

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

Concept of a decision-making tool for the groundwater prospecting in hard rock area; Southeast of Ivory Coast

KOUDOU A.¹, ADIAFFI B.², ASSOMA T.V.³, SOMBO A.P.¹, AMANI E.M.E.⁴ & BIEMI J.^{2,3}

Abstract : The present study is a contribution to the effort of prospecting and exploitation of the water table of Ivory Coast to answer the needs in drinkable water of the continuously increasing population. It has as principal objective to conceive a prototype of GIS coupled to the analysis multicriteria, as effective tool of decision-making aid for the selection of the sites most appropriate for the establishment of productive drillings. The structuring of several data (satellite pictures, drillings, geological, DEM, hydrographic data.) mainly obtained from new technologies of the geomatic allowed to set up a geospatial database. The combination of different parameters conditioning the existence of reservoirs in base rock zone in a GIS, facilitated the spatial analysis and the mapping of the potential aquifer zones. The base rock zone of the southeast is dominated by Excellent and Good classes (80%). The superposition of productive drillings ($Q > 1 \text{ m}^3/\text{h}$) to the structural lineaments network reveals the fractures and the productive crossings of fractures. The association of Excellent and Good zones of water-bearing potentiality with fractures and crossings of productive fractures highlights the sites most favourable to the installation of future productive drillings.

Keywords : , Ivory Coast , base rock, GIS, multicriteria analysis, aquiferous potentiality.

Résumé : La présente étude est une contribution à l'effort de prospection et d'exploitation des nappes aquifères de la Côte d'Ivoire pour répondre aux besoins en eau potable de la population sans cesse croissante. Elle a pour objectif principal de concevoir un prototype de SIG couplé à l'analyse multicritères, comme outil efficace d'aide à la décision pour la sélection des sites les plus aptes à l'implantation des forages productifs. La structuration de plusieurs données (images satellitaires, données de forages, géologiques, MNE, hydrographiques, etc.) majoritairement obtenues à partir des nouvelles technologies de la géomatique a permis de mettre en place une base de données géospatiales. La combinaison des différents paramètres conditionnant l'existence de réservoirs en milieu de socle dans un SIG, a facilité l'analyse spatiale et la restitution cartographique des zones à potentialité aquifère. La zone de socle du sud-est est dominée par les classes Excellente et Bonne (80%). La superposition des forages de débit d'exploitation ($Q > 1 \text{ m}^3/\text{h}$) au réseau des linéaments structuraux révèle les fractures et les croisements de fractures productifs. Le couplage des zones à potentialité aquifère Excellente et Bonne aux fractures et croisements de fractures productifs met en évidence les sites les plus propices à l'implantation des futurs forages productifs.

Mots clefs : Côte d'Ivoire, socle, SIG, analyse multicritères, potentialité aquifère.

¹Département des Sciences de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG)
02 BP 150 Daloa 02, Côte d'Ivoire

Téléphone : +(225) 05 766 617, Télécopieur : +(225) 32 787 570

E-mail : kdaime@yahoo.fr; somboabeparfait@gmail.com

²Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement UFR-Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët-Boigny
Abidjan, Bd de l'Université, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Téléphone : +(225) 49 136 274, Télécopieur : +(225) 22 445 270

E-mail: adiaffi_be@yahoo.fr; jbiemi@yahoo.fr

³Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) UFR-Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët-Boigny
Abidjan, Bd de l'Université, CURAT, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Téléphone : +(225) 05 656 148, Télécopieur : +(225) 22 445 270 E-mail: assoma.vce@gmail.com

⁴Département de Géologie Marine et de Sédimentologie UFR-Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët-Boigny
Bd de l'Université, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Téléphone : + (225) 49 136 274, Télécopieur : +(225) 22 445 270. E-mail : etche28@yahoo.fr

INTRODUCTION

La croissance démographique rapide et l'exigence d'assurer la pérennité des processus économiques (croissance agricole, besoins énergétiques) sociaux et culturels (eau potable, urbanisation, santé), obligent de plus en plus à recourir aux ressources en eau souterraine plus à l'abri des pollutions de tous genres et moins sujettes aux aléas climatiques.

L'eau souterraine, qui fait partie intégrante du grand cycle de l'eau, provient de l'infiltration de l'eau de surface dans le sol par les fractures et/ou les pores. Elle circule dans les roches cristallines à travers les réseaux de fractures à fonction drainante jusqu'à ce qu'elle atteigne les réservoirs souterrains. Les aquifères de socle présentent l'avantage de proposer une ressource en eau en général bien répartie géographiquement (LACHASSAGNE *et al.*, 2005). L'exploitation de ces aquifères est cependant rendue très difficile de par la complexité des transferts hydrogéologiques souterrains (qui dépendent notamment de la nature des roches, la structure géologique, la pluviométrie, la connectivité entre les failles, etc.). Parmi les techniques visant à optimiser la localisation de nappes d'eau souterraines, les campagnes de terrain avec des mesures aux sols apparaissent comme étant les plus efficaces mais elles s'avèrent coûteuses d'un point de vue financier (matériel de forage, compétences diverses) et en temps. Les forages captant les fractures généralement bien alimentées et capables de fournir des débits assez importants sont aujourd'hui les plus sûrs et les moins influençables par les fluctuations saisonnières (BIEMI, 1992).

Le projet de prospection d'eau souterraine et de réalisation de forages productifs dans les aquifères de socle nécessite la connaissance d'un grand nombre d'informations géoscientifiques multidisciplinaires, multisources et souvent multiformats. Le traitement de ces informations exige la parfaite maîtrise des outils et des méthodes tels les Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS), la Télédétection (TD) et l'Analyse Multicritères (AM). Les SIRS sont spécialisés dans la saisie, le stockage, l'analyse spatiale de l'information et sa restitution cartographique. La disponibilité et la maîtrise de l'information homogène et synoptique sous forme numérique dont fait preuve la télédétection, facilite les opérations de stockage, de manipulation et offre la possibilité de croiser des données provenant de plusieurs sources. Les méthodes d'AM sont conçues pour fournir une information synthétique, afin d'éviter au décideur d'être submergé par un excès d'information (JOERIN, 1995 ; 1998).

Dans le socle cristallin du sud-est de la Côte d'Ivoire, aucune étude intégrant à la fois les outils et les méthodes ci-dessus cités n'a encore été entreprise. Par ailleurs, l'adjonction de l'occupation du sol aux critères qui favorisent l'existence de réservoirs en environnement cristallin et cristallophyllien est la spécificité de cette étude. C'est à juste titre qu'elle a été initiée. Elle a pour objectif principal de concevoir un prototype de SIG couplé à l'analyse multicritère, comme outil efficace d'aide à la décision pour la sélection des sites les plus aptes à l'implantation des forages productifs. Il s'agit tout simplement de « trouver de l'eau souterraine ». En d'autres termes, de définir la position idéale pour implanter de nouveaux forages productifs qui pourront être exploités. Les nouvelles technologies de la géomatique devraient contribuer à la structuration des données multiples et variées (images satellitaires optique et radar, données de forages, géologique, MNE, hydrographique, hydro-climatique, etc.) pour la mise en place d'une base de données en vue de la sélection des sites d'implantation de forages productifs du sud-est de la Côte d'Ivoire.

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Situation géographique

La zone d'étude est une portion de socle du sud-est de la Côte d'Ivoire. Elle s'étend sur une superficie de 7°163 km² et est comprise entre les longitudes 4°38' et 2°40'O et entre les latitudes 5°05' et 5°48'N. Elle est limitée à l'est par le Ghana et au sud par le bassin sédimentaire côtier (Figure 1). Elle est caractérisée par le climat équatorial de transition avec deux saisons des pluies (d'avril à juin et de septembre à novembre) et deux saisons sèches (de juillet à août et de décembre à mars). Les valeurs moyennes de la pluviométrie sont passées de 1912 mm à 1613 mm sur la période 1937 à 2005 (ADIAFFI, 2008). La végétation de la zone d'étude est caractérisée par la forêt dense sempervirente et ombrophile. La morphologie est peu accidentée. L'altitude varie entre 51 m

à 200 m environ (AVENARD *et al.*, 1971). Les sols sont de type ferrallitique fortement désaturés caractérisés par la présence d'un horizon humifère peu épais et un horizon gravillonnaire peu développé (PERRAUD, 1971).

Contexte géologique et hydrogéologique

La géologie de la zone d'étude est constituée de socle cristallin et cristallophyllien d'âge protérozoïque (Figure 1). Elle est composée d'est à l'ouest des séries volcano-sédimentaires représentées en grande partie par des schistes tuffacés, des métagabbro, des métadiorites, des schistes quartzeux, et des granitoïdes métamorphisés constitués de métadiorites, des métatonalites, d'un faciès porphyroïde à l'intérieur des métagranodiorites à biotite et/ou hornblende. À ces formations s'ajoutent des métamonzogranites, des métagranites, des diorites et des séries grésopélitiques. Les séries grésopélitiques comprennent les métaarénites, les métsiltstones, les gneiss fins à biotite et amphibole au sein desquels se trouve un faciès siliceux (DELOR *et al.*, 1992).

Dans ces différentes formations cristallines et cristallophylliennes, on y rencontre deux types d'aquifères. Un aquifère d'altérites de fonctions capacitive et conductrice confondues (ENGALENC *et al.*, 1979 ; SAVADOGO, 1984), juxtaposé dans le plan vertical et lié par un phénomène de drainance à un aquifère de fissures ou de fractures. Les nappes d'altérites, moins profondes, sont captées par les puits villageois. À l'heure actuelle, les nappes de fractures ou de fissures, captées par les forages se révèlent à la fois plus fiables et plus productives pour leur alimentation permanente en eau potable (BERGER *et al.*, 1981 ; BIEMI, 1992 ; LASM, 2000).

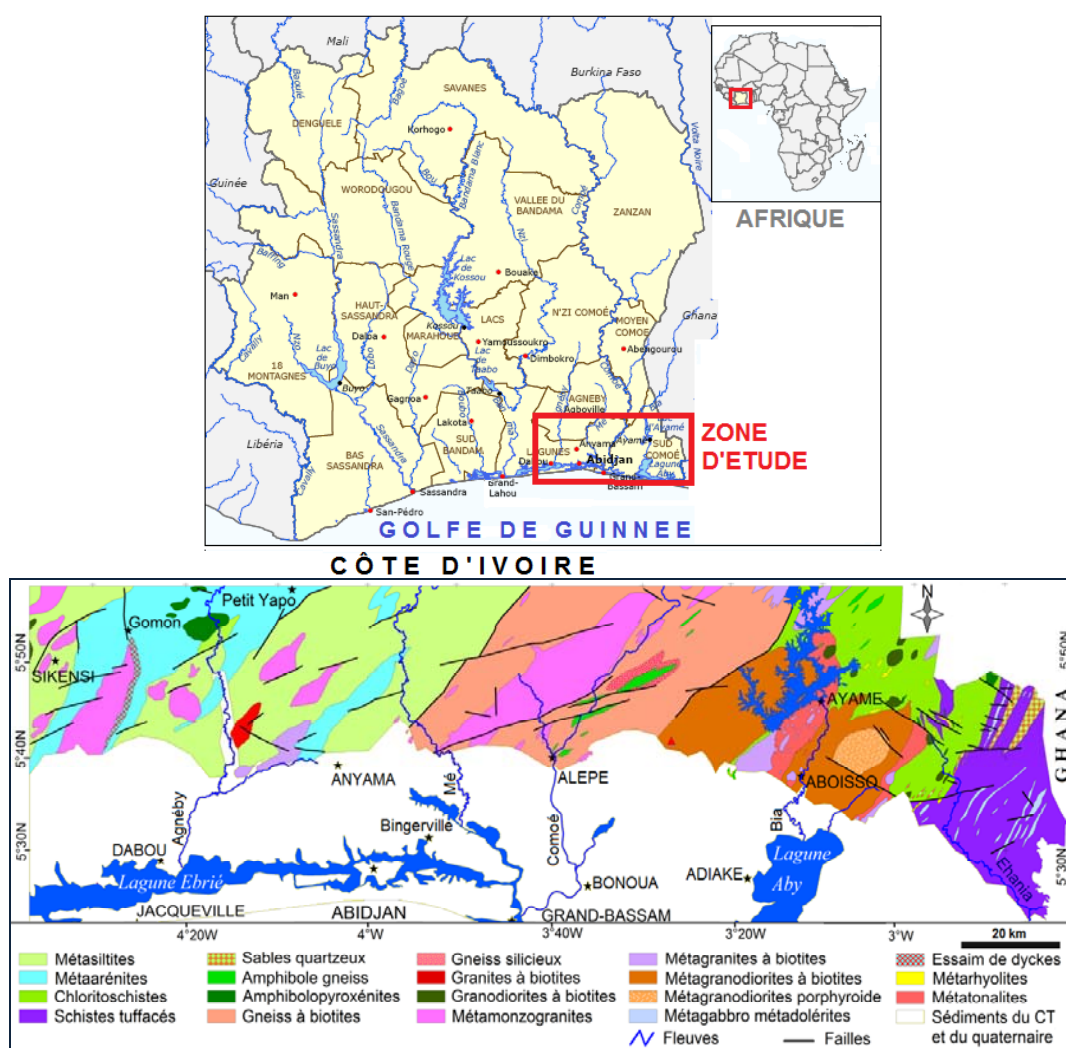


Figure 1. Localisation géographique et géologie de la zone d'étude (ASSOMA *et al.*, 2012)

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Caractéristiques des données

Plusieurs types de données ont été intégrés dans la base de données de cette étude. Il s'agit des images satellitaires optiques ETM+ de Landsat-7 corrigées et orthorectifiées (2 scènes 195/196-056 acquises le 12/02/2004), des images Radar Envisat, deux coupures mosaïquées des données MNE (Modèle Numérique d'Élévation) de 92 m de résolution issues de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography and Mapping) du 11 février 2000, des données bibliographiques, de la carte topographique (1/200 000) du sud-est de la Côte d'Ivoire réalisées par le Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) en 1995, des cartes géologiques des degrés carrés d'Abidjan et de Grand-Bassam (DELOR *et al.*, 1992) provenant de la Direction de la Géologie et des données de forages datant de 1995 à 2000 collectées auprès de la Direction de l'Hydraulique Villageoise du Ministère des Infrastructures Économiques de la Côte d'Ivoire. Pour 49 forages parfaitement identifiés, les informations relatives aux épaisseurs des altérites, à la profondeur des forages, à la profondeur du socle, aux formations géologiques, aux niveaux statiques, aux débits d'exploitation sont connues.

Ces données ont fait l'objet de compilation et de traitements divers à partir de logiciels appropriés en vue de générer d'autres informations. Envi 4.5 a été utilisé pour le traitement des images satellitaires, Linwin 2.0 a permis le traitement des linéaments, le programme EVC (COULIBALY, 1997) a permis le calcul automatique des perméabilités induites à partir des formules de FRANCISS (1970) et Arcview 3.3 a servi de véritable plate-forme pour la constitution de la base de données géospatiales et l'élaboration du SIG.

Modélisation spatiale des réservoirs exploitables de la zone d'étude

La démarche adoptée consiste en l'évaluation, l'intégration et le croisement de sept critères de décision, structurés dans une base de données relationnelle géospatiale et préparés dans le système UTM zone 30 du Sphéroïde WGS 84.

Justification du choix des critères de décision

En référence aux travaux de ENGALENC *et al.* (1978 et 1979) ; LANGEVIN *et al.* (1989) ; SAVANE (1997) ; SAVANE et BIEMI (1999) ; GOYAL *et al.* (2004) ; PHUKON *et al.* (2004) ; SALEY (2003) ; JOURDA (2005) ; JOURDA *et al.* (2006) ; KOUDOU *et al.* (2010) en environnement cristallin et cristallophyllien, les conditions favorables à l'existence de réservoirs sont définies par 6 critères que sont l'infiltration efficace, la pente, la densité de drainage, l'épaisseur d'altérites, la densité de fracturation et la perméabilité induite. La spécificité de l'étude est l'adjonction du critère de l'occupation du sol aux six autres précédemment identifiés.

Critère d'infiltration : l'infiltration efficace représente la frange d'eau qui alimente les aquifères et qui intervient pour la recharge de la nappe postérieurement à toutes les influences subies par les eaux de précipitation. Sur la zone d'étude, les valeurs de l'infiltration efficace proviennent de la bibliographie. Elle est estimée à 90 mm sur le bassin versant de l'Agnéby (ASSOMA, 2013), à 154,5 mm dans la région d'Agboville (N'GO *et al.*, 2004) et à 386 mm dans la région d'Aboisso (DIBI, 2007). La situation géographique de la zone d'étude justifie de l'infiltration forte à très forte.

Critère de pente : la prise en compte des pentes est retenue pour intégrer l'effet de la déclivité des terrains sur l'orientation des transferts d'eau et leur distribution entre composantes ruissellement et infiltration. La connaissance des pentes (Figure 2) est obtenue au moyen des images MNE/SRTM qui donnent accès aux valeurs de l'altimètre selon une résolution de 90 m. Les zones de faibles pentes peuvent être considérées comme favorables à l'infiltration donc à la recharge. Les pentes fortes favorisent le ruissellement et l'évacuation rapides des eaux météoriques par drainage.

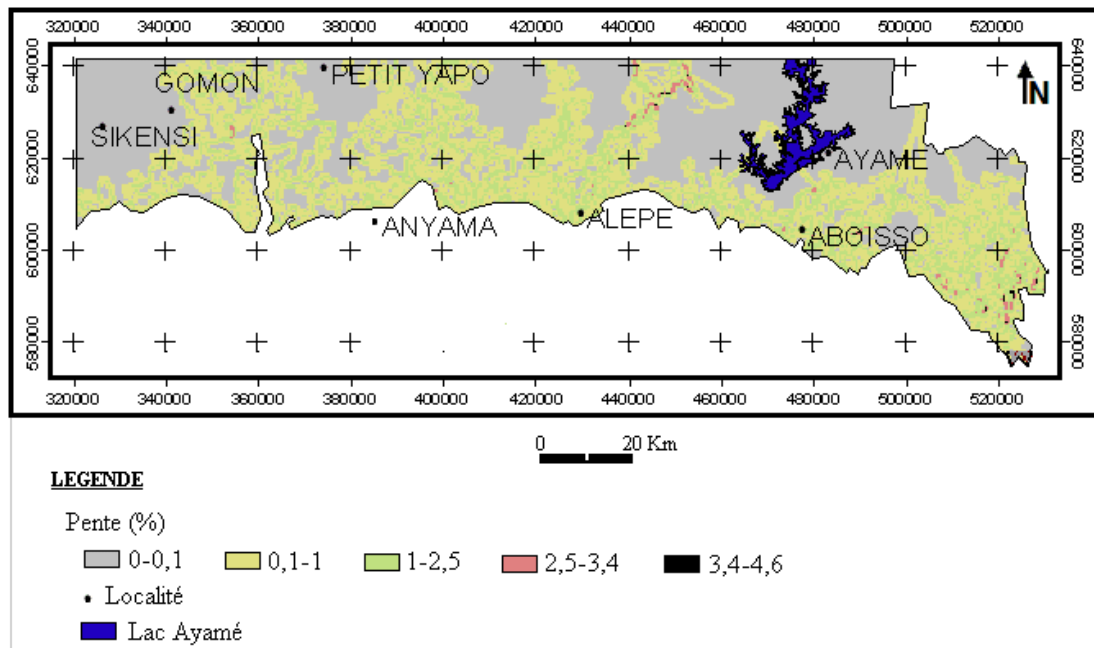


Figure 2 : Carte des pentes de la zone de socle du sud-est

Critère de densité de drainage : le réseau hydrographique (Figure 3) relevé sur la carte topographique du sud-est de la Côte d'Ivoire est discrétisé en mailles régulières de $5 \times 5 \text{ km}^2$ bien adaptées à la zone d'étude. Dans chaque maille réalisée, il est déterminé le nombre total et la longueur cumulée des drains. L'interpolation de la longueur cumulée des drains par maille, permet de générer la carte de densité de drainage de la zone d'étude. Les zones de forte densité de drainage représentent probablement les zones imperméables où le ruissellement est important.

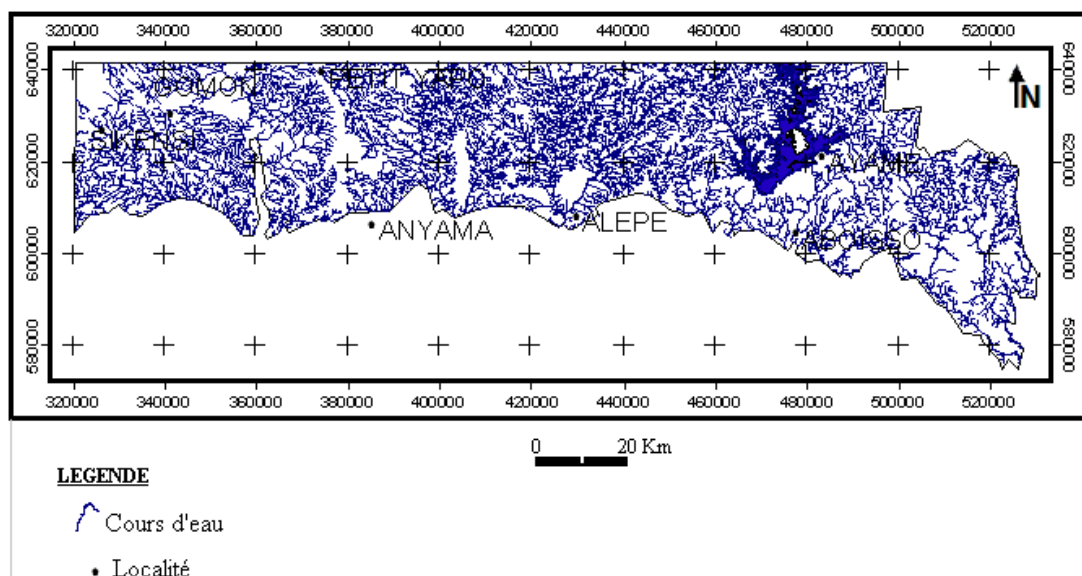


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique de la zone de socle du sud-est

Critère d'épaisseur d'altérites : les altérites sont des formations superficielles résiduelles résultant de l'altération et de la fragmentation de la roche mère. Elles renferment des réservoirs appelés aquifères d'altérites. Les épaisseurs d'altérites proviennent des données de 49 forages d'eau. Elles sont variables sur l'ensemble de la zone d'étude. Les zones de fortes épaisseurs d'altérites sont susceptibles d'augurer de la présence de réservoirs dans les aquifères contrairement aux zones de faibles épaisseurs d'altérites. La généralisation de l'extension de la couverture d'altérites sur toutes les formations indique l'importance de la fissuration.

Critère de densité de fracturation : l'évolution structurale des roches est un facteur indiscutable d'existence de nappe d'eau, car elle conditionne la formation des réservoirs. Les structures dans le sol peuvent gêner ou favoriser la formation des nappes. La présence au sein des roches des eaux souterraines exploitables est due à la fracturation ou à la fissuration. Les zones de très forte densité de fracturation constituent le pôle favorable à l'existence d'un réservoir potentiel, contrairement aux zones de très faible densité de fracturation qui augurent très défavorablement de la présence de réservoir. Une méthodologie propre aux images Radar Envisat (ASSOMA, 2013) a permis de dresser la carte des linéaments structuraux majeurs de la zone d'étude.

Critère de perméabilité induite : la perméabilité induite à la fracturation conditionne l'existence probable de réservoirs d'eau dans les milieux fissurés. Des longueurs cumulées de fractures à un degré supérieur occasionnent des perméabilités élevées, et les réservoirs sont plus importants. Ainsi, plus la région est fracturée, plus les perméabilités induites par ces fractures sont améliorées (KOUAME, 1999). Une méthodologie propre aux milieux fissurés pour la détermination des perméabilités induites par les fractures a été proposée par FRANCISS (1970), puis utilisée et améliorée par SAVADOGO (1984), BIEMI (1992), KOUSSOUBE (1996), SAVANE (1997), KOUAME (1999) et JOURDA (2005). Cette dernière a permis de déterminer les perméabilités induites de la zone d'étude à partir de la carte des linéaments structuraux relevés sur les images Radar Envisat.

Critère d'occupation du sol : la connaissance des éléments d'occupation du sol renseignent sur l'état du milieu à se laisser traverser par les eaux pluviales qui contribuent favorablement à la recharge des aquifères. Une méthode de cartographie de l'occupation du sol à partir des images ETM+ de Landsat-7 couvrant la zone d'étude a permis à ASSOMA *et al.* (2012) de définir 7 classes (Figure 4). Ces dernières ont été regroupées en 5 classes (forêt dense, forêt dégradée, forêt claire, cultures et sols nus) en fonction de leur sensibilité à la recharge des aquifères.

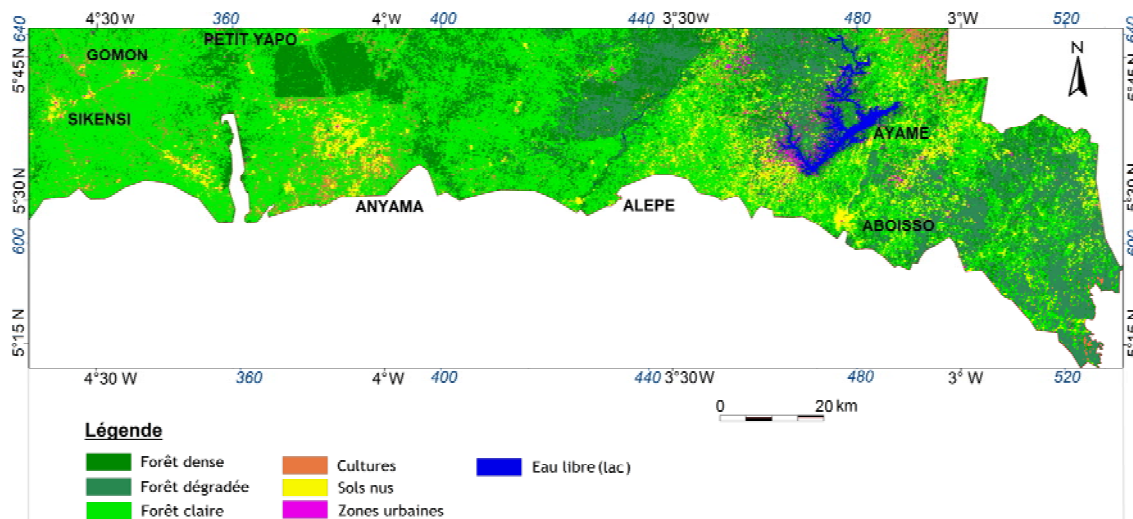


Figure 4 : Carte d'occupations du sol de la zone de socle du sud-est (ASSOMA *et al.*, 2012).

Classification, évaluation et standardisation des critères de décision

Chaque critère identifié est subdivisé en classes représentant soit un milieu particulier soit un intervalle de valeurs. Cinq classes qualifiées de très faible, faible, moyenne, forte et très forte (SAVANE *et al.*, 1997 ; SALEY, 2003 ; JOURDA, 2005) ont été réalisées pour chaque critère dans l'optique d'être dans de meilleures conditions d'interprétation. Par ailleurs, pour une bonne analyse multicritères, les différentes classes de chaque critère sont standardisées en fonction de leur influence particulière sur la formation de réservoir. Une échelle de cotation variant de 1 à 9 a été retenue. La cote de 9 est attribuée à la classe du critère qualifiée de « Très forte » selon qu'elle renforce l'occurrence de réservoir sur la zone d'étude. Dans le cas contraire, la classe est affectée

d'une cote de 1. Les classes intermédiaires ont une attribution de cotes intermédiaires selon une distribution linéaire croissante ou décroissante. Le tableau I illustre la classification, l'évaluation et la standardisation des critères de décision.

Tableau I. Classification, évaluation et standardisation des critères de décision

Critères	Classes	Qualificatif du critère	Cotes	Poids
Infiltration efficace (mm)	< 25	Très faible	1	0,35
	25 - 50	Faible	3	
	50 - 75	Moyen	5	
	75 - 100	Fort	7	
	> 100	Très fort	9	
Occupation du sol	Forêt dense	Très fort	9	0,25
	Forêt dégradée	Fort	7	
	Forêt claire	Moyen	5	
	Cultures	Faible	3	
	Zone urbaine	Très faible	1	
Pente (%)	< 0,1	Très faible	9	0,16
	0,1 - 1	Faible	7	
	1 - 2,5	Moyen	5	
	2,5 - 3,4	Fort	3	
	3,4 - 4,5	Très fort	1	
Densité de fracturation (km/km ²)	< 2,5	Très faible	1	0,05
	2,5 - 5,0	Faible	3	
	5,0 - 7,5	Moyen	5	
	7,5 - 10,0	Fort	7	
	> 10,0	Très fort	9	
Epaisseur d'altérites (m)	0 - 15	Très faible	1	0,07
	15 - 25	Faible	3	
	25 - 35	Moyen	5	
	35 - 50	Fort	7	
	> 50	Très fort	9	
Densité de drainage (km/km ²)	< 10	Très faible	9	0,11
	10 - 15	Faible	7	
	15 - 20	Moyen	5	
	20 - 25	Fort	3	
	> 25	Très fort	1	
Perméabilité induite ($\times 10^{-7}$ m/s)	< 0,5	Très faible	1	0,03
	0,5 - 1,5	Faible	3	
	1,5 - 2,5	Moyen	5	
	2,5 - 3,5	Fort	7	
	> 3,5	Très fort	9	

Croisement des critères de décision

Les critères classifiés ont été combinés par la méthode d'agrégation complète par pondération (SAVANE, 1997 ; SALEY, 2003 ; JOURDA, 2005 ; KOUDOU *et al.*, 2010 ; KOUDOU, 2013). Le poids traduit l'importance relative de chaque critère dans la formation de réservoir. La technique d'affectation des poids à chaque critère est basée sur la Méthode Hiérarchie Multicritère de SAATY

(1977) développée par KOUDOU *et al.* (2010). Les valeurs de poids, déterminés à partir d'une série de comparaisons par paires des critères identifiés, sont consignées dans le tableau I. Les poids attribués à chaque critère varient entre 0 et 1 et leur somme est égale à 1. L'évaluation de l'Indice Global de Cohérence (IGC) des jugements donne une valeur de 0,03, exprimant une cohérence satisfaisante des jugements selon SAATY (1984).

La connaissance des poids et des valeurs standardisées de chaque critère permet de calculer un indice d'aptitude à la formation des réservoirs souterrains potentiels, donné par l'équation :

$$S = \sum W_i X_i$$

Avec, S : le résultat, W_i : poids du critère i et X_i : la valeur standardisée du critère i.

Cet indice d'aptitude est situé sur une échelle de 0 à 10, car la somme des coefficients de pondération développée par la méthode de Saaty vaut 1.

L'établissement de la carte thématique consiste à reporter dans l'espace les différentes valeurs d'indices subdivisés en intervalles, et faire correspondre ces plages d'indices à des classes de potentialité. Quatre classes de potentialité qualifiées de Mauvaise, Médiocre, Bonne et Excellente ont été définies pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte résultante.

Méthode de validation des zones à potentialité aquifère

La réalité de la carte des zones à potentialité aquifère doit être vérifiée par des mesures de terrain. Celles-ci devront rendre compte de l'existence de réservoirs souterrains potentiels, et ainsi apporter une certaine crédibilité au travail effectué. Les débits d'exploitation de forages de la zone d'étude, répondant aux principes d'indépendance du critère puis de conformité de celui-ci (JOURDA, 2005 et JOURDA *et al.*, 2006) ont été retenus. Le mode de validation utilise les courbes de tendance de sensibilité en milieu de socle (JOURDA, 2005 et JOURDA *et al.*, 2006) (Figure 5). La technique de leur établissement est développée par JOURDA (2005). La validation des zones à potentialité aquifère s'effectue en comparant la forme des courbes de tendance des classes de sensibilité à celle des courbes théoriques.

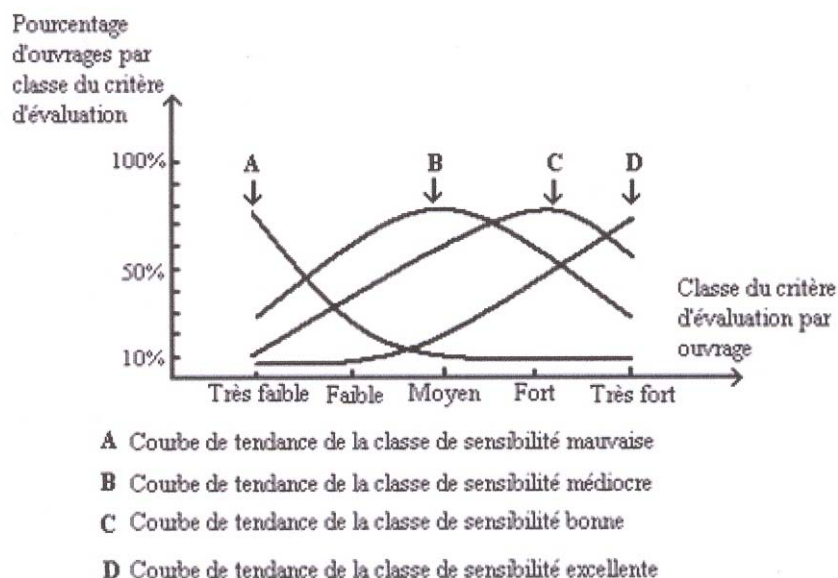


Figure 5 : Formes théoriques des courbes de tendance de sensibilité en milieu de socle (JOURDA, 2005)

RÉSULTATS

Cartographie des zones à potentialité aquifère

La carte thématique des zones à potentialité aquifère du socle du sud-est de la Côte d'Ivoire est illustrée à la figure 6. Elle présente quatre classes de potentialité aquifère de superficie variable (Figure 7). Les zones à potentialité Bonne correspondent aux secteurs de l'aquifère favorables à la présence des ressources en eau souterraine. Elles représentent un peu plus de la moitié de la superficie de la zone d'étude (51%) et s'identifient sur la quasi-totalité de celle-ci. Les zones à potentialité Excellente (29%) qui correspondent aux secteurs très favorables de l'aquifère à la présence des eaux souterraines, se rencontrent dans les régions d'Ayamé, de Gomon et Sikensi et au nord-ouest d'Anyama. Les secteurs de l'aquifère défavorables et très défavorables à la présence de réservoirs correspondent respectivement aux zones à potentialité Médiocre (18%) et Mauvaise (2%). Ils se rencontrent au nord d'Alépé et au sud-est de Petit Yapo. Quelques infimes poches s'identifient au nord-est d'Aboisso.

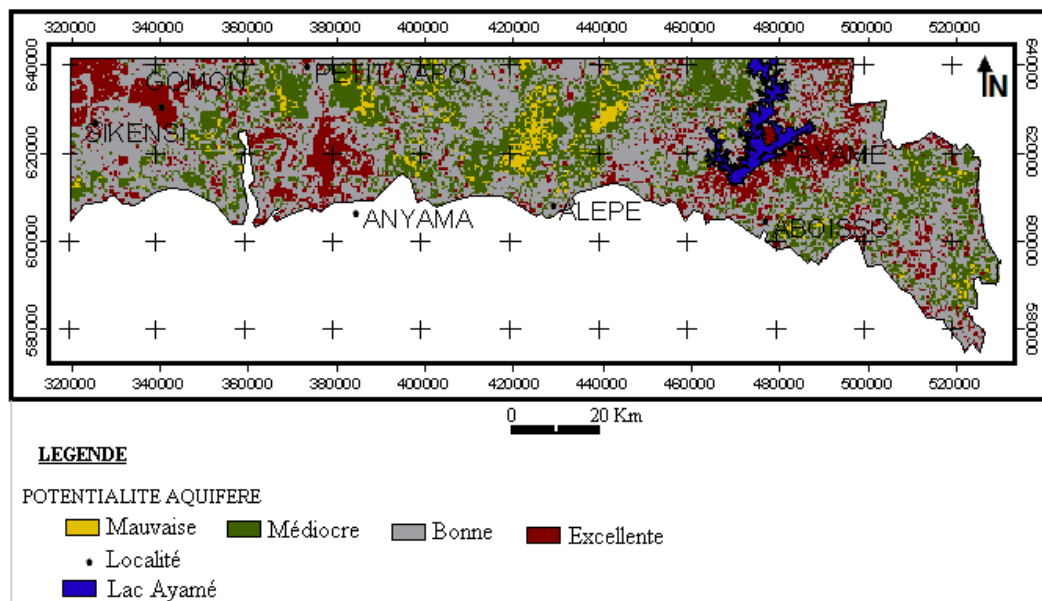


Figure 6 : Carte de potentialité aquifère de la zone de socle du sud-est de la Côte d'Ivoire

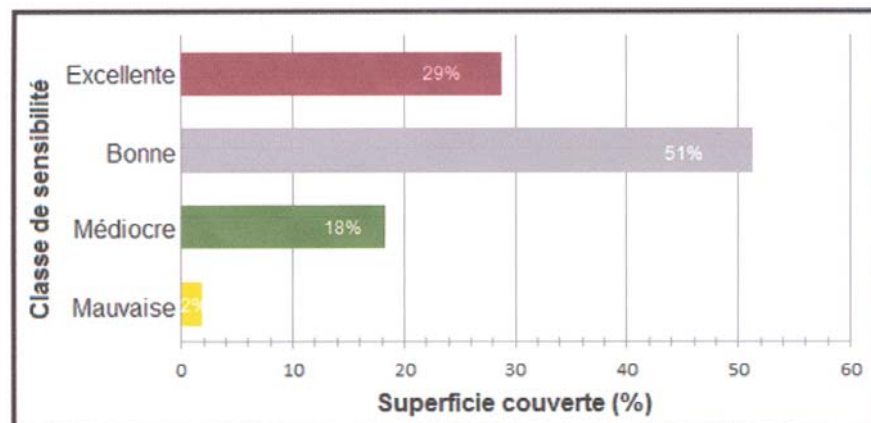


Figure 7 : Répartition en pourcentage des superficies couvertes par les classes de sensibilité

Validation de la carte des zones à potentialité aquifère

Le tableau II présente les pourcentages du nombre de forages selon les classes de débit. La figure 8 illustre les pourcentages du nombre de forages en fonction des classes de débit.

Tableau II. Pourcentage du nombre de forages suivant les classes de débit

Classes de sensibilité Classes de débit	Excellente (%)	Bonne (%)	Médiocre (%)	Mauvaise (%)	Nombre de forages par classe de débit
Très fort (5) $Q > 10 \text{ m}^3/\text{h}$	42,9	42,9	14,3	0,0	7
Fort (4) $5 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 10 \text{ m}^3/\text{h}$	33,3	25	25	16,7	12
Moyen (3) $2,5 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 5 \text{ m}^3/\text{h}$	36,4	27,3	27,3	9,1	11
Faible (2) $1 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$	45,5	36,4	9,1	9,1	11
Très faible (1) $0 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 1 \text{ m}^3/\text{h}$	25	50	12,5	12,5	8

Les différentes classes de sensibilité sont recouvertes dans la plupart des cas par les ouvrages à débits correspondants qui cohabitent avec les autres débits. Les classes de sensibilité n'expriment pas un pourcentage représentatif de la productivité des aquifères sur le terrain.

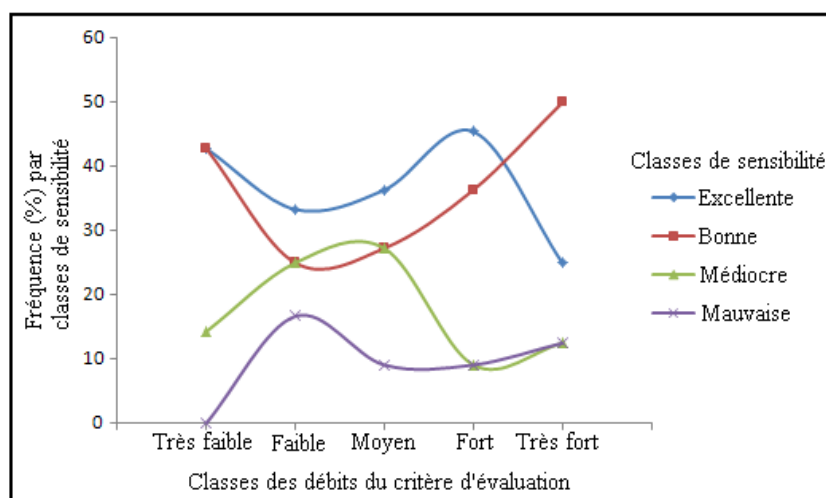


Figure 8 : Graphe des pourcentages du nombre de forages en fonction des classes de débits

Le graphe obtenu par l'évaluation de la carte des zones à potentialité aquifère ne reflète pas fidèlement la sensibilité du terrain.

Un ensemble de forages à débit très fort ($Q > 10 \text{ m}^3/\text{h}$), fort ($5 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 10 \text{ m}^3/\text{h}$), moyen ($2,5 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 5 \text{ m}^3/\text{h}$) et faible ($1 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$) de la zone d'étude ont été relevés après avoir été superposés à la carte thématique des potentialités aquifères. Les résultats sont présentés dans le tableau III.

Tableau III. Classe de potentialité aquifère et productivité : test de contrôle en vue de la validation de la carte de potentialité aquifère

N°	x-coordonnées	y-coordonnées	Classe de potentialité	Classe de débit	Productivité (m ³ /s)
1	331240	633914	Excellente	Très fort	12
2	380063	624626	Excellente	Très fort	15,8
3	331448	628716	Bonne	Très fort	10
4	370748	619116	Bonne	Très fort	16
5	341314	630239	Excellente	Fort	7,2
6	475412	612692	Excellente	Moyen	3
7	367097	621003	Bonne	Fort	5
8	329184	610255	Excellente	Fort	7,2
9	341309	630239	Excellente	Faible	2
10	501882	624515	Bonne	Fort	6
11	429883	607971	Bonne	Très fort	16
12	378498	616448	Excellente	Moyen	2,7

Les classes de potentialité Excellente et Bonne ont une productivité très forte à forte dans la majorité des cas. Ce résultat vient corroborer la validation de la carte thématique réalisée.

Cartographie des sites propices à l'implantation des forages productifs

La superposition des forages de débit ($Q > 1 \text{ m}^3/\text{h}$) et du réseau des linéaments structuraux sur la carte des aquifères potentiels du socle du sud-est de la Côte d'Ivoire est illustrée par la figure 9.

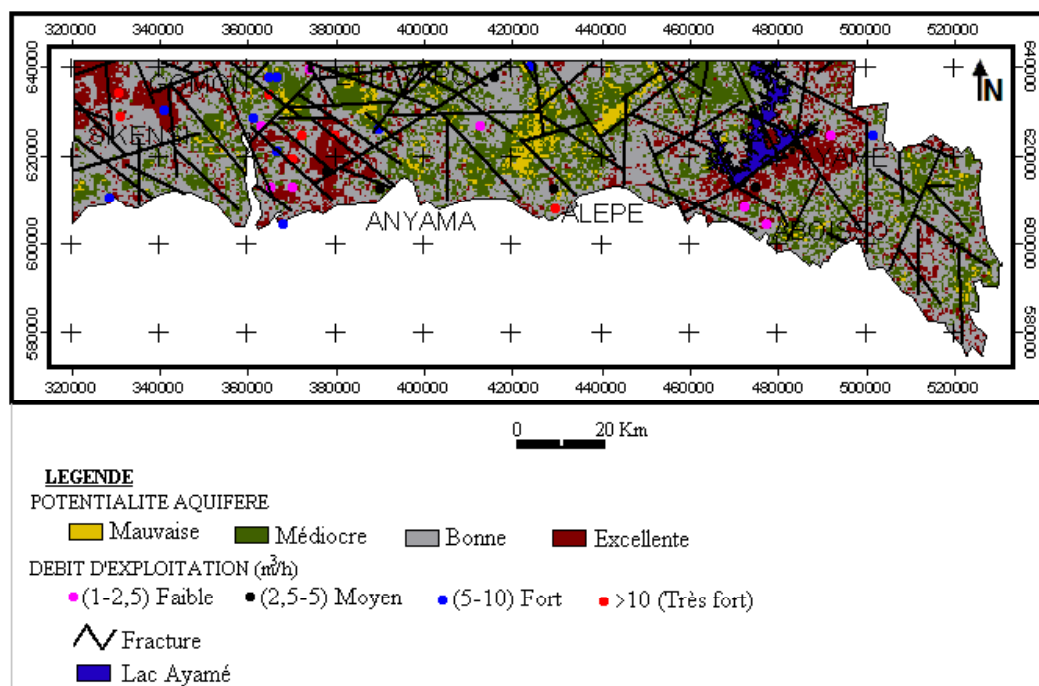


Figure 9 : Couplage forages de débit ($Q > 1 \text{ m}^3/\text{h}$), réseau des linéaments structuraux et zones à potentialité aquifère.

Le couplage de la figure 9 semble montrer globalement une concordance entre les trois entités qui y sont mentionnées. Les différents points représentant les forages s'alignent ou sont proches des différents linéaments structuraux cartographiés. Les débits obtenus dans cette région seraient liés aux fractures. Par ailleurs, les forages les plus productifs sont situés sur les accidents majeurs et des intersections de fractures. Au regard de tous les débits d'exploitation observés au niveau de ces forages ($Q \geq 1 \text{ m}^3/\text{h}$), il ressort que les fractures kilométriques sont hydrauliquement actives.

Des débits importants ($Q > 5 \text{ m}^3/\text{h}$) enregistrés au niveau de certaines fractures et des intersections de fractures, se superposent aux zones à potentialité Bonne et Excellente de l'aquifère. Ces fractures sont dignes d'intérêt d'un point de vue hydrogéologique. Les prospections hydrogéologiques pourraient tenir compte de ces fractures qui apparaissent les plus productives hydrauliquement.

Il est important de noter que les forages les plus productifs sont ceux qui doivent être implantés à la fois dans la zone de potentialité Bonne ou Excellente, et sur des fractures d'extension kilométriques ou des croisements de fractures.

DISCUSSION

La restitution cartographique des zones à potentialité aquifère et des sites propices à l'implantation des forages productifs présente des difficultés dans sa mise en œuvre. Celles-ci proviennent de la définition des limites de classes des critères choisis de la méthode. Pour chaque critère, la gamme de variation des valeurs est divisée en un certain nombre voulu de classes selon des valeurs de limites choisies, non nécessairement équidistantes mais significatives du point de vue des applications pratiques. Le choix des limites de classe s'opère en fonction d'une part, de la faculté de discernement de l'opérateur et de son sens de jugement et d'autre part, des valeurs affichées par les histogrammes des critères (JOURDA *et al.*, 2006). Les limites des classes des critères de la zone d'étude ne sont pas figées. Elles dépendent des valeurs en présence, de la réalité du terrain et des objectifs à atteindre.

La réalisation de certains paramètres (épaisseur d'altérites, perméabilité induite, densité de fracturation, densité de drainage) par interpolation a certainement entraîné des erreurs. L'interpolation n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles. L'établissement de la carte des zones à potentialité aquifère selon la méthode de pondération de Saaty ne traduit pas mieux la sensibilité du terrain. En fait, l'allure des courbes de tendance des classes de sensibilité ne reflète pas fidèlement celle des courbes théoriques en milieu de socle ; ce qui justifie de la complexité du milieu de socle. Par ailleurs, cette étude souffre de l'absence des débits de forages surtout dans l'extrême sud-est d'Aboisso. La validation de la carte des zones à potentialité aquifère mériterait d'être améliorée en utilisant des données de forages récents. Pour mieux reproduire les réalités du terrain, JOURDA (2005) préconise la méthode de codification. Malgré tout, la manière la plus fiable de valider la carte thématique de potentialité aquifère consiste à implanter de nouveaux forages dans chaque zone pour laquelle la classe thématique indique une classe de potentialité donnée et vérifier la productivité de ces ouvrages. Cela nécessite donc de disposer de suffisamment de moyens.

L'identification des zones à potentialité aquifère Bonne et Excellente ne garantit pas un taux de succès des forages à 100% même si la probabilité paraît forte. La carte thématique des zones à potentialité aquifère représente un outil d'aide à la décision qui permet de s'affranchir de la phase de prospection stratégique. Elle débouche directement sur une prospection hydrogéologique tactique qui permet d'exclure une partie du territoire à prospecter et de sélectionner les secteurs à potentiel aquifère prometteur.

La concordance entre alignement des forages et certains linéaments cartographiés montre que ces linéaments sont des fractures. Ce qui confirme qu'en milieu de socle cristallin, seules les fractures sont les véritables couloirs d'eau souterraine. Ces résultats sont en accord avec ceux de BIEMI (1992) ; SAVANE *et al.* (1995) ; LASM (2000) ; LASM *et al.* (2004). Les nœuds de fractures et les fractures de taille kilométrique sont les zones favorables pour les gros débits.

Le choix des forages de débit ($Q > 1 \text{ m}^3/\text{h}$) à superposer au réseau des linéaments structuraux de la zone d'étude n'est pas fortuit. Les analyses statistiques indiquent que la majorité des forages à l'échelle nationale ont de faibles débits (FAILLAT, 1986 ; SORO, 1987 ; BIEMI, 1992 ; SAVANE,

1997) d'une manière générale. En effet, pour l'approvisionnement en eau des populations rurales, SORO (1987) indique qu'un débit de 1 m³/h est suffisant. Les débits forts et très forts constituent un domaine favorable pour l'Hydraulique Urbaine et l'Agriculture motorisée (SAVANE, 1997).

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de concevoir un prototype de SIG, couplé à l'analyse multicritères, comme outil efficace d'aide à la décision pour la sélection des sites les plus aptes à l'implantation des forages productifs d'exploitation aquifère. La méthodologie mise en place a permis d'atteindre l'objectif fixé et d'obtenir des résultats fiables.

La carte de potentialité aquifère de la zone de socle du sud-est de la Côte d'Ivoire montre les secteurs susceptibles de faire l'objet d'une prospection classique avec promesse de succès. Les zones de l'aquifère à potentialité Bonne (51%) s'identifient sur la quasi-totalité de la zone d'étude. Les zones à potentialité Excellente (29%) se rencontrent dans les régions d'Ayamé, de Gomon et Sikensi et au nord-ouest d'Anyama. Les zones défavorables (18%) et très défavorables (2%) à la présence de réservoirs occupent 1/5 de la zone d'étude.

Le couplage des linéaments structuraux déterminés à partir des images Radar Envisat et la localisation des forages productifs a permis d'identifier les fractures susceptibles d'être vectrices d'eau souterraine ou de constituer des réservoirs d'eau. Cet ensemble mis en correspondance avec les zones à potentialité aquifère a permis l'identification des sites les plus aptes à l'implantation de forages productifs.

Cet outil se présente comme un instrument d'orientation, capable de faciliter les décisions et d'indiquer les directions de recherche en matière de prospection hydrogéologique. La localisation précise des forages et la détermination des débits d'exploitation les plus adaptés devrait faire converger l'ensemble de la méthode vers un véritable outil d'aide à la décision en matière de gestion des ressources en eau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADIAFFI, B., 2008. Apport de la Géochimie isotopique, de l'Hydrochimie et de la Télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact "Socle-Bassin sédimentaire" du Sud-est de la Côte d'Ivoire". Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Paris-Sud, Orsay, France, 230 p.
- ASSOMA, T.V., 2013. Variabilité hydroclimatique et évaluation des ressources en eau du bassin côtier de l'Agnéby au Sud-Est de la Côte d'Ivoire : apport des outils statistiques, de la modélisation et de la télédétection optique et radar. Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan – Cocody, 196 p.
- ASSOMA, T.V., ADIAFFI, B. & KOUDOU, A., 2012. Contribution of Remote Sensing, Multicriteria Analysis and GIS for Mapping Recharge Areas of the Coastal Aquifers in Southeast Ivory Coast. *American Journal of Scientific Research*, 80 : 112-125.
- AVENARD, J.M., ELDIN, M., GIRARD, G., SIRCOULON J., TOUCHEBOEUF, P., GUILLAUMET J.L., ADJANOHOON, E. & PERRAUD, A., 1971. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, n°50, 391 p.
- BERGER, J., CAMERLO, J., FAHY J.C. & HAUBERT, M., 1981. Etudes des ressources en eaux souterraines dans une région de socle cristallin : la boucle du cacao (Côte d'Ivoire). *Bull. BRGM*, 4 : 273-291.
- BIEMI, J., 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat ès Sciences naturelles, Université Nationale d'Abidjan, 493 p.
- COULIBALY, K.M., 1997. Evaluation du bilan hydrologique de la variabilité climatique et du tarissement des cours d'eau par l'application de méthodes mathématiques dans le bassin versant du fleuve Sassandra (Région de Bujo en Côte d'Ivoire) : Mémoire de DEA Université d'Abobo-Adjamé, 84 p.
- DELOR, C., DIABY, I., SIMEON, Y., YAO, B., AKRE, D., OKOU, A., KONATE, S., TASTET, J.-P., VIDAL, M., TRAORE, I., DOMMANG, A., CAUTRU, J.-P., KONAN, G. & CHIRON, J.-C., 1992. Carte géologique de la Côte d'Ivoire au 1/200 000 : Feuilles d'Abidjan et de Grand-Bassam. Direction des Mines et de la Géologie, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- DIBI, B., 2008. Cartographie des sites potentiels d'implantation 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 de Cocody, 165 p.

- ENGALENC, M., GRILLOT, J.C. & LACHAUD, J.C., 1978. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Édition Géohydraulique, Volume 1, 190 p.
- ENGALENC, M., GRILLOT, J.C. & LACHAUD, J.C., 1979. Méthodes d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches de l'Afrique de l'Ouest. Édition Géohydraulique, Volume 2, 193 p.
- FAILLAT, J.P., 1986. Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Languedoc, Montpellier-France, 534 p.
- FRANCISS, F.O., 1970. Contribution à l'étude du mouvement d'eau à travers les milieux fissurés. Thèse Doct. Ing., Univ. Grenoble I, 108 p.
- GOYAL, S., BHARADWAJ, R.S & JUGRAN, 2004. Multicriteria analysis using GIS for groundwater resource evaluation in Rawasen & Pili watershed. U. P., Natural Resource Management, 5 p.
- JOERIN, F., 1995. Méthode multicritère d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site. *Revue internationale de géomatique*, 1: 37-51.
- JOERIN, F., 1998. Décider sur le territoire. Proposition d'une approche par utilisation de SIG et de méthodes d'analyse multicritère. Thèse de Doctorat ès Sciences Techniques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de génie rural, 269 p.
- JOURDA, J.P.R., 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'état, Université de Cocody Abidjan, 430 p.
- JOURDA, J.P.R., SALEY, M.B., DJAGOUA, 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 Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. *Télédétection*, 4 : 339-357.
- KOUAME K.F., 1999. Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région sémi-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 hydrogéologiques à référence spatiale. Thèse de Doctorat de 3e cycle, Université de Cocody, 196 p.
- KOUDOU, A., 2013. Conception d'outils d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique : application à la sélection des zones à potentialité aquifère et moins vulnérables à la pollution du bassin versant du N'zi. Thèse Unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody (Côte d'Ivoire), 211 p.
- KOUDOU, A., KOUAME K.F., YOUAN TA, M., SALEY, M.B., JOURDA, J.P. & BIEMI, J., 2010. Contribution des données ETM+ de LANDSAT, de l'analyse multicritère et d'un SIG à l'identification de secteurs à potentialité aquifère en zone de socle du bassin versant du N'Zi (Côte d'Ivoire). *Photo-Interpretation European Journal of Applied Remote Sensing*, 3-4: 98-115.
- KOUSSOUBE, Y., 1996. Hydrogéologie en milieu du socle cristallin du Burkina Faso : cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (Province du Yatenga). Thèse Université Cheick Anta Diop, Dakar (Sénégal), 238 p.
- LACHASSAGNE, P., MARECHAL, J.C., AHMED, SH., DEWANDEL, B., GANDOLFI, J.M., KRISHNAMURTHY, N.S., SUBRAHMANYAM, K. & WYNS, R., 2005. Nouveaux outils et méthodes pour gérer et protéger la ressource en eau souterraine des régions de socle. *Hydrosciences*, 25 : 53-57.
- LANGVIN, C., PERNEL, F. & POINTET, T., 1989. Recherche de secteurs à potentiel aquifère en zone de socle, massif granitique de Huelgoat (Finistère) : analyse multicritère, cartographie assistée (SYNERGIE), perméabilité de fracture (méthode RADON). BRGM, Service sol et sous-sol, Département Eau, 120 p.
- LASM, T., 2000. Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse Unique de Doctorat, Université de Poitiers, 272 p.
- LASM, T., KOUAME, F., OGA M.S., JOURDA, J.R.P., SORO, N. & KOUADIO, B.H., 2004. Etude de la productivité des réservoirs des zones de socle. Cas du noyau archéen de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 5 : 97-115.
- N'GO, Y.A., GONE, D.L. SAVANE, I. & GOBLE M. M., 2004. Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique Science* 1 :127-144.
- PERRAUD, A., 1971. Les sols. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires O.R.S.T.O.M., Paris, 50 : 269-390.
- PHUKON, P., PHUKAN, S., DAS, P. & SARMA, B., 2004. Multicriteria Evaluation in GIS Environment for Groundwater Resource Mapping in Guwhati City Areas. *Assam Proceedings*, 10 p.
- SAATY, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15 : 234-281.

- SAATY, T.L., 1984. Décider face à la complexité, une approche analytique multicritère d'aide à la décision. *Entreprise moderne d'édition*, 231 p.
- 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 unique Université de Cocody, 211 p.
- SAVADOGO, A.N., 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta - Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse Doct. d'Etat Sci. Nat., Univ. de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 350 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 d'hydrogéologique à référence spatiale. Thèse. Doct. ès Sc. Univ. Abidjan, 395 p.
- SAVANE, I., BENIE, G.B., GUYON, Q.H. & BIEMI, J., 1995. Application de la télédétection à la recherche des eaux souterraines en milieu de socle cristallin : cas d'Odienné, Côte d'Ivoire. AUPELF-UREF, Télédétection et Ressource en eau, Vème Journée Scientifique de Tunis, *Presse de l'Université de Québec* :111-120.
- SAVANE, I., GOZE, B. & BIEMI, J., 1997. Évaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat (bassin d'Odienné, Côte d'Ivoire). Actes de l'Atelier international sur la télédétection et la gestion des ressources en eau, Éd. FAO, Rome : 144-156.
- SAVANE, I. & BIEMI, J., 1999. Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, 1 : 47-64.
- SORO, N., 1987. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du sud-est de la Côte d'Ivoire (bassin versant de la Mé). Thèse de doctorat 3è cycle Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu (France), 239 p.

