



**CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLES A
L'IMPLANTATION DES FORAGES A GROS DEBITS EN
MILIEU FISSURE PAR ANALYSE MULTICRITERE
CAS DU DEPARTEMENT D'OUME
(CENTRE-OUEST DE LA COTE D'IVOIRE)**

**YOUAN TA M., YAO K.A.F., BAKAR D., DE LASM Z. O., LASM T., ADJA
M.G., KOUAKOU S., ONETIE Z.O., JOURDA J.P.R., BIEMI J.**

UFHB, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire
UFR STRM (Sciences de la Terre et des Ressources Minières)
CURAT (Centre de Recherche et d'Application en Télédétection)

marc.youanta@curat-edu.org

RESUME

Situé au centre-ouest de la Côte d'Ivoire, dans le domaine paléoprotérozoïque, le département d'Oumé a fait l'objet de cette étude. L'objectif de ce travail est de cartographier les zones favorables à l'implantation des forages à gros débits pour le captage des eaux souterraines en vue de l'approvisionnement en eau potable des populations. La base de données est constituée d'image Radar de RADARSAT 1, de fonds cartographiques, de données de forages et hydroclimatiques. La méthode d'analyse multicritère a été employée. L'agrégation des critères par pondération permet de combiner ces différentes données pour générer des indicateurs Potentialité, Accessibilité et Exploitabilité des eaux souterraines. Ces différents indicateurs sont ensuite considérés comme critères et sont combinés suivant la technique d'agrégation par codification. Les résultats révèlent que plus de la moitié (60%) du territoire a une potentialité en eau souterraine de bonne à excellente avec une accessibilité généralement médiocre (65,5%). Seulement 40% des ressources disponibles dans la région d'Oumé ont une exploitabilité bonne à excellente. Les zones dites favorables à l'implantation d'ouvrage à débits acceptable pour l'approvisionnement en eau potable recouvrent plus de 58% de l'ensemble de la zone d'étude. Cette étude apporte des éléments de réponse dans la connaissance des ressources en eau souterraine. Ces résultats pourraient être utilisés comme des documents guides

dans l'exécution des ouvrages de captage des eaux souterraines du département d'Oumé.

Mots clés : Côte d'Ivoire, Oumé, Aquifère fissuré, Analyse multicritère.

ABSTRACT

Study area of this research is the Department of Oumé which is localized at center-west of Cote d'Ivoire, precisely on the paleoproterozoic rock formations. This study aims to map potential zones where implantation of drillings will yield great flows for drinking water supply. Database used for this research was constituted by satellite image from RADARSAT-1, cartographical illustrations, drillings and hydroclimatical data. Criteria analysis was useful to lead this study. This method firstly consisted to generate some indicators of ground waters potentiality, accessibility, and exploitability through weighting accumulation. Secondly, these indicators are considered such as criteria and gathered following the technical of aggregation by coding. Results obtained by this way revealed that more than half of the whole studied area (60%) has a good potentiality of ground waters but accessibility of them (65%) is poor. Only 40 % of available groundwater can be easily exploited. Thus, some potential zones where implantation of drillings will yield great flows cover about 58% of the studied area. These results contribute to best knowledge of ground waters from this region. They can be used as a guide to orientate groundwater capture in the department of Oumé.

Keywords: Côte d'Ivoire, Oumé, fissured aquifer, Criteria analysis.

INTRODUCTION

En Afrique en général et en Côte d'Ivoire en particulier, certaines populations ne sont toujours pas à l'abri du problème récurrent d'approvisionnement en eau potable pour la boisson. Ces dernières décennies ont vu le problème s'aggraver du fait de la baisse régulière et drastique des précipitations. En effet un déficit pluviométrique de 13% a été enregistré au niveau du bassin versant du N'Zi (sous bassin versant du Bandama) sur la période de 1969 à 2000 (Goula et al., 2006). Ce bassin versant du Bandama couvre la quasi-totalité du département d'Oumé qui fait l'objet de cette étude. Cette situation entraine l'assèchement total de certains ouvrages et la forte réduction du débit des autres principalement pendant la saison sèche. Signalons qu'un nombre non négligeable de pompes est en panne ce qui conduit ces populations à se tourner vers d'autres sources d'approvisionnement de qualité parfois douteuse. La région d'Oumé étant située dans la nouvelle boucle du Cacao, elle est devenue

de ce fait, une destination privilégiée pour de nombreuses populations à la recherche de terres fertiles pour des cultures industrielles (cacao, café, hévéa, palmier à huile, etc.). Cette région a atteint un taux d'accroissement de sa population de 3,8% (INS, 2000), avec une population estimée 210 264 habitants. Cette population ne cesse d'augmenter chaque jour compte tenu des potentialités économiques de la région. Du coup, la pression hydrique devient importante. En effet, les besoins en eau potable pour satisfaire les populations du département d'Oumé sont en perpétuelle augmentation. La nécessité de rechercher de nouvelles réserves d'eau de bonne qualité, à l'abri des variations saisonnières et des différentes formes de pollution s'impose dans cette région. Des études ont montré que l'intégration grâce à l'utilisation des techniques d'analyse multicritère, des caractéristiques physiographiques (pente, densité de drainage), hydroclimatologiques (infiltration efficace) et hydrogéologiques des aquifères de fissure (densité de fracturation, perméabilité induite, épaisseur d'altération, débit d'exploitation, niveau statique, etc.) permet de mieux comprendre le comportement de ces aquifères et de cartographier les zones d'accumulation ou de circulation des eaux souterraines (Jourda, 2005 ; Jourda et al., 2006 ; Brunner et al., 2007 ; Drury et Deller, 2007 ; Hoffmann et Sander, 2007 ; Leblanc et al., 2007 ; Dibi, 2008 ; Youan Ta, 2008 ; Youan Ta et al., 2011, Youan Ta et al., 2014).

La présente étude se propose d'utiliser les techniques de l'analyse multicritère pour la cartographie des sites potentiels à l'implantation des forages de captage d'eau souterraine à gros débits dans le département d'Oumé située au centre-ouest de la Côte d'Ivoire.

CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU DEPARTEMENT D'OUME

La zone d'intérêt est située au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 6°10' et 6°40' Nord et les longitudes 5°10' et 5°50'Ouest et couvre une superficie d'environ 2700 km². Elle appartient au domaine paléo protérozoïque de Côte d'Ivoire. Sur le plan lithologique (figure 1), on distingue 2 grands ensembles que sont :

- un ensemble volcano-sédimentaire constitué de plusieurs unités pétrographiques (Flyschs, Schistes, Amphibolites, Andésites) affleurant dans les régions sud et est de la zone d'étude;
- un ensemble granitoïde constitué essentiellement de granites homogènes à biotite, de granites hétérogènes à biotite et de granodiorites. Cet ensemble occupe plus de 70% de la superficie de la zone d'étude.

Ces différentes formations géologiques ont été affectées par plusieurs phases tectoniques qui ont conduit à la mise de place d'une importante fracturation. Les structures géologiques sont généralement suivant les directions NS et NE-

SW. Ces directions caractérisent l'orientation des plans de schistosité ou de foliation et parfois des plis ou des contacts anormaux (Faillat, 1986).

DONNEES ET METHODES

Données

Une importante base de données composée de données images, données cartographiques, données de forages et hydroclimatiques a été nécessaire à la réalisation de cette étude.

Les données images sont constituées d'images SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) avec 90 m de résolution et RADAR de RADARSAT1 de résolution 50 m. Il s'agit de la bande C de RADARSAT1 prise en janvier 2001 en polarisation HH avec un nœud descendant. Les fonds cartographiques utilisés se composent des cartes géologique, photogéologique (Géomines 1982) et topographique à l'échelle de 1/200 000. Les données de forages concernent les fiches techniques des forages réalisés dans la région d'Oumé entre 1976 et 2000. Les principales informations extraites de ces fiches sont relatives à la profondeur du socle, aux débits d'exploitation, les niveaux statiques, aux arrivées d'eau et aux logs des forages. Ces données ont été acquises auprès de la Direction de l'hydraulique Rurale et Périurbaine (DHRP). Les données hydroclimatiques regroupent les données de la pluviométrie, la température, l'humidité relative, l'insolation et les débits des cours d'eau. Ces données climatiques ont été fournies par la SODEXAM, elles couvrent la période de 1941 à 2008 ; et les débits des cours d'eau ont été fournies par la Direction de l'hydraulique Humaine du Ministère des Infrastructures Economique de Côte d'Ivoire.

Cartographie des zones potentielles à l'implantation des forages à gros débits en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas du département d'Oumé (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)

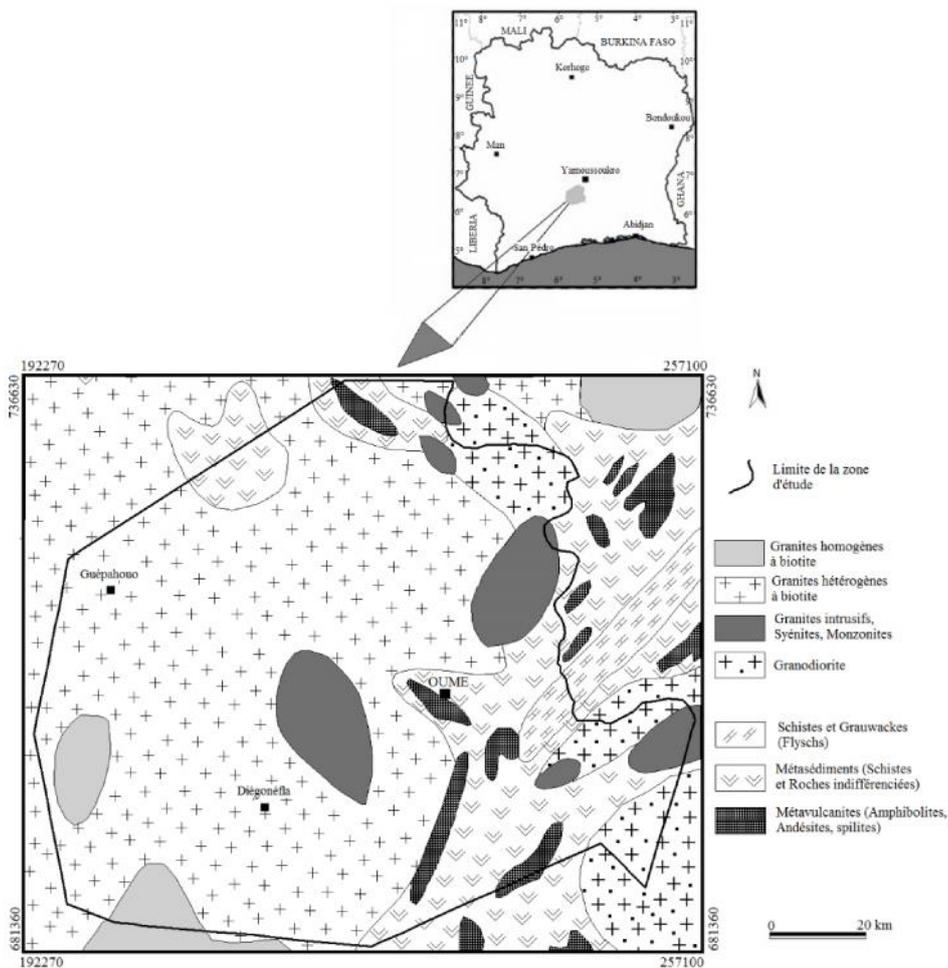


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude et carte géologique du département d'Oumé

Plusieurs logiciels spécialisés ont été utilisés pour le traitement des diverses données notamment le logiciel ENVI 5.0 pour le traitement des images RADARSAT-1 et le programme EVC (Evaluation de la Variabilité Climatique) pour le calcul de la perméabilité induite par les fractures. Ce logiciel a été développé au CURAT (Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection) de l'université Félix Houphouët-Boigny. L'analyse multicritère a nécessité l'usage du logiciel ARG GIS 10.2.1.

Méthodes

L'approche méthodologie abordée dans cette étude est basée sur l'utilisation des méthodes d'analyses multicritères (Joerin, 1995 ; Savané, 1997 ; El Morjani, 2002 ; Saley, 2003 ; Jourda, 2005 ; Jourda et al., 2006 ; Kouamé, 2007 ; Youan Ta, 2008 ; Youan Ta et al., 2011) pour la cartographie des zones favorables à l'implantation des forages à gros débits. La démarche suivie par ces méthodes comporte 3 étapes importantes : i) l'identification et élaboration des critères de décisions, ii) la classification et standardisation de ces critères en vue de l'élaboration des indicateurs et iii) la pondération des critères et leur agrégation suivant la démarche multicritère.

La structure hiérarchique utilisée dans cette étude présente quatre niveaux comme l'ont suggéré Youan Ta et al. (2011). Le niveau 1 est représenté par l'objectif assigné à ce travail, à savoir la cartographie des sites favorables à l'implantation d'ouvrages à débit important. Le niveau 2 désigne les trois indicateurs que sont la potentialité, l'exploitabilité et l'accessibilité dont la combinaison par codification permet d'atteindre l'objectif fixé. Le niveau 3 regroupe tous les critères dont l'agrégation abouti à l'élaboration des indicateurs. Enfin, le niveau 4 indique les différentes notes attribuées aux différentes classes définies pour chaque critère.

Identification et élaboration des critères de décisions

Selon Youan Ta (2008) et Youan Ta et al. (2011), l'identification des critères est une phase décisive et délicate qui conditionne la qualité des informations générées en vue de la prise de décision. Ainsi, en référence aux travaux d'El Morjani (2002), Hentati et al. (2005), Jourda (2005), Jourda et al. (2006), Kouamé (2007), Dibi (2008), Youan Ta (2008) et Youan Ta et al. (2011), un certain nombre de critères est identifié, sélectionné et évalué pour atteindre l'objectif fixé. Pour cette étude, les critères jugés très importants sont le coût de foration (euros) ; la probabilité de réussite (%) ; le débit d'exploitation (m^3/h) ; le niveau piézométrique de la nappe (m) ; l'infiltration efficace (mm) ; la pente (%) ; la densité de drainage (km/km^2) ; la densité de fractures (km/km^2) ; la perméabilité induite (m/s) ; l'épaisseur d'altération (m).

L'application des filtres Gamma, Kuan, Frost et Lee sur l'image Radar a permis de réduire fortement le chatoiement. La nouvelle image débarrassée de cette impureté est traitée par les filtres non directionnels (Laplacien modifié et gradient) et filtres directionnels (Sobel) en adoptant des fenêtres mobiles de taille 7×7 . Mener grâce au logiciel ENVI, ces opérations conduisent à l'établissement de la carte de fracturation du département d'Oumé (Baka, 2012) (figure 2). Les critères densité de fractures (km/km^2) et la perméabilité induite (m/s) ont été élaborés à partir du traitement de cette carte de fracturation grâce respectivement au logiciel Linwin et au programme EVC. L'exploitation des

Cartographie des zones potentielles à l'implantation des forages à gros débits en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas du département d'Oumé (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)

images SRTM sous le logiciel ARCGIS a permis non seulement d'établir la carte du critère pente (%) mais aussi la carte du réseau hydrographique. Cette dernière permet à la suite d'un traitement sous le logiciel Linwin d'élaborer le critère densité de drainage (km^2/km^2). L'exploitation des données hydroclimatiques ont permis d'estimer le critère infiltration efficace (mm). Les critères coût de foration (euros); probabilité de réussite (%); débit d'exploitation (m^3/h); niveau piézométrique de la nappe (m) et épaisseur d'altération (m) ont tous été élaborés à partir du traitement des données de forages exécutées dans le département d'Oumé.

La répartition spatiale de tous ces critères est représentée sous forme de cartes en format « shape file » et compilé en une seule base de données directement sous le logiciel ARC GIS. Pour plus de détails concernant les procédures d'élaboration de tous ces critères, nous renvoyons les lecteurs aux travaux de Jourda (2005), Youan Ta (2008) et Youan Ta et al. (2011)

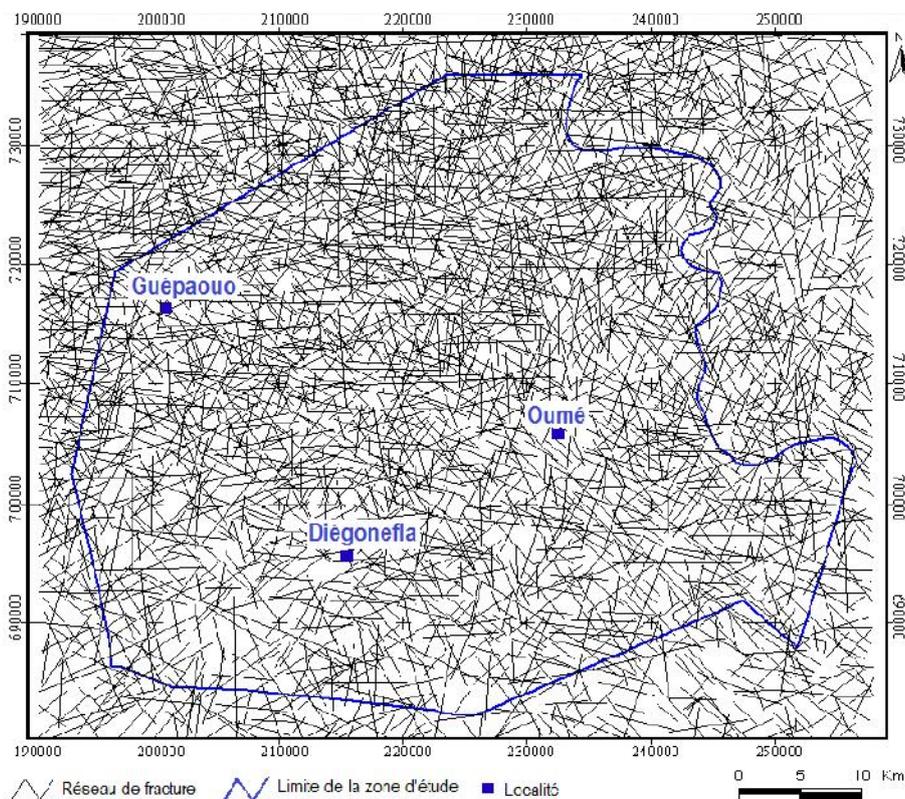


Figure 2 : Carte linéaire détaillée établie à partir d'une image RSO de RADARSAT-1 du département d'Oumé (Baka, 2012)

Classification et standardisation des critères

La classification consiste à regrouper les valeurs de chaque critère en un certain nombre de classes. Les différentes limites choisies pour ces classes ne sont pas nécessairement équidistantes mais fonction des objectifs fixés et du contexte général de l'étude (Jourda, 2005). Ces limites sont fixées en fonction des données disponibles et ne sont pas figées. Dans le cadre de cette étude, la classification tient compte de la variance des données et s'inspire de celle adoptée dans les travaux antérieurs (Jourda et al., 2006 et Youan Ta et al., 2011) réalisés en région de socle cristallin et métamorphique. Ainsi, 5 classes ont été retenues en vue d'une meilleure interprétation des résultats : Très faible, Faible, Moyenne, Forte et Très forte.

Une étape importante et incontournable est la standardisation des différents critères. En effet, ces critères sont exprimés dans différentes unités et pour une bonne analyse multicritère, une normalisation est nécessaire. Un intervalle commun de 1 à 10 est retenu pour cette opération. La note 10 est attribuée aux classes « très faible » ou « très forte » selon qu'elles contribuent à l'excellente réalisation de l'indicateur considéré. Dans le cas inverse, la note 1 est attribuée à ces classes. En suivant la même logique, les valeurs intermédiaires sont attribuées aux classes intermédiaires selon une distribution linéaire.

Pour l'élaboration de chaque indicateur considéré, un certain nombre de critères est retenu. Leur classification et standardisation sont ci-dessous présentées.

- ***Indicateur de potentialité en eaux souterraines***

Cet indicateur témoigne de la présence potentielle ou non d'eau dans un aquifère donné. Il résulte de la combinaison de 6 critères choisis à cause de leur concours directe ou indirecte à la présence potentielle d'eau souterraine. Il s'agit de l'infiltration efficace (Ie), la pente, la densité de drainage (Dd), la densité de fractures (Df), la perméabilité induite (Pi) et l'épaisseur d'altération (Ea). Le résultat de la classification et la standardisation de ces 6 critères est consigné dans le tableau 1.

- ***Indicateur accessibilité***

Cet indicateur permet de connaître les zones où l'eau souterraine est facilement accessible ou non. Selon Youan Ta et al. (2011), la ressource en eau d'un aquifère n'est accessible que si le coût de foration « l'autorise ». L'indicateur accessibilité est élaboré en combinant les critères coût de foration et probabilité de réussite. Le résultat de la classification et la standardisation des deux critères entrant dans l'élaboration de cet indicateur est consigné dans le tableau 2.

- **Indicateur exploitabilité**

Il s'agit ici d'un indicateur qui conditionne la présence ou pas de forages dans une zone donnée. En effet dès qu'il est avéré que la ressource est inexploitable dans une zone, nul besoin d'implanter un ouvrage. Cet indicateur est produit grâce à la combinaison des critères débit d'exploitation et niveau piézométrique. Le résultat de la classification et la standardisation des deux critères entrant dans l'élaboration de cet indicateur est consigné dans le tableau 2.

Pondération des critères

La pondération consiste à affecter des poids à chaque critère rentrant dans la réalisation d'un indicateur donné. La valeur des poids est relative à l'importance du critère dans l'accomplissement du phénomène que traduit l'indicateur. Dans cette étude, la pondération a été effectuée suivant la méthode de comparaisons par paires par le processus d'analyse hiérarchique (Analytical Hierarchy Process, AHP) développée par Saaty (2008 et 2000). En effet, selon Youan Ta et al. (2011), contrairement à la technique de pondération basée sur le choix arbitraire des poids, celle proposée par Saaty (2000) est une méthode simple dont l'ossature est consolidée par des calculs mathématiques qui génèrent des coefficients de pondération (C_p) standardisés dont la somme est égale à 1.

En s'appuyant sur la matrice générée par la comparaison par paire sur l'échelle proposée par Saaty (Tableau 3), le calcul des vecteurs propres (V_p calculé selon l'équation 1) et des coefficients de pondération devient alors plus facile.

$$V_p = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n g_i} \tag{1}$$

avec V_p le vecteur propre, g_i la note du critère i obtenu dans la matrice de comparaison par paire et n le nombre de critère.

Le coefficient de pondération C_p pour chaque critère est obtenu par le rapport de son vecteur propre et la somme de tous les vecteurs propres des autres critères entrant dans la réalisation d'un indicateur donné (équation 2).

$$C_{pi} = \frac{V_{pi}}{\sum_{i=1}^n V_{pi}} \tag{2}$$

avec C_{pi} le coefficient de pondération du critère i et V_{pi} le vecteur propre du critère i .

L'expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de critères selon El Morjani (2002) et pour les différents indicateurs, le calcul des vecteurs propres et des coefficients de pondération accompagnés d'exemple de

calcul sont consignés dans les tableaux 3 et 4. Ces tableaux ont été inspirés des travaux de Youan Ta (2008) et Youan Ta et al. (2011)

La matrice de comparaison par paire est aussi appelée matrice de jugement parce qu'elle porte les jugements du spécialiste qui est chargé de comparer les critères deux à deux. Au-delà de deux critères, il est possible que des incohérences soient observées dans le jugement apporté. D'où la nécessité d'adopter une méthodologie pertinente qui permet non seulement de mettre en évidence l'incohérence mais également d'apporter une solution pour corriger cette incohérence

Tableau 1 : Classification et Standardisation des critères de potentialité en eaux souterraines

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Notes
Potentialité en eau souterraine	Pente (%)	Très faible	< 0,6	10
		Faible	0,6 - 1,7	8
		Moyen	1,7 - 3,4	5
		Forte	3,4 - 5,1	3
		Très forte	> 5,1	1
	Infiltration efficace (mm)	Très faible	< 25	1
		Faible	25 - 50	3
		Moyen	50 - 75	5
		Forte	75 - 100	8
		Très forte	> 100	10
	Densité de drainage (km/km ²)	Très faible	< 3	10
		Faible	3 - 6	8
		Moyen	6 - 9	5
		Forte	9 - 11	3
		Très forte	> 11	1
	Densité de fracturation (km/km ²)	Très faible	< 1,3	1
		Faible	1,3 - 1,9	3
		Moyen	1,9 - 2,7	5
		Forte	2,7- 3.3	8
		Très forte	> 3,3	10
Perméabilité induite (×10 ⁻⁶ m/s)	Très faible	< 3,06	1	
	Faible	3,06 - 5,49	3	
	Moyen	5,49 - 7,39	5	
	Forte	7,39 - 10,1	8	
	Très forte	> 10,1	10	
Epaisseur d'altération (m)	Très faible	< 10	1	
	Faible	10 - 15	3	
	Moyen	15 - 25	5	
	Forte	25 - 35	8	
	Très forte	> 35	10	

Tableau 2 : Classification et standardisation des critères d'accessibilité et d'exploitabilité

Indicateur	critères	Qualificatifs des critères	Classes	Note
Accessibilité	Probabilité de succès (%)	Très faible	< 25	1
		Faible	25 - 50	3
		Moyen	50 - 60	5
		Fort	60 - 80	8
		Très fort	> 80	10
	Coût de foration (Euros)	Très faible	< 979	10
		Faible	979 - 1393	8
		Moyen	1393 - 1668	5
		Elevé	1668 - 2140	3
		Très élevé	> 2140	1
Exploitabilité	Débit d'exploitation (m ³ /h)	Très faible	< 1	1
		Faible	1 - 2	3
		Moyen	2 - 4	5
		Fort	4 - 10	8
		Très fort	> 10	10
	Niveau piézométrique (m)	Très faible	< 6	10
		Faible	6 - 10	8
		Moyen	10 - 15	5
		Fort	15 - 25	3
		Très fort	> 25	1

Tableau 3 : Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de critères (El Morjani, 2002)

Expression d'un critère par rapport à un autre	Note
Même importance	1
Modérément important	3
Fortement important	5
Très important	7
Extrêmement important	9
Modérément moins important	1/3
Moins important	1/5
Fortement moins important	1/7
Extrêmement moins important	1/9

Tableau 4 : Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des critères des indicateurs potentialité (a) ; accessibilité (b) et exploitabilité (c)

a) Indicateur potentialité

	Pente	Infiltration	Dd	Df	Pi	Ea	Vp	Cp
Pente	1	1/2	5	3	5	5	2,392	0,284
Infiltration	2	1	7	5	5	5	3,471	0,412
Dd	1/5	1/7	1	1/2	1/3	1	0,410	0,047
Df	1/3	1/5	2	1	1	5	0,934	0,111
Pi	0,2	0,2	3	1	1	3	0,843	0,100
Ea	0,2	0,2	1	0,2	1/3	1	0,372	0,044

b) Indicateur accessibilité

	Probabilité de succès	Coût de foration	Vecteur propre	Coefficient de pondération
Probabilité de succès	1	1/3	$\sqrt{1 \times \frac{1}{3}} = 0,58$	$\frac{0,58}{0,58 + 1,73} = 0,25$
Coût de foration	3	1	$\sqrt{3 \times 1} = 1,73$	$\frac{1,73}{0,58 + 1,73} = 0,75$

c) indicateur exploitabilité

	Débit d'exploitation	Niveau piézométrique	Vecteur propre	Coefficient de pondération
Débit d'exploitation	1	3	$\sqrt{3 \times 1} = 1,73$	$\frac{1,73}{1,73 + 0,58} = 0,75$
Niveau piézométrique	1/3	1	$\sqrt{1 \times \frac{1}{3}} = 0,58$	$\frac{0,58}{1,73 + 0,58} = 0,25$

L'avantage de la méthode de Saaty se trouve dans sa capacité à vérifier la cohérence du jugement porté lors la comparaison de plus deux critères grâce à l'indice de cohérence qu'elle permet de calculer. Ainsi, un raisonnement est dit cohérent lorsque son indice de cohérence reste inférieur ou égal à 10%.

L'élaboration de l'indicateur potentialité a nécessité la comparaison de six critères entres eux, entrainant ainsi une forte possibilité d'introduction d'un jugement incohérent. Ainsi, sur la base de la matrice de comparaison par paire de l'indicateur potentialité (Tableau 4a), l'indice de cohérence (I_d) est déterminé en suivant une approche méthodologique segmentée en cinq étapes (Tableaux 5 à 7).

Cartographie des zones potentielles à l'implantation des forages à gros débits en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas du département d'Oumé (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)

- La 1^{ère} étape consiste à multiplier chaque colonne par le poids ou le coefficient de pondération (C_p) correspondant. On obtient ainsi la matrice du tableau ci-dessous.

Tableau 5 : Première étape de la détermination de l'IC.

	Pente	Infiltration	Dd	Df	Pi	Ea
Pente	0,284	0,206	0,235	0,333	0,500	0,220
Infiltration	0,568	0,412	0,329	0,555	0,500	0,220
Dd	0,057	0,059	0,047	0,055	0,033	0,044
Df	0,095	0,082	0,094	0,111	0,100	0,220
Pi	0,057	0,082	0,141	0,111	0,100	0,132
Ea	0,057	0,082	0,047	0,022	0,033	0,044

- Au niveau de la 2^e étape, on procède à la somme des éléments de chaque ligne de la matrice.

Tableau 6 : Deuxième étape de la détermination de l'IC

	Pente	Infiltration	Dd	Df	Pi	Ea	Total : T
Pente	0,284	0,206	0,235	0,333	0,500	0,220	1,778
Infiltration	0,568	0,412	0,329	0,555	0,500	0,220	2,584
Dd	0,057	0,059	0,047	0,055	0,033	0,044	0,295
Df	0,095	0,082	0,094	0,111	0,100	0,220	0,702
Pi	0,057	0,082	0,141	0,111	0,100	0,132	0,623
Ea	0,057	0,082	0,047	0,022	0,033	0,044	0,286

- La 3^e étape : on divise chaque total de ligne par le poids du critère correspondant à cette ligne

Tableau 7 : Troisième étape de la détermination de l'IC

	C_p	Total : T	T/C_p
Pente	0,284	1,778	6,260
Infiltration	0,412	2,584	6,272
Dd	0,047	0,295	6,287
Df	0,111	0,702	6,325
Pi	0,100	0,623	6,232
Ea	0,044	0,286	6,494

- Au niveau de la 4^e étape, on détermine \max qui est la moyenne des résultats obtenus à l'étape précédente.

$$\}_{\max} = (6,260 + 6,272 + 6,287 + 6,325 + 6,232 + 6,494) / 6 = 6,312$$

- Au niveau de la 5^e et dernière étape, on détermine IC en appliquant la formule ci-dessous.

$$IC = \frac{\} - \text{nombre de critères}}{\text{nombre de critères} - 1} = \frac{6,312 - 6}{6 - 1} = 0,062$$

On obtient un indice de cohérence égal à 6,2%, il est donc inférieur à 10%. Par conséquent on peut affirmer que le raisonnement utilisé pour l'établissement de la matrice de l'indicateur potentialité est cohérent et peut être utilisé pour le calcul de cet indicateur.

Agrégation des critères

Dans cette étude la méthode d'agrégation des critères par pondération a été utilisée. Elle consiste à faire la somme des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère intervenant dans l'élaboration d'un indicateur donné (équation 3) :

$$S = \sum_{i=2}^n W_i X_i \quad (3)$$

avec S le résultat, W_i le poids du critère i et X_i la valeur standardisée du critère i . L'agrégation par pondération fournit un indice d'aptitude situé sur une échelle de 0 à 10. En effet, la somme des coefficients de pondération générée par la méthode de Saaty (2000) vaut 1. L'établissement de la carte d'un indicateur donné consistera à reporter dans un espace géographique les différentes valeurs issues de la sommation des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère intervenant dans l'élaboration dudit indicateur (Youan Ta et al., 2011 ; Koudou et al., 2011). Une reclassification des indicateurs conduira à des cartes thématiques à quatre classes qui sont : les classes mauvaise, médiocre, bonne et excellente.

Etablissement de la carte des zones favorables à gros débits

Suivant la même logique de l'analyse multicritère, les indicateurs potentialité, accessibilité et exploitabilité considérés ici comme des critères de décision vont être combinés selon la méthode de codification qui est également une technique d'agrégation complète. Cette démarche s'explique par le fait que la ressource en eau souterraine recherchée doit être suffisante, accessible et exploitable. Il est important avant de procéder à cette combinaison de s'assurer que les différentes cartes (indicateurs) reflètent la sensibilité de terrain, d'où la nécessité de leur validation.

• **Procédure de la validation des différentes cartes d'indicateurs**

Il faut signaler que seule la carte de l'indicateur potentialité sera soumise à cette procédure de validation. En effet celles des indicateurs accessibilité et exploitabilité sont produites à partir des données directement recueillies sur le terrain, ce qui n'est pas le cas de l'indicateur potentialité. Ainsi la validation de cette carte suivra la procédure de la théorie des courbes de tendance des classes de sensibilité proposée par Jourda (2005). À chaque classe est affecté un index selon lequel un tri est fait, de sorte qu'à la carte thématique, il est seulement superposé la classe du critère d'évaluation voulue. Il est ensuite relevé le nombre d'ouvrages (suivant la classe du critère d'évaluation) qui s'y trouve. Ainsi, pour chaque classe du critère d'évaluation, on obtient un nombre d'ouvrages qui appartient à chaque classe de sensibilité de la carte thématique étudiée et on calcule son pourcentage par rapport au total. On établit alors pour chaque classe de sensibilité une courbe de tendance de sensibilité par rapport à chacune des classes du critère d'évaluation. Les formes théoriques des courbes de tendance de sensibilité en zone de socle sont présentées à la figure 3. La validation des cartes thématiques se fait par comparaison de la forme des courbes de tendance des classes de sensibilité à celle des courbes théoriques. Le critère choisi pour la validation de l'indicateur potentialité notamment le débit, ne doit pas avoir été utilisé pour la réalisation de cet indicateur et doit provenir exclusivement de la zone d'étude. Les débits des forages utilisés sont ceux des programmes d'Hydraulique villageoise de cette région. Pour respecter le principe de conformité du critère, des classes ayant les mêmes bornes que celles de la carte de potentialité sont définies.

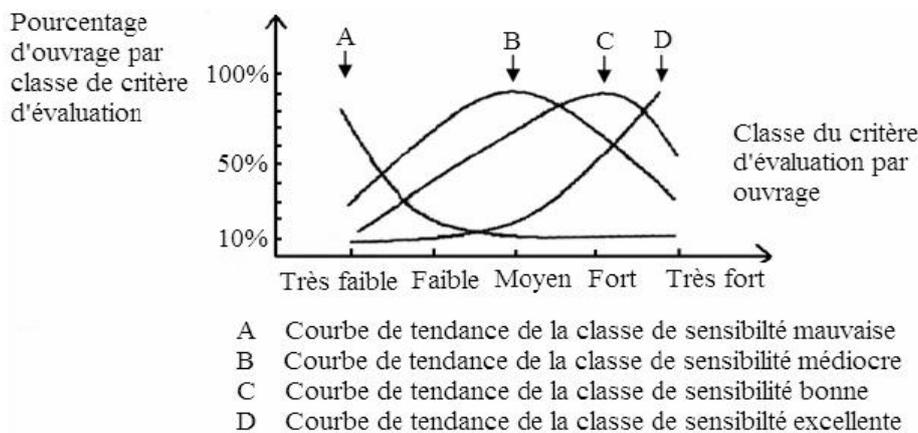


Figure 3 : Graphe théorique des courbes de tendance des classes de sensibilité (cas général) (Jourda et al., 2006).

- **Agrégation des indicateurs par codification pour la réalisation de la carte des zones favorables.**

Le tableau 8 présente les codes attribués aux différentes classes déterminées pour chaque indicateur considéré.

Tableau 8 : Classes et codes des critères (potentialité, exploitabilité et accessibilité)

Indicateur	Critères	Classes	Codes
Zones favorables	Potentialité	Excellente	400
		Bonne	300
		Médiocre	200
		Mauvaise	100
	Exploitabilité	Excellente	40
		Bonne	30
		Médiocre	20
		Mauvaise	10
	Accessibilité	Excellente	4
		Bonne	3
		Médiocre	2
		Mauvaise	1

En effet, l'agrégation par codification crée de nouvelles classes qui sont représentées par des nombres dans lesquels la participation de chaque critère peut être facilement déterminée. Ainsi il est possible de suivre la trace des critères dans l'indicateur à élaborer. En effet, pour l'interprétation de la classe « 341 » c'est-à-dire 300 + 40 + 1, l'opérateur sait qu'elle provient de l'agrégation des critères suivants ci-dessous représentés :

- « Bonne » potentialité en eau d'où le code 300 ;
- « Excellent » exploitabilité d'où le code 40 et
- « Mauvaise » accessibilité d'où le code 1.

La combinaison de ces critères par la technique de la codification donne différentes classes thématiques au nombre de 64 (Tableau 9). Une analyse de chacune de ces classes permet de les ranger dans une des 4 grandes classes issues d'une reclassification. Il s'agit de la classe non convenable (Caractère normal) ; la classe acceptable pour l'hydraulique villageoise (*en italique*) ; la classe acceptable pour l'hydraulique villageoise améliorée (*en italique gras*) et la classe convenable (**en gras**). La carte des zones favorables comportant ces grandes classes a été ainsi établie. Selon ce raisonnement, une zone de potentialité et d'exploitabilité bonne à excellente sera accessible par tous les moyens si c'est la profondeur à forer qui constitue l'obstacle. Cette zone sera donc considérée comme « classe convenable ». De même, quelles que soient la

potentialité et l'accessibilité d'une ressource, son inexploitabilité (exploitabilité mauvaise (10)) la rangerait dans la « classe non convenable ». L'élaboration des requêtes est la dernière phase aboutissant à la réalisation des cartes thématiques des indicateurs recherchés. Au sein du SIHRS qui a été mis en place, toutes les combinaisons ont été effectuées en mode Raster en utilisant l'outil "Map calculator" du module "Spatial Analyst" d'Arc-GIS. Cet outil "Map calculator" permet d'élaborer toutes les requêtes possibles par le biais des combinaisons qu'elle permet de réaliser.

Tableau 9 : Agrégation des critères par codification

		Critère 2 : Exploitabilité				
		Mauvaise (10)	Médiocre (20)	Bonne (30)	Excellente (40)	
Critère 1 : Potentialité en eau souterraine	Excellente (400)	414 ; 413 ; 412 ; 411	424 ; 423 ; 422 ; 421	434 ; 433 ; 432 ; 431	444 ; 443 ; 442 ; 441	Excellente (4) Bonne (3) Médiocre (2) Mauvaise (1)
	Bonne (300)	314 ; 313 ; 312 ; 311	324 ; 323 ; 322 ; 321	334 ; 333 ; 332 ; 331	344 ; 343 ; 342 ; 341	Excellente (4) Bonne (3) Médiocre (2) Mauvaise (1)
	Médiocre (200)	214 ; 213 ; 212 ; 211	224 ; 223 ; 222 ; 221	234 ; 233 ; 232 ; 231	244 ; 243 ; 242 ; 241	Excellente (4) Bonne (3) Médiocre (2) Mauvaise (1)
	Mauvaise (100)	114 ; 113 ; 112 ; 111	124 ; 123 ; 122 ; 121	<i>134 ;</i> <i>133 ;</i> <i>132 ; 131</i>	<i>144 ;</i> <i>143 ;</i> <i>142 ; 141</i>	Excellente (4) Bonne (3) Médiocre (2) Mauvaise (1)
						Critère 3 : Accessibilité

RESULTATS ET INTERPRETATION

L'analyse multicritères a abouti à la réalisation de nombreuses cartes apportant une aide considérable à la décision en matière de prospection hydrogéologique.

Potentialité en eau souterraine du département d'Oumé

Analyse de la carte de potentialité en eau souterraine

Cette carte est constituée de 4 classes réparties comme suit (Figure 4) :

- i. mauvaise potentialité : avec une proportion de 5,62%, cette classe est faiblement représentée sur l'ensemble de la zone d'étude. On la retrouve disséminée quasiment dans toute la zone à l'exception de la partie l'Est ;
- ii. Potentialité médiocre : cette classe recouvre 36,14% de la zone d'étude montrant ainsi que dans cette partie de la région l'eau n'est pas en quantité suffisante pour alimenter la population sans risque de pénurie. Cette classe est bien représentée au nord au nord-ouest et à l'ouest du secteur d'étude ;
- iii. bonne potentialité : c'est la classe la plus représentée. Elle occupe 52,37% de la zone d'étude et apparaît essentiellement au Sud, à l'Est et au Centre entre les localités d'Oumé et de Doukouya. Ces zones sont caractérisées par des pentes relativement faibles, une forte densité de fracturation et une densité de drainage modérément faible ;
- iv. excellente potentialité : cette classe traduit la présence de l'eau en quantité suffisante avec un environnement très fracturé. Cependant, elle ne représente que 5,87% du secteur d'étude. Elle se présente en petits secteurs au sud et à l'est de la zone d'étude.

La présence des classes bonne et excellente au Sud et surtout à l'Est de la zone d'étude s'explique par le fait que cette région est bornée dans sa partie orientale par le Bandama. En conclusion la région d'Oumé offre une bonne potentialité en eau souterraine puisque les zones à potentialité bonne et excellente couvrent environ 60% du territoire.

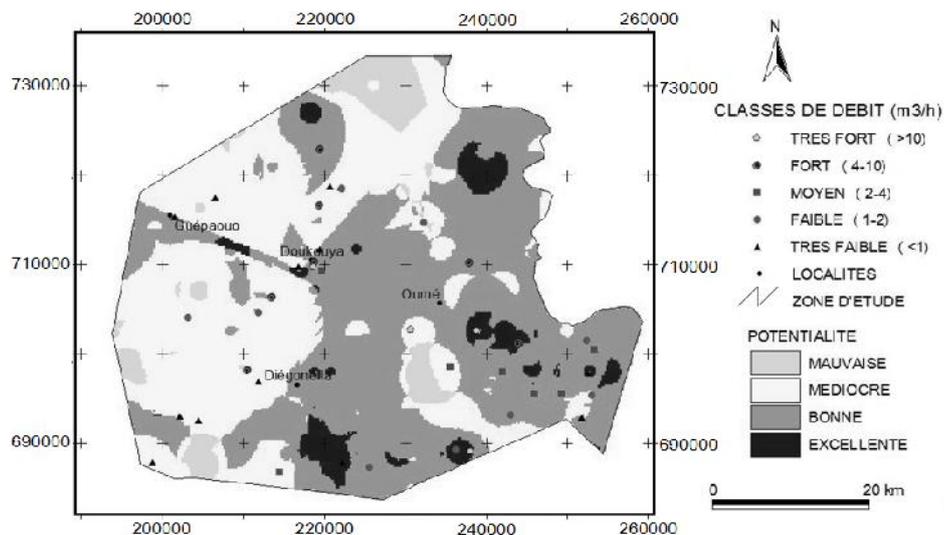


Figure 4 : Carte des débits superposés aux classes de sensibilité de la carte de potentialité en eau souterraine

Résultat de la validation de la carte de potentialité en eau souterraine

Les débits de 44 forages ont été superposés à la carte de potentialité. Le graphe des pourcentages du nombre de forages en fonction des classes de débits est illustré à la figure 5. L'analyse du graphe montre que 42,85% des forages à débit fort se superposent à la classe de sensibilité bonne et 50% des forages à débit très fort se superposent à la classe de sensibilité excellente. Par ailleurs, il ressort de cette analyse que 62,5% des forages à débit moyen se superposent à la classe de sensibilité bonne et que la classe de sensibilité médiocre recouvre 50% des forages ayant des débits moyens. Les différentes classes de sensibilité sont recouvertes en grande partie par les forages à débits correspondants. On note toutefois qu'aucun ouvrage ne se superpose à la classe de sensibilité mauvaise. Ainsi, on peut retenir que la carte de potentialité en eau de la région d'Oumé reflète la sensibilité du terrain.

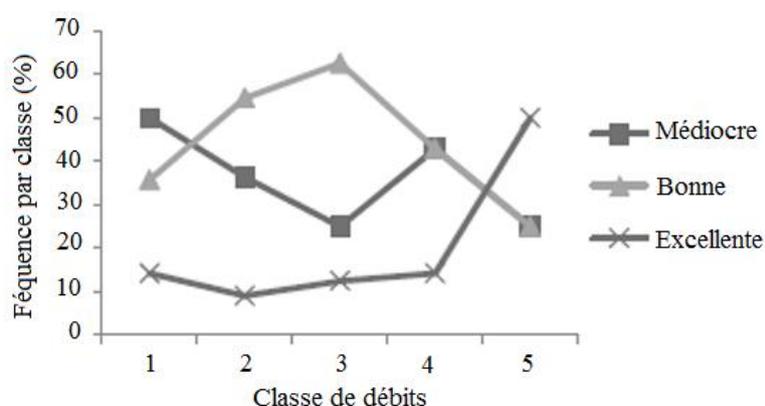


Figure 5 : Courbes de tendance des classes de sensibilité de la carte de potentialité en eaux souterraines

Accessibilité des ressources en eau souterraine du département d'Oumé

La carte d'accessibilité (figure 6) est définie par 4 classes :

- i. mauvaise accessibilité : elle ne représente que 4,2% de la superficie de la zone d'étude. On la retrouve un peu partout dans la zone sous forme de plages en forme arrondie et de tailles très variables. Cette classe indique le coût trop élevé de foration (> 2140 Euros) pour atteindre l'aquifère et exprime en même temps une faible probabilité de succès (< 25%) ;
- ii. médiocre accessibilité : cette classe occupe plus de la moitié de la région avec 65,6%. Elle domine l'ensemble des classes et apparaît aussi sous forme de point disséminés au Sud de Doukouya ;

- iii. bonne accessibilité : avec 28,4% de la zone d'étude, cette classe est beaucoup plus présente au Nord-est, au Centre et au Sud. Quelques poches sont aussi observées à l'Est et à l'Ouest de la zone d'étude ;
- iv. excellente accessibilité : seulement 1,8% du territoire étudié sont recouverts par cette classe. L'excellente accessibilité de la ressource en eau souterraine témoigne d'un coût de foration relativement très faible (< 977 Euros) et d'une probabilité de succès très élevée (> 80%). Cette classe se rencontre au Centre dans les environs d'Oumé et au Nord-ouest de la zone d'étude.

La région d'Oumé est dans l'ensemble dominée par une accessibilité médiocre (65,6%) des ressources en eau. Cela est essentiellement lié aux trop grandes profondeurs des nappes.

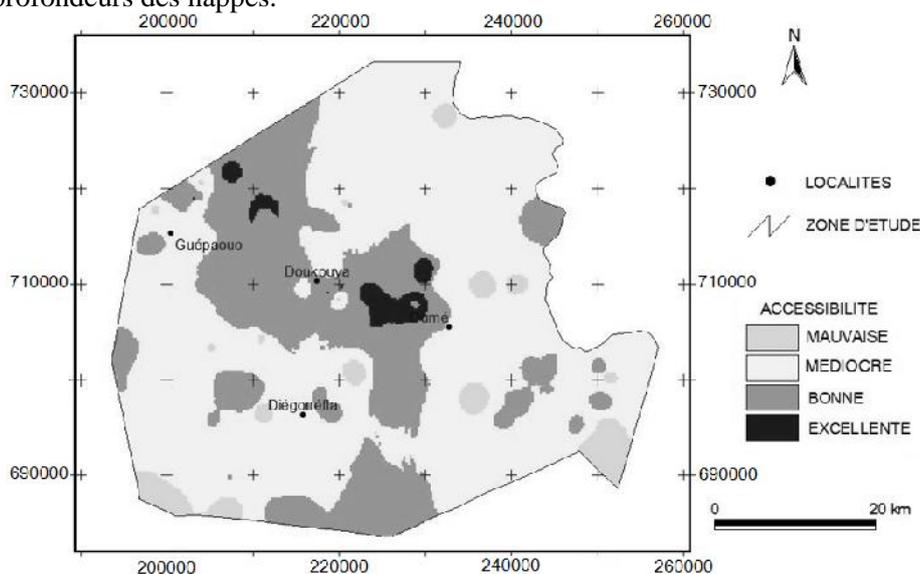


Figure 6 : Carte d'accessibilité des ressources en eau de la région d'Oumé

Exploitabilité des ressources en eau souterraine du département d'Oumé

L'analyse de la figure 7 révèle quatre classes d'exploitabilité inégalement réparties sur l'ensemble de la zone étudiée :

- i. mauvaise exploitabilité : cette classe n'occupe que 2,45% du secteur étudié. Elle se caractérise par de très petites surfaces qui couvrent la zone en dehors du nord. La classe mauvaise montre que les débits d'exploitation enregistrés dans les zones concernés sont très faibles ;
- ii. médiocre exploitabilité : elle occupe plus de la moitié (58%) de la surface étudiée. Cette classe est bien représentée au sud, au sud-est et à l'ouest ;

Cartographie des zones potentielles à l'implantation des forages à gros débits en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas du département d'Oumé (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)

- iii. bonne exploitabilité : avec une proportion de 32,45%, cette classe est localisée au Nord-Ouest et au Centre dans les environs de Diégonéfla et d'Oumé ;
- iv. excellente exploitabilité : elle représente 7,25% de la zone étudiée. Elle entoure la localité de Diégonéfla et apparaît aussi au nord d'Oumé, de Guépaouo et de Doukouya. Cette classe témoigne de l'existence de très forts débits.

L'ensemble de ces observations révèlent que moins de la moitié (environ 40%) des ressources disponibles dans la région d'Oumé a une exploitabilité bonne à excellente. L'exploitabilité médiocre de ces ressources est essentiellement liée à leur présence à la profondeur du niveau piézométrique et dans une moindre mesure au manque étude sérieuses avant implantation des ouvrages.

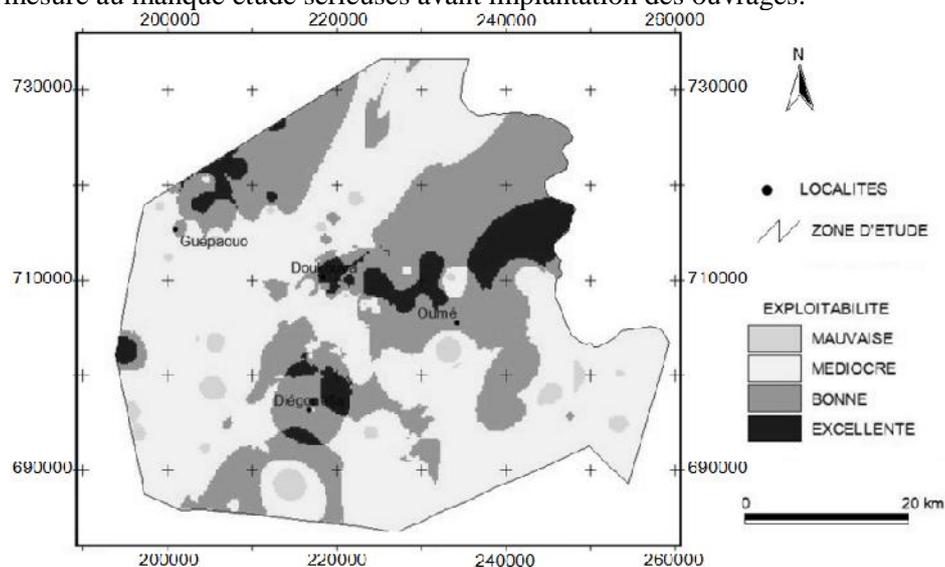


Figure 7 : Carte d'exploitabilité des ressources en eau de la région d'Oumé

Zones favorables à l'implantation des forages à gros débits.

L'analyse de la figure 8 révèle quatre classes de zones favorables à l'implantation de forages :

- i. la classe mauvaise zone à l'implantation de forages qui occupe 4,83% de la surface étudiée. Elle est localisée surtout au Nord et au Sud de la région avec quelques plages au Nord et à l'Ouest de Guépaouo. Ces zones ne conviennent pas à l'implantation de forages car elles sont caractérisées par une mauvaise potentialité en eau souterraine ;
- ii. la classe médiocre couvre 36,94% du territoire répartie notamment au nord-ouest et à l'ouest de la région. Ces zones sont appropriées lorsque les débits

faibles et moyens suffisent pour l’approvisionnement des populations. Cette classe est caractérisée par une potentialité médiocre à bonne, une accessibilité médiocre à bonne et une exploitabilité médiocre à bonne ;

- iii. la classe bonne zone à implantation de forages domine la région d’Oumé avec une proportion de 51%. Elle se rencontre au niveau des zones du Nord-est jusqu’au Sud. Ce sont des zones acceptables pour l’implantation de forages dans le cadre d’Hydraulique Villageoise Amélioré (HVA) ;
- iv. la classe excellente zone à implantation de forages représente 7,25% du territoire. Elle est caractérisée par une excellente potentialité en eau souterraine et une exploitabilité bonne à excellente. Elle se présente sous forme de plages localisées à l’Est, au Sud et dans les environs de Doukouya et de Guépaouo. Ces zones sont plus recherchées lors des campagnes d’implantation des forages à gros débits.

En somme dans la région d’Oumé, les zones favorables à l’implantation de forages à gros débits représentent plus de la moitié du territoire (soit 58,25%).

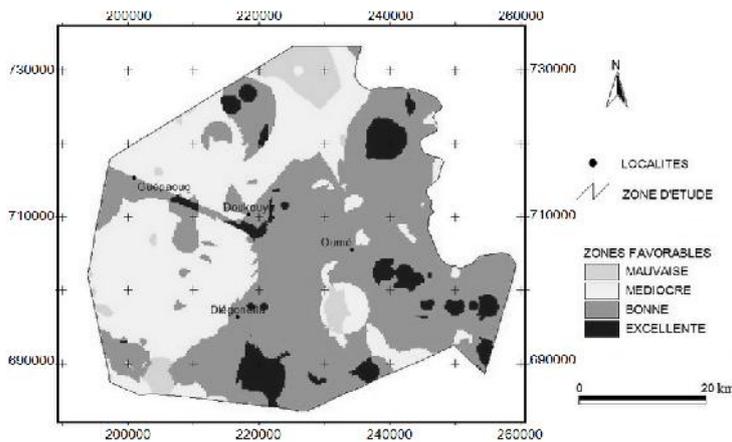


Figure 8 : Carte des zones favorables à l’implantation de forages

DISCUSSION

L’analyse multicritère apporte une aide précieuse à la caractérisation des phénomènes hydrogéologiques géospatiales faisant intervenir plusieurs paramètres ou critères. L’analyse multicritère couplé au SHIRS apporte une contribution incontestable dans la gestion des ressources en eau souterraine et les prises de décision en vue d’un développement harmonieux du département d’Oumé. Dans cette région, elle a contribué à la production des cartes de potentialité des ressources, de leur accessibilité et exploitabilité et enfin la carte des zones favorables à l’implantation des ouvrages à grands débits. Cette méthode a été appliquée avec succès dans plusieurs régions de Côte d’Ivoire par divers auteurs. Jourda (2005), Jourda et al. (2006) à Korhogo (nord de la Côte

d'Ivoire), Dibi (2008) à Aboisso (sud de la Côte d'Ivoire), Youan Ta (2008), Youan Ta et al. (2011) à Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire) et Koudou et al. (2011) dans le bassin versant du N'Zi (au centre de la Côte d'Ivoire) pour l'élaboration des cartes de potentialité, accessibilité et exploitabilité. Les résultats obtenus par ces auteurs s'apparentent à ceux obtenus dans la présente étude. Les résultats de ces travaux démontrent l'apport indéniable du SIHRS et de l'analyse multicritère dans le contexte décisionnel. Aussi cette étude apportera-t-elle assurément une contribution aux succès des prochaines campagnes d'implantation de forages dans le département d'Oumé. En effet, la parfaite connaissance de la répartition spatiale des zones favorables réduit fortement le taux d'échec lors de l'exécution de ces ouvrages. La qualité parfois médiocre et la quantité insuffisante des données entrant dans la réalisation de l'analyse multicritère conduisent à des résultats souvent erronés. Pour l'élaboration d'un critère de décision, si les données sont peu nombreuses et mal réparties sur l'ensemble de la zone d'étude, il est nécessaire de procéder à une estimation par krigeage. Cette méthode produit des estimations généralement accompagnées d'erreurs d'estimations. Plusieurs critères ainsi élaborés conduisent à la construction d'un indicateur plus ou moins erroné du fait de l'accumulation et l'intégration des différentes sources erreurs. Ceci a été signalé par Youan Ta et al. (2011) dans la région de Bondoukou. Ces auteurs ont indiqué qu'une bonne qualité et une base de données importante pourraient grandement améliorer la qualité des différentes cartes thématiques. De plus lorsque les critères sont trop nombreux, le risque d'incohérence des jugements étant alors trop élevé, la méthode de Saaty peut être délicate à mettre en œuvre (Roy, 1995). Joerin (1995) et Roy (1995) indiquent également que cette méthode demande au décideur de considérer toutes les comparaisons possibles, faisant implicitement l'hypothèse que tous les critères considérés sont parfaitement comparables. Selon Youan Ta et al. (2011) cette méthode admet qu'on ajoute les débits aux densités de fractures, etc. Toutefois, la standardisation des critères facilite et rend possible leur combinaison. Cette standardisation effectuée dans un intervalle commun de 1 à 10 est donc nécessaire car les différents critères ont été mesurés sur des échelles différentes au départ (El Morjani, 2002). L'analyse multicritère peut être considérée comme une approche subjective. Pour Koudou et al. (2011), la comparaison binaire des critères s'appuie sur le jugement subjectif de l'individu. Cette étape de collecte des appréciations est la plus controversée. En effet une des critiques majeures de la méthode de Saaty porte sur l'échelle de jugement. En effet, le choix de l'échelle allant de 1 (même importance) jusqu'à 9 (absolument plus important) n'est pas justifié mathématiquement.

En dépit de toutes ces insuffisances relevées ci-dessus, il n'en demeure pas moins que l'analyse multicritère adoptée dans le cadre de cette étude produit d'excellents résultats. En effet les différentes cartes obtenues ici sont d'une aide précieuse pour l'approvisionnement en eau potable de la région d'Oumé.

CONCLUSION

L'application de l'analyse multicritères dans l'étude des ressources en eau souterraine du département d'Oumé a montré son intérêt. Les différentes techniques de l'analyse multicritère appliquées dans le cadre de cette étude ont en effet, permis de mieux connaître le socle fracturé de la région d'Oumé. L'étude de la potentialité en eau souterraine indique qu'environ 60% de cette région ont 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, la zone d'étude est dominée par accessibilité médiocre (65,6%) de ses ressources en eau. Ce résultat est essentiellement liée 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. L'usage de cette carte pourrait réduire considérablement le taux d'échec dans les implantations futures des ouvrages de captage des eaux souterraines du département d'Oumé.

REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient remercier la Direction de l'hydraulique Rurale et Périurbaine (DHRP), la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) et le Centre Universitaire de Recherche et Application en Télédétection (CURAT) pour toute leur aide et la mise à notre disposition les différentes données et matériels. Les auteurs voudraient également remercier les différents instructeurs qui ont contribué à l'amélioration de ce présent document à travers leurs critiques, leurs commentaires et suggestions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAKA D. (2012). Géométrie, hydrodynamisme et modélisation des réservoirs fracturés du socle protérozoïque de la région d'Oumé (centre-ouest de la côte d'ivoire).Thèse unique. Université Félix Houphouet Boigny d'Abidjan, 390 p.
- BIEMI J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute

Cartographie des zones potentielles à l'implantation des forages à gros débits en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas du département d'Oumé (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)

Marahoué (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 493 p.

- BRUNNER P., HENDRICKS F. H.J., KGOTLHANG L., BAUER-GOTTWEIN P., KINZELBACH W. (2007). How can remote sensing contribute in groundwater modelling? *Hydrogeol. J.*, Vol.15, 5-18
- DIBI B. (2008). Cartographie des sites potentiels d'implantations des points d'eau Dans le département d'Aboisso (sud-est de la Côte-d'Ivoire) : Apport du SIG et de l'analyse multicritère, Thèse unique de doctorat, université d'Abobo-Adjamé, 164p
- DRURY S.A., DELLER A.M.E. (2002). Remote sensing and locating new water sources.
http://www.unoosa.org/pdf/sap/2002/Ethiopia/presentations/12speaker01_1.pdf. Consulté en novembre 2006.
- EL MORJANI Z. (2002). Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc), Thèse de doctorat, université de Genève, Terre et Environnement, Vol. 42. 300 p.
- FAILLAT J.P. (1986). Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest), Thèse Univ. Languedoc, Montpellier, France, 534 p.
- GEOMINES L. (1982). Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Ministère des Travaux Publics et des Transports, Direction Centrale de l'Hydraulique, République de Côte d'Ivoire, carte de Bondoukou, Cahier n°14.
- GOULA B.T.A., SAVANE I., KONAN B., FADIKA V., 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* – La revue en sciences de l'environnement, Vol7, N°1, 1-12.
- HENTATI I., ZAIRI M., DHIA H.B. (2005). Utilisation des SIG pour l'évaluation de la vulnérabilité environnementale des aquifères phréatiques : Cas de la nappe de Sfax-Agareb (Sud-Est tunisien), Communication SIG 2005, Environnement/Eau, Conférence Francophone ESRI - 5 et 6 octobre – Issy-les-Moulineaux, France.
- HOFFMANN J., SANDER P. (2007). Remote sensing and GIS in hydrogeology, *Hydrogeol. J.*, Vol.15, 1-3.
- INS (2000). Recensement général de la population et de l'habitat 1998, Région du Fromager, 30 p.
- JOERIN F. (1995). Méthode multicritère d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site, *Rev. Int. Géomatique*, Vol.5, N°1, 37-51.
- 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'hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 430 p.
- JOURDA J.P., SALEY M.B., DJAGOUE E. V., KOUAME K., J., BIEMI 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 de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation, Rev. Télédétection, Vol. 5, N°4, 339-357.
- KOUAME K.F. (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale, Thèse 3ème cycle, Univ. Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 194 p.
- KOUAME K. J (2007). Contribution à la gestion intégrée des ressources en eaux (GIRE) du district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution, Thèse unique de doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 225 p.
- KOUDOU A., KOUAME F.K., YOUAN TA M., SALEY M.B., JOURDA J.P., BIEMI J. (2011). 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).
- LEBLANC M., FAVREAU G. SARAH T., LEDUC C., RAZACK M., MOFOR L. (2007). Remote sensing for groundwater modelling in large semiarid areas: Lake Chad Basin, Afr. Hydrogeol. J., Vol.15, 97-100
- SAATY (2008). Decision making with the analytic hierarchy process, Int. J. Serv. Sci., Vol. 1, No. 1, 83-98
- SAATY T.L. (2000). Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process, kindle Edition Pittsburgh, PA 15260 USA. Vol. 6, 478p.
- SALEY M.B. (2003). Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-image et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse de doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 211p.
- 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 ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 395p.
- YOUAN TA M., LASM T., JOURDA J. P., KOUAME K. F., RAZACK M. (2008). Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de

Cartographie des zones potentielles à l'implantation des forages à gros débits en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas du département d'Oumé (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)

Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire), Rev. Télédétection, Vol. 8, N°2, 119-135.

YOUAN TA M., LASM T., JOURDA J. P., SALEY M.B., ADJA G.M., KOUAME K., BIEMI J. (2011). Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère : Cas de de la région de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). Rev. Int. géomatique. Vol. 21, N°1, 43-71.

YOUAN TA M., KOUAME K. F., KOUDOU A., ADJA M.G., BAKA D., LASM T., DE LASME O., JOURDA J.P., BIEMI J. (2014) Apport de la cartographie lithostructurale par imagerie satellitaire Landsat 7 à la connaissance des aquifères du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire), Int. J. Innov. Appl. Stud., Vol. 7, N°3, 892-910.