

Évolution des états de surface et des écoulements des bassins versants de deux petits barrages de Ferkessédougou, Nord de la Côte d'Ivoire

Léréyaha COULIBALY^{1*}, Ismaïla OUATTARA¹, Kouakou Hervé KOUASSI²,
Gneneyougo Emile SORO³ et Bamory KAMAGATE³

¹ Université de Man, UFR des Sciences Géologiques et Minières (SGM), BP 20, Man, Côte d'Ivoire

² Université Jean Lorougnon Guédé, UFR Environnement Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

³ Université Nangui Abrogoua, UFR Sciences et Gestion de Environnement, Laboratoire Géosciences et Environnement, 02 BP 801 Abidjan, Côte d'Ivoire

(Reçu le 29 Juin 2021 ; Accepté le 25 Octobre 2021)

* Correspondance, courriel : lereyaha.coulibaly@univ-man.edu.ci

Résumé

Cette étude vise à montrer la variabilité des états de surface et de la pluviométrie et leurs impacts sur les apports de deux petits barrages de Ferkessédougou (Nord de la Côte d'Ivoire). La caractérisation de la dynamique de l'occupation du sol par une étude diachronique a été faite à partir des traitements des images Landsat TM du 16/11/1986, Landsat 7 ETM+ du 15/11/2006 et Landsat 8 OLI du 05/01/2017 avec le logiciel QGIS. L'analyse des données de pluie mensuelle de 1980 à 2017 est basée sur les tests statistiques de tendance (Mann-Kendall et de la Régression Linéaire) et de rupture (t-Student, et Free- CUSUM). L'amplitude des tendances des apports calculés par la méthode de Dubreuil-Vuillaume a été estimée par la méthode de la pente de Sen. Les résultats de l'analyse de la pluviométrie montrent une quasi-stationnarité de la pluie. Cependant une hausse des apports d'eau avec des taux variant de 34 % à 39 % dans les barrages a été constatée. Le traitement des images, montre la savanisation de la sous-préfecture de Ferkessédougou et une anthropisation des bassins versants. Cette anthropisation est devenue un facteur important de la hausse des apports d'eau dans les barrages. Cette étude est un apport additionnel au développement des outils de gestion durable des petits barrages puisqu'elle montre la vulnérabilité des barrages si la dégradation des états de surface continue.

Mots-clés : *barrage, anthropisation, ruissellement, Ferkessédougou, Côte d'Ivoire.*

Abstract

Changes in surface conditions and drainage from the watersheds of two small dams in Ferkessédougou, North of the Ivory Coast

This study aims to show the variability of surface conditions and rainfall and their impacts on the inflow of two small dams in Ferkessédougou (Northern Ivory Coast). The characterization of land cover dynamics by a diachronic study was made from the processing of Landsat TM images of 16/11/1986, Landsat 7 ETM+ of 15/11/2006 and

Landsat 8 OLI of 05/01/2017 with the QGIS software. The analysis of monthly rainfall data from 1980 to 2017 is based on statistical tests of trend (Mann-Kendall and Linear Regression) and break (t-Student, and Free-CUSUM). The magnitude of the inflow trends calculated by the Dubreuil-Vuillaume method was estimated by the Sen slope method. The results of the rainfall analysis show a quasi-stationarity of rainfall. However, an increase in water inflow with rates varying from 34 % to 39 % in the dams was observed. The image processing shows the savannahisation of the Ferkessédougou sub-prefecture and the anthropisation of the watersheds. This anthropisation would be an important factor in the increase of water inflow to the dams. This study is an additional contribution to the development of sustainable management tools for small dams, as it shows the vulnerability of dams if the degradation of surface conditions revealed continues.

Keywords : *dams, anthropic activities, runoff, Ferkessédougou, Côte d'Ivoire.*

1. Introduction

L'impact des changements d'usage des sols sur le comportement hydrologique des bassins versants est actuellement un des problèmes majeurs des responsables de la gestion des ressources en eau. Cette thématique a fait l'objet de plusieurs études à travers le monde [1, 2]. L'occupation du sol influence les quantités d'eau disponibles pour l'écoulement de surface et l'infiltration selon le type de végétation (forêts, savanes, mosaïques) [3]. Les études hydrologiques en Afrique de l'Ouest ont montré que les coefficients d'écoulement ont fortement augmenté sur certains hydrosystèmes du Sahel, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale [4]. Cette influence est particulièrement exacerbée dans le cas de bassins versants de petite taille et fortement anthropisés [5]. Les barrages agropastoraux du Nord de la Côte d'Ivoire sont de petite taille. Ces petits réservoirs sont une composante incontournable des zones rurales des pays soudano-sahéliens d'Afrique de l'Ouest et constituent un élément indéniable dans la gestion de la ressource en eau [6, 7]. Qu'il s'agisse de "fonctionnement" ou "d'usages", il est évident que la disponibilité de la ressource en eau est l'un des éléments qui conditionne fondamentalement la valorisation des petits barrages. Edifiés depuis plusieurs dizaines d'années, on sait maintenant que les chroniques anciennes utilisées pour le dimensionnement des ouvrages diffèrent singulièrement des chroniques mises à jour avec les données des années récentes [8].

Paradoxalement, tandis que les séries pluviométriques se caractérisent par une nette diminution, des travaux récents révèlent simultanément une augmentation des coefficients de ruissellement des bassins versants [2]. Le comportement hydrologique des bassins soudano-sahéliens paraît en pleine mutation : l'effet du changement climatique, l'évolution des couverts végétaux, des états de surface et d'occupation des sols sur les bassins versants sont autant d'éléments susceptibles d'interagir [9]. Tout compte fait, la capacité actuelle des retenues et les conditions (climatiques et hydrologiques) nécessaires à leur remplissage doivent désormais être réévaluées. Aussi, en termes de variabilité, il convient de caractériser le fonctionnement hydraulique des lacs de barrage, en relation avec les apports et les pertes [4]. La cartographie de l'occupation des sols est un élément important dans de telles études. Les techniques de télédétection restent les outils incontournables dans l'étude des changements d'usage des sols [10]. La présente étude a été initiée dans le but de montrer l'évolution du couvert végétal entre 1986 et 2017 à partir des données de télédétection (images Landsat TM, ETM+ et OLI) dans les bassins versants de deux barrages de la sous-préfecture de Ferkessédougou et leur impact sur les coefficients d'écoulement. La mise en évidence des phénomènes de ruissellement dans ce travail a eu pour support les types d'occupation du sol de ces bassins versants et

l'évaluation des écoulements moyens annuels à partir de la méthode de Vuillaume-Dubreuil [11]. Les classes d'occupation du sol obtenues par classification des images Landsat ont été affectées de coefficients de pondération représentant leur capacité de rétention en eau [4]. L'objectif de cette étude est de montrer l'évolution des états de surface et des écoulements des bassins versants de deux petits barrages de Ferkessédougou (Nord de la Côte d'Ivoire).

2. Matériel et méthodes

2-1. Zone d'étude

La sous-préfecture de Ferkessédougou (**Figure 1**), objet de cette étude se situe entre les latitudes 9°20' et 10° Nord et les longitudes 4°50' et 5°40' Ouest. Elle se trouve à environ six cent (600) kilomètres d'Abidjan. La sous-préfecture fait partie de la région du Tchologo (région du District administratif des savanes) située au Nord de la Côte d'Ivoire. Les deux bassins versants retenus pour la présente étude sont ceux des petits barrages agropastoraux de Dékokaha et de Sépénédiokaha. Le bassin versant de Dékokaha situé au Centre-est de la zone d'étude est le plus grand avec un périmètre de 29,88 km et une superficie de 34,4 km². Le bassin versant de Sépénédiokaha, avec une superficie de 26,3 km² et un périmètre de 30,4 km, est lui situé au Nord de la sous-préfecture [12].

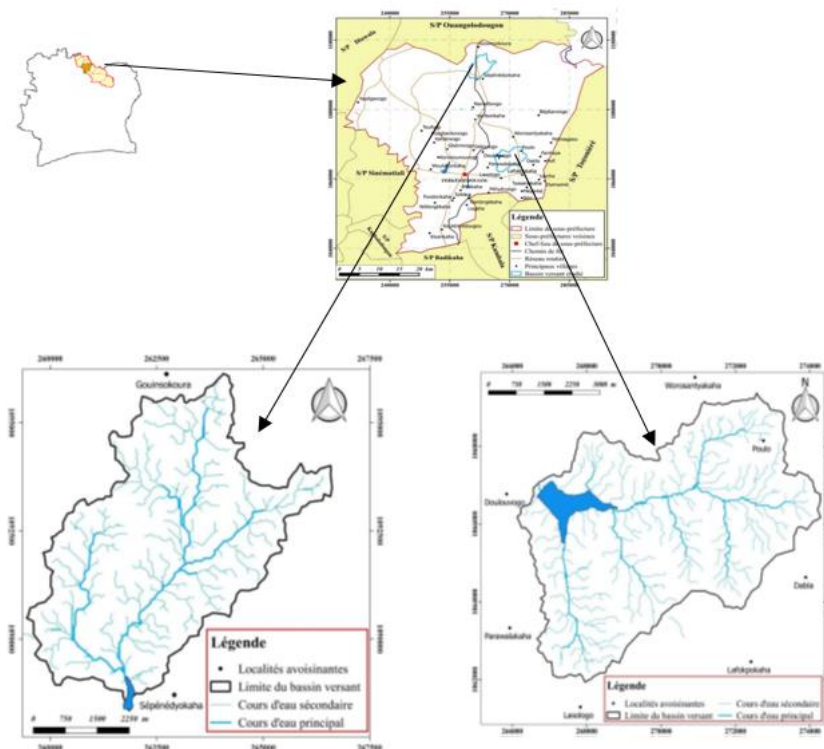


Figure 1 : Bassins versants des barrages de Dékokaha et de Sépénédiokaha

2-2. Données utilisées

Les séries de données climatiques proviennent de la direction agricole de la SUCAF-CI (Sucrierie Africaine en Côte d'Ivoire) et sont utilisées dans l'étude de la variabilité climatique. Ces données s'étendent de 1986 à

2017. L'imagerie des capteurs Landsat a permis l'analyse de la dynamique du couvert végétal. Ces données satellitaires (résolution spatiale de 30 m x 30 m) ont été acquises gratuitement sur le site Internet earth exploré de la National Aeronautic and Space Administration. Ces images prises toutes en saison sèche (novembre) permettent une bonne discrimination des unités d'occupation du sol, parce que c'est la période pendant laquelle les taux de couverture nuageuse sont les plus faibles [13, 14].

2-3. Méthodes

2-3-1. Cartographie de l'occupation du sol

La méthodologie a consisté à faire une analyse de l'occupation du sol à partir de données de télédétection et des travaux de terrain. Le prétraitement des images Landsat TM et ETM+ de 1986, de 2006 et Landsat 8 de 2017 a consisté en une succession d'opérations indispensables. Il s'agit des corrections géométriques des images et de l'amélioration de leur qualité par l'application de filtres. Ensuite, la composition colorée des bandes 4, 5 et 7 des données TM et ETM+ a été réalisée pour faciliter l'identification et la différenciation des types d'occupation du sol. Les données collectées sur le terrain ont permis de comprendre la signature spectrale des différents types d'occupation du sol. La validation des classifications a été réalisée à l'aide d'outils statistiques que sont la matrice de confusion et l'indice Kappa. Cet indice s'étend de 0 à 1 et se divise en cinq catégories : accord très faible de 0,00 à 0,20 ; accord faible de 0,21 à 0,40 ; accord modéré de 0,41 à 0,60 ; accord substantiel de 0,61 à 0,80 ; accord presque parfait de 0,81 à 1 [15].

2-3-2. Calcul de l'indice de capacité de rétention en eau des types d'occupation du sol

Afin d'évaluer l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur les écoulements, un indice représentant la capacité de rétention en eau au niveau de chaque classe d'occupation du sol pour l'année considérée a été calculé [16]. Ainsi, si l'on appelle p_i le pourcentage en superficie de la zone d'étude occupée par la classe d'occupation du sol i et a_i un coefficient de pondération représentant la capacité de rétention en eau effective de la classe i , alors, C_r est obtenu par la formule suivante **Équation (1)** [17]:

$$C_r = \sum_i P_i \times a_i \quad (1)$$

C_r étant la capacité de rétention ; P_i le pourcentage en superficie du bassin versant occupé par la classe d'occupation du sol i et a_i le coefficient de pondération représentant la capacité de rétention en eau effective de la classe i .

Les coefficients de pondération (a_i) ont été définis pour chaque classe entre 0 et 2 (rétentions nulle et maximale, respectivement) dans le **Tableau 1**. Le coefficient C_r , compris entre 0 et 200, est utilisable sur des bassins de taille suffisante pour discriminer avec efficacité les différentes classes d'occupation des sols par télédétection (surface de bassin > 25 km²). Dans ce cas, les valeurs fortes (> 100) correspondraient alors à des bassins encore sauvages dotés d'une importante couverture végétale, d'une forte capacité de rétention et donc peu propices à l'intensification des écoulements, tandis que les valeurs faibles correspondraient à des bassins anthropisés, voire dégradés, dotés d'une faible capacité de rétention et donc, à l'inverse des précédents, propices à d'importants écoulements.

Tableau 1 : *Coefficients de capacité de rétention pour chacune des classes d'occupation des sols* [17]

Classe d'occupation des sols	ai
Habitat	0
Sols nus ou dégradés	0
Cultures	1
Savanes faiblement cultivés	1
Savanes arbustives	1
Savanes arborés	2
Cultures irriguées	2
Forêt	2

2-3-3. Détermination des lames d'eau écoulées par la méthode de Vuillaume- Dubreuil

Pour l'estimation des apports d'eau à l'échelle annuelle, la méthode de [11] a été utilisée. Cette méthode prend en compte la notion de pluie efficace qui correspond à la pluie qui contribue à l'écoulement. La lame d'eau annuelle moyenne écoulée est déterminée à l'aide de relations issues de régressions multiples entre les paramètres climatiques et morphométriques du bassin. Le facteur explicatif principal P_r est un facteur climatique qui représente la part disponible pour l'écoulement de l'apport pluvial considéré à l'échelle mensuelle. Cette part peut être calculée par le biais d'une pluie réduite définie par **l'Équation (2)** [11] :

$$P_r = \sum_{n=1}^{12} \delta^n \left(P_n - \frac{ETP}{36} \right) \tag{2}$$

n le mois variant de 1 à 12, P_r l'apport pluvial après l'évapotranspiration (mm), P_n la pluie totale mensuelle du mois n et ETB l'évaporation annuelle moyenne sur bac d'eau libre (mm) avec $ETP = 0,75 ETB$.

La relation proposée pour le calcul de la lame écoulée moyenne annuelle E_c (exprimée en mm) est la suivante **(Équation 3)**[11] :

$$E_c = 0,47 \times P_r - \log(S) + 0,54 \times D_s + A \tag{3}$$

E_c étant l'apport annuel d'eau ou écoulement annuel d'eau (mm), S la superficie du bassin (km^2), D_s la dénivelée spécifique (m) et A le terme d'aptitude à l'écoulement.

2-3-4. Stationnarité des séries hydroclimatiques

Les méthodes sélectionnées pour la détermination des ruptures, des tendances d'une série s'appuient sur les travaux de synthèse [18, 19]. Les séries hydrologiques sont rarement symétriques et la condition de normalité n'est pas toujours vérifiée. Les tests non paramétriques pour les ruptures dans les séries sont celui de Mann-Kendall, le test libre des écarts cumulés (Free-CUSUM) et le test de t-Student. L'analyse des tendances dans les séries de précipitation dans le but d'apprécier la distribution temporelle des chroniques (linéarité, caractère cyclique des phénomènes) sur les bassins d'étude. Ces méthodes paramétriques et non paramétriques (régression linéaire, Mann-Kendall, etc.) ont été aussi citées par des auteurs comme [20]. Cependant, de toutes ces méthodes le test de Mann-Kendall s'est révélé efficace dans plusieurs études de caractérisation des tendances dans les séries hydroclimatiques [21].

3. Résultats

3-1. Dynamique de l'occupation du sol des différents bassins versants

3-1-1. Bassin versant de Dékokaha

La superficie des forêts à Dékokaha est passée de 13,23 km² en 1986 à 0,3 km² en 2017, soit une perte de 97,8 % par rapport à leur état en 1986. Tandis que la classe eau a augmenté : sa superficie est passée de 0,65 km² en 1986 à 0,86 km² en 2017, soit une hausse de 53 % par rapport à son état de 1986. Les savanes, les cultures et les sols nus ont connu une augmentation. Les savanes sont passées de 15,77 km² en 1986 à 26,5 km² en 2017 soit un gain de 68 % par rapport à l'état de savane de 1986. Les cultures ont connu une augmentation de 49,7 % entre 1986 et 2017 et les sols nus/ habitats ont augmenté de 35 % par rapport à leur état de 1986 (*Figure 2 et Tableau 2*).

3-1-2. Bassin versant de Sépénédiokaha

Avec une superficie de 0,065 km² en 1986, la classe eau a complètement disparu en 2017. Par ailleurs, les classes savanes et cultures ont connu respectivement une progression de 21,22 % et 10 %. La superficie des sols nus et habitats est passée de 1,12 km² en 1986 à 7,66 km² en 2017 avec une différence de 6,57 km² soit 500 % de progression par rapport à leur état en 1986 (*Figure 3 et Tableau 3*).

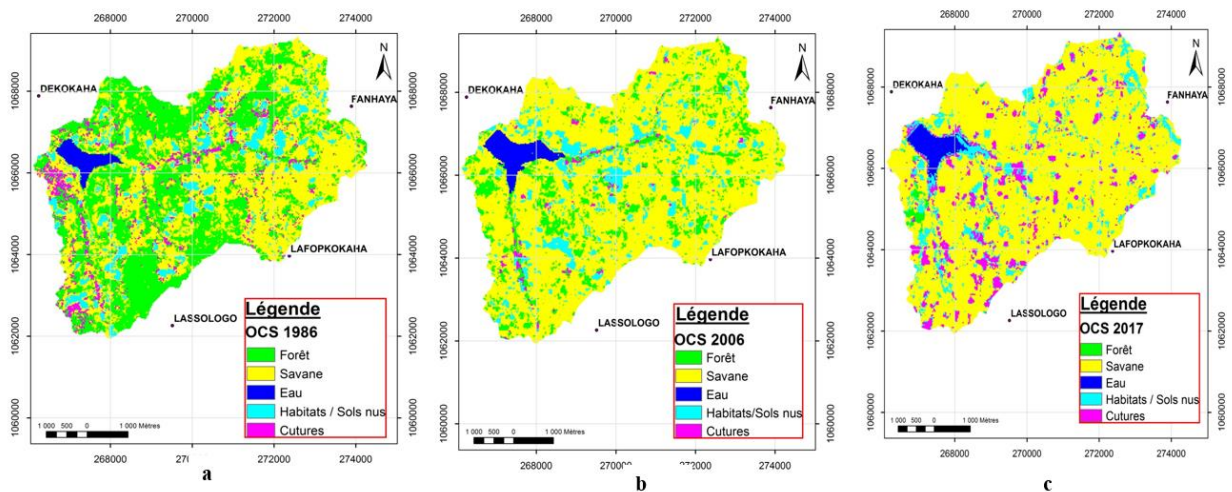


Figure 2 : Carte d'occupation du sol du sous bassin de Dékokaha en : (a) 1986, (b) 2006 et (c) 2017

Tableau 2 : Pourcentage des classes d'occupation du sol dans les bassins de Dékokaha et Sépénédiokaha

	Classes	Etat en 1986 (Km ²)	Etat en 2006 (Km ²)	Etat en 2017 (Km ²)	Progression (1986-2006)	Progression (2006-2017)	Progression (1986-2017)
Dékokaha	Forêt	13,16 (38,26 %)	4,46 (12,97 %)	0,25 (0,73 %)	-8,70	-4,21	-12,91
	Savane	15,78 (45,87 %)	25,21 (73,28 %)	26,49 (77,01 %)	9,43	1,28	10,71
	Eau	0,64 (1,86 %)	1,04 (3,02 %)	0,86 (2,50 %)	0,40	-0,18	0,22
	Habitat/Sol nu	2,83 (8,23 %)	3,28 (9,53 %)	3,81 (11,08 %)	0,45	0,53	0,98
	Culture	1,99 (5,78 %)	0,41 (1,19 %)	2,99 (8,69 %)	-1,58	2,58	1,00
	Total	34,40 (100 %)	34,40 (100 %)	34,40 (100 %)	-	-	-
	Sépénédiokaha	Forêt	10,08 (38,32 %)	2,21 (8,40%)	0,02 (0,08 %)	-7,87	-2,19
Savane		14,53 (55,25 %)	18,68 (71,02 %)	17,60 (66,92 %)	4,15	-1,08	3,07
Eau		0,06 (0,23 %)	0,07 (0,27 %)	0 (0 %)	0,01	-0,07	-0,06
Habitat/Sol nu		1,12 (4,26 %)	5,09 (19,35 %)	7,65 (29,09 %)	3,97	2,56	6,53
Culture		0,51 (1,94%)	0,25 (0,96 %)	1,03 (3,92 %)	-0,26	0,78	0,52

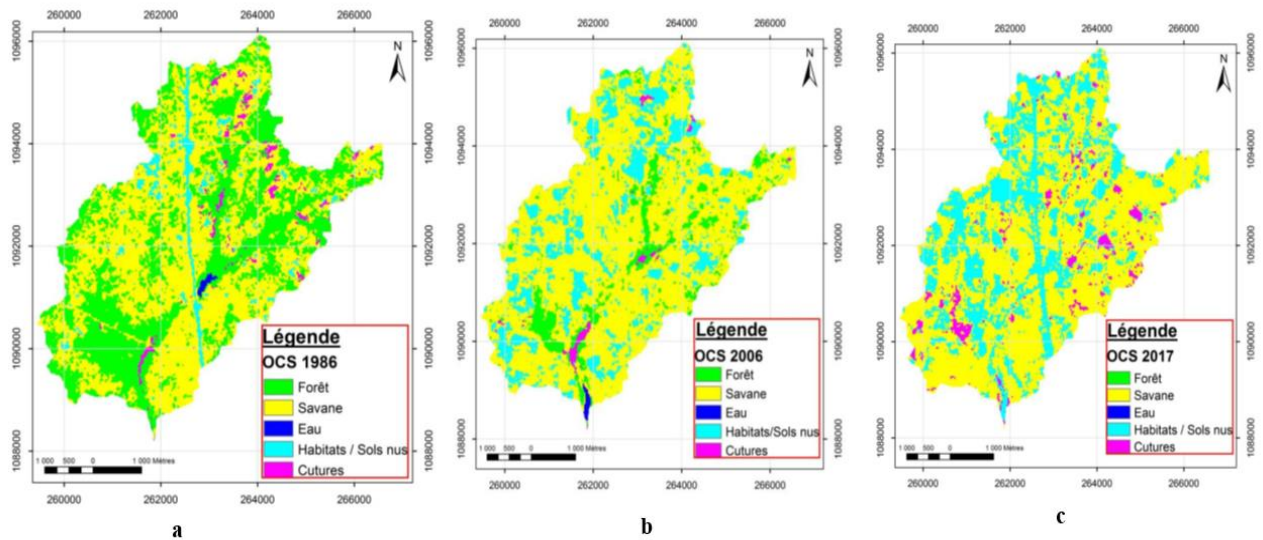


Figure 3 : Carte d'occupation du sol du sous bassin de Sépénédiokaha en 1986 (a), 2006 (b) et 2017 (c)

3-2. Détection de tendance et de rupture dans les séries climatiques

3-2-1. Pluviométrie

Les résultats de l'application des tests de rupture et de tendance sur les données de pluie sont consignés dans le **Tableau 3**. Les tests de tendances de Mann-Kendall et de régression linéaire présentent des résultats concordants. Il n'y a pas de tendance significative dans la série pluviométrique. Les tests paramétriques (t-Student) et non paramétriques présentent des résultats similaires. Les deux tests ne montrent pas de rupture de stationnarité dans la série pluviométrique avec un niveau de significativité $\alpha = 0,01$. Toutefois, l'année 2012 est considérée comme année de rupture de façon non significative (test de CUSUM). Cette date est utilisée dans la suite des travaux. La moyenne interannuelle de la pluviométrie avant l'année de rupture (2012) est inférieure à celle de la période post-rupture. En effet, avant la rupture, cette moyenne était de 1480,5 mm et après la rupture elle est passée à 1203,4 mm.

Tableau 3 : Tests statistiques de rupture et de tendance appliqués à la série pluviométrique

	Test de rupture			Test de tendance			
	CUSUM	t-Student	Mann-Kendall	Rég. Linéaire			
Année de rupture	Stat $\alpha=0,01$	t	Stat $\alpha=0,01$	Z _{score}	Stat $\alpha=0,01$	Z _{score}	Stat $\alpha=0,01$
2012	6.91	-0,46	1,69	0,73	1,64	0,73	1,69

3-2-2. Pente de Sen et taux de changement dans la série pluviométrique

Le taux de changement observé montre une hausse de la pluviométrie au fil du temps se traduisant par un taux positif d'amplitude de changement (**Tableau 4**). Le taux de changement sur la chronique d'étude est de 4 % avec une pente de 1,5. La **Figure 4** présente l'amplitude de la tendance de pluie à partir de la pente de Sen.

Tableau 4 : Amplitude de la tendance linéaire de la pluie

Paramètres	Pluie (mm)
Minimum	619,50
Maximum	1630,90
Ecart-Type	165,52
Pente de Sen	1,50
Taux de changement	0,04

3-3. Amplitude des tendances observées dans les apports

Les *Figures 4 et 5* présentent l'amplitude de la tendance de l'écoulement des deux bassins d'étude. A l'analyse de l'amplitude des tendances des apports d'eau, les pentes sont positives et identiques pour les deux bassins versants. Les apports dans les barrages connaissent donc une hausse avec des taux de changement différents. Ces taux varient de 34 % à 39 %. Le bassin de Sépénédiokaha a le taux de changement le plus élevé. La moyenne des taux de changement pour les bassins d'étude est de 36 %. Cette moyenne est supérieure au taux de changement de la pluviométrie qui est de 4 %.

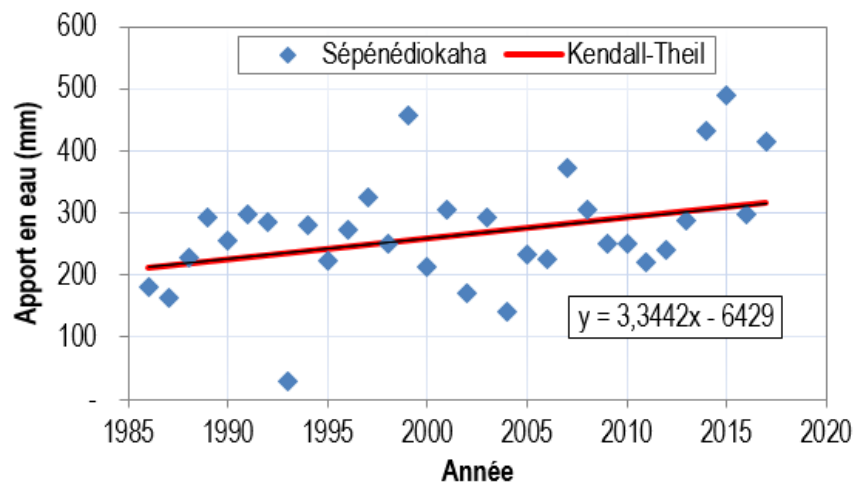


Figure 4 : Amplitude de la tendance des écoulements dans le barrage de Sépénédiokaha

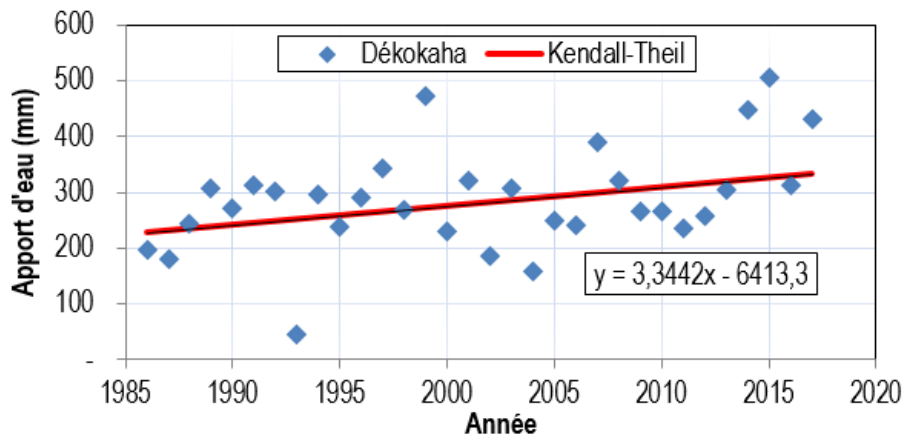


Figure 5 : Amplitude de la tendance des écoulements dans le barrage de Dékokaha

3-4. Coefficients d'écoulement moyens annuels

La mise en évidence d'éventuelles tendances dans l'évolution des coefficients d'écoulement en relation avec l'évolution des classes d'occupation du sol a donné les résultats consignés dans les **Figures 6** et **7**. Les résultats obtenus pour chacun des bassins sont très similaires, avec une nette tendance à l'augmentation des coefficients d'écoulement. Aussi, on observe que l'extensification des surfaces cultivées, des sols nus, et des zones d'habitat, au détriment des zones sauvages, savane et forêts, a affecté différemment les deux bassins versants (**Tableau 5**). Le bassin de Sépénédiokaha (**Figure 6**) a un coefficient moyen de 24 % sur la chronique 1986-2017. Ces coefficients d'écoulement qui oscillaient entre 5 % et 18 % jusqu'aux années 2013 augmentent brusquement jusqu'à 24 % en 2017. Dans la même période, les classes culture-habitat, sols nus associées à l'anthropisation du sous-bassin augmente de près de 27 %. Également, le taux de changement des écoulements y est le plus élevé. Enfin, le bassin versant de Dékokaha (**Figure 7**) enregistre le coefficient d'écoulement moyen le plus faible par rapport au bassin versant de Sépénédiokaha, avec une valeur de 23 %. Les coefficients d'écoulement augmentent de 14 % en 1986 à 26 % en 2017. Dans la même période, la classe d'occupation du sol associée à l'anthropisation augmente de 6 %. Ce bassin versant est le moins anthropisé. Globalement, le coefficient d'écoulement a augmenté sur l'ensemble des sous-bassins, en dépit de l'absence notable d'augmentation de la pluviométrie.

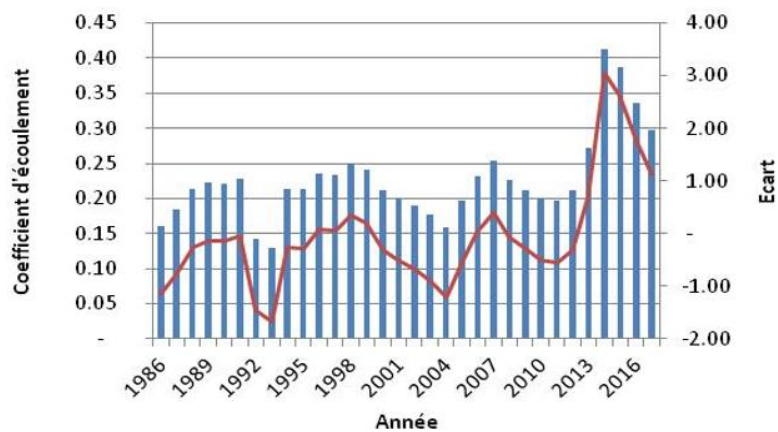


Figure 6 : Évolution des coefficients d'écoulement entre 1986 et 2017 (Sépénédiokaha)

Parallèlement les classes d'occupation des milieux associés à l'anthropisation des sous-bassins ont également augmenté. Ce qui signifierait que l'anthropisation des sous-bassins est un facteur majeur de l'augmentation des coefficients d'écoulement.

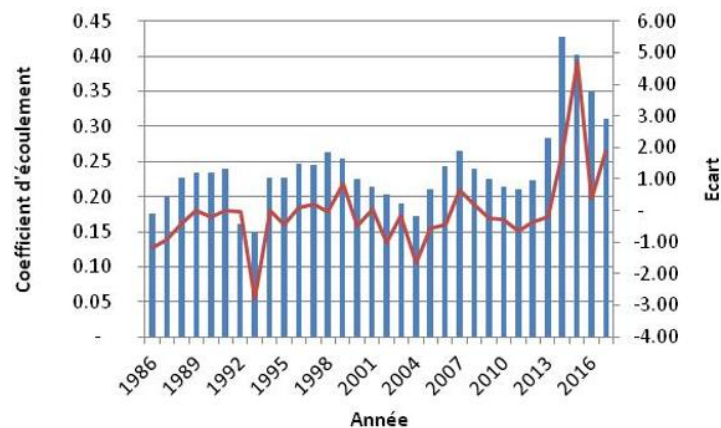


Figure 7 : Évolution des coefficients d'écoulement entre 1986 et 2017 (Dékokaha)

Tableau 5 : *Évolution des classes d'occupation des sols entre 1986 et 2017, sur les deux bassins versants de la sous-préfecture de Ferkessédougou*

Bassins versants	Classes	1986	2017
Sepenediokaha	[1-2]	93,57	67,00
	[4-5]	6,20	33,01
Dekokaha	[1-2]	84,16	77,71
	[4-5]	13,99	19,74

[1-2]: Forêt-savane [4-5]: Culture-habitats/sols nus

3-5. Impacts de l'anthropisation sur les écoulements

Dans le **Tableau 6**, on observe que pour l'année 1986 les coefficients de rétention pour les deux bassins sont supérieurs à 100. Et tous les coefficients de rétention de l'année 2017 sont inférieurs à 100. Les valeurs fortes (>100) du coefficient de rétention des bassins en 1986 correspondraient alors à des bassins encore sauvages dotés d'une importante couverture végétale, d'une forte capacité de rétention et donc peu propices à l'intensification des écoulements. Cependant, les valeurs faibles du coefficient de rétention correspondent à des bassins anthropisés. Ils sont dotés d'une faible capacité de rétention et donc, propices à d'importants écoulements. Ainsi, les zones naturelles font place aux cultures, sols nus et habitat. Le bassin de Sépénédiokaha est le plus anthropisé avec un écart de variation de -63. En revanche, le bassin de Dékokaha est modérément anthropisé avec un écart de variation de - 41.

Tableau 6 : *Évolution des coefficients de rétention des bassins versants entre 1986 et 2017*

Bassins versants	Capacité de Rétention		Ecart de variation
	1986	2017	
Sépénédiokaha	133,83	71,00	- 62,83
Dékokaha	128,34	87,27	- 41,07

4. Discussion

4-1. Dynamique de l'occupation du sol des différents bassins versants

L'analyse des images satellitaires et des données issues des campagnes de terrain a permis de dégager la tendance générale de la dynamique de l'occupation des sols des deux bassins versants d'étude. Cette tendance révèle l'augmentation de la savane, des cultures et des sols nus entre 1986 et 2017 dans les bassins versants des barrages d'étude. Cette tendance est la même que celle révélée par des études dans la même localité [22]. Aussi, des études réalisées en Afrique de l'Ouest ont déjà montré que la déforestation se fait à une vitesse inquiétante [23, 24]. Cette analyse de la dynamique de l'occupation du sol a également révélé l'anthropisation des deux bassins versants d'étude avec des coefficients de rétention inférieurs à 100. L'anthropisation croissante de ces bassins versants durant cette période s'est traduite par une nette altération des états de surface. La pression anthropique sur le couvert végétal se caractérise par l'exploitation incontrôlée des formations végétales. Elle se caractérise par la pratique de l'agriculture extensive [25] sur

brûlis (défrichements, coupes sélectives et abusives, etc.). L'anthropisation des bassins est confirmée par un auteur qui affirme que la pression anthropique est très forte sur les ressources végétales autour de cette aire protégée et la réserve de la Comoé Léraba (zone en amont des bassins d'étude) [26]. Cette pression anthropique sur les savanes boisées a également été signalée [27]. Cependant, cette tendance est contradictoire aux résultats obtenus par certains auteurs qui affirment que l'amélioration constatée des conditions pluviométriques à partir du milieu des années 1990, même si elle reste modérée, a engendré une progression de la couverture végétale perceptible par télédétection, appelée "reverdissement" du Sahel [28, 29].

4-2. Détection de tendance et de rupture dans les séries climatiques

L'analyse de la pluviométrie sur la chronique 1986-2017 n'a pas permis de dégager une tendance réelle. Cependant, certaines tendances ne sont pas jugées significatives du point de vue statistique alors qu'elles pourraient avoir des intérêts du point de vue pratique [30]. Même si le changement climatique existe, il ne peut pas être détecté à un niveau de significativité satisfaisant [31]. Par ailleurs, la tendance linéaire déterminée à partir de la pente de Sen montre, quant à elle, une hausse de la pluviométrie sur la chronique d'étude. Cette hausse a été mentionnée [32]. Selon ces auteurs, la baisse pluviométrique s'est intensifiée au cours des années 1980 et 1990 avant de connaître une légère hausse dans les années 2000. En revanche une étude plus récente montre une baisse non significative de la pluviométrie dans la même zone d'étude [33].

4-3. Amplitude des tendances des coefficients d'écoulement moyens annuels

Les apports importants ont été constatés dans les bassins entre 2009 et 2012 alors que la pluviométrie pendant la même période est restée quasi-constante. Cela pourrait se justifier par l'augmentation des coefficients d'écoulement. L'analyse de l'amplitude des tendances des apports d'eau dans les barrages a montré une hausse des écoulements. Les coefficients d'écoulement ont également augmenté sur tous les deux sous bassins d'étude. La moyenne calculée est de 24 % pour l'ensemble des bassins. Dans la même région (Korhogo), une étude menée sur 33 petits bassins a révélé que les valeurs annuelles des coefficients d'écoulement calculés pour chacun des bassins avaient une moyenne égale à 23,2 % [4]. Par ailleurs, l'étude a montré que les variations des coefficients d'écoulement paraissent directement liées aux fluctuations des précipitations et de l'anthropisation des bassins versants entre 1986 et 2017. Ces dynamiques globales ont un fort impact sur les coefficients d'écoulement et le ruissellement des bassins-versants, et donc sur le fonctionnement hydrologique des retenues [4]. En somme, l'évolution croissante des écoulements dans les barrages serait favorisée par l'anthropisation des bassins. Le cas spécifique du bassin de Sépénédiokaha est très indicatif : son taux de changement des écoulements est de 39 % et le coefficient moyen d'écoulement de 24 % sur la chronique 1986-2017. Dans la même période, la classe culture-habitats/sols nus associée à l'anthropisation du bassin versant augmente de près de 27%. L'augmentation du ruissellement peut être due à la conversion des zones naturelles en zones anthropisées. Les modifications des états de surface affectent, en effet, depuis quelques années, de façon très importante, l'hydrologie des régions de savane africaine et du Sahel [34].

5. Conclusion

Cette étude est un apport additionnel et appréciable au développement des outils de gestion durable des petits réservoirs d'eau. Elle montre clairement l'influence des états de surface sur les écoulements. Alors que sur la chronique d'étude on observe une quasi stationnarité de la pluie, les écoulements dans les deux barrages sont à la hausse avec des taux variant de 34 à 39 % et une valeur moyenne de 26 %. Aussi l'étude

montre la savanisation et l'emprise des activités anthropiques sur les deux bassins avec des coefficients de rétention inférieurs à 100. La dégradation des états de surface est donc un accélérateur important des écoulements dans les barrages. Par le passé les déficits pluviométriques constituaient l'une des principales contraintes au remplissage des réservoirs d'eau. Aujourd'hui, si l'augmentation de l'anthropisation des bassins versants continue, les barrages pourraient être exposés au phénomène d'envasement et d'inondation.

Références

- [1] - E. VISSIN, "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 (France), (2007) 286 p.
- [2] - G. I. L. MAHE, C. LEDUC, A. AMANI, J. E. PATUREL, S. A. B. I. N. E. GIRARD, E. SERVAT and A. DEZETTER, "Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau", *Iahs Publ.*, Vol. 278, (2003) 215 - 222
- [3] - A. M. KOUASSI, "Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire", Thèse de Doctorat unique, Université de Cocody (Côte d'Ivoire), (2007) 210 p.
- [4] - P. CECCHI, F. GOURDIN, S. KONE, D. CORBIN, J. ETIENNE and A. CASENAVE, "Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire : inventaire et potentialités hydrologiques", *Sci. Chang. planétaires / Sécheresse*, Vol. 20, N° 1 (2009) 112 - 122
- [5] - T. OUATTARA, J. P. DUBOIS and Q. H. J. GWYN, "Méthode de cartographie de l'occupation des terres en milieu aride à l'aide de données multisources et de l'indice de végétation tsavi", *Télétection*, Vol. 6, N° 4 (2006) 291 - 304
- [6] - Y. A. B. ZANNOU, "Analyse et Modélisation du Cycle Hydrologique Continental pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Bénin Cas du Bassin de l'Ouémé à Bétérou", Thèse de Doctorat unique Université d'Abomey-Calavi, Cotonou (Bénin), (2011) 210 p.
- [7] - C. DE FRAITURE, G. N. KOUALI, H. SALLY and P. KABRE, "Pirates or pioneers? Unplanned irrigation around small reservoirs in Burkina Faso", *Agric. Water Manag.*, N° 131 (2014) 212 - 220 p.
- [8] - P. HUBERT, E. SERVAT, J. E. PATUREL, B. KOUAME, H. BENDJOUDI, J. P. CARBONNEL and H. LUBES-NIEL, "La procédure de segmentation, 10 ans après". In E.SERVAT, D. HUGUES, J.M.FRITSCH and M. HULME (éds.) : "Water resources variability in Africa during the XXth century", *IAHS Publ.*, Vol. 73, (1998) 252 - 267
- [9] - F. GOURDIN, P. CECCHI, S. KONE, D. CORBIN, J. ETIENNE, S. KONE and A. CASENAVE, "Caractérisation hydrologique des petits barrages" In : "L'eau en partage : Les petits barrages de Côte d'Ivoire" [en ligne]. *Marseille : IRD Éditions*, (2007) 75 - 95. <http://books.openedition.org/irdeditions/5569> (19 octobre 2021)
- [10] - J. ANDRIEU, "Land cover changes on the West-African coastline from the Saloum Delta (Senegal) to Rio Geba (Guinea-Bissau) between 1979 and 2015", *Eur. J. Remote Sens.*, Vol. 51, N° 1 (2018) 314 - 325
- [11] - P. DUBREUIL and G. VILLAUME, "Influence du milieu physicoclimatique sur l'écoulement de petits bassins intertropicaux", *Publication-AISH*, Vol. 117, (1975) 205 - 215
- [12] - L. COULIBALY, "Impacts de la dynamique de l'occupation du sol et des variations climatiques sur le fonctionnement hydrologique des petits réservoirs d'eau de surface : cas de la sous-préfecture de Ferkessédougou (Nord de la Côte d'Ivoire)", Thèse de Doctorat unique, Université Nangui Abrogoua, (2018) 180 p.

- [13] - C. CHATELAIN, "Possibilités d'application de l'imagerie satellitaire à haute résolution pour l'étude des transformations de la végétation en Côte d'Ivoire forestière", Thèse de Doctorat unique, Université de Genève, Suisse, (1996) 158 p.
- [14] - Y. S. S. BARIMA, N. BARBIER, I. BAMBA, D. TRAORE, J. LEJOLY and J. BOGAERT, "Dynamique paysagère en milieu de transition forêt-savane ivoirienne", *Bois Forêts des Trop.*, Vol. 299, N°1 (2009) 15 - 25
- [15] - S. CHALIFOUX, M. NASTEV, C. LAMONTAGNE, R. LATIFOVIC and R. FERMANDES, "Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie", *Téledétection.*, Vol. 6, N°1 (2006) 9 - 17
- [16] - P. CECCHI, "Les petits barrages au Burkina Faso : un vecteur du changement social et de mutation des réalités rurales. *Pre-Forum Mondial de l'Eau*", (2006) 12 p.
- [17] - P. CECCHI, F. GOURDIN, S. KONE, J. ETIENNE and A. CASENAVE, "Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire : Inventaire et potentialités hydrologiques", *Sécheresse*, Vol. 20, N°1 (2009) 112 - 122
- [18] - F. LEMAITRE, "Recensement des tests de détection de tendances ou de ruptures adaptés à l'analyse de stationnarité des régimes de crues en France. Rapport de fin d'étude TPE, CEMAGREF", (2002) 94 p.
- [19] - U. KRISHNA, "*Studies in low and flood flow estimation for Irish River Catchments*", Phd University of Ireland, Galway., (2012) 312 p.
- [20] - Z. W. KUNDZEWICZ and A. J. ROBSON, "Change detection in hydrological records-a review of the methodology/revue méthodologique de la détection de changements dans les chroniques hydrologiques", *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 49, N°1 (2004) 7 - 19
- [21] - M. I. P. DE LIMA, S. C. P. CARVALHO and J. L. M. P. DE LIMA, "Investigating annual and monthly trends in precipitation structure : an overview across Portugal", *Sci. Nat. Hazards Earth Syst.*, Vol. 10, N°11 (2010) 2429 - 2440
- [22] - L. COULIBALY, K. H. KOUASSI, G. E. SORO and I. SAVANE, "Analyse du processus de savanisation du nord de la Côte d'Ivoire par télédétection : cas du département de Ferkessédougou", *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, Vol. 17, N°1 (2016) 136 - 143
- [23] - K. ADJONOU, O. DJIWA, Y. KOMBATE, A. KOKUTSE and K. KOKOU, "Étude de la dynamique spatiale et structure des forêts denses sèches reliques du Togo : implications pour une gestion durable des aires protégées", *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, Vol. 4, N° 1 (2010) 168 - 183
- [24] - I. BIGA, A. AMANI, I. SOUMANA, M. BACHIR and A. MAHAMANE, "Dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols des communes de Torodi, Gothèye et Tagazar de la région de Tillabéry au Niger", *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, Vol. 14, N°3 (2020) 949 - 965
- [25] - M. R. TSEWOUE, M. TCHAMBA, M. L. AVANA and A. D. TANOUGONG, "Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le Moungo, Région du Littoral, Cameroun : influence sur l'expansion des systèmes agroforestiers à base de banSci", *Int. J. Biol. Chem. aniers.*, Vol. 14, N°2 (2020) 486 - 500
- [26] - A. GNOUMOU and A. ADOUABOU, "Étude de la dynamique spatio-temporelle de la réserve de la ComoéLéraba et de ses terroirs environnants (Burkina Faso, Afrique de l'Ouest)", *J. Appl. Biosci.*, Vol. 157, (2021) 16213 - 16222
- [27] - A. MAMA, "Déforestation, savanisation et développement agricole des paysannes de savanes forêts dans la zone soudano-guinéenne du Bénin", *Bois For, Trop.*, Vol. 322, (2014) 1 - 11
- [28] - R. FENSHOLT and K. RASMUSSEN, "Analysis of trends in the Sahelian "rain-use efficiency" GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data" *Remote Sens. Environ.*, Vol. 115, N°2 (2011) 438 - 451 p. , doi: DOI : 10.1016/j.rse.2010.09.014
- [29] - C. DARDEL, L. KERGOAT, P. HIERNAUX, E. MOUGIN, M. GRIPPA and C. J. TUCKER, "Re-greening Sahel : 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger).", *Remote Sens. Environ.*, Vol. 140, (2014) 350 - 364

- [30] - A. BASISTHA and C. R. NELSON, “*New Measures of the Output gap Based on the Forward-Looking New Keynesian Phillips Curve*”, *J. Monet. Econ.*, Vol. 54, N°2 (2007) 498 - 511
- [31] - M. W. RADZIEJEWSKI and Z. KUNDZEWICZ, “*Detectability of changes in hydrological records*”, *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 49, N°1 (2004) 39 - 51
- [32] - Y. T. BROU, “*Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d’Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présentées en vue de l’obtention de l’Habilitation à Diriger des Recherches*”, Université des Sciences et Techniques de Lille, (France), (2005) 106 p.
- [33] - F. Z. YAO, E. REYNARD, I. OUATTARA, Y. A. N’GO, J.-M. FALLOT and I. SAVANE, “*A New Statistical Approach to Assess Climate Variability in the White Bandama Watershed, North-Tern Côte d’Ivoire*”, *Atmos. Climate Sci.*, Vol. 8, (2018) 410 - 430, doi: <https://doi.org/10.4236/acs.2018.84027>
- [34] - A. CASENAVE and C. VALENTIN, “*Les états de surface de la zone sahélienne : “influence sur l’infiltration. Edition de l’ORSTOM, Paris*”, *Collect. Didact.*, (1989) 229 p.