavabre *et al.*, 1993)<sup>2</sup>.

#### 3.2.4.2 PREPARATION DES DONNEES D'ENTREE DU MODELE GR2M

Les données d'entrée du modèle GR2M sont les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et les lames d'eau. Etant donné que les paramètres du modèle sont très sensibles aux variations de ces données, leur qualité et leur utilisation dans le modèle requiert des traitements appropriés. C'est dans ce sens que les méthodes des polygones de Thiessen et de Penman-Monteith ont été respectivement appliquées pour le calcul des précipitations moyennes et des évapotranspirations potentielles (ETP). Les différentes valeurs d'ETP sont ensuite converties en valeurs moyennes mensuelles étant donné qu'elles sont journalières.

#### 3.2.4.3 CALAGE ET VALIDATION DU MODELE: CRITERE D'OPTIMISATION DES PARAMETRES

Cette étape consiste à ajuster les paramètres du modèle de sorte qu'il y ait une adéquation entre les débits observés et simulés. Le critère le plus utilisé pour juger de cette adéquation est celui de Nash. Les paramètres du modèle retenus sont ceux dont la valeur minimise la fonction critère préalablement choisie. Une fois le modèle « calé », l'on utilise les paramètres issus du calage et un autre

---

<sup>2</sup> Plus d'informations sur son fonctionnement sont disponibles à l'adresse: <https://webgr.inrae.fr/modeles/mensuel-gr2m/>

jeu de données expérimentales pour effectuer la validation. Ainsi, la comparaison entre modèle et réalité terrain traduite par la valeur de la fonction critère permet alors de valider ou non le modèle.

Le calage et la validation sont faits sur la période 1984-2018, selon la méthode du « *differential split-sample test* » ou division de l'échantillon. Le principe de ce « *differential split-sample test* » consiste à séparer la période disponible en deux (2) sous périodes indépendantes et présentant un caractère non-stationnaire (caractéristiques climatiques différentes d'une période à l'autre), de caler le modèle sur la première période et de le valider sur la deuxième, puis inversement. L'expression du critère d'évaluation Nash et Sutcliffe (1970) est:

$$\text{NASH} = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{mean}})^2} \right] \quad (9)$$

Avec,  $Q^{\text{mean}}$ , débit moyen observé,  $Q^{\text{sim}}$ , débit calculé,  $Q^{\text{obs}}$ , débit observé, nombre d'observation. Cette formule traduit un certain rendement du modèle comparable au coefficient de détermination d'une régression. Le tableau I fournit les critères d'appréciation de la performance du modèle. On considère, généralement, qu'un modèle hydrologique donne des résultats acceptables, si la valeur du critère de Nash est supérieure à 0.5 (Gaume, 2009).

Tableau 1. Critère d'évaluation des simulations

NASH	EVALUATION DE LA PERFORMANCE
$0,75 < \text{NASH} \leq 1,00$	très bonne
$0,65 < \text{NASH} \leq 0,75$	bonne
$0,5 < \text{NASH} \leq 0,65$	satisfaisante
$\text{NASH} \leq 0,5$	Non satisfaisante

#### 3.2.4.4 EVALUATION DES PARAMETRES DU BILAN HYDROLOGIQUE MENSUEL

Le bilan hydrologique vise à établir le bilan entre les entrées et les sorties en eau d'une unité hydrologique définie pendant une période de temps donnée. Ainsi, il est admis que les précipitations qui tombent dans une région donnée sont partagées entre l'évapotranspiration, l'écoulement de surface et la recharge des nappes souterraines, de sorte que l'équation du bilan hydrologique s'exprime par:

$$P = (R + \text{ETR}) + I + \Delta S \quad (10)$$

Avec P: pluviométrie (mm); ETR: évapotranspiration réelle (mm); I: lame d'eau infiltrée (mm); R: lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin versant (mm);  $\Delta S$ : variation du stock d'eau.

A l'échelle du cycle hydrologique annuel, les variations de stock s'annulent sur un grand bassin (Mahé *et al.*, 1998). La lame d'eau infiltrée (I) est déduite de l'équation 2 selon la formule donnée:

$$I = P - (\text{ETR} + R) \quad (11)$$

Dans le cas de cette étude, la détermination de l'ETR est basée sur la modélisation de la relation pluie-débit par le modèle GR2M qui est un modèle à réservoir et de bilan. Selon Kouakou *et al.* (2016), l'expression de l'ETR, pour un mois considéré, est donnée par la relation suivante:

$$\text{ETR} = S_1 - S_2 \quad (12)$$

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

#### 3.2.5 EXTRACTION DES VALEURS NDVI DES IMAGES MOD13Q1

Les valeurs de NDVI ont été calculées avec la formule NDVI dans ArcGIS10.2 qui est la suivante:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (13)$$

Où NIR est la réflectance dans la bande proche infrarouge et RED la réflectance dans la bande rouge visible. La normalisation par la somme des deux bandes permet de réduire les effets d'éclairement. Le NDVI conserve une valeur constante quel que soit l'éclairement global, contrairement à la simple différence qui est très sensible aux variations d'éclairement. Les valeurs du NDVI sont comprises en théorie entre -1 et +1 (Xingtu *et al.*, 2020).

Pour chaque mois de la période étudiée, nous avons moyenné les deux valeurs bimensuelles du NDVI pour obtenir les valeurs mensuelles de cet indice. Enfin, nous avons moyenné ces valeurs mensuelles pour chaque pixel et pour chaque année de la période étudiée (2000-2018) pour obtenir enfin notre série temporelle de 19 ans.

### 3.2.6 VARIATIONS TEMPORELLES DU NDVI ET DES DIFFERENTS TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE

Une méthode graphique a été utilisée pour étudier les variations temporelles de l'indice de végétation NDVI et des différents termes du bilan hydrologique sur le bassin. Pour chaque année de la série de données, nous reportons sur un même graphique, en abscisse les mois, en ordonnée les valeurs du terme considéré du bilan et en ordonnée secondaire les valeurs de NDVI. Une telle représentation permet une étude comparative de l'évolution des deux paramètres à l'échelle mensuelle (Diello, 2005).

### 3.2.7 CORRELATION ENTRE NDVI ET TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE

La recherche des relations statistiques entre l'indice de végétation et les termes du bilan hydrologique a pour objectif de mieux appréhender l'influence de la voûte forestière (à travers NDVI) sur les termes du bilan hydrologique et aussi inversement, car l'état de la végétation dépend de certains paramètres du bilan hydrologique (la pluie, par exemple).

Le coefficient de corrélation (r) de Bravais-Pearson (Pearson, 1896) a été utilisé à cet effet, entre l'ensemble des données NDVI mensuelles et les différents termes du bilan hydrologiques. La formule de calcul est la suivante:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - m_y)^2}} \quad (14)$$

Avec:

$x_i$  et  $y_i$ : les valeurs des variables X et Y, m les moyennes des deux variables X et Y et n: le nombre d'observation ou la taille de l'échantillon. La force de la corrélation est donnée par la valeur absolue de la corrélation. Le sens de la relation entre les variables est donné par le signe de la corrélation. On note qu'avant 0,33, le coefficient de corrélation est dit « faible », de 0,33 à 0,67, il est moyen, et de 0,67 à 1, il est fort (André, 2014).

## 4 RESULTATS ET DISCUSSION

### 4.1 RESULTATS

#### 4.1.1 DETECTION DE RUPTURE DANS LA SERIE TEMPORELLE DE NDVI

Le test de Cusum appliqué à la série temporelle des NDVI a permis de détecter une rupture de stationnarité en juin 2009 au seuil de significativité de 0,05 permettant ainsi d'identifier deux (2) sous-périodes: une première période allant de janvier 2000 à juin 2009 et une seconde période de juillet 2009 à décembre 2018. Le test de Student, comparant ces deux sous-périodes entre elles montre que la première sous-période est supérieure à la première au seuil de significativité de 0,01. Les valeurs de ces deux tests sont consignées dans le tableau. Cette tendance à la hausse des indices de NDVI est mise en évidence le linéaire NDVI à la figure 3.

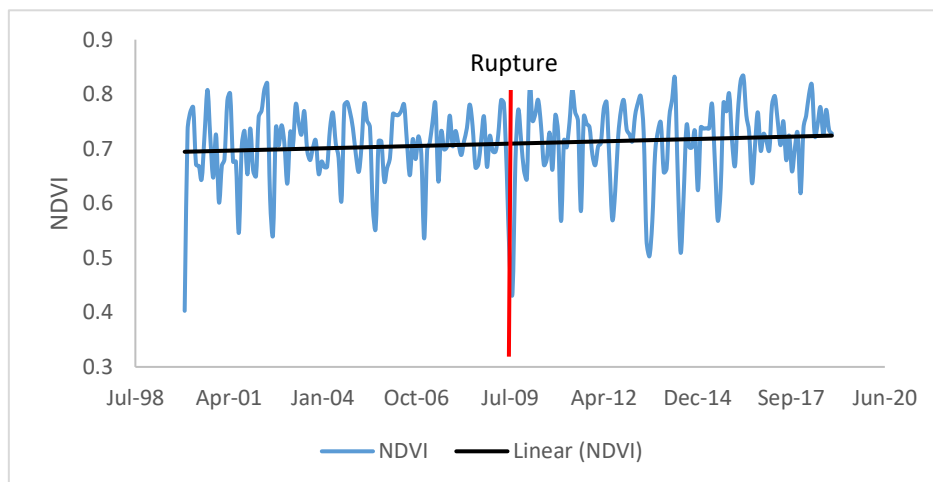


Fig. 3. Variation temporelle des indices de NDVI

Tableau 2. Tests statistiques appliqués à la série temporelle de NDVI

Test de rupture			
Cusum		Student	
Vk (Date de rupture)	Stat ( $\alpha=0,05$ )	t	Stat ( $\alpha=0,05$ )
Juillet 2009	20,54	$-\infty$	2,61

4.1.2 CALAGE ET VALIDATION DU MODELE GR2M

L'identification des périodes optimales de calage et de validation est faite sur la période 1984-2018. Les périodes consignées dans le tableau II sont celles qui ont donné de meilleures performances de simulation des écoulements. Ainsi, on enregistre des valeurs satisfaisantes de Nash de 74,1% et de 64,6% respectivement sur la période 1984-1989 et 2000-2018 pendant les phases de calage. Aussi, les validations issues de chaque calage donnent dans l'ensemble des valeurs de Nash satisfaisantes de 60,8; 70,4 et 65,3 respectivement sur les périodes 2001-2010, 2011-2018 et 1990-2002. Toutefois, celle de la période 1984-1989 fait la fausse note avec une valeur de Nash de 56,4%. Ces résultats numériques sont confirmés par une assez bonne similitude entre hydrogrammes observés et calculés (Figures 4 et 5).

Tableau 3. Résultats numériques du calage et de la validation du modèle GR2M

Longueur de la période de mise en route (1 an)		Sortie du modèle			
Période de calage	Période de validation	Paramètres		Critère d'efficacité	
		x1	x2	NS calage	NS validation
1984_1989	2001-2010				60,8
		7,18	0,69	74,1	
2000_2018	2011-2018				70,4
	1990-1999				56,4
	1990-2002	6,92	0,84	64,6	65,3

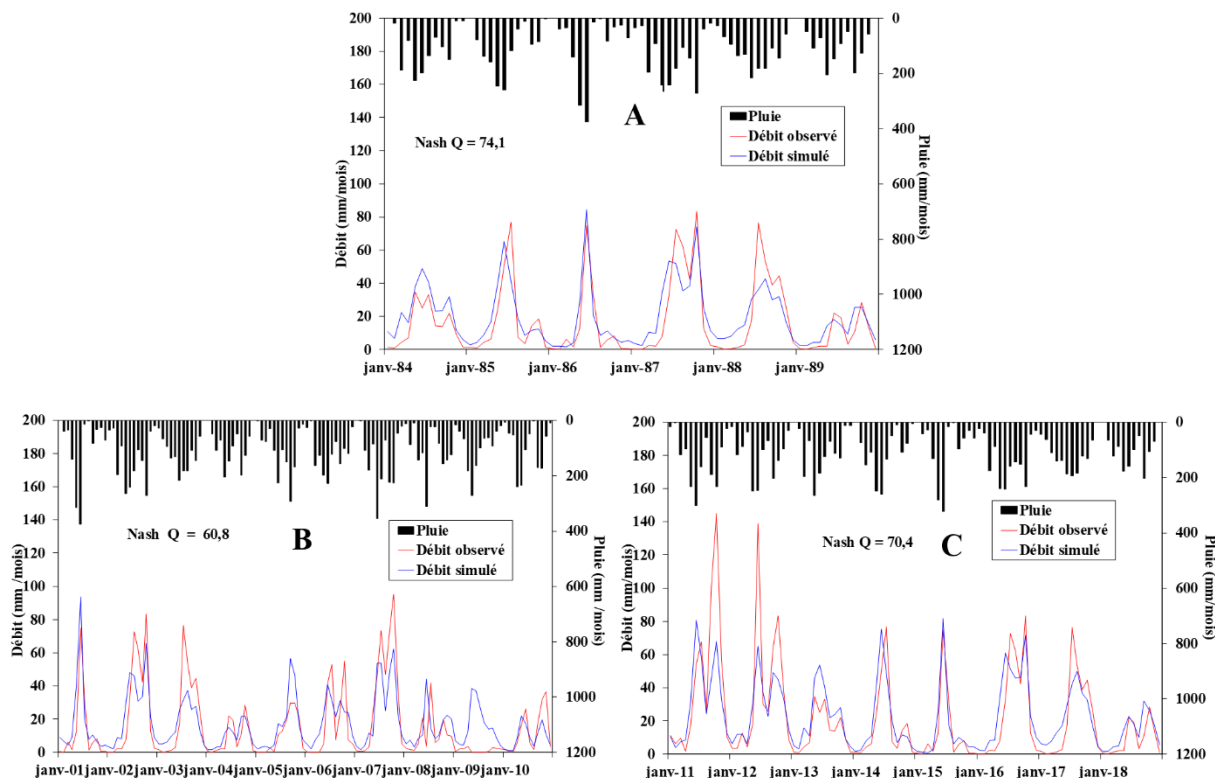




Fig. 4. Calage et validation: A: calage 1984-1989; B: validation 2000-2010; C: 2011-2018

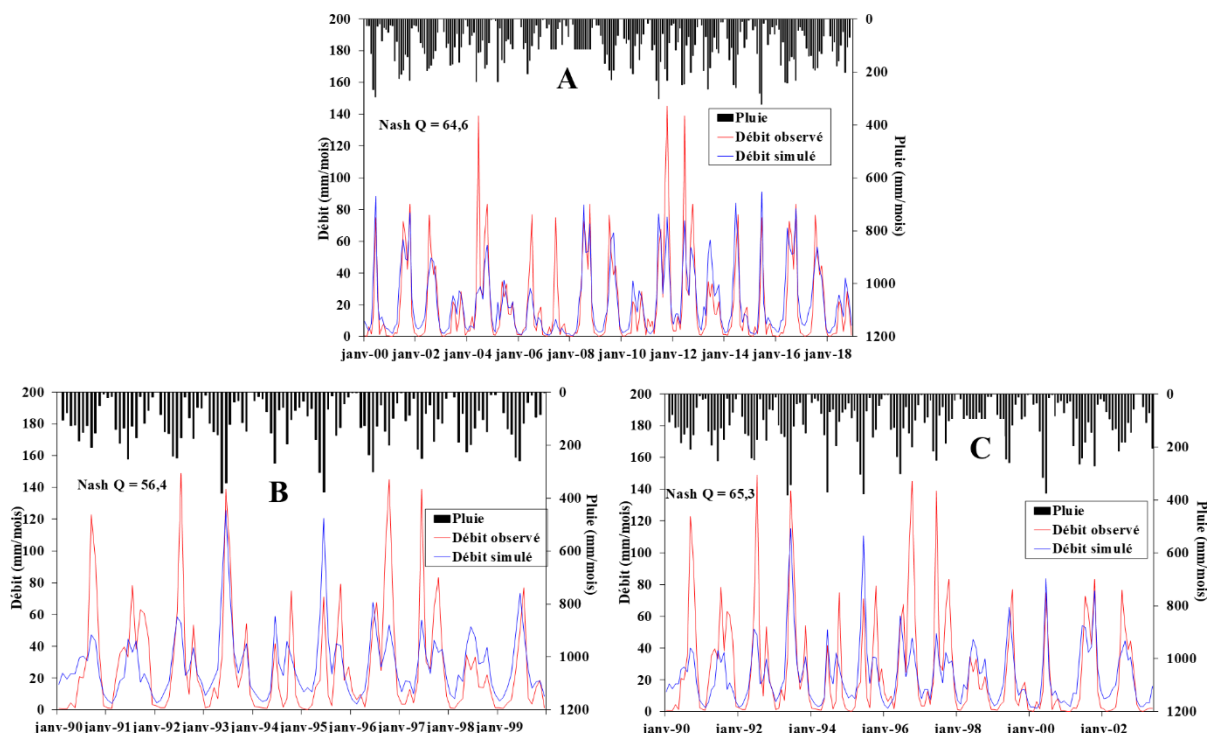


Fig. 5. Calage et validation. A: calage 2000-2018; B: validation 1990-1999; C: validation; 1990-2002

#### 4.1.3 EVALUATION DU BILAN HYDROLOGIQUE A L'ECHELLE MENSUELLE

Le tableau III et la figure 6 présentent les bilans hydrologiques moyens mensuels numériques et graphiques avant et après la période de rupture détectée dans la série temporelle de NDVI. Les lames d'eau infiltrées calculées sont négatives sur 9 mois sur 12 au cours de la période 2000-2009. Il s'agit des mois de juillet, août, septembre, octobre, novembre, décembre, janvier février et mars. Les valeurs positives sont enregistrées au cours des mois d'avril, mai et juin pour la période 2000-2009 (graphe A de la figure 6). Pour la période 2010-2018 (graphe B de la figure 6), tous les mois ont aussi des valeurs d'infiltration négatives, hormis les mois d'avril, mai, juin et de septembre. Sur la période 2000-2009, l'écoulement est plus important que l'évapotranspiration alors que sur la période 2010-2018, c'est le contraire qui est constaté (tableau III). Cependant, l'évapotranspiration reste plus important par rapport à l'écoulement sur presque tous les mois de l'année. Elle domine sur 9 mois (janvier, février, mars, avril, mai, juin, juillet, novembre et décembre) et 7 mois (janvier, février, mars, avril, mai, juin et décembre), respectivement sur les périodes 2000-2009 et 2010-2018.

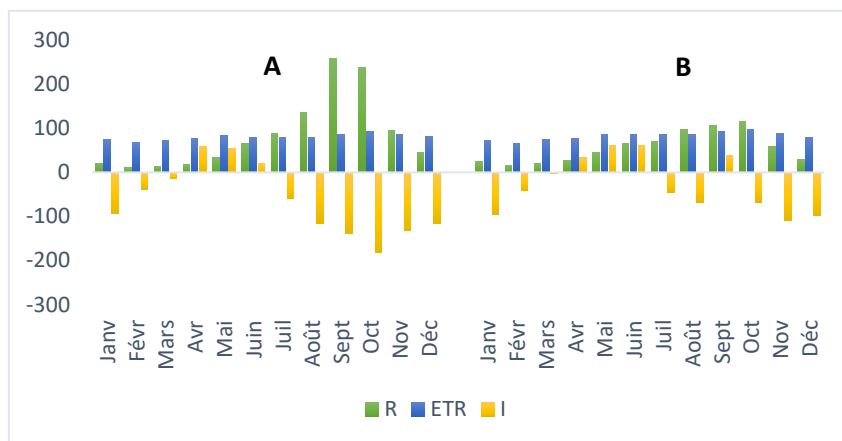


Fig. 6. Représentation graphique du bilan hydrologique moyen mensuel

Tableau 4. Bilan hydrologique mensuel sur les périodes 2000-2009 et 2010-2018

Mois	PERIODE 2000-2009				PERIODE 2010-2018			
	P	R	ETR	I	P	R	ETR	I
Janvier	3,3	21,1	75,7	-93,6	1,2	23,8	73,3	-95,9
Février	39	10	67,2	-38,2	39,9	15,9	65,7	-41,7
Mars	72,6	13,9	73,1	-14,4	92,7	20,1	74,8	-2,2
Avril	153,6	18,1	76	59,6	138,5	28	77,4	33,2
Mai	170,5	33,3	83,2	54	192,6	44,9	85,7	61,9
Juin	163,9	64,6	80	19,3	213,1	65,6	86,4	61,1
Juillet	108,6	88,6	79,9	-59,8	110,7	70,9	85,7	-45,9
Août	99,8	135,5	79,7	-115,4	116,3	97,3	86,6	-67,6
Septembre	206,4	258,8	86	-138,4	237,9	105,7	93,6	38,6
Octobre	147,4	237,6	92,7	-182,9	143,5	114,7	97,4	-68,6
Novembre	49,3	94,9	85,5	-131,2	37,8	58,6	87,5	-108,3
Décembre	10,3	46	80,4	-116,2	10,2	28,3	79,8	-97,9
Moyenne	102,06	85,2	79,95	-63,1	111,2	56,15	82,825	-27,775

P: pluie, R: écoulement, ETR: évapotranspiration réelle, I: infiltration

#### 4.1.4 VARIABILITE MENSUELLE NDVI ET LES TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE

Dans le but de mettre en exergue l'impact de la variabilité mensuelle de l'activité végétale via le NDVI, sur les termes du bilan hydrologique, une représentation graphique dans un même plan a été effectuée autour de la période de rupture.

##### 4.1.4.1 VARIABILITE MENSUELLE DU NDVI ET DE LA PLUIE

Au pas de temps mensuel, l'évolution du NDVI rythme avec celle de la pluviométrie et ce, quelle que soit la sous-période (avant ou après rupture) de la chronique 2000-2018. L'observation du graphe A de la figure 7 montre que le NDVI et la pluie croissent de façon régulière de janvier jusqu'au mois de juin. Ils décroissent ensuite légèrement jusqu'en juin pour la pluie et août pour le NDVI. Ils reprennent ensuite leur ascendance pour atteindre leurs valeurs maximales en septembre pour la pluie et en octobre pour le NDVI. Enfin, à partir de ces mois respectifs, ils diminuent jusqu'au mois de décembre. On note aussi un chevauchement dans leur évolution. Cette valeur maximale reste quasiment constante jusqu'en novembre. Pour le graphe B, le NDVI et la pluie ont une évolution synchrone de janvier à mai où ils atteignent leurs premières valeurs maximales qui restent longuement constante pour le NDVI. Les deux variables fléchissent ensuite ensemble pour atteindre un minimum en août. Il s'en suit une croissance de leur valeur pour atteindre un second pic en septembre. Les valeurs maximales atteintes à ce pic restent constantes jusqu'en novembre pour le NDVI tandis que cette valeur chute pour la pluie depuis septembre. En somme, l'analyse simultanée de la variation du NDVI et de la pluie montre que les mois les plus pluvieux (avril, mai, juin) ont des valeurs de NDVI élevées alors que les mois les moins arrosés (décembre, janvier, février) sont caractérisés par des valeurs de NDVI faibles. Aussi, le NDVI respecte le régime bimodal de la pluie dans cette zone.

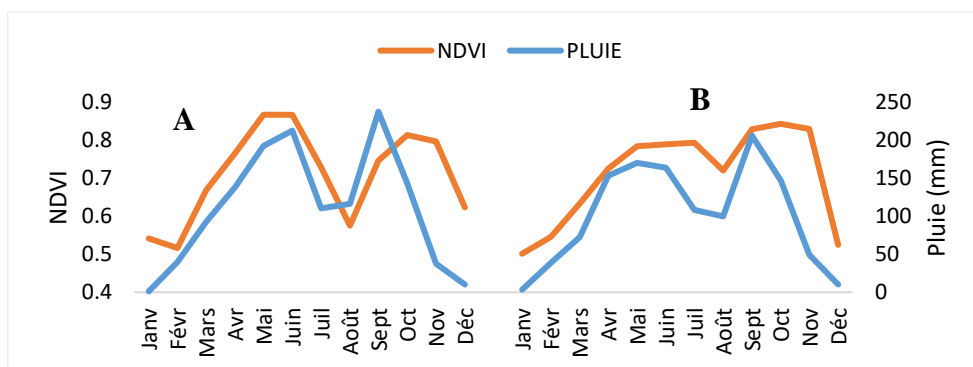


Fig. 7. Variabilité mensuelle du NDVI et de la pluie A) 2000-2009 et B) 2010-2018

4.1.4.2 VARIABILITE MENSUELLE DU NDVI ET DE L'ÉCOULEMENT (R)

Au regard du graphe A de la figure 8, on constate que le NDVI et l'écoulement n'évoluent pas de la même façon. Cela est bien mis en évidence pendant les mois d'août, juin et juillet où l'écoulement augmente alors que le NDVI diminue. Cependant, le graphe B montre que pendant les mois à fort écoulement fort, correspondent des valeurs élevées de NDVI et cela est bien perceptible à partir du mois d'août.

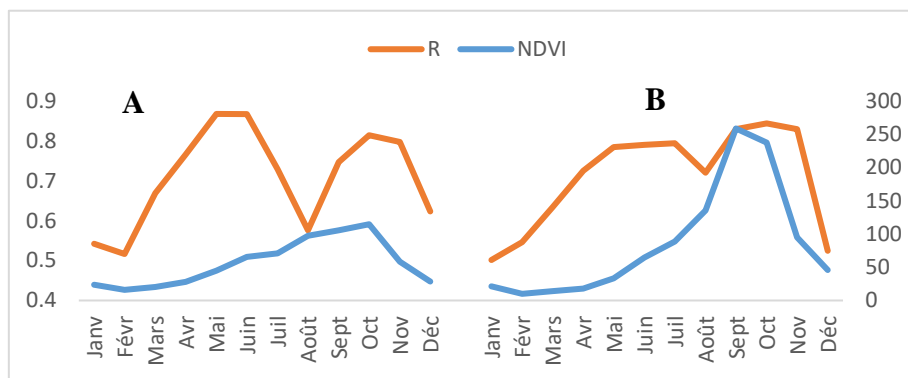


Fig. 8. Variabilité mensuelle du NDVI et de l'écoulement A) 2000-2009 et B) 2010-2018

4.1.4.3 VARIABILITE MENSUELLE DU NDVI ET DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION (ETR)

L'observation de la figure 9 montre que l'évapotranspiration (ETR) et le NDVI n'évoluent pas tout à fait selon la même cadence. La bimodalité n'est pas observé au niveau de l'ETR, surtout sur le graphe A. Sur le graphe B, l'évolution de l'ETR suit à peu près celui du NDVI. Les mois de forte évapotranspiration ont des valeurs de NDVI élevées et les mois à faible évapotranspiration ont des NDVI faibles.

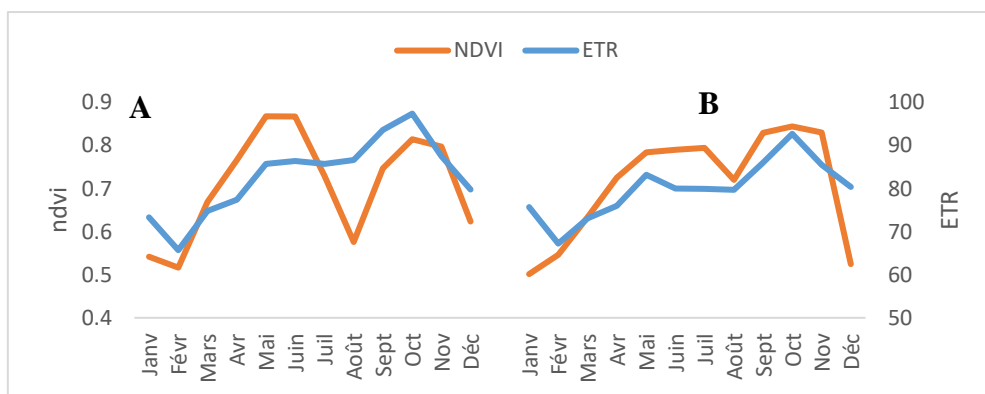


Fig. 9. Variabilité mensuelle du NDVI et de l'évapotranspiration (ETR) A) 2000-2009 et B) 2010-2018

4.1.4.4 VARIABILITE MENSUELLE DU NDVI ET DE L'INFILTRATION OU RECHARGE (I)

L'évolution de l'infiltration n'est pas exactement analogue à celle du NDVI, au regard du graphe A de la figure 10. Leur évolution semble être opposée.

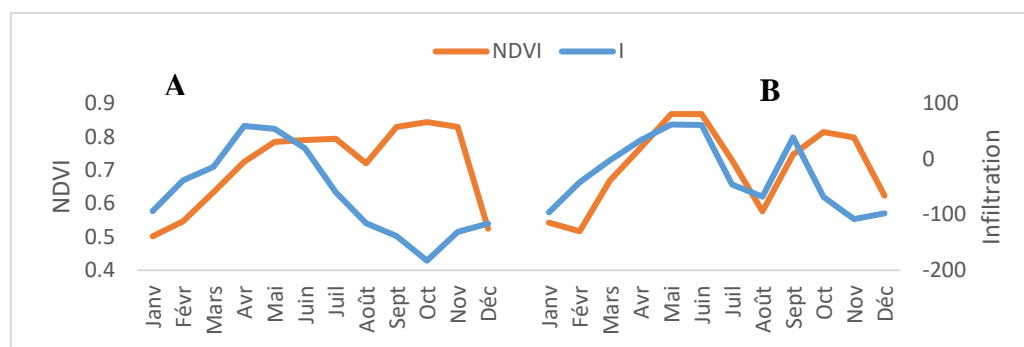


Fig. 10. Variabilité mensuelle du NDVI et de l'infiltration ou recharge (I) A: 2000-2009 et B: 2010-2018

L'infiltration croît de janvier jusqu'en mai où elle atteint un pic avant de décroître jusqu'en octobre alors que le NDVI reste élevé sur les mois de mai, juin et juillet. Aussi pendant le mois d'octobre l'infiltration connaît sa plus faible valeur bien que le NDVI est à son maximum. Toutefois, au regard du graphe B, l'infiltration et le NDVI font montre d'une évolution identique jusqu'en septembre.

#### 4.1.5 ANALYSE DE LA CORRELATION ENTRE NDVI ET TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE

Dans le bassin versant de la Hana, la corrélation a été établie entre le NDVI et les paramètres du bilan hydrologique avant et après l'année 2009 identifiée comme la période de rupture. Ainsi au regard des tableaux IV et V, que ce soit avant ou après la rupture, on constate que le NDVI est positivement et fortement corrélé avec les précipitations respectivement 0,78 et 0,68 pour les deux (2) sous période. Il en est de même aussi pour l'évapotranspiration avec des coefficients de corrélation de 0,66 et 0,75 respectivement avant et après la rupture. Et des p-valeurs inférieures à 0,05 dénotant d'une corrélation significative. La corrélation NDVI/écoulement présente une valeur de 0,38 (p-valeurs > 0,05) avant la rupture alors qu'on enregistre 0,63, après la rupture (p-valeur = 0,22 supérieure à 0,05). En ce qui concerne la corrélation NDVI/infiltration, on enregistre une valeur très faible et négative de -0,07 (p = 0,826) non significative avant la rupture. Après la rupture, ce coefficient s'améliore et atteint 0,54 avec un p-value de 0,067. En somme, on retient que les relations entre le NDVI et les termes du bilan hydrologique sont nettement meilleurs après la période de rupture qu'avant.

Tableau 5. Corrélation de Bravais-Pearson avant rupture

Paramètres du bilan	NDVI			
	2000-2009		2010-2018	
	r	p-valeur	r	p-valeur
Pluie	0,68	0,013	0,78	0,002
Evapotranspiration réelle	0,66	0,017	0,72	0,008
Écoulement	0,38	0,22	0,63	0,028
Infiltration	-0,07	0,826	0,54	0,067

NB: Les valeurs en gras avec des p-valeurs inférieures à  $\alpha = 0,05$  sont caractéristiques de corrélation significative.

## 4.2 DISCUSSION

### 4.2.1 COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA HANA

Les résultats de l'application du modèle GR2M au bassin versant de la Hana montrent que celui-ci traduit assez fidèlement son comportement hydrologique. Les critères d'évaluation numériques (coefficient de Nash) et graphiques le témoignent très clairement. En effet, des valeurs de Nash de l'ordre de 70% à 60% ont été obtenus en calage, respectivement sur les périodes 1984-1989 et 2000-2018. Aussi, au cours de la validation de bonnes valeurs de Nash ont été obtenues. Ces résultats de performance obtenus, s'inscrivent dans l'ordre des performances obtenues en général sur les bassins versants ouest africains Ouédraogo (2001), (Diello, 2007). Au niveau de la Côte d'Ivoire, plusieurs auteurs (Ardoïn, 2004, Kouakou *et al.*, 2016, Fadiga *et al.*, 2019 et Yao *et al.*, 2019) ont appliqué ce modèle à différents bassins versants. Des valeurs satisfaisantes de Nash ont été obtenues en calibration comme en validation. Perrin *et al.* (2007), affirment ainsi que la version Mouelhi du modèle GR2M, qui est celle utilisée au cours de cette étude, paraît plus performante et donc fiable pour établir un bilan hydrologique. Toutefois, le modèle a tendance à sous-estimer les débits observés. Cette contre-performance pourrait avoir deux origines: les contrastes climatiques et la non-prise en compte des états de surface du bassin versant (Diello, 2007).

#### **4.2.2 EVALUATION DU BILAN HYDROLOGIQUE À L'ÉCHELLE MENSUELLE**

Les bilans hydrologiques mensuels établis à partir du modèle GR2M, mettent en évidence une dominance, soit de l'écoulement ou de l'évapotranspiration réelle sur les autres paramètres respectivement sur les périodes 2000-2008 et 2009-2018. Les fortes valeurs de l'évapotranspiration seraient dues au caractère sempervirent de la forêt sur le bassin où, à toute période de l'année, la majorité des arbres est feuillue et cela accroîtrait son pouvoir évaporatoire. La réduction de l'écoulement découlerait de la prédominance de l'évapotranspiration. En effet, la forte couverture végétale en interceptant une grande part des eaux de pluie, contribue de façon complexe à sa redistribution entre les composantes du cycle hydrologique (Cosandey, *et al.*, 2000). Cependant, la faible évapotranspiration face à l'écoulement pourrait s'expliquer par la saturation du pouvoir évaporant de l'atmosphère qui serait atteinte plus tôt (Kouadio, 2015). L'analyse des valeurs de l'infiltration donne des indications sur la recharge de la nappe au cours des mois de l'année. Au cours des mois de novembre à février d'une part et d'autre part juillet et août, les lames d'eau infiltrées calculées sont toutes négatives. Ces différents mois constituent la grande et la petite saison sèche. Par ailleurs sur la période 2009-2018, le mois de septembre qui fait partie de la saison pluvieuse a enregistré une valeur négative de l'infiltration. A l'opposé, les périodes prenant en compte les mois d'avril, mai et juin sont consécutives à des valeurs positives d'infiltration. On pourrait ainsi dire que sous forêt, il faudrait une forte pluviométrie pour espérer avoir une infiltration. Pendant les mois où la pluviométrie est faible l'évapotranspiration réelle semble prendre les valeurs dans les réserves du mois précédent pour atteindre sa valeur maximale. Ainsi, la réserve commence à s'épuiser jusqu'à atteindre une valeur nulle ou négative pour satisfaire les autres exigences. Ce comportement hydrologique du bassin versant forestier de la Hana a été remarqué sur le bassin versant du Boubo en Côte d'Ivoire par Kouadio *et al.* (2015).

#### **4.2.3 RELATION ENTRE NDVI ET TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE**

Sur les deux sous-périodes (2000-2009 et 2010-2018), le NDVI est fortement corrélé avec la pluie et l'évapotranspiration réelle. Cette corrélation devient davantage forte quand on passe de la sous-période 2000-2009 à la sous-période 2010-2018. Ainsi, les liens entre le NDVI et ces deux paramètres semblent s'améliorer à mesure que le NDVI augmente. La bonne corrélation NDVI-pluie montre que la pluie et forêt (NDVI) sont sans conteste liés puisque, plus il pleut et plus la végétation naturelle est dense. Ces résultats concordent à ceux de Malo et Nicholson (1990) qui, en étudiant la relation entre pluies et NDVI au Niger et au Mali ont abouti à la conclusion que le NDVI mensuel est directement fonction des précipitations mensuelles. Des corrélations similaires de l'ordre de 0,63 entre la pluie et le NDVI, ont été obtenues par Philippon *et al.* (2008), Philippon *et al.* (2014) respectivement en Afrique semi-aride sub-saharienne et dans la corne de l'Afrique de l'Est (Kenya, de Tanzanie, d'Éthiopie et de Djibouti). Aussi, Diallo *et al.* (2009) ont obtenu des valeurs élevées du coefficient de corrélations dans l'ordre 0,74 à 0,87 sur 7 stations météorologiques du bassin versant de Kou au Burkina Faso.

Aussi, avons-nous obtenu d'assez bonne corrélation entre le NDVI et l'évapotranspiration réelle. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'à priori, une végétation saine (symbolisée par un bon NDVI) présente une assez bonne évapotranspiration. Ces résultats sont confortés par ceux de plusieurs auteurs. Traoré (2007), dans le bassin versant du Kou au Burkina Faso, a obtenu des corrélations très fortes à telle enseigne qu'il suggère une estimation indirecte de l'évapotranspiration à travers le NDVI. Pour lui, il suffirait désormais de calibrer nos valeurs d'indice de végétation pour leur faire correspondre des valeurs d'évapotranspiration réelle. Cela permettrait, en plus, un suivi assez régulier de l'évapotranspiration, en tenant compte des résolutions temporelles des images NDVI basse résolution qui sont assez bonnes (10 jours pour SPOT Végétation; 16 jours pour MODIS). Remi *et al.*, (2005) abonde dans le même sens. Pour ces auteurs, l'ETR explique une part importante des variations du NDVI, du point de vue temporel. La corrélation entre le NDVI et l'écoulement reste mitigée. On note une bonne corrélation entre ces deux paramètres seulement sur la période d'après rupture. Aussi, l'infiltration fait la fausse note. Sa corrélation avec le NDVI varie du très faible au moyen. Ces deux termes sont des paramètres complexes. Ils dépendent outre la couverture végétale et la pluie, des facteurs pédologiques, la géologiques et anthropiques.

## **5 CONCLUSION**

L'objectif de cette étude était d'établir des liens statistiques entre les paramètres du bilan hydrologique et l'indice normalisé de végétation NDVI et en vue de caractériser l'impact de la dynamique forestière sur ceux-ci.

Pour ce faire, des NDVI extraits des images satellites MODIS MOD13Q1 ont été mis en relation avec les paramètres du bilan hydrologique issus du modèle GR2M. Ce bilan a été établi de part et d'autre de la date rupture décelée dans les séries temporelles et chronologiques de NDVI. Ainsi, les valeurs de Nash issues des phases de calage et de validation sont assez satisfaisantes pour justifier l'utilisation du modèle GR2M dans l'évaluation des termes du bilan hydrologique.

Une représentation graphique du NDVI et des différents termes du bilan dans un même plan et autour de la période de rupture révèle une coévolution adéquate entre le NDVI et les paramètres comme la pluie, l'évapotranspiration réelle et l'écoulement. Quant

à l'infiltration, elle présente une discordance dans son évolution avec celle du NDVI. L'analyse statistique de ces relations fait montre d'une forte corrélation entre le NDVI et lesdits paramètres exceptée l'infiltration qui a enregistré un coefficient négatif sur la période 2000-2009. La connaissance du rôle hydrologique de la forêt dans le bassin versant de la Hana devrait passer par celui de ses effets sur les paramètres du bilan hydrologique vue les fortes corrélations qui les lient.

## REFERENCES

- [1] André M (2014): Variabilité spatio-temporelles des précipitations à La Réunion et impact sur la végétation. Climatologie. Mémoire de Master, université Joseph Fourier, Grenoble, 63 p.
- [2] Andrieu J. (2018): Analyse de la cinématique de la végétation en côte d'ivoire pendant les conflits à travers une métrique phénologique et la corrélation de Kendall de deux séries temporelles de NDVI. *Tropicultura*, 63. 2, 258-270.
- [3] 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 Montpellier II, Montpellier, 240 pages.
- [4] Avénard J.M. (1971): Aspects de la géomorphologie. In: In: Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM n°50.
- [5] Brochart D, Andréassian V (2014): Correction des estimations des pluies par satellite pour les bassins versants de Guyane française. *Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer, Bruxelles: Académie royale des sciences d'outre-mer*, 1959-, 2014, 60 (2), pp.361-370. fhal-01504441.
- [6] Cosandey C., Martin C, et DIDON-LESCOT J.F (2000): Forêt et écoulements: étude des d'une coupe forestière sur le bilan d'écoulement annuel, les crues et les étiages. Rapport sectoriel pour le rapport final du contrat européen FOREX, 34 p.
- [7] Coulibaly D (2018): Parc national de Taï en côte d'ivoire: entre enjeux de conservation et enjeux économiques. *Revue Africaine d'Anthropologie, Nyansa-Pô*, n° 27.
- [8] Diallo M. D, Compaoré N.F, Yacouba H. et Karambiri H, Ye D, Deprez F, Tychon B, Traoré F, Derouane J. (2009): Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport technique NO 2 (2007 – 2008).
- [9] Diello P, Mahé G, Paturel J-E, Alain D, François D, Servat E et Frederic O. (2005): Relations indices de Végétation–Pluie au Burkina Faso: Cas du Bassin Versant du Nakambé/Relationship between Rainfall and Vegetation Indexes in Burkina Faso: A Case Study of the Nakambé Basin, *Hydrological Sciences Journal*, 50: 2, -221,.
- [10] Diello P. (2007): Interrelations Climat – Homme – Environnement dans le Sahel Burkinabé: impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique, Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier2, 304p.
- [11] Dieng B., Bazie P and Schmitt A. (1991): Transfert d'eau en milieu poreux non saturé. Recharge des nappes en climat soudano-sahélien. In: Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone, " Actes des journées scientifiques de Thiès, AUPEL-UREF.
- [12] Fadika V, Dao A, Soro G. E, Goula B. T. A et Savane I (2019): Test of simulation of discharges from an ungauged basin in the South-West Côte d'Ivoire in equatorial climate. *International Journal of Scientific & Engineering Research* Volume 10, Issue 9.
- [13] Gaume E. (2009): Hydrologie de versants et de bassins versants et modélisation pluie-débit. Master 2 Sciences et Génie de l'Environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris, 86 p.
- [14] Gregoire J-M., Ferrari G. (1990): Suivi par télédétection des changements d'état de surface sur les bassins versants du Haut-Sénégal, de la Gambie et du Rio Corubal (novembre 1987 – décembre 1988). *Télédétection et sécheresse*, paris, pp 81-93.
- [15] Kouadio Z. A, Kouakou K. E, Konan-W. A. B, GOULA B. T.A et SAVANE I. (2015): Modélisation du comportement hydrologique du bassin versant du Boubo en milieu tropical humide de la Côte d'Ivoire par l'application du modèle hydrologique distribué CEQUEAU.
- [16] KOUAKOU K. E., KOUASSI A. M., KOUADIO Z. A., GOULA B. T. A. and SAVANE I. (2016): Modélisation hydrologique du bassin versant de la Comoé dans un contexte de changement climatique, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 15, No 4 (2016) 799 -811.
- [17] Lavabre, J., Folton, N. & Cernesson, F. (1993): - BVRE du Réal Collobrier. Modélisation des écoulements mensuels. 1er workshop DM2E, 24-25 novembre 1993, Aix-en-Provence.
- [18] Makhoulouf Z., Michel C. (1994). A two- parameter monthly water balance model for french watersheds, *Journal of Hydrology*, n°162, pp 299-318.
- [19] Malo, A. R., and Nicholson, S. E. (1990): A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. *Journal of Arid Environments* 19, 1-24.
- [20] Mouehli S, (2003): Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Cemagref (Antony), Université Paris VI.
- [21] Nash J. E. and Sutcliffe J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models; Part I: a discussion of principles, ". *Journal of hydrology*, vol.10, pp. 282-290.
- [22] OIPR. (2015): Plan d'aménagement et de gestion du Parc National de Taï 2014-2018, 141 p.

- [23] Ouédraogo 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.
- [24] Paturel J. E., Servat E., Dezetter A., Boyer J. F., Laroche C., Mounirou L., Lubes-Niel H. et Mahe G. (2006): Modélisation hydrologique et regionalisation en Afrique de l'Ouest et centrale Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment–MOPEX. IAHS Publ. 307, 2006.
- [25] Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Boyer J. F., Lubès H., et Masson J.M., (1995): Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse*, 6 (1), pp. 95-102.
- [26] Pearson K. (1896): Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, Heredity and Panmixia, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 187, 253–318.
- [27] Perrin C, Claude M, Andréassian V. (2007): Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR), Cemagref, 16 p.
- [28] Philippon N, Nadège M, Pierre C., Yves R (2008): impact des précipitations sur l'activité photosynthétique de la végétation en Afrique semi-aride sub-saharienne. *Journées de Climatologie - Climat et société: Climat et végétation*.
- [29] Philippon N., Camberlin P., Moron V., Gitau W., Ozer P (2014): Evolution récente des précipitations de mars-mai en Afrique de l'Est: configurations spatiales et évolution saisonnière, XXVIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie 2-5, Dijon France.
- [30] Rémi L, Dubreuil V, Hubert-Moy Laurence (2005): Suivi de l'occupation hivernale des sols par télédétection basse résolution en paysage fragmenté: comparaison de séries temporelles de NDVI noaa/avhrr, spot/végétation et eos/modis, *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil*, 16-21, INPE, p. 3093-3095.
- [31] Rim A. (2013): Estimation régionale de l'évapotranspiration sur la plaine de Kairouan (Tunisie) à partir de données satellites multi-capteurs, thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 195 p.
- [32] SEP-REDD+ et FAO. (2017). Données forestières de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire inventaire de la biomasse forestière pour l'estimation des facteurs d'émission, 76 p.
- [33] Shrestha M. (2015). Data analysis relied on linear scaling bias correction (V.1.0) Microsoft Excel file.
- [34] TRAORE F (2007): Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso. Mémoire de fin d'étude de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en Sciences et Gestion de l'Environnement, Université de Liège, 133p.
- [35] Vissin E. W (2007): Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 311 p.
- [36] Xingtu L, Nana L, Dehua M and Bolong W (2020). Climate Change Affected Vegetation Dynamics in the Northern Xinjiang of China: China: Evaluation by SPEI and NDVI.