

Impact de la répartition spatiale de la pluviométrie et de l'occupation du sol sur la recharge des aquifères du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire

[Impact of spatial distribution of rainfall and land use on aquifer recharge in the Bandama watershed in Côte d'Ivoire]

Alexis Kassi Kouamé¹, Christian Gnangui Adon², Michel Amani Kouassi³, Aimé Koudou⁴, and Fernand Koffi Kouamé²

¹Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement (DSTEGE), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

²Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

³Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (SteRMi), Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

⁴Département des Sciences de l'Environnement (DES), Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

Copyright © 2019 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: The spatial distribution of rainfall and land use has important consequences for the hydrological and hydrogeological behaviour of a watershed. This study aims to better understand the impact of this distribution on aquifer recharge in the Bandama watershed. The spatialization of rainfall from isohyets, shows that it varies between 1200 mm and 1700 mm. The basin displays five (5) classes of land use that are: (1) dense forests, (2) open forests and / or savannahs, (3) shrub savannas, (4) bare soils and localities, and (5) water. The water balance shows that the excess which gives the surface flow and seepage is 348 mm upstream (Korhogo), and only 119 (Yamoussoukro) downstream. The total amount of water flowing over the Bandama basin at Yamoussoukro is 164.86 mm; which corresponds to an annual volume of run-off water of 4.33810^9 m³. The infiltrated water slide is 73.18 mm; which equates to an annual quantity of infiltrated water of 1.87410^9 m³.

KEYWORDS: Bandama; watershed; climate; land use; recharge.

RÉSUMÉ: La répartition spatiale de la pluviométrie et de l'occupation du sol a des conséquences importantes sur le comportement hydrologique et hydrogéologique d'un bassin versant. Cette étude vise une meilleure connaissance de l'impact de cette répartition sur la recharge des aquifères dans le bassin versant du Bandama. La spatialisation de la pluviométrie à partir des isohyètes, montre que celle-ci varie entre 1200 mm et 1700 mm. Le bassin affiche cinq (5) classes d'occupation du sol que sont : (1) forêts denses, (2) forêts claires et/ou savanes arborées, (3) savanes arbustives, (4) sols nus et localités, et (5) eau. Le bilan hydrologique montre que l'excédent qui donne l'écoulement superficiel et l'infiltration est de 348 mm en amont (Korhogo), et seulement de 119 (Yamoussoukro) en aval. La lame totale d'eau ruisselée sur le bassin du Bandama à Yamoussoukro est de 164,86 mm ; ce qui correspond à un volume annuel d'eau ruisselée de $4,338 10^9$ m³. La lame d'eau infiltrée est de 73,18 mm ; ce qui équivaut à une quantité annuelle d'eau infiltrée de $1,874 10^9$ m³.

MOTS-CLEFS: Bandama; bassin versant; climat; occupation du sol; recharge.

1 INTRODUCTION

L'occupation du sol peut être succinctement définie comme la couverture biophysique de la surface des terres émergées [1]. Elle peut être influencée par la répartition spatiale de la pluviométrie et avoir des conséquences importantes sur le comportement hydrologique et hydrogéologique d'un bassin versant. L'objectif principal de ce travail est de montrer le lien entre la répartition spatiale de la pluviométrie, l'occupation du sol et la recharge des aquifères dans le bassin versant du Bandama. Plusieurs travaux réalisés en Côte d'Ivoire soulignent une modification de l'occupation du sol [2], [3], [4], [5] et une variation spatiale de la pluviométrie [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. On est donc amené à se demander si les variations de la pluviométrie et de l'occupation du sol observées ont pu affecter la recharge des aquifères du bassin.

2 DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Le bassin versant du Bandama s'étend du Nord au Sud de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°14'N et 10°21'N et les longitudes 4°W et 7°W. Il a une superficie de 97 000 km² et une forme rectangulaire. Il est drainé par le fleuve Bandama et ses deux principaux affluents : la Marahoué et le N'zi. Ce fleuve, d'une longueur de 1 050 km, est le seul parmi tous les grands fleuves de la Côte d'Ivoire dont le bassin versant est entièrement en territoire ivoirien. Il prend sa source à une altitude de 480 m, entre Korhogo et Boundiali. Après une orientation E-W de son cours supérieur jusqu'à Ferkessedougou, il prend une direction N-S. De Ferkessedougou à sa confluence avec le Bou, le Bandama décrit une succession de nombreux méandres. Au droit de Kossou, la vallée se resserre notablement. C'est à cet endroit qu'est construit depuis 1971 le barrage de Kossou (le plus important barrage hydroélectrique du pays). Peu après Kossou, il reçoit la Marahoué ou Bandama rouge, long de 550 km. Le Bandama prend ensuite une direction NW-SE jusqu'à sa confluence avec le N'zi, affluent long de 725 km. Il reprend ensuite une direction N-S jusqu'à son embouchure à Grand-Lahou [14]-[15]. La zone d'étude est limitée par les bassins versants du Niger et de la Comoé au Nord, les bassins versants du Boubo, de l'Agnéby et l'océan atlantique au Sud, le bassin versant de la Comoé à l'Est et le bassin versant du Sassandra à l'Ouest (Figure 1).

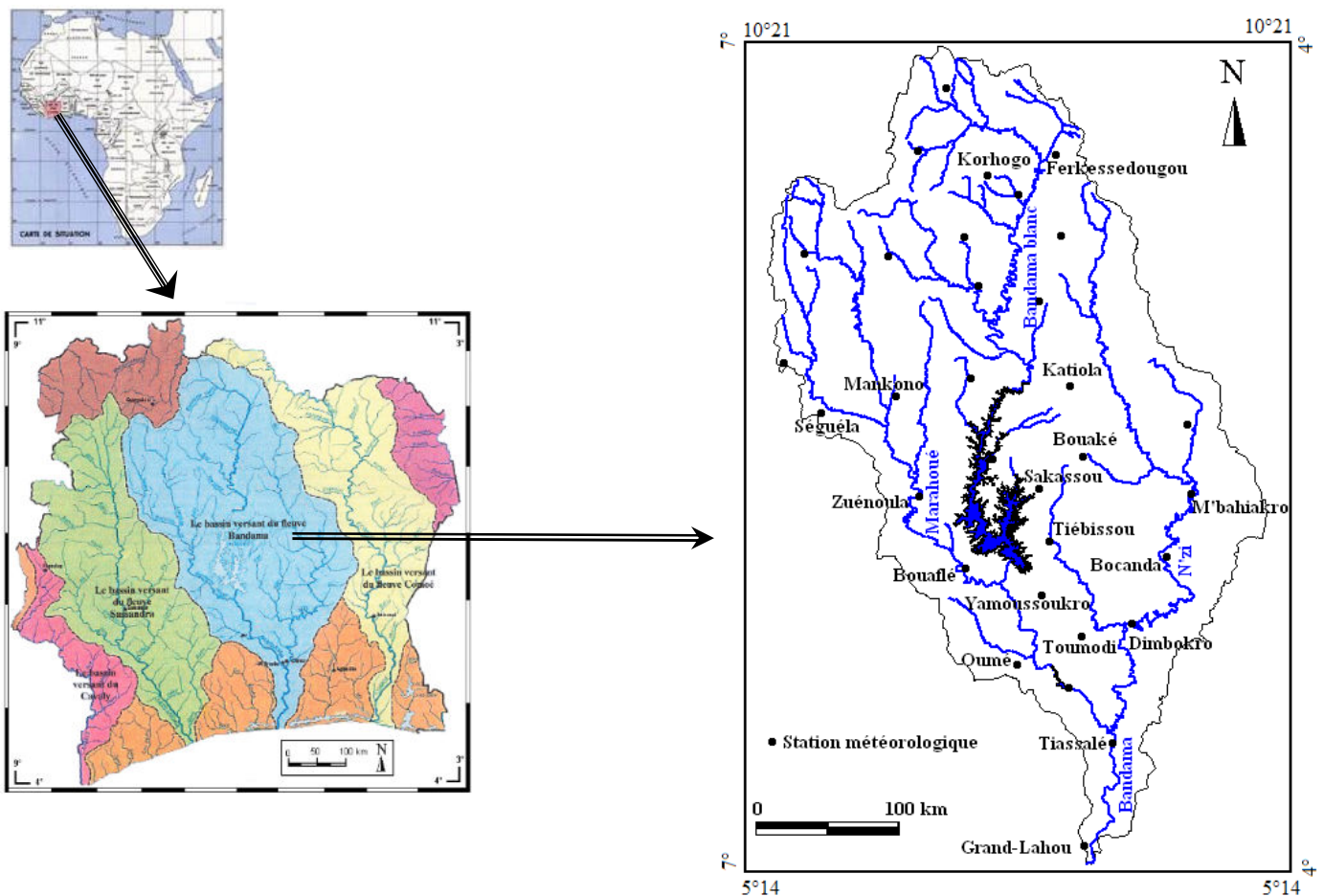


Fig. 1. Carte de présentation du bassin versant du Bandama

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 DONNÉES

3.1.1 DONNÉES CLIMATIQUES

Cette étude a été réalisée à l'aide des données météorologiques des stations de Yamoussoukro, de Bouaké et de Korhogo pour la période 1981-2010, fournies par la SODEXAM située à l'aéroport Félix Houphouët Boigny d'Abidjan. Les données pluviométriques de la station de Korhogo caractérisent le climat soudanais (partie amont du bassin) ; celles de la station de Yamoussoukro correspondent au climat baouléen (partie aval du bassin) et la station de Bouaké permet d'étudier les variations en zone de transition climatique (partie centrale du bassin).

3.1.2 DONNÉES PHYSIOGRAPHIQUES

La base de données physiographiques du bassin versant du Bandama est composée de :

- - une carte du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) couplé au réseau hydrographique [7] ;
- - une carte des barrages [12] ;
- - une carte d'occupation du sol de 2006 [7] ;
- - une carte des propriétés hydrauliques des sols [7].

3.2 MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

L'étude climatologique consiste à établir la variation moyenne mensuelle de la pluviométrie au cours de l'année sur la période 1981-2010. Cette variation saisonnière de la pluie est ensuite mise en évidence d'amont en aval du bassin versant à partir de la répartition spatiale des isohyètes.

3.2.1 BILAN HYDROLOGIQUE SELON LA MÉTHODE DE THORNTHWAITTE

C'est une méthode empirique basée sur les températures. La formule de l'ETP a été établie à partir d'un ajustement statistique des mesures expérimentales de l'ETP sur les cases lysimétriques aux données climatologiques. Elle se définit par l'expression suivante :

$$ETP(mm/j) = 16 \times \left(\frac{10t}{I} \right) \times a \times F(\lambda)$$

Avec : t : température moyenne de la période considérée en °C ; a : Fonction complexe de l'indice thermique I.

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

I : indice thermique annuel (somme des douze indices thermiques mensuels (i) calculés par la formule) :

$$i = \left(\frac{\theta}{5} \right)^{1,514}$$

θ : Température du mois considéré en °C ; F (λ) = Facteur correctif qui est fonction de la latitude du lieu considéré.

La Figure 2 montre l'organigramme de calcul du bilan hydrologique selon Thornthwaite.

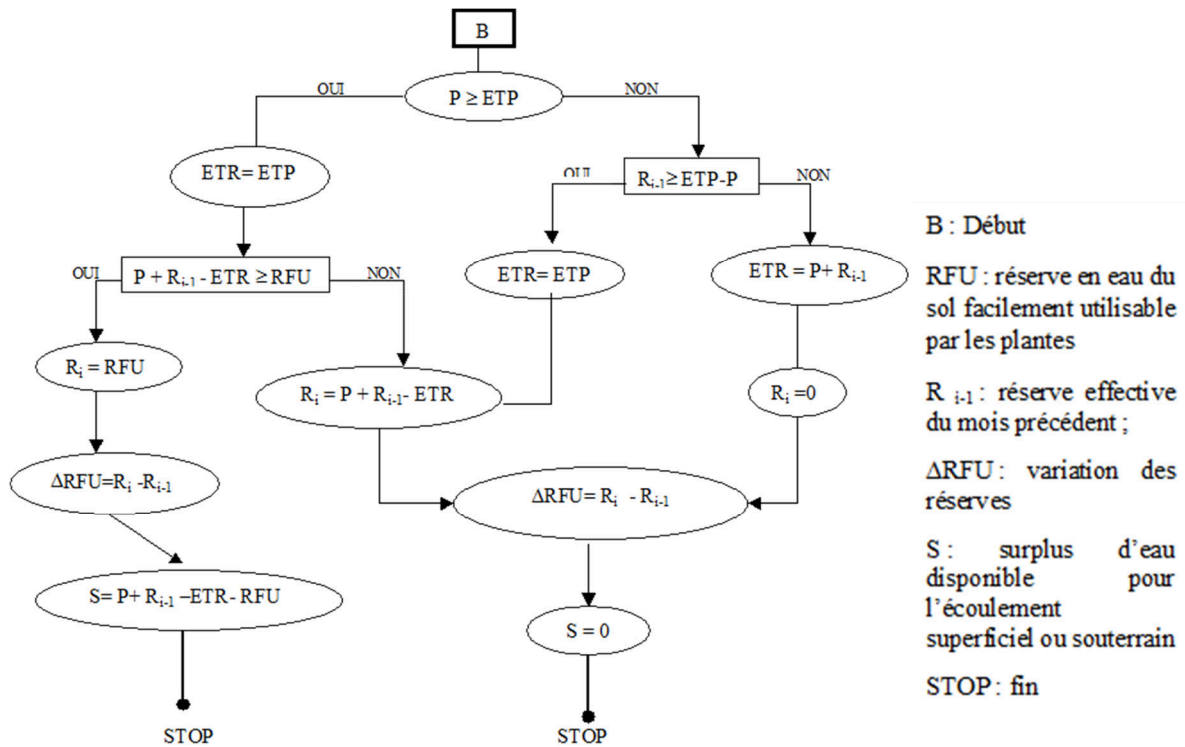


Fig. 2. Organigramme de calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite [16]

3.2.2 CALCUL DU RUISSELLEMENT

La détermination de la quantité d'eau ruisselée s'est faite à partir de la formule suivante :

$$R = \frac{Q \times t}{S}$$

Avec : t = temps en secondes ; S = superficie du bassin en m² ; Q = débit en m³.s⁻¹ ; R = ruissellement en m.

3.2.3 CALCUL DE L'INFILTRATION

L'infiltration est liée au type de sol, à l'état de fracturation du substratum mais aussi à la densité du couvert végétal. C'est pourquoi au cours d'une étude régionale, il est préférable de prendre les résultats globaux. L'utilisation de la méthode du bilan hydrologique de Thornthwaite permet de déterminer la valeur de l'excédent du bilan (P – ETR). Il représente en fait, la somme de l'infiltration (I) et du ruissellement (R).

$$(P - ETR) = I + R$$

$$I = (P - ETR) - R$$

Avec : P = Précipitation moyenne annuelle en mm ; ETR = Évapotranspiration réelle moyenne annuelle en mm ; R = Ruissellement moyen annuel en mm ; I = Infiltration moyenne annuelle en mm.

Puis en multipliant l'infiltration (I en m) par la superficie du bassin versant (S en m²), on détermine le volume d'eau infiltrée (V en m³).

4 RÉSULTATS

4.1 VARIATION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DU BASSIN VERSANT DU BANDAMA

4.1.1 PLUVIOMÉTRIE SAISONNIÈRE

La variation de la pluviométrie moyenne mensuelle dans le bassin versant du Bandama au cours de la période 1981-2010 est donnée par la Figure 3.

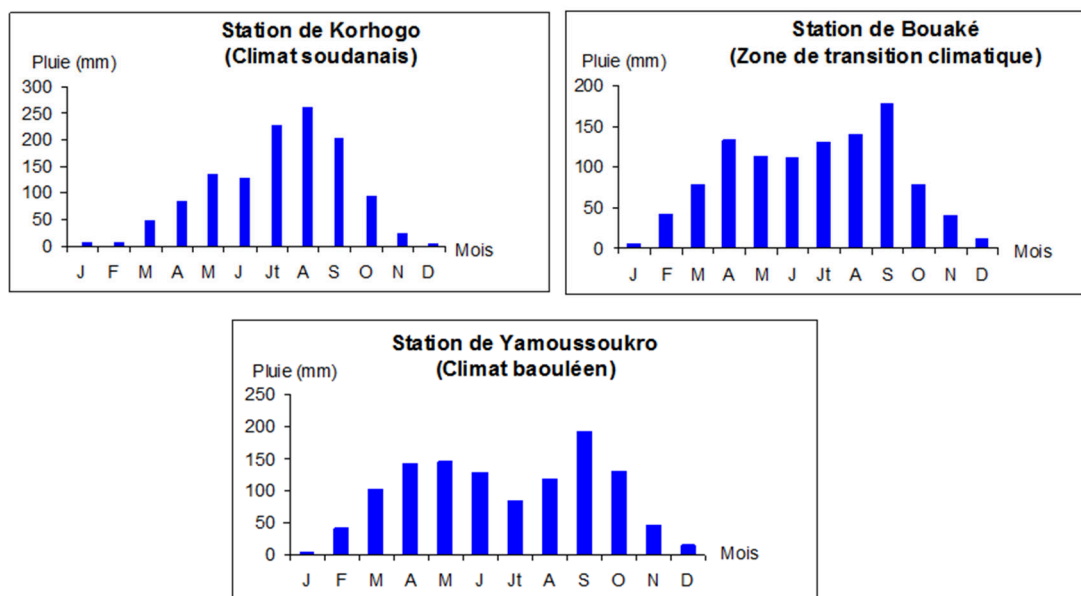


Fig. 3. Pluviométrie moyenne mensuelle du bassin versant du Bandama (1981 à 2010)

L'analyse de la Figure 3 montre que :

- A la station de Korhogo, il existe deux saisons ; une saison pluvieuse d'avril à octobre (7 mois) et une saison sèche de novembre à mars (5 mois). Cela correspond au climat tropical de transition (climat soudanais).
- A la station de Yamoussoukro, il en existe quatre ; une première saison des pluies de mars à juin (5 mois), une baisse des précipitations de juillet à août (2 mois), une deuxième saison des pluies de septembre à octobre (2 mois) et une saison sèche marquée de novembre à février (4 mois). Ce qui correspond au climat équatorial de transition atténué (climat baouléen).

A la station de Bouaké, la pluviométrie reste généralement intermédiaire entre celles de Korhogo et Yamoussoukro. C'est la preuve que Bouaké est une zone de transition climatique.

4.1.2 RÉPARTITION SPATIALE DES ISOHYÈTES

Les hauteurs de précipitations annuelles du bassin versant du Bandama varient entre 1200 et 1700 mm (Figure 4). Cette variation se fait de façon symétrique par rapport au centre du bassin (Bouaké). En effet, la pluviométrie augmente de 1200 mm à 1400 mm en amont (Niellé) d'une part, et de 1200 mm à 1700 mm en aval (Grand-Lahou), d'autre part.

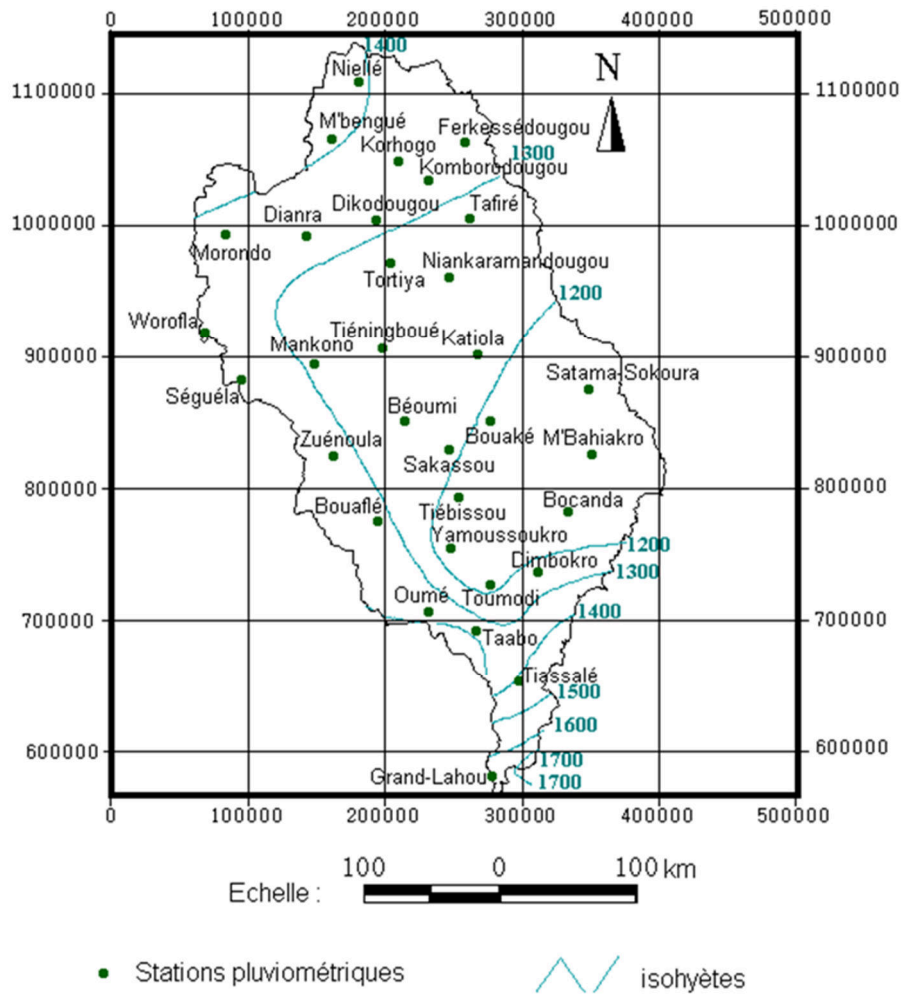
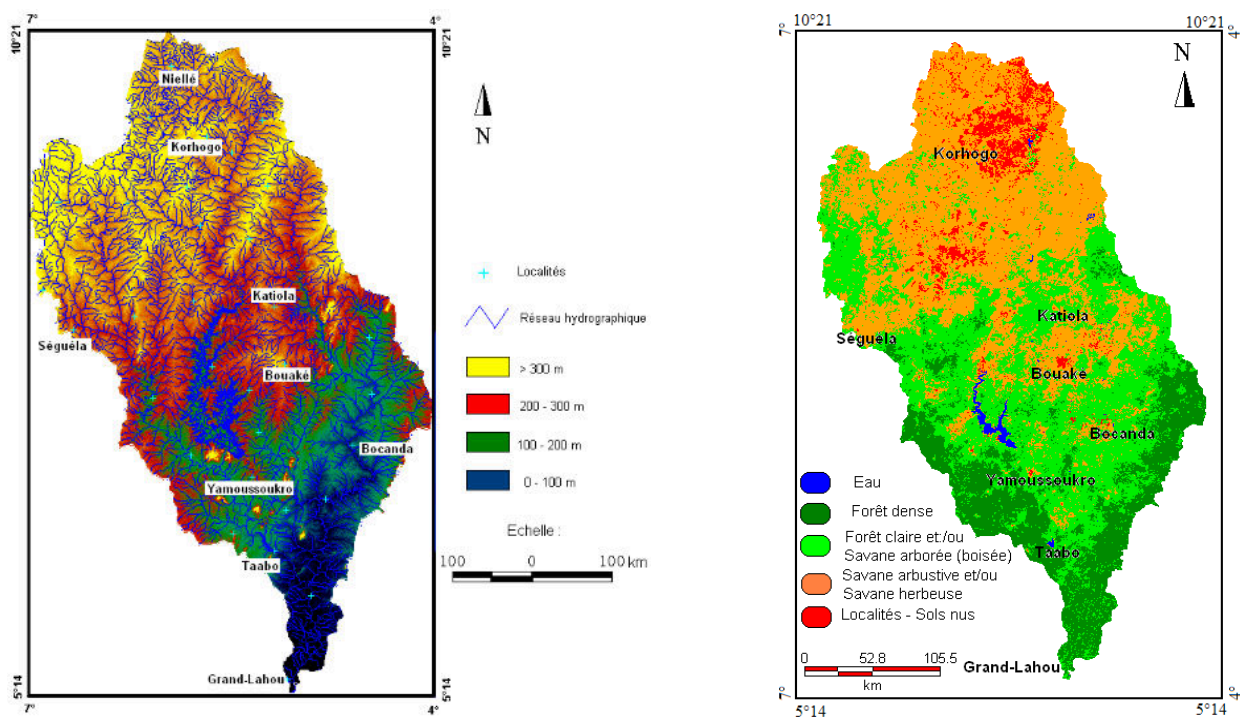


Fig. 4. Répartition spatiale de la pluviométrie du bassin versant du Bandama

La répartition spatiale de la pluviométrie s’explique par une augmentation la topographie dans la partie amont (Figure 5-a). En effet, du centre au Nord du bassin, nous passons de la région de la vallée du Bandama (200 m d’altitude) au prolongement de la chaîne montagneuse du Fouta-Djalon (plus de 300 m d’altitude). Dans la partie aval, elle est due à un changement de la végétation qui passe de la savane à la forêt dense (Figure 5-b). La prise en compte des états de surface est très importante dans la caractérisation du fonctionnement d’un hydrosystème. Le croisement de ces données spatiales permet de prendre en compte l’influence des états de surface sur les processus hydrologiques.



a-MNA couplé au réseau hydrographique

b- Occupation du sol

Fig. 5. Carte des états de surface du bassin versant du Bandama [7]

4.2 EVALUATION DE LA RECHARGE DES AQUIFÈRES

4.2.1 BILAN HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU BANDAMA

- Station de Korhogo (climat soudanais)

Les valeurs des différents paramètres du bilan hydrologique, calculées à la station de Korhogo pour la période 1981-2010 sont consignées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Résultats du bilan hydrologique à la station de Korhogo (1981-2010)

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
Pluie (mm)	7,04	5,98	49	83,8	135	127	227	260	201	95,2	22,9	5,02	1220
ETP (mm)	134	172	206	187	167	136	116	113	111	122	137	131	1732
ETR (mm)	7,04	5,98	49	83,8	135	127	116	113	111	122	96,1	5,02	970
Réserves utiles (Si)	0	0	0	0	0	0	11	47	90	0	0	0	148
Réserve du sol (Ri)	0	0	0	0	0	0	100	100	100	73,2	0	0	373,2
dRFU (mm)	0	0	0	0	0	0	100	0	0	-26,8	-73,2	0	0
ETP-ETR (Déficit en mm)	127	166	157	103	32	9	0	0	0	0	41	126	761
P-ETR (Excédent en mm)	0	0	0	0	0	0	111	147	90	0	0	0	348

D'une manière générale, l'évapotranspiration potentielle (1732 mm) est bien supérieure aux précipitations de la région (1220 mm). Par conséquent, les plantes ne disposant pas de quantités d'eau nécessaires à leur croissance complète se contentent d'une évapotranspiration réelle de 970 mm, imposée par les conditions naturelles d'humidité du sol.

En considérant mois par mois, l'effet de la recharge par la pluie (P) et de la baisse par l'évapotranspiration potentielle (ETP), on distingue deux (2) principaux cas correspondant aux deux grandes saisons de la région :

- **P >> ETP** : caractérise surtout les mois de juillet, août et septembre, c'est la saison des pluies qui débute au mois d'avril. En saison humide, la précipitation (227 ; 260 et 201 mm) est nettement supérieure à l'évapotranspiration (116 ; 113 et 111 mm). Dans ces conditions, l'évapotranspiration se réalise sans difficulté (ETR=ETP) et la RFU est saturée (RFU=100 mm). Durant ces trois mois, l'excédent P-ETR (348 mm), qui correspond à la pluie efficace, va s'écouler soit vers les cours d'eau de surface, soit en profondeur en direction des nappes.

- **P << ETP** : c'est la saison sèche qui correspond aux mois de novembre, décembre, janvier, février, mars et avril. Cette saison sèche influence tant les deux premiers mois pluvieux (avril et mai) que le dernier (octobre). Partout, la pluie étant très inférieure à l'évapotranspiration (22,9 ; 5,02 ; 7,04 ; 5,98 ; 49 ; 83,8 ; 135 ; 127 ; et 95,2 mm contre 137 ; 131 ; 134 ; 172 ; 206 ; 187 ; 167 ; 136 et 122 mm pour l'ETP), les réserves facilement utilisables du sol seront en totalité sollicitées par les plantes sans que leur besoin réel ne soit couvert, eu égard au pouvoir absorbant de l'air. La RFU étant épuisée depuis le mois de novembre, l'évapotranspiration ne peut se réaliser uniquement que sur la pluie. En général, à chaque pluie, ETR = P et le déficit du bilan (ETP-ETR ou ETR-ETP) va persister de novembre à mai.

Ainsi, dans le bassin versant du Bandama, les valeurs des différents paramètres du bilan de l'eau à la station de Korhogo sont les suivantes : Pluie = 1220 mm ; ETP = 1732 mm ; ETR = 970 mm ; Excédent = 348 mm ; Déficit = 761 mm.

• **Station de Bouaké (zone de transition)**

Les valeurs des différents paramètres du bilan hydrologique, calculées à la station de Bouaké pour la période 1981-2010 sont consignées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Résultats du bilan hydrologique à la station de Bouaké (1981-2010)

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
Pluie (mm)	6,1	43,2	78,7	133	113	111	130	139	178	77,7	39,2	10,8	1060
ETP (mm)	144	153	166	158	142	115	101	99	101	114	122	126	1541
ETR (mm)	6,1	43,2	78,7	133	113	111	101	99	101	114	102,9	10,8	1014
Réserves utiles (Si)	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	46
Réserve du sol (Ri)	0	0	0	0	0	0	29	69	100	63,7	0	0	262
dRFU (mm)	0	0	0	0	0	0	29	40	31	-36,3	-63,7	0	0
ETP-ETR (Déficit en mm)	137,9	109,8	87,3	25	29	4	0	0	0	0	19,1	115,2	527
P-ETR (Excédent en mm)	0	0	0	0	0	0	29	40	77	0	0	0	146

Nous distinguons ici aussi deux (2) principaux cas correspondant aux deux grandes saisons de la région :

- **P >> ETP** : caractérise surtout les mois de juillet, août et septembre, c'est la saison des pluies qui débute au mois d'avril. En saison humide, les précipitations sont nettement supérieures à l'évapotranspiration : 130 mm, 139 mm et 178 mm respectivement en juillet, août et septembre ; contre 101 mm, 99 mm et 101 mm pour l'ETP. Dans ces conditions, l'évapotranspiration se réalise sans difficulté (ETR=ETP) et la RFU, sous-saturée en juillet et août (29 mm et 69 mm), va atteindre la saturation au mois de septembre (RFU=100 mm). Durant ce mois, l'excédent P-ETR (77 mm), qui correspond à la pluie efficace en septembre, va s'écouler soit vers les cours d'eau de surface, soit en profondeur en direction des nappes. Au contraire, en juillet et août, la RFU étant sous-saturée (29 mm et 69 mm), l'excédent (29 mm + 40 mm = 69 mm) que l'on observe ne sert qu'à l'humidification du sol.

- **P << ETP** : c'est la saison sèche qui correspond aux mois de novembre, décembre, janvier, février et mars. Cette saison sèche influence tant les trois premiers mois pluvieux (avril, mai, juin) que le dernier (octobre). Partout, la pluie étant très inférieure à l'évapotranspiration (39,2 ; 10,8 ; 6,1 ; 43,2 ; 78,7 ; 133 ; 113 ; 111 et 77,7 mm contre 122 ; 126 ; 144 ; 153 ; 166 ; 158 ; 142 ; 115 et 114 mm pour l'ETP), les réserves facilement utilisables du sol seront en totalité sollicitées par les plantes sans que leur besoin réel ne soit couvert, eu égard au pouvoir absorbant de l'air. La RFU étant épuisée depuis le mois de décembre, l'évapotranspiration ne peut se réaliser uniquement que sur la pluie. En général, à chaque pluie, ETR=P et le déficit du bilan (ETP-ETR ou ETR-ETP) va persister de novembre à juin.

Ainsi, dans le bassin versant du Bandama, les valeurs des différents paramètres du bilan de l'eau à la station de Bouaké sont les suivantes : Pluie = 1060 mm ; ETP = 1541 mm ; ETR = 1014 mm ; Excédent = 146 mm ; Déficit = 348 mm.

● **Station de Yamoussoukro (climat baouléen)**

A la station de Yamoussoukro, les valeurs des différents paramètres du bilan de l'eau, calculées pour une période allant de 1981 à 2010, sont portées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Résultats du bilan hydrologique à la station de Yamoussoukro (1981-2010)

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
Pluie (mm)	4,2	42,2	102	142	146	128	84,8	118	192	131	46,5	15,3	1152
ETP (mm)	112	138	155	146	141	120	110	109	110	117	112	99	1469
ETR (mm)	4,2	42,2	102	142	141	120	98,6	109	110	117	112	49,8	1148
Réserves utiles (Si)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,9	0	0	13,9
Réserve du sol (Ri)	0	0	0	0	5,4	13,8	0	9,4	91,3	100	34,5	0	254
dRFU (mm)	0	0	0	0	5,4	8,4	-13,8	9,4	81,9	0	-65,5	-34,5	-8,7
ETP-ETR (Déficit en mm)	108	95,8	53,4	4,2	0	0	11,4	0	0	0	0	49,2	322
P-ETR (Excédent en mm)	0	0	0	0	5,4	8,4	0	9,4	82	13,9	0	0	119

Ici, par contre, il existe quatre (4) principaux cas correspondant aux quatre saisons de la région (Figure 6) :

- **P >> ETP** : caractérise surtout les mois d'août à octobre, c'est la grande saison des pluies. En saison humide, les précipitations sont nettement supérieures à l'évapotranspiration : 118 mm, 192 mm et 131 mm respectivement en août, septembre et octobre contre 109 mm, 110 mm et 117 mm pour l'ETP. Dans ces conditions, l'évapotranspiration se réalise sans difficulté (ETR=ETP) et la RFU va évoluer rapidement pour atteindre la saturation au mois d'octobre (RFU=100 mm). Durant Ce dernier mois, l'excédent P-ETR (13,9 mm), qui correspond à la pluie efficace, va s'écouler soit vers les cours d'eau de surface, soit en profondeur en direction des nappes. Au contraire, en août, la RFU étant sous-saturée (9,4 mm), l'excédent de 9,4 mm d'eau que l'on observe ne sert qu'à l'humectation du sol. Quant au mois de septembre, l'excédent de 82 mm sert à l'humidification du sol.

- **P < ETP** : caractérise surtout le mois de juillet. C'est la petite saison sèche (juillet-août). La pluie (84,8 mm) est très peu inférieure à l'ETP (110 mm). L'évapotranspiration se fait non seulement sur la totalité de la pluie, mais encore sur les réserves du sol, $ETR = P + \Delta RFU$: $98,6 \text{ mm} = 84,8 \text{ mm} + 13,8 \text{ mm}$ au mois de juillet. La RFU s'annule au cours de ce mois (RFU=0 mm). Ainsi, elle n'existe, dans le sol, que dans la période allant de mai à juin et d'août à novembre, période pendant laquelle le bilan de l'eau reste équilibré (ETR-ETP=0), mais elle n'atteint la saturation qu'en octobre.

- **P << ETP** : c'est la grande saison sèche (novembre-février). Partout, la pluie étant très inférieure à l'évapotranspiration (46,5 ; 15,3 ; 4,2 ; 42,2 mm contre 112 ; 99 ; 112 ; 138 mm pour l'ETP). Les réserves facilement utilisables du sol sont en totalité sollicitées par les plantes (RFU = 0) sans que leur besoin réel ne soit couvert eu égard au pouvoir absorbant de l'air. La RFU étant épuisée depuis le mois de décembre, l'évapotranspiration ne peut se réaliser uniquement que sur la pluie. Le déficit du bilan (ETP-ETR ou ETR-ETP) va persister de décembre à avril.

- **P > ETP** : caractérise surtout les mois de mai et juin, c'est la petite saison des pluies (mars-juin). Durant ces deux derniers mois, la pluie (146 mm et 128 mm) est très peu supérieure à l'ETP (141 mm et 120 mm). L'évapotranspiration commence à se réaliser normalement : ETR=ETP et il reste encore une certaine quantité d'eau disponible P-ETR (5,4 mm en mai et 8,4 mm en juin) qui servira à humidifier le sol : c'est la pluie efficace dont le volume sera plus important au mois de septembre (82 mm) pour achever l'humidification complète du sol. Par conséquent, dans cette région la lame totale d'eau d'humidification du sol est de 119 mm.

Ainsi, dans le bassin versant du Bandama, les valeurs des différents paramètres du bilan de l'eau à la station de Yamoussoukro sont les suivantes : Pluie = 1152 mm ; ETP = 1469 mm ; ETR = 1148 mm ; Excédent = 119 mm ; Déficit = 322 mm.

La Figure 6 montre que l'écoulement ne se fait que lorsque la pluviométrie est supérieure à l'évapotranspiration potentielle et qu'à la même époque la réserve en eau facilement utilisable est saturée.

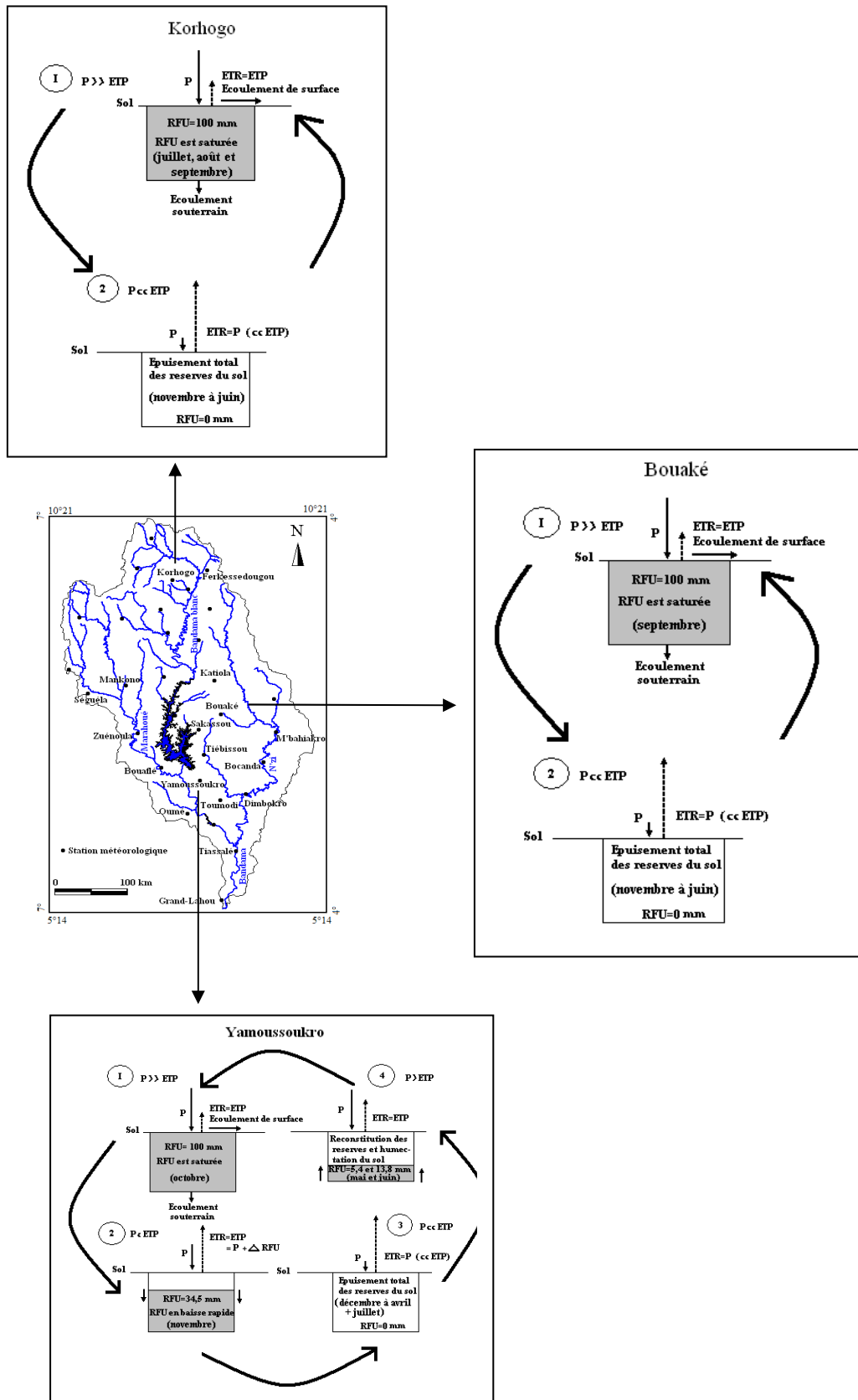


Fig. 6. Schémas des différents cas de calcul du bilan hydrologique dans le bassin versant du Bandama, selon la méthode de Thornthwaite

4.2.2 COMPARAISON DES PARAMÈTRES DU BILAN HYDROLOGIQUE D'AMONT EN AVAL DU BASSIN VERSANT

Les paramètres du bilan hydrologique en amont (climat soudanais), au centre (zone de transition climatique) et en aval (climat baouléen) du bassin versant sont consignés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Comparaison des paramètres du bilan hydrologique

Paramètres (mm)	AMONT (Korhogo)	CENTRE (Bouaké)	AVAL (Yamoussoukro)
Pluie	1220	1060	1152
ETP	1732	1541	1469
ETR	970	1014	1148
Excédent	348	146	119
Déficit	761	527	322

L'analyse du Tableau 4 montre que l'excédent qui donne l'écoulement superficiel et l'infiltration est de 348 mm en amont et seulement de 119 en aval.

L'ETR est plus élevée en aval (1148 mm) qu'en amont (970 mm). Il y a donc une très forte évapotranspiration réelle dans la zone Yamoussoukro. Cela se justifie par le fait que l'évapotranspiration est la résultante de la transpiration des végétaux et l'évaporation des plans d'eau de surface et des sols nus. Ces deux phénomènes exigent, pour leur réalisation, un rayonnement solaire adéquat, mais aussi et surtout d'un intense couvert végétal. Ce qui est le cas dans cette région du bassin où le lac de Kossou (vaste plan d'eau de surface) s'étend au sein d'une très dense végétation (forêt dense et savane guinéenne).

4.2.3 RUISSELLEMENT

Le Tableau 5 nous donne la lame d'eau annuelle la lame totale d'eau ruisselée sur le bassin versant du Bandama à Yamoussoukro.

Tableau 5. Lame d'eau annuelle ruisselée

	Qmoy (m ³ s ⁻¹)	t (s)	S (km ²)	R (mm)	Vr (m ³)
Bandama	133,55	31536 10 ³	52200	164,86	4,338 10 ⁹

La lame totale d'eau ruisselée sur le bassin du Bandama à Yamoussoukro est de 164,86 mm. Le volume annuel d'eau ruisselée est donc de 4,338 10⁹ m³.

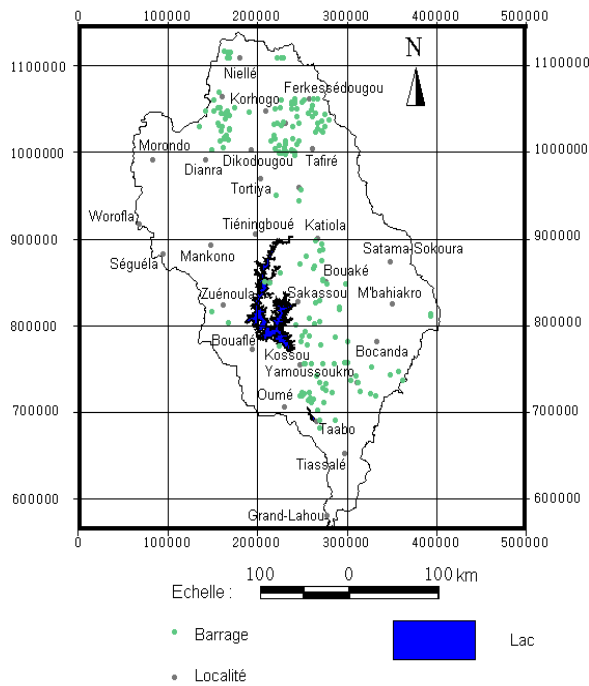
4.2.4 INFILTRATION

Le Tableau 6 nous donne la lame d'eau annuelle infiltrée sur le bassin versant du Bandama à Yamoussoukro.

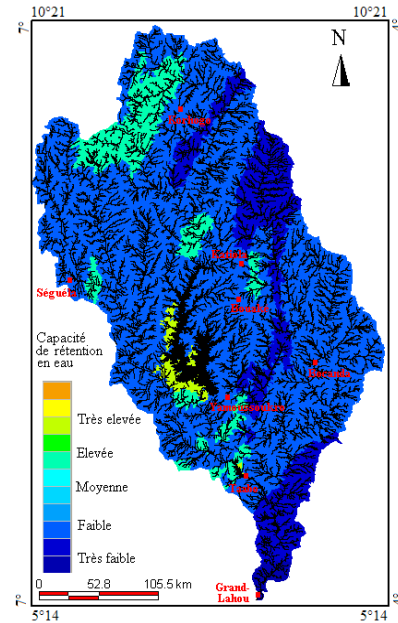
Tableau 6. Lame d'eau annuelle infiltrée

	Excédent (mm)	R (mm)	I (mm)	S (km ²)	Vi (m ³)
Bandama	238	164,86	73,14	52200	1,874 10 ⁹

Ce tableau montre que la quantité totale d'eau infiltrée sur le bassin versant à Yamoussoukro est de 1,874 10⁹ m³. Ces résultats sont fortement influencés par les barrages qu'on rencontre sur le bassin versant (Figure 7-a), notamment celui de Kossou qui impose et régule le débit du Bandama. Par ailleurs, les différents types de sol du bassin ont en général une capacité de rétention en eau faible à très faible (Figure 7-b). Ils sont donc très perméables et favorisent ainsi l'infiltration des eaux de surface.



a-Barrages



b- Propriétés hydrauliques des sols

Fig. 7. Facteurs d'infiltration de l'eau dans le bassin versant du Bandama

5 DISCUSSION

En Côte d'Ivoire, le régime des précipitations est essentiellement lié à l'interaction de deux masses d'air (harmattan et mousson). En Janvier, la trace du contact entre les deux masses d'air, contact appelé «Front Intertropical ou F.I.T. » passe au tiers Sud du pays. La trace au sol du F.I.T. oscille, en moyenne climatologique, entre deux positions extrêmes, respectivement : en janvier (4 à 5° N) et en août (20 à 25° N). En août, le F.I.T. remonte jusqu'au 20^{ème} parallèle pour descendre vers le Sud au début de septembre, jusqu'à occuper sa position initiale de janvier [17]. Les valeurs des paramètres du bilan hydrologique des trois stations étudiées sont du même ordre de grandeur que celles trouvées par [17], à la station de Séguéla, dans le bassin versant de la haute Marahoué au cours de la période 1981-1990. Pour cette station située à la même latitude que celle de Bouaké, cet auteur a obtenu les valeurs suivantes : (Pluie = 1324 mm ; ETP = 1545 mm ; ETR =1172 mm ; Excédent =152 mm ; Déficit = 373 mm).

6 CONCLUSION

Bien que les précipitations soient moyennement élevées (1200 mm en amont et 1700 mm en aval), l'évapotranspiration est très intense dans le bassin. Cependant, la partie nord a une plus forte évapotranspiration potentielle (ETP = 1732 mm) que la partie sud (ETP = 1469 mm) à cause du climat soudanais plus chaud. Cependant, l'évapotranspiration réelle est plus élevée au Sud (ETR = 1148 mm) qu'au Nord (ETR = 970 mm) compte tenu de l'activité végétale importante et de la présence du lac de Kossou. Aussi, le bilan hydrologique du bassin versant a-t-il montré un excédent de 348 mm et un déficit de 761 mm en amont, avec trois mois (juillet, août et septembre) de recharge des nappes. Ce bilan a également montré un excédent de 119 mm et un déficit de 322 mm en aval, avec trois mois (août, septembre et octobre) de recharge des nappes. La lame d'eau infiltrée est de 73,18 mm ; ce qui équivaut à une quantité annuelle d'eau infiltrée de $1,874 \cdot 10^9 \text{ m}^3$.

REMERCIEMENTS

L'acquisition des images satellitaires utilisées dans cette étude a été possible grâce à la collaboration de personnes étrangères via internet. Merci donc à Mr Brett de la NASA pour sa disponibilité et ses conseils avisés depuis le téléchargement des images MODIS-NDVI jusqu'à leur traitement final. Merci également à Dr OUATTARA Adama du CURAT pour la programmation des algorithmes nécessaires à l'exploitation des images MODIS.

REFERENCES

- [1] FAO, "Les conséquences de l'accord sur l'agriculture du cycle d'Uruguay pour les pays en développement", 1998.
- [2] N'guessan K. E., "Etude de l'évolution de la végétation du « V Baoulé » contact forêt/savane en Côte d'Ivoire", In *LAFRANCE, P. DUBOIS, J.M., Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Editions AUPEL*, 1990.
- [3] Kangah A., "Utilisation de la télédétection et d'un système d'information géographique (SIG) pour l'étude des pressions anthropiques sur les paysages géomorphologiques des savanes sub-soudanaises : exemple du degré carré de Katiola (centre-Nord ivoirien)", *Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire*, 186 p., 2006.
- [4] N'da D. H., "Etude et suivi par télédétection et système d'information géographique d'une aire protégée soumise aux pressions anthropiques : cas du parc national de la Marahoué", *Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire*, 139 p., 2007.
- [5] Kouassi A. M., "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 Unique, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire*, 210 p., 2007.
- [6] Kouamé K. F., Bernier M., Fortin J. P., Lefèbre R. et Biémi J., "Application du modèle hydrologique distribué HYDROTEL à la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide : cas du bassin versant du N'zo en Côte d'Ivoire", *12è congrès de l'AQT, Chicoutimi*, 27 p., 2005.
- [7] Kouamé K. A., Kouamé K. F., Kouassi A. M., Oularé S., Adon G. C. R. et Bernier M., "Mise en place d'une base de données pour une modélisation hydrologique distribuée du bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire) : Apport d'un modèle numérique d'altitude, de la télédétection et du SIG Physitel", *Afrique Science*, Volume 07(2), N°12 pp. 94-114, 2011.
- [8] Amessan M., Kouamé F., Lasm T., N'guessan Bi V. H., Aka K. et Biémi J., "Modélisation et simulation des écoulements de surface dans le bassin versant du Bandama blanc : utilisation d'un modèle distribué (HYDROTEL)", *International Journal of Innovation and Scientific Research*, vol. 11, n° 2, pp. 457-470, 2014.
- [9] Adon G. C. R., "Evaluation des potentialités en eau de l'hydrosystème de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire) : apports des données géospatiales, du modèle hydrologique « HYDROTEL » et de l'analyse multicritère", *Thèse unique, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire*, 143 p., 2015.
- [10] Kouamé K. A., Koudou A., Kouamé K. F., Kouassi A. M., Oularé S. et Adon. G. C. R., "Evolution de l'occupation du sol et rythme saisonnier de la végétation du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire", *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, Volume 26, pp. 173-193, 2015.
- [11] Irié G. R., Soro G. E. et Goula Bi T. A., "Récents variations spatio-temporelles des paramètres pluviométriques et leurs impacts sur les écoulements du fleuve Marahoué (Côte d'Ivoire)", *Larhyss Journal*, N° 25, pp. 241-258, 2016.
- [12] Kouamé K. A., Oularé S., ADON G. C. R., Kouamé K. F., Kouassi A. M. et Bernier M., "Un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest)", *Afrique Science*, Vol.12, N°1, pp.237-253, 2016.
- [13] Koudou A., Kouamé K. A., Adjiri O. A., Assémian A. E., Gahi Z. N. and Kouassi A. M., "Spatio-temporal analysis of the impact of rainfall dynamics on the water resources of the N'zi watershed in Côte d'Ivoire", *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, vol. 19 n° 1, pp. 1-14, 2019.
- [14] Camus H., "Hydrologie du Bandama", Tome 1, « Le Bandama Blanc », 89 p., 1972 a.
- [15] Camus H., "Hydrologie du Bandama", Tome 2, « La Marahoué », 81 p., 1972 b.
- [16] Coulibaly K. M., "Evaluation du bilan hydrologique, de la variabilité climatique et du tarissement des cours d'eau par l'application de méthodes mathématiques dans le bassin versant du fleuve Sassandra (région de Buyo en Côte d'Ivoire)", *Mémoire de DEA en Sciences de l'Environnement, Université d'Abobo-Adjamé*, 74 p., 1997.
- [17] Biémi J., "Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire)", *Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale de Côte d'Ivoire*, 493 p., 1992.