

Simulation des Écoulements dans les Réservoirs Fracturés : Application au Socle Archéen de Touba (Nord Ouest de la Côte d'Ivoire)

Koffi Fernand Kouamé,
Armel Ghislain Akaffou,
Théophile Lasm

Université de Cocody,
22 BP 801 Abidjan 22
kouamef@yahoo.fr ;
akaffou77@caramail.com ;
theophile_lasm@yahoo.fr

Jean Raynald De Dreuzy,
Philippe Davy,
Olivier Bour

Université de Rennes 1,
35042, Rennes Cedex
jean-raynald.de-dreuzy@univ-rennes1.fr ;
philippe.davy@univ-rennes1.fr ;
olivier.bour@univ-rennes1.fr

Résumé

Ce travail vise à simuler les écoulements dans les réservoirs fracturés du socle Archéen de Touba (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). L'interprétation d'images satellitaires Landsat-TM est couplée aux investigations géologiques pour établir la carte de fracturation. Les caractéristiques géométriques du réseau de fractures, ainsi que l'analyse des lois d'échelles ont permis de construire le modèle de réseaux pertinents. La distribution en loi puissance des longueurs de fractures (distribution des ouvertures étant considérée uniforme) induit des écoulements fortement chenalisés suivant les axes de fracturation majeure. La perméabilité équivalente du réseau est comparée aux données hydrodynamiques existantes pour une validation du modèle géométrique ainsi que des paramètres hydrauliques. La concordance partielle entre les cheminements de l'eau et les forages à débits moyens et forts est un résultat prometteur dans la prospection des ressources en eau souterraine.

1. Introduction

L'hydrogéologie des régions de socle fracturé est très complexe. La connaissance des systèmes géologiques et la caractérisation des conditions de circulation des eaux dans les réseaux de fractures sont des problèmes auxquels tentent de répondre de nombreux chercheurs dont [1],[2],[3],[4],[5],[6],[7] à partir d'approches théoriques, numériques ou même expérimentales.

En Afrique de l'Ouest, l'étude des systèmes aquifères en milieu de socle cristallin et cristallophyllien ([8],[9],[10],[11],[12],[13]) est fondamentale et indispensable

pour la détermination des aires de captage des eaux souterraines, leur gestion ainsi que leur protection.

En Europe et en Amérique, l'étude de la fracturation constitue également une grande préoccupation de la communauté scientifique et des décideurs, surtout en ce qui concerne la recherche des sources d'énergie et des sites d'enfouissement de déchets nucléaires ([3],[4],[14]).

C'est l'organisation géométrique du réseau de fractures qui conditionne, les transferts de soluté en milieu de socle fracturé. De ce fait; la caractérisation structurale des systèmes géologiques est incontournable dans toute démarche de modélisation hydrogéologique. Pour la cartographie de la fracturation, des méthodes très variées, simples ou complexes sont utilisées. De façon générale, plusieurs disciplines (géomorphologie, géologie structurale, hydrogéologie, géophysique, photographie aérienne, télédétection, modélisation, Système d'Informations Géographiques, etc...) sont couplées pour une caractérisation directe ou indirecte des aquifères discontinus. Dans les régions d'accès difficiles (relief, couvert végétal, manteau d'altérite, etc...), les investigations géologiques sont réalisées à l'aide des techniques de détection à distance (Photographie aérienne, télédétection), associées à des levés de terrain localisés avant de procéder à une généralisation [15].

La détermination des caractéristiques géométriques du réseau de fractures ([2],[5],[6],[16],[17]) permet de disposer de paramètres statistiques décrivant la structure du réseau. L'hétérogénéité et l'anisotropie des milieux fracturés (à petite échelle), ne permettent pas dans la plupart des cas, d'utiliser l'approche de milieu continue dans la simulation des écoulements en hydrogéologie des milieux fracturés [18]. C'est l'approche discrète qui permet de mieux aborder la modélisation des réseaux de

fractures car elle décrit de façon plus réaliste les milieux naturels [19]. Dans ce type de modèle, l'écoulement est essentiellement concentré dans les fractures. La répartition du flux dans le réseau de fractures se fait dans un nombre restreint de fractures de sorte qu'il s'en suit une chenalisation extrême [20]. Il se pose, alors, le problème de la connaissance et de la description détaillée de la structure du réseau ; limite à laquelle se heurte cette approche. Les fractures ne peuvent être décrites dans la plupart des cas que de façon partielle. Suivant leur densité, leurs tailles, leur arrangement dans le milieu et leurs propriétés physiques, les fractures modifient considérablement les propriétés hydrauliques des roches non fracturées. De plus, elles existent à diverses échelles (micro et macroscopique). Il faut par conséquent trouver l'échelle idéale pour la modélisation. Pour une meilleure compréhension des effets d'échelle et de la chenalisation, Long et al. [19] propose de relier les propriétés géométriques des fractures aux propriétés d'écoulement du milieu.

Ce travail a pour but de simuler les écoulements dans les réservoirs fracturés du socle Précambrien de Touba (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Cette région appartient au domaine Archéen de la dorsale de Man [21],[22] et a été affectée par les orogènes Léoniennes et Libériennes. Les roches sont essentiellement composées de gneiss (para et ortho-dérivés) et de quartzites associés à des amphibolites et amphibolo-pyroxénites ([21],[22],[23]). La structure la plus importante de l'Ouest ivoirien est la faille duassandra, d'orientation N-S, qui sépare le domaine Archéen à l'Ouest et le domaine Paléoproterozoïque à l'Est. Cette faille qui s'étend sur plus de 250 km a une zone de déformation large de plus de 10 km. En effet cette faille a joué plusieurs fois au cours de son histoire, soit de manière dextre ou senestre avec des intensités d'importances inégales et variables ([23],[24]). Les événements tectoniques ayant prévalu dans cette région ont donné naissance à un schéma structural très complexe. Les axes tectoniques majeurs peuvent induire une zonalité hydrogéologique et améliorer la productivité des réservoirs. La modélisation hydrogéologique permet de faire une évaluation du potentiel hydrogéologique de ces réservoirs dans une perspective d'optimisation de la gestion des ressources en eaux, ainsi que leur protection contre les sources de pollution. Pour ces raisons, il est indispensable de bien connaître les caractéristiques générales d'écoulement à l'échelle de l'aquifère, notamment la perméabilité et les axes de circulations des eaux souterraines.

L'approche méthodologique est basée sur le couplage de la télédétection et à la modélisation hydrogéologique. À partir d'images satellitaires Landsat-TM et des investigations géologiques classiques, la carte de fracturation a été établie. L'organisation géométrique du

réseau de fractures (distribution des longueurs, ouverture, densité) et des lois d'échelles permettent de construire le modèle de réseaux pertinents et de déduire les caractéristiques hydrauliques induites par les fractures.

2. Méthodologie

2.1. Données utilisées

La base de données géoscientifiques comporte une image satellitaire Landsat-TM (scène 198-56 acquise le 28/12/1990, en saison sèche) et des cartes géologiques à 1/200 000 ([25],[26]) ainsi que des informations issues des fiches techniques de forages. Les données de géophysique recueillies grâce au programme d'implantation de forages "Don Japonais" complètent la base de données.

Le traitement numérique des images a été réalisé au Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT, Université de Cocody) à l'aide du logiciel ENVI. Le traitement statistique de la fracturation et la simulation de l'écoulement dans le réseau de fractures sont réalisés grâce au logiciel VISUAL BASIC qui a permis de compiler et d'exécuter les programmes en langage C++ développés depuis plusieurs années à l'Université de Rennes 1 ([2],[5],[6]).

2.2. Cartographie structurale par télédétection et Système d'Informations Géographiques

Le traitement numérique des images pour l'identification et l'extraction des linéaments est fondamental en matière de cartographie géologique et structurale. Les exemples de travaux réalisés dans l'anti-atlas au Maroc ([27],[28],[29]), dans le bassin de Paris en France ([30]), dans le socle Archéen en Côte d'Ivoire ([10],[11],[12],[31]), dans le bouclier Canadien ([32],[33]) et dans bien d'autres régions, montrent que l'application des procédés de filtrage (spatiaux et directionnels) facilite l'accentuation des discontinuités lithologiques et structurales assimilables aux linéaments. Le terme "linéament" défini par Hobbs [34] et O'Leary [35], décrit toute structure ayant un tracé rectiligne ou curviligne et dont l'interprétation a une signification géologique [36].

Acquises en saison sèche, en l'absence de couverture nuageuse, les images Landsat-TM sont bien lisibles et s'adaptent aux analyses géologique et structurale. Une rectification géométrique s'est faite à l'aide de la carte topographique de Touba (1/200 000), grâce à 14 points de calage et 5 points de contrôle répartis de façon homogène, et une transformation polynomiale de degré 2, suivi d'un rééchantillonnage bilinéaire. L'erreur moyenne

est de 0,45 pixel ; ce qui est satisfaisant car une erreur de l'ordre du demi pixel résulte d'une bonne correction.

Pour l'accentuation et la détection des linéaments, le filtrage directionnel est appliqué à diverses images. Les filtres de type haute fréquence tels que le Laplacien permettent de souligner les zones de variation brusque d'intensité. Les filtres directionnels 7 X 7 de type Sobel ont été appliqués dans les directions N-S, E-W, NW-SE et NE-SW. Un exemple de matrice est présenté dans le tableau 1. Ces filtres testés par Kouamé *et al.* [31] font bien ressortir les discontinuités-images et ont permis la cartographie du secteur Man-Danané, situé au Sud de la région Touba.

Tableau 1. Matrice 7x7 de filtre de Sobel (direction N-S)

N-S						
1	1	1	2	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1

Le relevé des linéaments est effectué par interprétation visuelle des images traitées : images brutes rehaussées, images transformées, compositions colorées. Selon Mahmoud [28] la bande 7 de Landsat 5 met bien en évidence les linéaments et facilite leur cartographie. Dans la région d'Odienné, situé au Nord de Touba, Savané et Biémi [37] ont cartographié les linéaments à l'aide des bandes 4, 5 et 7 de Landsat 5. Pour mieux faire ressortir les éléments structuraux (failles, joints, contacts lithologiques, dykes, etc...), la composition colorée en RGB des bandes TM 3, 5 et 7 a été utilisée. Le tracé des accidents coïncide souvent avec les cours d'eau ([10],[12],[38]) qui sont soulignés par une végétation plus ou moins dense. La distinction des structures est également améliorée sur les 3 premières composantes de l'ACP. On y distingue très bien le réseau hydrographique et les sols nus.

En appliquant les filtres de type Sobel à la seconde composante issue de l'ACP, les principaux accidents ont été détectés. Dans les travaux de Himyari [29] l'application des filtres sur des images issues du traitement des ACP augmente de 20%, l'ensemble des linéaments répertoriés.

Les tracés rectilignes relatifs aux activités anthropiques (routes, pistes, ligne de transport d'énergie) sont éliminés de la carte obtenue par un croisement aux cartes thématiques existantes. Pour que la carte finale ne comporte que des linéaments géologiques, il est indispensable de procéder à une validation des

linéaments. Les investigations géologiques, réalisées aux cours des travaux antérieurs de cartographie géologique ([21],[22],[23],[24],[25],[26]) ont permis de compléter et de valider la carte de fracturation établie. Cette carte constitue le support utilisé pour la simulation des écoulements souterrains.

2.3. Caractérisation de la géométrie des réservoirs fracturés

La détermination des paramètres géométriques est basée sur les théories développées par Davy *et al.* [2] qui permettent de définir un modèle géométrique stochastique de fractures à partir du réseau de fractures, extrait des images Landsat-TM. Plus spécifiquement, l'étude des longueurs de fractures est réalisée par l'analyse de la distribution des fréquences, des fréquences cumulées et celle de la densité de fréquence. Cette étape est fondamentale et permet non seulement une description paramétrique du réseau, mais aussi l'analyse des différents niveaux d'échelles.

La distribution des longueurs de fractures est décrite par diverses lois statistiques : lognormale ([39],[40]), exponentielle négative [41], hyperbolique [42] et puissance ([5],[6],[7],[13],[43],[44],[45],[46]). Les fractures existent dans une gamme très large de taille et l'absence d'échelle caractéristique de longueurs de fractures oriente vers le choix de la loi puissance [7]. Cette loi a la particularité d'être définie par des valeurs minimale l_{\min} et maximale l_{\max} de longueurs de fractures, avec un exposant «a», dont la valeur fixe la proportion de grandes et de petites fractures. La fonction puissance $n(l)$ décrivant la distribution des longueur de fractures est exprimée par l'équation 1 :

$$n(l) = \frac{(a-1)l^{-a}}{l_{\min}^{1-a} - l_{\max}^{1-a}} \sim \frac{(a-1)l^{1-a}}{l_{\min}^{1-a}} \quad (\text{Éq. 1})$$

$$l \in [l_{\min}, l_{\max}] \text{ et } a \geq 1$$

Entre les valeurs l_{\min} et l_{\max} , lorsque «a» décroît la proportion de grandes fractures croît. Toutes les fractures ont la même longueur l_{\min} si a est très grand (infini) et, toutes les fractures ont la taille l_{\max} si a = 1.

L'étude de la distribution spatiale des fractures permet de déterminer un second paramètre noté «D» qui représente la dimension fractale du réseau de fractures. La dimension fractale peut être déterminée soit à partir de la méthode de comptage de boîtes (Box-counting method) ou par la méthode de la répartition spatiale de masses.

La première méthode est très sensible aux effets de bord et de taille finie. Son usage nécessite certaines précautions que nous estimons utiles de rappeler [13],[47]:

- exclure de l'analyse les zones sans relevé ;
- ne pas démarrer l'analyse avec une boîte unique recouvrant la totalité de l'objet ;
- éviter les effets de bord en excluant les boîtes sur les limites du tracé ;
- tenir compte de la dimension minimale et maximale des paramètres de l'objet (longueurs des fractures) pour dimensionner les boîtes.

La deuxième méthode utilise la fonction de corrélation (ou encore la mesure de la corrélation intégrale) pour calculer la dimension fractale des réseaux naturels ([43],[47],[48],[49]).

Cette dernière méthode a été appliquée dans ce travail. Elle utilise la fonction de corrélation $C(r)$ dont la pente dans un diagramme bi-logarithmique donne la valeur de D . Chaque fracture étant assimilée à son centre d . La fonction de corrélation est définie par l'équation 2 :

$$C_2(r) = \frac{2N_p(r)}{N(N-1)} \quad (\text{Éq. 2})$$

où $2N_p(r)$ représente le nombre de paires de points dont la distance est inférieure à r et N le nombre total de points du système.

La connaissance de ces deux paramètres «a» et «D» permet une meilleure caractérisation des propriétés géométriques du réseau de fractures et l'analyse des différents niveaux d'échelles.

2.4. Simulation des écoulements

L'un des facteurs les plus importants influençant la perméabilité d'un réseau de fractures est la surface sur laquelle chaque fracture est reliée, l'une à l'autre afin de former un chemin continu d'écoulement à travers la roche [50]. Dans cette étude, la matrice de la roche est considérée imperméable par rapport aux fractures. Les fractures qui s'interceptent forment des groupements appelés amas de fractures. Un amas est dit connecté s'il est percolant, c'est-à-dire s'il relie les quatre bordures du réseau. La connectivité d'un réseau peut être étudiée de façon numérique à partir de l'expression (équation 3) du paramètre de percolation « p » donné par Davy [43] :

$$p = \frac{\int \text{Min}(L^2, l^2) \cdot n(l) \cdot dl}{L^2} \quad (\text{Éq. 3})$$

avec p_c , le paramètre de percolation au seuil de la connectivité. Ainsi si pour un réseau de fractures donné, $p \geq p_c$; le réseau est dit connecté et inversement si $p < p_c$, il est dit déconnecté.

Une fois la connectivité du réseau de fractures est prouvée, il devient possible de calculer la perméabilité de ce réseau. Les conditions aux limites appliquées sont les suivantes (figure 1) : les deux faces opposées du système sont à charges imposées et les deux autres bords

perpendiculaires à celles-ci sont imperméables. Ces conditions sont déduites du perméamètre de Darcy et sont ramenées à l'échelle de la fracture, en utilisant la loi des nœuds sur chaque intersection du réseau. Nous obtenons un système d'équation dont la solution est la perméabilité du réseau de fractures.

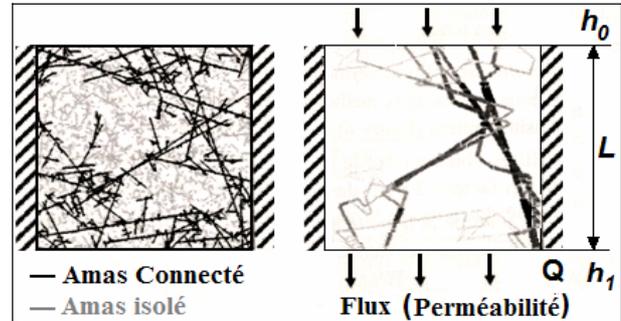


Figure 1. Illustration des conditions aux limites

3. Résultats et interprétation

3.1. Carte de fracturation

Les différentes images brutes et/ou transformées (figures 2 et 3) ont permis de rehausser les discontinuités images assimilables à des linéaments géologiques. L'interprétation visuelle a facilité l'identification des linéaments géologiques.

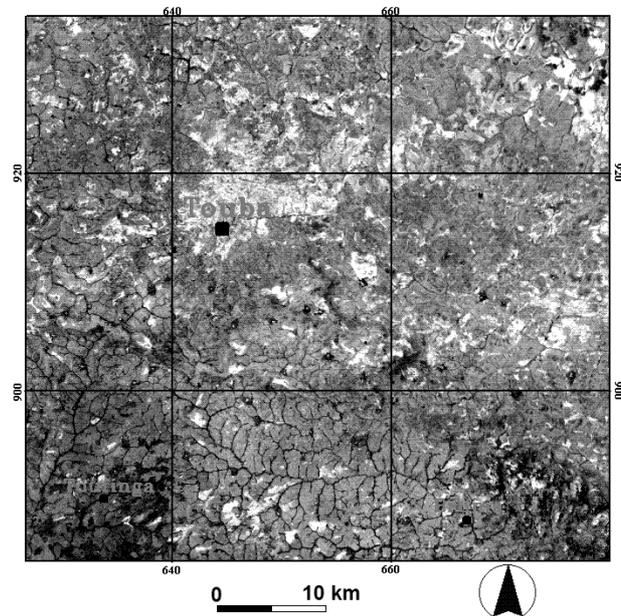


Figure 2. Deuxième composante issue de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)

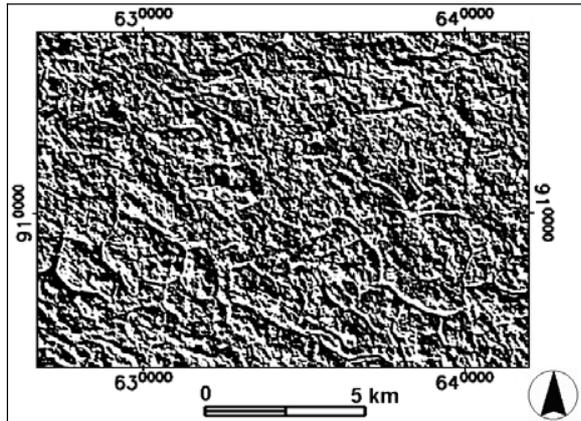


Figure 3. Fenêtre issue du filtrage de Sobel de direction NE-SW

L'extraction linéaire a abouti à l'établissement de la carte détaillée du bâti structural de Touba (figure 4).

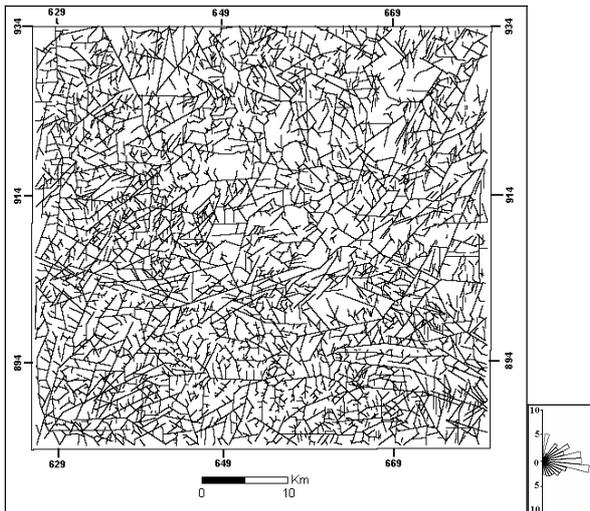


Figure 4. Carte linéaire de Touba

Sur la carte obtenue, les pics directionnels relevés (N°80-100, N°55-65 et N°10-20) concordent avec les grandes directions tectoniques relevées dans le domaine Archéen de Côte d'Ivoire ([21],[23],[24]).

Les accidents N80-100 ont une répartition statistique prépondérante dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire et sont le plus souvent observés sur les formations charnockitiques et gneissiques. Ces accidents sont d'extension kilométrique et traversent le secteur d'étude d'Est en Ouest. Les travaux de Koné et al., [23] ont mis en évidence un couloir de transpression N-S, limité par les failles de Booko à l'Ouest et du Sassandra à l'Est. La région de Touba qui se situe dans cette zone de déformation transpressive Post-archéenne a été influencée par celle-ci et elle présente de nombreux témoins de cette

déformation. De nombreux couloirs secondaires, dextres ou senestres s'observent dans la direction E-W. La faille E-W, située au Sud de la ville de Touba est un exemple de ce type d'accident.

La déformation la plus importante se fait par aplatissement et cisaillement dans la direction N-S [23]. C'est la direction principale des accidents majeurs de l'Ouest ivoirien [12],[13],[21] avec les couloirs de cisaillement de Booko, de Kouroumassa et du Sassandra. Les fractures N°55-65 sont également présentes et marquent l'influence de l'orogénèse éburnéenne.

3.2. Modèle de réseau

La distribution des longueurs des fractures se fait selon la loi puissance dans la gamme de longueurs [900-6000 m] avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,97$ (figure 5). La valeur de l'exposant caractéristique de la loi puissance $a=2,17$ concorde avec les valeurs d'un réseau de faille, généralement comprises entre 1 et 3 ([6],[46]). Dans la région de Man, situé au Sud de Touba, Lasm [13] a obtenu une valeur de 2,9.

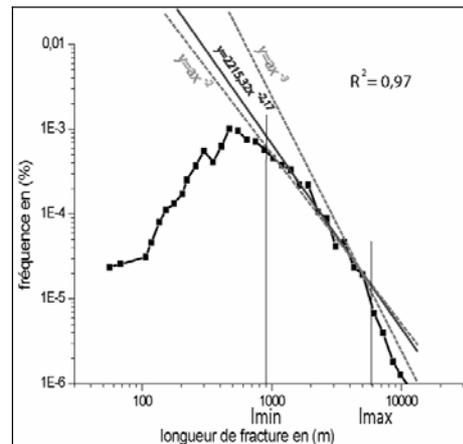


Figure 5. Ajustement de la courbe de densité de fréquence à la loi puissance

L'étude de la fonction de corrélation a permis de caractériser la distribution spatiale des fractures dans le réseau. La dimension fractale obtenue ($D= 1,8$) est inférieure à celle déterminée par Lasm [13] pour la région de Man (1,9). D est très proche de 2, ce qui permet de dire que la distribution des positions de fractures est quasi homogène et que celles-ci sont peu corrélées [46].

La détermination de tous les paramètres géométriques du réseau de fractures permet une étude du comportement de celui-ci à petite échelle, en supposant la continuité de la loi de modélisation à une échelle plus grande comme celle de l'affleurement [50].

Le modèle de réseau de la région de Touba est décrit par l'expression suivante :

$$n(l,L) = \alpha L^D l^{-\alpha+1}, \text{ avec } \alpha=2,2 ; D=1,8 \text{ et } \alpha=0,03$$

3.3. Connectivité du réseau et simulation des écoulements souterrains

La figure 6 montre que le réseau de fractures de Touba est bien connecté. La plupart des fractures appartiennent à l'amas principal, qui est aussi bien connecté aux bordures du réseau. Le paramètre de percolation « p » vaut 5,78 et permet de situer le réseau dans la zone de transition de la connectivité. Il s'agit d'une connexion au seuil. Selon les auteurs [5],[6],[50], [51]), p varie très peu en fonction de la taille du réseau et tend vers une moyenne de 5,6.

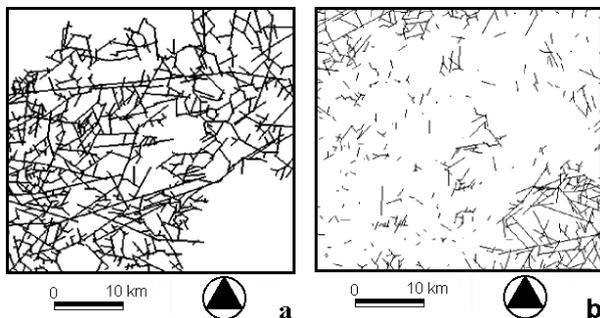


Figure 6. Connectivité du réseau naturel : a) amas connecté ; b) réseau déconnecté

Le calcul de la perméabilité équivalente et du flux dans le réseau naturel donne la valeur de $KR_n = 0,037$ m/s dans le cas du réseau naturel complet et la valeur de $KR_{nt} = 0,024$ m/s pour le réseau tronqué (suppression des fractures de tailles inférieure à 900 m). L'ouverture est considérée uniforme et la perméabilité de chaque fracture est fixée à $K_f = 1$ m/s. La perméabilité équivalente du réseau trouvée se heurte au problème de sous échantillonnage pour les petites fractures et de troncature pour les fractures de grandes tailles.

Biémi [10] a déterminé au niveau de la région de la Marahoué, située à l'Est de la région de Touba, une valeur de conductivité hydraulique moyenne des fractures égale à $3,5 \cdot 10^{-5}$ m/s. En utilisant cette valeur de K_f dans cette étude, la perméabilité du réseau naturel estimée vaut $1,3 \cdot 10^{-6}$ m/s. Cette valeur s'insère dans la gamme des valeurs de perméabilités induites par les fractures obtenues par [10],[12] dont les valeurs oscillent entre 10^{-8} et 10^{-4} m/s. Les valeurs de perméabilités induites obtenues par Savadogo [8] dans le bassin versant de la Sissili (Burkina Faso) et par Savané [11] dans la région d'Odienné restent inférieures à 10^{-8} m/s. Le paramètre densité de fracturation influence énormément les valeurs de perméabilités induites.

La distribution en loi puissance des longueurs de fractures induit des écoulements fortement chenalisés concentrés dans les fractures majeures [20]. Les figures 7a et 7b montrent respectivement le réseau naturel débarrassé des fractures de tailles inférieures à 900 m et les flux simulés dans le réseau. Il apparaît une chenalisation du cheminement de l'eau et les axes préférentiels épousent les directions des grandes fractures. La mobilisation et le transfert des eaux s'effectuent selon une direction générale NE-SW. La faille E-W au Sud de Touba constitue un couloir souterrain majeur qui connecte un nombre important d'accidents qui forment des couloirs souterrains facilitant le transit des eaux. A l'Ouest, le flux est d'orientation N-S et emprunte divers chemins. Le coin SE n'est pas connecté à l'amas principal dans la fenêtre d'étude.

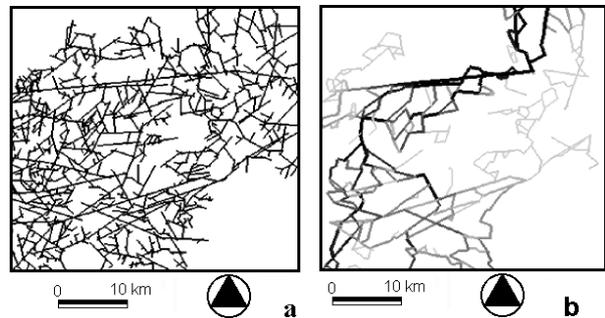


Figure 7. Connectivité et écoulement des eaux : a) amas connecté ; b) flux simulé dans le réseau

Les résultats théoriques se rapportant aux flux dans le réseau sont surimposés à la carte des débits des forages pour rechercher les interrelations pouvant exister entre eux (figure 8).

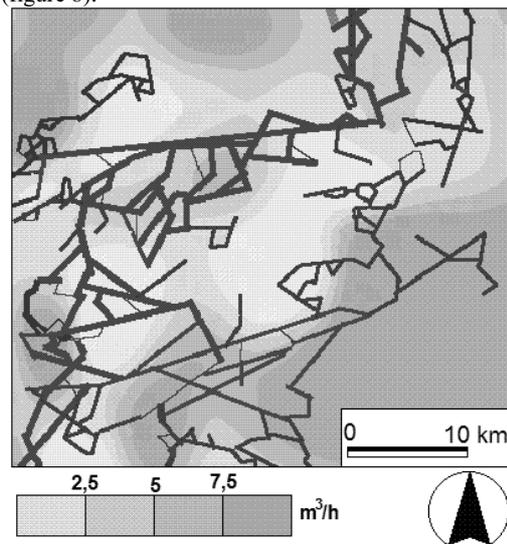


Figure 8. Relation entre les flux simulés dans le réseau et les débits

La zonalité hydrogéologique exprimée par les zones à débits moyens et élevés semble concorder avec les chemins de l'eau, déterminé par la modélisation hydrogéologique.

La concordance entre les valeurs de perméabilités induites par les fractures d'une part, et les cheminements de l'eau et les secteurs à débits moyens et forts d'autre part, constituent une preuve de performance du modèle géométrique du réseau. Ces observations constituent un résultat prometteur dans la prospection des ressources en eau souterraine dans cette région.

4. Conclusion

Le réseau de fractures de la région de Touba, déterminé à partir du traitement des images Landsat-TM, possède des caractéristiques géométrique et hydraulique qu'il est possible de modéliser par des lois mathématiques.

Du point de vue géométrique, la distribution des longueurs de fractures suit une loi puissance d'exposant caractéristique «a». Cette loi donne en réalité la probabilité N(1) d'occurrence d'une fracture de longueur l. La distribution spatiale des fractures est interprétée à travers la grandeur «D», représentant la dimension fractale du réseau. Les valeurs de ces deux paramètres montrent que le réseau de fracture peut être décrit par le modèle mathématique donné par Davy *et al.* [2].

La concordance partielle entre les cheminements de l'eau et les forages à débits moyens et forts qui est observée, est un résultat prometteur dans la prospection des ressources en eau souterraine.

5. Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements au Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Côte d'Ivoire qui a accordé une bourse de stage à AKAFFOU Armel Ghislain pour effectuer une partie de ses travaux de 3è cycle au CAREN, Université de Rennes 1 (France).

6. Références

[1] De Marsily, G., *Flow and transport in fractured rocks : connectivity and scale effect*. Edited by I.A. Hydrol., 1985.

[2] Davy, P., A. Sornette, and D. Sornette, "Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting". *Nature*, 348, 1990, pp. 56-58.

[3] Hsieh, P.A., A.M. Shapiro, C.C. Barton, F.P. Haeni, C.D. Johnson, C.W. Martin, F.L. Paillet, T.C. Winter, and D.L. Wright. *Methods of characterizing fluid movement and chemical transport in fractured rock in Field Trip*. In

Guide Book for Northeastern United States, Edited by Chaney, J.T. and J.C. Hepburn, 1993.

[4] Neretnieks, I., *Solute transport in fractured rock. Applications to radionuclide waste repositories*. In Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock, Edited by Bear, J., C-F. Tsang, and G. De Marsily, pp. 39-127, 1993.

[5] Bour, O., *Transfert de fluide dans les milieux fracturés : effets d'échelle*. Thèse Univ. Rennes 1, 200 p, 1997.

[6] De Dreuzy, J-R., *Analyse des propriétés hydrauliques des réseaux de fractures*. Thèse Univ. Rennes 1, 217 p, 2000.

[7] Darcel, C., *Corrélation dans les réseaux de fractures : caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques*. Thèse Univ. Rennes 1, 223 p, 2002.

[8] Savadogo, A.N., *Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de la Haute Volta. Étude régionale du bassin versant de la Sissili*. Thèse d'Etat, Univ. Grenoble 1, 350 p, 1984.

[9] Boukari, M. et R. Guiraud, "L'hydrogéologie de régions de socle de l'Afrique intertropicale : l'exemple de Dassa-Zoumè (Bénin méridional)". *Journ. Afr. Earth Sci.*, 3 (4), 1985, pp. 491-503.

[10] Biémi, J., *Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire)*, Thèse d'État, Univ. Abidjan, 480 p, 1992.

[11] Savané I., *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 d'État, Univ. Abidjan, 386 p, 1997.

[12] Kouamé K.F., *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 Univ. Cocody, 210 p, 1999.

[13] Lasm, T., *Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques, application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire*, thèse Univ. Poitiers, 274 p, 2000.

[14] Dershowitz, W.S., P. Wallmann, J.E., Geier, and G. Lee, Discrete fractured network modeling of tracer migration experiments at the SCV site. *Swedish Nuclear Power and Waste Management Co., Stockholm, Sweden, SKB Report*, 1991, pp. 91-23.

[15] Scanvic, J.Y., "Utilisation de la télédétection dans les Sciences de la Terre", *Manuels et méthodes*, 7, Éd. B.R.G.M., 1983, 160 p.

[16] Andersson, J. and R. Thunvik, "Predicting mass transport in discrete fracture networks with the aid of geometrical filed data", *Water Resour. Res.*, 22, 1986, pp. 1941-1950.

[17] Odling, N., P. Gillespie, B. Bourguin, C. Castaing, J-P. Chilès, N. Christensen, E. Fillion, A. Genter, C. Olsen, L. Thrane, R. Trice, E. Aarseth, J. Walsh and J. Watterson,

- "Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractured hydrocarbon reservoirs", *Petroleum Geosciences*, 5, 1999, pp. 373-384.
- [18] Snow D.T. "Anisotropic permeability of fractured media", *Water Resour. Res.*, 5, 1969, pp. 1273-1289.
- [19] Long, C., J. Remer, C. Wilson and P. Witherspoon, "Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures", *Water Resour. Res.*, 3, 1982, pp. 645-658.
- [20] Olson, J. E, *Fracture mechanics analysis of joints and veins*. Ph D Dissertation, UMI, 1991.
- [21] Camil, J., *Pétrographie, chronologie des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain*. Thèse d'État, Univ. Abidjan, 306 p, 1984.
- [22] Kouamélan, A.N., *Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque*, Thèse Univ. Rennes, 277 p, 1996.
- [23] Koné, M., Y. Vialette, P. Tempier, S. Lemoine et J. Camil, "Transpression post archéenne dans l'ouest de la Côte d'Ivoire (craton Ouest africain)", *Africa Geosci. Review*, 3(3/4), 1996, pp. 407-411.
- [24] Djiro, S.C., *Évolutions tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma-Touba (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire)*. Thèse d'État, Univ. Abidjan, 121 p, 1998.
- [25] Tagini, B., *Esquisse structurale de la Côte-d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale*. Thèse d'État, Univ. Lausanne, 302 p, 1971.
- [26] Direction de la Géologie, *Carte géologique provisoire de Touba à 1/200 000*, 1996
- [27] Emran, A., J. Chorowicz, B. Cervelle, N. Lyberis, G. Tamain et E.M. Alem, "Cartographie géologique et analyse de la fracturation du sud de l'anti-atlas central (Maroc) à partir d'une image Landsat MSS", *Photo-Interprétation*, 1988/2, 1988, pp. 1-7.
- [28] Mahmoud, A., "Lineament as groundwater exploitation guides in hard-rock terranes of arid region", *Journ. Can. Télédétection*, 22(1), 1996, pp. 108-116 p.
- [29] Himyari, M.S., C. Hoepffner, M. Benzakour et D. El Hadani, "Étude structural du Haut Atlas Oriental (Maroc) à l'aide de l'analyse linéamentaire des images HRV (XS) de SPOT". *Télédétection*, 2(4), 2002, pp. 243-253.
- [30] Rouzeau O., et J. Scanvic, "Interprétation structurale des linéaments observés sur des données spatiales thermiques multitemporelles et multiplicateur dans le bassin de Paris", *Bulletin du B.R.G.M.*, Orléans, 113, 1989, pp. 8-12.
- [31] Kouamé, K.F., P. Gioan, J. Biémi, et K. Affian, Méthode de cartographie des discontinuités images extraites d'images satellitales (exemple de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, 1(2), 1999, pp. 139-156.
- [32] Sharma, K.N.M., V.H. Singhroy, L. Madore, J. Lévesque, C. Hébert and M. Hinse, "Use of radar images in the identification of major regional structures in the Greenville province, western Quebec", *Can. Journ. Remote Sensing*, 25(3), 1999, pp. 278-290.
- [33] Desjardins, R.S., D.W. Iris, G.H. Roy, Lemieux et T. Toutin, "Efficacité des données de radarsat-1 dans la reconnaissance des linéaments : un bilan", *Journ. Can. Télédétection*, 26(6), 2000, pp. 537-548.
- [34] Hobbs, W.H., "Lineaments of the Atlantic border region". *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 15, 1904, pp. 483-506.
- [35] O'Leary, D.W., J.D. Friedman and H.A. Pohn, "Lineaments, linear, lineations : some standards for old terms". *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87, 1976, pp. 1463-1469.
- [36] Deslandes, S. et H.Q. Qwyn, "Évaluation de SPOT et SEASAT pour la cartographie des linéaments : comparaison basée sur l'analyse de spectre de Fourier", *Journ. Can. Télédétection*, 17(2), 1991, pp. 98-110.
- [37] Savané, I. et J. Biémi, "Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odiénne (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire)", *Télédétection*, 1(1), 1999, pp. 47-64.
- [38] Lasm, T. et M. Razack, Lois d'échelle dans la fracturation des roches dures cristallines et du réseau hydrographique associé. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 333, 2001, pp. 225-232.
- [39] Hudson, J.A. and S.D. Priest, "Discontinuity frequency in rock masses", *Int. J. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 20, 1983, pp. 73-79.
- [40] Rouleau, A. and J. Gale, "Statistical characterization of the fracture system in the stripa granite, Sweden", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 22, 1985, pp. 353-367.
- [41] Robertson, A.M., "The interpretation of geological factors for use in slope theory. Planning of Open Pit Mines", *Proceedings, Johannesburg*, 1970, pp. 55-71.
- [42] Segall P. and D.D. Pollard, "Joint formation in granitic rock of the Sierra Nevada", *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 1983, pp. 563-575.
- [43] Davy, P. "On the frequency-length distribution of the San Andreas fault system", *Journ. Geophys. Res.*, 98, 1993, pp. 141-151.
- [44] Bour, O. and P. Davy, "Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution", *Water Resour. Res.*, 33, 1997, pp. 1567-1583.
- [45] De Dreuzy, J-R., P. Davy and O. Bour, "Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution: 1-Effective connectivity". *Water Resour. Res.*, 7, 2001, pp. 107-111.
- [46] Bonnet, E., O. Bour, N. Odling, I. Main, B. Berkowitz, P. Davy and P. Cowie, "Scaling of fracture systems in geological media", *Rev. Geophys.*, 39, 2001, pp. 347-383.
- [47] Walsh J.J. and J. Watterson, "Fractal analysis of fracture using the standard box counting technique: valid and invalid methodologies", *J. Struct. Geol.*, 15(12), 1993, pp. 1509-1512.
- [48] Viseck, T., *Fractal growth phenomena*, 488 p., World Scientific, London, 1992.
- [49] Ouillon G., and Sornette, D., "Unbiased multifractal analysis: Application to fault patterns", *Geophys. Res. Lett.* 23, 1996, pp. 3409-3412.
- [50] Odling, N., "Scaling and connectivity of joint system in sandstones from Western Norway", *J. Struct. Geol.*, 19, 1997, pp. 1257-1271.
- [51] De Dreuzy, J-R. and J. Erhel, "Efficient algorithms for the determination of the connected fracture network and the solution to the steady-state flow equation in fracture networks", *Computer and Geosciences*, 29, 2002, pp. 107-111.