



EVALUATION DES POTENTIALITES EN EAU SOUTERRAINE DES AQUIFERES FISSURES DANS LE BASSIN VERSANT DU BANDAMA (CÔTE D'IVOIRE)

ASSESSMENT OF THE GROUNDWATER POTENTIALITIES OF CRACKED AQUIFERS IN THE BANDAMA WATERSHED (CÔTE D'IVOIRE)

**MANGOUA M. J.^{1,2}, YAO A. B.^{1,2}, DOUAGUI G. A.²,
KOUASSI K. A.², GOULA B. T. A.², BIEMI J.³**

¹ UFR Environnement, Laboratoire Sciences et Technologie de l'Environnement,
Université Jean Lorougnon Guedé, Daloa, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.

² Laboratoire Géosciences et Environnement, Université Nangui-Abrogoua, 02 BP 801
Abidjan 02, Côte d'Ivoire.

³ Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, Université
Félix Houphouët Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

mjul_2@yahoo.fr

RESUME

En Côte d'Ivoire, le problème d'accessibilité en eau potable se pose avec acuité du fait que les retenues aménagées pour l'alimentation en eau des populations ne sont plus correctement alimentées et sont sujettes à une très forte eutrophisation. D'où le recours aux eaux souterraines. Cette étude vise à évaluer les potentialités en eau souterraine du bassin versant du Bandama afin d'identifier les sites d'implantation de forages de grande productivité. La démarche méthodologique s'appuie sur les méthodes de l'analyse multicritère et des SIG.

Les classes à bonne et excellente potentialité en eau sont les plus dominantes, elle représente 52% du bassin. Malgré cette bonne potentialité en eau, les eaux souterraines du bassin versant du Bandama sont difficilement accessibles. Les différentes zones convenables à l'implantation d'ouvrage à gros débits ont été cartographiées et peut servir d'outils d'aide à la prospection en milieux fissurés.

Mots-clés : Analyse multicritère, Potentialité, Système d'Information Géographique, Bandama, Côte d'Ivoire

ABSTRACT

In Côte d'Ivoire, the problem of access to drinking water is particularly acute because the impoundments built for supplying water to populations are no longer properly served and are subject to very strong eutrophication. Hence the use of groundwater. This study aims at assessing the Bandama watershed's groundwater potentialities in order to identify high productivity drilling sites. The methodological approach is based on the multicriteria analysis methods and GIS. Classes with good and excellent water potentiality are the most dominant, representing 52% of the basin. Despite this good water potentiality, the groundwater of the Bandama watershed are difficult to access. The different areas suitable for the implementation of large flows structures have been mapped and can be used as aid tools to explore cracked environments.

Key words: Multi-criteria analysis, potentialitie, Geographic information system, Bandama, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

Partout dans le monde, la pression sur les ressources en eau et en particulier sur les ressources en eau de surface est à la hausse, principalement en raison de la demande croissante et de la dégradation de la qualité de l'eau. Contrairement aux eaux de surface, les eaux souterraines sont considérées comme l'une des sources les plus importantes pour l'approvisionnement en eau potable du fait de leur grande capacité de stockage ainsi que de leur faible exposition aux polluants (Guergazi et Achour., 2005, Ehoussou et al., 2018). En effet, ces aquifères situés en grande profondeur, sous un recouvrement d'altérites plus ou moins épais sont généralement à l'abri des fluctuations saisonnières et de toute pollution (Biémi, 1992). Pour ces raisons sécuritaires, l'approvisionnement en eau potable est de plus en plus orienté vers la recherche des eaux souterraines profondes dont la qualité répond généralement aux normes OMS (Biémi, 1992).

Sur le bassin du Bandama, les aménagements hydrauliques (barrages hydroagricoles et hydro-électriques) réalisés connaissent un dysfonctionnement important du système d'eau du fait des sécheresses récurrentes et des pluies irrégulières observées ces dernières décennies (Soro et al., 2004; Goula et al.,

2006; Kouassi et *al.*, 2010; Soro et *al.*, 2011). Ses territoires, constitués par le socle cristallin où l'eau se trouve dans les fractures sont d'accès difficile car ces aquifères présentent une certaine complexité. Les taux de desserte en eau des différents départements du bassin varient de 38 à 57 % en moyenne. Ces taux sont faibles par rapport à la moyenne 68% (ONEP, 2010). Ce faible taux de couverture montre que malgré le progrès enregistré pour satisfaire les besoins en eau de la population, beaucoup reste à faire pour arriver à bout de ses besoins vitaux. La recherche de nouveaux sites de forages avec une forte probabilité de succès, impose d'améliorer les connaissances de l'hydrogéologie de ce milieu complexe. C'est dans cette optique que cette étude s'inscrit. Elle a pour objectif d'évaluer les potentialités en eau souterraine du bassin versant du Bandama afin d'identifier les sites d'implantation de forages de grande productivité. L'approche méthodologique adoptée s'appuie sur la Télédétection, l'Analyse multicritère et Système d'Information Hydrogéologique à Référence.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le fleuve Bandama est l'un des quatre grands cours d'eau de la Côte d'Ivoire. Il est compris entre 3°50' et 7° de longitude Ouest et 5° et 10°20' de latitude Nord (Figure 1). Le Bandama prend sa source dans le Nord du Pays, entre Korhogo et Boundiali, à une altitude de 480 m. Long de 1050 km, il coule d'abord d'Ouest en Est sur près de 200 km, en décrivant un arc de cercle autour de Korhogo. Il prend ensuite une direction Nord-Sud et son cours présente alors de nombreux méandres. Il se jette au Sud du pays dans la lagune de Grand-Lahou.

De par sa forme géographique, le bassin versant du Bandama recouvre trois des quatre grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire. Au Nord du bassin, règne le régime tropical de transition (climat soudano-guinéen) avec deux saisons. La partie centrale du bassin est caractérisée par le régime équatorial de transition atténué (climat baouléen) avec deux saisons pluvieuses et une saison sèche.

Au Sud du bassin, règne le climat équatorial de transition (Climat Attiéen) avec quatre saisons.

Sur le plan géologique, le bassin versant du Bandama se situe principalement dans le mégacycle éburnéen. Il appartient au domaine protérozoïque inférieur et moyen (Lévêque et *al.*, 1983). Les formations rencontrées sont donc d'âge protérozoïque, comprenant des complexes volcano-sédimentaires (laves, schistes, quartzites), des formations métamorphiques d'origine sédimentaires (conglomérats, flyschs, grès, schistes verts) et des granitoïdes très largement

répandus sur le bassin. Une petite partie du bassin sédimentaire est localisée dans la région de Grand-Lahou sur le littoral avec des formations sédimentaires (sable continental).

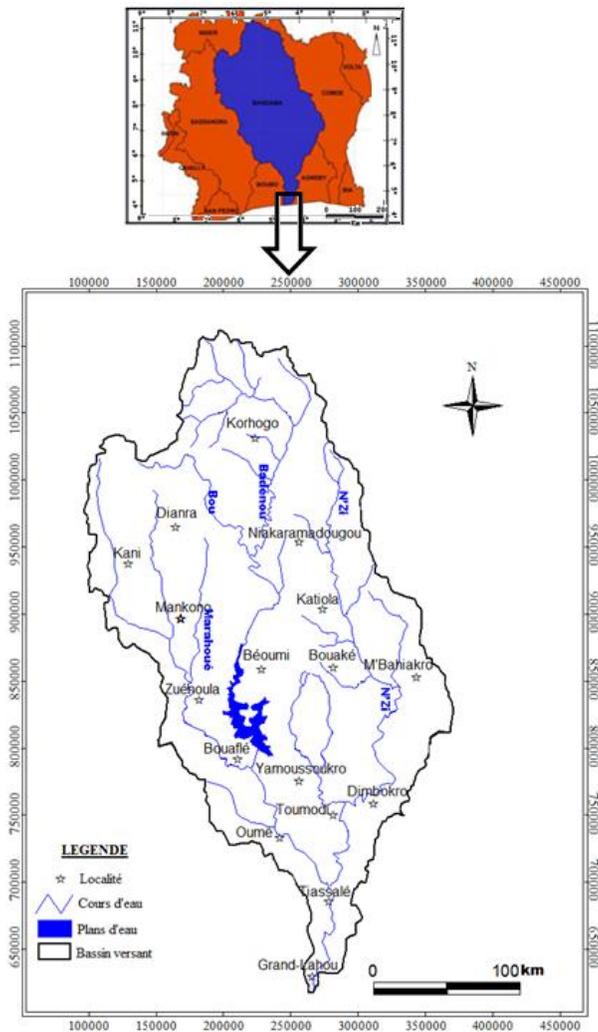


Figure 1 : Localisation du bassin versant du Bandama

Au plan hydrogéologique, le secteur d'étude présente deux types aquifères qui sont les aquifères d'altérites et les aquifères de fissures (fractures). Ces deux aquifères sont généralement superposés, comme dans la plupart des régions de la Côte-d'Ivoire. Les aquifères d'altérites sont les plus superficiels et ont une

fonction capacitive alors que les aquifères de fractures sont les plus profonds et ont une fonction essentiellement conductrice.

MATERIEL ET METHODES

Données

Nous avons eu recours à des données de 2772 forages provenant de la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH), des cartes géologiques et topographiques à l'échelle 1/200 000. Les données climatiques, pluies et températures (1971-2000) ont été utilisées pour l'estimation de l'infiltration aux stations de Boundiali, Korhogo, Tafiré, Mankono, Bouaké, M'bahiakro, Bouaflé, Oumé, Dimbokro et Tiassalé. Les images utilisées sont celles de ETM+ (**E**nha**n**ced **T**hematic **M**apper **p**lus) de Landsat 7 qui ont permis d'établir la carte des fractures. Il s'agit des scènes 196-054 ; 196-055 ; 196-056 ; 197-053 ; 197-054 ; 197-055 ; 197-056 ; 198-053 ; 198-054 et 198-055 acquises le 02/02/2000 qui couvrent totalement la zone.

Ces scènes sont disponibles sur le site <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>.

Le traitement de ces données a nécessité l'utilisation des logiciels Envi 4.5 pour le traitement des images satellitaires, Linwin 2.0 et ArcView 3.2a pour le traitement du réseau de fractures et pour la mise en place du SIG.

Méthodes

En hydrogéologie, certains paramètres peuvent renseigner sur la nature et l'aptitude des aquifères à former de bons réservoirs d'eaux souterraines. Nous avons utilisé l'approche qui est basée sur l'établissement des cartes de disponibilité, d'exploitabilité et d'accessibilité pour déterminer la potentialité en eau souterraine de la zone d'étude.

Etablissement des cartes de potentialités en eau souterraine

- Cartographie des zones à potentialités aquifères

La méthodologie adoptée pour la cartographie des zones à potentialités aquifères est basée sur une démarche multicritère. Cette démarche comprend quatre étapes : la définition des critères, la pondération des critères, l'agrégation des facteurs et la validation des cartes thématiques.

- Définition des critères

Les critères qui ont été sélectionnés pour leur influence sur la potentialité aquifère du bassin sont consignés le tableau 1. Ces critères relatifs à la potentialité en eau souterraine se regroupent en trois indicateurs quantitatifs qui sont : la disponibilité, l'accessibilité et l'exploitabilité. Ces indicateurs sont décrits comme suit :

L'indicateur disponibilité traduit la notion de l'existence d'un aquifère et constitue la première condition à savoir, avant tout autre activité (Savané, 1997). Il résulte de l'association de trois paramètres que sont l'infiltration, la densité de fracturation et l'épaisseur d'altération. Parmi ces paramètres, l'infiltration est le plus important pour la disponibilité des eaux souterraines. La densité de fracturation a été obtenue à partir de la carte des linéaments (Figure 2) réalisé lors d'un projet sur la vulnérabilité des eaux du Bassin du Bandama.

Concernant l'indicateur accessibilité, il faut noter que les réserves d'eau souterraine ne sont véritablement utilisables que lorsque certains paramètres réunis rendent possible leur accès. Les plus importants sont la profondeur totale (Pt) des ouvrages et l'indice de succès (Is).

L'indice de succès donne la probabilité de succès d'un forage et est calculé par l'équation 1 suivante (Doumouya et al., 2012) :

$$a = \frac{b}{10} \times 100 \quad (1)$$

avec :

a : indice de succès en pourcentage (%),

b : débit d'exploitation (m^3/h).

L'indice de succès varie de 10 à 100 %. Selon les recommandations de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP), l'indice de succès permet la distinction des zones de bonne productivité caractérisée par des forages positifs ($a \geq 10\%$) ; des zones de faibles productivité avec un nombre élevé de forages négatifs ($a < 10\%$) (DHH, 2001). Ainsi un forage avec un indice de succès $a > 10\%$ est accessible à la population pour exploitation.

La ressource en eau n'est exploitable que si le débit d'exploitation le permet. Le débit d'exploitation en lui-même est conditionné par la quantité d'eau dans la réserve souterraine et la rapidité de renouvellement de cette réserve en cas de forte sollicitation (Youan Ta et al., 2011).

Tableau 1 : Classification et standardisation des paramètres

Thème	Paramètres	Appréciation des classes	Classes	Notes
INDICATEUR DE DISPONIBILITE EN EAU	Infiltration efficace (mm)	Très faible	10 - 25	1
		Faible	25 - 40	3
		Moyenne	40 - 70	5
		Forte	70 -100	7
		Très forte	>100	9
		Très faible	1 - 5	1
	Densité de fracturation (Km/Km ²)	Faible	5 - 10	3
		Moyenne	10 - 15	5
		Forte	15 - 20	7
		Très forte	>20	9
		Très faible	<10	1
		Faible	10 - 20	3
	Epaisseur d'altération (m)	Moyenne	20 - 30	5
		Forte	30 - 40	7
		Très forte	40 - 78	9
		Très faible	11 - 25	9
		Faible	25 - 52	8
INDICATEUR D'ACCESSIBILITE EN EAU	Profondeur totale (m)	Moyenne	52 - 70	7
		Forte	70 - 85	5
		Très forte	85 - 98	1
	Indice de succès (%)	Très faible	0 - 20	1
		Faible	20-40	3
		Moyenne	40-60	5
		Forte	60-80	8
		Très forte	80-100	10
		Très faible	1 - 5	10
		Faible	5 - 15	8
INDICATEUR D'EXPLOITABILITE EN EAU	Niveau statique (m)	Moyenne	15 - 25	6
		Forte	25 - 40	3
		Très forte	40 - 45	1
		Très faible	0 - 1	1
		Faible	1 - 3	3
	Débit d'exploitation (m ³ /h)	Moyenne	3 - 5	5
		Fort	5 - 8	8
		Très fort	8 - 25	9

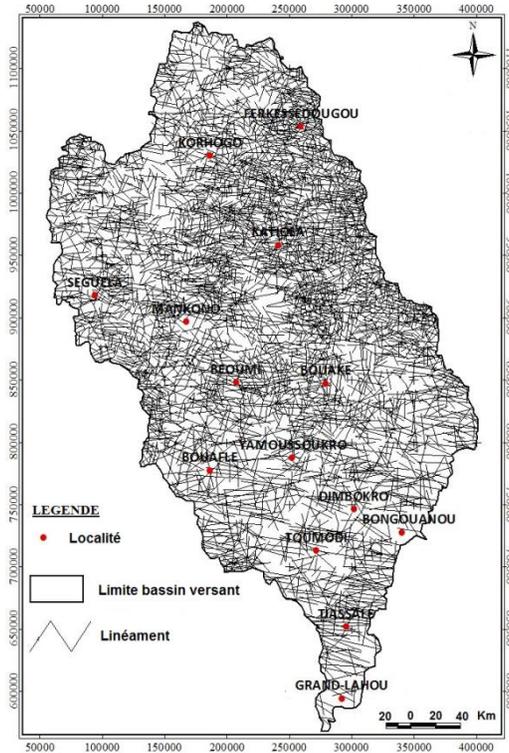


Figure 2 : Carte détaillée des linéaments du bassin versant du Bandama

- Pondération des critères

Les critères de décision sont pondérés grâce à la méthode de combinaison linéaire basée sur la technique de comparaison par paire selon le Processus d'Analyse Hiérarchique (Analytical Hierarchy Process, AHP) de Saaty (1977) utilisée par Youan Ta et al. (2011); Doumouya et al. (2012); Mangoua et al. (2014). Elle permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1. Les détails de l'application de cette méthode sont consignés dans les travaux de Yao et al. (2016). Dans le cas de cette étude, les matrices de comparaison par paire et les coefficients de pondération des critères pour chaque indicateur et pour les trois indicateurs sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Valeurs propres et Coefficient de pondération des facteurs

Paramètres	Valeur propre	Coef. de pondération
Infiltration (Inf.)	3,5	0,50
Densité de fracturation (Df)	0,90	0,12
Epaisseur d'altération (EA)	0,58	0,08
DISPONIBILITE	2,46	0,64
Profondeur totale (Pt)	1,73	0,75
Indice de succès (Is)	0,58	0,25
ACCESSIBILITE	0,41	0,10
Débit d'exploitation	1,73	0,75
Niveau statique (Ns)	0,58	0,25
EXPLOITABILITE	1	0,26

- Agrégation des facteurs

Il existe diverses méthodes pour l'évaluation de l'analyse multicritère ou l'agrégation des facteurs. Dans cette étude le choix s'est porté sur la méthode d'agrégation complète par pondération utilisée par Joerin (1995), Savané (1997), Saley (2003), Martin et *al.* (2004) et Jourda (2005). Cette méthode consiste à multiplier chaque facteur ou indicateur par son coefficient de pondération respectif et ensuite en additionnant ces résultats pour produire un indice d'aptitude selon l'équation 2 suivante :

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (2)$$

S : résultat final

W_i : poids du critère i

X_i : valeur standardisée du critère i

Cette démarche a été utilisée individuellement pour les trois indicateurs de décision, que sont l'accessibilité, l'exploitabilité et la disponibilité.

L'établissement de la carte thématique « Potentialité en eau souterraine » consiste à reporter dans l'espace, les différentes valeurs issues de la sommation des valeurs standardisées et pondérées de chaque indicateur intervenant dans l'élaboration de ladite carte. Une reclassification des 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 classe est fixé à quatre pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte résultante.

- Méthode de validation des cartes thématiques : Analyse de l'incertitude

Les cartes thématiques réalisées ont été validés par le calcul de l'incertitude (Doumouya et al., 2012 ; Mangoua, 2013). En effet, le mode de validation des cartes thématiques utilisées dans les études antérieures (Jourda, 2005 ; Jourda et al, 2006 ; Youan Ta et al., 2011 ; Koudou et al., 2013 et Koffi et al., 2016) a montré des insuffisances dans le faite qu'il est pratiquement impossible de trouver une classe de sensibilité reflétant à 100% la réalité du terrain car à côté d'un forage à gros débit, il est possible d'avoir un autre forage à débit faible, voire nul. Ainsi, le calcul des incertitudes sur les moyennes des divers paramètres des principaux indicateurs est donné par l'équation 3 :

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} \quad (3)$$

avec :

$\Delta\bar{X}$: incertitude sur la moyenne de la série de données

σ : écart type de la série de données

m : nombre de données

Un facteur d'expansion (K) est alors calculé afin de déterminer le niveau de confiance. La détermination de ce paramètre est basée sur le principe statistique de calcul de l'incertitude étendue. Le facteur K permet la définition d'un intervalle de portée suffisante ayant pour but d'avoir dans les résultats une grande confiance. L'expression de ce facteur est donnée par l'équation 4 :

$$K = \frac{|E-\bar{X}|}{\sigma} \quad (4)$$

avec :

K : facteur d'expansion,

E : est la valeur extrême de la série statistique qui peut être le maximum ou le minimum de cette série.

Les niveaux de confiance des différents paramètres ont été déduits des différentes valeurs de K. Ainsi, K= 1 pour un niveau de confiance de 68 % ; K = 2 pour un niveau de confiance de 95 % et K = 3 pour une confiance de 99 %.

RESULTATS ET DISCUSSION

Cartographie des potentialités aquifères du Bandama

Disponibilité en eau souterraine

Les zones à disponibilité bonne et excellente n'occupent que 39 % du bassin (Figure 3). L'analyse de cette figure montre quatre classes :

- la classe à disponibilité mauvaise occupe 22% du bassin ; elle s'observe dans la partie centrale du bassin sur une bande de direction Centre-Est - Centre Ouest et autour de la localité de Séguéla. Cette classe révèle une mauvaise recharge des nappes d'eau souterraine de ces localités.
- la classe à disponibilité médiocre est la plus représentée sur le bassin. Elle occupe 39 % de la zone étudiée et apparaît sur tout le bassin, mais elle est plus présente dans le Centre du bassin. Elles ne favorisent pas la formation d'importants réservoirs souterrains. Néanmoins, un forage implanté aux droits ou à l'intersection de méga-fractures ouvertes peut fournir des débits exceptionnels, bien qu'il soit en zone à disponibilité médiocre.
- la classe à bonne disponibilité en eau souterraine n'occupe que 26 % de la zone d'étude et apparaît au Nord et au Sud du bassin versant. Ces zones à bonne disponibilité en eau sont caractérisées par des pentes relativement faibles et une forte densité de fracturation. Elles réunissent les conditions favorables à l'accumulation des eaux souterraines et par conséquent à la formation d'importantes réserves. Au niveau de ces zones, les méga-fractures ouvertes interconnectées ont une forte probabilité d'être productives.
- la classe à excellente disponibilité occupe 13 % du secteur d'étude et apparaît au Nord et au Sud comme la classe précédente. Elle est en grande partie au niveau des régions de Toumodi et de Tiassalé. Ces zones sont les plus recherchées, car elles contiennent d'énormes réserves d'eau souterraine. Ces zones sont densément fracturées ou à pente douce, qui favoriseraient l'infiltration.

La carte de disponibilité des eaux souterraines à une marge d'erreur de $\pm 0,006$ avec un niveau de confiance de 95%.

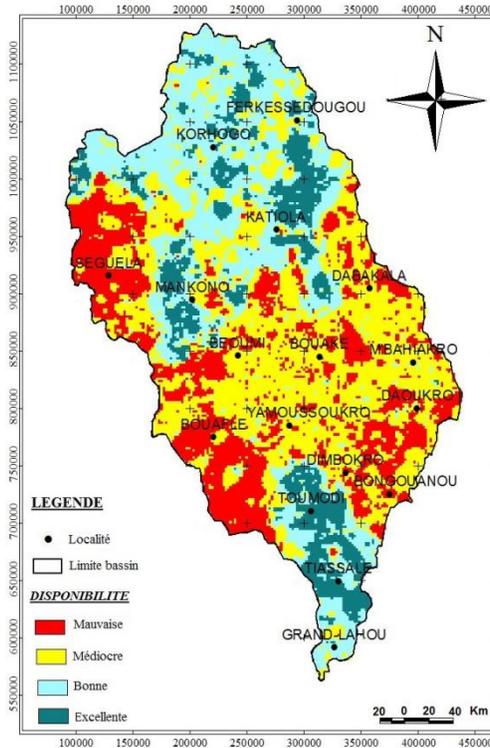


Figure 3 : Carte de disponibilité en eau souterraine du bassin versant du Bandama

Accessibilité des ressources en eau souterraine

La carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine du bassin est caractérisée par quatre classes d'inégale répartition (Figure 4). L'accessibilité en eau souterraine sur le bassin est difficile, car est à 80,60 % mauvaise. Cette carte d'accessibilité aux eaux souterraines à une marge d'erreur de $\pm 0,003$ avec un niveau de confiance de 99%.

L'analyse et interprétation de ces différentes classes indiquent que :

- la classe à accessibilité mauvaise aux ressources en eau souterraine couvre 80,60 % du bassin. Elle est répartie sur tout le bassin du Nord au Sud. Les forages sont très profonds avec des débits très faibles.
- la classe à accessibilité médiocre couvre 19,10 % du bassin et se localise dans le Nord, dans les départements de Boundiali et de Korhogo. Les forages dans ces zones ont de fortes profondeurs.

Evaluation des potentialités en eau souterraine des aquifères fissurés dans le bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire).

- la classe à bonne et excellente accessibilité n'existe pratiquement pas sur le bassin. Une petite plage est localisée dans la région de Dimbokro.

Les eaux souterraines du bassin versant du Bandama sont difficilement accessibles, à cause de l'utilisation de la géomorphologie au détriment de la télédétection et de la géophysique. Le bassin présente une mauvaise accessibilité en générale.

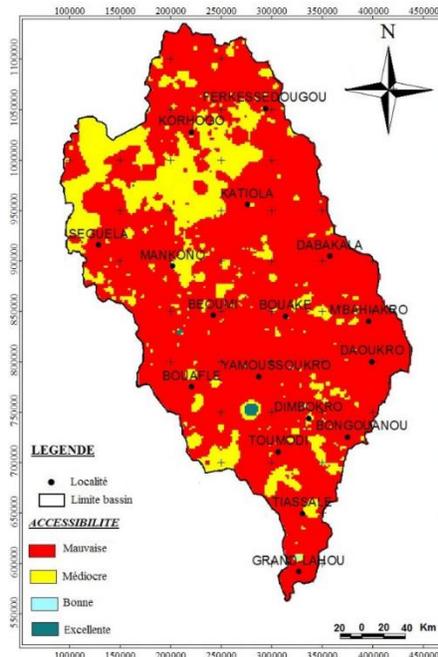


Figure 4 : Carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine du bassin du Bandama

Exploitable des ressources en eau du bassin versant du Bandama

La figure 5 présente la carte d'exploitabilité des eaux souterraines du bassin, elle est dominée par la classe bonne. L'analyse et l'interprétation de ces différentes classes révèlent que :

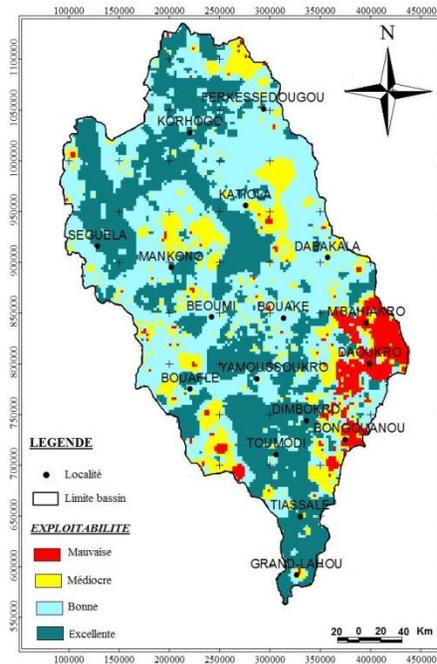


Figure 5 : Carte d'exploitabilité en eau souterraine du bassin versant du Bandama

- la classe à exploitabilité mauvaise ne couvre que 6 % du bassin. Cette classe apparaît à l'Est du bassin dans les localités de M'Bahiakro, Daoukro et Bongouanou. Elle est caractérisée par des débits d'exploitation très faible ($<1\text{m}^3/\text{h}$) et un niveau statique très fort ($>25\text{m}$);
- la classe à exploitabilité médiocre couvre 13 % du bassin Elle exprime une relative difficulté dans l'exploitation des ressources souterraines et se retrouve en petites plages disséminées sur tout le bassin. Cette classe peut être convenable à l'hydraulique villageoise où les débits faibles ($1 - 2 \text{m}^3/\text{h}$) suffisent pour l'approvisionnement des populations ;
- la classe à bonne exploitabilité est caractérisée par des débits moyens et forts accompagnés de niveaux statiques relativement favorables (10 - 15 m). Elle occupe 45 % de la zone d'étude et apparaît essentiellement sur tout le bassin versant. Ces zones sont appropriées pour exercer la petite irrigation et pour approvisionner les centres secondaires (gros villages ou ville) en eau potable ;
- la classe à excellente exploitabilité couvre 36 % de la zone d'étude et est caractérisée par les débits très forts ($> 10 \text{m}^3/\text{h}$) avec des niveaux

statiques très faibles à faibles (< 10 m). Cette classe se retrouve au Sud et au Nord, respectivement dans les départements de Toumodi, Tiassalé, Grand-Lahou et dans les départements de Korhogo et Séguéla. Ces zones sont les plus recherchées pour l'approvisionnement en eau potable des grands centres urbains comme c'est le cas de la ville d'Odienné.

La carte d'exploitabilité des eaux souterraines à une marge d'erreur de $\pm 0,005$ avec un niveau de confiance de 68%.

Analyses des sites potentiels en eau souterraine

La carte des zones potentielles en eau souterraine est issue de la combinaison linéaire des cartes de disponibilité, d'exploitabilité et d'accessibilité selon leur poids respectif. L'observation de la carte des potentialités en eau souterraine (Figure 6) montre que le bassin est dominé par les classes bonne et excellente. En effet, les classes à bonne et excellente potentialité occupent 52 % de la surface totale du bassin contre environ 48 % jugées zones à moindre potentialité. Cette carte à une marge d'erreur de $\pm 0,007$ avec un niveau de confiance de 68%.

L'analyse et l'interprétation de ces différentes classes révèlent que :

- la classe des mauvaises potentialités est représentée par une proportion de 19 %. Il s'agit des zones de disponibilité et d'accessibilité mauvaises ou médiocres auxquelles peut s'ajouter une mauvaise exploitabilité. Elles se rencontrent en grande partie dans les régions de M'Bahiakro, Dabakala, Daoukro et Bongouanou à l'Est et à l'Ouest dans les régions de Bouaflé et Oumé. Il s'agit des zones dont la disponibilité en eau est mauvaise et dont l'accessibilité n'est pas évidente. Dans ces cas, la ressource en eau est difficile à exploiter pour des raisons évidentes c'est-à-dire les structures géologiques moins fracturées constituées de granitoïdes sont caractérisées par de fortes pentes et des épaisseurs d'altérites fortes.
- la classe des zones à potentialités médiocres couvre 29 % du bassin et occupe les zones de disponibilité et d'accessibilité médiocre auxquelles s'ajoute quelquefois une bonne exploitabilité. Un forage implanté va tarir avec le temps. Cette zone est présente au Centre du bassin et dans sa partie Nord-Ouest. Nous distinguons aussi de petites plages disséminées sur tout le bassin. Ce sont des zones à densité de fracturation faible, caractérisées par une recharge médiocre de la nappe.

Dans ces zones, l'aquifère est profond. Ces zones sont cependant appropriées pour l'implantation des forages dont les débits sont acceptables dans le cadre de l'hydraulique villageoise ;

- la classe des bonnes potentialités occupe 25 % du secteur d'étude et est présente au Nord du bassin et dans la région de Yamoussoukro. Dans ces zones, les forages implantés sont moins profonds et à succès probable. Ces zones sont caractérisées par une densité de fracturation élevée. La ressource en eau est disponible avec une pente relativement faible qui permet une bonne recharge de la nappe-aquifère. Ces zones sont favorables à l'implantation de forage à gros débits. Ce sont des zones acceptables pour l'implantation de forage dans le cadre de l'hydraulique villageoise améliorée (HVA).
- la classe des zones à potentialité excellentes occupe 27 % du bassin. Elle se localise en grande partie dans les départements de Korhogo, Boundiali, Ferkessedougou et Katiola au Nord et au Sud dans les départements de Toumodi, Tiassalé et Grand-Lahou. Ces zones possèdent une excellente disponibilité d'eau souterraine facilement accessible et exploitable pour l'approvisionnement en eau potable. Ce sont des zones fortement fracturées par endroits. Cette classe est donc la plus recherchée lors des campagnes d'implantation des forages à gros débits.

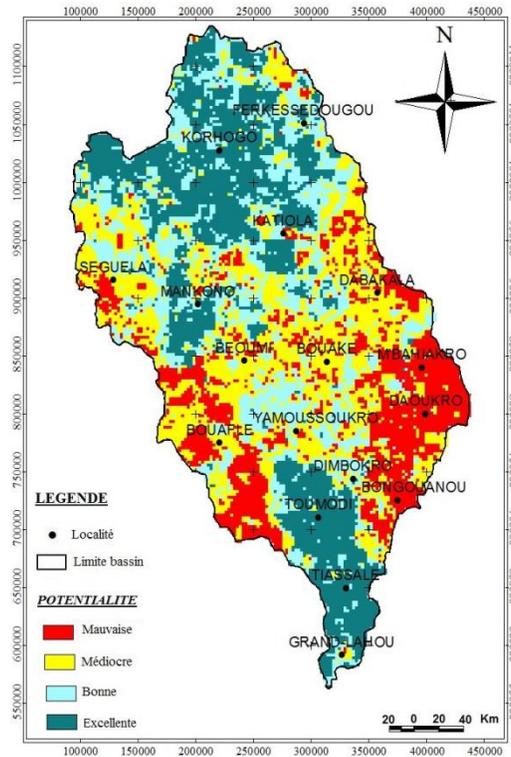


Figure 6 : Carte des potentialités en eau souterraine du bassin versant du Bandama

Discussion

Sur le bassin versant du Bandama, les forages sont très profonds avec des débits très faibles ; une profondeur moyenne de 60 m. L'analyse de la relation entre la profondeur de forage et les débits a montré qu'il n'existe pas de relation significative entre ces deux paramètres. De manière générale, on note la présence de faibles débits ($Q < 2 \text{ m}^3/\text{h}$) à toutes les profondeurs avec un taux très élevé. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Mangoua *et al.* (2010) qui ont montré que les débits faibles observés sur le bassin de la Baya seraient liés à l'utilisation de la géomorphologie au détriment de la géophysique, de la télédétection et de la photo-interprétation pour l'implantation des forages.

La variation des débits en fonction de l'épaisseur montre que l'importance des débits des forages ne semble pas établir une relation particulière avec la puissance des altérites. Cette hypothèse se justifie par le fait que l'on ne tient

pas compte ni de la nature des altérites, ni de la roche mère dont elles sont issues (N'go et al., 2005). En effet, certains auteurs (Biscaldi, 1967 et Dibi et al., 2004) ont montré que la productivité des forages augmente avec l'épaisseur des altérites sur les roches cristallines et cristallophylliennes et diminue lorsqu'il s'agit des schistes birimiens de Côte d'Ivoire.

L'utilisation des SIHRS dans le bassin versant du Bandama a abouti à la production des cartes de potentialité, d'accessibilité, d'exploitabilité et des sites favorables à l'implantation d'ouvrages à gros débits. Sur ce bassin plusieurs études similaires ont été réalisées mais de façon locale. Ainsi, les études de Jourda et al., (2006) sur le Département de Korhogo a montré que cette région était potentiellement pourvue en eau ressource en eau souterraine avec près de 60% du territoire présentant une bonne disponibilité en eau dont 40% sont d'une bonne exploitabilité. Otchoumou et al. (2012) ont montré que le département de Daoukro possède une bonne disponibilité en eau souterraine (80 % de la superficie totale). Les travaux de Koudou (2013) sur le bassin versant du N'Zi qui est un affluent du Bandama ont montré également une variabilité spatiale des secteurs à potentialité aquifère avec la classe bonne potentialité étant la plus représentative du bassin. L'ensemble de ces études montre que le bassin du Bandama possède de bons réservoirs d'eau souterraine ; ce qui est en accord avec nos résultats. Néanmoins, nos résultats ont montré que le secteur de Daoukro-Dimbokro présente une mauvaise potentialité en eau contrairement aux résultats d'Otchoumou et al. (2012). En effet, la considération de tout le bassin versant du Bandama constitue une limite qui cache les disparités locales. De plus, la méthode d'estimation de la recharge qui est l'un des paramètres les plus importants dans la cartographie de la disponibilité en eau pourrait influencer les résultats. En effet, la recharge est un phénomène discontinu spatialement (les zones de recharges étant locales) et une interpolation biaise le résultat aux limites des zones de recharges de valeurs différentes. Là où les valeurs de recharge obtenues constituent une approximation régionale, le résultat peut varier en fonction de la qualité des données et de la méthode utilisée. Aussi, la méthode multicritère fait des simplifications inacceptables selon la logique mathématique (Youan Ta et al., 2011) L'établissement de la carte thématique des zones à potentialité aquifère, a justifié de l'utilisation de certains paramètres (recharge, perméabilité induite, épaisseur d'altération, etc.) dont la réalisation s'est faite par interpolation. Cette dernière permet certes, d'assigner des valeurs dans des secteurs où aucune donnée n'est disponible, cependant elle entraîne des erreurs dans la réalisation de ces paramètres, car elle n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles (Koudou, et al., 2013). Néanmoins, malgré toutes ces faiblesses, les cartes des

zones à potentialité aquifères obtenu fournissent une importance capitale dans l'aménagement de la région étudiée. Ces cartes interviennent en amont de toutes les recherches d'eau souterraine et constituent des outils d'aide à la prospection en milieux fissurés qui peuvent être utilisés par les autorités du conseil général des toutes les régions traversées par le fleuve Bandama pour aborder plus sereinement le problème récurrent d'approvisionnement en eau potable des populations.

CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'évaluer les potentialités en eau souterraines du bassin versant du Bandama par analyse multicritère et des SIG.

Le SIHRS du Bandama a permis l'évaluation des trois principaux éléments intervenant dans l'étude des eaux souterraines à savoir la disponibilité, l'accessibilité et l'exploitabilité. Les classes bonne et excellente potentialité est la plus dominante, elle représente 52% du bassin. Néanmoins, les eaux souterraines du bassin versant du Bandama sont difficilement accessibles, à cause de l'utilisation de la géomorphologie au détriment de la télédétection et de la géophysique. Le bassin présente une mauvaise accessibilité en générale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELBAKI C. (2013). Contribution to the cartography of the groundwater quality of the urban group of Tlemcen (Algeria), Larhyss Journal, n°16, pp. 7-19.
- ADJIM M., BESAOUA F. (2013). Application of the drastic groundwater vulnerability to the aquifer of Maghnia (North-West of Algeria), Larhyss Journal, n°16, pp. 21-30.
- ATTE A. G. (2010). Mise en place d'outils d'aide à la décision pour la gestion des ressources en eau en Côte d'Ivoire : actualisation et extension des capacités du SIG sur le bassin versant du Bandama, Mémoire de Master spécialisé en GIRE, 2IE, 35 p.
- BELHADJ M.Z., BOUDOUKHA A., AMROUNE A., GAAGAI A., ZIANI D. (2017). Statistical characterization of Groundwater quality of the Northern area of the basin of Hodna, M'Sila, Southeastern Algeria, Larhyss Journal, n°31, pp. 177-194.
- BENAOULA F., BESALAH M., ADJIM M. (2005). Les forages récents dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen, Larhyss Journal, n°4, pp. 7-15.

- BENMOUSSAT A., ADJIM M., BESAOUA F. (2017). Use of the Zygos model for the estimation of groundwater recharge in Sikkak watershed (Northern West of Algeria), *Larhyss Journal*, n°30, pp. 105-119.
- BIEMI J. (1992). Contribution a l'étude géologique, hydrogéologique, et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructural, hydrodynamique et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Marahoué (Cote d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Naturelles, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 479p.
- BISCALDI R. (1967). Etude statistique des forages et carte hydrogéologiques des régions à substratum éruptif et métamorphique en Afrique Occidentale. BRGM-CIEH, 2, 437 p.
- CIEH, (1985). Evaluation hydrogéologique des projets hydrauliques en terrains cristallins du bouclier Ouest Africain. Série hydrogéologie.
- DHH (2001). Bilan diagnostic et redynamisation du dispositif de maintenance des pompes manuelles. Séminaire de réflexion sur la maintenance des pompes d'hydraulique villageoise, 47 p.
- DIBI B., INZA D., GOULA B. T. A., SAVANE I., BIEMI J. (2004). Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Sud sciences & technologies* n°13 pp. 22-31
- DOUMOUYA I., BROU D., KOUASSI I. K., BACHIR S., JOURDA J. P., SAVANE I. ET BIEMI J. (2012). Modelling of favourable zone for the establishment of water points by geographical information system (GIS) multicriteria analysis (MCA) in the Aboisso area (South-east of Côte d'Ivoire). *Environnemental Earth Sciences*, Vol. 67, Issue 6, pp 1763–1780.
- EHOUSSOU K.M., KOUASSI A.M., KAMAGATE B. (2018). Hydrodynamic characterization of the aquifers fissured of the area of the “belier” (Center of Ivory Coast), *Larhyss Journal*, n° 36, pp. 119-143.
- GUERGAZI S., ACHOUR S. (2005). Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra. *Pratique de la chloration*, *Larhyss Journal*, n°4, pp. 119-127.
- GOULA B. T. A., SAVANE I., KONAN B., FADIKA V. ET KOUADIO G. B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*, n°1, pp. 1-12.
- JOERIN F. (1995). Méthode multicritère d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site. *Revue internationale de géomatique*, Vol. 5, n° 1, pp. 37-51.

- JOURDA J. P., SALEY M. B., DJAGOUA E. V., KOUAME K. J., BIEMI J., ET 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. *Revue de Télédétection*, Vol. 5, n° 4, pp. 339-357.
- JOURDA J. P. (2005). Méthodologie 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 des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sc. Nat., Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 430 p.
- KHEDIDJA K., BOUDOUKHA A. (2016). Statistical and hydrochemical characterization of the shallow aquifer of Tadjanet-Chelghoum laid (Eastern Algeria), *Larhyss Journal*, n°28, pp. 181-197.
- KOUASSI A. M., KOUAME K. F., KOFFI Y. B., DJE K. B., PATUREL J. E. et OULARE S. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergéo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, n° 513, 29 p.
- KOUDOU A., ADIAFFI B., ASSOMA T.V. ET AL. (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*, Vol. 37, pp. 211-226.
- LEVEQUE C, DEJOUX C, ILTIS A. (1983). *Limnologie du fleuve Bandama*, Côte-d'Ivoire; O.R.S.T.O.M ; pp. 114-118.
- MANGOUA MJ, DIBI B, KOBLAN EW, DOUAGUI GA, KOUASSI KA, SAVANE I. ET BIEMI J. (2014). Map of potential areas of groundwater by the multicriteria analysis for the needs for water of the Baya's catchment basin (East of Côte d'Ivoire). *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 9, n°45, pp. 3319-3329.
- MANGOUA M. J. (2013). Evaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan (Côte d'Ivoire), 171p.
- MANGOUA M. J., TOURE S., GOULA B. T. A., YAO K. B., SAVANE. I et BIEMI J. (2010). Evaluation des caractéristiques des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya ou Bâ (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, Vol. 16, pp. 243-259.
- MARTIN J. L., HENRY E., BOULEMIA C. et MASSON F. X. (2004). Proposition d'outils de gestion et d'aide à la décision dans une moyenne collectivité locale : application à l'exploitation de la ressource en eau souterraine. Acte de la journée

- d'études « Les territoires de l'eau », Université d'Artois, Arras, 26 mars 2004, pp. 74-82.
- N'GO Y. A., GONE D. L., SAVANE I. ET GOBLE M. M. (2005). Potentialité en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydro climatique et physique, *Afrique Science*, Vol. 01, n° 1, pp.127-144.
- SAATY T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, issue 3, pp. 234-281.
- SALEY M. B. (2003). Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo- image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 209 p.
- SAVANE I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire) : apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat d'Etat es-Sc. Nat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 398 p.
- SORO, N., LASM, T., KOUADIO, B.H., SORO, G., AHOUSSE, K.E. (2004). Variabilité du régime pluviométrique du sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan. *Sud Sciences et Technologies*, n°14, pp. 30-40.
- SORO, T.D., SORO, N., OGA, Y.M-S., LASM, T., SORO, G., AHOUSSE, K.E., BIEMI, J. (2011). La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand Lahou (Sud-Ouest de la côte d'Ivoire). *Géographie physique et Environnement*, Vol.5, pp. 55-73
- UNICEF (2009). Etude de faisabilité des forages manuels. Identification des zones potentiellement favorables (côte d'Ivoire), 73p.
- YAO A. B., GOULA B. T. A., KANE A., MANGOUA O. M. J. ET KOUASSI K. A. (2016). Cartographie du potentiel en eau souterraine du bassin versant de la Lobo (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire). Approche par analyse multicritère, *Journal des Sciences Hydrologique*, Vol. 61, n° 5, pp.856-867
- YOUAN T. M., LASM T., JOURDA J. P., SALEY M. B., ADJA M. G., KOUAMÉ K., BIÉMI J. Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 21, n°1, pp. 43-71.