

Cartographie des zones d'accessibilité et d'exploitabilité en eau souterraine par SIG dans le département de Yamoussoukro, Centre-Sud de la Côte d'Ivoire

Emile Assiè ASSEMIAN, Alexis Kan KOFFI* et Beh Ibrahim DIOMANDÉ

*Université Alassane Ouattara de Bouaké, UFR Communication, Milieu et Société,
Département de Géographie, Laboratoire d'Hydro-climatologie, de Télédétection et d'Environnement
(LHCTE), 01 BP V 18 Bouaké 01, Côte d'Ivoire*

(Reçu le 08 Mai 2023 ; Accepté le 10 Août 2023)

* Correspondance, courriel : assmilea@gmail.com

Résumé

Les eaux souterraines constituent une ressource de premier choix pour l'alimentation en eau potable des populations. Elles sont d'une qualité relativement bonne. Toutefois, l'accès à cette précieuse ressource devient de plus en plus difficile précisément dans les régions de socle. La présente étude vise à cartographier les zones d'accessibilité et d'exploitabilité en eau souterraine dans le département de Yamoussoukro. La méthodologie est basée sur l'application des méthodes SIG aux données de forage et d'analyse statistique. L'approche analyse multicritère a été appliquée dans cette méthode SIG. Les résultats mettent en évidence une bonne et excellente accessibilité en eau souterraine de 29 % de la superficie du département. Elles sont identifiées au Centre-Est, au Nord et à l'Ouest. Les zones de bonne et excellente exploitabilité en eau souterraine s'observent plus dans le Sud et le Nord-Ouest. Elles occupent une proportion de 22 % de la superficie de la zone d'étude. Ces résultats démontrent que le département présente une modeste accessibilité et exploitabilité en eau souterraine. Ces zones de bonne et excellente exploitabilité en eau souterraine fournissent des forts débits des forages et donc constituent de bon réservoir d'eau souterraine dans ce socle. Un forage implanté dans ces secteurs fournira des débits importants pour l'approvisionnement en eau potable des populations.

Mots-clés : *cartographie, accessibilité, exploitabilité en eau souterraine, SIG, Yamoussoukro.*

Abstract

Mapping of groundwater accessibility and exploitability zones by GIS in the department of Yamoussoukro, South-Central Côte d'Ivoire

Groundwater is a prime resource for supplying drinking water. Its quality is relatively good. However, access to this precious resource is becoming increasingly difficult, particularly in basement regions. The aim of this study is to map groundwater accessibility and exploitability zones in the Yamoussoukro department. The methodology is based on the application of GIS methods to drilling data and statistical analysis. The multicriteria analysis approach was applied in this GIS method. The results show that 29 % of the department's surface area has good and excellent access to groundwater. These are identified in the

Centre-East, North and West. Areas of good and excellent groundwater exploitability are found more in the south and north-west. They cover 22 % of the study area. These results show that the department has modest groundwater accessibility and exploitability. These areas of good and excellent groundwater exploitability provide high borehole flow rates and therefore constitute good groundwater reservoirs in this basement. Boreholes drilled in these areas will provide significant flow rates for drinking water supplies.

Keywords : *mapping, accessibility, groundwater operability, GIS, Yamoussoukro.*

1. Introduction

L'accessibilité à l'eau potable est l'un des objectifs majeurs des projets de développement à travers le monde. L'accès à l'eau est un révélateur des inégalités sociales et illustre plus généralement les problèmes de développement. Cette caractérisation montre que la quasi-totalité de l'Afrique subsaharienne est exposée à une pénurie d'eau, provoquée par un manque d'investissement, bien que l'eau soit disponible physiquement [1, 2]. En effet, lors d'une prospection hydrogéologique, une fois la ressource en eau souterraine est disponible, elle doit être accessible et exploitable. Cependant, les réserves d'eau souterraine ne sont véritablement utilisables que lorsque certains paramètres réunis rendent possible leur accès. Les plus importants sont la profondeur totale des ouvrages et l'indice de succès [3, 4]. Au niveau des aquifères de socle, qui occupe 97,5 % de la superficie de la Côte d'Ivoire, leur productivité en eau souterraine est si modeste, ce qui rend difficile son exploitation pour les grandes agglomérations. L'exploitation de ces eaux a longtemps été axé sur le repérage de niveaux aquifères ayant les meilleures caractéristiques hydrauliques. Ainsi, l'utilisation des approches géomorphologiques et géophysiques pour le repérage des structures géologiques favorables à l'obtention de bon débit, nous donne peu de succès. Ces méthodes ont conduit parfois à la réalisation de bon nombre d'ouvrages non exploitables ayant un débit inférieur à 1 m³/h. Ces faibles débits pourraient être essentiellement dus au mauvais choix des sites d'implantation des forages et à une méconnaissance du système de fractures qui couvrent ces régions de socle [3, 5, 6]. L'avènement des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la Télédétection ont permis de répondre les problèmes d'accès et d'exploitation des eaux souterraines en milieu de socle [7 - 11]. Dans le département de Yamoussoukro, l'accessibilité en eau est symptomatique depuis l'avènement du réchauffement climatique. La rareté de l'eau a suscité le recours à l'exploitation des eaux souterraines. Ainsi, les eaux souterraines constituent une ressource de premier choix pour l'alimentation en eau potable des populations, car elles ont une qualité relativement bonne et un coût peu élevé [12, 13]. En milieu de socle comme le département de Yamoussoukro, l'exploitation de cette ressource pose souvent des problèmes. Ce travail a pour objectif de cartographier les zones d'accessibilité et d'exploitabilité en eau souterraine dans le département de Yamoussoukro au moyen des méthodes des systèmes d'information géographique (SIG). En effet, les zones de bonnes accessibilité et exploitabilité en eau souterraine pourraient fournir des débits importants [14, 15]. Le département de Yamoussoukro est situé au Centre-Sud de la Côte d'Ivoire précisément entre les longitudes 5°30'W et 5°10' W et les latitudes 6° 36'N et 6°70' N (*Figure 1*). Il bénéficie d'un climat équatorial de transition favorisant la poussée d'une savane arborée avec des forêts galeries. Cette zone qui occupe une partie Est du bassin versant du Bandama blanc, est dominée par un relief de plateaux, avec des altitudes variant de 132 à 471 m. Les sols évoluant sur ce paysage sont de type ferrallitique et hydromorphe. Sa formation géologique est dominée par les complexes granitoïdes baoulé, abronien et des formations birimiennes. Le sous-sol foré est un aquifère de socle formé d'altérite au niveau de la partie supérieure et d'un horizon fissuré sous-jacente. Comme tout aquifères de socle, leur productivité en eau souterraine reste très modeste [16].

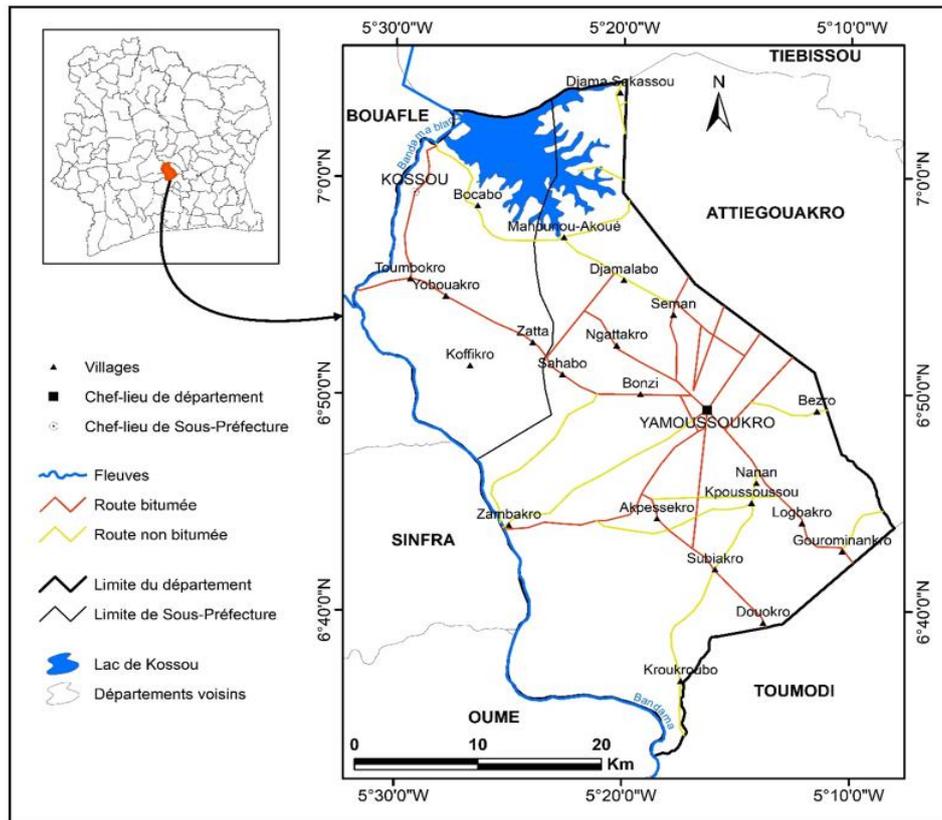


Figure 1 : Localisation du département de Yamoussoukro

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel et données

Nous avons utilisé les données techniques (profondeur totale, débits d'exploitation, niveaux statiques) de 196 forages recueillis à la Directions Territoriales de l'Hydraulique de Yamoussoukro. Nous avons également eu recours à une base de données vectorielle de 2014 éditée par le CNTIG. Pour le traitement des données, le logiciel Arcgis 10.2 a permis de réaliser les différentes cartes thématiques.

2-2. Méthodes

L'accessibilité et l'exploitabilité des eaux souterraines sont des indicateurs qui caractérisent la productivité en eau souterraine d'une région donnée. Elles permettent d'orienter les campagnes de prospection en eau souterraine. L'accessibilité montre si l'eau souterraine est facilement accessible et l'exploitabilité vérifie si l'eau souterraine est exploitable pour l'approvisionnement en eau potable.

2-2-1. Indicateur d'accessibilité en eau souterraine

Les réserves d'eau souterraine ne sont véritablement utilisables que lorsque certains paramètres réunis rendent possible leur accès [3]. Les plus importants sont la profondeur totale (Pt) des ouvrages et l'indice de succès (Is) [3, 7].

✚ La *profondeur totale*, c'est la profondeur du forage au cours de laquelle, l'on a pu obtenir un débit optimum ou important. Ainsi, un site sera plus productif lorsqu' on peut obtenir un débit important pour une faible profondeur,

✚ *Indice de succès*, il donne la probabilité de succès d'un forage. Sa formule est définie par ***l'Équation*** suivante :

$$IS = \frac{b}{10} * 100 \quad (1)$$

où, *Is* est l'indice de succès (%); et *b* est le débit d'exploitation (m^3h^{-1}).

Selon les recommandations de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP), l'indice de succès permet la distinction des zones de bonne productivité caractérisée par des forages positifs ($Is \geq 10 \%$) et des zones de faible productivité avec un nombre élevé de forages négatifs ($Is < 10 \%$). Ainsi un forage avec un indice de succès $Is > 10 \%$ est accessible à la population pour exploitation [3].

2-2-2. Indicateur d'exploitabilité en eau souterraine

La ressource en eau n'est exploitable que si le débit d'exploitation est significatif (au moins $1 m^3h^{-1}$). Le débit d'exploitation en lui-même est conditionné par la quantité d'eau dans la réserve souterraine et la rapidité de renouvellement de cette réserve en cas de forte sollicitation [17]. Pour mettre évidence l'indicateur d'exploitabilité, les facteurs utilisés sont : les débits d'exploitation et les niveaux statique, avec une très grande importance accordée aux débits d'exploitation en référence aux travaux de [3, 18].

✚ *Le débit d'exploitation*, c'est un paramètre de forage qui décrit la productivité du forage dans son rayon d'influence. Les secteurs où les fractures sont connectées, il décrit les propriétés hydrauliques de l'aquifère. Le choix des classes des débits est inspiré des travaux antérieurs du comité interafricain des études hydrauliques (CIEH). Le débit d'exploitation est le débit de pompage définit pour exploiter l'eau au niveau du forage.

✚ *Le niveau statique*, permet de suivre la fluctuation du niveau d'eau dans l'aquifère. Celui-ci caractérise le niveau piézométrique.

2-2-3. Analyse multicritère pour la production des cartes thématiques

Ce travail doit consister à produire les cartes d'accessibilité et d'exploitabilité en eau souterraine en se basant sur les méthodes SIG (analyses multicritères). Les indicateurs conçus pour l'étude de la productivité spatiale sont : l'accessibilité et l'exploitabilité [19 - 21]. Selon [19], une nappe est accessible lorsque la profondeur pour obtenir un débit positif ou important est faible, de même une zone est exploitable si le débit d'exploitation est important. Ainsi, les critères qui entrent dans l'élaboration de chaque indicateur selon ses auteurs, sont consignés dans le ***Tableau 1***.

Tableau 1 : Classification, codification et pondération des critères des indicateurs Accessibilité et Exploitabilité

Indicateur	Critères	Qualitatifs	Classe	Codification
Accessibilité	Indice de succès (poids : 0,25)	Très faible	< 30 %	1
		Faible	30 à 45 %	3
		Moyen	45 à 60 %	5
		Forts	60 à 75 %	8
		Très fort	> 75 %	10
	Profondeur de l'ouvrage (poids : 0,75)	Très faible	< 35 m	10
		Faible	35 à 45 m	8
		Moyen	45 à 55 m	5
		Forts	55 à 70 m	3
		Très fort	> 70 m	1
Exploitabilité	Débits d'exploitation (poids : 0,75)	Très faible	< 1m ³ /h	1
		Faible	1 à 2,5 m ³ /h	3
		Moyen	2,5 à 5 m ³ /h	5
		Forts	5 à 10 m ³ /h	8
		Très fort	> 10m ³ /h	10
	Niveau statique (poids : 0,25)	Très faible	< 6 m	10
		Faible	6 à 16 m	8
		Moyen	16 à 26 m	5
		Forts	26 à 36 m	3
		Très fort	> 36 m	1

Le choix de chaque classe, est inspiré des travaux antérieurs du comité interafricain des études hydrauliques [22]. Les critères étant mesurés sur des échelles différentes, une codification de ceux-ci s'impose pour une bonne analyse multicritère. Un intervalle commun de 1 à 10 a été retenu pour cette opération, en tenant compte des études antérieures réalisées par [20 - 22]. La note 10 est attribuée à la classe « très forte » contribuant à l'excellente réalisation de l'indicateur considéré. Dans le cas inverse, la note 1 est attribuée à cette classe. Pour la pondération des critères, la méthode développée par [23] fut appliquée. Contrairement à la technique basée sur le choix arbitraire des poids, celle-ci emploie des calculs mathématiques qui génèrent des coefficients de pondération (poids) dont la somme est égale à 1, selon l'importance de chaque critère pour la conception de l'indicateur. Les valeurs du poids affectés à chaque critère sont consignées dans le tableau 1. Pour la production des cartes thématiques, la méthode d'agrégation complète fut appliquée. Elle permet d'intégrer tous les critères de chaque indicateur et de sommer leurs valeurs pondérées [20, 22, 24, 25]. On résume cette approche par l'Équation suivante :

$$I = \sum_{i=2}^n W_i X_i \tag{2}$$

avec, I : le résultat ou indice de l'indicateur ; W_i : le poids du critère ; X_i : la valeur standardisée du critère de facteur i.

Le logiciel Arcgis10.2 est un outil possédant les fonctionnalités complètes pour la réalisation de cette analyse multicritère grâce aux fonctions « interpolate grid » et « Calculatrice raster » de l'outil « Spatial Analyst ». Ainsi, à la fin du processus, les quatre classes thématiques retenues après agrégation sont : mauvaise, médiocre, bonne et excellente.

3. Résultats

3-1. Relation entre débit et profondeur des forages

La profondeur totale d'un forage correspond à la profondeur au cours de laquelle, l'on a pu obtenir un débit optimum. En vue de déterminer la profondeur optimale d'obtention des forages productifs dans le département de Yamoussoukro, un graphe de répartition des débits en fonction de la profondeur totale de l'ouvrage a été établi (**Figure 2**). Dans la zone d'étude, les profondeurs varient entre 19 et 109 m, avec une moyenne de 65 m et un écart type de 15,2 m. La mise en évidence de la relation entre les débits de foration et la profondeur totale forée est illustrée par la **Figure 2**. À l'analyse, la tranche de profondeur optimale à proposer pour réaliser des forages productifs varie entre 55 et 75 m. Les profondeurs comprises entre 55 m et 75 m sont caractérisées par des débits plus importants pouvant atteindre $12,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, mais les débits des ouvrages tendent à baisser au-delà de 75 m. Au regard des forages étudiés dans cette région, la zone optimale de productivité est comprise entre 55 et 75 m.

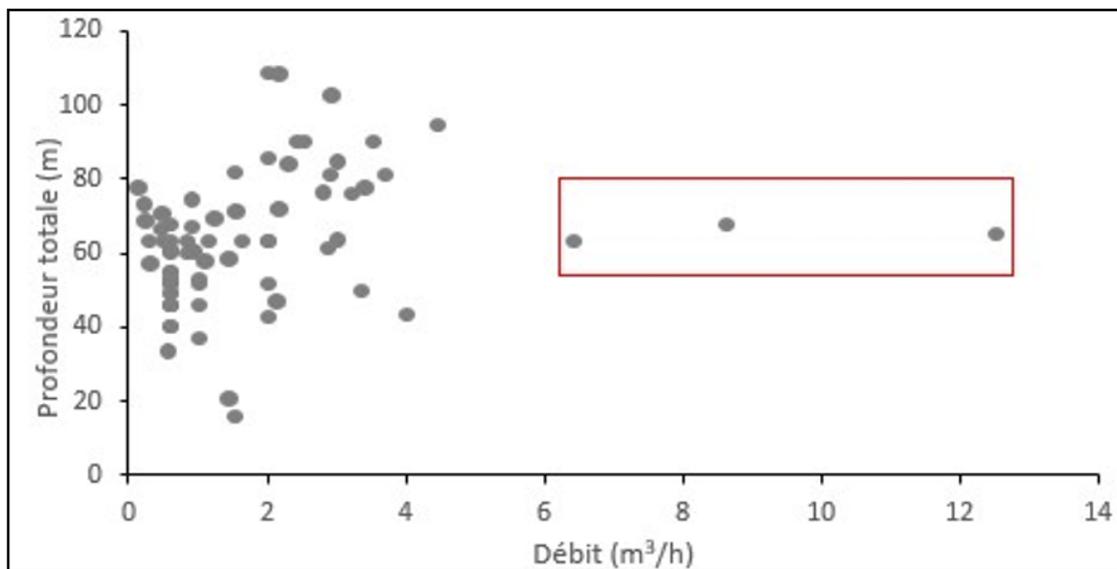


Figure 2 : Relation profondeur totale et débit d'exploitation des forages

Au niveau spatial, les profondeurs des forages comprises entre 56 et 73 m occupe une proportion de 71,53 % (**Figure 3**). Cette tranche de profondeur couvre quasiment le département. Afin d'optimiser le coût des ouvrages, une analyse spatiale des profondeurs des forages nous permet de localiser les eaux souterraines facilement accessibles dans le département.

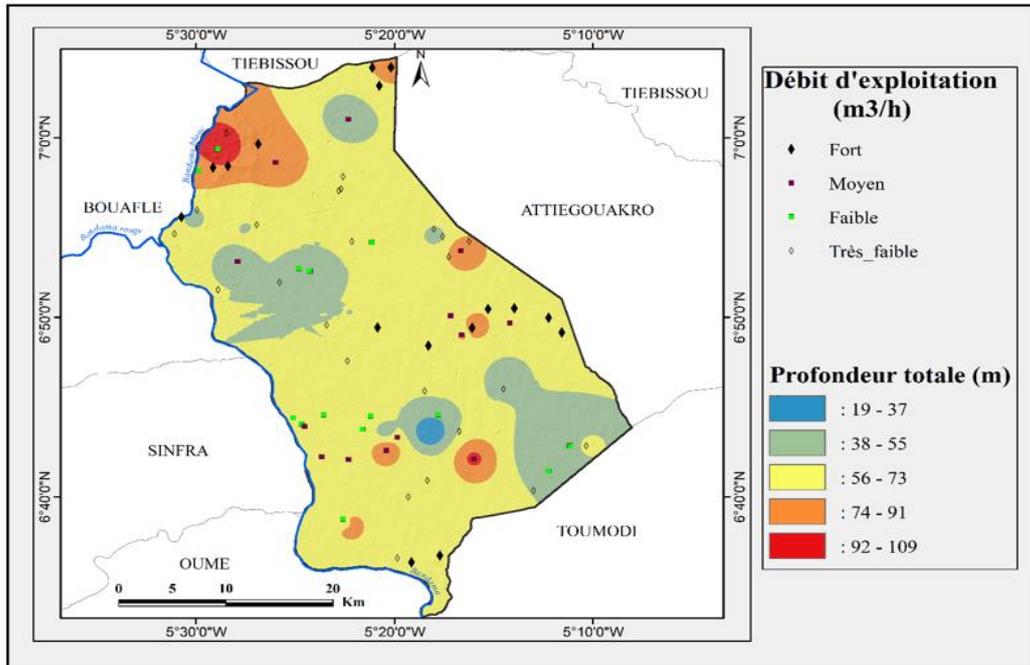


Figure 3 : Répartition spatiale des profondeurs totales des forages

La répartition spatiale des débits d'exploitation permet de mettre en exergue les zones faibles et fortes productivités en eau souterraine. Ainsi, on remarque que les forts débits sont localisés dans la partie Centre-Est de la zone d'étude notamment au niveau des localités de Yamoussoukro, Bozre, dans la partie Sud au niveau de Kroukroubo et dans le Nord du département, précisément dans les localités de Toumbokro, Bocabo et Djama-Sakassou. Cette classe de débits (moyens et forts) occupe environ 8 % du département. Globalement, l'ensemble du département est dominé par des débits évoluant entre 0,6 et 3 m³h⁻¹, occupe environ 90 % de la surface et correspond aux faibles débits selon la **Figure 4**.

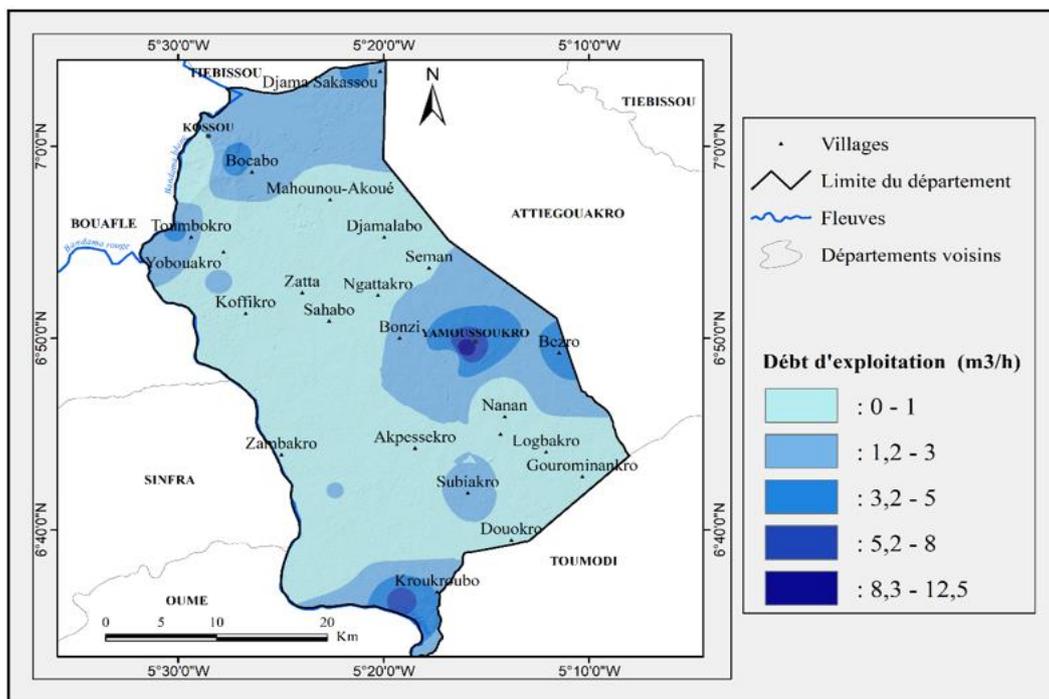


Figure 4 : Répartition spatiale des débits d'exploitation des forages

3-2. Dynamique du niveau statique des aquifères

Les données de forage ont servi à estimer les variations du niveau statique des aquifères dans ce socle de la zone d'étude. En effet, dans un milieu poreux, le niveau statique représente le niveau de l'eau dans la nappe. La modélisation spatiale des valeurs du niveau statique par interpolation est représentée par la **Figure 5**. À partir de la carte de variation du niveau statique, on constate que les niveaux statiques faibles et les niveaux statiques moyens sont majoritairement représentés. Ils occupent respectivement environ 44,8 % et 27,32 % de la superficie totale du département. Les zones à faible niveau statique sont quasi localisées au Centre-Sud, avec quelques intrusions du niveau moyen dans les localités de Kroukroubo, Gourominankro et Seman. Quant aux niveaux statiques moyens (26,08 %), on les rencontre dans le Nord. Les niveaux statiques forts et très forts occupent une proportion de 1,69 % et s'observent dans l'extrême nord-ouest.

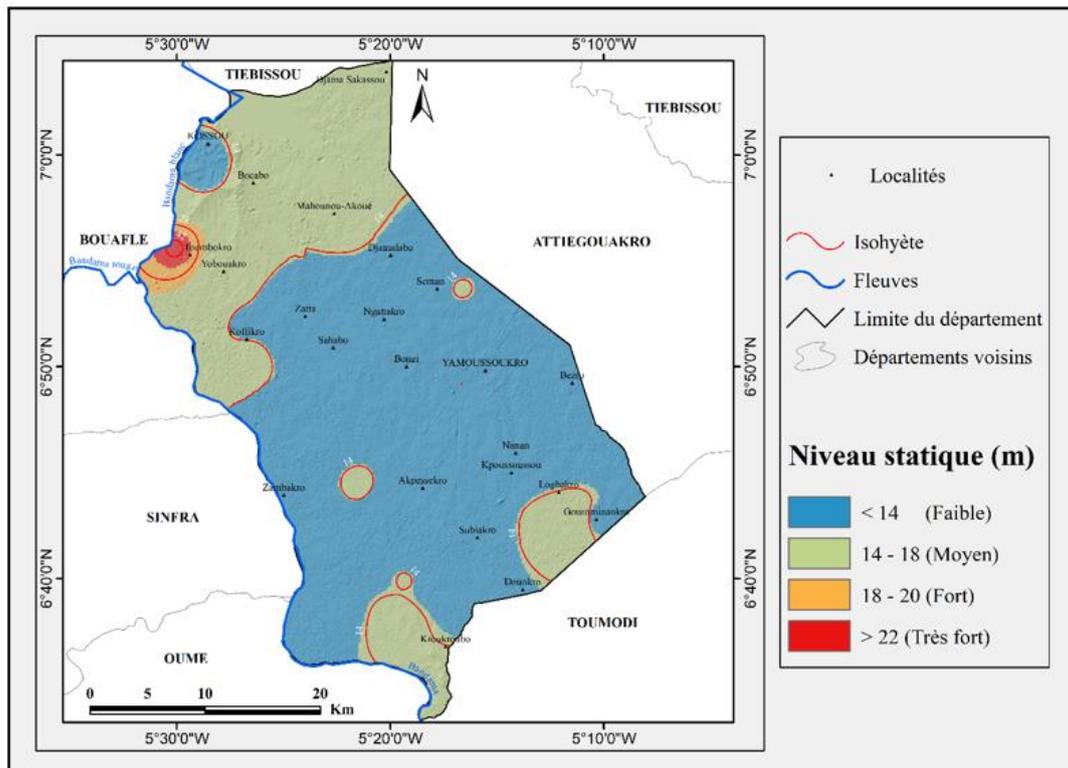


Figure 5 : Variation spatiale du niveau statique

3-3. Cartographie de l'accessibilité et de l'exploitabilité en eau souterraine

3-3-1. Accessibilité des ressources en eau souterraine

L'étude de l'accessibilité des nappes d'eaux souterraines dépend des paramètres de profondeur de l'ouvrage et l'indice de succès. L'analyse multicritère de ces deux paramètres a permis de réaliser la carte d'accessibilité des eaux souterraines du département (**Figure 6**). Cette carte montre que la classe bonne et excellente accessibilité occupent 29 % de la zone d'étude. Elles se caractérisent par des faibles profondeurs pour obtenir des débits positifs forts. Aussi, ces classes sont déterminées par de fortes densités de fracturation et des débits de forages fréquemment forts. Les profondeurs d'obtention de débits forts sont plus ou moins faibles. Elles sont identifiées au Centre-Est, au Nord et à l'Ouest. La classe d'accessibilité moyenne occupe une proportion de 36 % de la superficie totale. Elle est plus marquée dans le Nord avec de faible superficie dans le Centre-Sud. Ces secteurs sont parfois caractérisés par de fortes épaisseurs d'altération et souvent les profondeurs d'obtention de débits importants sont très élevées. La classe de mauvaise accessibilité en eau

couvre 35 % de la superficie totale. Elle domine la partie Sud. Ces zones disposent des forages à profondeur élevée avec surtout de très faibles débits. L'accessibilité en ressource en eau souterraine du département de Yamoussoukro est modeste. Ce qui pourrait être une des caractéristiques des aquifères de socle développé sur les formations volcano-sédimentaires.

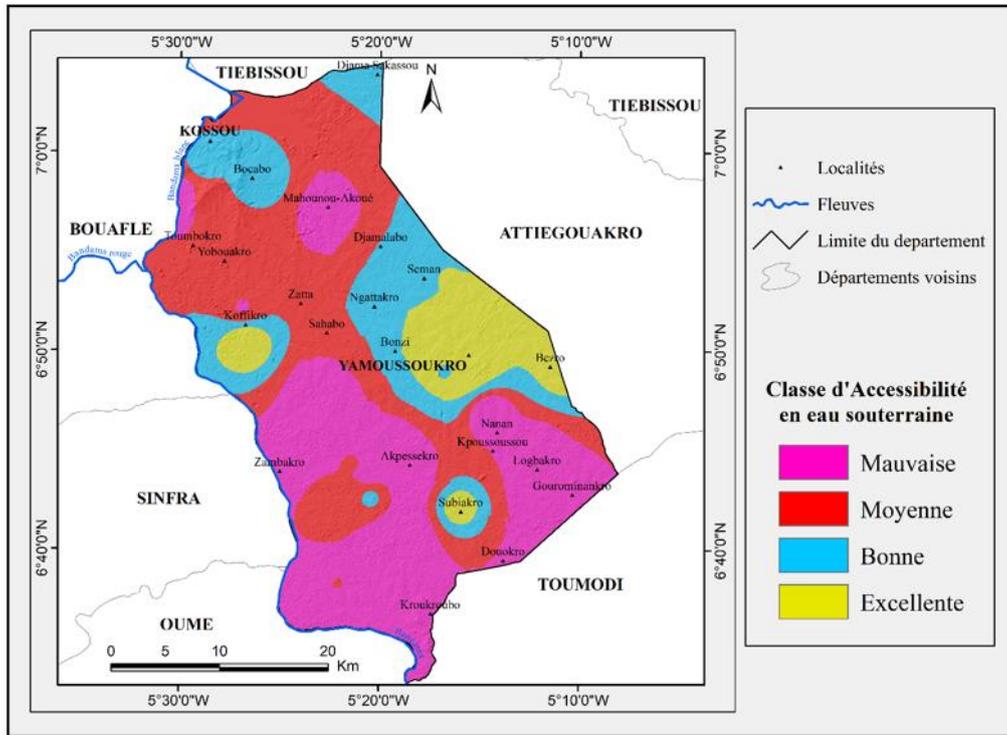


Figure 6 : Répartition spatiale d'accessibilité en eau souterraine dans le département de Yamoussoukro

3-3-2. Exploitableté des ressources en eau souterraine

L'exploitableté des ressources en eaux souterraines est guidée par le débit que l'on peut tirer dans la nappe. Pour réaliser la carte d'exploitableté (Figure 7), les critères de débits d'exploitation et du niveau statique sont utilisés. D'après la Figure 7, la classe de mauvaise exploitableté est localisée dans la partie centrale excepté l'Est avec des intrusions au Nord-Ouest et au Sud-Est. Elle couvre 36 % de la superficie totale du département. Elle se caractérise par des zones à très faibles débits et à très forts niveaux statiques. La classe à exploitableté moyenne est répartie sur l'ensemble du territoire avec une proportion de 42 %. Les débits des forages dans cette classe sont rarement forts. La classe à bonne exploitableté est caractérisée par des débits moyens et forts, avec des niveaux statiques relativement faibles. Elle occupe une proportion d'environ 20,2 % et se concentre en grande partie au Nord avec des intrusions à l'Est et au Sud. Ces zones sont propices pour l'approvisionnement en eau potable des villes de fortes densités de population. La classe à excellente exploitableté occupe seulement 2 % du territoire. Ce secteur est concentré au Nord-Ouest, à l'extrême de la zone de bonne exploitableté. Les débits des forages sont généralement très forts ($> 5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) dans ces localités. Il ressort de cette analyse que, le département de Yamoussoukro présente une exploitableté en ressources en eau souterraine modeste, avec une proportion de 45,6 % et un débit maximum de $12,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Ces régions coïncident aux zones pénélaine à fortes densités de fracturation et à fortes épaisseurs d'altération.

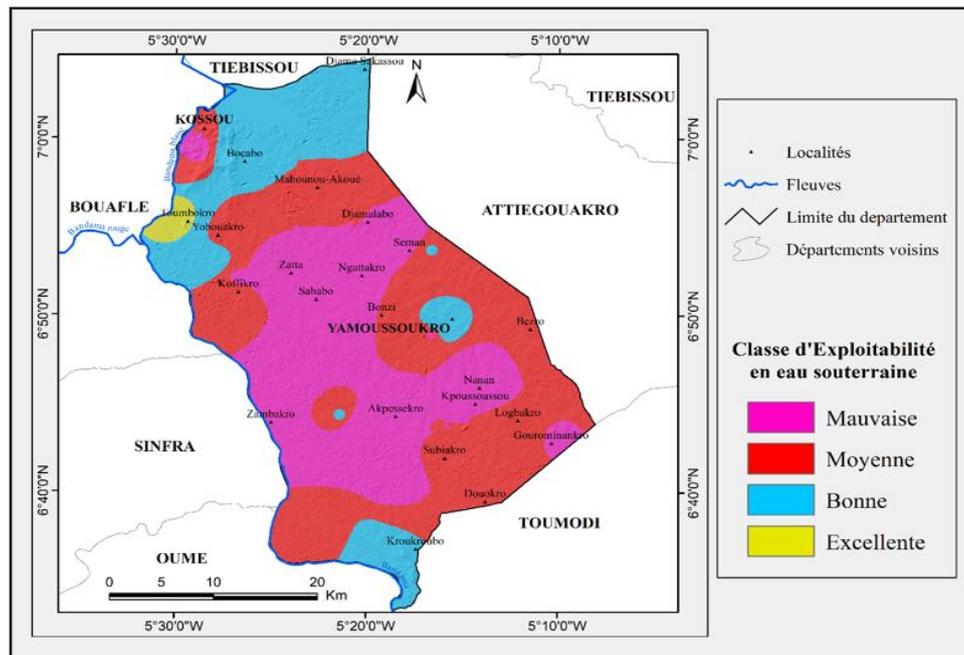


Figure 7 : Répartition spatiale de l'exploitabilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro

4. Discussion

L'accessibilité en ressource en eau souterraine du département de Yamoussoukro est modeste. La classe de bonne et excellente accessibilité occupent 29 % de la zone d'étude. Elles se caractérisent par de faibles profondeurs pour obtenir débits de forage importants et une forte probabilité de succès. Cette modeste accessibilité en eau souterraine caractérise des aquifères de socle développé sur les formations volcano-sédimentaires [5]. Par ailleurs, l'exploitabilité des ressources en eau souterraine est guidée par les débits importants que le forage peut tirer dans la nappe et les faibles niveaux statiques. Pour une bonne et excellente exploitabilité en eau souterraine, il faut de forts débits d'exploitation et des niveaux statiques faibles. Dans le cadre de notre étude, la classe bonne et excellente exploitabilité occupent une proportion de 22,2 % et s'observent surtout au nord à l'est et au sud. Ces régions fournissent des débits d'exploitation importants des forages et donc sont très productives en eau souterraine. Dans cet aquifère de socle, ces régions sont des zones de faibles pentes, à fortes densités de fracturation et à fortes épaisseurs d'altération [18]. Les études de [26] menées dans le bassin versant du Gambie ont indiqué que les zones en aval du bassin (particulièrement sur la façade Nord) ont un potentiel en eaux souterraines plus élevé que les zones en amont. Dans ces zones en aval, les pentes sont faibles et très fracturées, ce qui favorise une forte infiltration de l'eau. [27] font remarquer que plus la pente est forte, plus l'eau de surface circule rapidement et moins la nappe se recharge. Ce facteur joue un rôle dans l'augmentation de la vitesse de l'écoulement de l'eau avec une réduction subséquente de la percolation verticale et ainsi dans l'affectation du processus de la recharge. Au niveau du nord de la zone d'étude, les zones de bonnes et excellente accessibilité coïncide avec les zones de bonnes et excellente exploitabilité. Ce secteur pourrait être de très bon réservoir d'eau souterraine, car dans ce cas, les débits d'exploitation sont forts, les niveaux statiques sont faibles et la profondeur pour obtenir des débits importants sont faibles. C'est des secteurs propices pour l'approvisionnement en eau potable pour des grandes agglomérations. [6] analyse de la carte d'accessibilité de la basse vallée de l'Ouémé au sud du Bénin et révèle que près de la moitié de ces ressources en eau souterraine disponibles (50,51 %) sont potentiellement accessibles et exploitable, alors que dans notre étude, l'accessibilité et l'exploitabilité sont très modestes, malgré que ces zones d'études sont des zones de socle.

5. Conclusion

Cette étude a pour objectif de cartographier l'accessibilité et l'exploitabilité en eau souterraine dans le département de Yamoussoukro par les Systèmes d'Information Géographique. La cartographie de ces indicateurs dans l'étude des eaux souterraines a pu être réalisée à partir de la profondeur totale des forages et l'indice de succès pour l'accessibilité, et du débit d'exploitation et le niveau statique pour l'exploitabilité dans un environnement SIG. Cette étude indique que la classe de bonne et excellente accessibilité en eau souterraine occupe une proportion de 29 %. On les rencontre à l'extrême Nord, à l'Est et au Nord-Ouest du département. Par ailleurs, la classe de bonne et excellente exploitabilité en eau souterraine occupent une proportion de 22,2 % et se répartie dans les localités du Nord, l'extrême Sud et à l'Est. Ces cartes thématiques interviennent également en amont de toutes les recherches d'eau souterraine et constitue un outil d'aide à la prospection hydrogéologique en milieu fissuré. Ces zones de bonnes et excellences exploitabilités en eau souterraine sont favorables à l'implantation de forage pour l'obtention de bon débit. Elles sont donc très productives en eau souterraine.

Références

- [1] - A. M. MALAM, B. B. SALEY, I. MAMADOU et B. L. ISSAKA, « Regards croisés sur l'évolution de la pénurie d'eau de la ville de Zinder (Niger) de 1900 à nos jours », in *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, Vol. 32, N°4 (2020) 395 - 406 p.
- [2] - D. ASSOUMA, « Étude par modèle mathématique de la structure et du fonctionnement d'un aquifère de socle exploité, en région tropicale (alimentation en eau potable de la ville de Dapaong-Togo) ». Thèse de Doctorat, 3e cycle, Université Orléans, France, (1988) 183 p.
- [3] - A. B. YAO, B. T. A. GOULA, A. KANE, O. M. J. MANGOUA et K. A. KOUASSI, « Cartographie du potentiel en eau souterraine du bassin versant de la Lobo (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère », in *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 61, N°5 (2016) 856 - 867 p.
- [4] - N. COURTOIS, P. LACHASSAGNE, R. WYNS, R. BLANCHIN, F. D. BOUGAIRE, S. SOME et A. TAPSOBA, « Large-scale mapping of hard rock aquifer properties applied to Burkina Faso. » *Groundwater*, 48 (2009) 269 - 283
- [5] - B. DEWANDEL B., P. LACHASSAGNE, B. LADOUCHE, J. L. PINAUT et A. AL-MAKL, « A conceptual model of the structure and functioning of the Oman ophiolite hardrock aquifer through a pluridisciplinary and multiscale approach. » *Hydrogeol. J.*, 13 (2005) 708 - 726
- [6] - J. P. FAILLAT, « Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). Thèse d'État, Univ. Languedoc (Montpellier), France, (1988) 534 p.
- [7] - J. BIEMI, « Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique par télédétection de bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest. Hydrostructurale hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillon et aire granitique de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire) », Thèse Doct.ès Sc. Nat. Université de Cocody, Abidjan, (1992) 479 p.
- [8] - A. E. ASSEMIAN, « Étude des potentialités en eau souterraine du département de Bongouanou (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) par télédétection et SIG », Thèse de Doctorat en Sciences de la Terre/ Hydrogéologie, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, (2014) 208 p.
- [9] - F. COCKER, J. B. VODOUNOU et J. YABI, « Cartographie du potentiel en eau souterraine de la basse vallée de l'Ouémé, sud-Bénin (Afrique de l'Ouest), in *La Houille Blanche*, N°2 (2020) 74 - 85 p.
- [10] - K. A. KOFFI, « Caractérisation hydrogéologique des aquifères de socle dans le département de Yamoussoukro (Centre-Sud de la Côte d'Ivoire) », Mémoire de Master en Géographie Physique/Hydrogéologie, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire, (2021) 140 p.

- [11] - B. A. HASSANE, « Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique, cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER). » Thèse de Doctorat, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, (2010) 198 p.
- [12] - M. RAZACK et T. LASM, « Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast) ». *J. Hydrol.*, 3 (25) (2006) 164 - 178
- [13] - P. LACHASSAGNE, R. WYNS et B. DEWANDEL, « The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova* », 30 (2011) 145 - 161
- [14] - N. SORO, « Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique ». Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, (2002) 272 p.
- [15] - K. ROTZOLL K. et A. I. EL-KADI, « Estimating hydraulic conductivity from specific capacity for Hawaii aquifers », USA. *Hydrogeol. J.*, 16, (2008) 969 - 979
- [16] - S. SRIVASTAV, K. M. WLUBCZYNSKI et K. BIYANIA, « Upscaling of transmissivity, derived from specific capacity : a hydrogeomorphological approach applied to the Doon Valley aquifer system in India. » *Hydrogeol. J.*, 15 (2007) 1251 - 1264
- [17] - T. M. YOUAN, « Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologiques du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou Nord-Est de la Côte d'Ivoire. » Thèse unique de doctorat, université de cocody, Abidjan, (2008) 236 p.
- [18] - F. KANOHIN, M. B. SALEY, G. E. AKÉ, I. SAVANÉ, « Apport de la télédétection et des SIG dans l'identification des ressources en eau souterraine dans la région de Daoukro (Centre-Est de la Côte D'Ivoire) », in *International Journal of Innovation and Applied Studies, ISSR Journals*, Vol. 1, N°1 (2012) 35 - 53 p.
- [19] - I. SAVANE et J. BIEMI, « Cartographie des aquifères de fissures en milieu cristallin du Nord Ouest de la Côte d'Ivoire par télédétection. » *La télédétection francophonie : analyse critique et perspectives*. Ed. AUF, (2000) 279 - 288 p.
- [20] - M. B. SALEY, Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo-image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de doctorat, université de Cocody, (2003) 211 p.
- [21] - T. M. YOUAN, T. LASM, J. P. JOURDA, K. F. KOUAMÉ, M. RAZACK, « Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire) », in *Teledetection, Editions des Archives Contemporaines / Editions scientifiques GB / Gordon and BreachScientific Publishers*, 8 (2) (2008) 119 - 135 p.
- [22] - J. P. JOURDA, M. B. SALEY, E. V. DJAGOUA, K. J. KOUAME, J. BIEMI et M. RAZACK, « Utilisation des images Landsat ETM+ pour l'évaluation des potentialités en eaux souterraines dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation », *Revue de télédétection*, 5 (4) (2006) 339 - 357 p.
- [23] - T. L. SAATY, "A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, N°15 (1977) 234 - 281
- [24] - F. JOERIN, « Méthode multicritère d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site. » *Revue internationale de géomatique*, 1 (5) (1995) 37 - 51 p.

- [25] - J. L. MARTIN, E. HENRY, C. BOULEMIA et F. X. MASSON, « Proposition d'outils de gestion et d'aide à la décision dans une moyenne collectivité locale : application à l'exploitation de la ressource en eau souterraine : Actes de la journée d'études « Les territoires de l'eau », Université d'Artois, Arras, (2004) 74 - 82 p.
- [26] - C. FAYE, D. D. BA et A. C. DIOUF, « Outils d'évaluation des niveaux d'eau souterraine dans un contexte de variabilité pluviométrique et de hausse des pompages : cas des Niayes (littoral nord sénégalais) », in *REVUE DE GEOGRAPHIE DU LARDYMES* (Laboratoire de Recherche sur la Dynamique des Milieux et des Sociétés), N°23 (2019) 43 - 55 p.
- [27] - N. NOUAYTI, D. KHATTACH et M. HILALI, « Cartographie des zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines dans le haut bassin du Ziz (Maroc) : Apport de la télédétection et du système d'information géographique », in *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, N° 39 (2017) 45 - 57 p.