

Rôle hydrogéologique des linéaments structuraux en milieu cristallin et cristallophyllien : cas du bassin versant du Sassandra, Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire

Koffi Théodore YAO^{1*}, Marie-Solange OGA¹, Konan Emmanuel KOUADIO¹, Olivier FOUCHÉ², Gérard FERRIERE³ et Christine PERNELLE⁴

¹ *Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, (UFR- STRM) Université Félix Houphouët-Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

² *LEESU, École des Ponts Paris Tech, Université Paris-Est, 6-8 avenue Blaise Pascal, Champs-sur-Marne, 77455, Marne-la-vallée cedex 2, France*

³ *Conservatoire national des arts et métiers (Le cnam), Laboratoire Matériaux Industriels, 2 rue Conté, 75003, Paris, France*

⁴ *Conservatoire national des Arts et Métiers de Paris, Département Analyse chimique et bioanalyse Physique, 2 rue Saint Martin, 75141 Paris cedex 03, France*

* Correspondance, courriel : koffiyao@ymail.com

Résumé

La zone d'étude est située en milieu tropical humide au sud-ouest de la Côte d'Ivoire dans les formations plutoniques et métamorphiques précambriennes. L'objectif est d'étudier l'effet des linéaments structuraux dans l'hydrodynamisme souterrain dans un tel environnement en se basant sur des données de télédétection, de forages, des teneurs SO_4^{2-} et Cl⁻ des eaux souterraines. Le traitement des images satellitaires a donné la carte des linéaments qui a servi au choix des sites d'échantillonnage d'eau souterraine et à l'individualisation des « blocs ». Les rapports de SO_4^{2-} et Cl⁻ a permis d'identifier les linéaments participant à la circulation de l'eau souterraine à l'échelle régionale. L'analyse des données géométriques des blocs et des débits des forages a permis de mettre en évidence le rôle hydrogéologique prépondérant des petits linéaments par rapport aux linéaments majeurs. Confirmant ainsi l'importance de l'horizon fissuré et la topographie dans l'écoulement souterrain en milieu de socle cristallin et cristallophyllien.

Mots-clés : *aquifères de socle, bloc, débit, horizon fissuré, hydrodynamisme.*

Abstract

Hydrogeological role of structural lineaments in plutonic and metamorphic environment: Case of Sassandra Watershed (South-Western Côte d'Ivoire)

The survey area is located south-west of Ivory Coast in Precambrian metamorphic and plutonic zone. The aim is to study the contribution of structural lineaments in the underground hydrodynamics in such environment. To highlight the network of kilometer-scale fractures in hard-rock, remote sensing techniques, drilling and concentrations SO_4^{2-} and Cl⁻ in groundwater were used.

The map of lineaments obtained after processing of satellite images has been discretized into blocks aquifers which are delimited by opened or clogged fractures that can have a conducting or watertight function. Analysis of the geometric block parameters and the drilling instantaneous discharge helped highlight the leading role hydrogeological small fractures (fissured layer) compared to major lineaments in groundwater flow of in hard-rock. Thus confirming the importance of fissured topography and groundwater flow in crystallophyllian crystalline basement.

Keywords : *hard-rock aquifer, block, hydrodynamism, fissured zone, and yield.*

1. Introduction

Les aquifères de socle qui sont particulièrement intéressants dans l'approvisionnement en eau se situent dans couches altérées et fissurées / fracturées de la roche cristalline [1]. Jusqu'à récemment, la conductivité hydraulique de ces aquifères était communément considérée comme dépendant, soit des "fractures tectoniques" (fracturation récente ou fracturation survenus avant le processus d'altération) ou de « décompression lithostatique » [2,3]. En Côte d'Ivoire, 97,5 % du territoire se trouve en milieu plutonique et métamorphique [4,5]. La part des ressources en eau souterraine issue du socle dans l'alimentation en eau potable des populations est de plus en plus croissante [6,7]. Cet engouement vers ces eaux souterraines s'explique d'une part du fait des premiers effets de la sécheresse des années 1970 en Afrique de l'Ouest, qui a entraîné le tarissement de bon nombre de puits villageois et de points d'eau de surface et d'autre part, de la mauvaise qualité microbiologique et chimique (utilisation croissante des intrants agricoles) des eaux de surface [8,9].

La plupart des forages réalisés au cours de nombreuses campagnes ont pour objectif le captage des fractures hydrauliquement actives. Cependant, malgré les moyens mis en œuvre, les travaux de forage connaissent un taux d'échec important (environ 19%) et bon nombre de ces ouvrages tarissent ou ne satisfont pas les besoins des populations dans certaines localités. Cet échec s'explique principalement par la non prise en compte de la complexité des aquifères discontinus (fissures et fractures inégalement réparties et aléatoires) avant l'implantation des ouvrages. Pour améliorer la compréhension du mode de gisement et de circulation des masses d'eau souterraine de nombreuses études ont été menées dans plusieurs endroits du pays. C'est le cas des travaux de [10-14] etc. Ces auteurs sont partis de la cartographie des linéaments pour caractériser les aquifères discontinus dans le socle ivoirien ou pour montrer la corrélation entre la distance à linéament et le débit dans les forages. [15] définissent le linéament comme une figure linéaire et continue qui est perçue dans une image d'un corps solide planétaire et ayant des limites latérales définissables. Il a également une longueur relativement élevée et un azimut discernable et est plus ou moins corrélé à une structure stratigraphique ou géologique.

Le linéament est une ligne significative du paysage, ayant un tracé rectiligne ou curviligne, causée par des joints ou des failles, et qui révèle l'architecture du substratum géologique. Raison pour laquelle, il exploité dans l'exploration pétrolière et minérale, le stockage des déchets radioactifs et dans les installations et nucléaires ainsi que dans les recherches en ressources en eau [16,17]. Depuis les travaux [14, 18-22] l'interprétation du linéament dans un but hydrogéologique est basée sur l'idée qu'une intensité de linéaments beaucoup plus élevée par rapport au substratum engendre probablement des zones faillees conductrices d'eau souterraine. Le linéament est ainsi considéré comme un objet nécessairement plus conducteur que le volume rocheux qui le contient. Cette vision du réseau percolant régional est-elle toujours vérifiée ? En effet, cette théorie est sujette à controverses car elle exclut la présence des formations superficielles et le rôle de l'horizon fissuré y est totalement négligé.

De récents travaux ont mis en évidence l'importance des processus d'altération (les profils d'altération correspondants) et sur les propriétés hydrodynamiques des aquifères de socle [23-25]. Selon [26,27], un profil typique de socle-altération est constitué de couches superposées. Chaque couches a ses propriétés hydrodynamiques spécifiques ce qui aboutit à un aquifère stratiforme composite. De haut en bas, nous rencontrons l'horizon altéré suivi de l'horizon fissurée et enfin le substratum sain sous-jacent qui ne présente des perméabilités significatives que très localement. Dans cet article, nous utilisons la notion de bloc telle que définie par [14] et les acquis des travaux de [28,29] qui ont montré que la connaissance de la composition chimique de l'eau souterraine peut fournir des informations sur les grands axes d'écoulement.

2. Cadre d'étude

2-1. Caractéristiques géographiques économiques et climatiques

Le département de Soubré est localisé au sud-ouest de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°19' et 6°34' N et les longitudes 6°12' et 7°08' W (*Figure 1*). Il fait partie d'une vaste péninsule légèrement ondulée, d'altitude moyenne égale à 200 m et inclinée vers la mer au sud avec une pente moyenne autour de 2 %. Le réseau hydrographique y est très dense avec comme principale artère le fleuve Sassandra (650 km) et un débit moyen annuel de 350 m³.s⁻¹ sur une période de trente ans [30]. Le climat est de type subéquatorial (chaud et humide). Les pluies y sont abondantes (entre 1600 mm et 1800 mm) et atteignent un maximum en juin et juillet. Les températures oscillent au cours de l'année entre 26°C et 32°C. L'alimentation en eau potable de la population est généralement assurée par des forages équipés de pompes à motricité humaine ou électrique, ayant des profondeurs très variables, entre 10 m et 120 m [30]. L'agriculture est l'activité principale, notamment la culture du cacao. Elle est faite de façon extensive, entraînant une réduction irréversible de la forêt et de la biodiversité.

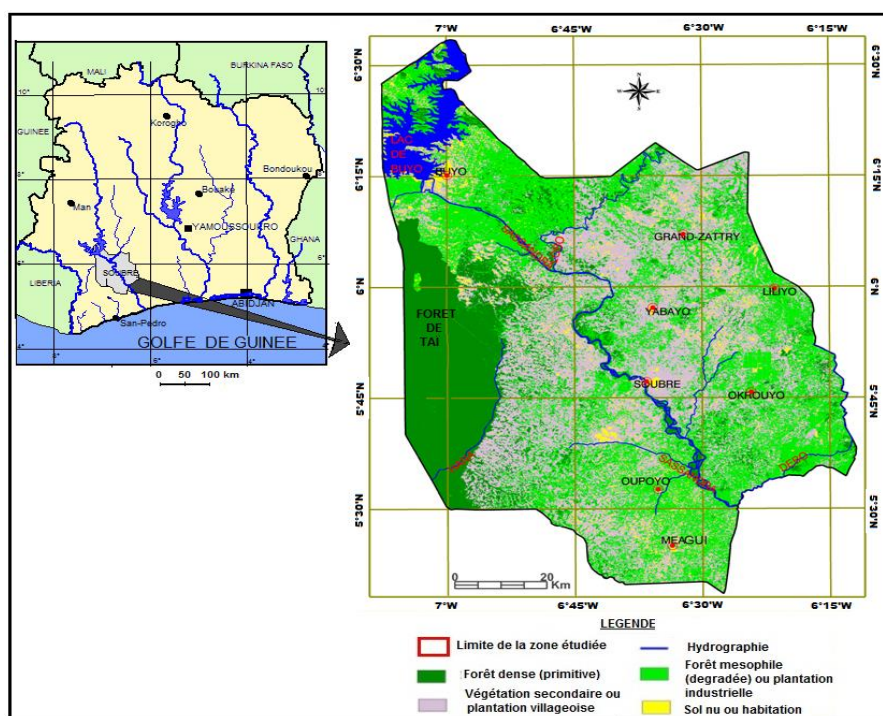


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

2-2. Contexte géologique

La zone d'étude appartient à la principale séquence supracrustale birimienne. Au sud de la faille Hana-Lobo, affleurent des roches qui associent divers granitoïdes intrusifs de l'orogénèse éburnéenne avec un composant Archéen métamorphisé (**Figure 2**). Un corps allongé avec des faciès granodioritique syntectonique orthogneiss (texture foliée) est associé au glissement de la faille crustale au début de l'époque éburnéen. Entre cette unité et la faille Hana-Lobo, un fossé tectonique rempli de grès alternés et de tufs volcaniques est bordé par une variété de schistes plus ou moins sableux [31]. Puis, le long de la limite sud de la région, les plutons de granite à deux micas sont disposés parallèlement à la faille Hana-Lobo. Entre ces deux groupes d'intrusions et soudés réside un corps concentriques de l'âge du Libérien constitué d'un noyau granodioritique entouré de migmatite enfermée dans un anneau de gneiss. Cet ensemble est parsemé d'amphibole-pyroxène, de dyke et la seule expression d'une phase de fin d'Éburnéen magmatique (syénite allongée) qui est intrusive dans l'unité de gneiss.

Les événements tectoniques du Précambrien et du Phanérozoïque anorogénique ont accentué les mouvements le long des réseaux de fractures dans l'ensemble du sud-ouest ivoirien [32]. Les déformations qui ont lieu sur cette longue période ont abouti à des zones de failles qui sont facilement visibles sur des images satellitaires permettant ainsi une cartographie des faiblesses dans le substratum ivoirien. Ainsi, dans le compartiment sud, quelques failles secondaires de longueur maximale 15 km et orientées NO-SE ou parfois N-S, marquées par des mylonites, sont dispersées dans les granodiorites et les migmatites. Les fractures s'orientent majoritairement selon trois directions principales : SSO-NNE, SO-NE et N-S. Les failles de direction SO-NE traversent la partie nord-ouest de ce compartiment sur une distance d'environ 65 km [31].

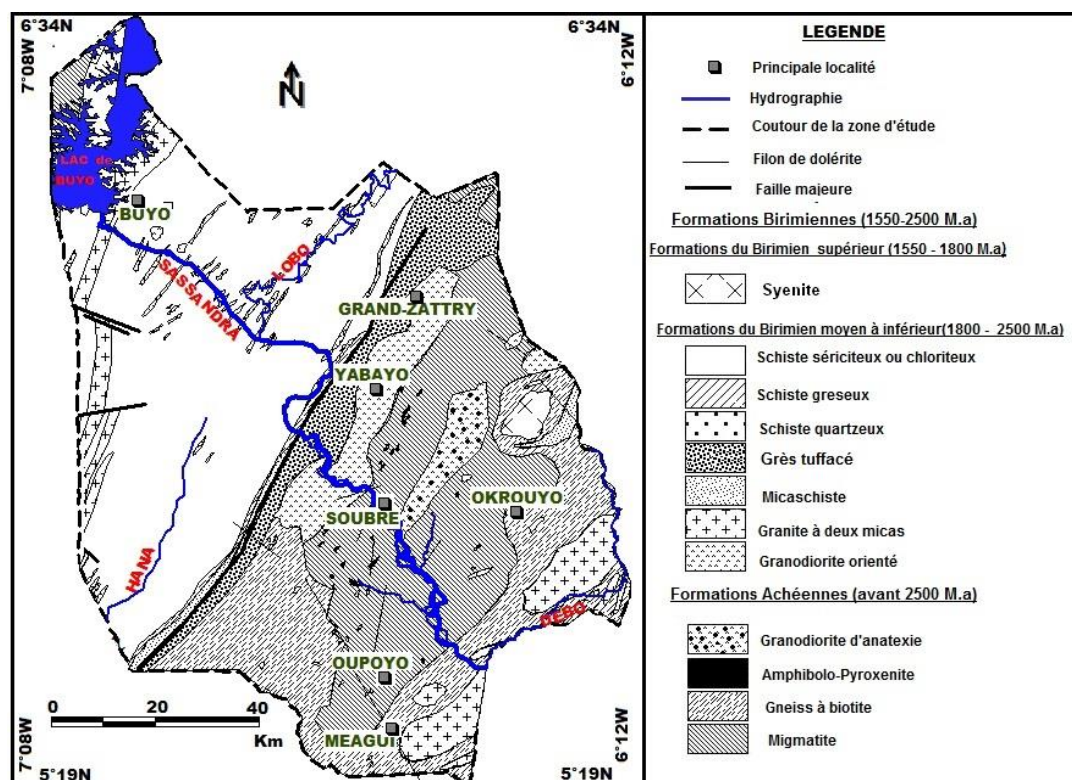


Figure 2 : Géologie simplifiée de la zone d'étude

3. Méthodologie

3-1. Cartographie des linéaments

Pour établir la carte linéaments, nous avons eu recours à des images satellitaires optiques et radar (ETM+ de Landsat-7 et Radarsat-1). L'ensemble des procédés de traitement, d'extraction et de validation des linéaments est tiré des travaux de [32,33] et [12, 14,22]. L'application de la méthodologie appropriée (ACP, réduction de chatoiement et filtrages spatiaux et directionnels...) a permis de ressortir les linéaments qui tronçonnent la zone d'étude.

3-2. Individualisation des blocs aquifères

La carte détaillée des linéaments obtenue a servi de base pour l'individualisation des blocs. L'échelle du département étant trop petite, une sous image d'une zone comprise dans le bassin versant de Sassandra. Elle est limitée au NO par la faille de Hana-Lobo et au SE par la rivière Débo dans les granitoïdes car ils sont plus hétérogènes que l'unité schisteuse de Hana-Lobo (zone au NO) et le taux d'échec des forages y est plus fort, de l'ordre de 50 %. Le champ linéamentaire de cette sous zone a été exploité pour la discrétisation ou la mise évidence des « blocs ». Cette opération a été faite à l'aide du logiciel VISILOG 4.0 qui est l'environnement de référence pour la réalisation d'applications en traitement d'images et à la réalisation d'interfaces de produits d'imagerie scientifique (<http://www.tnpc.fr/fr/visilog.html>). La méthodologie spécifique à notre image pour la discrétisation des blocs est présentée dans les travaux de [9,30].

3-3. Synthèse des données de forage, de la surface de bloc et la carte linéamentaire

Il s'agit de faire ressortir la relation entre le débit de soufflage de fin de foration avec la surface d'un bloc ou de déterminer la distance entre un forage et le linéament le plus proche. Pour ce faire, les coordonnées géographiques (X, Y) des forages, l'altitude du sol (cote par rapport au niveau de la mer) à la tête du forage (Zt), la profondeur totale (Pt), l'épaisseur de l'horizon d'altérites (Na), le niveau statique (Ns), le débit de soufflage et la carte linéamentaire ont été intégrés dans un SIG. Ces informations ainsi compilées constituent la base de données qui a servi à étudier la relation entre la proximité d'un linéament et les débits des forages. Pour la corrélation entre le flux (débit en fin de forage) et la surface des blocs, nous avons eu recours aux données de débits linéaires de 84 forages répartis dans la sous-zone d'étude (espace des blocs). Ce débit a été défini en fonction de la hauteur de forage en dessous de la base des altérites meubles plutôt que de la profondeur du forage ou de la longueur totale.

3-4. Échantillonnage et dosage des eaux

Sur la base de la carte de linéaments majeurs obtenue et des réalités du terrain (accessibilité et disponibilité du forage), 57 forages situés plus ou moins proches de ceux-ci ont été ciblés. Ces forages ont fait l'objet de mesure des paramètres physico-chimiques (température, conductivité électrique, pH, THT et TAC) et d'échantillonnage. Ces travaux se sont déroulés en suivant le protocole préconisé par [34,35]. Les eaux recueillies ont été analysées au laboratoire de la Chaire de Génie analytique du Conservatoire national des arts et métiers de Paris à l'aide de spectromètre d'absorption atomique (SAA) et d'émission à couplage inductif (ICP-OES) respectivement pour les éléments majeurs et les éléments en trace comme le fer, l'aluminium et le manganèse. Le contrôle de la validité des résultats des analyses a été fait par le calcul des balances ioniques.

3-5. Détermination des axes d'écoulement

L'utilisation des ions majeurs pour déterminer les chemins d'écoulement souterrain dans les aquifères fracturés a été faite avec succès par [29] dans un bassin versant de 50 km² au Sud-Est de l'Australie. Dans notre cas, pour distinguer les liens possibles entre les eaux proches des linéaments majeurs, nous avons vérifié la continuité entre les eaux des nappes le long d'un linéament majeur en se basant sur des critères chimiques issus des travaux de synthèse de [28]. Il en ressort que, dans les formations de socle des milieux tropicaux humides, le rapport Na/K est faible dans les milieux drainants. En outre, de l'amont vers l'aval, suivant la direction d'écoulement, la teneur en SO₄ diminue ; le rapport SO₄/Cl suit cette tendance alors que le rapport Mg/Ca croît.

4. Résultats

4-1. Champ des alignements morpho structuraux : linéaments

4-1-1. Linéaments majeurs pour l'échantillonnage des eaux

Le champ de linéaments obtenu après validation à l'aide de travaux antérieurs et de terrain est considéré comme représentatif du bâti structural du département de Soubé [14]. De ce réseau linéamentaire il a été extrait la carte des linéaments majeurs (pour l'échantillonnage des eaux, **Figure 3**) et celle ayant servi à l'individualisation des blocs. Les linéaments présentant une longueur supérieure ou égale à 9 km (300 pixels) ont été considérés comme majeurs. Ainsi, 168 linéaments ont été relevés et sont illustrés à la **Figure 4**. Dans l'ensemble, les longueurs vont de 9 à 56 km. Les fractures de longueur comprise entre 15 et 29 km représentent 55 % de l'effectif total. Les fractures d'extension comprise entre 30 et 56 km sont moins fréquentes (moins de 15 % du total), ainsi que celles inférieures à 15 km (moins de 15 %).

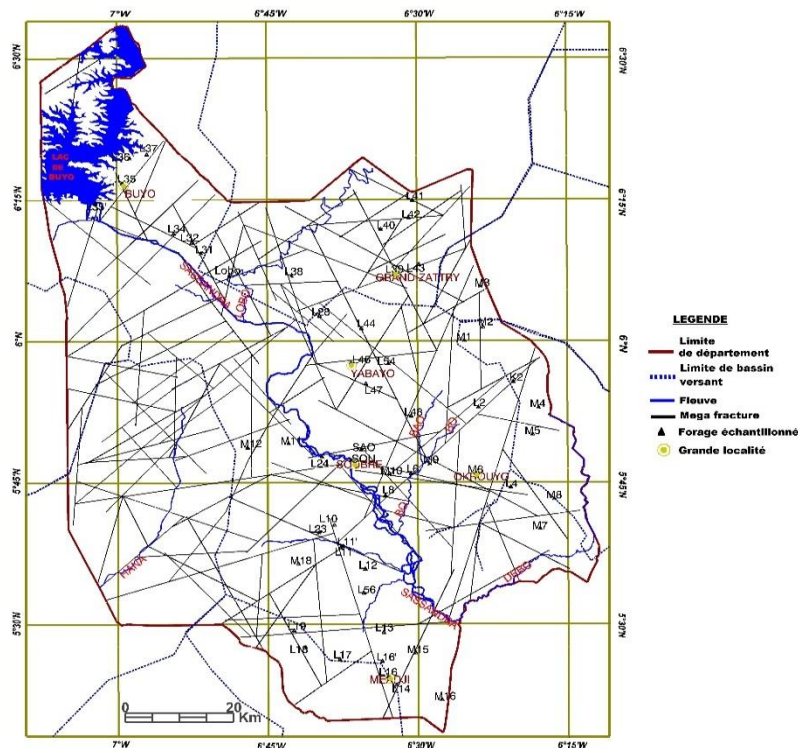


Figure 3 : Linéaments majeurs et répartition spatiale des forages échantillonnés

4-1-2. Linéaments de base pour l'individualisation des blocs

La **Figure 4** présente la carte linéamentaire de base ayant servie à l'établissement des blocs. Elle compte 983 linéaments dont les longueurs sont comprises entre 320 m et 48 km avec une moyenne de 5,6 km. Cependant, la quasi-totalité (96%) à une longueur inférieure à 15 km et 58% des linéaments sont inférieurs à 5 km. Trois principales familles se dégagent : N60 à N100 (majoritaire), N100 à N140 et des fractures verticales ou subverticales (N0 à N20 et N170 à N180) qui sont significatives. Les directions N20 à N60 et N140 à N170 sont ultra minoritaires (fréquence inférieures à 5 %). Elles traduisent un bruit de fond qui résulte de la variabilité de chaque famille mais aussi des contacts géologiques qui ont pu être confondus à des fractures ou au réseau hydrographique.

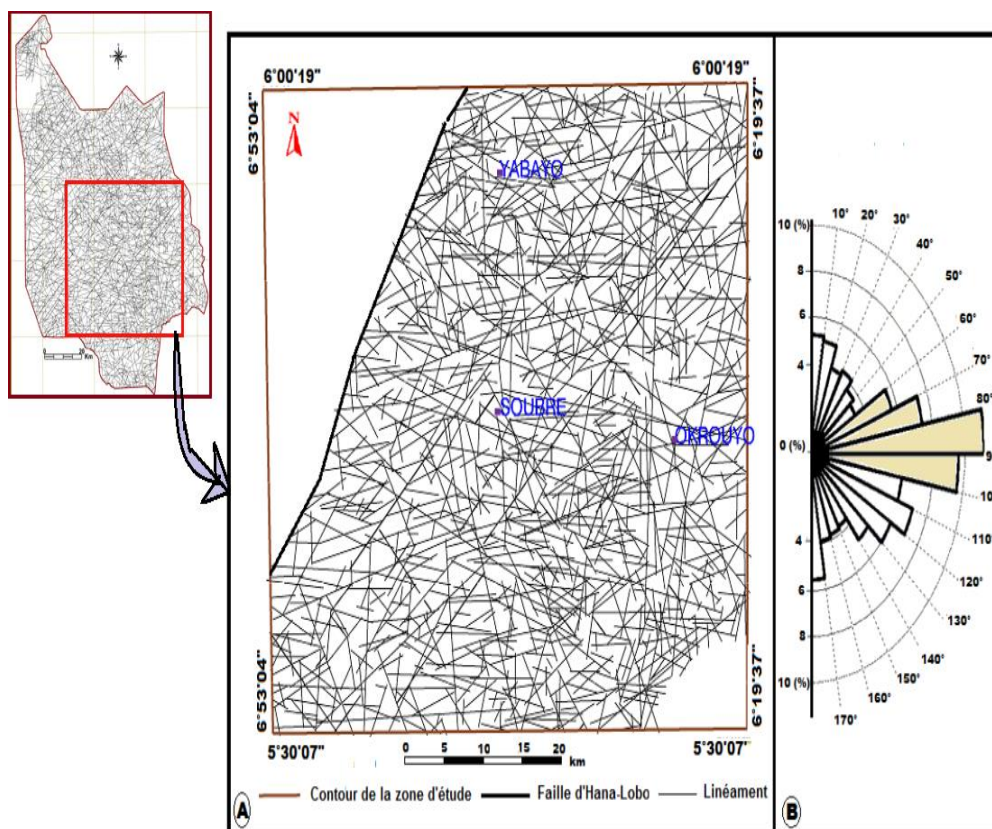


Figure 4 : Carte de linéament de la sous zone d'étude et rosace directionnelle

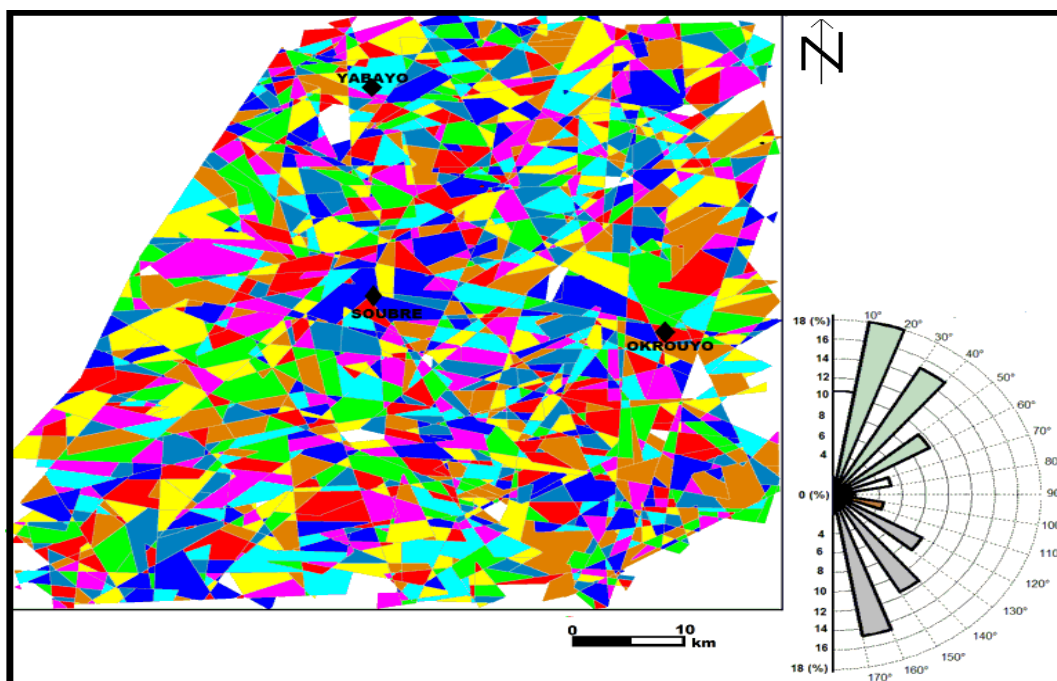
4-2. Des linéaments aux blocs individualisés

La **Figure 5** présente le résultat du processus d'analyse de la carte de fracturation suivie de sa « labellisation ». Elle met en évidence 1869 blocs individualisés. Ces blocs pourraient représenter des aquifères discontinus, qui sont délimités par les linéaments majeurs. Les statistiques des paramètres géométriques de ces blocs que sont le diamètre équivalent (D_e), le périmètre de bloc (P_b), la surface de Bloc (S_b) et l'orientation du grand axe de bloc (Θ) sont donnés dans le tableau I. La surface de bloc est comprise entre $[0,011 \text{ km}^2; 22,400 \text{ km}^2]$. Le diamètre équivalent de ces figures géométriques varie entre 0,121 km et 5,341 km avec une moyenne de 1,050 km.

Tableau 1 : Résultats des paramètres géométriques des blocs

	D_e (km)	Θ ($^\circ$)	P_b (km)	S_b (km ²)
τ	0,12	0,00	0,36	0,01
T	5,34	162,00	38,57	22,41
μ	1,05	75,84	5,15	1,29
σ	0,74	58,38	3,99	1,93
η	0,19	18,00	2,99	0,03

NB : (D_e) Diamètre équivalent du bloc aquifère (diamètre d'un cercle virtuel ayant la même superficie que le bloc considéré); (Θ) Orientation du grand axe de bloc ; (P_b) Périmètre de bloc ; (S_b) Surface de Bloc (τ) Minimum ; (T) Maximum ; (μ) Moyenne ; (σ) Ecart type) ; (η) Mode (valeur la plus représentée).

**Figure 5 : Image labélisée des blocs aquifères et rosace directionnelle des grands axes**

La distribution directionnelle des diamètres équivalents s'organise autour d'un pic vers N20 et d'un minimum à N100. Cependant, les blocs d'orientation N20 à N50 sont les plus fréquents (cumulant 33 %). Un second pic est notable entre N160 et N170. Les blocs de direction E-O sont rares et la direction N40° qui est la direction des formations birimiennes ressort dans l'orientation des grands axes des blocs.

4-3. Débit, surface de bloc et distance à un linéament

La **Figure 6** illustre la corrélation entre débit en fin de forage) et la surface du bloc. Selon la position des points dans le graphique, une relation d'affinité entre la surface du bloc et le débit du forage a été recherchée. Globalement, il existe une relation inverse entre le débit et la surface du bloc. On constate que la disposition des points dans le graphe ne pourra pas donner pas une courbe de tendance unique. Alors, nous les avons subdivisé les points en quatre groupes qui présentent dont trois présentent un coefficient de détermination supérieur à 0,9 et donc pouvant se structurer suivant des équations avec des caractéristiques mathématiques simples. Le groupe 1 concerne tous les points qui s'entassent dans le bas du graphique.

Ce sont des forages qui ne présentent pas de corrélation notable entre le débit et la surface des blocs. En fait, ce sont tous les forages de petits débits (inférieurs à 5 m³. h⁻¹), qui pour la plupart ont des grandes profondeurs. Les groupes 3 et 2 suivent chacun une tendance linéaire décroissante qui met en évidence une relation inverse entre le débit et la surface des blocs. Dans l'ensemble, on pourrait supposer que le débit croît quand la surface de bloc diminue.

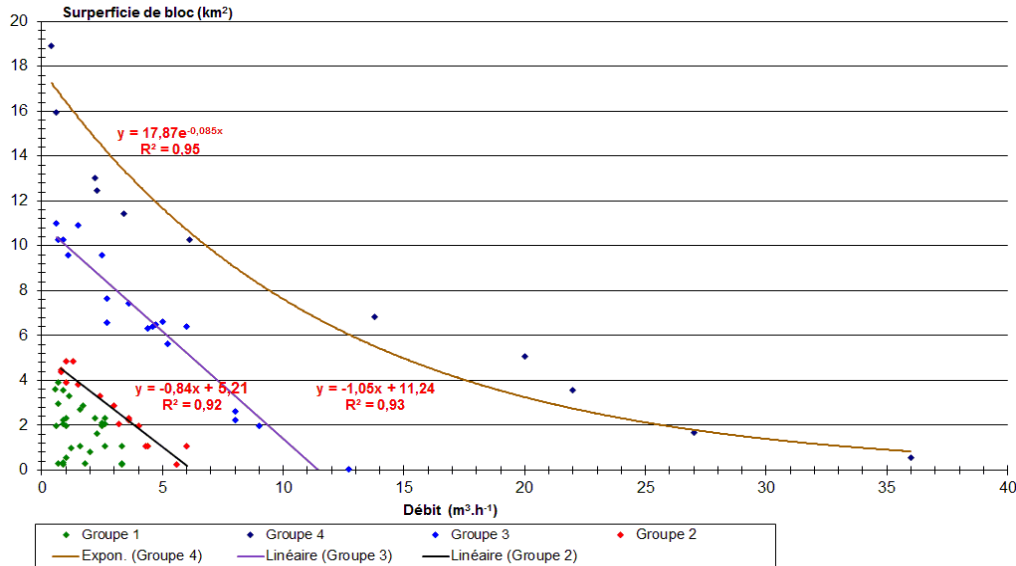


Figure 6 : Relation entre débit de forage et surface de bloc

Cette observation est confirmée davantage dans le groupe 4 où les points s'alignent sous la forme d'une courbe enveloppe exponentielle décroissante. Plus la surface est grande, moins le débit observé est important. Pour ces localités, les distances entre le forage et le linéament le plus proche n'excèdent pas 2,5 km (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Débit, surface de bloc et distance par rapport au linéament le plus proche

Localité	Débit (m ³ .h ⁻¹)	S (km ²)	D (km)
SIPEF-CI	0,40	18,93	2,493
TAYO	0,6	15,93	0,5
KPADA	2,2	13,01	0,982
KOZIAYO	2,3	12,46	1,549
BABAYEROUA	3,4	11,45	1,354
GALEA	6,1	10,29	1,734
BAKAYO	13,8	7,855	2,3
KOPERAGUI	20	5,56	0,326
KOFFIKRO	27	1,688	0,26
OKROUYO	22	3,54	2,76
KOFFIKRO	27	1,688	0,26
KOUAMEKRO	36	0,556	1,081

*Débit = débit à la fin de foration ; S = surface du bloc aquifère contenant le forage ;
D = la plus petite distance entre le forage et le linéament majeur le plus proche*

L'on note à l'analyse du tableau que le forage ayant un débit faible est loin d'un linéament majeur. Dans, l'ensemble les forages de débit important sont relativement loin d'un linéament majeur (distance supérieure à 1 km). En somme, on notera que la probabilité d'obtenir un débit plus grand croît avec la proximité à un linéament dans certaines conditions (*Figure 7*). En effet, cela parait vrai dans la gamme des distances variant entre 500 m et 3000 m (± 250 m) et avec de forts débits (entre 15 et 50 $m^3.h^{-1}$).

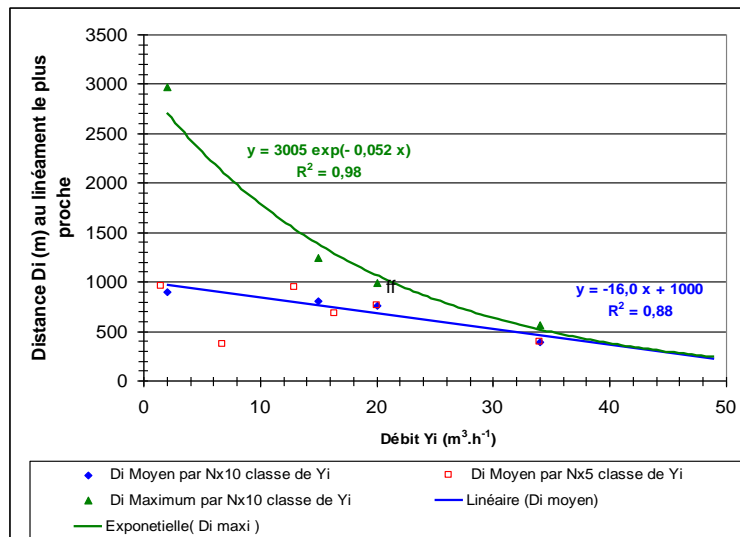


Figure 7 : Relation entre distance au plus proche linéament majeur et débit (48 forages)

4-4. Rapport SO_4/Cl et sens d'écoulement d'eau souterraine

La *Figure 8* montre les variations des classes du rapport chimique SO_4/Cl dans les différents forages. Pour éviter de surcharger la figure avec des valeurs, nous avons pris en compte que la moyenne et la valeur du rapport. On y a fait ressortir les directions dans lesquelles décroissent ces rapports et par conséquent les sens supposés d'écoulement de l'eau souterraine dans la région.

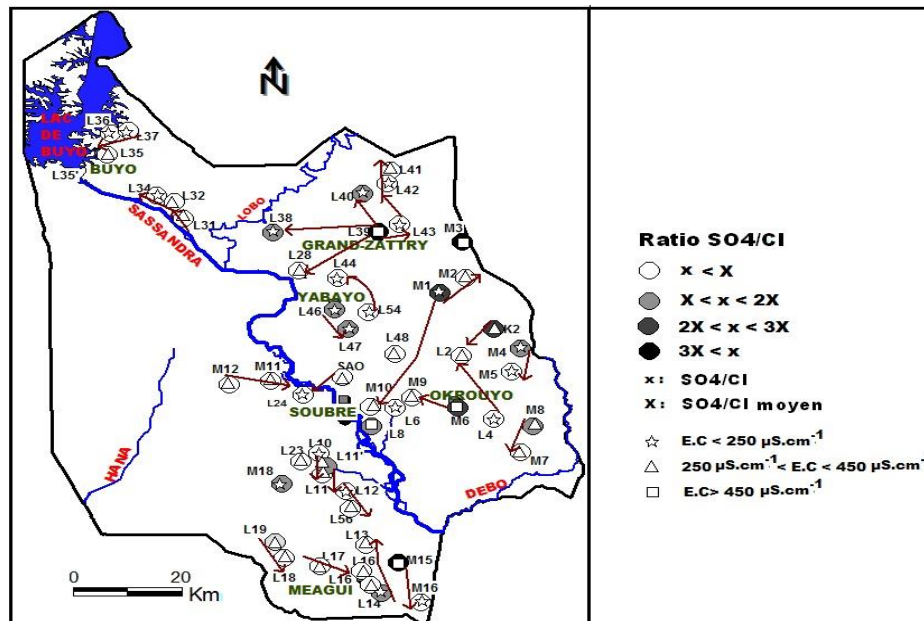


Figure 8 : Distribution spatiale de du rapport SO_4/Cl et sens d'écoulement souterrain

En tenant compte des variations du ratio SO_4/Cl et la similitude entre les teneurs en ions majeurs des axes ont pu être identifiés (Figure 9). Ce sont les axes : L18-L19, L2-M9, L48-M10, L37-L35 et L34-L31. Ces axes d'écoulement suivent en majorité les sens de drainage des eaux de surface. En étendant cette théorie aux eaux voisines sur la carte, nous dégagons d'autres possibilités de continuité hydraulique entre d'autres nappes. Ainsi, il pourrait avoir une connectivité entre les nappes des localités : M4 et M5, L39 et L38, M11 et M12, L42 et L41, M1 et M2, M15 et M16, etc. Par contre, nous constatons que les fractures près desquelles sont situées les localités L23 et L12, L54 et L44, K2 et L2, M6 et M9, L24 et SAO ne semblent pas être des axes de circulation des eaux souterraines. L'écoulement souterrain suit le plus souvent la pente topographique et ne coïncide pas nécessairement avec un linéament majeur. C'est le cas des forages M4, M5 et M8, M7 (Sud-Est) de la zone d'étude. Dans certains cas, le flux suit un linéament, mais pas la pente régionale de la rivière Sassandra (c'est le cas L31, L32, L34 au nord de la rivière Lobo). Certains linéaments majeurs non soulignés par le flux sont peu susceptibles d'être des zones de fracture ouverte à l'écoulement (voir le linéament NNE-SSW marquée par puits L2-L6-L8 le long du fleuve Bo).

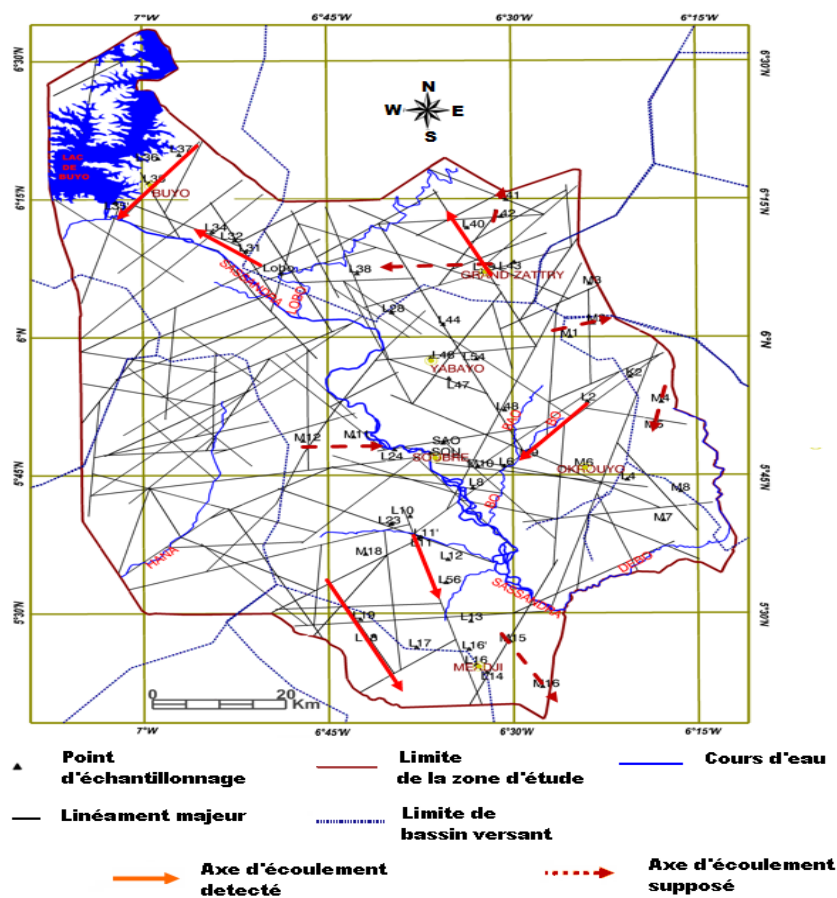


Figure 9 : Principaux axes d'écoulement dans le département de Soudra

5. Discussion

L'ensemble des techniques de cartographie linéamentaire a permis de mettre en évidence une bonne proportion des linéaments présents dans le bassin versant du Sassandra. Bien que nous ne négligions pas les biais d'échantillonnage inhérents à l'utilisation de l'imagerie satellitaire en hydrogéologie [36, 14], nous estimons que la carte de linéaments validée, reflète l'ensemble des fractures de la région.

En effet, la comparaison avec des cartes géologiques publiées du sud-ouest ivoirien [31, 37] montre que la plupart des linéaments extraits à partir des données de télédétection sont représentatifs du bâti structural de la zone d'étude. Ce fond structural a servi à la discrétisation des blocs qui sont des volumes rocheux délimités par les linéaments. Ceux-ci pourraient constituer des aquifères en fonction du caractère perméable, ou non, des linéaments qui découpent le bloc en question. Quand ce sont des aquifères, ils peuvent être plus ou moins isolés et peuvent contenir plusieurs petits linéaments notamment ceux non cartographiés du fait de la résolution des images satellitaires utilisées comme l'a montré les travaux de [14]. En effet, selon ses travaux, le biais de petite fracturation est estimé dans le département de Soubré à 17 %. L'influence du linéament sur la productivité d'un forage demeure une controverse. Pour [38], les linéaments ne sont pas systématiquement associés aux apports appréciables d'eau le long d'un tunnel pas même pour 50% d'entre eux et certaines zones détectées d'entrée d'eau n'ont pas été prévues par la carte de linéament. [39] qui a travaillé sur un échantillon de 300 de forages (productifs ou non) de 11 zones couvrant une gamme variée de formations géologiques et 90 % étaient situés à moins de 150 m d'un photo-linéament. Il n'a trouvé aucune corrélation du débit avec la distance au linéament, ni avec son azimut ou sa longueur.

Nous avons observé une corrélation entre le débit d'un forage et la distance au linéament le plus proche en excluant plusieurs forages dont les débits sont faibles. Comme nous, [40, 20, 41, 12 et 22] ont montré qu'il existe une influence significative de la distance par rapport à un méga linéament ou au nœud de linéaments (intersection de deux ou plusieurs linéaments) sur les débits des forages. Le rôle joué par les linéaments dans la circulation des eaux souterraines devient difficile à trancher quand on considère seulement le débit de forage ou qu'on regarde à une échelle régionale. C'est pour cela, nous avons utilisé la chimie pour comprendre l'apport du linéament dans la circulation des eaux souterraines. Le ratio SO_4/Cl a permis de soupçonner (dans une moindre mesure) un contrôle structural à l'échelle régionale (de quelques km à une centaine de km), via une relation entre le linéament et le débit maximum attendu des forages. Sur la base des connaissances tirées [42] relatives à la relation longueur/largeur des fractures à différentes échelles dans les granitoïdes, les forages échantillonnés sont assez proches des linéaments (distance allant de 100 m à 2,5 km). Par conséquent, leur influence sur l'importance du débit des forages pourrait être significative.

Selon la carte mondiale du régime de contraintes établie par [43], le système de contrainte appliqué à la compression est O-E en Afrique de l'Ouest. Les études réalisées par [44] en France, [45] au Ghana (à quelques centaines de km à l'est de notre zone d'étude), suggèrent qu'une direction de compression N105 optimisée permettrait de mieux expliquer l'ensemble de fractures les plus productives. Sur la carte des linéaments majeurs incluant les bassins versants de la zone d'étude, cinq des sept axes d'écoulement principaux mis en évidence sont compatibles avec la direction de compression moyenne N105. En plus, les différentes directions d'écoulement déduites par la chimie ont été aussi observées dans d'autres zones de socle en Côte d'Ivoire [46]. Cela laisse penser qu'il existe réellement à une échelle régionale une ou deux familles de linéaments préférentielles qui sont sous le contrôle du régime de contrainte actuelle signalé par [43] et qui permettent une circulation des eaux dans le bassin versant du Sassandra. Si cela peut être vrai à l'échelle régionale, il paraît difficile à vérifier à une échelle plus grande (petite surface ou un point). Les débits importants observés dans les petits blocs (*cf. Figure 6*) prouvent que le débit de forage est conditionné par la densité des petits linéaments. Ce qui est réaliste car [3, 1] soutiennent que les propriétés hydrodynamiques d'un aquifère de socle sont héritées de l'altération in situ des roches. Cette observation montre que ce ne sont pas toujours les linéaments majeurs qui sont responsables de l'écoulement de l'eau souterraine. Ils individualisent des aquifères discontinus où la densité de fracturation dans l'horizon fissuré et la géomorphologie jouent un rôle prépondérant dans la circulation des eaux souterraines [23, 25].

Ainsi, les linéaments cartographiés à petite échelle (échelle régionale) ne peuvent pas être judicieux pour étudier l'écoulement souterrain en milieu de socle. La « petite » fracturation (hectométrique à kilométrique) qui existe à l'intérieur de chaque bloc contribue à la circulation interne. Un facteur supplémentaire qui n'a pas été pris en compte à cause des limites inhérentes aux données des dossiers de forages est le pendage des fractures qui se cachent sous les linéaments considérés. La large gamme d'azimuts associée aux forages positifs suggère une influence pénétrative en volume telle que le déchargement mécanique dû à l'érosion qui agit sur tous les systèmes de fracture existants.

6. Conclusion

Les linéaments d'une partie du bassin versant du Sassandra ont été cartographiés puis validés pour être assimilés à des fractures parcourant la zone d'étude. Le réseau de fracture a servi de base pour discrétiser le domaine sous forme de blocs qui constituent les aquifères discontinus qu'on pourrait dénombrer dans l'espace d'étude et leur degré d'exploitabilité est meilleur par rapport aux linéaments. Ils deviennent alors les meilleurs éléments pour l'étude de l'hydrodynamisme en région de socle. Ils permettent d'étudier l'hydrodynamisme souterrain dans un espace restreint (à une échelle locale). Dans l'ensemble, le débit maximum que l'on peut espérer en forage est important dans les petits blocs, justifiant ainsi le rôle prépondérant que joue la densité de fracturation dans l'écoulement souterrain en zone de socle. En effet, la connectivité du réseau de fracture, et par conséquent de la circulation de l'eau souterraine, est assurée par des fractures d'ordre métrique qui sont causées par les décompression des masses roches ou de l'altération de certains minéraux des roches encaissantes.

Références

- [1] - B. DEWANDEL, P. LACHASSAGNE, R. WYNS, J.C. MARECHAL, and N.S. KRISHNAMURTHY, *Journal of Hydrology*, 330 (2006) 260-284.
- [2] - E.P. WRIGHT, in "*Hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa*" ed. E.P. Wright and W.G. Burgess, London Geological Society, Special Publication n° 66 (1992) 1-27.
- [3] - R. TAYLOR and K. HOWARD, *Hydrogeology Journal*, 3(8) (2000) 279-294.
- [4] - B. TAGINI, Thèse d'État, Université de Lausanne Suisse (1971).
- [5] - I. YACE, Initiation à la géologie. L'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest. Éditions CEDA (Abidjan), Côte d'Ivoire, (2002).
- [6] - M. ENGALENC, in "Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest". *Géohydraulique CIEH*, vol. II (1979).
- [7] - J-P. JOURDA, *Rapport du projet Unicef-Abidjan* (2009).
- [8] - J-P. JOURDA, B.M. SALEY, K.KOUAMÉ, B.H. KOUADIO, J. BIEMI et M. RAZACK, Conférence Francophone ERSI 5 et 6 octobre 2005, Issy-les-moulineaux, France (2005)
<http://www.esrifrance.fr/sig2005/communications2005/jourda/jourda.htm>
- [9] - K.T. YAO, O. FOUCHÉ, M-S. OGA, G. FERRIERE AND D. BAKA, *Am. J. Sci. Ind. Res.*, 3(4) 2012b) 208-220.
- [10] - I. SAVANE, K. AFFIAN, B.Z. KOLI et G. COUGNY, *Bull. de l'Association Internationale de Géologie de l'ingénieur*, 44 (1997) 79-88.
- [11] - J. BIEMI, J-P. JOURDA, S. DESLANDS et H. GWYN, Positionnement, productivité et gestion des forages en milieu fissuré de Côte d'Ivoire par télédétection et système d'information géographique. *Actes de l'Atelier international sur la télédétection et gestion des ressources en eau*. Ed. FAO, Rome (1997) 245-268

- [12] - J.P. JOURDA, E.V DJAGOUA, K. KOUAMÉ, B.M. SALEY, C. GRONAYES, J-J. ACHY et M. RAZACK, *Revue Télédétection*, 6(2) (2006) 123-142.
- [13] - K. KOUAMÉ, T. LASM, J.R. DE DREUZY, A. AKAFFOU, P. DAVY et O. BOUR, *Revue des sciences de l'eau*, 23(1) (2010) 41-56.
- [14] - K.T. YAO, O. FOUCHÉ, M-S. OGA, et T.V. ASSOMA, *Revue Télédétection*, 10(4) (2012a) 161-178.
- [15] - C.M. WOODRUFF, J-C. CEPEDA, C. GEVER, C.D HENRY, G.L. MACPERSON and M.W. MCBRIDE, *Geothermal Resource Assessment for the State of Texas*. Bureau of Economic Geology, University of Texas, Austin, USA (1982).
- [16] - DOUGLAS, M. Mixing and temporal variations of groundwater inflow at the Con Mine, Yellowknife, Canada; an analogue for a radioactive waste repository. M.Sc. thesis, Dept. of Geology, University of Ottawa, Canada (1997).
- [17] - A. POUYA and O. FOUCHÉ *Advances in Water Resources*, 32 (2009) 303-314.
- [18] - P. WATERS, D. GREENBAUM, P.L. SMART and H. OSMASTON, *Remote Sensing Rev.*, 4(2) (1990) 223-264
- [19] - S.B. MABEE, K.C. HARDCASTLE and D.U. WISE, *Ground Water*, 32(6) (1994) 884-894.
- [20] - M. MAGOWE, and J.R. CARR, *Ground Water*, 37(2) (1999) 282-286.
- [21] - S. CHANDRA, V.A. RAO, N.S KRISHNAMURTHY, S. DUTTA and S. AHMED, *Hydrogeol. J.*, 14(6) (2006) 1042-1051.
- [22] - KOITA, M., JOURDE, H., RUELLAND, D., KOFFI K., PISTRE, D. & SAVANE, I. *Hydrological Sciences Journal*, 55(5), (2010) 805-820.
- [23] - P. LACHASSAGNE, R. WYNS, P. BÉRARD, TH. BRUEL, L. CHÉRY, TH. COUTAND, J-F. DESPRATS, P. LE STRAT, *Ground Water*, 39(4) (2001) 568-581.
- [24] - P. LACHASSAGNE, R. WYNS and B. DEWANDEL, *Terra Nova* 23, (2011) 145-161.
- [25] - J-C. MARECHAL, B. DEWANDEL and K SUBRAHMANYAM, *Water Resources Research*, 40 (2004) 11-17.
- [26] - P.J. CHILTON and S.S.D. FOSTER, *Hydrogeology Journal*, 3(1) (1984) 36-49.
- [27] - R. WYNS, J-M. BALTASSAT, P. LACHASSAGNE, A. LEGCHENKO, J. VAIRON and F. MATHIEU, *Bull. Soc.géol. fr.*, 1 (2004) 21-34.
- [28] - D. DARMENDRAIL, Types hydrochimiques d'eaux souterraines en milieu fissuré de socle. Rapport de. Bureau de recherches géologiques et minières. Service géologique national, (1984).
- [29] - S. TWEED, T. WEAVER and I. CARTWRIGHT, *Hydrogeology journal*, 13 (2005) 771-776.
- [30] - K.T. YAO, Hydrodynamisme de l'eau souterraine dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubré. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie. Thèse de doct. Conservatoire national des Arts et Métiers, Paris, France (2009).
- [31] - A. PAPON et R. LEMARCHAND, Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Synthèse des travaux de l'opération SASCA (1962-1968). SODEMI, Abidjan (1973).
- [32] - J. BIEMI, Q.H.J. GWYN, S. DESLANDES, et J-P. JOURDA, In "Télédétection et gestion des ressources". Gagnon, P. (Ed.), Association québécoise de télédétection, vol. 692 VII (1991) 135-145.
- [33] - K.F KOUAMÉ, P. GIOAN, J. BIEMI et K. AFFIAN, *Revue Télédétection*, vol. 2 (1999) 139-156.
- [34] - AFNOR (1997) Association française de normalisation qualité de l'eau : terminologie, échantillonnage et évaluation des méthodes. Tome 1, 2^e éd. (1999) 376 p.
- [35] - J. THIERRIN, P. STEFFEN, S. CORNAZ, F. VUATAZ et LOASER, Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines. Édité par l'Office de l'environnement, des forêts et du Paysage et la Société Hydrogéologique de Suisse (2001).
- [36] - P. SANDER, *Hydrogeol. J.*, 15 (2007) 71-74.

- [37] - A.N. KOUAMELAN, 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, France (1996).
- [38] - S.B. MABEE, P.J. CURRY et K.C. HARDCASTLE, *Ground Water* 40(1), (2002) 37-43.
- [39] - D. GREENBAUM, In *Hydrogeology of Crystalline Basement Aquifers in Africa*. Geological Society Special Publication 66 (1992) 77-85.
- [40] - J-P. FAILLAT, Aquifères fissurés en zone tropicale humide: structure hydrodynamique et hydrochimie. Thèse d'état, Université de Montpellier, France (1986).
- [41] - N. COURTOIS, P. LACHASSAGNE, R. WYNS, R. BLANCHIN, D.F BOUGAÏRE, S. SOME, and A. TAPSOBA, *Ground Water*, 48 (2) (2010) 269-283.
- [42] - O. FOUCHÉ, R. COJEAN et M. ARNOULD, *Bull. Eng. Env.* 60(3), (2001) 231-240.
- [43] - ZOBACK, M.L. *J. Geophys. Res.* B8. 11 (1992) 703-728.
- [44] - V. DURAND, B. DEFFONTAINES, V. LEONARDI, R. GUERIN, R. WYNS, G. DE MARSILY, J.L. BONJOUR, *Bull. Soc. Geol. Fr.* 177 (2006) 227-236
- [45] - F. BERTONE, et C. LE GUELLEC, *Le géologue*, 159 (2008) 39-47.
- [46] - J. SARROT REYNAULD, J. BIEMI, J-P. JOURDA et N. SORO, *Journal of African Earth Sciences* 5(3-4) (1992) 303-309