

Apport Des Nappes Profondes À L'amélioration De La Desserte En Eau De Consommation Dans Le Bassin Versant Du Kan (Côte d'Ivoire)

Kouassi N'Guessan Fabrice,

Doctorant en Hydroclimatologie, Université Alassane Ouattara,
Laboratoire d'Hydroclimatologie, de Télédétection et d'Environnement
(LHCTE), Côte d'Ivoire

Diomande Beh Ibrahim,

Maître de Conférences en Climatologie, Université Alassane Ouattara,
Laboratoire d'Hydroclimatologie, de Télédétection et d'Environnement
(LHCTE), Côte d'Ivoire

Fossou Jean Kouadio,

Docteur en Géologie, Université Felix Houphouet Boigny, Côte d'Ivoire

Doi:10.19044/esj.2020.v16n24p260 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n24p260](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n24p260)

Résumé

Connaître les zones favorables pour l'alimentation en eau potable dans les régions en quête est une nécessité pour anticiper ce que pourraient être les conséquences sur les sociétés de ces régions. Cet article a pour objectif de contribuer à l'identification des zones potentielles favorables dans le bassin versant du Kan. Pour y parvenir une méthodologie de SIG couplée à l'analyse multicritère et les tests statistiques de détection des différentes ruptures dans les séries chronologiques hydropluviométriques ont été adoptés. Les tests statistiques (Tests de Hubert, de Pettitt et de Lee et Hightman) ont montré une baisse des hauteurs pluviométriques et hydrométriques respectivement dans les stations de Tiébissou (- 6,76 % en 2014 et - 12,22 % en 1976), de Yamoussoukro (+ 6 % en 1993 et - 6,21 % en 1980) et de Dimbobro (+ 2,06 % en 2001 et - 8,72 %) excepté la station de Bouaké (+ 13 % et + 43,91 % en 1993). La structuration de données (images satellitaires, données de forages, géologiques, hydrographiques, etc.) majoritairement obtenues à partir des nouvelles technologies de la géomatique a permis de mettre en place une base de données géospatiales d'analyse. Les zones de socle favorable à l'implantation des forages manuels sont dominées par les classes de l'ordre de bonne et excellente avec un pourcentage de 75 % sur le bassin. Le couplage des zones à potentialité aquifère Excellente et Bonne aux fractures et croisements de fractures productifs met en évidence les sites les plus convenables à l'implantation des futurs forages productifs.

Mots-clés: Nappes, Hydropluviométrie, Forage, Ressource En Eau, Kan

Contribution of Deep Aquifers in the Improvement of Drinking Water Supply in the Kan Watershed (Côte d'Ivoire)

Kouassi N'Guessan Fabrice,

Doctorant en Hydroclimatologie, Université Alassane Ouattara,
Laboratoire d'Hydroclimatologie, de Télédétection et d'Environnement
(LHCTE), Côte d'Ivoire

Diomande Beh Ibrahim,

Maître de Conférences en Climatologie, Université Alassane Ouattara,
Laboratoire d'Hydroclimatologie, de Télédétection et d'Environnement
(LHCTE), Côte d'Ivoire

Fossou Jean Kouadio,

Docteur en Géologie, Université Felix Houphouet Boigny, Côte d'Ivoire

Abstract

A good understanding of the areas suitable as a source of drinking water in the region is of significant importance in anticipating the consequences that might be faced by the societies in these regions. This paper aims to contribute to the identification of suitable potential areas in the Kan watershed. To achieve this, a GIS methodology coupled with multicriteria analysis and statistical tests for the detection of different breaks in the hydropluviometric time series were adopted. Statistical tests (Hubert, Pettitt and Lee, and Higeonian tests) showed a decrease in rainfall and hydrometric heights respectively in the Tiébissou station (- 6,76 % in 2014 and - 12,22 % in 1976), Yamoussoukro station (+ 6 % in 1993 and - 6,21 % in 1980), and Dimbobro station (+ 2.06 % in 2001 and - 8,72 %). The Bouaké station (+ 13 % and + 43,91 % in 1993) was however excluded. The structuring of data (satellite images, drilling, geological, hydrographic data, etc.) mainly obtained from new geomatics technologies has made it possible to set up a geospatial database for analysis. The base areas favourable to the installation of manual drilling are dominated by classes of the order of good and excellent with a percentage of 75 % on the basin. The coupling of the zones with Excellent and Good aquifer potential to the fractures and crossings of productive fractures highlights the most suitable sites for the siting of future productive boreholes.

Keywords: Groundwater, Hydropluviometry, Drilling, Water Resources, Kan

Introduction

Les difficultés d'approvisionnement en eau Côte d'Ivoire se présentent avec acuité dans les différents bassins versants. Les facteurs tels que le changement climatique, l'accroissement démographique et le faible investissement dans les infrastructures en approvisionnement d'eau sont les premiers indices de causalité à la problématique d'eau. L'espace du bassin versant du Kan au sein du V Baoulé n'est pas en reste de cette question. La dynamique hydropluviométrique est une réalité et les eaux de surface sont de plus en plus insuffisantes surtout pendant la saison sèche. C'est le cas palpable de tarissement en 2018 des étangs-lacs du Nicolo à Katiola, de la Loka à Bouaké, du Kan à Tiébissou, du Kotoua-Kan à Duybo pour ne citer que cela. Ces étangs-lacs à vocations agropastorales ont été mise en place par l'Etat de Côte D'Ivoire après l'indépendance pour faciliter les activités de ce secteur. Malheureusement, compte tenu du régime intermittent des cours d'eau dans ce nouveau contexte climatique, ils ne sont profitables seulement qu'en saison humide.

L'un des objectifs majeurs du développement durable, est l'alimentation en eau potable en quantité et en qualité. Pour l'accomplissement de cet objectif, les eaux souterraines occupent une place importante. Dans les zones rurales comme urbaines, les eaux souterraines constituent la réserve la plus importante utilisée pour satisfaire les populations pendant les saisons sèches.

Dès lors, la présente étude a pour objectif de montrer la dynamique hydropluviométrique dans le bassin versant du Kan afin d'évaluer la capacité en eau souterraine pour la bonne implantation des forages.

1. Matériels et méthodes

1.1. Matériels

1.1.1. Situation de la zone d'étude

Avec une superficie de 6282,5 Km², les coordonnées du centroïde de l'espace d'étude est de 7°04'55.5 N et de 5°02'49.3 W. Le bassin versant du *Kan* est une partie du " V Baoulé " étant une pointe de savanes pré-forestières qui pénètrent sur près de deux cents kilomètres au sein des forêts denses du massif guinéen et constituent une anomalie dans le tracé du contact forêt-savane en Afrique occidentale. Le relief du bassin du *Kan* est mis en évidence par un modèle numérique d'altitude (MNA) acquis par les images ASTER. Une étude du MNT montre que le relief du bassin du *Kan* est moyennement accidenté. Il comprend selon le gradient Nord-Sud, un relief dont l'altitude varie entre 66 m et 550 m au-dessus du 8ème parallèle, et composé d'un ensemble de plateaux étagés dont la surface aplanie est renforcée par une

cuirasse de nature ferrugineuse. Les structures géologiques présentent une inégale répartition dans la distribution spatiale de leurs aires. La structure la plus dominante en surface et en longueur est le massif médian avec 42,47 % de surface (Figure 1).

La population de l'espace d'étude est estimée à 266.677 habitants avec une densité moyenne 42,82 hbts/km² (INS, 2014). Les besoins en eau ne cessent de croître dans cet espace géographique (Sorokoby *et al.*, 2010 ; Youan Ta *et al.*, 2015).

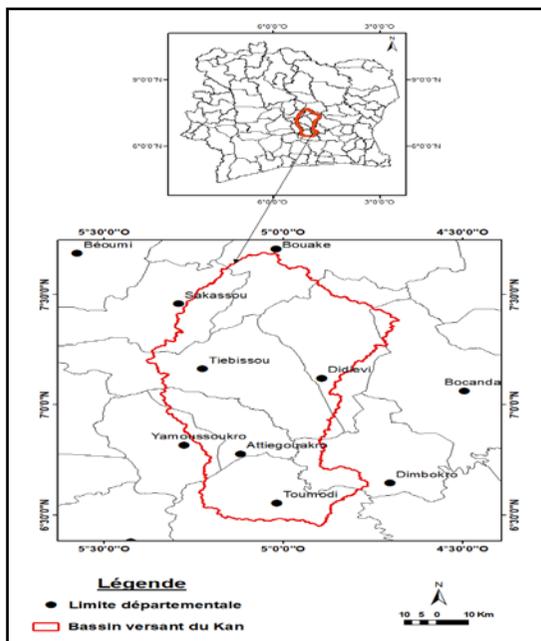


Figure 1. Situation géographique du bassin versant du Kan

1.1.2. Base de données de l'étude

1.1.2.1. Données hydropluviométriques et potentialité hydrogéologique

Les paramètres des forages ont été recueillis lors d'une mission auprès du ministère de l'hydraulique sous couvert de la direction régionale de l'hydraulique de Yamoussoukro, de Bouaké et de Dimbokro. Les données recueillies pour chaque forage sont : les coordonnées géographiques, la profondeur totale, l'épaisseur de l'horizon altéritique, l'épaisseur de socle sain traversé, le niveau statique ou piézométrique, le débit d'exploitation, l'altitude, la nature géologique et géomorphologique du lieu foré, la profondeur de conduit d'eau et les mesures des essais de pompage (sur 80 forages). Les cartes exploitées dans cette étude sont : les cartes topographiques, fournies par le BNETD et les cartes géologiques (feuilles de Dimbokro et Bouaké), fournies par la direction de la géologie de Côte d'Ivoire. Toutes ces cartes sont réalisées à l'échelle 1/50 000 ou 1/200 000.

Les données hydropluviométriques ont été acquises auprès de la société de développement et d'exploitation aéroportuaire et maritime (SODEXAM).

1.1.2.2. Données de l'analyse prospective hydrogéologique

Les eaux de surface et les eaux souterraines sont corrélées par des liens de recharges ; soit de la rivière ou de l'étang-lac vers la nappe soit de la nappe vers la rivière ou de l'étang-lac. Le sens de la recharge constitue un point focal d'où la nécessité d'utilisation d'indice permettant d'identifier les différents types de nappes phréatiques, la maturité en eau de ces nappes, le sens de recharges et le débit d'infiltration (Tableau 1).

Tableau 11. Caractéristiques des données du calcul du ratio WTR

Variables	Nature
R (m/j)	Raster
L (m)	Supposé 2000
M	Supposé 8
K (m/j)	Raster
H (m)	Supposé 100
d (m)	Raster (90)

Source : Gleeson et al., 2011

L'élévation du terrain (d) est extraite du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) avec une résolution de 90 m. L'épaisseur de l'aquifère (H) et la distance moyenne entre les rivières (L) sont difficiles à évaluer à partir des informations disponibles. La valeur de (H) varie d'un ordre de grandeur au maximum en milieu fracturé. Ainsi, les travaux effectués en Côte d'Ivoire indiquent que l'épaisseur se situe le plus souvent entre 10 et 80 m (Kouamé, 1999 ; Youan Ta et al., 2008). Pour ce paramètre, une valeur constante de 100 m a été adoptée, et proche de l'épaisseur maximale connue en Côte d'Ivoire. Quant au paramètre L (distance moyenne entre les rivières), dont l'estimation est rendue difficile par l'organisation spatiale du réseau hydrographique (confluences en V), il a été considéré comme partout égal à 2000 m. La valeur du paramètre m est fixée à 8, l'écoulement régional de la nappe étant supposé horizontal (Dupuit, 1863).

1.2. Méthodes d'analyse

L'approche méthodologique adoptée permet l'analyse de l'évolution hydropluviométrique, de l'extraction des linéaments et de l'identification des zones favorables en eau souterraine. La validation linéamentaire a été largement développée par les travaux de divers auteurs Saley (2003), Jourda (2005), Jourda et al. (2006), et Assemian (2014). La carte de linéaments est obtenue à l'issue du traitement appliqué à l'image brute Landsat ETM+. La carte de linéaments a fait l'objet d'un examen de validation en vue de son utilisation comme support de base pour l'interprétation structurale et

hydrogéologique. De prime abord, il s'agit de déterminer les dates de ruptures hydropluviométriques, les types de nappes utilisées et leur relation avec l'eau de surface. Il s'agit enfin de cartographier les zones favorables en eau.

1.2.1. Tests de détection des ruptures dans les séries chronologiques

Le test de rupture et Lee et Heghinian et la procédure de segmentation de Hubert ont été utilisés. Les séries hydropluviométriques annuelles ont été analysées à l'aide du logiciel KhronoStat (IRD, 1998) en vue de détecter une éventuelle rupture liée à une non-stationnarité. La procédure de segmentation de Hubert consiste à découper la série en un certain nombre de sous-séries ou segments, suivant la technique des moindres carrés, de telle sorte que les moyennes de deux segments contigus soient significativement différentes selon le principe de Scheffé (Dagnelie 1970). Toute décomposition de la série initiale en un sous-séries est une segmentation d'ordre m . Leurs applications sont effectuées à l'aide du logiciel Khronostat 1.01 développé par HydroSciences Montpellier.

1.2.2. Déficit (-) (ou Excès (+)) pluviométrique et hydrométrique

Pour les variables hydroclimatiques dont la série chronologique présente une rupture, il est intéressant de calculer le pourcentage de variation de la moyenne autour de la date de rupture en appliquant selon Ardoin-Bardin (2004), l'équation suivante :

$$D = \left(\left(\frac{\bar{x}_j}{\bar{x}_i} \right) - 1 \right) \times 100$$

Equation 1

Où D est le déficit pluviométrique ou hydrométrique ; \bar{x}_i représente la moyenne sur la période après la rupture ; \bar{x}_j représente la moyenne sur la période avant la rupture.

1.2.3. Calcul du coefficient de tarissement : loi de Maillet

Pour le calcul du coefficient de tarissement, la détermination par dichotomie proposée par Savané *et al.* (2003) est utilisée. Cette méthode est basée sur la loi de Maillet représentée par l'équation suivante :

$$Q_t = Q_0 e^{kt}$$

Equation 2

Avec : Q_t = Débit à l'instant t donné ;

Q_0 = Débit initial (débit au début du tarissement) ;

k = Coefficient de tarissement de Maillet

1.2.4. Détermination des types de nappes selon le modèle (WTR) dans le secteur d'étude

Pour déterminer les différents types de nappes, dans le bassin versant du Kan, le modèle mathématique WTR (Water Table Ratio) de Haitjema .H et de Smitchell-Bruker au niveau du bassin versant a été utilisé. Ce modèle

permet de distinguer deux types de nappes en occurrence les nappes superficielles et les nappes profondes. Ainsi, lorsque WTR est positif, les nappes sont contrôlées par la topographie ; il s'agit des nappes superficielles. A contrario les nappes sont contrôlées par la recharge ; il s'agit dans ce cas des nappes profondes. Le modèle se présente comme suit :

$$WRT = \frac{\log R * (\log L)^2}{(\log m * \log K * \log H * \log d)}$$

Equation 1

Avec R : le flux d'échange (m/j) ; L : distance entre les rivières (m) ; K : la conductivité hydraulique (m/j) ; H : épaisseur moyenne de l'aquifère ; d : Elévation du sol et m une valeur de 8 à 16 (sans unité) qui dépend du type d'écoulement analysé (8 pour 1D et 16 pour l'écoulement radial).

1.2.5. Détermination du sens du flux de recharge par étude géomatique

Cette méthode consiste à exploiter les observations ponctuelles des niveaux d'eau dans les nappes et dans les rivières pour en déduire le sens des échanges nappe/rivière et estimer les flux d'eau échangés. Cette méthode est adaptée à la caractérisation des échanges nappe/rivière ou de l'étang-lac dans un contexte hydrogéologique de nappe alluviale libre superficielle, ou aquifère de versant (milieu poreux) dont la connexion avec le cours d'eau est avérée. La méthode est plus rapide à mettre en œuvre qu'un modèle hydrogéologique. Il peut y avoir trois configurations :

- Échanges de la nappe vers la rivière (côte de la nappe supérieure à celle du cours d'eau) ou de l'étang-lac;
- De la rivière vers la nappe (côte du cours d'eau supérieure à celle de la nappe) ;
- Pas d'échanges ou équilibre (côtes de la nappe et du cours d'eau similaires ou berge très colmatée).

1.2.6. Cartographie, validation des linéaments et analyse statistique de la fracturation

La méthodologie adoptée pour le traitement, l'extraction des linéaments ainsi que leur validation a été largement développée par les travaux de divers auteurs comme Saley (2003), Jourda (2005), Jourda *et al.* (2006). La carte de linéaments est obtenue à l'issue du traitement appliqué à l'image brute Landsat ETM+. La carte de linéaments doit faire l'objet d'un examen de validation en vue de son utilisation comme support de base pour l'interprétation structurale et hydrogéologique. Le traitement des données structurales à l'aide du logiciel Rockworks permet d'obtenir les rosaces directionnelles en nombre de fractures et en longueur cumulée. Chacune d'elles montre la distribution des fractures selon la direction par classe de 10 degrés. Les longueurs des fractures et leurs espacements définissent le degré de porosité des aquifères. L'ajustement statistique des longueurs des fractures par des modèles théoriques permet de définir le stade de maturité de l'aquifère de fissures.

Dans ces conditions, on procède à un ajustement par la loi puissance. L'ajustement à la loi puissance, consiste à représenter dans un diagramme bi-logarithmique la distribution des fréquences des paramètres. Si les points s'alignent suivant une droite, la distribution suit alors une loi puissance selon l'équation suivante :

$$N(l_i) = a l_i^\alpha \tag{Equation 4}$$

Avec l_i : Centres des classes des paramètres ; N : Fréquence de classe ; a : coefficient de proportionnalité ; α : exposant caractéristique de la loi puissance.

1.2.7. Identification, classification et standardisation des critères

Le choix des classes s'est fait en tenant compte de la variance des données et des travaux antérieurs réalisés par Saley (2003), Jourda (2005), Jourda *et al.* (2006), Koudou *et al.* (2010), en région du socle. La classification des débits a aussi tenu compte de la classification proposée par le Comité interafricain d'étude hydraulique. Le nombre de classes a été réduit à 5 comme l'ont défini Savané (1997), Saley (2003) et Jourda (2005), en vue d'une meilleure interpolation. Il s'agit des classes très faibles, faibles, moyennes, fortes et très fortes (Tableau 2). Les critères retenus dans cette étude sont ceux utilisés par Jourda (2005) et Youan Ta *et al.* (2011). Il s'agit du débit d'exploitation (m³/h), le niveau statique (m) et l'épaisseur d'altération (m), l'infiltration efficace (mm), la pente (%), la densité de drainage (Km/Km²) et la densité de fracture (km/km²), la perméabilité induite (m/s).

Tableau 2. Classification des critères

Critères	Classes				
	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Densité de drainage		< 8	8 -16	16 - 24	24 <
Densité de fracturation		< 13,5	13,5 - 27	27 - 40,5	40,5 <
Epaisseur des altérites		< 15	15 – 30	30– 45	45 <
Profondeur (m)		< 15	15 – 30	30– 70	70 <
Débit d'exploitation		< 1	1 – 3	3 – 5	5 <
Niveau statique (m)	< 10	10– 25	25 – 40	40 <	

Source : DIHH, 2015

1.2.8. Pondération et agrégation des critères

Les vecteurs propres ont été déterminés à partir de la formule (1) et ont servi au calcul des différents poids.

$$vp = \sqrt[n]{\prod_i^n gi}$$

Equation 5

vp : vecteur propre, n : nombre de critère, gi : note du critère i

Il existe plusieurs méthodes d'agrégation. Cependant, le choix s'est porté sur la méthode d'agrégation complète par pondération utilisé par Saley (2003), Jourda (2005), Koudou *et al.* (2010), et Koffi *et al.* (2016). Cette méthode consiste à la sommation des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère intervenant dans l'élaboration de l'indicateur spécifique (Koudou *et al.*, 2010). Elle peut être résumée par la formule suivante :

$$S = \sum Wi.Xi$$

Equation 6

avec S : le résultat, Wi : poids du critère i , Xi : la valeur standardisée du critère i . Cette démarche produit un indice d'aptitude situé sur une échelle de 0 à 10 (Jourda, 2005 ; Youan Ta, 2008), car la somme des coefficients de pondération développée par Saaty vaut 1. Cette démarche a guidé l'élaboration des différentes cartes thématiques. Une reclassification des différents facteurs conduira à des cartes thématiques à quatre classes que sont : la classe Mauvaise, la classe Médiocre, la classe Bonne et la classe Excellente. Le nombre de classes est fixé à quatre, afin de permettre une meilleure lisibilité et une bonne interprétation des cartes résultantes (Tableau 3).

Tableau 3. Attribution de poids aux différents critères

Carte de	Critères	Poids	Total
Disponibilité	Densité de drainage	0,4	1
	Densité de fracturation	0,6	
Accessibilité	Profondeur du forage	0,8	1
	Niveau statique	0,2	
Exploitabilité	Débit d'exploitation	0,7	1
	Niveau statique	0	

Source : Grailot *et al.* (2002)

1.2.9 Cartographie des zones favorables à l'implantation des forages à gros débits

En milieu fissuré, la ressource en eau souterraine recherchée doit être facilement accessible, exploitable et de bonne potentialité (Jourda, 2005; Youan Ta, 2008). Les indicateurs d'accessibilité, d'exploitabilité et de potentialité sont donc utilisés pour déterminer les sites favorables à l'implantation de forages à bons débits. Ainsi, une combinaison de ces trois premiers indicateurs a été définie en suivant une approche d'agrégation complète (Youan Ta, 2008). Le Tableau 4 présente les codes attribués aux classes thématiques pour chaque indicateur pris ici comme critère. Cette méthode crée de nouvelles classes qui sont représentées par des nombres dans lesquels, la participation de chaque critère peut être facilement déterminée. Quatre grandes classes sont définies, après analyse des soixante-quatre

nouvelles classes pour l'établissement de la carte des zones favorables à l'implantation des ouvrages de captages.

Tableau 412. Classes et codes des critères (Potentialité, Exploitabilité et Accessibilité)

Indicateurs	Critères	Classes	Codes
Zones Favorables	Potentialité en eau	Excellente	400
		Bonne	300
		Médiocre	200
		Mauvais	100
	Exploitabilité	Excellente	40
		Bonne	30
		Médiocre	20
		Mauvais	10
	Accessibilité	Excellente	4
		Bonne	3
		Médiocre	2
		Mauvais	1

Source : Savané, 2011

1.2.10. Validation de la carte de potentialité en eau souterraine

Le choix de la méthode de validation de la carte de potentialité en eau souterraine se fonde sur les travaux de (Jourda, 2005). Le critère d'évaluation choisi répond aux exigences du terrain, aux principes d'indépendance du critère et de conformité de celui-ci. Les débits de 32 forages ont été retenus pour la validation de la carte de potentialité en eau souterraine. Le mode de validation utilise des courbes de tendance de sensibilité en milieu du socle. La carte des débits de forage regroupés en cinq classes (très fort, fort, moyen, faible et très faible) est superposée à la carte thématique de potentialité en eau, puis le nombre de forages se trouvant dans chaque classe est relevé et exprimé en pourcentage par rapport au nombre total de forages. Un graphe est par la suite construit et comparé à la courbe des tendances de sensibilité en milieu du socle.

1.2.11. Établissement de la carte des zones favorables

La carte de la zone favorable à l'implantation des forages a été réalisée en combinant les différentes cartes thématiques des indicateurs de potentialité en eau souterraine, d'accessibilité et d'exploitabilité suivant une approche d'agrégation complète (méthode de réalisation par codification) utilisée par Youan Ta *et al.* (2011). Le choix de cette méthode est motivé par le fait qu'elle crée des nouvelles classes qui sont représentées par des nombres dans lesquelles, la participation de chaque critère peut être facilement déterminée.

2. Résultats et discussions

2.1. Analyse de l'homogénéité pluviométrique dans le bassin versant

Différents tests de ruptures sont soumis à la dynamique pluviométrique dans le bassin versant. Ces tests sont notamment le test Pettitt, de Lee et Heghinian et la segmentation de Hubert. Les résultats obtenus à partir de ces différents tests de rupture présentent des hétérogénéités des séries pluviométriques dans le bassin versant du *Kan*. Ainsi, dans la station de Bouaké, une rupture est notée en 1998 avec une augmentation de 13 % des hauteurs pluviométriques. A la station de Tiébissou, la rupture intervient à l'année 2014 avec un déficit de 6,76 %. A la station de Yamoussoukro, la rupture date de 1993 avec un gain pluviométrique de 6 %. Dans la région de Dimbokro, une rupture en 2001 s'observe avec une hausse pluviométrique de 2,06 %. Ces différents tests permettent de qualifier l'état pluviométrique identifié dans le bassin versant du *Kan* de 1975 à 2018 (Tableau 5).

Tableau 513. Rupture détectée par Lee et Heghinian et la segmentation de Hubert

Stations	Tests de Rupture	
	Lee et Heghinian	Segmentation Hubert
Bouaké	1998	Oui
Yamoussoukro	1993	Non
Tiébissou	2014	Non
Dimbokro	2001	Non
Toumodi	Non	Non

Source : SODEXAM, 2015

2.2. Analyse de l'homogénéité hydrométrique dans le bassin versant

Les résultats montrent que l'ensemble des séries des débits annuels analysés présente une rupture. Les tests de rupture ont été utilisés pour mettre en relief la date de rupture au cours de l'évolution des débits. Ce sont les tests de Lee et Heghinian et la segmentation de Hubert. Ainsi, à Bouaké, une rupture est observée en 1993 avec une augmentation de 43,91 % du débit. A la station de Tiébissou, la rupture se situe en 1976 avec un déficit de 12,22 %. A Yamoussoukro, la rupture date de 1980 avec une perte hydrométrique de 6,21 %. Dans la station de Dimbokro, une rupture est remarquée en 2001 avec une baisse hydrométrique de 8,72 %. En effet, le test de Pettitt ne marque pas de rupture au cours de la période d'étude. Il indique seulement une variation hétérogène. Cependant, le test de Buishand marque une rupture significative en 1994 au niveau du débit du cours d'eau. Cette rupture exprime une élévation du débit des cours d'eau à partir de 1994 avec un gain estimé à 45 %. Ces résultats obtenus sont similaires aux travaux effectués par Koffi *et al.* (2016), en présentant l'impact de la baisse hydrométrique sur le volume du lac Kossou.

Tableau 6. Rupture hydrométrique

Stations	Tests de Rupture	
	Lee et Heghinian	Segmentation de Hubert.
Bouaké	1993	Oui
Tiébissou	1976	Non
Yamoussoukro	1980	Oui
Dimbokro	2001	Non

Source : DIHH, 2015

Les coefficients de tarissement moyens ont été déterminés sur la période d'étude allant de 1975 à 2015 sur les données des différentes stations hydrométriques retenues. Les débits moyens journaliers ont été calculés sur cette période pour déterminer les coefficients de tarissement au niveau des stations de Bouaké, Tiébissou, Yamoussoukro et Dimbokro (Tableau 7).

Tableau 7. Coefficients de tarissement interannuel

Stations	Périodes	Tarissement moyen (j-1)
Bouaké	1975-2015	2.10-2
Tiébissou	1975-2015	2,5.10-2
Yamoussoukro	1975-2015	2,8.10-2
Dimbokro	1975-2015	3.10-2

Source : SODEXAM, 2015

Les résultats du Tableau 7 montrent que les coefficients de tarissement varient entre $2.10^{-2}j^{-1}$ et $3.10^{-2}j^{-1}$ sur la période d'étude au sein des séries hydrométriques. Ces résultats mettent donc en évidence une augmentation du coefficient de tarissement suivant le gradient géothermique Nord-Sud caractérisé par deux types de climat adjacent. Les durées de tarissement fluctuent entre 140 jours (4 mois et 20 jours) et 150 jours (5 mois) en moyenne.

2.3. Sens de recharge de l'écoulement dans le bassin versant du Kan

Dans l'hydrosystème, l'étude des échanges nappe-rivière est placée dans un contexte général de bassin versant ; cela implique souvent la non prise en compte des processus locaux. Les échanges nappe-rivière répondent principalement au gradient hydraulique régional et aux propriétés hydrodynamiques du milieu (Vernoux et *al.*, 2011). La direction des échanges évolue en fonction de la différence de charge hydraulique entre la rivière et la nappe et les volumes échangés dépendent de la configuration géométrique et des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère et du lit de la rivière. Le sens de recharge dans le bassin versant du Kan se fait des étangs-lacs aux nappes. L'analyse géomatique a permis de mieux faire la distinction. En effet, les côtes de la nappe sont très inférieures aux côtes des rivières et des étangs-lacs (Figure 2). A cet effet, la recharge se fait verticalement ou subverticalement des eaux de surface vers les nappes phréatiques.

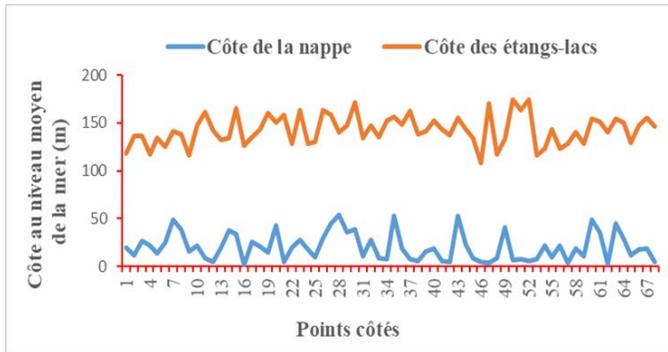


Figure 2. Comparaison de la côte des nappes à la côte des étangs-lacs

2.4. Carte d'accessibilité en eau souterraine dans le bassin versant du Kan

La carte d'accessibilité est le résultat de la synthèse des facteurs de profondeur du forage et du niveau statique. Deux classes essentielles caractérisent cette zone : l'accessibilité médiocre (58,50 %) et l'accessibilité bonne (37 %) qui sont fonction de la répartition des différentes caractéristiques hydrogéologiques du secteur (Figure 3). Dans les zones concernées par les accessibilités médiocres, il se pose un problème de coût pour l'implantation d'un forage et le captage sera à risque. Dans les localités à bonne accessibilité, le pourcentage de succès au niveau des forages est très grand, ces zones sont mieux indiquées pour l'implantation de forages comme Dimbokro, Toumodi, Tiébissou et Didiévi.

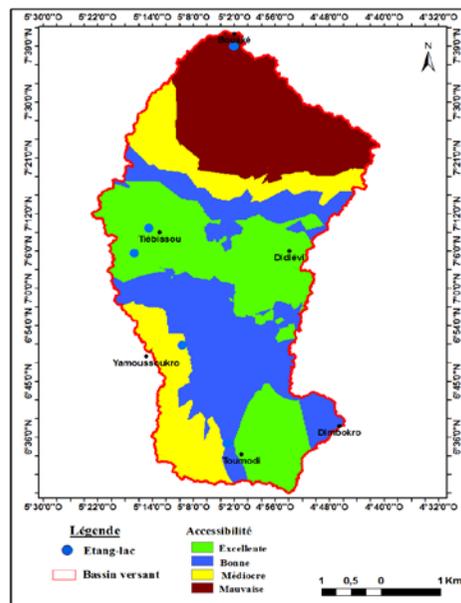


Figure 3. Niveau d'accessibilité aux ressources en eau souterraine

2.5. Carte d'exploitabilité des ressources en eau souterraine

L'exploitabilité des ressources en eau est guidée par le débit de l'eau que l'on peut tirer et le niveau piézométrique selon le modèle de Saley (2003). La carte d'exploitabilité des ressources résulte donc de la combinaison de ces deux critères. Quatre classes peuvent être regroupées en deux caractérisant cette carte. Les exploitabilités mauvaises et médiocres occupent à elles seules 15 % du territoire et regroupent les zones à faibles débits au Nord du bassin versant. Les classes bonnes et excellentes occupent 85 % du bassin en dessous des classes mauvaises et médiocres (Figure 4). un emboîtement s'observe entre les classes bonnes et excellentes.

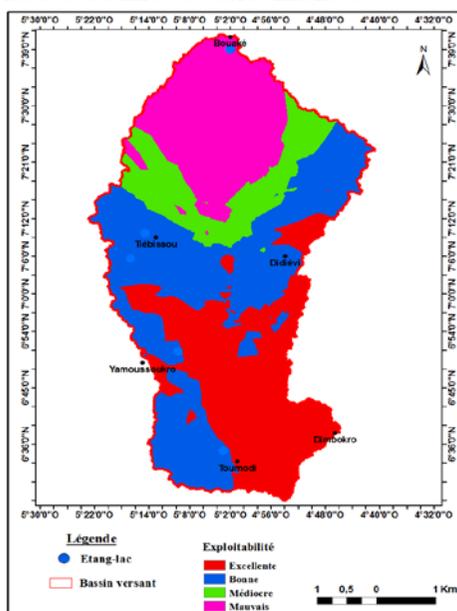


Figure 43. Exploitabilité des ressources en eau souterraine

Ces zones se situent dans toute la partie Nord du secteur d'étude précisément dans le département de Bouaké. Elles constituent le domaine favorable à l'hydraulique villageoise et le domaine de recherche des eaux de consommation selon Savané (1997). Les exploitabilités excellente et bonne occupent les secteurs périphériques du Centre et du Sud du bassin versant soit 75 % de la superficie totale. Il s'agit des départements de Dimbokro et de Yamoussoukro. Les travaux effectués par plusieurs auteurs sont accord aux résultats obtenus. Selon Youan Ta *et al.* (2011), l'étude de la potentialité en eau souterraine indique qu'environ 60 % de cette région a une potentialité bonne et excellente. Ces zones concernent l'Est, le Centre et le Sud de la zone d'étude. En ce qui concerne l'accessibilité, l'auteur montre la zone d'étude est dominée par l'accessibilité médiocre (65,6 %) de ses ressources en eau. Ce résultat est essentiellement lié aux trop grandes profondeurs des nappes.

L'analyse de la carte d'exploitabilité des ressources révèle que seulement 40 % des ressources disponibles dans la région d'Oumé sont potentiellement exploitables. Ces ressources sont situées au Nord-ouest, à l'Est de la région et le secteur de Diégonéfla. Le couplage de toutes ces cartes a permis de mettre en relief les différentes zones favorables à l'implantation de forages à gros débits. Ces zones couvrent plus de 58 % de l'ensemble de la région.

2.6. Carte de potentialité des ressources en eau souterraine

L'analyse de la carte des potentialités en eau souterraine montre que les zones à indice de potentialité médiocre (10 % du domaine) et mauvais (5 % du territoire) sont présentes aux extrémités centre-ouest du bassin dans les départements de Tiébissou et de Sakassou (Figure 5). Ces zones se caractérisent par de fortes profondeurs d'ouvrages, de forts niveaux statiques, de faibles épaisseurs d'altérites et des débits faibles. Les zones à excellent indice de potentialité sont circonscrites en différents chefs-lieux (Toumodi, Dimbokro et Raviart) et sont faiblement représentées (20 %). Les zones à bon indice de potentialité représentent 55 % du territoire et se concentrent dans la partie centrale, au Nord du domaine, au Sud-Ouest et à l'Est en suivant le gradient Nord-sud. Ces zones sont indiquées pour la recherche et l'implantation des sites de forage dans la région et prédisent des débits d'exploitation assez importants. Ce sont les régions du Bélier et du N'Zi Comoé.

Selon Koudou *et al.* (2013), l'établissement de la carte des zones à potentialité aquifère selon la méthode de pondération de Saaty (1984) ne traduit pas mieux la sensibilité du terrain. Cette étude souffre de l'absence des débits de forages surtout dans l'extrême sud-est d'Aboisso. La validation de la carte des zones à potentialité aquifère mériterait d'être améliorée en utilisant des données de forages récents. Pour mieux reproduire les réalités du terrain, Jourda (2005) préconise la méthode de codification. Malgré tout, la manière la plus fiable de valider la carte thématique de potentialité aquifère consiste à implanter de nouveaux forages dans chaque zone pour laquelle la classe thématique indique une classe de potentialité donnée et à vérifier la productivité de ces ouvrages. L'identification des zones à potentialité aquifère Bonne et Excellente ne garantit pas un taux de succès des forages à 100 % même si la probabilité paraît forte. La carte thématique des zones à potentialité aquifère représente un outil d'aide à la décision qui permet de s'affranchir de la phase de prospection stratégique. Elle débouche directement sur une prospection hydrogéologique tactique qui permet d'exclure une partie du territoire à prospecter et de sélectionner les secteurs à potentiel aquifère prometteur.

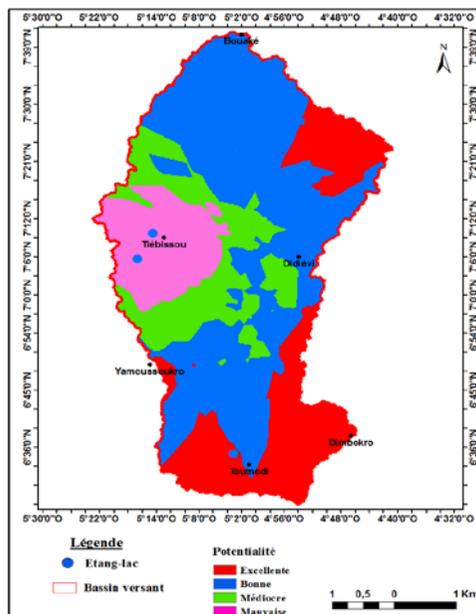


Figure 5. Type de potentialité en eau dans le bassin versant du Kan

Conclusion

L'étude de la dynamique hydropluviométrique dans le bassin versant du Kan, réalisée grâce à la récolte de données climatiques et hydrologiques a permis de détecter des dates de ruptures dans ces séries chronologiques dans les différentes stations. Ces ruptures hydropluviométriques traduisent la présence d'années déficitaires et excédentaires. Cette étude, dans la quête de la production d'eau potable pour le développement durable, a permis à l'élaboration des cartes de zones favorables à l'approvisionnement des eaux souterraines à travers des forages peu profonds et profonds à partir des données géologiques et données relatives aux points d'eaux existants, intégrées avec des analyses hydrogéologiques. Le modèle WTR, la loi de puissance et la géomatique ont permis d'identifier respectivement les types de nappes phréatiques (profondes 97 % et superficiel 3 %), leur maturité (Méga-fractures) et le sens de l'écoulement des étangs-lacs vers les nappes profondes. Cette étude a permis de mettre en évidence les énormes potentialités en ressources d'eau souterraine du bassin versant du Kan. Dans ce bassin, le degré de potentialité hydrogéologique varie de « Mauvais à Excellent » avec la classe « Bonne » la plus représentative (55 %) et la classe Mauvaise la moins représentative 2 %. La classe Bonne occupe la quasi-totalité du bassin versant du Kan. La classe de potentialité Excellente caractérise en majorité l'Est et le Sud du bassin versant, dominé par les formations métamorphiques.

References:

1. Assemian, E. A., Kouamé, F. K., Djagoua, É. V., Affian, K., Jourda, J. P. R., Miessan, A., Lasm, T. & Biémi, J. (2013). Étude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide Cas du département de Bongouanou (Est de la Côte d'Ivoire) : *Revue des sciences de l'eau*, 26 (3), pp. 247-261
2. Cherqui, F. (2005). Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier Méthode ADEQUA. Thèse. Université de La Rochelle. 182 p.
3. Dupuit, J. (1863). Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables : DUNOD, seconde édition, Paris, pp.14-19
- INS (2014). Résultats globaux, <http://www.ins.ci/n/RESULTATS%20GLOBAUX.pdf>
4. Jourda, J.P. (2005). Méthodologies d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : Cas de la zone test de Korhogo (Côte d'Ivoire). Thèse Université de Cocody. Abidjan. 402 p.
5. Jourda, J. P., Saley, M. B., Djagoua, E. V., Kouamé, K. J., Biémi, J. & Razack, M. (2006). Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire). approche par analyse multicritère et test de validation : *Télédétection*, 4(5), pp.339-357.
6. Koffi, K. M., Yao, K. T., Mobio, A. & Oga, Y. M. S. (2016). Apport de l'analyse multicritère à la cartographie des zones favorables à l'implantation de forages dans la région de Gagnoa (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire) : *Geo-Eco-Trop.*, 2016, 40 (4), pp. 327-344
7. Kouamé, K.F. (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports des données des images satellitaires et des méthodes statistiques et fractales à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale, Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 200 p.
8. Koudou, A., Adiaffi, B. & Assoma, T.V. (2013). Conception d'un outil d'aide à la décision pour la prospection des eaux souterraines en zone de socle du Sud-Est de la Côte d'Ivoire : *Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicale*, (37), pp. 211-226
9. Koudou, A., Kouamé, K.F., Youan, M.T., Saley, M.B., Jourda, J.P. & Biémi, J. (2010). Contribution des données ETM+ de Landsat, de l'analyse multicritère et d'un SIG à l'identification de secteurs à

- potentialité aquifère en zone de socle du bassin versant du N'Zi (Côte d'Ivoire) : article photo-interprétation European journal of applied remote sensing, pp.3-4.
10. Saaty, T. L. (1984). Décider face à la complexité, une approche analytique multicritère d'aide à la décision, *Entreprise moderne d'édition*, 231 p.
 11. Saley, M.B. (2003). Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de l'Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 209 p.
 12. Savané, I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle d'Odienné (Nord-Ouest de Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à références spatiales (SIHRS). Thèse d'Etat ès- Sciences naturelles. Université de Cocody-Abidjan. Côte d'Ivoire. 398 p.
 13. Vernoux, J. F., Lions, J., Petelet-Giraud, E., Seguin, J.J., Stollsteiner, P. & Lalot, E. (2011). Caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystème terrestres associés en lien avec la DCE. Rapport BGRM. France, 200 p.
 14. Youan, T. M., Lasm, T., Jourda, J. P., Saley, M.B., Adja, G.M., Kouamé, K. & Biémi, J. (2011). Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère : Cas de la région de Bondoukou (Côte-d'Ivoire) : *Revue internationale de géomatique*, 21 (1), pp.43-71.
 15. Youan, T.M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologiques du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : cas de la région de Bondoukou Nord-Est de la Côte d'Ivoire. Thèse unique de Doctorat. Université de Cocody. Abidjan. 236 p.
 16. IRD (1998). KhronoStat version 1.0. Logiciel, IRD, Montpellier.URL : <http://www.hydrosciences.org/spip.php?article239>.