



## **Apport de l'analyse multicritère à la cartographie des zones favorables à l'implantation de forages dans la région de Gagnoa (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire)**

### **Contribution of multicriteria analysis in the cartography of zones favorable to the establishment of drilling in the Gagnoa region (west central of the Ivory Coast)**

KOFFI K. M.<sup>1</sup>, YAO K. T.<sup>1</sup>, MOBIO A.<sup>1</sup> & OGA Y. M. S.<sup>1</sup>

**Abstract :** This present study was carried out in Gagnoa region in west-central Ivory Coast. It aims to map out favorable productive drilling areas for water resources. Satellite Landsat 7 ETM + hydroclimatic data, topographic and geological maps and technical data sheets of boreholes of the Gagnoa region were used. The As methodology, we evaluated aquifer recharge, realized fracturing map, and used multicriteria analysis to assess water resources. This methodology helped to establish potential indicators maps, accessibility and exploitability of groundwater resources in that region. Then, these indicators are combined inside a SIHRS by the codification using aggregation technique to generate the suitable of productive drilling in Gagnoa area. The result of this study reveals that the region has a dense fracture network. The potential and accessibility of groundwater are good to excellent covering respectively 65.22% and 50.41% of the territory with 73% of moderate to poor exploitability. Favorable areas of good drilling site occupy 45% of the territory. The result from this study will amply guide the hydrogeological prospecting during the implementation of future drilling in the region.

Key words: Gagnoa, fracture, favorable area, multicriteria analysis, drilling, recharge, water resources.

**Résumé :** La présente étude, menée dans la région de Gagnoa au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, a pour objectif de cartographier des zones favorables à l'implantation de forages productifs en matière d'accessibilité aux ressources aquifères. Les données utilisées sont composées d'images satellitaires Landsat 7 ETM+, des données hydroclimatiques, de cartes topographiques et géologiques et des données de fiches techniques de forages réalisés dans la région. La méthodologie adoptée à consister à réaliser la carte de fracturation, à évaluer la recharge des aquifères, et les ressources en eau par une analyse multicritère. Cette démarche a permis d'établir des cartes d'indicateurs de potentialité, d'accessibilité et d'exploitabilité des ressources en eau souterraine de la région. Ces indicateurs ont été ensuite combinés à l'intérieur d'un SIHRS par la technique d'agrégation par codification et cela a permis de générer la carte des zones favorables à l'implantation des forages productifs. Cette étude a montré que la région est densément fracturée. La potentialité en eau souterraine et l'accessibilité sont bonne à excellente couvrant 65,22% et 50,41% du territoire avec une exploitabilité médiocre à mauvaise 73%. Les zones favorables à l'implantation occupent 45% du territoire. Ces résultats guideront les prospections hydrogéologiques lors de l'implantation des futurs forages dans la région.

Mots clés : Gagnoa, fractures, zone favorable, analyse multicritère, forage, recharge, ressource en eau.

<sup>1</sup>Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement UFR-Sciences de la Terre et des Ressources Minière, Université Félix Houphouët-Boigny Abidjan, Bd de l'université, 22 BP 582 Abidjan 22 Côte d'Ivoire

Téléphone : +(225) 48 042 371

E-mail : [michelkoffi50@yahoo.fr](mailto:michelkoffi50@yahoo.fr), [yakoft@yahoo.fr](mailto:yakoft@yahoo.fr), [akmobio@yahoo.fr](mailto:akmobio@yahoo.fr), [oga\\_oms@yahoo.fr](mailto:oga_oms@yahoo.fr)

## INTRODUCTION

En Côte d'Ivoire, l'eau souterraine constitue la principale source d'alimentation en eau potable de la population rurale. Cependant, l'insuffisance des points d'eau potable pousse ces populations rurales à utiliser des eaux de surface (marigots, rivières). La région de Gagnoa, de par sa position géographique participe à l'essor économique de la Côte d'Ivoire à travers les activités agricoles. Elle est devenue la destination de nombreuses personnes à la recherche de terres propices aux cultures industrielles (cacaoyer, caféier, hévéa, palmier à huile, etc...). Aujourd'hui, avec une population estimée à 602 097 habitants (INS, 2014), les besoins en eau ne cessent de croître. Aussi les travaux de forage connaissent-ils un taux d'échec important. En effet, sur 39 forages réalisés dans le domaine de l'hydraulique urbaine (HU), 17 sont négatifs. De plus, sur 406 forages et puits réalisés dans le cadre de l'hydraulique villageoise (HV), 71 sont abandonnés. Ces abandons sont souvent dus à la mauvaise qualité de l'eau, aux tarissements ou aux baisses de débit des forages en période sèche ainsi qu'à l'état défectueux des pompes dans certains villages.

Le centre-ouest de la Côte d'Ivoire est confronté à ces différents problèmes d'approvisionnement en eaux potables selon SOROKOBY *et al.*, (2010), YOUAN TA *et al.* (2015). C'est dans l'optique de pallier ces insuffisances et aider à la réalisation de forage à gros débit que cette étude a été menée dans cette partie de la Côte d'Ivoire. La cartographie des secteurs susceptibles de contenir d'importantes ressources en eau participerait à la bonne implantation des forages dans la région de Gagnoa. Les techniques d'analyse multicritère utilisées par certains auteurs, tels que SALEY (2003); JOURDA (2005); YOUAN TA *et al.* (2015) ont permis de cartographier des zones favorables à l'implantation de forages à gros débit. Elles constituent un moyen efficace pour la cartographie des ressources en eau souterraine. Cette rédaction débute par les généralités sur la zone d'étude suivie du matériel et les méthodes utilisées pour conduire l'étude. Enfin l'analyse des résultats obtenus et leur discussion.

## GÉNÉRALITÉS SUR LA ZONE D'ÉTUDE

### Cadre géographique

Le secteur d'étude est situé au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, s'étend sur une superficie de 4 572km<sup>2</sup>. Il est compris entre la longitude 5°44'9'' et 6°24'31'' Ouest et la latitude 5°40'32'' et 6°31'44'' Nord (figure 1).

La région présente un relief ondulé comportant une succession de collines, de plateaux et de bas-fond.

La végétation constituée de forêt dense et semi-décidue. Les formations pédologiques sont dominées par des sols ferrallitiques fortement désaturés présentant une texture argilo-sableuse à argileuse (KASSIN *et al.*, 2008). Le climat de la région de Gagnoa est de type équatorial de transition (climat Attiéen) qui se caractérise par deux saisons sèches : novembre à février (grande saison sèche) et de juillet à août (petite saison sèche) et deux saisons de pluies (la grande saison de mars à juin et la petite saison de septembre à novembre).

Cette région appartient au bassin versant du fleuve Sassandra et présente un réseau hydrographique dense.

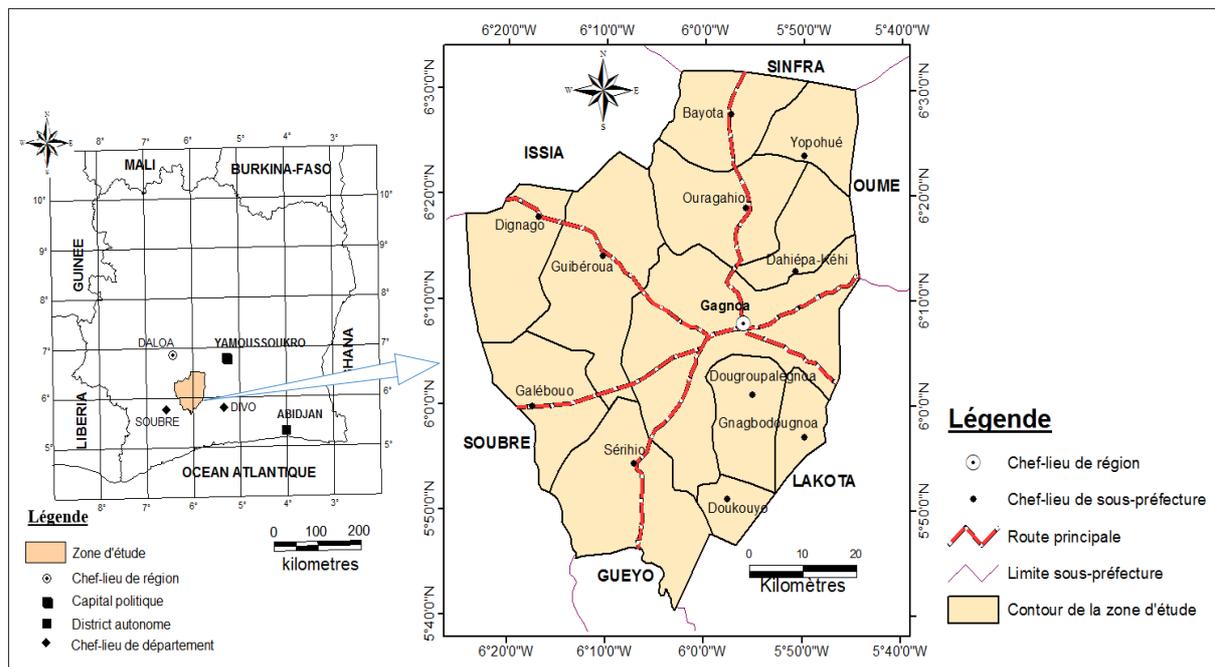


Figure 1. Localisation de la région de Gagnoa

## Cadre géologique et hydrogéologique

Du point de vue géologique, la région est caractérisée par des formations appartenant au domaine libérien et au domaine éburnéen (figure 2). Ce dernier a pour particularité la coexistence des formations post-éburnéennes, éburnéennes et archéennes (KOUAMELAN, 1996). Les formations post-éburnéennes se rencontrent sous forme de filon dans la partie ouest de la zone d'étude. Ces filons se sont mis en place dans des zones de moindre résistance qui, dans la plupart des cas, sont des fractures orthogonales (direction NO-SE) à la direction des plis éburnéens. Ce sont dolérites et des granophyres. Les formations éburnéennes qui se regroupent en formations syntectoniques et en formation pyroclastiques et de semi-profondeur. Les formations syntectoniques sont caractérisées d'une part par un ensemble granitique, et d'autre par un ensemble schisteux. L'ensemble granitique est constitué de granite à deux micas, de métagranite à biotite, de granodiorite à biotite et de granodiorite à facies orthogneissique. Cet ensemble couvre le centre de la région et est plus représentatif des localités de Gagnoa, Ouragahio, Dahiépa-Kéhi. L'ensemble schisteux regroupe les schistes gréseux, les micaschistes à deux micas et les grès feldspathiques tufacés. Les formations pyroclastiques et de semi-profondeur regroupent des tufs, des amphibolites et des métavulcanites. Ces formations sont constituées d'élément d'origine volcanique repris dans un sédiment (YACE, 2002). Elles se rencontrent dans le Centre-Ouest et à l'Est dans la région de Dougroupalégnoa. Les formations archéennes sont antérieures à une orogénie dite libérienne entre 2750 et 2579 Ma. Elle constitue le soubassement ou l'encaissant de toutes les autres formations (TAGINI, 1971).

Au plan hydrogéologique, la région présente deux grands types d'aquifères qui se superposent. À savoir l'aquifère d'altérites et l'aquifère de fractures, généralement formés au sein des formations de schistes et de granitoïdes.

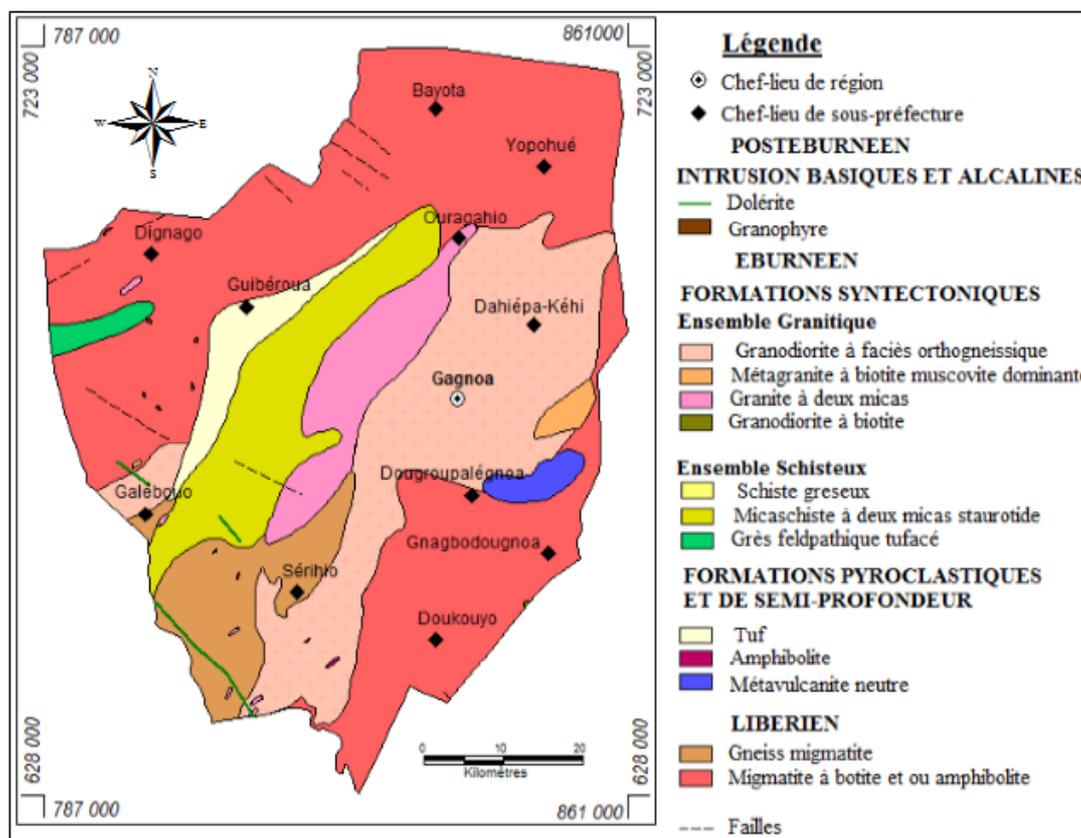


Figure 2. Carte géologique de la région de Gagnoa (GEOMINES, 1982)

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Données et logiciels utilisés

Cette étude a nécessité des données images provenant de deux scènes ETM+ du satellite Landsat 7 (scènes 197-55 et 197-56) acquises, respectivement, le 20 janvier 2002 et le 23 avril 2001 et d'un modèle numérique d'altitude (MNA). Des cartes topographiques, géologiques et photogéologiques (GEOMINES, 1982) des degrés carrés de Soubré, Gagnoa, Grand-lahou, Daloa H et Daloa C) au 1/200000 ont été également nécessaires. Les données de forages concernent les fiches techniques de forages obtenues auprès de la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH). Elles regroupent les informations recueillies sur 201 forages et concernent les débits d'exploitation, la profondeur totale, le niveau statique et l'épaisseur d'altération. Les données hydroclimatiques ont été acquises auprès de la société de développement et d'exploitation aéroportuaire et maritime (SODEXAM). Ces données concernent les mesures de la pluviométrie (mm), la température (degré Celsius), dont les périodes de mesure varient entre 1975 et 2000.

Au cours de cette étude, nous avons utilisé le logiciel ArcGis 10.2.1 pour les travaux cartographiques (numérisation des cartes et la réalisation du SIHRS). Envi 4.5 a été utilisé pour les traitements des images satellitaires en vue d'obtenir la carte linéamentaire. Le traitement statistique des cartes de fracturation et de celle du réseau hydrographique a été effectué à l'aide de LINWIN 2.1. Le programme EVC de COULIBALY (1997) a servi à déterminer la perméabilité induite par les fractures à partir de la méthode de FRANCIS (1970).

## **Méthodes**

### **Cartographie et validation des linéaments**

La méthodologie adoptée pour le traitement, l'extraction des linéaments ainsi que leur validation a été largement développée par les travaux de divers auteurs SALEY (2003), JOURDA (2005), JOURDA *et al.* (2006). La carte de linéaments est obtenue à l'issue du traitement appliqué à l'image brute Landsat ETM+. La carte de linéaments doit faire l'objet d'un examen de validation en vue de son utilisation comme support de base pour l'interprétation structurale et hydrogéologique.

### **Identification des critères**

Les critères retenus dans cette étude sont ceux utilisés par Jourda (2005) et Youan Ta *et al.* (2011). Il s'agit du coût de foration en francs CFA, la probabilité de réussite (%), le débit d'exploitation ( $m^3/h$ ), le niveau statique (m) et l'épaisseur d'altération (m), l'infiltration efficace (mm), la pente (%), la densité de drainage ( $Km/Km^2$ ) et la densité de fracture ( $km/km^2$ ), la perméabilité induite (m/s).

### **Classification et standardisation des critères**

Le choix des classes s'est fait en tenant compte de la variance des données et des travaux antérieurs réalisés par SALEY (2003), JOURDA (2005), JOURDA *et al.*, (2006), Koudou *et al.*, (2010), en région du socle. La classification des débits a aussi tenu compte de la classification proposée par le Comité interafricain d'étude hydraulique (CIEH, 1978). Le nombre de classes a été réduit à 5 comme l'ont défini SAVANE (1997), SALEY (2003) et JOURDA (2005), en vue d'une meilleure interpolation. Il s'agit des classes très faible, faible, moyenne, forte et très forte.

### ***Indicateur potentialité en eau souterraine***

L'indicateur de potentialité en eau souterraine regroupe six critères aussi importants les uns que les autres. Ceux sont la pente, l'infiltration efficace, la densité de drainage, la densité de fracture, la perméabilité induite et l'épaisseur d'altération. La combinaison de ces différents critères donne des informations qui témoignent de la présence ou non de l'eau dans les aquifères (Tableau 1).

### ***Indicateur accessibilité de la ressource en eau souterraine***

Les ressources en eau ne sont véritablement utilisables que lorsque certains facteurs réunis rendent possible leur accès. Les critères retenus pour cette étude sont la probabilité de succès et le coût de foration. L'accessibilité à la ressource dépend plus du coût de foration que de la probabilité de succès (Tableau II).

### ***Exploitableté de la ressource en eau souterraine***

La disponibilité et l'accessibilité de la ressource eau étant déterminées, il est donc nécessaire de s'assurer que cette ressource est exploitable en vue de l'approvisionnement des populations. En effet, l'exploitableté de cette ressource est fonction du débit d'exploitation qui, lui-même, est conditionné par la quantité d'eau dans la réserve souterraine et la rapidité de renouvellement de cette réserve en cas de forte demande (Tableau III).

**Tableau I.** Potentialité en eau souterraine

Indicateurs	Critères	Qualifications des critères	Classes	Notes
<b>Potentialités en eau souterraine</b>	Pente%	Très faible	< 0,8	10
		Faible	0,8 – 2	8
		Moyen	2 - 4,5	5
		Fort	4,5 - 5	3
		Très fort	> 5	1
	Infiltration efficace (mm)	Très faible	< 25	1
		Faible	25-50	3
		Moyen	50-75	5
		Fort	75-100	8
		Très fort	>100	10
	Densité de drainage (km/km <sup>2</sup> )	Très faible	< 2,91	10
		Faible	2,91 - 9,31	8
		Moyen	9,31 -13,16	5
		Fort	13,16 - 16,21	3
		Très fort	> 16,21	1
	Densité de fracturation (km/km <sup>2</sup> )	Très faible	< 1	1
		Faible	1 - 1,9	3
		Moyen	1,9 - 2,5	5
		Fort	2,5 - 3,2	8
		Très fort	> 3,2	10
Perméabilité induite (x10 <sup>-8</sup> m/s)	Très faible	< 3	1	
	Faible	3 – 8	3	
	Moyen	8 -14	5	
	Fort	14 – 22	8	
	Très fort	> 22	10	
Epaisseurs d'altération (m)	Très faible	< 10	1	
	Faible	10 – 15	3	
	Moyen	15 – 25	5	
	Fort	25 – 40	8	
	Très fort	> 40	10	

**Tableau II :** Accessibilité des ressources en eau souterraine

Indicateur	Critères	Qualification des critères	Classe	Note
<b>Accessibilité</b>	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 (FCFA)	Très faible	< 1115 000	10
		Faible	1115 000 - 1130 000	8
		Moyen	1130 000 - 1300 000	5
		Elevé	1300 000 - 1 500 000	3
		Très élevé	> 1 500 000	1

**Tableau III.** Exploitabilité des ressources en eau souterraine

Indicateur	Critères	Qualification des critères	Classes	Note
<b>Exploitabilité</b>	Débit d'exploitation (m <sup>3</sup> /h)	Très faible	< 1	1
		Faible	1 - 2,5	3
		Moyen	2,5 - 4,5	5
		Fort	4,5 - 8	8
		Très fort	> 8	10
	(Niveau statique) (m)	Très faible	< 7	10
		Faible	7 – 13	8
		Moyen	13 – 15	5
		Fort	15 – 20	3
		Très fort	> 20	1

**Pondération des critères**

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

$$vp = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n gi} \quad (1)$$

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

**Tableau IV.** 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	Notes
<b>Même importance</b>	1
<b>Modérément important</b>	3
<b>Fortement important</b>	5
<b>Très important</b>	7
<b>Extrêmement important</b>	9
<b>Modérément moins important</b>	1/3
<b>Moins important</b>	1/5
<b>Fortement moins important</b>	1/7
<b>Extrêmement moins important</b>	1/9

Le coefficient de pondération pour chaque critère est obtenu en divisant chaque vecteur propre par leur somme. Ces différents calculs sont présentés dans les tableaux V, VI et VII.

**Tableau V.** Pondération accessibilité des ressources en eau souterraine

Critères	Probabilité de Succès	Coût de foration	Vecteur propre	Coefficient de pondération
<b>Probabilité de Succès</b>	1	1/7	= 0,38	= 0,13
<b>Coût de foration</b>	7	1	= 2,65	= 0,87

**Tableau VI.** Pondération exploitabilité des ressources en eau souterraine

Critères	Débit d'exploitation	Niveau Statique	Vecteur Propre	Coefficient de pondération
Débit d'exploitation	3	1	= 1,73	= 0,75
Niveau Statique	1	1/3	= 0,58	0,25

**Tableau VII.** Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération de l'indicateur potentialité en eau souterraine

	Pente	Infilt.	Dd	Df	Pi	Ea	Vp	Cp
Pente	1	1/2	2	5	7	2	2,03	0,25
Infilt.	2	1	4	6	5	3	2,99	0,37
Dd	1/2	1/4	1	3	4	2	1,2	0,15
Df	1/5	1/6	1/3	1	3	1/3	0,47	0,06
Pi	1/7	1/5	1/4	1/3	1	1/4	0,29	0,04
Ea	1/2	1/3	1/2	3	4	1	1	0,13
Total	4,34	2,45	8,08	18,33	24,00	8,58	7,98	1,00

**Infilt** = infiltration efficace ; **Dd** = densité de drainage ; **Df** = densité de fracture ;

**Pi** = perméabilité induite ; **Ea** = épaisseur d'altération ; **Vp** = vecteur propre ; **Cp** = coefficient de pondération.

### Agrégation des critères

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

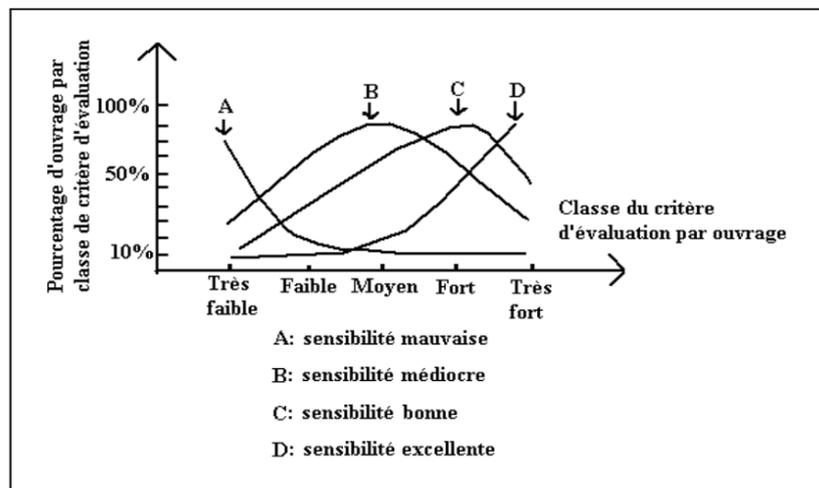
$S = \sum W_i X_i$  avec S : le résultat,  $W_i$  : poids du critère i,  $X_i$  : la valeur standardisée du critère i

Cette démarche produira un indice d'aptitude situé sur une échelle de 0 à 10 (JOURDA, 2005 ; YOUAN TA, 2008), car la somme des coefficients de pondération développée par SAATY (2000) vaut 1. Cette démarche a guidé l'élaboration des différentes cartes thématiques. Une reclassification des différents facteurs conduira à des cartes thématiques à quatre classes que sont : la classe Mauvaise, la classe Médiocre, la classe Bonne et la classe Excellente. Le nombre de classes est fixé à quatre, afin de permettre une meilleure lisibilité et une bonne interprétation des cartes résultantes.

### Validation de la carte de potentialité en eau souterraine

La méthode de validation de carte de potentialité en eau souterraine en se basant sur les travaux de JOURDA (2005). Le critère d'évaluation choisi répond au souci de la réalité du terrain, aux principes d'indépendance du critère et de conformité de celui-ci. Les débits de 32 forages ont été retenus pour la validation de la carte de potentialité en eau souterraine. Le mode de validation utilise des courbes de tendance de sensibilité en milieu du socle (figure 3). La carte des débits de forage regroupés en cinq classes (très fort, fort, moyen, faible et très faible) est superposé à la carte thématique de potentialité en eau, puis le nombre de forages se trouvant dans chaque classe est relevé et exprimé en pourcentage par rapport au nombre total de forages. Un graphe est par la suite construit

et comparé à la courbe des tendances de sensibilité en milieu du socle. Les deux indicateurs (accessibilité et exploitabilité) étant très liés à des critères directement issus du terrain, il n'est donc pas nécessaire de les valider. La qualité de ces indicateurs dépend donc directement de celle des critères entrant dans leur conception (YOUAN TA *et al.*, 2011).



**Figure 3.** Courbe de tendance des classes de sensibilité des cartes thématiques (cas général)

### Établissement de la carte des zones favorables

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

## RÉSULTATS ET ANALYSES

### Cartographie des linéaments

La carte de linéaments obtenus présente 3095 linéaments qui sont de tailles et de directions différentes (Figure 4). Leurs interconnexions forment un réseau dense témoignant l'intensité des phénomènes tectoniques dans la région. L'exploitation de la carte du relevé détaillé des fractures permet d'élaborer de nombreux fichiers thématiques à partir desquels est définie et caractérisée la densité de fracturation, distribution des longueurs et des orientations des linéaments, perméabilités minimales, moyennes et maximales induites par les fractures.

### Carte de perméabilité induite et couloir de circulation des eaux souterraines

La répartition spatiale de la perméabilité à partir des valeurs moyennes des perméabilités induites est présentée à la figure 5. Cette carte rend nettement compte de la variabilité spatiale des perméabilités de la région en montrant les axes majeurs des couloirs de circulation des eaux souterraines. La perméabilité est très faible dans les zones situées en bordure de la carte. Elle est moyenne et relativement élevée dans les secteurs du Nord, Nord-est, centre et Sud. Quatre axes principaux sont observés. Il s'agit des axes NE-SW s'observe au Nord partant de la région de Bayota vers Guibéroua et au Centre dans la région de Gagnoa. Le second axe NW-SE est localisé dans le nord de la zone d'étude entre Yopohué et Ouragahio, au centre dans la localité de Gagnoa. Au Sud cet axe s'observe dans la région de Sérihio. Le troisième axe de direction W-E situé dans l'ouest de la zone

d'étude dans la région de Guibéroua. Le quatrième axe N-S est observé dans les localités de Ouragahio, Dahiépa-Kéhi, Gagnoa et Dougroupalégnoa.

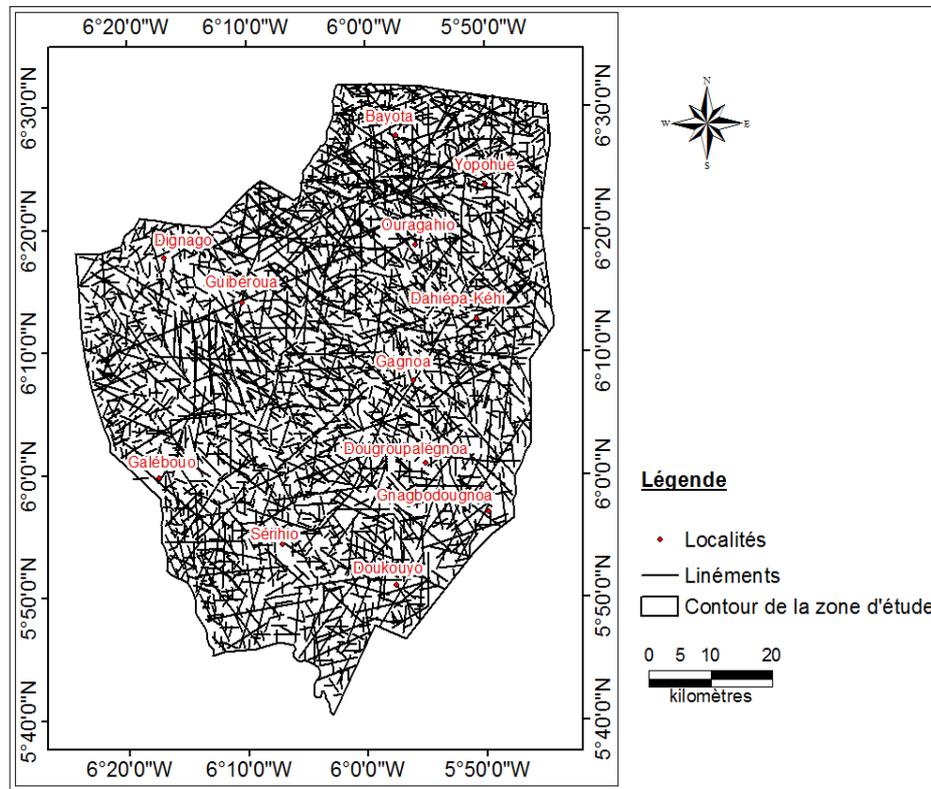


Figure 4. Carte de linéaments détaillés de la région de Gagnoa

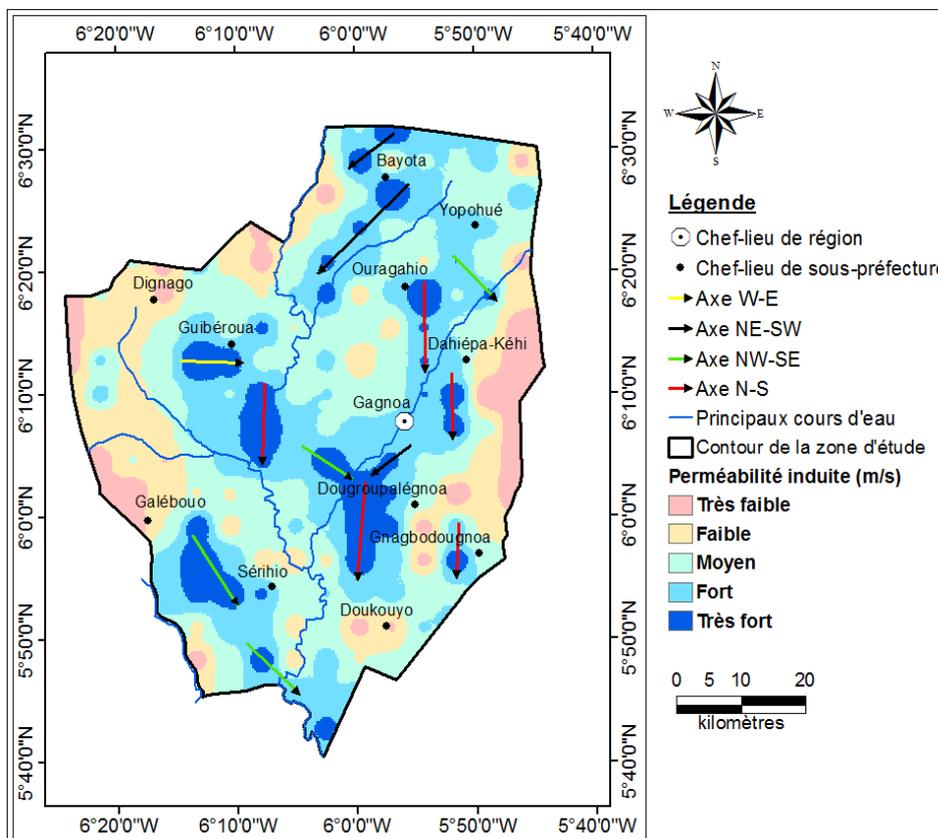


Figure 5. Carte de perméabilité induite et axe de circulation des eaux souterraines

La superposition des principaux cours d'eau à la carte des perméabilités induites met en évidence une relation entre les cours d'eau et la recharge des nappes souterraine. Ces zones sont à la base de la formation des réservoirs d'eau souterraine (figure 4). Les couloirs souterrains recoupent les cours d'eau. Ce résultat s'explique par le fait que lors du relevé linéaire, les linéaments qui se confondaient avec les axes d'écoulement des eaux de surface ont été supprimés afin de permettre une meilleure appréciation des relations qui existent entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Les points d'intersection seraient alors probablement les lieux privilégiés de rencontre entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

## Analyse des cartes thématiques des ressources en eau souterraine

### Carte de potentialité en eau souterraine

La carte de potentialité en eau souterraine obtenue (figure 6) est caractérisée par quatre classes qui sont :

**La classe mauvaise** avec une proportion de 5,50% : elle se rencontre dans le sud et le sud-est de la zone d'étude. Il en existe de petites poches dans le nord et l'ouest du secteur d'étude ;

**La classe de potentialité médiocre** avec 29 % de proportion se rencontre également dans le sud, le centre avec des poches dans l'ouest et le nord. Cette classe est caractérisée par de faibles densités de fracturation, une perméabilité induite et une épaisseur d'altération faible. Ces zones ne favorisent pas la formation d'importants réservoirs.

**La classe à bonne potentialité** en eau souterraine est la plus représentative avec une proportion de 40%. Elle apparaît sur la quasi-totalité de la zone étudiée et se caractérise par des pentes relativement faibles, une densité de drainage modérément faible et une densité de fracture forte.

**La classe de potentialité excellente** couvre 25,50% de la zone d'étude et apparaît dans le secteur nord, nord-ouest et nord-est. Quelques poches de cette classe existent ailleurs dans la zone de Gnagbodougnoua. C'est la classe la plus recherchée lors des campagnes hydrogéologiques.

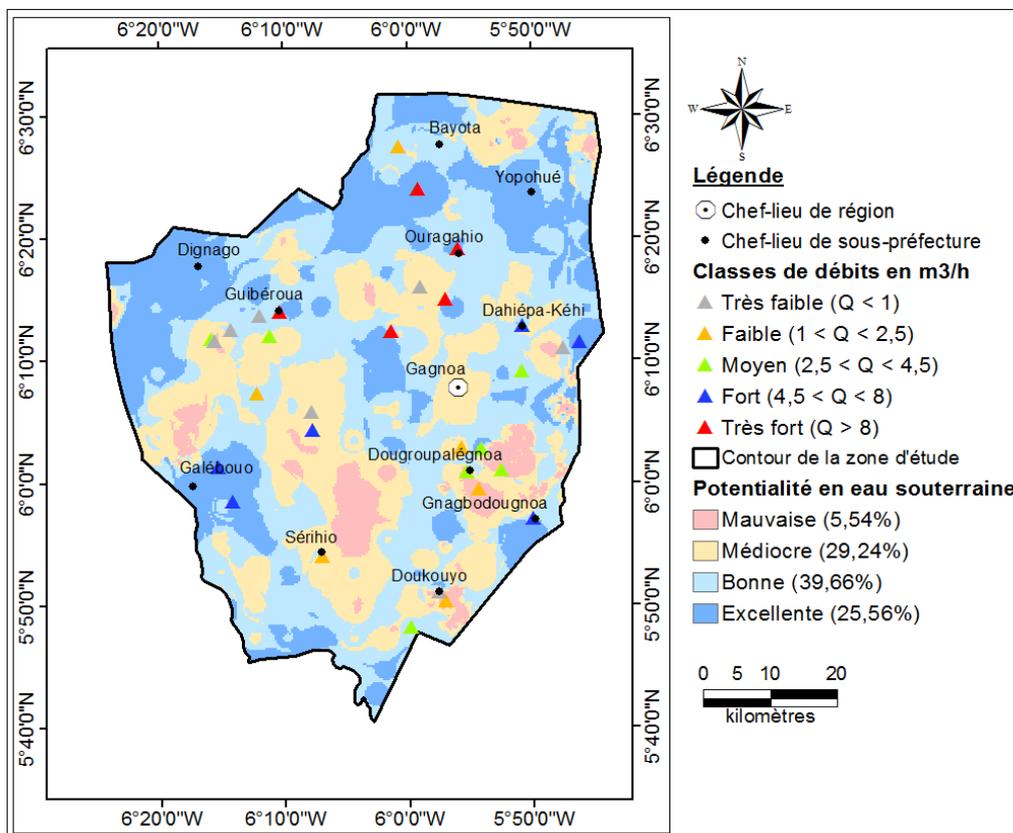


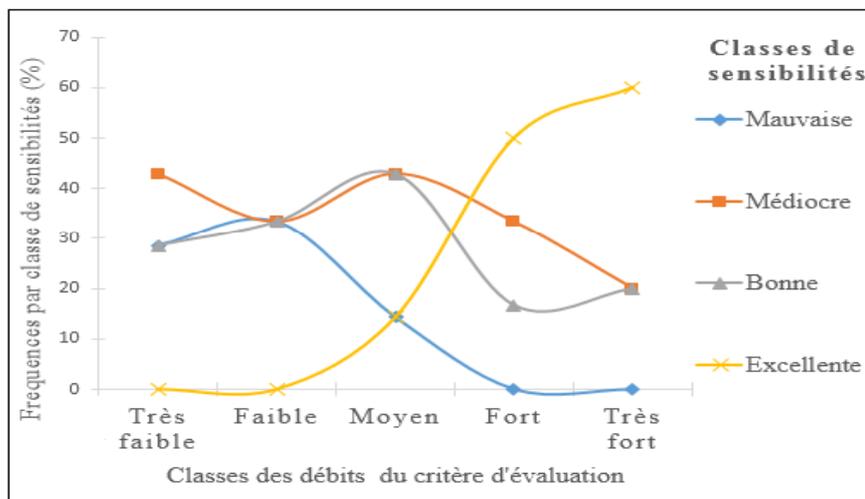
Figure 6. Validation de la carte de potentialité

Le pourcentage de forages d'une classe de débit se superposant à une classe thématique donnée a été calculé et consigné dans le tableau IX. L'analyse de ce tableau montre que 50% des forages à débit fort se superposent à la classe de sensibilité bonne et 60% des forages à débit très fort se superposent à la classe de sensibilité excellente. Par ailleurs, il ressort de cette analyse que 43 % des forages à débit moyen se superposent à la classe de sensibilité bonne et que la classe de sensibilité médiocre recouvre 42,86% des forages ayant des débits très faibles. De plus 33 et 28 % des ouvrages à débit faible et très faible se superposent à la classe de sensibilité mauvaise.

**Tableau IX.** Pourcentage de forages d'une classe de débit se superposant à une classe thématique donnée

	Mauvais	Médiocre	Bonne	Excellente
<b>Très faible</b>	28,57	42,86	28,57	0,00
<b>Faible</b>	33,33	33,33	33,33	0,00
<b>Moyen</b>	14,29	42,86	42,86	14,29
<b>Fort</b>	0,00	33,33	16,67	50,00
<b>Très fort</b>	0,00	20,00	20,00	60,00

La figure 7 présente la courbe de tendance de la région de Gagnoa. Ce graphe bien qu'ayant quelques différences avec le graphe théorique au niveau de la courbe de tendance de la classe de sensibilité mauvaise, reflète la sensibilité du terrain. Ces résultats traduisent le fait que les classes de sensibilité expriment la productivité des aquifères sur le terrain permettant ainsi de valider la carte de potentialité.



**Figure 7.** Courbes de tendance des classes de sensibilités de la carte de potentialité en eaux souterraines

### Carte d'accessibilité

L'analyse de la figure 8 révèle quatre classes d'inégales répartitions. Les zones d'accessibilité mauvaise représentent 18 % du domaine d'étude et sont caractérisées par de faibles probabilités de succès (< 25%) et un coût foration très élevé (> 1 500 000 FCFA, soit 2287 €). Les zones d'accessibilité médiocre (32 %) s'étendent sur la partie ouest et est de la zone d'étude. Les zones d'accessibilité bonne (31 %) concernent les parties sud, centre et est de la région. Elles sont caractérisées par des probabilités de succès moyenne (>50%) et un coût de foration relativement moyen (1 130 000 FCFA soit 1723 €). Les zones d'accessibilité excellente 20% témoigne d'un coût de foration relativement très faible (<1 115 000 FCFA soit 1700 €) et une probabilité de succès très

élevée (> 80%). Ces zones se rencontrent au Centre, dans le département de Gagnoa, avec quelques poches situées dans le nord et dans l'Ouest de la zone d'étude.

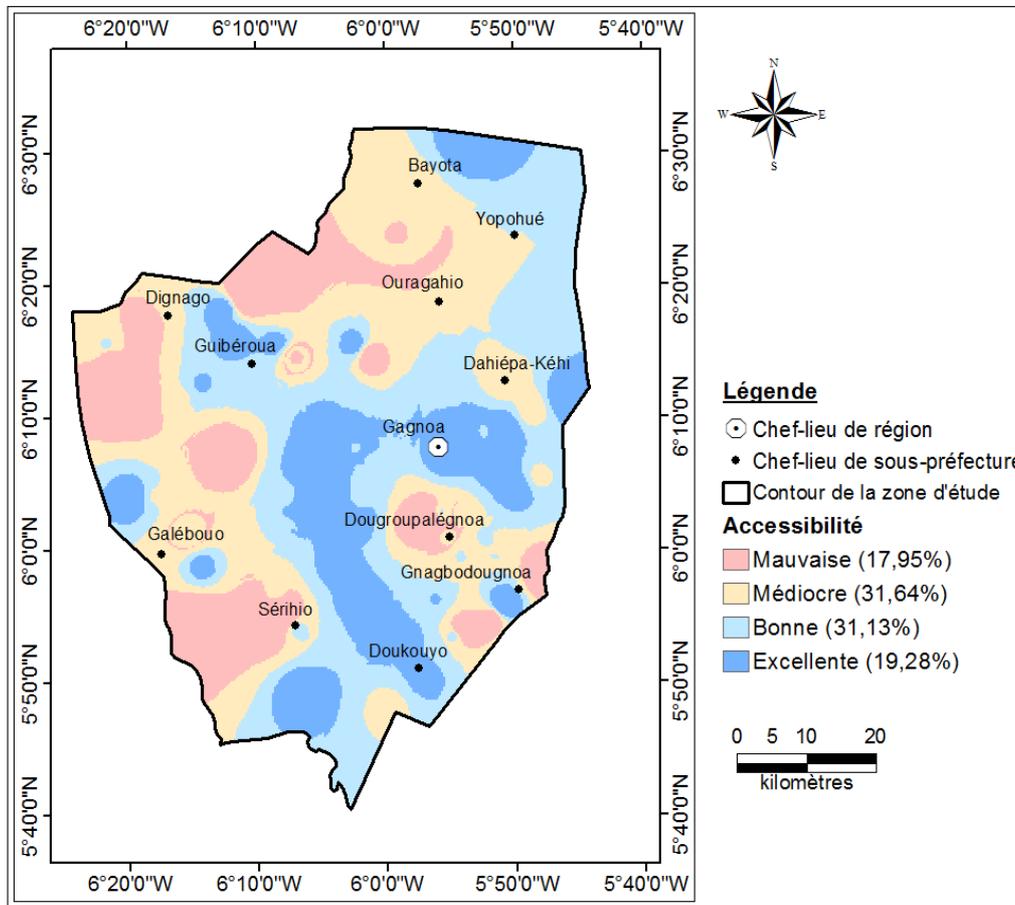


Figure 8. Carte d'accessibilité en eau souterraine

### Carte d'Exploitableté

L'analyse de cette carte (figure 9) révèle quatre classes d'exploitableté des ressources en eau de la région de Gagnoa. Les zones d'exploitableté mauvaise 42,50% se situent dans le centre, le sud et l'est avec quelques indices à l'ouest dans les départements de Galébouo et Dignago. Les zones d'exploitableté médiocre environ 31% du territoire, dominent la partie ouest avec plusieurs poches dans le centre et l'est. Les zones d'exploitableté bonne avec une proportion de 11,40% sont localisées dans le nord à l'ouest et par endroit à l'est. Quant aux zones d'exploitableté excellente (débits moyen à très fort (> 4,5m<sup>3</sup>/h) avec des niveaux statiques moins profonds (< 13m), elles occupent 11,40% de la superficie du territoire et se localisent dans le nord.

### Carte des zones favorables

L'analyse de cette carte révèle quatre classes de zones d'implantation de forages (figure 10). La zone d'implantation mauvaise (13%) se rencontre au sud dans la localité de Sérhio, au sud-est dans les régions de Dougroupalégnoa et Gnagbodougnoa à l'ouest dans les environs de Galebouo et par endroit dans le nord-ouest. Ces zones ne conviennent pas à l'implantation de forages, car elles sont caractérisées par une mauvaise potentialité en eau souterraine.

La zone d'implantation médiocre (42%) se localise au sud-est, à l'ouest et de façons circonscrites dans le nord. Ces zones sont caractérisées par une potentialité médiocre à bonne, une accessibilité médiocre à bonne et une exploitableté médiocre à bonne.

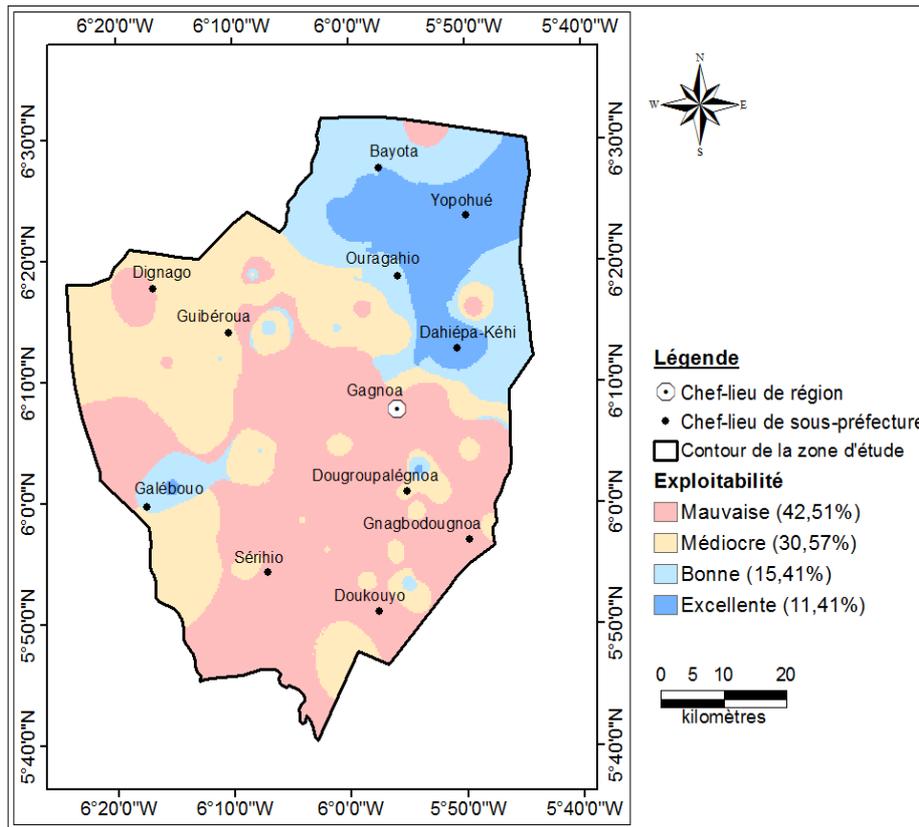


Figure 9. Carte d'exploitabilité en eau souterraine

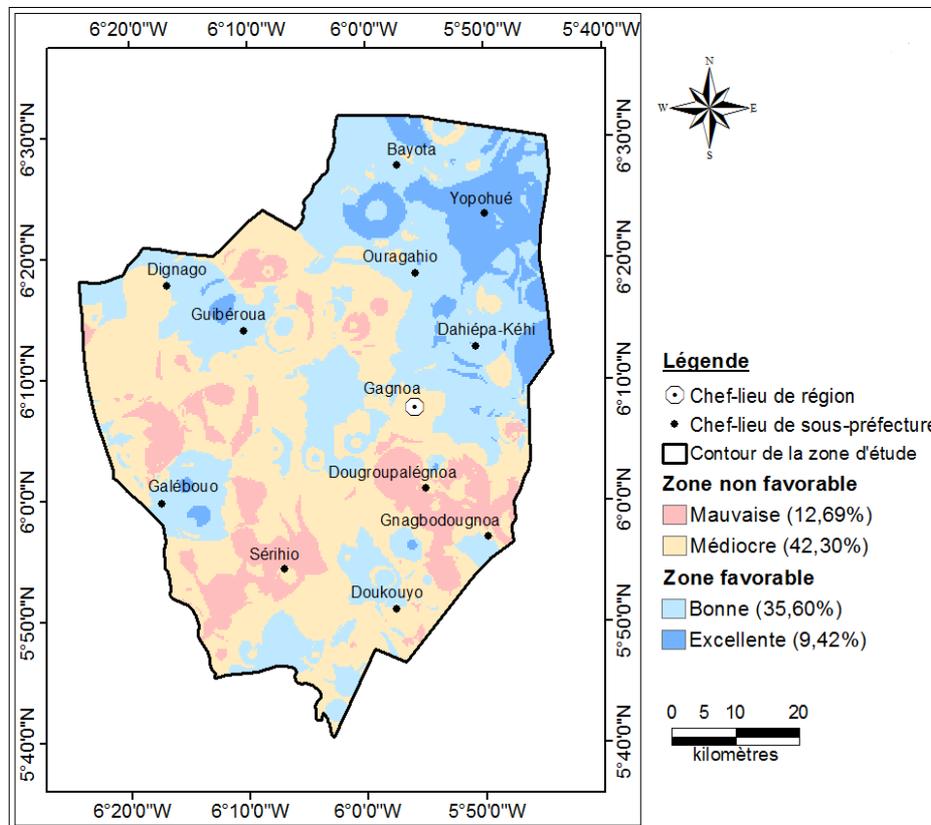


Figure 10. Carte des zones favorables à l'implantation des forages dans la région de Gagnoa

La zone d'implantation bonne qui couvre 36% est dispersée sur la quasi-totalité de la région. Ce sont des zones acceptables pour l'implantation de forages dans le cadre d'hydraulique villageoise améliorée (HVA). La zone d'implantation excellente couvre que 9,5% du territoire et est localisée en grande partie dans le nord dans la localité de Yopohué, de Galébouo, Guibéroua, Bayota et Dahiépa-Kéhi.

## DISCUSSION

Cette étude a montré que la télédétection, les SIHRS et l'analyse multicritère présentent d'énormes avantages dans la recherche de zones favorables à l'implantation de forage productif dans la région de Gagnoa. En effet, ces différentes méthodes ont permis à certains auteurs tels SOROKOBY *et al.*, (2010) à Soubré-Méagui, SALEY (2003) à Man de cartographier des zones favorables à l'implantation des forages à gros débits et la sélection de meilleurs sites de stockage de déchets (JOURDA, 2005).

La réalisation de la carte des linéaments pourrait donner un aperçu de la fracturation du milieu souterrain toutefois si elle est validée. La démarche recommandée pour la validation de la carte linéamentaire est la vérification sur le terrain des traits structuraux par d'autres méthodes telle que la géophysique (KOUAME, 1999). Cependant, l'utilisation de la carte de forages à hauts débits pour la validation des fractures (JOURDA *et al.*, 2006) apparaît comme une démarche plausible et judicieuse. En effet, les travaux de BIEMI (1992), SAVANE (1997), KOUAME (1999), SALEY (2003) et JOURDA *et al.*, (2006) ont montré que les forages les plus productifs se trouvaient proches ou à l'intersection de fractures. Ainsi, la carte des linéaments de la région de Gagnoa obtenue et validée nous renseigne sur le bâti structural et donc, la présence de l'eau souterraine la région.

Le résultat des calculs de perméabilités induites moyennes donne des valeurs qui oscillent entre  $1,03.10^{-7}$  à  $1,10.10^{-6}m.s^{-1}$ , avec une moyenne de  $5,51.10^{-7}m.s^{-1}$ . Ces résultats sont sensiblement identiques à ceux obtenus par DE LASME (2013) à San Pedro qui vont de  $2,35.10^{-7}$  à  $8,13.10^{-6} m.s^{-1}$  et supérieur à ceux de SAWADOGO (1984), dans la Sissili au Burkina Faso qui sont de l'ordre de  $10^{-8} m.s^{-1}$ . Par contre ces valeurs sont inférieures à ceux de BIEMI (1992) dans la région de la Marahoué qui varient de  $10^{-6}$  à  $10^{-4} m.s^{-1}$ . La différence de ces résultats s'explique par le fait que la carte de fracturation obtenue par chaque auteur est différente d'une région à une autre. Aussi, les faibles valeurs de perméabilités induites observées seraient dues à des biais au contour de la zone d'étude. La carte de potentialité obtenue apparaît comme un outil de recherche de potentiel ressource en eau. Par contre, le manque de données dans certaines zones pourrait entraîner des erreurs dans la réalisation des différentes cartes. C'est le cas dans la partie sud de la région de Gagnoa où l'interpolation a permis d'assigner des valeurs obtenues par pondération entre les variables à cartographier. Selon KOUDOU *et al.*, (2010) l'interpolation permettant d'assigner des valeurs dans ces zones peut entraîner certaines erreurs dans la réalisation de ces paramètres, car elle n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles. Aussi, l'intégration du critère occupation du sol pourrait améliorer la qualité de la carte. Cependant, l'exécution de la méthode de Saaty peut être délicate à mettre en œuvre lorsque les critères sont trop nombreux, le risque d'incohérence des jugements étant alors trop élevé cela été signalé par YOUAN TA *et al.*(2015). Une autre difficulté auquel on assiste est le manque de données fiables sur une durée suffisante, ce qui peut empêcher la construction ou la validation de la méthode.

La carte d'accessibilité a montré que la région de Gagnoa est dominée par des zones ayant une accessibilité médiocre (32%) en ressources en eau souterraines. Cela est sans doute dû au coût de foration élevé ( $> 1\ 300\ 000$  FCFA soit plus de 1982€) des forages de ces zones. En effet l'accessibilité à l'eau souterraine est conditionnée par le cout de foration que ces travaux pourraient engendrer car parfois les budgets alloués à ces ouvrages sont très insuffisants.

Les zones d'exploitabilité mauvaise à médiocre couvrent plus de la moitié de la région. Elles regroupent les secteurs où les ressources en eaux ne sont généralement pas exploitables, bien qu'elles soient probablement disponibles. En effet, elles sont caractérisées par des débits d'exploitation très faibles ( $< 1m^3/h$ ) et un niveau statique très relativement important ( $> 20m$ ).

Les zones d'implantation médiocre caractérisées par des débits supérieurs à  $1m^3/h$  seraient des zones appropriées à l'implantation des forages à débits acceptables dans le cadre de l'hydraulique

villageoise. En effet selon SORO (1987), les débits supérieurs à  $1\text{m}^3/\text{h}$  peuvent être considérés comme suffisants pour l'alimentation en eau potable de la population en HV.

Les zones favorables présentant des pentes relativement faibles sont caractérisées par une densité de fracture élevée. La potentialité, l'accessibilité et l'exploitabilité y sont également bonnes voir excellentes. De façon générale, une zone ne peut être considérée comme zone favorable à l'implantation des forages à bons débits que dans les régions possédant une bonne réserve d'eau souterraine (potentialité bonne à excellente), facilement accessible et exploitable pour l'approvisionnement en eau potable.

En définitive, cette étude vient confirmer l'apport indéniable de l'analyse multicritère et des SIHRS dans la recherche de zones favorables à l'implantation de forages à gros débits. Elle nous a permis de donner également une orientation dans la recherche et l'approvisionnement en eau des populations de la région de Gagnoa. Aussi met-elle en évidence les énormes potentialités en ressources en eau souterraine de la région de Gagnoa.

## CONCLUSION

La cartographie des secteurs favorables pour une implantation de forage dans la région de Gagnoa a été effective grâce à l'utilisation conjuguée de la méthode de télédétection, de l'analyse multicritère et du SIHRS. Le résultat obtenu à partir de la télédétection révèle une interconnexion des linéaments formant un réseau dense. L'intégration des différentes cartes thématiques dans un SIHRS nous a permis de réaliser la carte des zones favorables de la région de Gagnoa. Les ressources en eau souterraine sont disponibles et accessibles car 65,22% et 50,41% du territoire présente respectivement une bonne à excellente potentialité en eau souterraine et une bonne à excellente accessibilité. Près de la moitié de la superficie de cette région, est favorable à l'implantation de forages à gros débit. L'utilisation de la télédétection, de l'analyse multicritère et des SIHRS constitue un atout majeur dans la cartographie des ressources en eaux souterraines afin de faciliter l'approvisionnement en eau de la population.

Les résultats obtenus dans cette étude, contribuent à améliorer la localisation des réservoirs fracturés de la région de Gagnoa. Par conséquent, les acquis de ces travaux guideront les campagnes de prospections hydrogéologiques futures dans cette région en vue de l'approvisionnement des populations en eau potable.

## BIBLIOGRAPHIE

- BIEMI, J., 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique par télédétection des bassins versants subsaharien 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 d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody Abidjan (Côte d'Ivoire), 480 p.
- CIEH, 1978. Méthodes d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. *Géohydraulique*, 38, 100 p.
- COULIBALY, K., 1997. Evaluation du bilan hydrologique, de la variabilité climatique et du tarissement des cours d'eau par l'application des méthodes mathématiques dans le bassin versant du fleuve Sassandra (Région de Buyo). Mémoire DEA. Université Abobo-Adjamé, 81p.
- DE LASME, O., Z., 2013. Contribution à une meilleure connaissance des aquifères fissurés du socle précambrien : cas de la région de San-Pedro (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire) ; Thèse de Doctorat Université Felix Houphouët-Boigny ; 174 p.
- 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.
- FRANCIS, O., 1970. Contribution à l'étude du mouvement de l'eau à travers les milieux fissurés. Géomorphologie et géologie du Brésil. Thèse de Doctorat d'Ingénieur, Faculté des Sciences, Université de Grenoble, 112 p.
- GEOMINES., 1982. Inventaire hydrogéologique appliqué à l'Hydraulique Villageoise, Rapport de synthèse. République de Côte d'Ivoire, Ministère des TP et des Transports, Direction Centrale de l'Hydraulique. 111 p.

- GEOMINES., 1982a. Inventaire hydrogéologique appliqué à l'Hydraulique Villageoise. Carte de Daloa, Cahier n°23, Annexe 1. République de Côte d'Ivoire. Ministère des TP et des Transports, Direction Centrale de l'Hydraulique. 28 p.
- GEOMINES, 1982b. Inventaire hydrogéologique appliqué à l'Hydraulique Villageoise. Carte de Gagnoa, Cahier n°24, Annexe 1. République de Côte d'Ivoire, Ministère des TP et des Transports, Direction Centrale de l'Hydraulique. 32 p.
- GEOMINES, 1982c. Inventaire hydrogéologique appliqué à l'Hydraulique Villageoise. Carte de Grand Lahou, Cahier n°29, Annexe 1. Ministère des TP et des Transports, Direction Centrale de l'Hydraulique. République de Côte d'Ivoire. 26 p.
- GEOMINES, 1982d. Inventaire hydrogéologique appliqué à l'Hydraulique Villageoise. Carte de Soubré, Cahier n°28, Annexe 1. Ministère des TP et des Transports, Direction Centrale de l'Hydraulique. République de Côte d'Ivoire. 19 p.
- INS, 2014. (Institut National de la Statistique). Recensement général de la population et de l'habitat (R.G.P.H.) ; principaux résultats préliminaires 26 p.
- JOURDA, J., P., R., 2005. Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissures d'Afrique de l'ouest, concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat Université de Cocody Abidjan (Côte d'Ivoire) 435 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 Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. *Télédétection*, 5, 4 : 339-357.
- KASSIN, K., E., DOFFANGUI, K., KOUAME, B., YORO, R., G & ASSA, A., 2008. Variabilité pluviométrique et perspectives pour la replantation cacaoyère dans le Centre ouest de la Côte d'Ivoire, *Journal of Applied Biosciences*, 12 : 633 – 641.
- KOUAME, K., F., 1999. Hydrogéologie des régions de Montagne : apports des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, 215 p.
- KOUAME, F., GIOAN, P., BIEMI, J., & AFFIAN, K., 1999. Méthodes de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitales: exemples de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Télédétection*, 1 : 139-156
- KOUAMELAN, A., N., 1996. Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 277 p.
- KOUDOU, A., KOUAME, K., F., MARC, Y., T., 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), article photo-interprétation *European journal of applied remote sensing* n° 2010/3-4
- SAATY, T., L., 2000. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*, kindle Edition Pittsburgh, PA 15260 USA. Vol. 6, 478 p.
- SALEY, M., B., 2003. Système d'Informations Hydrogéologiques à Référence Spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies Thématiques des ressources en eau de la région semi-Montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire), thèse de Doctorat, Université de Cocody 195 p.
- SAVADOGO, A., N., 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta. Etude régionale du Bassin versant de la Sissil. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université Grenoble 1, 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. Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan 386 p.
- 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, 239 p.
- SOROKOBY, V., M., SALEY, M., B., KOUAME, K., F., DJAGOUE, M., E., V., BERNIER, M., AFFIAN, K. & BIEMI, J., 2010. Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubré-Méagui (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire) : contribution à la gestion des ressources en eau souterraine. *Télédétection*, 9, 3-4 : 209-223.
- TAGINI, B., 1971. Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Thèse de Doctorat, Université de Lausanne, Suisse, 302 p.
- YACE, I., 2002. Initiation à la géologie ; L'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest paru à l'édition CEDA 183 p.

- YOUAN TA, M., 2008. Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest cas de la région de Bondoukou (Nord-est de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, Université de Cocody, 236 p.
- 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 Bondoukou (Nord-est de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, 2 : 34-42
- 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 la région de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). *Revue internationale de géomatique*. 21, 1: 43-71.
- 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. 2015. Cartographie des zones potentielles à l'implantation des forages à gros débits en milieu fissure par analyse multicritère : Cas du département d'Oumé (centre-ouest de la Côte d'Ivoire), *Larhyss Journal*, 23 : 155-181