UTILISATION DES IMAGES LANDSAT ETM+ ET DU SIRS POUR LA CARTOGRAPHIE LINÉAMENTAIRE ET THÉMATIQUE DE SOUBRE-MEAGUI (SUD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE): CONTRIBUTION À LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

Mathunaise Vano SOROKOBY[1*], Mahaman Bachir SALEY[1], Fernand Koffi KOUAMÉ[1], Eric M'moi Valère DJAGOUA[1], Monique BERNIER[3], Affian KOUADIO[1] et Jean BIÉMI[2]

[1]Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Université de Cocody, 22 BP 801 Abidjan 22, République de Côte d'Ivoire; courriel: sdvano@yahoo.fr; basaley@yahoo.fr; kouamef@yahoo.fr
[2]Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la Terre et des ressources Minières (STRM), Université de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, République de Côte d'Ivoire. Tel. / Fax: (225) 22 44 52 70.
[3]Institut national de la Recherche Scientifique, Centre-Eau, Terre et Environnement, 490 de la Couronne, Québec-(Qc) –G1K-9A9-(Canada); courriel: moniquebernier@ete.inrs.ca;

Soumis le 2 mars 2009; accepté le 6 juillet 2010 - © *Revue Télédétection*, 2010, vol. 9, n° 3-4, p. 209-223

Résumé :

L'exploration des eaux souterraines en zone de socle est l'une des voies indiquées pour la fourniture des populations en eau. En effet, les aquifères du socle fissuré constituent d'excellents réservoirs d'eau souterraine (Kouamé, 1999; Jourda et al, 2005). L'objectif de ce travail est de réaliser la carte des linéaments et les cartes thématiques des ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui en vue de leur gestion efficiente. L'approche méthodologique utilisée est la télédétection couplée au Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS). Grâce aux différents traitements appliqués aux images Landsat ETM+ (correction géométrique, rehaussement, ACP, composition colorée, filtrage spatial), les linéaments structuraux ont été extraits manuellement. La validation de ces linéaments avec des cartes photogéologiques préexistantes a permis de réaliser la carte de fracturation de Soubré-Méagui. L'intégration de cette carte dans le SIRS avec les données hydrogéologiques a permis la cartographie thématique des ressources en eau souterraine. Les cartes de disponibilité, d'accessibilité, d'exploitabilité et de potentialité en eau souterraine ont été réalisées. Cette étude révèle que 82,60 % du domaine présente une bonne et excellente disponibilité en eau souterraine. Ces ressources sont difficilement accessibles car 62 % du territoire présente une accessibilité mauvaise à médiocre. Elles sont aussi difficilement exploitables car 76.63 % de la superficie présente une exploitabilité des ressources en eau souterraine mauvaise et médiocre. La carte des potentialités en eau souterraine révèle que 60% du domaine présente un excellent à bon indice de potentialité; ce qui prédit de bons débits d'exploitation des futures forages dans les zones concernées.

***Mots-clés** : Télédétection, SIRS, linéaments, cartographie thématique, ressources en eau souterraine, Soubré-Méagui.*

Abstract

The exploration of groundwater in hard rock is one of the ways indicated for supplying populations in water. In fact, the cracked bedrock aquifers are excellent groundwater reservoirs (Kouame, 1999; Jourda et al, *2006).The aim of this work is to produce a map of lineaments and thematic maps of Soubré-Méagui's groundwater resources for their efficient management. The method uses remote sensing associated to Spatial Reference Information System (SRIS). Indeed, thanks to different treatments applied to Landsat ETM + images (geometric correction, enhancement, CPA, RGB composition, space filtering), structural lineaments have been extracted. The validation of these lineaments with photogeological map has helped to map fracturing of Soubré-Méagui. The integration of this map in the SRIS with hydrogeological data has made possible thematic mapping of groundwater resources. Maps of availability, accessibility, exploit-*

ability and potentiality of groundwater ressources were performed. This study shows that 82.60% of the area provides a good availability of groundwater resources. These resources are however difficult to reach because 62 % of the area presents bad and poor accessibilities. Therefore these resources are fitfully exploitable with 76.63 % of the area presenting bad and poor groundwater resources exploitability. The map groundwater potentiality reveals that 60% of the area presents excellent and good potentialities, predicting good flow of future drilling operations in the concerned areas.

***Keywords**: Remote sensing, SRIS, lineaments, thematic mapping, water resources, Soubré-Méagui.*

1. INTRODUCTION

La région de Soubré-Méagui objet de la présente étude se trouve dans cette situation d'accessibilité difficile aux ressources en eau souterraine. En effet les ouvrages hydrauliques déjà réalisés ont des débits en général faibles et sont inégalement répartis (Sorokoby, 2005). La région, favorable à la pratique de l'agriculture (café, cacao, hévéa, palmier à huile), attire de nombreuses populations qui affluent sans cesse augmentant ainsi la densité de population déjà très forte dans la région dans un contexte de variabilité climatique très marquée (Servat et *al.,* 1999; Adja, 2009). Ainsi le problème d'approvisionnement en eau devient préoccupant et il urge que des pistes de solution soient rechercher en vue de couvrir les besoins des populations en eau. L'une des solutions réside dans l'exploration des eaux souterraines et la connaissance des aquifères qui les contiennent à l'aide de la Télédétection et du Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS). En effet, en zone de socle cristallin comme c'est le cas pour la zone d'étude, l'utilisation de cette méthode a donné des résultats satisfaisants (Biémi, 1992; Savané, 1997; Kouamé, 1999, Saley, 2003; Jourda et *al*, 2006).

Ce travail vise la cartographie linéamentaire et thématique des ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui en vue d'une gestion durable de celles-ci.

L'approche méthodologique utilisée est la télédétection couplée avec le Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS). Il s'agira d'utiliser les techniques de traitements des images Landsat ETM+ pour cartographier les linéaments structuraux et établir la carte de fracturation et de mettre en place un SIRS pour la réalisation des cartes thématiques des ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui.

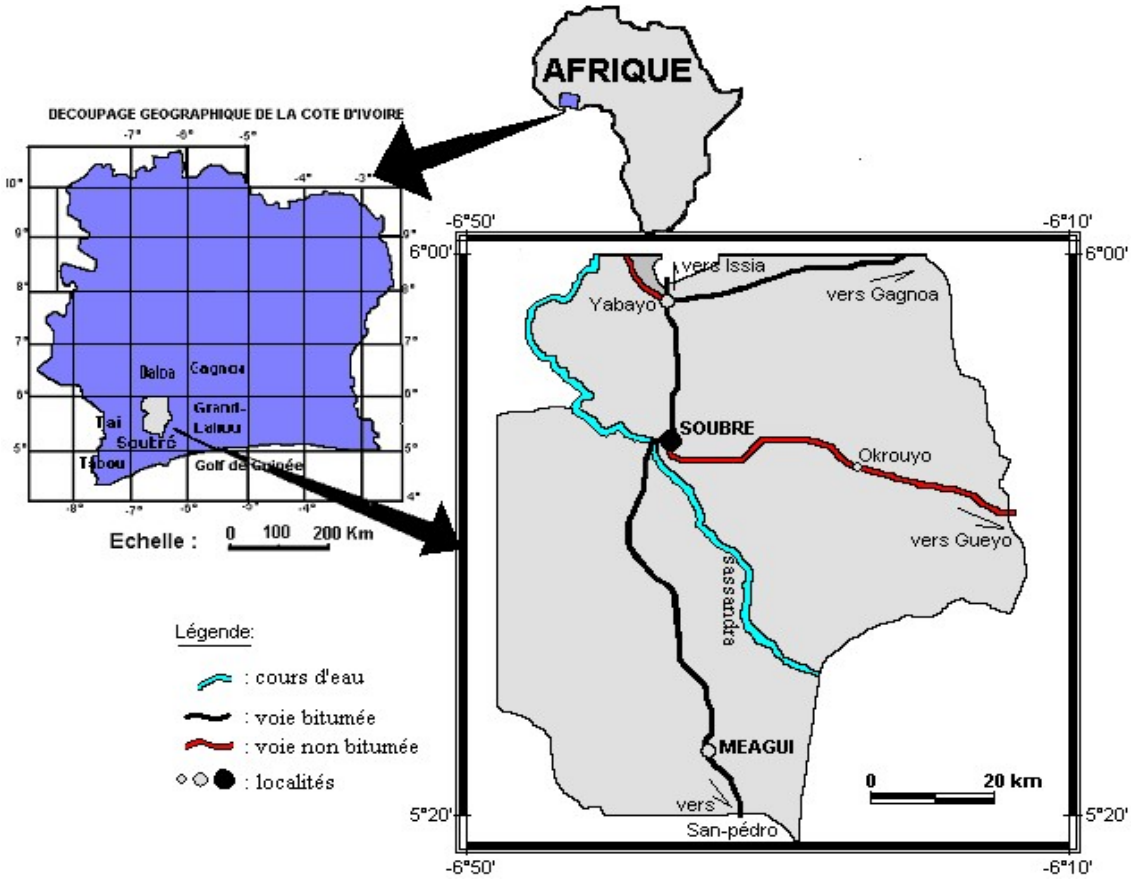


Figure 1: Carte de présentation de la zone d'étude

2. GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

Le secteur Soubré-Méagui se situe entre les latitudes 5º18'et 6º Nord et les longitudes 6º10' et 6°50' Ouest. Il inclut les sous-préfectures de Soubré, Okrouyo et une partie des sous-préfectures de Méagui, Liliyo et Oupoyo (figure 1). La population atteint environ 430 000 habitants (INS, 1998) avec une superficie totale de 3705 km^2 soit une densité de 116 habitants au kilomètre carré. Cette population est essentiellement constituée d'autochtones Bété et Bakwé, d'allogènes Baoulé et Dioula et d'étrangers Burkinabé, Maliens et Guinéens.

La région de Soubré est une vaste pédiplaine ondulée s'inclinant graduellement d'une altitude moyenne de 200 m au Nord à 80 m au Sud. Trois types d'unités s'y distinguent: des plaines intérieures, des bas plateaux et quelques hauteurs qui viennent rompre la monotonie de ce relief (les monts Trokoua à l'Ouest dont l'altitude varie entre 426 m et 445 m). La plupart des sols de texture argileuse et limoneuse sont en général des sols ferrallitiques fortement à moyennement désaturés selon Dibi (1993) cité par Sorokoby (2005).Ces sols sont bien adaptés à la production agricole (café, cacao, hévéas, palmier à huile, cocotier, bananier etc.). Le climax de la zone est une forêt dense humide sempervirente. Elle est drainée sur son ensemble par un réseau de cours d'eau particulièrement très dense (Sassandra, Débo, Gô, Bô, Bao) qui participent à la recharge de la nappe d'eau souterraine à travers un réseau de fractures sous-jacentes interconnectées dans les roches granitiques et les altérites. Le fleuve Sassandra est le plus important de la région du Sud-ouest ivoirien par sa longueur et par son débit (1120m³/s à la station de Soubré). Deux domaines climatiques essentiels caractérisent la région de Soubré: à l'extrême Nord-ouest le climat baouléen et sur le reste le climat attien. La pluviométrie moyenne annuelle varie entre 1400 et 2200 mm. Le déficit hydrique cumulé varie de 150 à 250 mm. La durée annuelle d'insolation est faible et varie de 1800 heures à Soubré à 1600 heures à Méagui. La température moyenne annuelle oscille entre 25°C et 27ºC avec une très faible variation dont l'amplitude est inférieure à 3,5ºC.

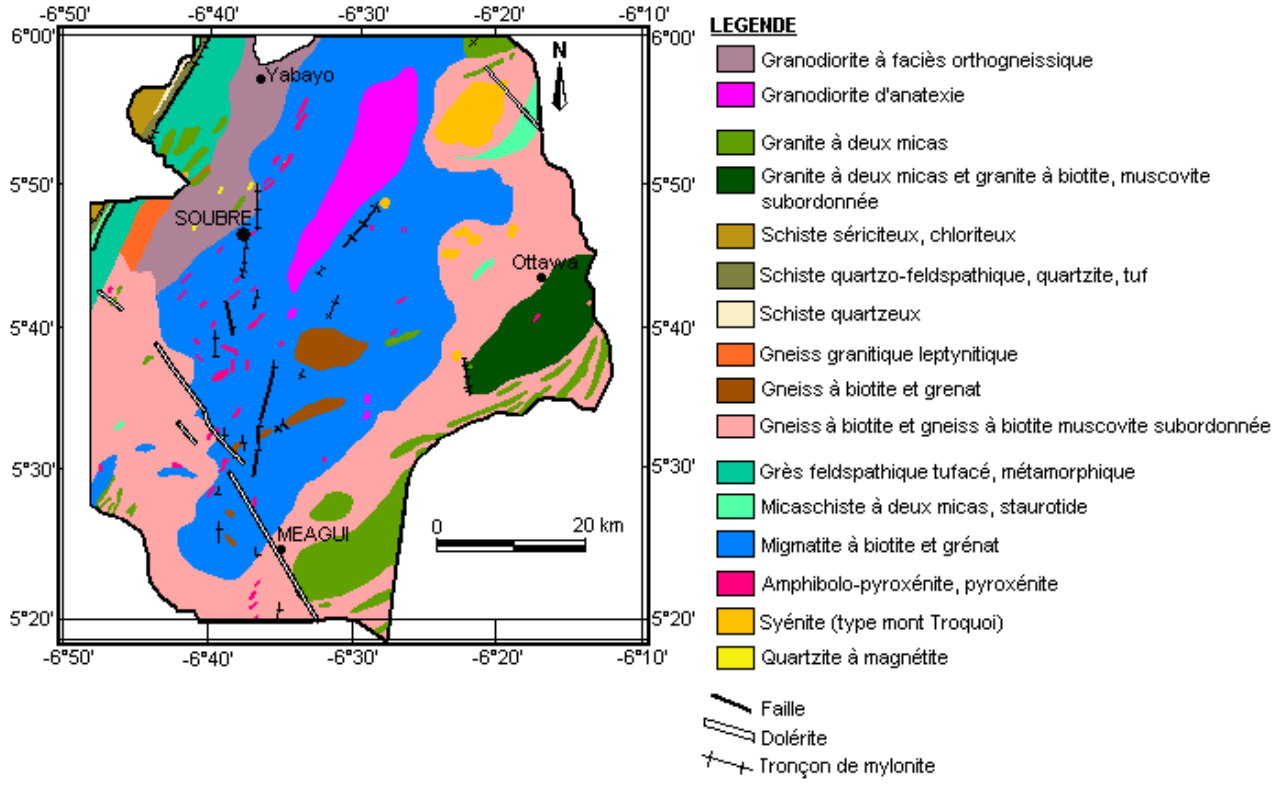


Figure 2: Carte géologique de Soubré-Méagui

La géologie du secteur d'étude a été largement étudiée par Papon (1973), Tagini (1971) et Kouamelan (1996). Tagini (1971) définit huit unités géologiques regroupées et présentées sur la carte de Soubré (figure 2) et qui sont disposées selon un alignement NE-SW. Ce sont des syénites d'âge protérozoïque inférieur à permien, des granites éburnéens composés de granites à deux micas et des granitoïdes, des formations birimiennes caractérisées par les métasédiments indifférenciés (flyschs), des roches métamorphiques d'âge incertain, des métasédiments associés à des vulcanites, des migmatites anciennes antébirimiennes. Une faille de direction NE-SW affecte la partie nord-ouest de la zone sur une distance d'environ 65 km. Une autre de direction N-S se situe sur toute la totalité de son parcours dans les schistes ou métasédiments et est ponctuée de quelques tronçons mylonitiques (Géomines, 1982). Quelques petites failles secondaires de longueur maximum 15 km et de direction N-W ou franchement N-S sont présentes au contact des granodio-

rites et des migmatites. On note sur toutes ces failles, plusieurs zones à mylonites. Il est aussi à signaler la présence de nombreux dykes doléritiques de direction NW-SE dans la moitié sud de la zone.

Sur le plan hydrogéologique, la région d'étude fait partie du socle cristallin. Ce dernier présente des réserves d'eau se développant dans les aquifères dont l'importance est fonction du niveau d'altération et de fracturation de la roche mère. On distingue dans la région les nappes des alluvions et les nappes profondes ou nappes de fissures. Les nappes des alluvions sont exploitées généralement au niveau des campements par les puisards et les puits paysans (diamètre variant entre 0,8 m et 1 m, profondeur moyenne de 10 m). Les nappes de fissure sont généralement captées par les forages modernes dans leur majorité. Ces forages se situent dans la presque totalité des grands sites d'habitations (gros villages, campements importants) de la région. Leur profondeur varie entre 60 et 90 m (Ottawa, Koziayo).

3. MATERIELS ET METHODES

3.1. Données utilisées

Pour notre étude nous avons utilisé une image brute Landsat 7 ETM+ acquise le 08 février 2003; scène (197; 056), une image géoréférencée ETM+ de Landsat 7 du 18 février 2001 de la même scène ayant servi d'image de référence pour le géoréférencement de l'image brute, une carte topographique à l'échelle 1/500000 (feuillé Sud-Ouest) acquise au CCT (Centre de Cartographie et de Télédétection) et qui date de 1996, une carte topographique à l'échelle 1/200000 acquise également au CCT et datant de 1966, une carte géologique du secteur à l'échelle 1/200.000 (degré carré de Soubré) provenant de la Direction de la Géologie et des données sur les caractéristiques des forages du secteur d'étude (niveau statique de l' eau, débits d'exploitation, profondeurs d'ouvrages, etc.) provenant de la Direction de l'Eau.

3.2. Méthodes

3.2.1. Cartographie des structures linéamentaires de Soubré-Méagui par télédétection

La cartographie des linéaments de la zone d'étude a été rendue possible grâce aux différents traitements appliqués à l'image brute Landsat ETM+ scène 197-056 du 08-03-2003. A partir de l'image géoréférencée Landsat ETM+ scène 197-056 du 18-02-2001, nous avons procédé au géoréférencement de l'image brute. Nous avons appliqué à cette image les techniques de traitements que sont le rehaussement, l'analyse en composante principale (Bonn et *al*, 1992), le rapport de bandes, la composition colorée, le filtrage spatial des données (filtre directionnel et non directionnel). Ces différents traitements ont été effectués sur les composantes ACP 1 et ACP 2 car ces deux composantes renferment 87,81 % de l'information. Les différents filtres par contre ont été appliqués sur la composante ACP 2 car rehaussant toutes les discontinuités images assimilables à des linéaments géologiques (Kouamé et *al*, 2005). Au niveau du relevé des linéaments structuraux, deux approches méthodologiques sont à considérer selon Kouamé (1999). La première consiste à extraire de façon automatique les linéaments par morphologie mathématique (Moore and Waltz, 1983; Bonn et Ronchon, 1992 cités par Kouamé, 1999). La seconde que nous avons utilisée consiste en une extraction manuelle des linéaments par photo-interprétation (Biémi et *al*, 1991; Savané, 1997; Kouamé, 1999; Saley, 2003). Cette méthodologie nous a donc permis d'extraire les linéaments de la zone d'étude.

3.2.2. Validation de la carte de linéaments

La vérité terrain est le moyen le plus fiable pour la procédure de validation des cartes linéamentaires (Kouamé, 1999). Les failles d'extension kilométrique à hectométrique sont immédiatement reconnaissables sur le terrain selon Larson (1977) cité par Savané (1997). Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les cartes géologiques de Tagini (1971), de Papon (1973), la carte photogéologique de Biémi (1992), la carte du réseau hydrographique et la carte des forages à haut débits. Ces cartes nous ont servi de support à la validation de la carte de fracturation de Soubré-Méagui. La démarche a consisté à identifier et à répertorier toutes les failles parallèles aux segments de cours d'eau rectilignes, à prendre en compte les linéaments identiques sur les différentes cartes et ceux proches des forages à haut débits. En effet, les cours d'eau rectilignes sont en fait l'expression en surface des failles de tension selon Savané (1997) et sont le lieu de circulation intense des eaux souterraines. Par ailleurs, les travaux de Jourda et *al* (2006) ont révélé que les forages les plus productifs sont situés sur les accidents majeurs et peuvent donc être un outil essentiel à la validation des linéaments. Cette méthode nous a permis de dresser la carte des fractures majeures de Soubré-Méagui.

3.2.3. Conception et mise en place de la base de données hydrogéologiques de la zone d'étude

La cartographie thématique des ressources en eau souterraine nécessite la conception et la mise en place d'une base de données hydrogéologiques de la zone d'étude. La méthodologie de conception d'une base de données hydrogéologiques consiste d'abord à collecter des donnés caractéristiques de forages du secteur d'étude, ensuite à les répertorier dans un tableau (Saley, 2003). Pour Soubré-Méagui, les données collectées font référence au département, la sous-préfecture, le village, les coordonnées géographiques de ces villages, la population, la carte topographique, la nature et l'état de l'ouvrage, la profondeur et le débit d'exploitation de l'ouvrage, le niveau statique de la nappe et l'épaisseur des altérites, la géologie , la fracturation et le réseau hydrographique et enfin les images satellitaires. Tous ces éléments seront re-

groupés dans un tableau et constitueront la base de données hydrogéologiques de notre secteur d'étude qui servira à la cartographie thématique.

La cartographie thématique obéit à un certain nombre de critères qu'il est important d'intégrer pour sa réalisation. La sélection de ces critères dépend de la nature de la carte thématique à réaliser. La combinaison de plusieurs critères se fait grâce aux «poids» ou «codes» qui leur sont respectivement affectés en vue de produire des cartes de synthèse. L'affectation de ces «poids» ou «codes» se fait selon l'importance que l'on donne à tel ou tel critère (Savané, 1997; Saley, 2003). Les critères peuvent être multiples mais pour la réalisation de notre étude, le choix a porté sur les critères suivants tels que la profondeur de l'ouvrage, l'épaisseur d'altérites, le débit d'exploitation, le niveau statique de la nappe, la densité de drainage (le taux d'infiltration), la densité de la fracturation. Selon l'importance de chaque critère et pour une analyse et une interprétation plus conséquente nous avons réduit le nombre de classes à 4 ou 5: très faible, faible, moyen, fort et très fort. Ainsi cette démarche nous a permis d'organiser les différents critères présentés dans le tableau 1. Ces différents critères nous ont permis de dresser les différentes cartes liées aux paramètres hydrogéologiques de Soubré-Méagui. Ce sont les cartes de densité de drainage, de densité de fracturation, de profondeur d'ouvrage, d'épaisseur d'altérites, de niveau statique et de débits d'exploitation.

Tableau 1 : Classification des critères

CRITERES	**CLASSES**				
	Très faible	**Faible**	**Moyenne**	**Forte**	**Très forte**
Densité de drainage (% de longueur cumulée de cours d'eau au km^2)		< 8	8 -16	16 - 24	24 <
Densité de fracturation (% de longueur cumulée et de nombre)		< 13,5	13,5 - 27	27 - 40,5	40,5 <
Epaisseur des altérites (m)		< 15	15 – 30	30– 45	45 <
Profondeur (m)		< 15	15 – 30	30– 70	70 <
Débit d'exploitation (m^3/h)		< 1	1 - 3	3 – 5	5 <
Niveau statique (m)	< 10	10– 25	25 – 40	40 <	

3.2.4. Cartographie thématique des ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui

La réalisation des cartes thématiques a obéit à une méthodologie de pondération des critères. La pondération consiste à affecter un poids à chaque critère dont la valeur dépend de l'importance du critère dans l'évaluation du résultat final. La somme de ces poids doit être égale à 1. Ce qui suppose que le poids affecté est un chiffre compris entre 0 et 1 (Saley, 2003). Ainsi la combinaison obtenue avec cette méthode est estimée de la façon suivante :

$S = \sum W_i X_i$ avec S le résultat de la combinaison, W_i le poids du facteur i et X_i la valeur du critère de facteur i.

Ce principe de pondération a guidé la confection de nos différentes cartes thématiques. En effet les différentes cartes décrivant les paramètres hydrogéologiques ont été combinées sous le logiciel ArcView® 3.2 selon le principe pour produire les différentes cartes thématiques. Ce sont, la carte de disponibilité, la carte d'accessibilité et la carte d'exploitabilité des ressources en eau souterraine. Le tableau 2 donne les différents poids affectés à chaque critère selon son importance et sa contribution dans la réalisation des cartes thématiques. L'analyse détaillée et ordonnée de ces cartes selon ces différents critères est une démarche d'hiérarchisation des critères appelée analyse multicritère selon Graillot et *al*. (2002) cités par Saley (2003). C'est la démarche suivie dans l'analyse de nos différentes cartes thématiques. Par exemple pour la carte de disponibilité des ressources en eau, le choix a porté sur les critères ''densité de fracturation'' et ''densité de drainage'' avec respectivement un poids de 0,6 au premier et 0,4 au second. En effet en zone de socle bien que la densité de drainage soit importante, les ressources en eau souterraine ne seront disponibles que lorsque la fracturation sera ouverte et dense. Si la fracture est moins dense et fermée toute l'eau drainée sera entraînée et ne peut intégrer le système souterrain. Ce critère s'avère donc dominant dans l'affectation des poids.

Tableau 2 : Attribution de poids aux différents critères selon la nature de la carte.

CARTE DE	CRITERES	POIDS	Total
DISPONIBILITE	Densité de drainage	0,4	1
	Densité de fracturation	0,6	
ACCESSIBILITE	Profondeur du forage	0,8	1
	Niveau statique	0,2	
EXPLOITABILITE	Débit d'exploitation	0,7	1
	Niveau statique	0,3	

3.2.5. Etablissement de la carte des potentialités en eau souterraine

Cette carte prend en compte les conditions d'épaisseurs d'altérites, de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité des ressources en eau.

Elle présente quatre classes ou indices de potentialité.

- l'indice Mauvais est caractérisé par.une disponibilité mauvaise, des épaisseurs d'altérites faibles, une accessibilité mauvaise et une exploitabilité mauvaise;
- l'indice Médiocre se caractérise par.une disponibilité médiocre, des épaisseurs d'altérites moyennes, une accessibilité médiocre et une exploitabilité médiocre;
- l'indice Bon est caractérisé par.une disponibilité bonne, des épaisseurs d'altérites fortes, une accessibilité bonne et une exploitabilité bonne;
- l'indice Excellent est caractérisé par.une disponibilité excellente, des épaisseurs d'altérites très fortes, une accessibilité excellente et une exploitabilité excellente.

La réalisation de la carte des potentialités en eau souterraine nécessite la combinaison de tous ces critères. Dans l'attribution des poids pour cette dernière carte, nous avons pris soin de bien prendre en compte le fait qu'un critère peut avoir déjà été utilisé dans toutes les cartes. Il est donc important d'attribuer un poids qui tienne compte de l'importance du thème mais surtout du critère de répétitivité.

Les différents poids attribués sont 0,2 pour le critère épaisseur d'altérites, 0,2 pour le critère accessibilité, 0,3 pour le critère exploitabilité et 0,3 pour le critère disponibilité.

Dès lors que ces paramètres sont choisis et fixés, nous pouvons procéder à la réalisation de la carte.

4. RESULTATS ET ANALYSES

4.1. Cartographie des linéaments structuraux de Soubré-Méagui

En ce qui concerne notre étude, l'objectif est la détection de toutes les structures linéamentaires pouvant influencer de façon significative l'ensemble de la fracturation de la zone d'étude. Tous les filtres appliqués ont eu pour but de rehausser certaines caractéristiques de l'image. Les différents résultats présentés à la figure 3 rehaussent d'une manière plus ou moins nette les linéaments du secteur.

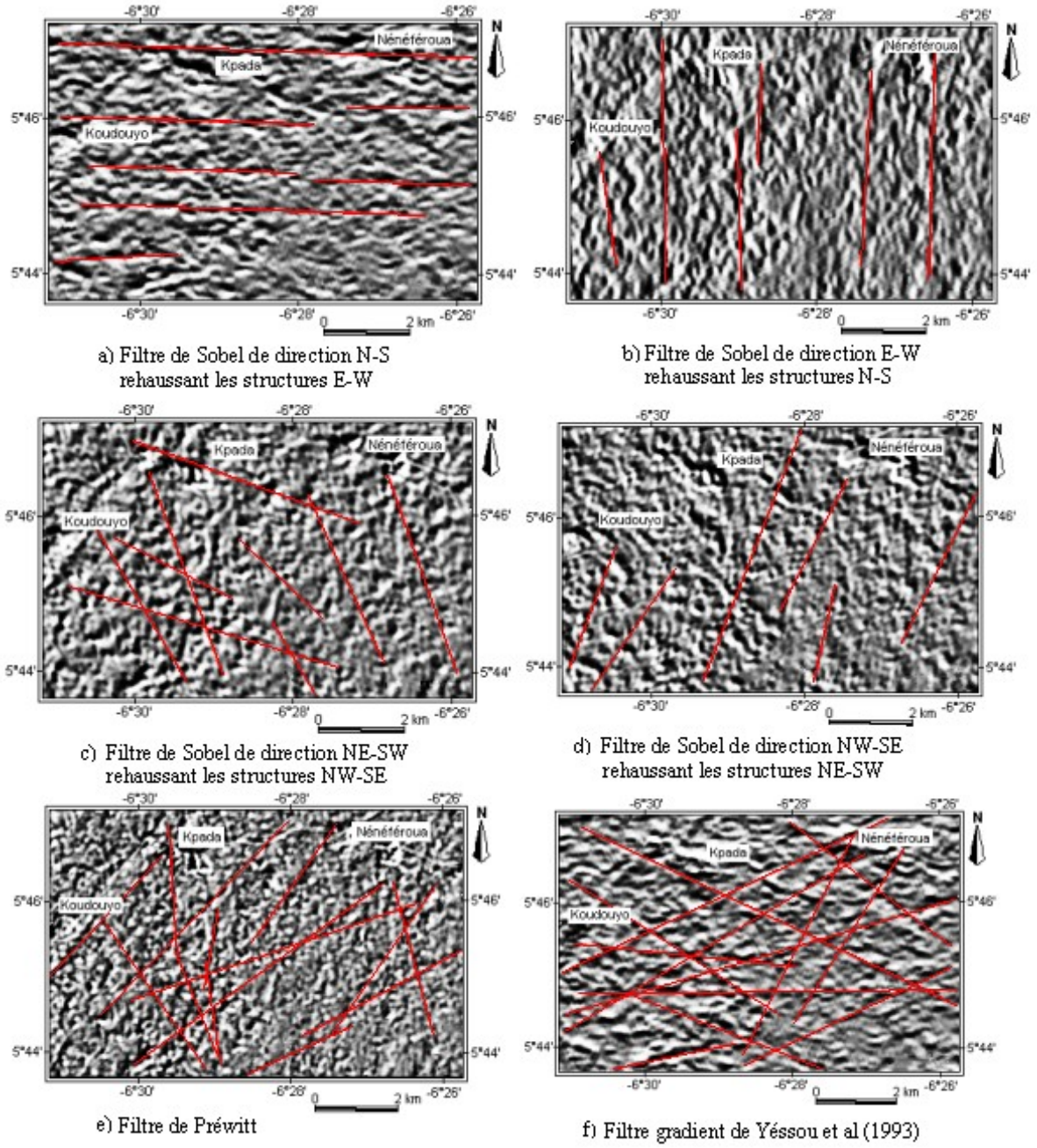


Figure 3: Résultats des différents filtres appliqués à la composante ACP 2 de l'image Landsat ETM+

4.1.1. Carte des linéaments détaillés

L'extraction manuelle des linéaments a consisté à répertorier ou identifier toutes les structures linéaires et linéamentaires de la région sur les images ETM+ de Landsat issues des différents traitements effectués. Selon Scanvic (1975) cité par Saley (2003), les détails linéaires observés sur les images sont liés à des phénomènes géologiques variés tels que les failles, les contacts géologiques, les structures plissées…. Ainsi, les discontinuités images peuvent être l'expression des lignes de crête, des limites entre les formations géologiques, des couloirs de cisaillement et des vallées. Le relevé de toutes les discontinuités images sur l'ensemble des images traitées (à l'exception des routes, des lignes de haute tension etc.) a permis de dresser la carte des linéaments détaillés de la zone d'étude (figure 4). Ces linéaments ont été validés à partir des cartes géologiques et photo-géologiques préexistantes pour obtenir la carte des fractures majeures (figure 5).

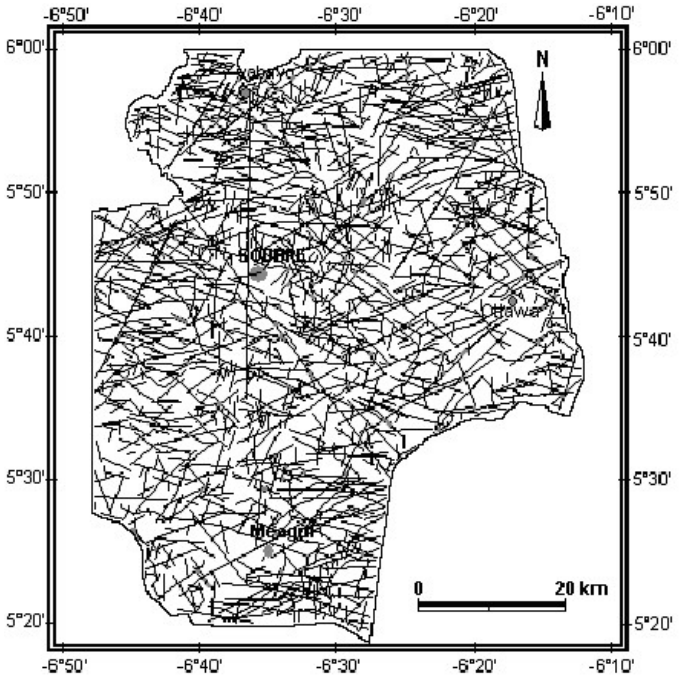


Figure 4: Carte des linéaments détaillés de Soubré-Méagui

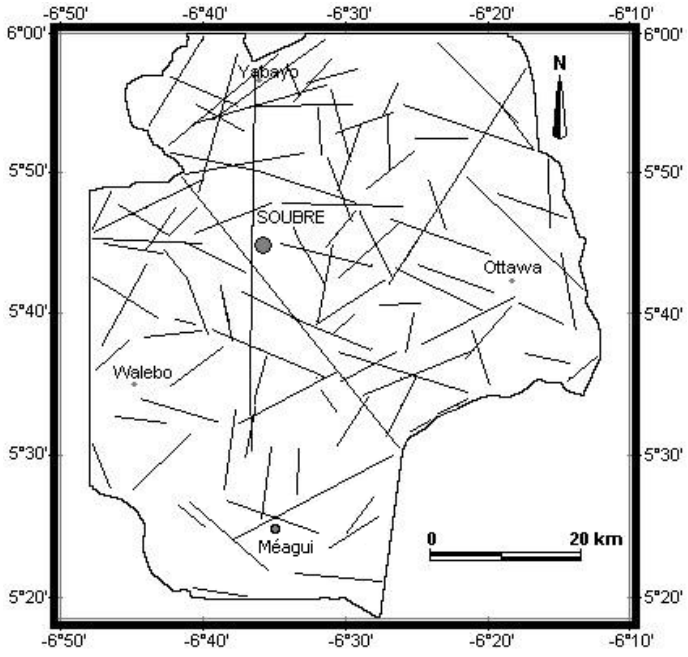


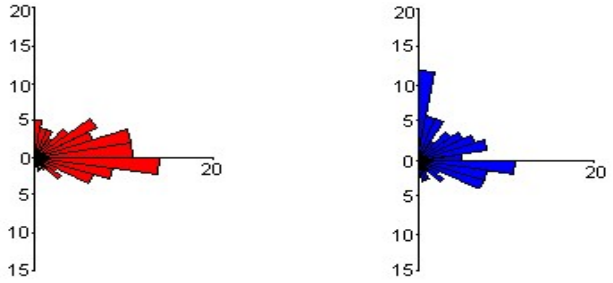
Figure 5: Carte des fractures majeures de la région de Soubré-Méagui.

4.1.2. Analyse des linéaments

L'observation de cette carte révèle la présence des failles kilométriques de directions NW-SE, N-S et NE-SW associées à des fractures secondaires orientées dans presque toutes les directions. On note que ce réseau de linéaments est plus ou moins dense par endroit. Ces linéaments ne sont pas exhaustifs du fait de la subjectivité du photo-interprète, mais ils peuvent être utilisés comme support de base à l'interprétation de la fracturation dans la recherche des sites favorables à la circulation des eaux souterraines.

4.1.3. Analyse statistique des linéaments

L'analyse statistique des paramètres de la fracturation a été l'objet de plusieurs études dont celles de Delay et *al* (1992) et Lasm (2000). Pour l'étude statistique détaillée des linéaments de Soubré-Méagui, nous avons exporté la carte des linéaments dans le logiciel Linwin. Ce qui nous a permis d'obtenir les rosaces directionnelles. La maille unitaire utilisée pour la zone d'étude est de 4,5 km x 4,5 km. Il ressort de l'observation des rosaces directionnelles (figure 6) que les directions principales prédominantes des linéaments en nombre sont: N0°-N10°, N90°-N100°, N70°-N80°, N100°-N110°, N110°-N120°, et N60°-N70°. Les directions prédominantes des linéaments en longueur sont: N90°-N100°, N70°-N80°, N80°-N90°, N100°-N110° et N50°-N60°. Cette analyse montre aussi qu'il existe une bonne corrélation entre la densité en longueurs cumulées et la densité en nombre de linéaments; le coefficient de corrélation linéaire étant de 0,87. Ces deux paramètres apportent donc des informations plus ou moins similaires et l'analyse de la fracturation peut se faire à partir de la répartition spatiale de l'un ou l'autre critère à savoir les densités en longueurs cumulés ou la densité en nombre de linéaments (figure 7).



Longueur des linéaments *Nombre de linéaments*

Figure 6 : Rosace directionnelle

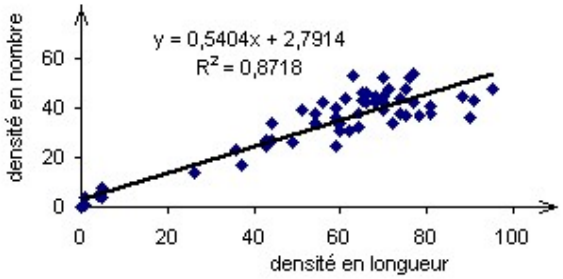


Figure 7: Relation entre les densités en longueurs et en nombre de linéaments

4.2. Analyse des cartes thématiques des ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui

* L'exportation de la carte des linéaments dans le logiciel ArcView 3.2, a permis de dresser la carte de densité de linéaments (figure 8) dont l'analyse permet de comprendre la distribution spatiale des linéaments dans la région de Soubré-Méagui. Pour ce faire nous avons utilisé une maille de 4,5 km x 4,5 km comme surface élémentaire représentative avec une unité de 4,5 km en longueur cumulée de linéaments par maille. L'analyse de cette carte met en évidence quatre classes de répartition des densités de linéaments sur le territoire. Les zones à faible densité de fracturation sont quasi rares et occupent 0,35 % du territoire. Les zones à densité moyenne se situent aux extrémités nord-ouest, au Sud-Ouest et au Sud-Est. Ces zones occupent 4,80 % du territoire. Les fortes densités de fracturation s'observent sur les parties périphériques du domaine et couvrent 21,75 % du territoire. Elles sont situées dans leur totalité dans les formations gneissiques, dans les micaschistes et les granites à deux micas. La partie centrale du domaine est couverte par les très fortes densités de linéaments qui occupent 73 % du territoire. Celles-ci affectent les migmatites à biotite, les granodiorites d'anatexie et granodiorites à faciès orthogneissique. L'analyse de la fracturation renseigne que la fracturation est en général intense dans cette région et elle affecte la majorité des formations géologiques du secteur.

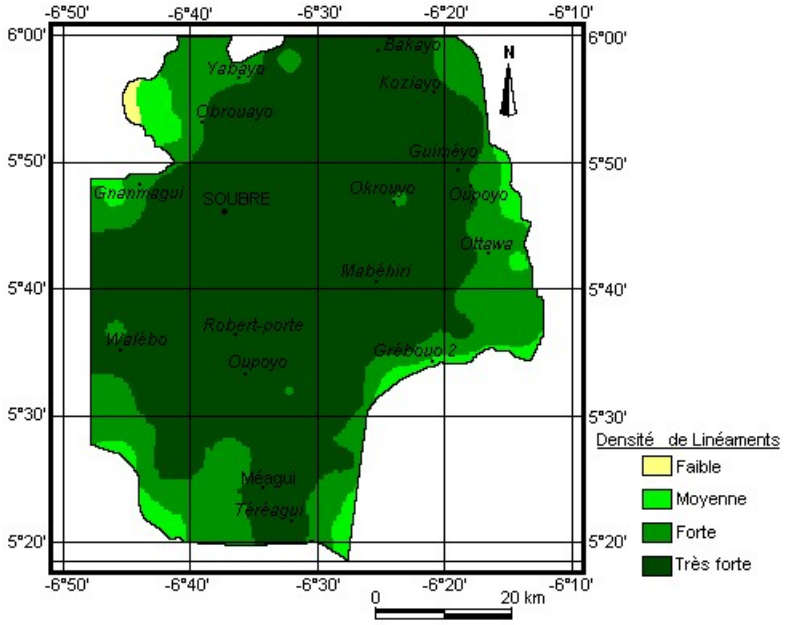


Figure 8: Carte de densité de linéaments de Soubré-Méagui

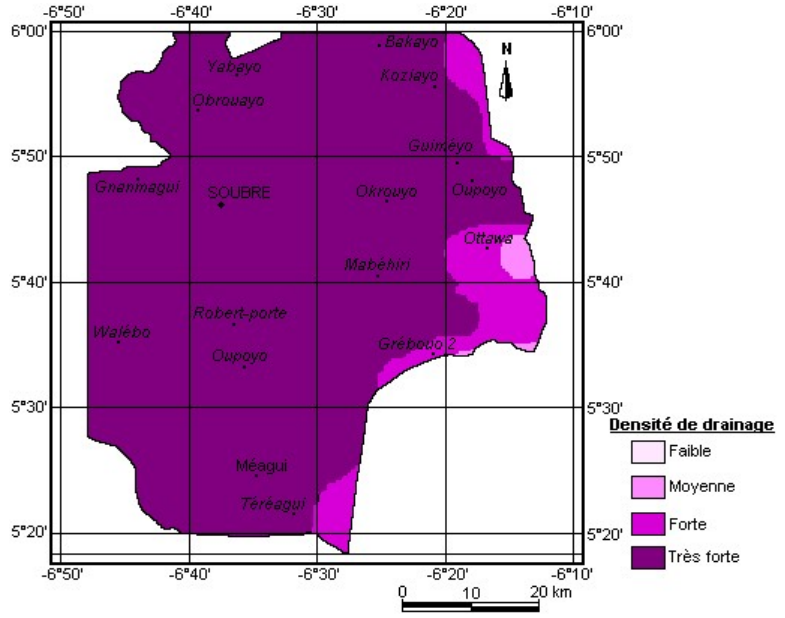


Figure 9: Carte de densité de drainage de Soubré-Méagui

** La carte de densité de drainage (figure 9) a été réalisée à partir de la carte du réseau hydrographique exportée et traitée sous le logiciel ArcView 3.2 avec la même maille. L'observation de cette carte montre que la région à l'étude est très fortement drainée en eau de surface. Les densités faibles et moyennes de drainage sont rares et occupent 0,70 % du territoire. Ces zones se situent à l'Est et au Sud-Est de la région. Les fortes et très fortes densités sont présentent dans toute la partie centrale, à l'Ouest et au Nord et occupent plus de 99 % du territoire. La forte densité de drainage de la région implique que le phénomène d'infiltration est moins accentué. Ce qui suppose que le ravitaillement des nappes d'eau souterraine se ferait par l'intermédiaire des fractures ouvertes.*

* La carte d'épaisseur d'altérites est présentée à la figure 10. L'analyse de cette carte montre que les épaisseurs d'altérites sont plus ou moins liées au réseau de drainage. En effet, les zones à fortes et très fortes épaisseurs d'altérites qui occupent 39,40 % du domaine se situent dans des zones où le drainage est très intense. Ce qui suppose que cette altération est surtout due à l'action dégradante de l'eau qui s'infiltre de façon lente et progressive dans le sol. Les épaisseurs moyennes d'altérites avec 57,68 % de la superficie demeurent la classe dominante et se retrouvent sur l'ensemble du domaine tandis que les faibles épaisseurs apparaissent un peu partout dans la zone (au Sud de Walebo, Méagui…).

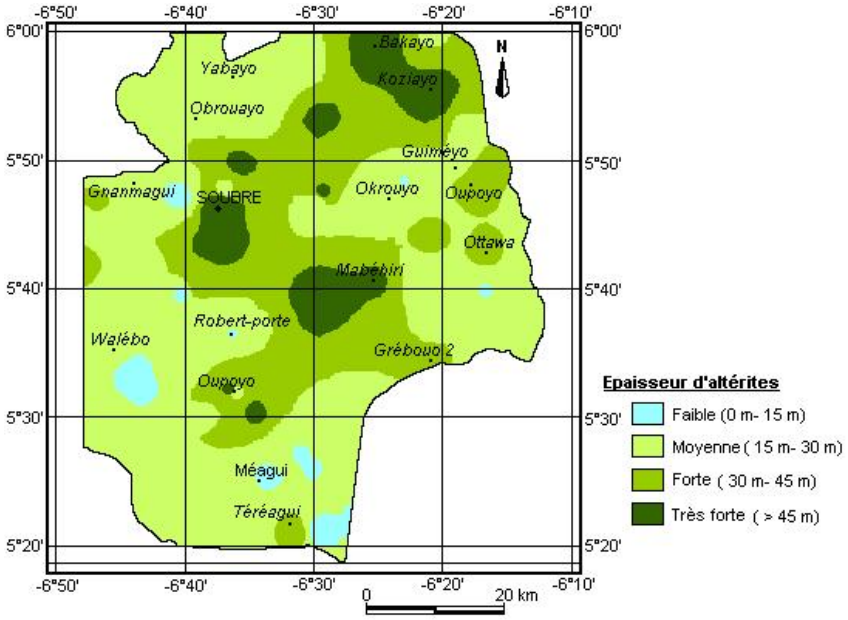


Figure 10: Carte d'épaisseur d'altérites de Soubré-Méagui

4.2.1. Cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité

La réalisation de ces cartes a nécessité la conception d'un SIRS et l'intégration des paramètres hydrogéologiques dans celui-ci. Ces paramètres ont servi à la réalisation de la cartographie thématique des ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui selon le principe de l'analyse multicritère. Ainsi, nous avons pu réaliser les cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité des ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui.

* La carte de disponibilité des ressources en eau :

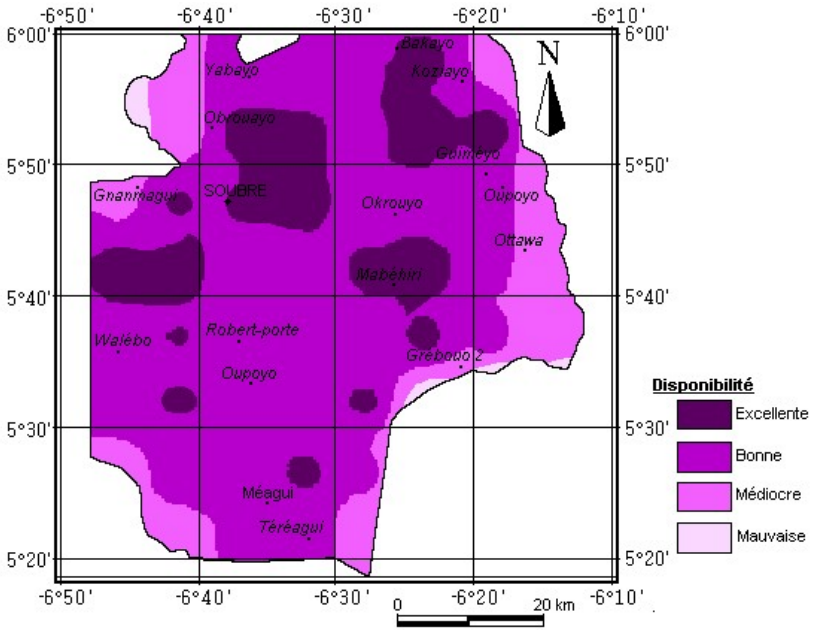


Figure 11: Carte de disponibilité des ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui

La réalisation de la carte de disponibilité en eau souterraine a tenu compte des paramètres tels que la carte de densité de drainage et la carte de densité de fracturation. Leur combinaison s'est faite dans le logiciel ArcView 3.2 et nous a permis d'obtenir cette carte (figure 11). Elle se caractérise par quatre classes. Les disponibilités mauvaise et médiocre occupent 17% du domaine et caractérisent les zones à faible densité de fracturation. Ces zones sont à déconseiller pour l'implantation de forages car il sera difficile d'y trouver des débits optima. Les classes de disponibilité bonne (63,60%)

et excellente (19%) caractérisent les zones favorables à l'implantation des forages. Elles traduisent une bonne alimentation des nappes; la fracturation y est intense et participe à la recharge de la nappe souterraine.

* La carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine :

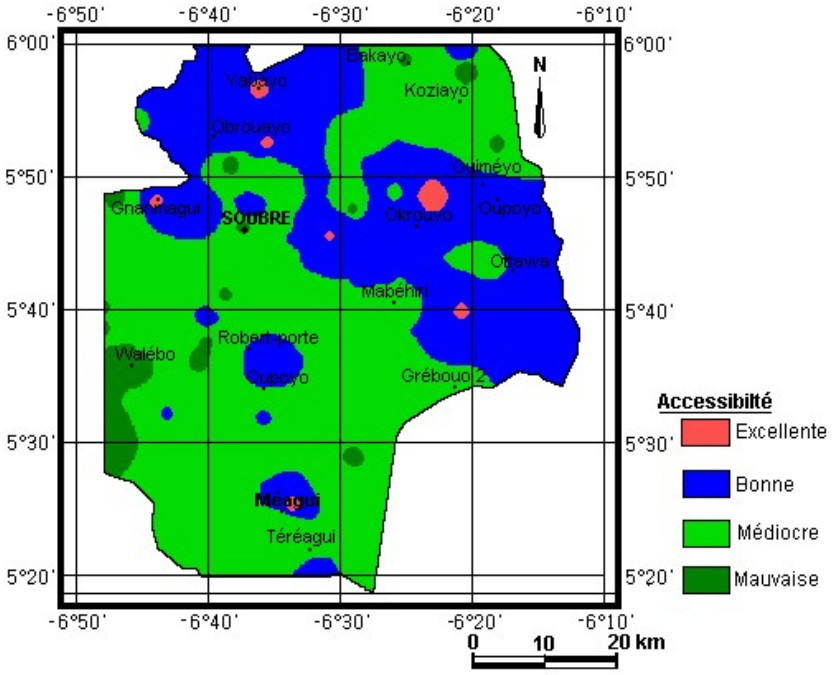


Figure 12: Carte d'accessibilité aux ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui

La carte d'accessibilité (figure 12) est le résultat de la synthèse des facteurs profondeur du forage et niveau statique. Deux classes essentielles caractérisent cette zone : l'accessibilité médiocre (58,50 %) et l'accessibilité bonne (37 %) qui sont fonction de la répartition des différentes caractéristiques hydrogéologiques du secteur.

Dans les zones concernées par les accessibilités médiocres, il se posera un problème de coût pour l'implantation d'un forage et le captage sera à risque. Dans les localités à bonne accessibilité, le pourcentage de succès au niveau des forages est très grand; ces zones sont mieux indiquées pour l'implantation de forages.

* La carte d'exploitabilité des ressources en eau souterraine:

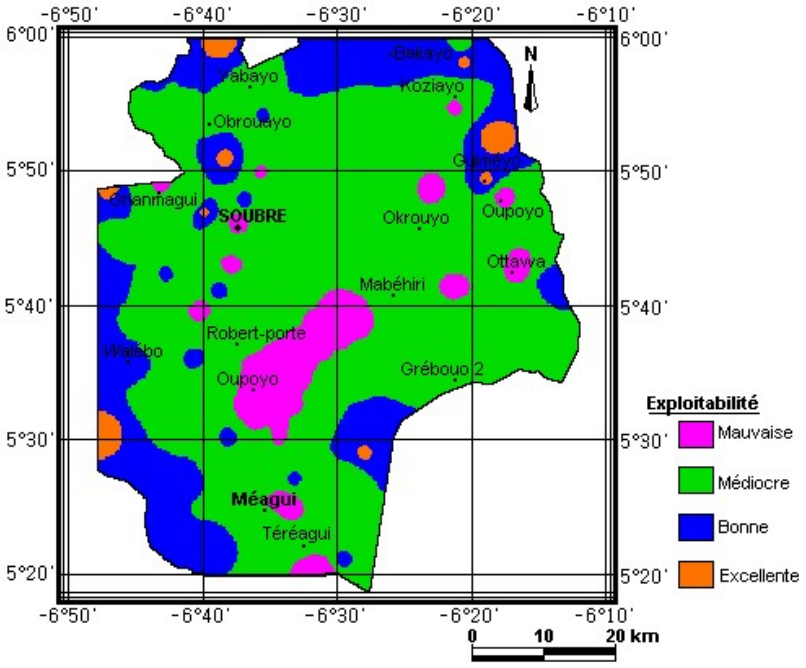


Figure 13: Carte d'exploitabilité des ressources en eau de Soubré-Méagui

L'exploitabilité des ressources en eau est guidée par le débit de l'eau que l'on peut tirer et le niveau piézométrique (niveau statique de la nappe dans notre cas) selon Saley (2003). La carte d'exploitabilité des ressources (figure 13) résulte donc de la combinaison de ces deux critères. Quatre classes que nous pouvons regrouper en deux caractérisent cette carte. Les exploitabilités mauvaise et médiocre occupent à elles seules 76.63 % du territoire et regroupent les zones à faibles débits. Ces zones se situent dans toute la partie centrale du secteur d'étude. Elles constituent le domaine favorable à l'hydraulique villageoise et le domaine de recherche des eaux de boisson selon Savané (1997). Les exploitabilités excellente et bonne occupent les secteurs périphériques avec 23,37 % de la superficie totale. Savané (1997) et Saley (2003) pensent que ces zones sont favorables à l'hydraulique urbaine, et à l'agriculture motorisée.

4.2.2. Carte des potentialités en eau souterraine

L'analyse de la carte des potentialités en eau souterraine (figure 14) montrent que:

Les zones à indice de potentialité médiocre (32,4 % du domaine) et mauvais (7,70 % du territoire) sont présentes aux extrémités nord-ouest et sud-ouest. Ces zones se caractérisent par de fortes profondeurs d'ouvrages, de forts niveaux statiques, de faibles épaisseurs d'altérites et des débits faibles. Les zones à excellent indice de potentialité sont circonscrites en différents chefs lieux (Soubré, Bakayo, Walebo…) et sont faiblement représentées (6,30%). Les zones à bon indice de potentialité représentent 53,60 % du territoire et se concentrent dans la partie centrale (Soubré, Mabéhiri), au Nord-Est du domaine (Oupoyo, Guiméyo) et au Sud-Ouest. Ces zones sont indiquées pour la recherche et l'implantation des sites de forage dans la région et prédisent des débits d'exploitation assez importants.

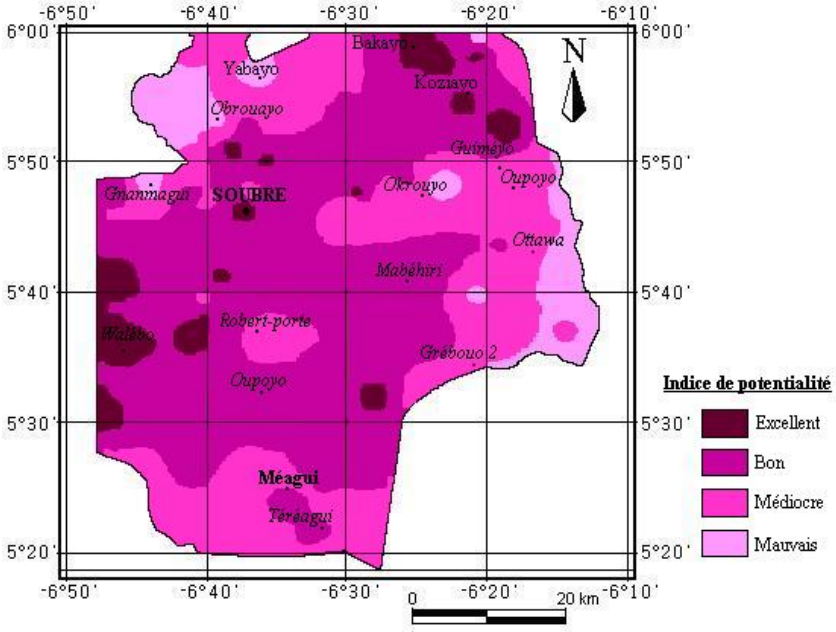


Figure 14: Carte de potentialité en eau souterraine de Soubré-Méagui

5. DISCUSSION

La carte des linéaments de Soubré-Méagui est le résultat de plusieurs traitements effectués sur les images satellitaires de la zone. Ces linéaments donnent un aperçu de la fracturation du milieu souterrain et une idée de la présence de l'eau souterraine dans les aquifères de la région. Evidemment des erreurs peuvent survenir dans le relevé des linéaments et certaines fractures déjà identifiées par des études antérieures comme celles de Papon (1984), Tagini (1971) et Biémi (1992) peuvent ne pas avoir été repérées pendant cette opération. Ce fait est certainement à mettre au compte du photo-interprète car ces opérations sont souvent délicates et requièrent une attention particulière dans le relevé de ces linéaments. Il peut se poser aussi le problème de l'échelle à laquelle ces linéaments sont observés; ceci entraîne souvent une mauvaise interprétation des images. La démarche recommandée pour la validation de la carte linéamentaire est la vérification sur le terrain (Kouamé, 1999) des traits structuraux par d'autres méthodes telle que la géophysique. Cependant l'utilisation de la carte de forages à haut débits pour la validation des fractures (Jourda et *al*, 2006) apparaît comme une démarche plausible et judicieuse. En effet les travaux de Biémi et al (1992), Savané (1997), Kouamé (1999), Saley (2003) et Jourda et *al* (2006) ont montré que les forages les plus productifs se trouvaient proches ou à l'intersection de fractures. Ainsi, la carte des linéaments nous renseigne sur le comportement et la présence de l'eau souterraine en milieu de socle fissuré. L'utilisation du SIRS et son couplage avec la télédétection pour l'évaluation et la gestion des ressources en eau ont permis, à partir de la carte linéamentaire et des données hydrogéologiques préexistantes, la réalisation des cartes thématiques de la région de Soubré-Méagui. Les différentes cartes obtenues à l'issue de cette étude sont

à considérer avec une certaine marge d'erreurs. Les cartes thématiques réalisées ne représentent en réalité qu'une évaluation relative des phénomènes (Saley, 2003). Or ces phénomènes sont évolutifs dans le temps et dans l'espace. L'analyse des cartes peut donc être faussée dans ces conditions. Ce qui est cependant intéressant, c'est la capacité du SIRS à pouvoir croiser toutes les données disponibles qui décrivent une réalité et à les afficher sous forme de carte de synthèse. Cette carte peut fournir des informations qui peuvent guider la prise de la bonne décision pour une gestion efficiente des ressources en eau souterraine. Ainsi le SIRS reste et demeure-t-il selon Saley (2003) l'un des meilleurs outils de résolution scientifique de nombreuses de nos préoccupations, d'où son apport dans les prises de décisions de développement.

6. CONCLUSION

Au terme de cette étude nous retenons que les différentes méthodes de traitements des images satellitaires et leur interprétation nous ont permis de dresser la carte des linéaments détaillés de Soubré-Méagui. Le SIRS a permis d'intégrer cette carte et les données hydrogéologiques de la zone pour la cartographie thématique des ressources en eau souterraine. Les cartes de disponibilité, d'accessibilité, d'exploitabilité et de potentialité en ressources en eau souterraine sont les résultats de cette méthodologie. Cette étude a permis de mettre en évidence les énormes potentialités en ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui.

En perspectives, nous entendons intégrer les paramètres comme l'occupation du sol aux données hydrogéologiques pour une plus grande robustesse de la méthode de cartographie thématique des ressources en eau du secteur d'étude. L'utilisation de l'imagerie Radar pour la connaissance plus accentuée de la fracturation dans cette zone en vue d'une meilleure compréhension des relations qui lient cette fracturation au réseau hydrographique en surface est souhaitée en vue d'une meilleure gestion des ressources en eau souterraine de Soubré-Méagui.

Remerciements

Aux enseignants chercheurs et doctorants du Centre de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), nous adressons nos sincères remerciements pour avoir apporté leur expertise à la réalisation de ce travail. Nous voudrions dire notre reconnaissance aux Professeurs BIEMI Jean, AFFIAN Kouadio et JOURDA Patrice sans oublier les Docteurs SALEY Bachir, KOUAME Fernand, OUATTARA Adama et DJAGOUA Eric pour leurs sages conseils et encadrements ainsi qu'à madame Monique BERNIER pour son soutien. Aux évaluateurs, en occurrence monsieur Kamal LABBASSI, dont la pertinence des remarques a permis de recentrer ce travail nous témoignons notre infinie gratitude.

Bibliographie

ADJA M. G. (2009): Etude de l'état hydrique saisonnier du bassin versant de la Bagoé dans un contexte de variabilité climatique. Départements de Boundiali et Tengréla (Milieux soudano sahéliens au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Thèse de Doct. unique. Univ. Abidjan. 184 p.*

BIEMI J. (1992): Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). *Thèse Doct. ès Sc. Nat. Univ. Abidjan, 479 p.*

BIEMI J., GWYN H., DESLANDES S. et JOURDA J.P. (1991): Influence des linéaments sur la productivité des forages dans le bassin versant de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire): apport de la télédétection et d'un système d'information à référence spatiale. *Télédétection et gestion des ressources. 7 ème congrès de l'Association québécoise de Télédétection. Québec 23 au 25 octobre 1991. Vol. VII Ed. Paul Gagnon, pp 41-49 ; 135-145.*

BONN F., ROCHON G. (1992): Précis de Télédétection. Principes et méthodes. *Presse Univ. Sainte Foy. Vol. I. 485 p.*

DELAY F., BRACQ P., COLBEAUX J. P. (1992): Cartographie numérique de linéaments morphostructuraux, exemple d'application à l'hydrogéologie de la craie du Nord de la France. *Bull. Sc. Géol. Fr., n°163 (3), pp 345-352.*

GEOMINES (1982): Inventaire hydrogéologique appliqué à l'Hydraulique villageoise. *Cahier n°28 (Degré carré de Soubré). 28 p.*

INS (1998): Institut National de la Statistique. *Recensement général de la population et de l'habitat (R.G.P.H.), 1998. Volume III. Données socio-démographiques et économiques par localités 83p.*

JOURDA J. P., SALEY M. B., DJAGOUA E. V., KOUAME K. J., RAZACK M. (2006): Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire): Approche par analyse multicritère et test de validation. *Revue de Télédétection, Vol. 5, N°4, pp. 339-357.*

KOUAMELAN A. N. (1996): Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de en Côte d'Ivoire. Implication pour la transition archéen-protérozoïque. *Thèse de Doct. Univ. Rennes 1 n°1463, 277 p.*

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 Doct. 3ème cycle. Univ. Cocody Abidjan. 196 p.*

KOUAME K. F., AKAFFOU A. G., LASM T., DE DREUZY J. R., DAVY P., BOUR O. (2005): Simulation des écoulements dans les réservoirs fracturés: Application au socle archéen de Touba (Nord Ouest de la Côte d'Ivoire). *Actes du Colloque Internationale SITIS 05 Yaoundé(Cameroun) 27 Nov.-1er Déc. 2005. pp. 39-46.*

LARSON I. (1977): Groundwater in hard rocks. *International Seminar, groundwater in hard rocks. Stockholm. Cagliari (Italy).*

LASM T. (2000): Hydrogéologie des réservoirs de roche: Analyse statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). *Thèse Doct. unique, faculté des sciences fondamentales et appliquées. Univ. Poitiers. 274 p.*

PAPON A. (1973): Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la côte d'Ivoire. *Mém. Bur. Res. Géol. Paris n°80 284p*

SALEY M. B. (2003): Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région sémi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire. *Thèse de Doct. unique. Univ. Abidjan. 18 pl., 15 tab., 94 fig., 211 p.*

SAVANE I. (1997): Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la Télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. *Thèse Doct. ès Sc. Nat. Univ. Abidjan 396 p.*

SOROKOBY V. M. (2005): Apport de la Télédétection et d'un Système d'Information à Référence Spatiale à l'évaluation des ressources en eau dans le degré carré de Soubré (secteur Soubré-Méagui, Sud-Ouest de la Cote d'Ivoire)**.** *Mém. DEA Télédétection et SIG. Univ. Abidjan, 82p.*

SERVAT E., PATUREL J.-E., LUBES-NIEL H., KOUAME B., MASSON J.M., TRAVAGLIO M.,

TAGINI B. (1971): Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotechnique régionale. Rapport SODEMI. Côte d'Ivoire. *Thèse Doct. ès Sc. Nat. Univ. Lausanne.88 fig., 14 tab., 266 p.*