Télédétection, 2006, vol. 5, n° 4, p.339-357
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

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.

Jean Patrice JOURDA*[1], Mahaman Bachir SALEY[2], Éric Valère DJAGOUA[3], Kan Jean KOUAMÉ[4], Jean BIÉMI[5] et Moumtaz RAZACK[6]

[1] Laboratoire des Sciences et Techniques de l'eau et de l'Environnement (LSTEE) et Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire. Téléphone : (225) 22 44 52 70 ; télécopieur : (225) 22 44 35 00 ; Courriel : jourda_patrice@yahoo.fr

[2]Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) et UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody , 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire. Téléphone : (225) 22 44 52 70 ; télécopieur : (225) 22 44 52 70 ; Courriel :saley@caramail.com

[3]Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) et UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, Téléphone : (225) 44 52 70 / 05 47 44 80 ; télécopieur : (225) 22 44 52 70 ; Courriel : vdjagoua@yahoo.fr

[4]Laboratoire des Sciences et Techniques de l'eau et de l'Environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire. Téléphone : (225) 22 44 52 70 ; télécopieur : (225) 22 44 35 00 ; Courriel : jeankan05@yahoo.fr

[5]Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), , UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire. Téléphone : (225) 44 52 70 ; télécopieur : (225) 22 44 35 00 ; Courriel : jbiemi@yahoo.fr

[6]Laboratoire d'Hydrogéologie, UMR 6532 HydrASA CNRS, Université de Poitiers, 40 Avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers cedex, France. Courriel : moumtaz.razack@hydrasa.univ-poitiers.fr

(Soumis le 24 octobre 2005; révisé le 23 mars 2006; accepté le 3 avril 2006)

Cette étude, initiée conjointement par le CURAT (Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection) et le LSTEE (Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement) de l'Université de Cocody, vise la mise en place d'une méthodologie, à partir des techniques de l'observation spatiale, permettant une évaluation des potentialités en eaux souterraines des milieux fissurés précambriens d'Afrique de l'Ouest en général et plus particulièrement ceux de la région de Korhogo. Le traitement spécifique des images Landsat ETM+ a permis de réaliser une carte de fracturation détaillée et celle des accidents majeurs.

L'intégration dans un SIG des deux cartes avec d'autres sources de données favorables à une bonne accumulation des eaux souterraines en milieux fissurés a permis la réalisation de la carte des potentialités en eaux souterraines de la région de Korhogo, par une approche par analyse multicritère. Cette carte révèle que cette région est dominée par les classes excellente et bonne (près de 60 %). La carte de potentialité a été validée par la méthode d'évaluation mise en œuvre qui confirme la conformité de celle-ci avec la productivité des aquifères de la région. L'utilisation conjointe de la carte de potentialité en eaux souterraines, des ouvrages à grande productivité (Q> 10 m³/h) et des accidents majeurs de la région a permis, d'une part, de définir trois principales directions productrices : la direction N-S avec des débits allant de 10 à 36 m³/h, la direction NE-SO correspondant aux directions éburnéennes avec des débits atteignant 20 m³/h et la direction NO-SE associée à la direction libérienne dont les débits sont compris entre 36 et 66 m³/h et, d'autre part, d'établir une carte de sites favorables à de gros débits dans une optique d'amélioration de l'approvisionnement en eau des grandes agglomérations.

Mots clefs : ETM+ de Landsat, Potentialité, Analyse Multicritère, Korhogo

THE USE OF LANDSAT ETM+ DATA AND GIS FOR EVALUATING THE GROUNDWATER POTENTIAL IN THE FRACTURED PRECAMBRIAN ROCKS OF THE KORHOGO REGION (NORTHERN IVORY COAST) : MULTI-CRITERIA ANALYSIS APPROACH AND VALIDATION TEST.

This study, initiated jointly by CURAT (Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection) and LSTEE (Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement) of the University of Cocody, consists in developing a methodology, using the techniques of space observation, to evaluate the groundwater potential of Precambrian fractured rocks in West Africa in general and particularly those of the Korhogo area, Côte d'Ivoire. The specific processing of the Landsat ETM+ images made it possible to produce a detailed map of fractures and major faults.
The two maps were integrated with other data sources into a Geographical Information System (GIS) in order to identify areas favourable to groundwater accumulation in fractured rock. A multi-criteria approach was used to derive a map of the groundwater potential of the Korhogo area. This map reveals that the area is dominated by groundwater potential classified as 'excellent' and 'good' (nearly 60 %). The groundwater potential map was validated with data on groundwater productivity relating to the aquifers in the area. The combined use of the groundwater potential map, high yield (Q > 10 m³/h) acquifer borehole data and knowledge of the major fault system of the area made it possible to define three principal directions of ground water production : N-S direction, with yields going from 10 to 36 m³/h, NE-SW direction, corresponding to the Eburnean directions, with yields reaching 20 m³/h and NW-SE direction, associated with the Liberian direction, with yields between 36 and 66 m³/h. The study resulted in a map of favourable sites for high-yield groundwater production from the point-of-view of improving the water supply of large urban areas.

Key words: Landsat ETM+, groundwater potential, multi-criteria analysis, Korhogo, Ivory Coast

1. INTRODUCTION

La géologie de la Côte d'Ivoire étant constituée à 97,5 % de socle cristallin et cristallophyllien, l'essentiel des ressources en eau est donc contenu dans les aquifères formés par le socle fracturé dont l'importance hydrogéologique est considérable. Le département de Korhogo qui fait l'objet de cette étude appartient à ce domaine. Aujourd'hui, avec le développement du secteur minier et le besoin d'accroître la capacité d'une agriculture moderne basée non plus sur les précipitations naturelles, mais sur l'irrigation qui exige des quantités d'eau en abondance et disponibles toute l'année, il devient indispensable de développer des techniques modernes pour la découverte et la mise en valeur de nouvelles réserves d'eau et, en particulier, les ressources en eau souterraine.
Ainsi, pour répondre aux besoins croissants en eau dans cette partie de la Côte d'Ivoire, une étude hydrogéologique pertinente est nécessaire pour le choix des sites d'implantation de forages de grande productivité pouvant satisfaire les besoins en hydraulique villageoise améliorée et en hydraulique urbaine. Le milieu de socle est complexe et l'existence d'un aquifère requière la prise en compte de plusieurs facteurs pouvant favoriser l'accumulation des eaux souterraines (Biscaldi, 1968a et 1968b ; Engalenc et *al.* , 1978 et 1979 ; Owolabi et *al.*,1998). La connaissance parfaite de l'hydrogéologie de ces milieux nous permettra de mieux maîtriser le comportement des aquifères de fissures et de faciliter les prospections. L'utilisation des données issues de la télédétection avec d'autres sources de données permettra de mieux modéliser les zones à potentialité en eau souterraine. Castany (1982) relève que la partition conventionnelle en ruissellement et en infiltration est adéquate pour l'évaluation de la ressource en eau souterraine renouvelable naturelle et celle-ci est régie par le pouvoir répartiteur du sol caractérisé par l'index hydrogéologique. Celui-ci dépend

de cinq facteurs (géomorphologie, géologie de subsurface, état de la surface du sol, profondeur de la surface piézométrique, aménagements des eaux et des sols). Les actions de ces facteurs interfèrent de telle sorte, qu'à l'échelle d'un bassin hydrologique, les deux facteurs déterminants sont la géomorphologie et la lithostratigraphie. Ainsi, les données de l'occupation du sol n'ont pas été intégrées directement dans cette étude du fait que la région de Korhogo est constituée de quatre sous-bassins hydrologiques.

Les objectifs assignés à cette étude sont de : 1) modéliser spatialement les zones à potentialité en ressources en eau souterraine des milieux fissurés en intégrant les facteurs favorisant une bonne accumulation des eaux souterraines ; 2) proposer une méthode de validation de cette carte de potentialité de la région de Korhogo ; 3) déterminer les directions productrices et de proposer les sites à gros débits potentiels. Il s'agit dans cette étude de mettre l'accent sur la méthodologie développée pour atteindre ces objectifs.

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1. Cadre d'étude

Le département de Korhogo est situé dans la partie nord de la Côte d'Ivoire, entre les longitudes 5°23' et 6°01' W et les latitudes 9°26' et 9°46' N (figure 1), et couvre une superficie d'environ 12 500 km^2.

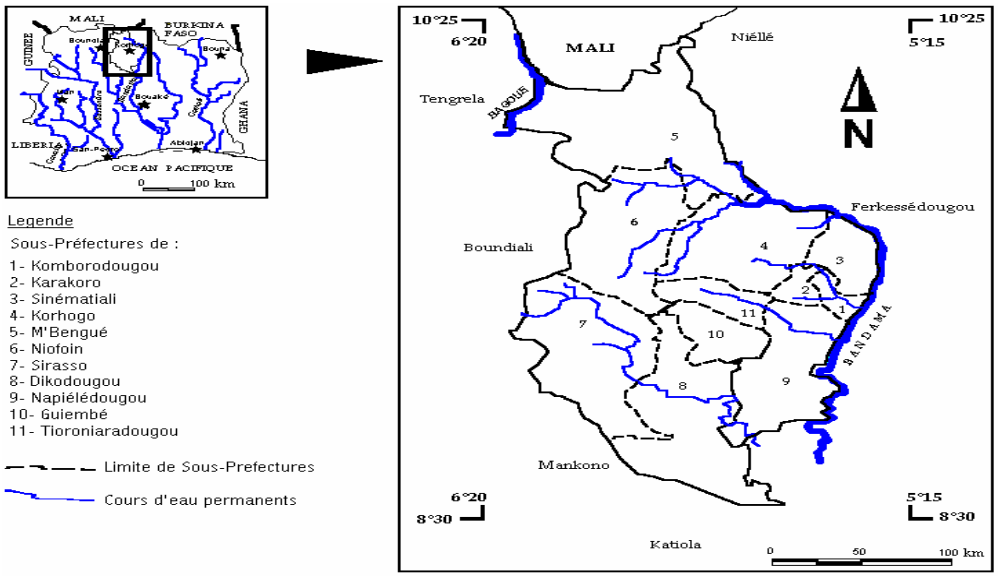


FIGURE 1 : Localisation de la région étudiée. *Location of the study area.*

Le sol est en grande partie couverte par la savane très variée et comportant différents types, à savoir des savanes boisées, des savanes arborées, des savanes arbustives et des savanes herbeuses. Il est aussi couvert par des steppes arborées-arbustives, des steppes herbacées, des forêts claires et des forêts galeries. On rencontre également de nombreuses plantations de coton, d'anarcades, d'ignames et des rizières dans les bas-fonds au centre et à l'est. On dénombre de nombreuses agglomérations villageoises concentrées autour des barrages agro-pastoraux construits sur les affluents du Bandama blanc et une dizaine de Sous-Préfectures relativement peuplées d'environ 2 000 habitants (INS, 2000). Les sols nus sont constitués par les affleurements de roches cristallines rencontrés surtout dans le secteur autour de la ville de Korhogo et au sud est. Le relief de la zone est monotone avec des altitudes variant en moyenne entre 300 et 400 m . On note dans le paysage des inselbergs granitiques culminant parfois à plus de 500 m d'altitude. La région de Korhogo est constituée de plateaux latéritiques d'une hauteur variant de 0 à 3 m, témoins d'une ancienne pénéplaine. Ces plateaux sont affectés d'une pente très faible et régulière vers le fleuve Bandama .

2.2. Contexte climatique

Le département appartient au système climatique tropical de type soudano-sahélien dont le rythme des saisons est réglé par le déplacement du Front Intertropical (FIT). Le climat est caractérisé par une grande saison sèche qui va de décembre à février et une courte saison pluvieuse allant de mars à novembre. La hauteur de précipitation annuelle est de l'ordre de 1 200 mm, avec une température moyenne annuelle de 27 °C.

2.3. Contexte hydrologique

Le département de Korhogo est largement drainé par le Bandama et ses affluents (le Yoré Lorho, le Solomougou, le Badenou et le Bou). Il développe en maints endroits avec ses affluents, des plaines d'inondation larges de 1 à 1,5 km. Chacun de ces affluents est alimenté par de nombreuses rivières dont le cours supérieur est souvent intermittent**.** La variation saisonnière des écoulements est matérialisée par une période de crue maximale en août et septembre avec des pointes situées en septembre et une période d'étiage de décembre à juin. Le tarissement des différents cours d'eau est court avec une durée moyenne de 50 à 60 jours (2 mois). La décrue est rapide autour d'une dizaine de jours.

2.4. Contexte géologique

Le contexte géologique et tectonique de cette région s'intègre dans l'histoire du craton Ouest africain. Plusieurs travaux (Arnould, 1961 ; Lemoine, 1988 ; Kouamelan, 1996 ; Ouattara, 1998) ont porté sur la géologie et la tectonique de cette région. D'un point de vue lithologique on peut distinguer deux grands ensembles (figure 2) :

- les formations volcaniques, volcano-sédimentaires et sédimentaires, métamorphisées déposées dans les sillons intracratoniques ;
- les granitoïdes éburnéens qui sont des massifs granitiques au sein desquels on y distingue plusieurs générations de granites.

Il ressort également de ces études que la tectonique est polyphasée et a abouti à la mise en place d'une fracturation très développée dans ces formations.

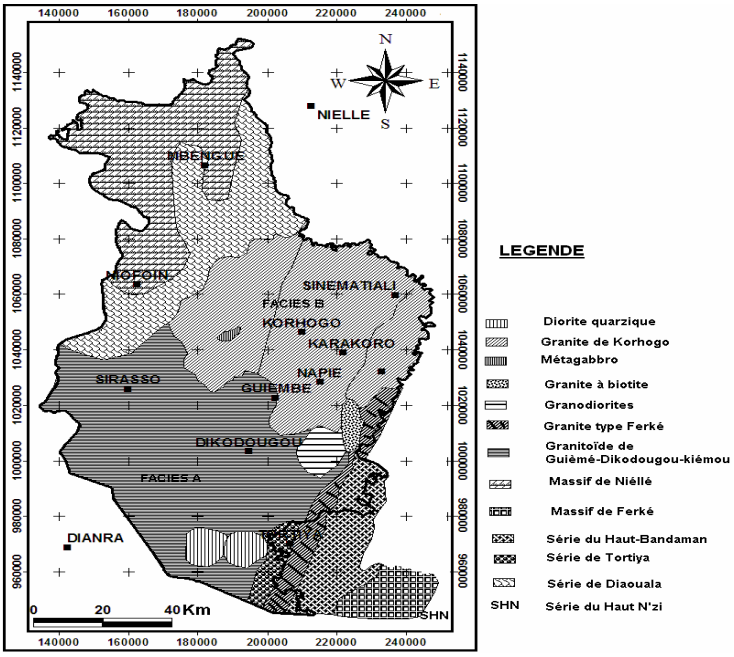


FIGURE 2 : Carte géologique du département de Korhogo. *Geological map of the Korhogo department.*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODOLOGIE

Dans cette étude, plusieurs logiciels ont été utilisés pour le traitement des données cartographiques, des images satellitaires, des fractures et pour l'application du SIG. Ce sont les logiciels ENVI 3.1 et EASE PACE de PCI 6.2 pour le traitement des images satellitaires ; LINWINC 2.1 pour le traitement du réseau de fractures et ArcView 3.2 pour la mise en place du SIG.

Le contenu de la base de données reflète l'objectif visé et est constitué de données climatiques (pluies et températures de la période allant de 1986 à 1995), données hydrologiques (de 1980 à 1996), six cartes topographiques au 1/200 000 de l'Institut Géographique National de France (IGNF) de 1967, deux scènes (197-54 et 197-55) ETM+ de Landsat du 31 janvier 2 000 et des fiches techniques des forages. À partir de ces données primitives, d'autres informations ont été générées. Pour une conformité d'échelle, le relevé de la fracturation détaillée à partir des images Landsat a été faite à l'échelle de 1/200 000 pour ne prendre en compte que les fractures secondaires d'ordre kilométrique et multikilométrique qui ont un intérêt hydraulique dans le milieu fissuré (Engalenc, 1978 et 1979).

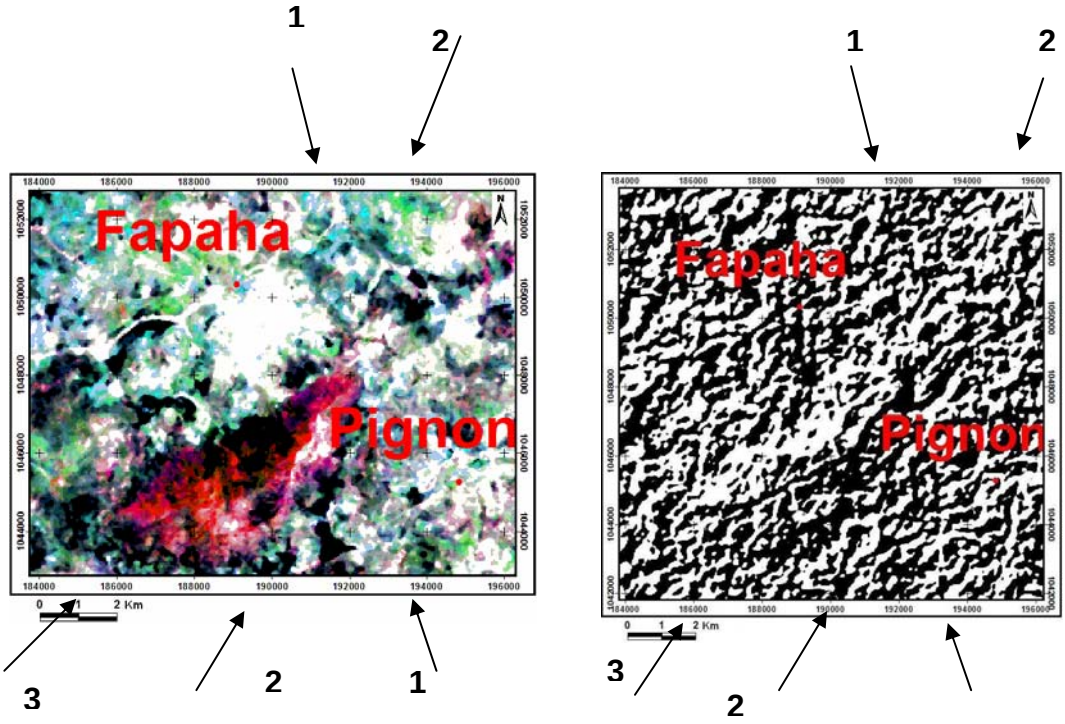
3.1. Méthode de modélisation spatiale des potentialités en eau souterraine

La méthodologie adoptée pour la cartographie des zones à potentialité en ressources en eau en milieux fissurés comprend quatre (4) étapes à savoir la définition des critères, la classification des critères, l'évaluation des critères et le croisement ou l'agrégation des critères.

3.1.1. Définition des critères

Pour la définition des critères favorisant une bonne accumulation des eaux souterraines, les travaux de plusieurs auteurs (Engalenc, 1978 et 1979 ; Savané, 1997 ; Savané et Biémi, 1999 ; Savané *et al.*, 1999 ; Jourda *et al.*, 2003 ; Goyal *et al.*, 2004 ; Phukon, 2004 ; Saley, 2003 ; Jourda, 2005 ; Jourda *et al.*, 2005) ont été utilisés. Les critères retenus sont :

- la pente déterminée à partir des cartes topographiques au 1/200 000. Les courbes de niveau numérisées ont servi à la réalisation du MNT. À partir de celui-ci, la carte des pentes a été générée. Elle permet d'identifier les zones à bonnes conditions de réalisation d'ouvrages ou à bonnes conditions de recharge ;
- la densité de drainage obtenue après un relevé du réseau hydrographique a été déterminée à partir de la mosaïque des 6 cartes topographiques des départements de Korhogo, Mankono, Katiola, Tengrela, Niellé et de Boundiali au 1/200 000 fournies par le Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT). À partir de cette carte du réseau de drainage, une carte de densité de drainage a été réalisée. Toute la zone d'étude a été discrétisée suivant un maillage de 5 km x 5 km et le nombre de drains par maille a été compté. Les données ont été transférées sous Arcview 3.2 où elles ont été interpolées pour générer une carte de densité de drainage par maille ;
- la densité de fracturation est tirée de la carte de fracturation détaillée du département de Korhogo issue du traitement des images ETM+ de Landsat du 31 janvier 2000. Le choix des images de cette date a été motivé par l'absence de nuages dans la région au cours de la saison sèche allant des mois de décembre à février. En outre, les images de différentes dates n'ont aucun effet sur les résultats attendus sachant que la mise en place des fractures s'est effectuée il y a de cela des million d'années. Les scènes 197-53, 197-54 et 198-53 ont été utilisées. Une image de la zone d'étude a été extraite à partir de la mosaïque des trois scènes. Cette image a été corrigée géométriquement par la méthode de modélisation mathématique polynomiale et la précision est attestée par des erreurs de 0,13 (soit 3,9 m) suivant les pixels et de 0,13 (soit 3,9 m) suivant les lignes. À l'échelle de relevé des fractures détaillées (1/200 000), ce taux d'erreur d'environ 4 m sur le terrain correspondant sur la carte à 0,002 cm (soit 0,02 mm d'erreur), n'influence pas de façon majeure la direction des fractures. À la suite de la correction géométrique, les images ont subi tous les traitements spécifiques qui ont permis de révéler les linéaments (figure 3) et de faciliter leur extraction.



Composition colorée ETM+542

Filtre de Sobel 7X7 SE-NW

FIGURE 3 : Zoom d'une mosaïque d'images Landsat montrant des exemples typiques de fractures. *Zoom on a Landsat mosaic showing typical examples of fractures.*

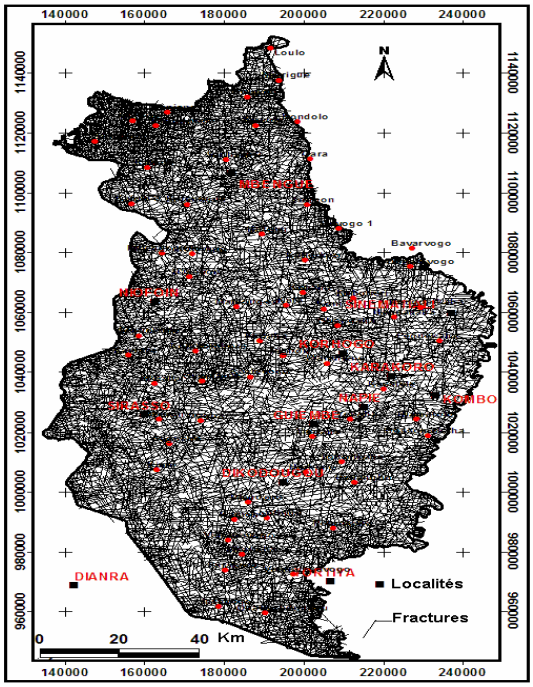


FIGURE 4 : Carte de discontinuités-image du département de Korhogo extraites des images ETM+ de Landsat du 31 janvier 2000. *Map of the discontinuities in the Korhogo department extracted from Landsat ETM+ images of January 31, 2000.*

Ces derniers ont été validés sur la base des données de terrain, des cartes géologiques et des photographies aériennes existantes permettant ainsi d'obtenir une carte de fracturation détaillée (figure 4). L'étude de la fracturation a été conduite à l'aide du champ de fracturation réalisé ;

- l'épaisseur d'altération a été calculée à partir des fiches techniques de forages contenues dans la base de données. Le croisement d'un modèle numérique de terrain (MNT) issu des cartes topographiques et d'un modèle numérique du substratum (morphologie du toit du bed rock) a permis d'identifier les bassins d'altération de la zone d'étude ;
- les perméabilités induites ont été calculées à partir de la méthode de Francis (1970) proposée

pour les milieux fissurés. Cette méthodologie a été utilisée et améliorée par différents auteurs dont Savadogo (1984), Biémi (1992), Savané (1997), Kouamé (1999), Koussoubé (1996) et Jourda (2005). Son application s'est effectuée sur la carte de fracturation régulièrement maillée issue des images ETM+ de Landsat. Dans chaque maille de taille 5 km x 5 km, il est déterminé le nombre total de fractures, la longueur et l'orientation de chaque fracture. À partir de ces paramètres, il est calculé à l'intérieur de chaque maille, les perméabilités induites maximum, minimum et moyenne. Enfin, une carte de perméabilité induite moyenne est réalisée ;

- l'infiltration efficace est déterminée à partir des données pluviométriques, hydrologiques et du bilan hydrique de Thornthwaite (1944). La méthode de Thornthwaite n'exige qu'un minimum de données climatiques puisque dans la formule, seule la température de l'air est prise explicitement en compte. Mais les valeurs obtenues doivent être utilisées avec prudence étant donné l'adoucissement des fluctuations réelles de l'ÉTP et du choix de la réserve facilement utilisable (RFU) par les plantes qui résulte de l'emploi de cette formule. En particulier, le déficit de saturation de l'air n'est pas pris en compte. Or, pour une même température moyenne, le pouvoir évaporant de l'air dépend pour beaucoup de son degré hygrométrique, ainsi que de la vitesse du vent. Toutefois, lorsqu'on travaille à grande échelle (bassin versant par exemple) et en valeurs cumulées (cas du bilan hydrologique), les résultats sont satisfaisants et permettent de donner un intervalle de grandeurs des différents paramètres qui concourent à l'estimation de l'infiltration avec un taux d'erreur de 10 %.

3.1.2 Classification des critères

Chaque critère identifié, pour être dans les meilleures conditions d'interprétation a été reparti en 5 classes comme l'ont défini Savané *et al.* (1997) et Saley (2003) : très faible, faible, moyen, forte, très forte. Ces classes ont été choisies en tenant compte de la classification proposée par le Comité Inter-Africain d'Études Hydrauliques (C.I.E.H., 1978) qui subdivise les débits de production des ouvrages en cinq classes. Les débits de production des ouvrages, bien que n'intervenant pas dans la réalisation de la carte thématique « Potentialité en eaux souterraines », vont servir comme critère d'évaluation et moyen de validation de celle-ci. Les différentes limites de classes sont résumées dans le tableau 1

.

TABLEAU 1: Limites de classes des critères. *Class limits of the criteria*

CLASSES	*Très faible*	*Faible*	*Moyenne*	*Forte*	*Très forte*
Épaisseur d'altération	*< 10 m*	*10-15 m*	*15-25 m*	*25-40 m*	*40-70 m*
Pente	*<0,1*	*0,1--1*	*1-3,5*	*3,5-5*	*5-7,5*
Densité de drainage (km / km2)	*<0,3*	*0,3-0,36*	*0,36-0,44*	*0,44-0,56*	*0,56-1,16*
Perméabilité induite (xE^{-7})	*<0,5*	*0,5-1,5*	*1,5-2,95*	*2,95-4,5*	*4,5-6*
Densité de fracturation (km / km²)	*<1*	*1- 2*	*2-3*	*3-4,6*	*4,6-7,12*
Infiltration efficace	*<25 mm*	*25-50 mm*	*50-75 mm*	*75-100 mm*	*>100 mm*

3.1.3 Évaluation des critères

L'évaluation spatiale des critères est fonction de la thématique qu'on veut étudier. Chaque thème appelé aussi indicateur (Savané, 1997) est formé d'un ensemble de critères ou facteurs nécessaires à la réalisation de l'indicateur. Dans le cadre de cette étude, l'indicateur « Potentialité en eaux souterraines » associe les critères pente, infiltration efficace, densité de drainage, densité de fracture, perméabilité induite et épaisseur d'altération (Jourda, 2005). L'évaluation de chaque critère sera

faite en fonction de l'objectif à atteindre ; ici le calcul d'un indicateur donné. La plupart des critères considérés dans une démarche de définition des potentialités en ressources en eaux souterraines font appel à des évaluations d'un phénomène physique (la densité de drainage, la fracturation, la pente, etc.). On combine ainsi des informations de types géomorphologique et climatique (MNT, pluviométrie, hydrologie, etc.). Pour Florent (1995), ce type de critère est facilement évalué, grâce aux fonctionnalités d'analyse spatiale des SIG matriciels. Chaque évaluation aboutit à une carte représentant, pour toutes les surfaces élémentaires (pixels), leur adéquation au critère considéré. L'unité de mesure de ces évaluations est en général une unité physique (mètre, temps, %.....) qui peut être ramenée à des classes de sensibilité. Dans le calcul de l'indicateur « Potentialité en eaux souterraines », le critère (carte) densité de fracturation est évalué de la manière suivante (tableau 2) et comparé à un autre indicateur (site de stockage) pris comme exemple. Comme on le constate à la lecture du tableau 2, l'évaluation change en fonction de l'indicateur. Une forte densité de fracturation sera idéale pour l'infiltration des précipitations, alors que cette même forte densité de fracturation n'est pas indiquée pour le stockage de déchets toxiques, parce que dans ce cas, on recherche plutôt les terrains imperméables. En se basant sur cette logique, tous les critères ont été évalués. Une fois que les différentes cartes de critères ou facteurs sont évaluées, on passe au croisement ou agrégation de ces critères.

TABLEAU 2 : Exemple d'évaluation du critère densité de fracturation par rapport aux indicateurs potentialité en eaux souterraines et site de stockage de déchets toxiques. *Example of assessment of the density of fracturing criterion compared to the indicators of groundwater potential and toxic waste storage site*

	CLASSE	***LIMITE DE CLASSE***	***ÉVALUATION /POTENTIALITÉ EN EAUX SOUTERRAINES (classes de sensibilité)***	***ÉVALUATION/ SITE DE STOCKAGE DE DÉCHETS TOXIQUES (classe de sensibilité)***
CRITÈRE DENSITÉ DE FRACTURATION *(km/km²)*	*Très faible*	*< 1*	*Très défavorable*	*Très favorable*
	Faible	*1 - 2*	*Défavorable*	*Favorable*
	Moyenne	*2 - 3*	*Moyennement favorable*	*Moyennement favorable*
	Forte	*3 – 4,6*	*Favorable*	*Défavorable*
	Très forte	*4,6 – 7,12*	*Très favorable*	*Très défavorable*

3.1.4. Croisement ou agrégation des critères

Une fois que les critères sont identifiés, classés et évalués en fonction de l'indicateur, la question qui se pose est celle du choix de la méthode de croisement ou d'agrégation des critères (facteurs).

De nombreuses méthodes existent. Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes : les méthodes d'agrégation partielle ou méthode de surclassement et les méthodes d'agrégation complète.

Pour cette étude, c'est la méthode d'agrégation complète par codification qui a été retenue (Kouamé, 2003 ; Jourda *et al.*, 2003 ; Jourda, 2005 ; Jourda *et al.*, 2005). La codification consiste à faire correspondre à chaque classe un « Code ». Le système de notation retenu est celui de la progression arithmétique pour que les « points » obtenus puissent être additionnés avec ceux des classifications relatives aux autres facteurs.

Les différents codes affectés aux classes des critères de l'indicateur potentialité en eaux souterraines sont résumés dans le tableau 3. L'assignation des codes 1, 10, 100 a été adoptée pour faciliter la distinction des différentes variantes (pixels) après l'agrégation des cartes thématiques (critères). C'est ce qui a été appelé le concept de « traçabilité ». En effet, après l'agrégation, la distinction est facilitée dans ce cas, car on voit aisément que par exemple, la variante 51, vient du croisement des variantes 50 et 1. Cela se passe comme si les différentes variantes étaient suivies à la trace.

TABLEAU 3 : Classes et codes des critères de l'indicateur potentialité en eaux souterraines. *Classes and codes of the criteria of the indicator groundwater potential*

INDICATEUR	*CRITÈRES*	*CLASSES*	*CODES*
POTENTIALITÉ EN EAUX SOUTERRAINES	***Pente (%)***	***< 0,1***	***5***
		0,1-1	***4***
		1–3,5	***3***
		3,5–5	***2***
		5–7,5	***1***
	Infiltration efficace (mm)	***< 25***	***10***
		25–50	***20***
		50–75	***30***
		75-100	***40***
		>100	***50***
	Densité de drainage (km/km²)	***< 0,3***	***50***
		0,3–0,36	***40***
		0,36–0,44	***30***
		0,44–0,56	***20***
		0,56–1,16	***10***
	Densité de fracturation (km/km²)	***< 1***	***1***
		1–2	***2***
		2-3	***3***
		3–4,6	***4***
		4,6–7,12	***5***
	Perméabilité induite (X10⁻⁷m/s)	***< 0,5***	***10***
		0,5–1,5	***20***
		1,5-2,95	***30***
		2,95–4,5	***40***
		4,5-6	***50***
	Épaisseur d'altération (m)	***< 10***	***1***
		10-15	***2***
		15-25	***3***
		25-40	***4***
		40-70	***5***

Dans le tableau 4 on présente un exemple d'agrégation de critères et de regroupement en classes de sensibilité. Le nombre de classes dans chaque critère étant de 5, le nombre de variantes possible est 5 x 5, ce qui donne 25 variantes possibles.

TABLEAU 4 : Valeur prise par chaque variante (pixel) après l'agrégation des critères pour créer la carte thématique intermédiaire des réservoirs. *Value taken by each variable (pixel) after the aggregation of the criteria to create the intermediate thematic map of groundwater reserves*

K induite / ***Épaisseur d'altération***	***Très fort*** 50	***Fort*** 40	***Moyen*** 30	***Faible*** 20	***Très faible*** 10
Très Fort 1	***51***	***41***	***31***	***21***	***11***
Fort 2	***52***	***42***	***32***	***22***	***12***
Moyen 3	***53***	***43***	***33***	***23***	***13***
Faible 4	***54***	***44***	***34***	***24***	***14***
Très Faible 5	***55***	***45***	***35***	***25***	***15***

Chaque variante obtenue sera évaluée selon l'indicateur qu'on veut cartographier (tableau 5). Ici, il s'agit de la potentialité en eaux souterraines en milieux fissurés.

Les critères seront croisés deux à deux pour produire des cartes thématiques intermédiaires :

- la carte des pentes sera croisée avec celle du taux d'infiltration efficace pour créer la carte des recharges efficaces. Dans ce croisement, le critère prépondérant est le taux d'infiltration ;
- la carte de densité de drainage sera croisée avec celle de la densité de fracturation pour donner la carte des zones à fractures ouvertes. Ici, le critère prépondérant est la densité de drainage ;
- la carte de perméabilité induite sera croisée avec celle de l'épaisseur d'altération pour donner la carte des réservoirs, le critère prépondérant étant la perméabilité induite, elle-même liée à la densité de fracturation ;
- la carte des zones à fractures ouvertes sera croisée avec celle de la carte des réservoirs pour donner la carte des aquifères potentiels ;
- enfin, la carte des aquifères potentiels sera croisée avec celle de la recharge efficace pour produire la modélisation spatiale des zones à potentialité en eaux souterraines.

Nous effectuons par la suite un regroupement en classes de sensibilité en tenant compte de l'environnement du terrain (classification dirigée en quelque sorte) et en adoptant la logique suivante qui tient compte du critère dominant :

- une classe de sensibilité excellente (sens strict) est le fruit du croisement de la classe très forte du

critère dominant et celle très fable du critère minoré;
- une classe de sensibilité bonne (sens strict) provient du croisement de la classe forte du critère dominant et celle faible du critère minoré;
- une classe de sensibilité médiocre (sens strict) provient du croisement de la classe moyenne du critère dominant et celle moyenne du critère minoré;
- une classe de sensibilité mauvaise (sens strict) provient du croisement de la classe faible du critère dominant et celle forte du critère minoré et également du croisement de la classe très faible du critère dominant et celle très forte du critère minoré.

TABLEAU 5 : Mode d'évaluation des variantes (pixel) de la carte thématique intermédiaire des réservoirs.
Mode of assessment of the variable (pixel) of the intermediate thematic map of groundwater reserves

K induite / ***Épaisseur d'altération***		***Très fort*** *50*	***Fort*** *40*	***Moyen*** *30*	***Faible*** *20*	***Très faible*** *10*
Très fort	*1*	*BONNE*	*BONNE*	*MÉDIOCRE*	*MAUVAISE*	*MAUVAISE*
Fort	*2*	*BONNE*	*BONNE*	*MÉDIOCRE*	*MAUVAISE*	*MAUVAISE*
Moyen	*3*	*BONNE*	*BONNE*	*MÉDIOCRE*	*MAUVAISE*	*MAUVAISE*
Faible	*4*	*EXCELLENTE*	*BONNE*	*BONNE*	*MAUVAISE*	*MAUVAISE*
Très faible	*5*	*EXCELLENTE*	*EXCELLENTE*	*BONNE*	*MAUVAISE*	*MAUVAISE*

Toutes les variantes (pixels) issues de l'agrégation des critères sont regroupées en (4) classes de sensibilité selon la logique définie ci-dessus. Toutes les combinaisons sont effectuées en mode marticiel en utilisant l'outil Map Calculator du module Spatial Analyst 1.1 de Arcview 3.2. C'est ainsi que la carte thématique « Potentialité en eaux souterraines » de la zone d'étude a été réalisée. Cette carte obtenue est un modèle spatial de la potentialité des eaux souterraines de la région de Korhogo et comme tout modèle, celui-ci a besoin d'être évalué (testé) afin d'être validé.

3.2. Méthodologie de validation des cartes thématiques : test d'évaluation

La problématique des modèles spatiaux issus des SIG est la conformité des résultats obtenus avec la réalité du terrain. En effet, comment savoir si une classe évaluée excellente d'un indicateur donné l'est effectivement ? Cela pose le problème de la validation des résultats de l'analyse multicritère. Pour répondre à ces préoccupations, une méthode a été développée, fondée sur le choix du critère d'évaluation, sur les principes d'utilisation de ce critère et du mode de validation.

3.2.1 Choix d'un critère d'évaluation

Pour évaluer une carte thématique, il faut d'abord disposer de données de référence qui serviront de critère d'évaluation. Ce référentiel doit être des données de terrain portant sur les ouvrages (par exemple, les débits de forages) pour répondre au souci de la réalité de terrain.
Ce critère d'évaluation doit obéir à deux principes :
1) le principe d'indépendance du critère qui exige que les données de référence n'aient pas servi à la réalisation de la carte thématique qu'on veut évaluer. Cela définit la condition d'indépendance du critère pour éviter que le critère d'évaluation soit juge et partie. C'est le principe d'indépendance du critère.
2) le principe de conformité du critère qui nécessite que les données de référence soient regroupées en classes ayant les mêmes bornes (limites de classe) que celles des cartes à évaluer. Cela exprime la condition de conformité ou principe de conformité des classes entre l'évalué (carte thématique) et l'évaluateur (critère d'évaluation).

3.2.2. Mode de validation : courbes de tendance de sensibilité

Dans le SIG, nous superposons à la carte thématique, son critère d'évaluation regroupé en cinq classes (très fort, fort, moyen, faible et très faible). À chaque classe est affecté un index et un tri est fait suivant cet index, de telle sorte qu'à la carte thématique, il est seulement superposé la classe du critère d'évaluation voulue. Il est relevé pour

chaque classe de sensibilité de la carte thématique évaluée, le nombre d'ouvrages (suivant la classe du critère d'évaluation) qui s'y trouve. Ainsi, pour chaque classe du critère d'évaluation, on obtient un nombre d'ouvrages qui appartient à chaque classe de sensibilité de la carte thématique étudiée. Ensuite, on calcule pour chaque classe du critère d'évaluation, le pourcentage par rapport au total. On établit pour chaque classe de sensibilité (carte thématique) une courbe de tendance de sensibilité par rapport à chaque classe du critère d'évaluation. Les formes théoriques des courbes de tendance de sensibilité sont les suivantes :

- une classe de sensibilité excellente est supposée ne contenir que des forages à classe du critère d'évaluation très fort (100 % des ouvrages) ;
- une classe de sensibilité bonne est supposée ne contenir que des forages à classe du critère d'évaluation fort (100 % des ouvrages) ;
- une classe de sensibilité médiocre est supposée ne contenir que des forages à classe du critère d'évaluation moyen (100 % des ouvrages) ;
- une classe de sensibilité mauvaise est supposée ne contenir que des forages à classe du critère d'évaluation faible et très faible (100 % des ouvrages).

La forme des courbes de tendance de classe de sensibilité reflétant à 100 % la réalité du terrain est illustrée par la figure 5. Dans ce cas, on obtient seulement des points et non des courbes. Ce cas peut correspondre aux milieux poreux continus.

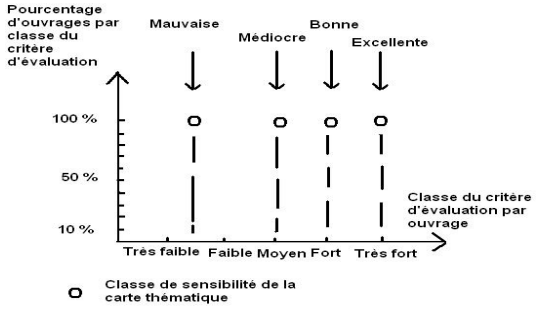


FIGURE 5: Graphe théorique des tendances des classes de sensibilité des cartes thématiques reflétant à 100 % la réalité du terrain. *Theoretical graph of the trends in the sensitivity classes of the thematic map reflecting 100 % of field reality.*

Le milieu de socle est très complexe et variable et la productivité d'un ouvrage donné ou la probabilité de trouver des ressources en eaux dans une zone donnée dépend de beaucoup de facteurs. Il est pratiquement impossible de trouver une classe de sensibilité reflétant à 100 % la réalité du terrain, en ce sens qu'à côté d'un forage à gros débit on peut avoir un autre forage à débit faible, voire nul. Dans les milieux de socle, des courbes vont exprimer les tendances des classes de sensibilité (Figure 6). La validation des cartes thématiques se fait donc par comparaison de la forme des courbes de tendance des classes de sensibilité des cartes thématiques évaluées à la forme des courbes théoriques.

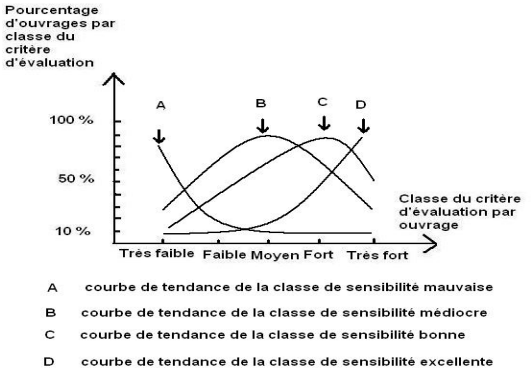


FIGURE 6: Graphe théorique des courbes de tendance des classes de sensibilité (Cas général). *Theoretical graph of the trend curves of the sensitivity classes (general case).*

Chaque courbe de tendance de sensibilité matérialise le comportement (sensibilité) d'une classe de sensibilité donnée vis-à-vis d'un critère d'évaluation.

Pour qu'une classe de sensibilité thématique donnée soit le reflet de la réalité du terrain, il faut que sa courbe de tendance soit de la forme de l'une des courbes théoriques définies ci-dessus correspondant à sa classe :

- la courbe de tendance de la classe de sensibilité excellente doit être de la forme unimodale ;
- la courbe de tendance de la classe de sensibilité bonne doit être de la forme unimodale ou présenter un mode centré sur la classe fort du critère considéré ;
- la courbe de tendance de la classe de sensibilité médiocre doit être de la forme en cloche (courbe de Gauss) avec un mode centré sur la classe moyenne du critère d'évaluation considéré ;
- la courbe de tendance de la classe de sensibilité mauvaise doit être de la forme unimodale franche ou avec une variante présentant un mode centré sur la classe faible du critère d'évaluation considéré.

Dans la figure 7, on résume la démarche méthodologique de la réalisation de la carte des potentialités en eaux souterraines du département de Korhogo

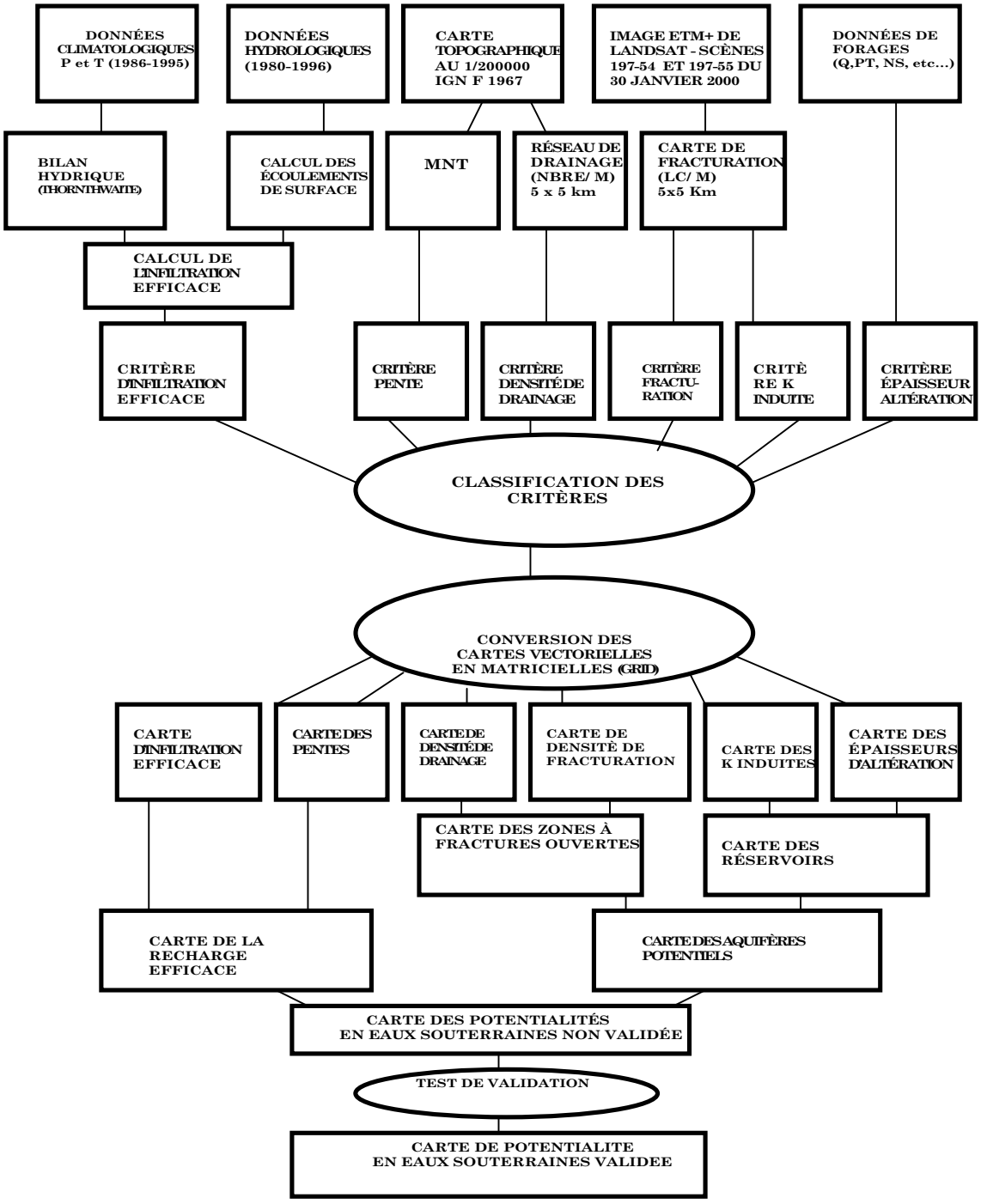


FIGURE 7 : Synthèse de la méthode de réalisation de la carte de potentialité en eaux souterraines. *Synthesis of the method of implementation of the map of groundwater potential.*

3.3. Détermination des principales directions de production et des sites d'implantation de forages à gros débits potentiels

Dans un milieu de socle, l'obtention d'un gros débit est fortement liée au positionnement des forages par rapport aux fractures (Savadogo, 1984 ; Biémi, 1992 ; Nakolendousse et Savadogo, 1993 ; Biémi *et al.*, 1997 ; Jourda, 2005) . L'un des critères souvent retenu est de rechercher les fractures les plus longues possibles (carte des accidents majeurs) et l'intersection de deux ou plusieurs fractures kilométriques d'orientation préférentielle SO-NE et SE-NO (carte de la fracturation détaillée). En plus de ces critères, nous avons estimé que le site, pour être très productif, doit se superposer à une zone à fort potentiel hydraulique, à une zone à forte densité de nœuds, à une zone à forte densité de fracturation, à une zone à forte épaisseur d'altération au dessus d'un bassin d'altération et enfin, à une zone à forte perméabilité induite.

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

4.1. Carte des potentialités en eaux souterraines de la région de Korhogo

La carte thématique des potentialités en eaux souterraines de la région de Korhogo est présentée à la figure 8. La superficie couverte par chaque classe thématique a été calculée.

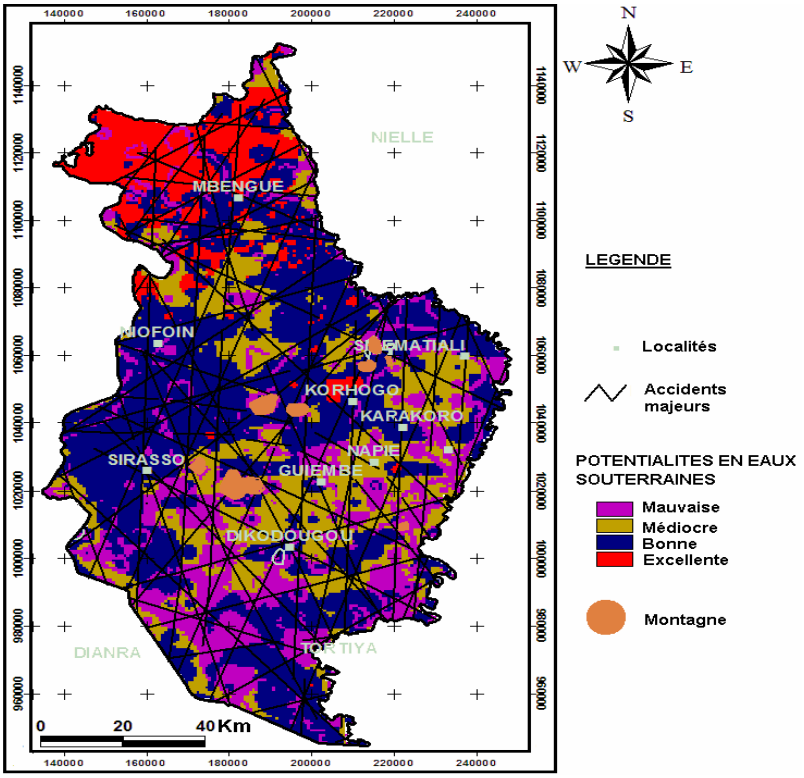


FIGURE 8 Carte de potentialité en eaux souterraines du département de Korhogo. *Map of groundwater potential of the Korhogo area.*

Les résultats sont présentés dans la figure 9. Quatre classes de potentialité en ressources en eau ont été cartographiées. Sur le plan de la potentialité en eau, la région est dominée par les classes excellente et bonne (près de 60 %). Il y a 3 zones orientées sensiblement SO-NE :

- la zone à potentialité bonne à excellente orientée SO-NE et NO-SE est à l'ouest et part de la ville de Mbengue en passant par Niofoin jusqu'à Sirasso et Tortiya. Quelques poches de ces classes existent ailleurs dans la zone de Karakoro, Komborodougou et de Korhogo. Ces classes sont très recherchées par les hydrogéologues. Dans le futur plan de développement de la région de Korhogo, ces zones seront très importantes dans l'implantation des ouvrages à gros débits dans le cadre de l'hydraulique villageoise améliorée et urbaine. Il

est intéressant de voir qu'à elles seules, ces deux classes couvrent près de 60 % du territoire. Les grandes villes comme Korhogo, Sirasso, Mbengue, Dikodougou et Sinématiali sont dans les environs immédiats des zones à potentialité excellente à bonne. La ville de Korhogo, dans son plan de développement des ressources en eau peut envisager les eaux souterraines comme source alternative aux eaux de barrages qui sont plus exposées à la pollution dont le traitement s'avère coûteux. Cette zone est à potentialité bonne à excellente parce qu'elle est très fracturée avec des grands bassins d'altération et de nombreux bas-fonds ;

- la zone à potentialité médiocre est disséminée et part de la ville de Dikodougou jusqu'à Korhogo. Elle couvre 20 % du territoire. ;
- la zone à potentialité mauvaise est à l'extrémité sud-est de la région, prés des secteurs de Kiémou. Ces zones sont à potentialité mauvaise parce que l'infiltration se fait aussi difficilement liée à l'absence de bas-fonds. Les épaisseurs d'altération sont faibles et le socle affleure.

On recommande pour une implantation d'ouvrages dans ces zones de viser les accidents majeurs repérés en images satellitaires. La région de Korhogo a de grandes potentialités en eaux souterraines pouvant constituer des sources d'approvisionnement de la population.

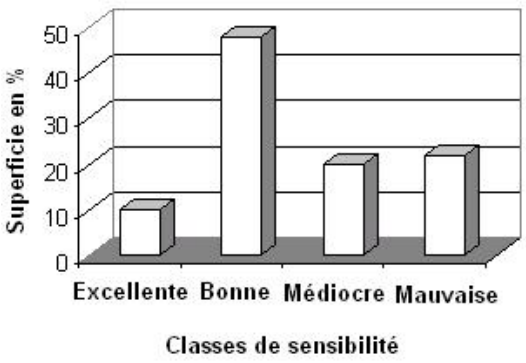


FIGURE 9 : Histogramme de répartition en pourcentage des superficies couvertes par les classes de sensibilité de la carte de potentialité en eaux souterraines. *Histogram of distribution expressed as a percentage of the surfaces covered by the sensitivity classes of the map of groundwater potential.*

4.2 Validation de la carte thématique « Potentialité en eaux souterraines »

Pour évaluer la carte de la potentialité en eaux souterraines de la zone d'étude, la condition idéale était de disposer d'un référentiel qui puisse donner le potentiel en eaux souterraines. Pour ce faire, le débit des ouvrages a été utilisé. Le problème d'indépendance ne se posait pas, parce que ce paramètre n'a pas été intégré comme critère dans la modélisation spatiale des potentialités en eaux souterraines. Les débits ont été regroupés en cinq classes telles que définies précédemment

TABLEAU 6 : Pourcentage de forages d'une classe du critère d'évaluation (débit) se superposant à une classe de sensibilité (N*= 180). *Drilling percentage of a class of the assessment criterion (yield) superimposed on a sensitivity class (N*= 180)*

Classes de sensibilité / ***Classes de débits***	***EXCELLENTE (%)***	***BONNE (%)***	***MÉDIOCRE (%)***	***MAUVAISE (%)***	***NOMBRE DE FORAGES PAR CLASSE DE DÉBIT***
Très fort (5) *Q> 10 m³/h*	***44,5***	***33,4***	***22,2***	***0***	***9***
Fort (4) *10 <Q>5 m³/h*	***13***	***47,9***	***21,7***	***8,7***	***22***
Moyen (3) *5<Q>2 m³/h*	***11,5***	***31,4***	***42,9***	***14,3***	***35***
Faible (2) *2<Q>1 m³/h*	***10***	***20***	***40***	***24***	***50***
Très faible (1) *Q < 1 m³/h*	***7,9***	***19***	***26,9***	***46***	***63***

N* : Nombre total de forages. *Total number of drillings*

Les forages ont été triés selon leur index lié au débit et superposés à la carte de potentialité en eaux souterraines. Le nombre de forages qui se superposent à chaque classe thématique donnée est relevé. À partir de ce nombre obtenu, on calcule le pourcentage des forages qui se superposent à la classe de la carte de potentialité. Ces pourcentages sont résumés dans le tableau 6.

Un graphe des pourcentages du nombre de forages en fonction des classes de débits est construit (figure 10).

À l'analyse du graphe de la figure 10, on se rend compte que le graphe obtenu par l'évaluation de la carte de potentialité en eau réalisée par la méthode par codification reflète la sensibilité du terrain.

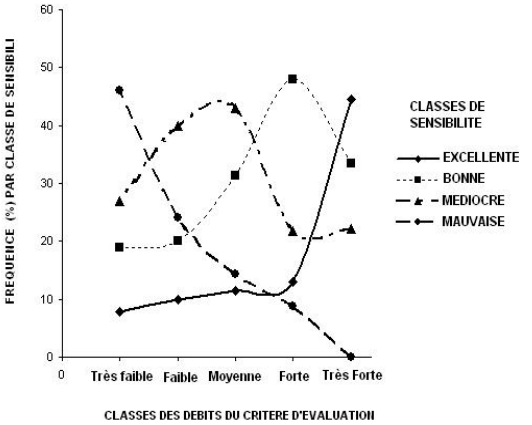


FIGURE 10: Courbes de tendance des classes de sensibilité : test d'évaluation de la carte thématique de potentialité en eaux souterraines. *Trend curves of the sensitivity classes: assessment test of the thematic map of groundwater potential.*

Les différentes classes de sensibilité sont recouvertes en grande partie par les ouvrages à débits correspondants. C'est ainsi que près de 45 % des ouvrages à débit très fort se superposent à la classe de sensibilité excellente, 48 % des ouvrages à débit fort se superposent à la classe de sensibilité bonne, 70 % des ouvrages à débit faible et très faible se superposent à la classe de sensibilité mauvaise et enfin, 43 % des ouvrages à débit moyen se superposent à la classe de sensibilité médiocre. Ce résultat traduit le fait que les classes de sensibilité expriment la productivité des aquifères sur le terrain. Il faut cependant noter que c'est la classe de sensibilité mauvaise qui exprime le mieux la réalité du terrain. Nous avons relevé pour exemple un ensemble de forages à débit très fort et fort après les avoir superposés à la carte thématique des potentialités en eaux souterraines. Les résultats sont résumés dans le tableau 7.

L'analyse du tableau 7 indique que sur les 30 ouvrages ($Q > 10$ m^3/h), 28 ouvrages (93 %) se superposent aux classes de potentialité bonne à excellente. Seuls deux ouvrages à débit très fort ($Q = 18$ m^3/h et $Q = 21$ m^3/h) sont classés dans la classe de potentialité moyenne et mauvaise. En outre, l'analyse du tableau 6 et 7 indique que dans la majorité des cas, les classes de potentialité excellente et bonne contiennent les forages ayant une productivité très forte (78 %) à forte (61 %). Ce résultat démontre que les classes de sensibilité excellente et bonne reflètent fortement les zones à bonne potentialité en eaux souterraines des aquifères du département de Korhogo. Il est indéniable que la carte des potentialités en ressources en eau réalisée par la méthode par codification reflète la productivité des aquifères de socle de la région de Korhogo, comme l'a montré le test d'évaluation permettant ainsi de valider cette carte.

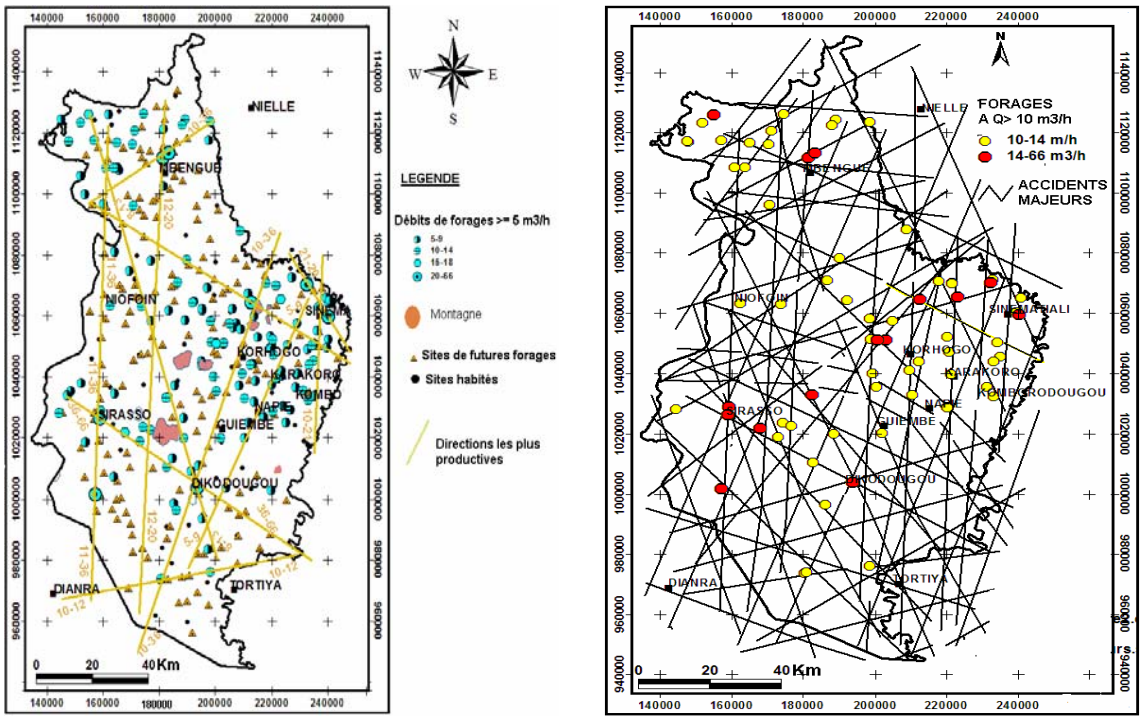
Le test de l'influence d'un des critères (densité de fracturation) sur la productivité des ouvrages montre que cette dernière varie en fonction de la densité de la fracturation. En effet, près de 75 % des ouvrages à forte productivité (très fort et fort) se superposent aux classes de densité de fracturation, très fort et fort également. Par contre, près de 70 % des ouvrages à faible productivité (faible et très faible) se superposent aux classes de densité de fracturation, faible et très faible. Ce résultat du test individuel de la densité de fracturation révèle que la productivité des ouvrages est étroitement liée à la densité de fracturation confirmant ainsi les résultats de travaux antérieurs dans le milieu de socle (Engalenc *et al.*, 1978 et 1979, Savadogo, 1984, Biémi, 1992, Biémi *et al.*, 1997).

TABLEAU 7 : Classes de sensibilité excellente et bonne et productivité des forages. *Excellent and good sensitivity classes and drilling productivity*

N°	*LOCALITÉS*	*CLASSE DE SENSIBLITÉ*	*CLASSE DU CRITÈRE D'ÉVALUATION (DÉBITS)*	*PRODUCTIVITÉ DES FORAGES (m^3/h)*
1	*BEVOGO*	*BON*	*BON*	*10*
2	*DAGBAPLA*	*BON*	*BON*	*13,5*
3	*DIKODOUGOU*	*BON*	*EXCELLENT*	*36*
4	*FONANFLA*	*BON*	*EXCELLENT*	*18*
5	*FONONVOGO*	*BON*	*EXCELLENT*	*17*
6	*FONONVOGO*	*BON*	*BON*	*12,9*
7	*KAFAGAVOGO*	*BON*	*BON*	*11*
8	*KAFONON*	*EXCELLENT*	*EXCELLENT*	*15*
9	*KANOFA*	*BON*	*BON*	*11*
10	*KASSIOLO*	*EXCELLENT*	*BON*	*10*
11	*KATENEGUE*	*BON*	*BON*	*11*
12	*KATENEGUE*	*BON*	*BON*	*11*
13	*KOHOTIERI*	*MOYEN*	*EXCELLENT*	*21*
14	*KOKO*	*BON*	*EXCELLENT*	*36*
15	*KOLIANI*	*BON*	*BON*	*11*
16	*KONDOLO*	*EXCELLENT*	*BON*	*11*
17	*KOUOLO*	*BON*	*BON*	*11*
18	*MBENGUE 1*	*EXCELLENT*	*EXCELLENT*	*20*
19	*MBENGUE 2*	*EXCELLENT*	*EXCELLENT*	*29*
20	*NGOLOKAHA*	*EXCELLENT*	*BON*	*10,8*
21	*NIOFOIN*	*BON*	*BON*	*13*
22	*NONGON*	*EXCELLENT*	*BON*	*10,8*
23	*SAKPELLE*	*MAUVAIS*	*EXCELLENT*	*18*
24	*SINEMATIAL 1*	*BON*	*EXCELLENT*	*20,5*
25	*SINEMATIALI 2*	*BON*	*EXECELLENT*	*21*
26	*SIRASSO 1*	*BON*	*EXCELLENT*	*66*
27	*SIRASSO 2*	*BON*	*EXCELLENT*	*16*
28	*TCHEKAHA*	*BON*	*BON*	*13*
29	*TIOROTIERI*	*EXCELLENT*	*BON*	*11*
30	*VONONLOHO*	*EXCELLENT*	*BON*	*10,8*

4.3. Carte des sites favorables à l'implantation des forages à gros débit dans la région deKorhogo

La superposition des forages à gros débit sur la carte des accidents majeurs révèle que les forages les plus productifs sont situés sur les accidents majeurs et s'alignent suivant trois directions principales, soulignées en orange sur la figure 11a : la direction N-S avec des débits allant de 10 à 36 m^3/h, la direction NE-SO avec des débits pouvant atteindre 20 m^3/h et la direction NO-SE avec des débits importants de 36 m^3/h et pouvant atteindre 66 m^3/h dans la zone de Sirasso.



b: Carte des sites à gros débit et des directions productives de Korhogo

a: Relation entre les accidents majeurs et la productivité des ouvrages

FIGURE 11 : Productivité des forages et mégafractures dans le socle précambrien. *Productivity of drillings and major fractures in the Precambrian rocks*

Il est important de noter que les forages les plus productifs de la région captent un accident majeur. Les traitements spécifiques des images satellitaires ont permis de mettre en évidence les fractures les plus importantes qui ont été captées par ces forages. Pour l'identification des sites favorables à l'implantation des forages, le croisement des grandes fractures issues du traitement des images ETM+ de Landsat et la proximité des sites habités ont été intégrés comme critères d'identification. Les résultats sont représentés sur la figure 11b. La réalisation de cette carte des sites est basée sur les fractures dont les nœuds ont servi de point de repère

5. DISCUSSION

La méthode développée pour réaliser la carte de potentialité en eaux souterraines ne peut s'appliquer que dans les milieux fissurés où la profondeur maximum des aquifères se situe autour de 100 m et non pour les aquifères très profonds ou fossiles. L'une des difficultés de cette méthode est la définition des limites des classes des critères choisis. Pour chaque critère, la gamme de variation des valeurs est divisée en un certain nombre voulu de classes selon des valeurs de limites choisies, non nécessairement équidistantes mais significatives du point de vue des applications pratiques. Le choix des limites de classe s'opère en fonction, d'une part, de la faculté de discernement de l'opérateur et de son sens de jugement et, d'autre part, des valeurs affichées par les histogrammes des critères. Les limites des classes des critères adoptées dans cette étude ne sont donc pas figées, mais dépendent des valeurs en présence, de la réalité du terrain et des objectifs à atteindre.

Dans ce genre d'étude, l'approche pour obtenir la conductivité hydraulique dans un milieu cristallo-metamorphique est rendue difficile. En effet, la méthode pour calculer ce paramètre ne permet pas d'avoir une idée réelle de celui-ci. Si bien que les valeurs calculées sont-elles celles de la zone des altérites ou des fissures ? Une autre difficulté est en relation avec la situation des fractures sur le

terrain qui reste tributaire de la précision des corrections géométriques effectuées sur les images et de la précision des positionnements par GPS. Cependant, à l'échelle à laquelle ont été relevées les fractures, le taux d'erreur est insignifiant et n'affecte pas les résultats obtenus.

Cette étude souffre de l'absence de mesures piézométriques continues permettant de suivre l'évolution des nappes et, par conséquent, leur alimentation effective sur le terrain, cette lacune étant liée à l'absence de piézomètres dans la région. Si on devait faire des mesures sur les forages, il aurait fallu démonter ceux-ci ; ce qui n'était pas sans causer beaucoup de désagréments aux populations avec les risques de casser les pompes d'exhaure. C'est vrai que par cette approche, les zones à haut potentiel sont définies, mais cela n'est pas une garantie de succès à 100 % même si la probabilité est forte. La carte de potentialité en eau souterraine est un instrument d'aide à la prospection en milieux de socle. Elle intervient en amont dans toutes recherches d'eau. L'intérêt de cette carte de potentialité est de contribuer à prédire la probabilité de succès lors de la réalisation des ouvrages en ce sens qu'une bonne potentialité traduirait une probabilité élevée de tomber sur un aquifère productif.

6. CONCLUSION

La méthodologie développée pour l'évaluation des potentialités des eaux souterraines en milieux fissurés précambriens de la région de Korhogo à partir des images ETM^+ de Landsat et des méthodes d'analyse multicritères s'avère fiable. Nous avons défini les méthodologies spécifiques qui sont les plus indiquées dans la cartographie des critères favorisant l'accumulation des eaux souterraines dans des milieux fissurés. Le SIG, grâce à ses capacités d'analyse spatiale, a permis de réaliser la carte de potentialité en eaux souterraines de la région de Korhogo qui est d'un apport dans la gestion des ressources en eau de la région. Celle-ci se présente comme une région potentiellement pourvue en ressources en eau avec près de 60 % du territoire présentant une bonne disponibilité en eau. Cette carte révèle que la région de Korhogo est dominée par les classes excellente et bonne (près de 60 %) situées à l'ouest et qui partent de la ville de Sirasso en passant par Niofoin jusqu'à M'bengué. La carte de potentialité a été validée par la méthode d'évaluation mise en œuvre.

Enfin, l'analyse multisource a permis de réaliser une carte de sites favorables à de gros débits dans une optique d'amélioration de l'approvisionnement en eau des grosses agglomérations. Les principales directions productrices de la région ont été identifiées : la direction N-S, la direction NE-SO correspondant aux directions éburnéennes et la direction NO-SE associée à la direction libérienne.

Ces résultats, bien que prometteurs, ont besoin d'être améliorés en intégrant un autre critère tel que l'occupation du sol pour tenir compte de l'évolution socio-économique de la région. Il serait également intéressant de déterminer la recharge réelle en associant les techniques des isotopes de l'environnement et les limites des classes des critères en relation avec les poids qui leurs sont affectés par des méthodes statistiques. En outre, il faudrait envisager une étude sectorielle à une échelle plus grande (1/50 000) et voir la variation de la potentialité en eau souterraine.

Remerciements

Les auteurs remercient la Coopération Française et l'UNESCO, bureau de Nairobi pour le financement de ce projet de recherche.

Références

Arnould, M. (1961) Étude géologique des migmatites et des granites précambriens du Nord-Est de la Côte d'Ivoire et de la Haute Volta méridionale. Bulletin n°1, Direction de la Géologie et de la Prospection Minière, Abidjan, 175 p.

Biémi, J. (1992) Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsaheliens 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 de doctorat ès Sciences naturelles, Université Nationale d'Abidjan, 493 p.

Biémi, J., Jourda, J.P., Deslandes, S. et Gwyn, H. (1997) Positionnement, productivité et gestion des forages en milieu fissuré de Côte d'Ivoire par télédétection et système d'information géographique. Actes de l'Atelier international sur la télédétection et la gestion des ressources en eau, Éd. FAO, Rome, p. 245-268.

Biscaldi, R. (1968a) Hydrogéologie des roches éruptives et métamorphiques. Analyse bibliographique- Bulletin du BRGM (2e série), section III, n° 2, p. 23-40.

Biscaldi, R. (1968b) Problèmes hydrogéologiques des régions d'affleurement de roches éruptives et métamorphiques sous climat tropical- Bulletin du BRGM (2e série), section III, n° 2, p. 7-22.

Castany, G. (1982) Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Éd. Dunod Université, 236p.

CIEH (1978) Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Volume 3.

Engalenc, M., Grillot, J.C. et Lachaud, J.C. (1978) Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Édition Géohydraulique, Volume 1, 190p.

Engalenc, M., Grillot, J.C. et Lachaud, J.C. (1979) Méthodes d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches de l'Afrique de l'Ouest. Édition Géohydraulique, Volume 2, 193p.

Florent, J. (1995) Méthode multicritère d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site. Revue internationale de géomatique, n°1, Vol. 5, p. 37 - 51.

Francis, O.F. (1970) Contribution à l'étude du mouvement de l'eau à travers les milieux fissurés. Géomorphologie et géologie du Brésil. Thèse de Doctorat d'Ingénieur, Faculté des Sciences, Université de Grenoble, 112 p.

Goyal, S., Bharadwaj, R. S. and Jugran, D. K. (2004) Multicriteria analysis using GIS for ground water resource evaluation in Rawasen and Pili watershed. U. P., Natural Resource Management, 5 p.

INS (2000) Statistique de la population du Recensement Général de la Population et de l'Habitat RGPH 1998 : Résultats provisoires. Département de Korhogo, correspondance du 16 juin, 1 feuille. Antenne Régionale de Korhogo.

Jourda, J.P. (2005) Méthodologies d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest.Concept de l'hydrotechnique spatiale.Cas de la zone test de Korhogo (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat ès Sciences naturelles, Université de Cocody, Abidjan 402 p.

Jourda, J.P., Kouamé, K.F., Soro, N., Kouamé, K.J., Kouadio, B.H., Saley, M.B., Kouamé, K. et Ahoussi, E. (2003) Gestion et protection des eaux souterraines urbaines : apports d'un système d'information géographique à la réalisation de la carte de vulnérabilité de la nappe du Continental Terminal au niveau de l'agglomération d'Abidjan. Actes de la conférence sur les SIG 2003, Paris, octobre 2003.

Jourda, J.P., Kouamé, K.J., Saley, M.B., Kouamé, K.F., Kouadio, B.H. and Kouamé, K. (2005) A new cartographic approach to groundwater vulnerability of the Abidjan aquifer in Côte d'Ivoire. Groundwater pollution in Africa review (sous presse).

Kouamé, 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 de statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université de Cocody, 196 p.

Kouamé, K.J. (2003) Apports d'un Système d'Information Géographique (SIG) à la réalisation de la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe du Continental Terminal au niveau de l'agglomération d'Abidjan. Mémoire de DEA des Sciences de la terre, option hydrogéologie, Université de Cocody, 63 p.

Kouamelan, A. N. (1996) Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte D'Ivoire. Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque. Thèse, Université de Rennes 1, 284 p.

Koussoubé, Y. (1996) Hydrogéologie en milieu du socle cristallin du Burkina Faso : cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (Province du Yatenga). Thèse de doctorat, Université Cheick Anta Diop, Dakar (Sénégal), 238 p.

Lemoine, S. (1988) Évolution géologique de la région de Dabakala (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) au Protérozoïque inférieur. Possibilité d'extension au reste de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso : Similitudes et différences ; les linéaments de Greenville-Ferkessedougou et Grand Cess-Niakaramandougou. Thèse d'État, Université Blaise Pascal, 334 p.

Nakolendousse, S. et Savadogo, A. N. (1993) Les facteurs de productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso : l'exemple de Podé-Mengao. In Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique, Série Actualité scientifique, Éd. AUPELF-UREF, Presses de l'Université du Québec, p. 95-107.

Ouattara, G. (1998) Structure des batholites de Ferkessedougou (Secteur de Zuénoula, Côte d'Ivoire). Implications sur l'interprétation de la géodynamique du paléoprotérozoïque d'Afrique de l'Ouest à 2,1 Ga. Thèse de Doctorat ès Sciences naturelles, Université d' Orléans.

Owolabi, A. and Adegoke-Anthony, C.W. (1988) Groundwater prospects in the basement complex rocks of southwestern Nigeria. Journal of African Earth Sciences, vol. 7, n°. 1, p. 227-235.

Phukon, P., Phukan, S., Das, P. and Sarma, B. (2004) Multicriteria Evaluation in GIS Environment for Groundwater Resource Mapping in Guwhati City Areas. Assam Proceedings, 10 p.

Saley, M.B. (2003) Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuitiés pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique, Université de Cocody, 211 p.

Savadogo, N.A. (1984) Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de la Haute-Volta. Étude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de Doctorat ès Sciences naturelles, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 351 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 Hydrogéologique à Référence Spatiale (S.I.H.R.S.).Thèse de Doctorat d'État ès Sciences naturelles, Université d'Abidjan, 386 p.

Savané, I. et Biémi, J. (1999) Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Télédétection, vol. 1, p. 47-64.

Savané, I., Goze, B. et Biémi, J. (1997) Évaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat (bassin d'Odienné, Côte d'Ivoire). Actes de l'Atelier international sur la télédétection et la gestion des ressources en eau, Éd. FAO, Rome. p. 144-156.

Thornthwaite, C.W. (1944) The measurement of potential evapotranspiration. J .M. Mather, Sea-Brook, New Jersey, 225 p.