EXTRACTION PAR TÉLÉDÉTECTION DES RESEAUX DE FRACTURES MAJEURES DU SOCLE PRÉCAMBRIEN DE LA RÉGION DE DIMBOKRO (CENTRE EST DE LA CÔTE D'IVOIRE).

Alexis Yao N'GO[1], Théophile LASM [2], Mahamadou KOITA [1] & Issiaka SAVANE [1]

[1] UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement (SGE), Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 02 B.P. 801 Abidjan 02, Téléphone : +225 235 21 983/ +225 203 04 200 , télécopieur : +225 203 78 118. E-mails : nyaoalexis@yahoo.fr ; kmahamoudk@yahoo.fr ; savanei@hotmail.com

[2]UFR STRM, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 22 BP 582 Abidjan 22, Téléphone : +225 224 83 803, télécopieur : +225 224 45 270. E-mail : theophile_lasm@yahoo.fr

Soumis le 21 juin 2008, accepté le 17 juin 2009 - © *Revue Télédétection*, 2010, vol. 9, n° 1, p. 33-42

Résumé

Dans le milieu de socle, les fractures sont le siège de circulation et d'accumulation des eaux souterraines. La connaissance de leur géométrie est essentielle pour une meilleure exploitation de leurs ressources en eaux. La prospection hydrogéologique permet d'identifier et de localiser les réseaux de fractures susceptibles de constituer des réservoirs d'eau par diverses méthodes (télédétection, géophysique). C'est dans le souci de contribuer à une meilleure connaissance du potentiel de production en eau de cette région que cette étude a été entreprise. La zone d'étude est située dans la partie médio-orientale de la Côte d'Ivoire constituée essentiellement de socle et où la fracturation est bien développée. Le principal objectif de cette étude est de cartographier les réseaux de fractures par imagerie satellitaire. La validation de cette carte s'est faite à partir des débits de forages productifs ($Q > 5\ m^3/h$). Les données utilisées sont des fiches techniques de forages, d'essai de pompage, des cartes géologiques et topographiques et des images satellitaires. Les techniques de traitement d'images satellitaires ont été employées pour extraire une carte de fracturation et les forages productifs ont été utilisés pour élaborer la carte de positionnement des forages. Ces forages se superposent globalement sur les fractures majeures cartographiées. L'ensemble des résultats est une contribution à une meilleure prospection hydrogéologique dans la région de Dimbokro.

Mots clés : télédétection, fractures, forages productifs, outil de validation, Dimbokro, Côte d'Ivoire.

EXTRACTION OF THE MAJOR FRACTURE NETWORKS OF THE CRYSTALLINE BASEMENT OF THE DIMBOKRO AREA (CENTRE EAST OF IVORY COAST) BY REMOTE SENSING: RELATION WITH THE PRODUCTIVE DRILLINGS DATA.

Abstract

In crystalline basement environment, fractures are the seat of circulation and groundwater accumulation. Knowledge of their geometric properties is essential for a better exploitation of water resources. The hydrogeological prospecting complemented by various methods (remote sensing, geophysical prospecting) permits to identify and to localize the fracture networks associated to the development of water reservoirs. Therefore, in order to contribute to a better knowledge of the potential for water production in this region that this study has been undertaken. The study area is located in the mid-eastern part of Ivory Coast consists mainly of fractured crystalline basement rocks. The main objective of this study is to map the fracture network by satellite imagery. The validation of this map is based on productive drillings rates ($Q > 5\ m^3 / h$). The data used are constituted of drilling report, pumping test data, the geological and topographic maps, and satellite and radar images. Treatment of satellite images were used to extract a fracturing map and productive drillings were used to elaborate drillings localization maps. These drillings are generally superimposed on the major fractures mapped. The whole of the results contributed to a better hydrogeological prospection of the Dimbokro area.

Key words: remote sensing, fracture, productive drillings, validation tool, Dimbokro, Ivory Coast.

1. INTRODUCTION

Les eaux souterraines constituent une ressource vitale pour satisfaire les besoins en eau douce des collectivités. L'exploration de ces eaux en milieu cristallin et cristallophyllien prend en compte deux principaux types de réservoirs se développant, d'une part, dans les altérites et d'autre part, dans les réseaux de fractures. Ces deux types de réservoir sont le plus souvent superposés et constituent un système bicouche (Margat, 1983 ; Faillat, 1987). Les premiers, superficiels, ont une fonction essentiellement capacitive et les seconds généralement profonds ont une fonction conductrice (Margat, 1983 ; Faillat, 1986 ; Guiraud, 1988 ; De Marsily, 1994 ; Lasm, 2000 ; Lasm *et al.*, 2004 a). Les travaux menés en Afrique de l'Ouest (Faillat, 1985 ; Faillat, 1986 ; Biémi, 1992 ; Savané *et al*., 1995; Biémi *et al.*, 1997) ont montré que les gros débits sont liés à des fractures d'extension kilométrique, des intersections des fractures, et à des réseaux de fractures caractérisés par une forte interconnexion. Il existe à l'heure actuelle diverses techniques de détection et de cartographie des fractures parmi lesquelles les techniques de télédétection (photo-interprétation, imagerie satellitaire ; imagerie radar) et de géophysique. L'identification des fractures par télédétection présente certaines limites notamment dans leur interprétation. En effet, les linéaments relevés par imagerie satellitaire ou aéroportée sont avant tout des alignements morpho-structuraux (Faillat, 1986 ; Savané *et al.,* 1995*)*. La validation de ces linéaments sur le terrain présente souvent des difficultés, du fait que les affleurements de socle sont peu nombreux, et souvent recouvert par des sols épais. Selon Andersson *et al*. (1992), l'analyse hydrogéologique faite à partir de ces techniques, nécessite en plus de la cartographie linéamentaire, l'identification et l'étude d'un certain nombre d'indices révélateurs de la présence de l'eau, notamment les phénomènes associés aux zones de recharge, la persistance du sol humide pendant la saison sèche, la nature lithologique des roches et la densité du réseau de drainage. Il importe ici donc de développer de nouvelles techniques d'identification plus rapides. La mise en correspondance de la localisation des forages productifs avec le tracé des linéaments déterminés par télédétection, devrait permettre l'identification des fractures susceptibles de constituer des réservoirs.

La région étudiée a un climat local particulier (situation dans une cuvette) qui influencerait la mobilisation des ressources en eau (N'go *et al.*, 2005). Elle est située dans un contexte de forte température et de forte évapotranspiration qui favorise un tarissement précoce des nappes superficielles.

L'analyse des débits d'exploitation effectuée dans cette région, révèle que plus de 65% des forages ont un débit inférieur à 2,5 m^3/h. Ces faibles débits observés dans le domaine rurale, pourraient être exclusivement imputés aux manques d'études sérieuses qui impliqueraient des méthodes de géophysiques et de télédétection (photo-interprétation, radar) lors de leur implantation (Faillat, 1986 ; Lasm, 2000). Les analyses statistiques indiquent que la majorité des forages à l'échelle nationale ont de faibles débits (Faillat, 1986 ; Soro, 1987 ; Biémi, 1992 ; Savané, 1997) d'une manière générale. En effet, pour l'approvisionnement en eau des populations rurales, de gros débits ne sont pas toujours recherchés. Soro (1987) indique qu'un débit de 1 m^3/h est suffisant pour l'alimentation en eau au niveau des villages.

Le traitement des données de forages ont montré que près 20 % des forages de la zone d'intérêt, ont un débit supérieur à 5 m^3/h. Ce résultat serait lié à la présence de fractures ouvertes à extension kilométrique et hydrauliquement actives avec de très bonnes propriétés géométriques. En effet, selon Lasm (2000) et Lasm *et al*. (2004 a), l'essentiel des ressources en eau souterraine du pays est contenu dans les réservoirs formés par le socle fracturé. La connaissance du milieu fracturé apparait dès lors comme une nécessité en vue d'une meilleure gestion et exploitation de ces ressources en eau.

Ce travail a pour objectifs de cartographier les réseaux de fractures par imagerie satellitaire en s'appuyant pour la validation sur les débits de forages productifs.

2. CONTEXTES GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

La zone d'étude est située dans la région médio-orientale de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 3° et 5° W et les latitudes 6° et 8° N et couvre une superficie d'environ 10 360 km^2 (fig. 1). Elle est constituée d'un point de vue géologique majoritairement de socle birimien. On y rencontre deux grands ensembles (fig. 1) : i) un ensemble volcano-sédimentaire, ii) et un ensemble granito-gneissique. L'ensemble volcano-sédimentaire est représenté essentiellement par les formations cristallophylliennes dont les schistes birimiens intrudés par plusieurs générations de granitoïdes (granite, granodiorite à biotite) comportant de nombreux filons de quartz et de pegmatite. Les formations granitiques apparaissent au sud en massifs distincts dont l'origine intrusive dans la série birimienne est assez nette (Yao *et al*., 1995). L'ensemble granito-gneissique est essentiellement constitué de granitoïdes métamorphisés (Migmatites, métagranites et métamonzogranites, métatonalites). Ces formations ont été déformées et fracturées par les différents événements tectoniques qui ont eu lieu dans le domaine Baoulé-Mossi. Les déformations ont abouti à la mise en place dans ces roches d'une fracturation développée à l'instar des autres régions de Côte d'Ivoire. Cette tectonique semble complexe et polyphasée. Certaines fractures ont rejoué plusieurs fois au cours de leur histoire soit en compression soit en distension, ce qui est favorable pour les écoulements souterrains et la mobilisation des ressources en eaux. En effet, Faillat (1986) indique que les fractures anciennes n'ayant pas subi de remobilisation auront tendance à se refermer par colmatage ou par recristallisation secondaire ; empêchant ainsi le développement d'aquifères.

Le climat de type tropical humide est particulièrement chaud et relativement sec avec deux saisons pluvieuses (avril à juillet et octobre à novembre) et deux saisons sèches (décembre à mars et août à septembre). La région de Dimbokro a connu trois grandes variations climatiques déterminées sur une chronique de 71 années d'observation relevée à la station de Dimbokro : i) une période humide allant de 1930 à 1945, ii) une période normale allant de 1945 à 1968, iii) et enfin une période sèche à partir de 1969, caractérisée par une nette régression des précipitations (fig. 2) servant à la recharge des réservoirs.

L'évapotranspiration réelle a été calculée sur cette chronique par la méthode de Thornthwaite (1954). Les précipitations mensuelles moyennes oscillent entre 14,33 et 180, 13 mm. Juin et janvier sont respectivement les mois les plus pluvieux et sec. Les isohyètes augmentent lorsqu'on se déplace du nord vers le sud (par exemple) mettant en évidence la présence d'un gradient pluviométrique. La valeur de l'ETP calculée est de 1 128 mm, cette valeur reste supérieure à la précipitation annuelle (1077 mm) durant la même période. La méthode de Thornthwaite, ne prend pas en compte tous les paramètres climatiques. En effet, elle est basée sur des hypothèses assez simplistes qui pourraient sous-estimer la valeur de l'ETP et partant de l'ETR. Cependant, d'une manière générale, l'on remarquera que l'ETR influence considérablement la recharge des réservoirs souterrains d'eau dans la région de Dimbokro. Une bonne partie des précipitations est reprise par le phénomène d'évaporation et très peu contribue à la recharge de la nappe.

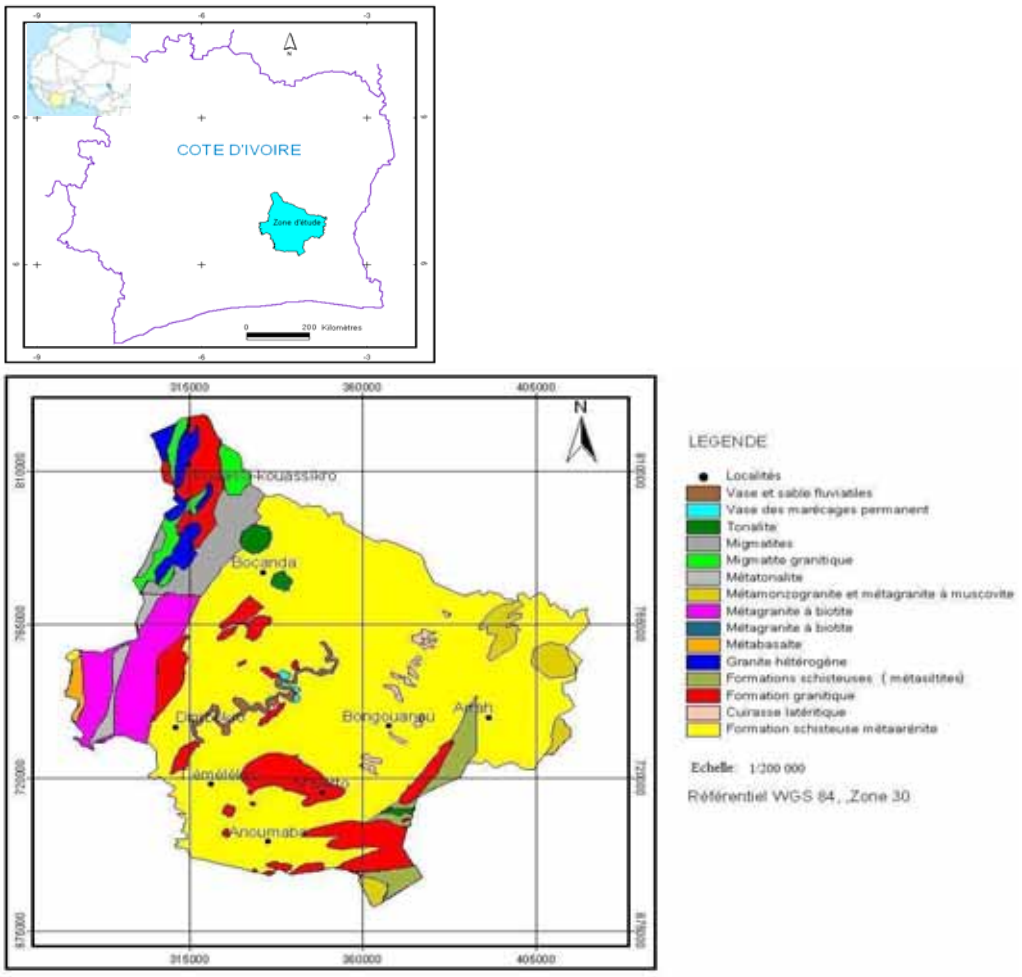


Figure 1: Localisation et carte géologique de la zone d'étude. (Yao *et al.*, 1995, modifié).
Figure 1: *Location and Geological map of the study area.*

3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1. Matériel

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé plusieurs types de données dont les données hydrogéologiques comportant les fiches techniques des forages et les données d'essai de puits ; les cartes géologiques et topographiques des degrés carrés (coupures) de Dimbokro, Abengourou et M'Bahiakro à l'échelle 1/200 000 réalisées respectivement par la Direction de le Géologie et par le Centre de Cartographie et de Télédétection de Côte d'Ivoire (CCT). Les images

satellitaires du satellite Landsat TM (scènes 196-55 et 196-56) et radar (scène SAR) de Radarsat, acquises respectivement le 16/01/1986 et le 01/01/2000, ont été utilisées pour la cartographie du réseau linéamentaire. Cette période correspond à la saison sèche et est caractérisée par la quasi absence de nuages, ce qui contribue à la bonne visibilité des capteurs en ce qui concerne les Landsat. Selon Youan Ta *et al*. (2008), ces images satellitaires sont choisies du fait de leurs caractéristiques spectrales et spatiales permettant une bonne cartographie structurale à petite échelle.

Ces différentes images ont été fournies par le Centre de Cartographie et de Télédétection (C.C.T.) du Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement (B.N.E.T.D.) de Côte d'Ivoire. Les images satellitaires ont été traitées au laboratoire des Sciences et Gestion de l'Environnement (S.G.E.) de l'Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire) à l'aide d'un ordinateur équipé du logiciel ENVI 4.2. Le nombre de forages pris en compte dans cette étude est de 120. Ces forages ont des profondeurs variant entre 50 et 95 m mesurés par rapport à la surface topographique. Dans le cadre de cette étude, seuls les forages ayant un débit air-lift supérieur à 5 m^3/h ont été utilisés. Ces débits sont qualifiés de forts selon la classification du Comité Inter-Africain d'Études Hydrauliques (CIEH) (voir Lasm, 2000).

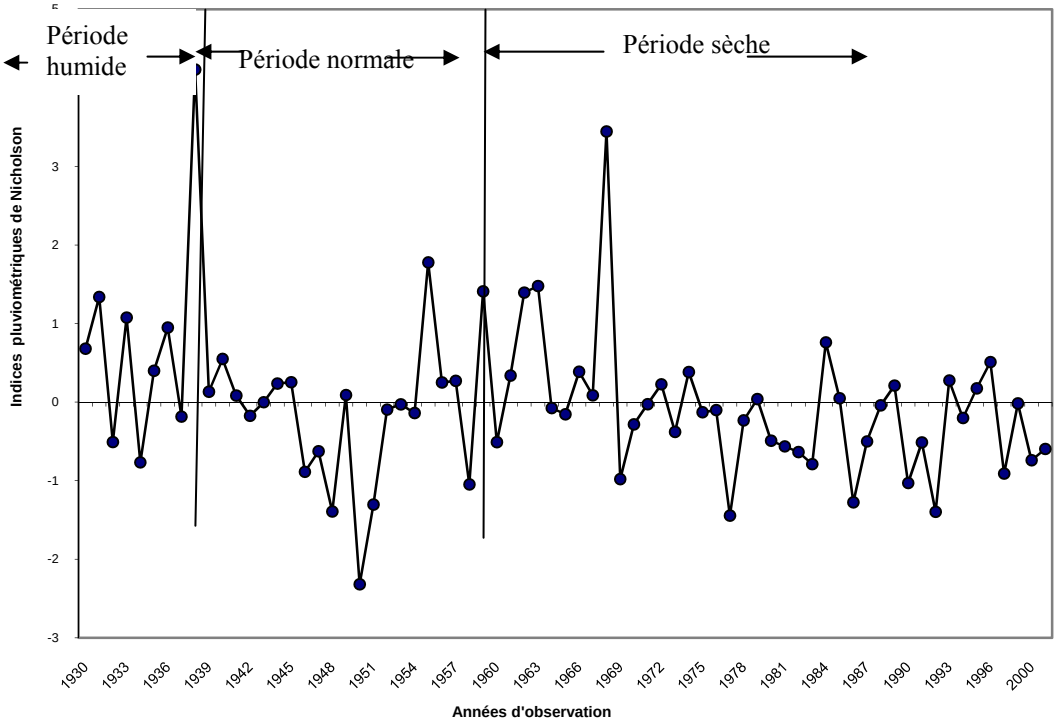


Figure 2: Évolution de l'indice pluviométrique annuel à la station de Dimbokro (1930-2001).
Figure 2: *Evolution of the yearly pluviometry at the Dimbokro station (1930-2001).*

3.2. Méthodologie

Deux cartes ont été élaborées, la première est une carte du réseau linéamentaire, issue du traitement des images satellitaires et radars. La deuxième est la carte de répartition des forages sur l'ensemble de la zone d'étude. Celle-ci met en évidence l'alignement de ces forages. Ces forages captent principalement les réseaux de fractures dans le socle. Le couplage de ces deux cartes permet de mettre en évidence la concordance existant entre ces deux entités ; c'est-à-dire les différents forages s'alignent ou sont au voisinage des fractures précédemment cartographiées par imagerie satellitaire. Si cette concordance est confirmée alors les linéaments concernés pourront être assimilés à des fractures. On pourrait ainsi utiliser ces forages dans le cadre de la validation des linéaments cartographiés par télédétection (imageries satellitaires et radar).

3.2.1. Méthodologie de traitement des images Landsat TM et Radar

3.2.1.1. Techniques de traitement des images satellitaires Landsat TM

Les techniques appliquées aux images Landsat TM sont d'ordre multiple. Après mosaïcage (scènes 196-55 et 196-56) des images Landsat TM, les différentes techniques de rehaussement d'image (compositions colorées, combinaison de bandes, analyse en composantes principales, filtrages directionnels, etc.) ont été appliquées en vue de mieux discriminer

les linéaments pour leur cartographie. Ces différentes approches ont déjà été utilisées dans le cadre de nombreux travaux dans le monde (Oberg, 1992 ; Bonn et Rochon, 1992 ; Yésou *et al*., 1993 ; Savané, 1997 ; Kouamé, 1999).

Dans le souci d'améliorer le contraste des images, des compositions colorées ont été réalisées avec les bandes 2, 4, 5 et 7. Dans le système RGB, les combinaisons 457, 752 et autres ont été appliquées pour mieux percevoir les contrastes.

Les combinaisons de bandes sont des opérations arithmétiques (addition, soustraction et division) appliquées sur les différents canaux. Plusieurs linéaments régionaux ont été mis en évidence par les combinaisons additives des canaux (TM7+TM6), (TM4+TM6). Le rapport de bandes (TM6-TM7)/(TM6+TM7) a permis également de mettre en évidence des structures régionales. Pour tenir compte des différences de résolution entre les canaux (6 et 7 par exemple) qui ont respectivement 60 et 30 m, nous avons procédé à un rééchantillonage du canal 6 et nous lui avons attribué la résolution du canal 7.

La matrice de corrélation (tableau 1) montre une forte corrélation entre les différentes bandes. La transformée de Hotelling (ou ACP) a été réalisée avec toutes les bandes de TM, afin de s'affranchir des redondances d'une part et d'améliorer le contraste d'image d'autre part. Cette technique permet de réduire en outre le nombre de bandes à traiter en comprimant les informations selon une hiérarchie. Après l'analyse, les trois premiers néo-canaux CP1, CP2 et CP3 donne respectivement 80,05 %; 10,73 % et 5,22 % de corrélation. Il en résulte donc que 96 % d'information sur l'image de cette zone sont contenues dans ces trois néo-canaux. La technique de l'étalement linéaire a ensuite été appliquée à ces néo-canaux pour une amélioration du contraste.

Les filtres directionnels de type Sobel ont été utilisés pour mettre en évidence la majorité des structures linéaires sur les images ACP (Kouamé, 1999). Ces filtres peuvent être des matrices de types 3×3, 5×5, 7×7 ou 11×11. Dans la présente étude, les filtres de types 3×3 et 11×11 ont été utilisés pour identifier les linéaments, parce qu'ils nous ont permis de mieux discriminer les linéaments. Afin de cartographier l'essentiel des linéaments de la région de Dimbokro, des traitements complémentaires ont été réalisés sur l'image Radar (Radarsat). Ce dernier traitement a permis de cartographier certaines fractures discrètes complétant ainsi la base de données du réseau linéamentaire de Dimbokro.

3.2.1.2. Techniques de traitement de l'image Radar

La technique de rehaussement des images Radarsat (année 2000 en bande C) s'est résumée à l'application de filtres adaptatifs. Un premier objectif a été d'identifier le meilleur filtre réduisant le chatoiement (structures aléatoires d'éléments de l'image produite par l'interférence des ondes électromagnétiques diffusées par des surfaces ou des objets). Plusieurs méthodes d'évaluation quantitatives et qualitatives appliquées pour le filtrage des images sont composées d'algorithmes (Lee, sigma, local sigma, médian, etc.) dont la taille des fenêtres et le nombre d'itérations varient en fonction du niveau de satisfaction de l'utilisateur. Ces filtres modifient l'image pixel par pixel, en fonction des paramètres de brillance à proximité de chaque pixel de l'image d'origine. Plusieurs techniques de filtrage spatial ont été développées par différents auteurs (Heygster, 1982 ; Hoffer *et al*., 1987 ; Touzi *et al*., 1988 ; Nezry *et al*., 1991 ; Lopez *et al*., 1993 ; Mori *et al*., 1995). Les filtres de Lee et Médian avec les fenêtres 3x3 et 7x7 ont été les plus utilisés.

Tableau 1 : Matrice de corrélation des canaux TM de landsat.
Tableau 1 : *Correlation matrix of the Landsat TM channels.*

Bande 1	**Bande 2**	**Bande 3**	**Bande 4**	**Bande 5**	**Bande 6**	**Bande 7**	**Bandes**
1	0.95	0.91	0.70	0.81	0.75	0.85	**Bande 1**
	1	0.92	0.76	0.88	0.78	0.89	**Bande 2**
		1	0.54	0.86	0.81	0.91	**Bande 3**
			1	0.70	0.55	0.61	**Bande 4**
				1	0.79	0.94	**Bande 5**
					1	0.88	**Bande 6**
						1	**Bande 7**

3.3. Extraction des linéaments

Avant l'extraction des linéaments, le réseau routier et les lignes de haute tension ont été vectorisés et superposés aux différentes images traitées afin d'éliminer les structures d'origine anthropique. La carte du réseau de linéaments est obtenue par vectorisation à l'écran des discontinuités. Les discontinuités et les changements brusques de tonalité observés sur les images sont représentés par des segments de droite. Les linéaments qui n'ont pu être répertoriés par l'image Landsat, ont pu être détectés sur l'image Radar. La couche « vecteur » issue de l'image Landsat a été superposée à l'image Radar pour compléter l'extraction du réseau linéamentaire de Dimbokro.

Les linéaments liés aux activités anthropiques (routes, chemin de fer) ayant été supprimés de l'ensemble, les autres linéaments (considérés comme des discontinuités structuraux) ont fait l'objet de l'analyse fréquentielle avec les forages productifs en vue de confirmer l'hypothèse de départ.

3.4. Superposition des forages

Dans la seconde étape, tous les forages ayant un débit élevé (Q> 5 m^3/h) ont été répertoriés et positionnés sur la carte de la zone d'étude géoréférencée dans le système WGS 84 (UTM, zone 30). Ces forages ont été par la suite superposés à la carte de fracturation obtenue par télédétection à l'aide du logiciel ENVI 4.2.

4. RÉSULTATS

Fracturation et forages productifs

La figure 3 présente la répartition spatiale des forages dans la région de Dimbokro. L'observation de cette carte montre un certain alignement des forages à certains endroits. Cet alignement pourrait représenter une discontinuité tectonique.

L'analyse des réseaux de fractures majeures de cette région obtenus après les divers traitements des images (Landsat TM et Radar) (fig. 4) permet de mettre en évidence les orientations dominantes des linéaments. L'histogramme circulaire de la fracturation en nombre et en longueurs cumulées montre que la distribution des familles de fractures est d'une manière générale homogène (fig. 5). En effet, sur cet histogramme aucune famille de fractures ne dépasse guère les 10 % en fréquence. Cependant, certaines familles se démarquent de l'ensemble, il s'agit des familles N20-30, N30-40, N40-50, N50-60 et N90-100 avec des fréquences qui oscillent entre 7 et 10 %. Ces familles peuvent être considérées comme principales, le reste constitue les familles secondaires. Ce résultat se justifie dans la mesure où les petites fractures n'ont pas été prises en compte dans cette analyse. Au niveau des longueurs cumulées, seule la classe de fracturation N90-100 dépasse les 10 % en fréquence et constitue la classe majoritaire de fracturation, les classes de fractures N80-90, N40-50, N50-60 et N60-70, apparaissent comme les directions secondaires. Ces résultats semblent montrer que les classes directionnelles dominantes sont les plus longues.

Le couplage de la carte du réseau linéamentaire et la carte de répartition spatiale des forages de débit (Q > 5 m^3/h) est illustré par la figure 6. Ce couplage semble montrer globalement une concordance entre ces deux entités. En effet, les différents points représentant les forages s'alignent ou sont proches des différents linéaments cartographiés. Ce résultat montre que les débits les plus importants obtenus dans cette région seraient liés aux fractures de taille kilométrique. Certaines de ces fractures n'ont pu être cartographiées par télédétection. Ces fractures non mise en évidence sont celles dont les techniques mises en œuvre dans le cadre de cette étude n'ont pu discriminer. Cependant, l'organisation spatiale de différents forages semble indiquer bien un alignement morpho structural qui est témoin de l'existence de discontinuités tectoniques.

Au regard des forts débits d'exploitation observés au niveau de ces forages (5 à 45 m^3/h), nous pouvons retenir que ces fractures kilométriques sont hydrauliquement actives. Des débits importants (Q> 15 m^3/h) ont été enregistrés au niveau de certaines fractures. Ces débits ont été enregistrés sur des familles de fractures N-S qui constitueraient des familles de fractures dignes d'intérêt d'un point de vue hydrogéologique. Les prospections hydrogéologiques pourraient tenir compte de ces fractures qui apparaissent parmi les familles les plus productives d'un point de vue hydraulique.

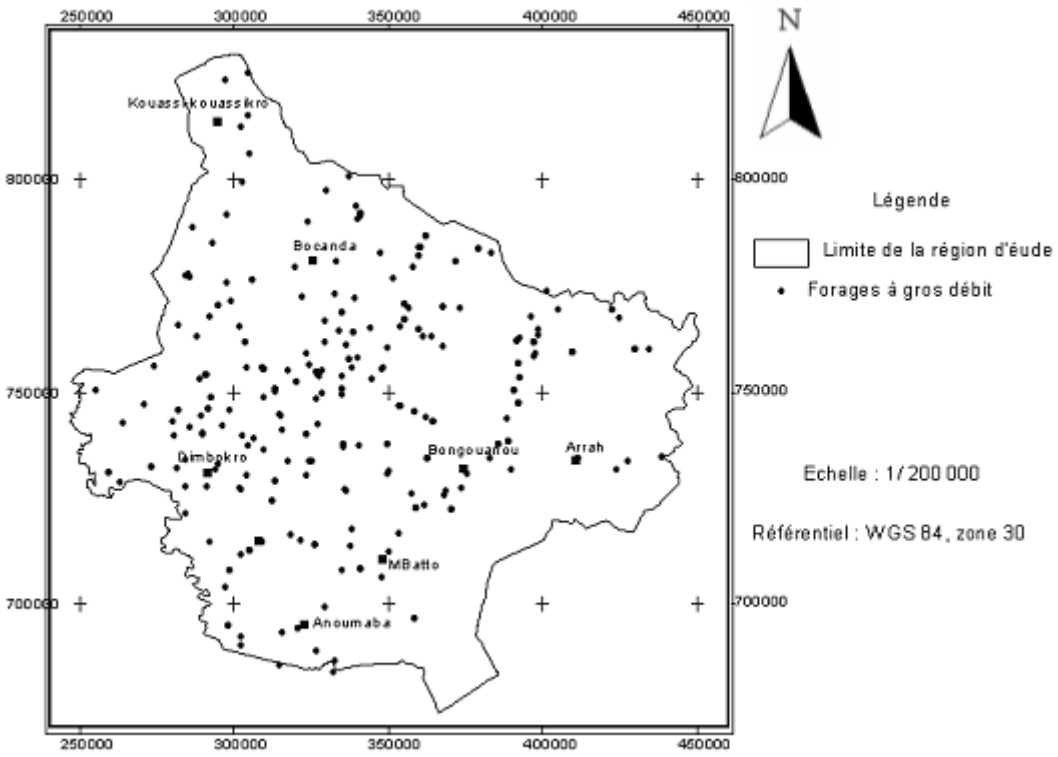


Figure 3: Carte de répartition des forages ayant un débit important (≥ 5 m^3/h).
Figure 3: *Drillings distribution map with an important discharge (≥ 5 m^3/h).*

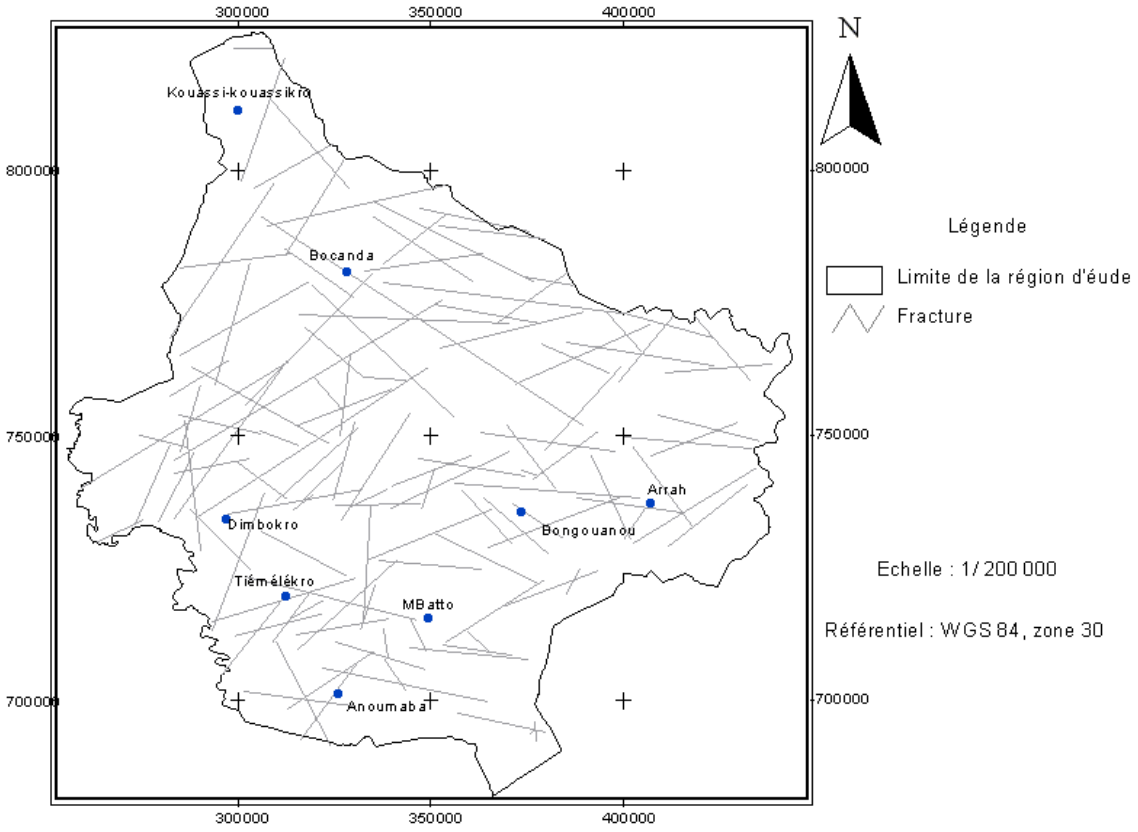
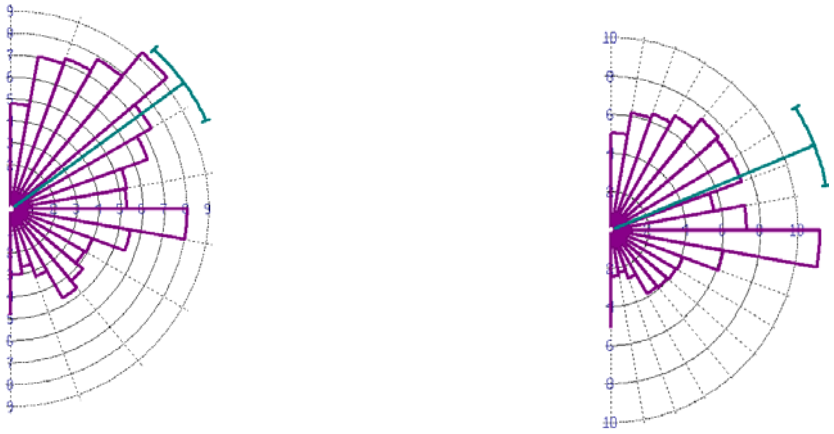


Figure 4 : Carte de fracturation obtenue à partir du traitement d'image Landsat et Radar.
Figure 4 : *Fracturing map obtained from Landsat and radar image analysis.*



A : Fréquence en nombre. B : Fréquence en longueur cumulée.

Figure 5 : Rosaces directionnelles en fréquence relative des fractures kilométriques de la région de Dimbokro.
Figure 5 : *Orientation diagrams in relative frequency of the kilometric fractures of the Dimbokro area.*

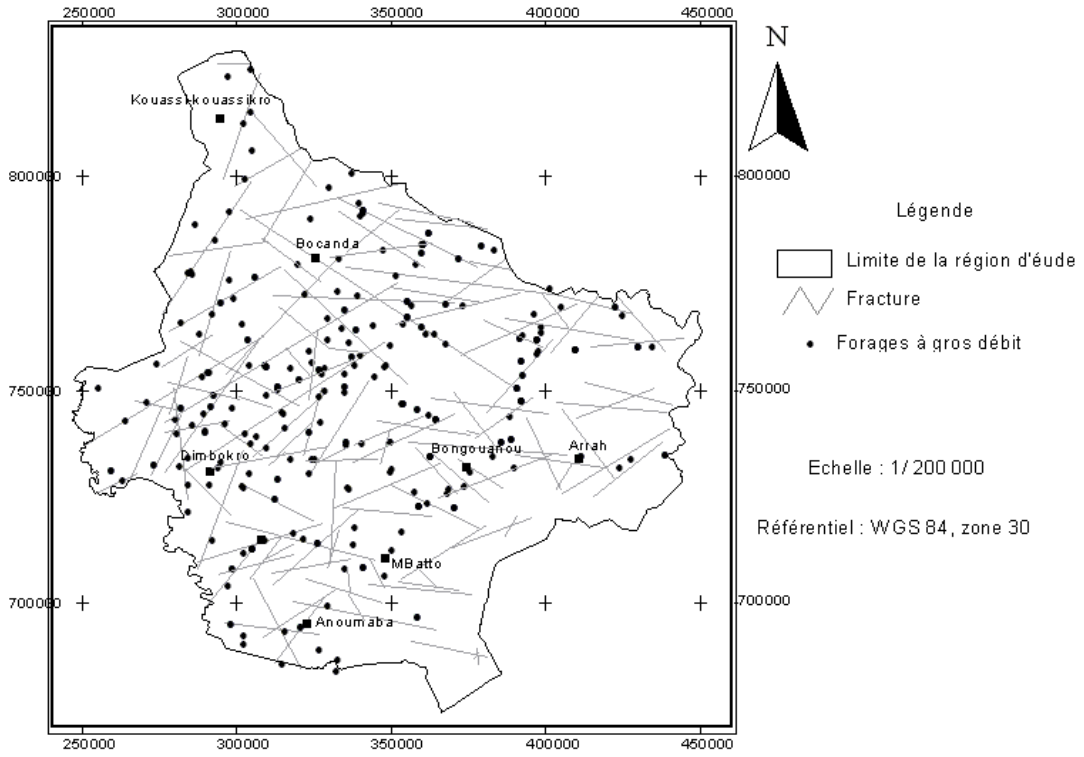


Figure 6 : Couplage entre carte de fracturation obtenue à partir du traitement d'image et positionnement de forage productifs.
Figure 6 : *Coupling between map of fracturation obtained from treatment of image and productive location drillings.*

5. DISCUSSION

La région de Dimbokro se caractérise par sa forte température moyenne annuelle (30°C). La mobilisation des ressources en eau reste l'une des difficultés majeures. La forte évapotranspiration entraîne un tarissement prématuré des puits dans les réservoirs d'altérites. L'étude des débits d'exploitation dans cette région, révèle que plus de 65% des forages ont un débit inférieur à 2,5 m^3/h, débit caractérisé de faible par certains auteurs (Soro, 1987 ; Biémi, 1992 ; Savané, 1997). Les faibles débits observés lors de ces campagnes d'implantation des forages, pourraient être exclusivement imputés aux manques d'études sérieuses lors de la mise en place des ouvrages. En effet, les forages sont implantés sous les seules considérations géomorphologiques parce que les gros débits ne sont pas recherchés obligatoirement pour l'approvisionnement en eau potable des populations rurales. La géophysique n'intervient que lorsque le taux d'échec est élevé (Faillat, 1986 ; Lasm, 2000). C'est ce qui expliquerait les débits généralement faibles dans les programmes

d'implantation de forages dans domaine rural à l'échelle nationale (Faillat, 1986 ; Soro, 1987 ; Biémi, 1992 ; Savané, 1997). Ces débits peuvent être améliorés en utilisant la géophysique, la photo-interprétation et même la télédétection (images satellitaires et radar). Dans la région étudiée, seules 20 % des forages de la zone d'intérêt, ont un débit supérieur à 5 m^3/h. Pour Savané (1997), les gros débits sont le témoin de l'existence de domaine favorable pour l'hydraulique urbaine et l'agriculture motorisée. Cette bonne productivité, serait tributaire des bonnes propriétés géométriques des réseaux de fractures. En effet, selon Savané *et al.* (1995), ces fractures, lorsqu'elles ne sont pas remplies de recristallisations secondaires, sont ouvertes du fait de leur orientation correspondant à la direction des formations birimiennes (N40°) et constitue le siège des écoulements souterrains. Les travaux de certains auteurs (Carlsson et Olsson, 1981 ; Razack, 1984 ; Arthaud et Jalludin, 1987) montrent que la déformation des roches compétentes à une contrainte est fonction de la lithologie et surtout de l'orientation des principales contraintes par rapport à la fracture. L'ouverture et la fermeture des fractures sont donc conditionnées par le jeu des mouvements tectoniques (compression ou en distension). La tectonique joue un important rôle dans l'acquisition des propriétés géométriques et partant des propriétés hydrauliques des fractures (Lasm, 2000 ; Lasm *et al*., 2004a).

La concordance entre alignement des forages et certains linéaments cartographiés montre que ces linéaments sont des fractures. Ce qui confirme qu'en milieu de socle cristallin, seules les fractures sont les véritables couloirs d'eau souterraine. Les résultats des présents travaux sont en accord avec les données de la littérature (Biémi, 1992 ; Savane *et al*., 1995 ; Lasm, 2000 ; Lasm *et al*., 2004a). Les nœuds des fractures et les fractures de taille kilométrique sont les zones favorables pour les gros débits. La recherche de ces fractures devient dès lors une priorité dans la prospection hydrogéologique. Cependant, les réseaux de fractures obtenues par imagerie satellitaire sont généralement validés par les connaissances de terrain et les cartes géologiques et photogéologiques existantes. La recherche des fractures sur le terrain n'est pas toujours aisée, surtout en milieu couvert par de fortes couches d'altération.

Cette étude a permis de montrer la bonne concordance entre les différents forages productifs et les linéaments cartographiés par les images satellitaires. Une telle approche si elle est confirmée sur d'autres sites avec des échelles plus grandes, est un élément intéressant dans la connaissance des réseaux de fractures de Côte d'Ivoire.

Les forages productifs pourraient donc être utilisés comme un élément de validation des fractures cartographiées par télédétection. En plus, la bonne connaissance du réseau de fracturation de cette région est un gage qui permettrait d'optimiser l'alimentation en eau potable des populations soumises ces dernières années à la sévérité du climat.

6. CONCLUSIONS

Différentes techniques de traitement des images (composition colorée, filtres adaptatifs et directionnels) ont permis d'extraire un réseau linéamentaire dans la région de Dimbokro. La mise en correspondance de la localisation des forages productifs avec le tracé des linéaments déterminés par télédétection, a permis l'identification des types de fractures susceptibles de constituer des réservoirs d'eau. Les réservoirs souterrains les plus productifs dans cette région sont essentiellement les réservoirs formés par les réseaux de fractures de grande taille. Les forages productifs s'organisent suivant ces fractures. La bonne connaissance de l'ensemble des forages à forte productivité devrait contribuer à la validation de la fracturation régionale.

Dans le futur, nous comptons caractériser les réseaux de fractures (géométrie, connectivité) de la région de Dimbokro par la méthode isotopique par exemple. Cette démarche permettra d'appréhender le mécanisme de recharge de ces aquifères en vue de l'élaboration des modèles numériques représentatifs qui conduiront à la simulation des réservoirs fracturés.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement le BNETD/CTT qui a mis à notre disposition les différentes images de télédétection pour la réalisation de cette étude ainsi que les instructeurs anonymes qui ont contribué à l'amélioration de ce papier à travers leurs remarques pertinentes et constructives.

RÉFÉRENCES

Andersson, C., Benabderrahmane, A., Bystrom, J. et Oberg M. (1992) "Remote sensing as a tool in groundwater assessment. Example of Tamanrasset region", Hoggar, Algeria. Hydrogéologie, n° 1-2, p. 93-99.

Arthaud, F., Jalludin, M. (1987) « Cartographie des fractures d'un réservoir hydrogéologique en milieu volcanique à partir de données HRV de SPOT contrôlées sur le terrain (basaltes miocènes de Djibouti) », *Télédétection et Cartographie.* Ed. AUPEL-UREF, Press Univ. Québec, p. 83-94.

Biémi, J. (1992) Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique, et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : hydrostructural, hydrodynamique et isotopique des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Marahoué (C.I). Thèse de doctorat *ès* Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 479 p.

Biémi, J., Jourda, J. P., Deslandes, S. et Gwyn, H. (1997) Positionnement, productivité et gestion des forages en milieu fissuré en Côte d'Ivoire par télédétection et système d'information géographique. Water reports, 16 p.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) *Précis de télédétection : principes et méthodes*. Presse université de Québec. AUPELF-UREF, Vol. 1, 485 p.

Carlsson, A.et Olsson, T. (1981) « Caractéristiques de fracture et propriétés hydrauliques d'une région au sous-sol cristallin en Suède », *Bulletin du B.R.G.M.,* Sect. III, 03, p. 215-233.

De Marsily, G. (1994) « Hydrogéologie : comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants », collection Science de la terre, 243 p.

Faillat, J.P. (1985) « Synthèse et commentaire d'étude de forage en zone de socle fissuré et éruptif et métamorphique, principalement en Afrique ». 110e Congrès National de la Société Savante, Colloque Géologie Africaine, Montpellier, Fasc.VI, p. 317-329.

Faillat, J.P. (1986) Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat *ès* Sciences Naturelles, Université de Languedoc, Montpellier-France, 534 p.

Faillat, J. P. (1987) « Aquifères fissurés en zone tropicale humide: structure hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'ouest) ». *Hydrogéologie*, n°. 2, p. 109-112.

Guiraud, R. (1988). « L'hydrogéologie de l'Afrique ». *Journal of Africa Earth Sciences*, Vol. 7, n°. 3, p. 519-543.

Heygster, G. (1982) "Rank filters in digital image processing". *Computer Graphics and Image Processing* 19, p. 148-164.

Hoffer, R. M., Lozano-Garcia, D.F. and Gillespie, D. D. (1987) "Characterizing forest stands with multi-incidence angle and multipolarized SAR data". *Adv Space Res*., Great Britain 7, p. 309-311.

Kouame, K. F. (1999) Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistiques et fractales à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de 3e cycle, Université de Cocody (Abidjan-Côte d'Ivoire), 194 p.

Lasm, T. (2000) Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (Domaine Archéen). Thèse Université de Poitiers (France), 274 p.

Lasm, T., Kouamé, F., Oga, M. S., Jourda, J. R. P., Soro, N. et Kouadio, B. H. (2004a) « Etude de la productivité des réservoirs des zones de socle. Cas du noyau archéen de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire) ». *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, vol. 5, p. 97-115.

Lopez, A., Nezry, E., Touzi, R and Laur, H. (1993) « Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR image ». *International Journal of Remote Sensing,* Vol. 14, n°. 9, p. 1735-1758.

Margat J. (1983) Rapport sur le thème 3 du colloque : Les milieux discontinus en hydrogéologie. Orléans 16-17 novembre 1982. Hydrogéologie et Géologie l'Ingénieur, 1, BRGM, Orléans, p. 25-33.

Mori, M., Yamamoto, N. and Yokoyama, T. (1995) « Enhancement of J-ERS-1 SAR imagery », in *third thematic conference on Remote Sensing for Marine and Coastal environments*, Seattle, WA, Vol. II, p. 801-807.

Nezry, E., Lopez, A. and Touzi, R. (1991) "Detection of structural and textural features for SAR images filtering", in *proceeding of IGARSS 91*, p. 2169-2172.

N'go, Y. A., Goné, D. L., Savané, I. Goblé, M. M. (2005) « Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la régiond'Agboville (Sud ouest de la Côte d'Ivoire) : caractérisation hydroclimatique et physique ». *Afrique Science, Vol.* 1, n°. 1, p. 127-144.

Oberg, M. (1992) « Satellite image enhancement techniques for hydrogeological mapping ». *Hydrogéologie*, n°1-2, p. 89-91.

Razack, M. (1984) Application des méthodes numériques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie, Thèse de doctorat *ès* Sciences Naturelles, Université du Languedoc (Montpellier II - France), 384 p.

Savané, I. (1997) Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologiques à Référence Spatiale. Thèse de doctorat *ès* Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 386 p.

Savané, I., Bénié, G. B., Guyon, Q. H. et Biémi, J. (1995) Application de la télédetection à la recherche des eaux souterraines en milieu de socle cristallin : cas d'Odienné, Côte d'Ivoire. AUPELF-UREF, Télédétection et Ressource en eau, Vème Journée Scientifique de Tunis, Presse de l'Université de Québec, 1995, p. 111-120.

Soro, N. (1987) Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du sud-est de la Côte d'Ivoire (bassin versant de la Mé). Thèse de doctorat 3è cycle Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu (France), 239 p.

Tornthwaite C. W (1954) *The measurement of potential evapotranspiration*. J.M. Mather, sea brook, new Jersey, 225 p.

Touzi, R., Lopez, A. and Bousquest, P. (1988) "A statistical and geometrical edge detector for SAR images". *IEEE Transactions on Geoscience, Remote Sensing, vol.* 26, ,n°. 6, p. 764-773.

Yao, D., Delor, C., Gadou, G., Kohou, P., Okou, A., Konate, S. et Diaby I. (1995) Notice explicative de la carte géologique feuille de Dimbokro, 21 p.

Yésou, H., Poin, J. C., Besnus, Y., Saint Jean, R . (1993) Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical. Exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo). IIIème Journée Scientifique des Réseaux de Télédétection, UREF, Toulouse, 13-16 novembre 1990, p. 143-164.

Youan Ta, M., Lasm, T., Jourda, J. P., Kouame, K. F., Razack ,M. (2008). « 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) ». *Télédétection, Vol. 2, p. 34-42*