Télédétection, 1999, vol. 1, p. 47-64
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à autorisation

© 1999 OPA (Overseas Publishers Association) N.V.
Publié sous license par
Gordon and Breach Science Publishers
Imprimé en Malaisie

Notes scientifiques et techniques

Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire)

ISSIAKA SAVANÉ[a*] et JEAN BIÉMI[b†]

[a]Institut d'écologie tropicale (IET) 08 B.P. 109 Abidjan, 08- Côte d'Ivoire et [b]Université de Cocody- Centre Universitaire de recherche et d'application en télédétection (C.U.R.A.T.) 22 B.P. 801 Abidjan 22- Côte d'Ivoire. Laboratoire associé francophone LAF 401

(soumis le 28 mai 1998 ; accepté le 16 juillet 1998 ; révisé le 17 novembre 1998)

Dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire, l'emploi des techniques de télédétection pour l'étude des aquifères de fissures et l'interprétation des perméabilités induites par les fractures dans un système d'information géographique (SIG) montrent que 36 % des linéaments sont orientés N60° et 32 % N130°. Les forages à gros débit sont implantés dans 29 % des cas par rapport aux fractures NE-SO, contre 22 % pour des fractures N-S les moins sollicitées en hydraulique villageoise.

À l'intérieur du SIG, les principales mégafractures correspondant aux couloirs souterrains de circulation des eaux dans les fissures ont été identifiées. La superposition de la carte des perméabilités induites à celle de densité de drainage met en évidence la relation qui existe entre les eaux de surface et les eaux souterraines aux droits des mégafractures.

Les cartes d'accessibilité, d'exploitabilité et d'indices de productivité des aquifères de la région, établies à partir de la combinaison de plusieurs facteurs (probabilité de succès des puits, profondeur d'extraction, niveau piézométrique et débit d'exploitation) mettent en évidence les zones favorables à l'implication des forages d'eau dans le socle.

Mots clés : Télédétection, SIG, aquifère de socle, linéaments, perméabilité induite, productivité des puits.

* Téléphone (225) 25 73 36.
† Téléphone: (225) 44 52 70; télécopieur: (225) 44 57 39.

Remote Sensing and GIS for Crystalline Basement Aquifer Study in Odienné (North-West of Côte D'Ivoire)

In a projet setting between UREF-IET and CARTEL, aiming at to evaluate the remote sensing implication in fractured-rock and underground water research, a structural and geological study has been undertaken. The purpose of this study was to make the inventory of major lineament networks in best well-yield locations.

The exploration of groundwater in crystalline rocks raises enormous problems at the level both of productivity and of the return from the wells to be put down. One of the methods proposed today, to avoid failures in village water supply programmes, is mapping fracture traces in order to determine favourable sites for drilling. A method for estimating the hydraulic conductivity of a fractured rock is formulated from a knowledge of the fracture geometry. The basis of this approach is the averaging of the equation of linear momentum for the fluid in the fractures over the Representative Elementary Volume (REV). The hydraulic conductivity tensor which results is defined solely in terms of the fracture geometry, and it exhibits the effet of the orientation of the individual fractures.

Order to find the geological images interpretation together with existing geological data on rock nature, allowed to establish geological and structural map. Geological formations are mainly constituated of granite and granite migmatite.

In North-West of Côte d'Ivoire the use of remote sensing techniques to study aquifers derived from fractures and for the interpretation of induced permeabilities by fractures in a Geographical Information System (GIS) showed that 36 % of lineations are oriented N60° and 32 % oriented N130°.

High yield boreholes in 29 % of cases correspond to fractures oriented NE-SW as compared to 22 % of cases for fractures oriented N-S, these being less used for water supply in villages.

Within GIS, were identified the main megafractures corresponding to underground corridors for water mouvement in the fractures. The superposition of the map showing induced permeabilities to that of drainage density showed evidence for the relationship existing between surface waters and underground waters at the intersection of megafractures.

Maps of accessibility, exploitability and productivity indices of the aquifers from the study region, as established from the combination of several factors such as the probability of success of boreholes, the extraction depth, the piezometric level and the exploitation yield, showed favorable points for the implantation of water wells in the basement.

Keywords: remote sensing; GIS; crystalline basement aquifer; lineament; induced permeability; productivity of wells

1. INTRODUCTION

Notre objectif visait à étudier l'hydraulicité des fractures affectant le socle cristallin ainsi que les indices de productivité des formations géologiques en vue de déterminer les potentiels en eau, les conditions d'accessibilité et d'exploitabilité des aquifères tout en précisant la relation entre eaux de surface et eaux souterraines, et en décrivant la géométrie des réservoirs.

En milieu cristallin, la cartographie et l'analyse des fractures, et du profil d'altération qui leur est associé, permettent de guider l'implantation au sol des forages capables de fournir un gros débit. Biémi (1992) a montré le rôle des fractures dans la productivité des puits dans le bassin versant de la

Marahoué. D'autres auteurs (Lattman and Parizek, 1964; Setzer, 1966; Siddiqui and Parizek, 1971; Parizek, 1976; Castaing *et al.*, 1989) ont montré la nécessité de l'utilisation de la photographie aérienne ou des images satellitaires pour cartographier les fractures et la probabilité (de succès des puits creusés au-dessus des fractures ou mieux à l'endroit où deux ou plusieurs fractures se croisent.

La découverte des quantités d'eau exploitables dans le socle cristallin nécessite (de plus en plus l'utitilisation indispensable de technologies modernes variées et performantes, surtout dans les zones semi-arides et arides d'Afrique où les problèmes d'eau se présentent avec acuité. En effet, si l'eau souterraine doit de plus en plus occuper une place importante dans les activités quotidiennes (domestiques, industrielles et agricoles) de ces zones, des informations exactes sont indispensables sur les facteurs qui influencent la productivité, l'accessibilité ainsi que l'exploitabilité des aquifères et des forages d'eau. L'importance du couple fracturation-altération est incontestable dans les roches cristallines parce que l'eau souterraine est limitée aux structures secondaires où les vides ont été produits par l'action conjuguée de la tectonique et l'altération. Les parties massives de la roche ne peuvent contenir d'eau que si les ouvertures secondaires sont présentes, parce que la porosité matricielle et la perméabilité primaire induite de la plupart des roches cristallines sont extrêment faibles.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Située au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, la région d'Odienné couvre 13 340 km^2 (figure 1).

2.1. Contexte climatique

Le climat est de type tropical subhumide. Il est caractérisé par deux saisons : une saison sèche (novembre à mai) et une saison des pluies (juin à octobre). La hauteur de précipitation annuelle est de l'ordre de 1 600 mm, avec une température moyenne annuelle de 26 °C.

2.2. Contexte hydrologique

Le drainage régional est assuré, d'une part, par les tributaires du fleuve Niger vers le nord et, d'autre part, par les tributaires du fleuve Sassandra vers le sud. Seuls les cours d'eau d'ordre égal ou supérieur à six sont per-

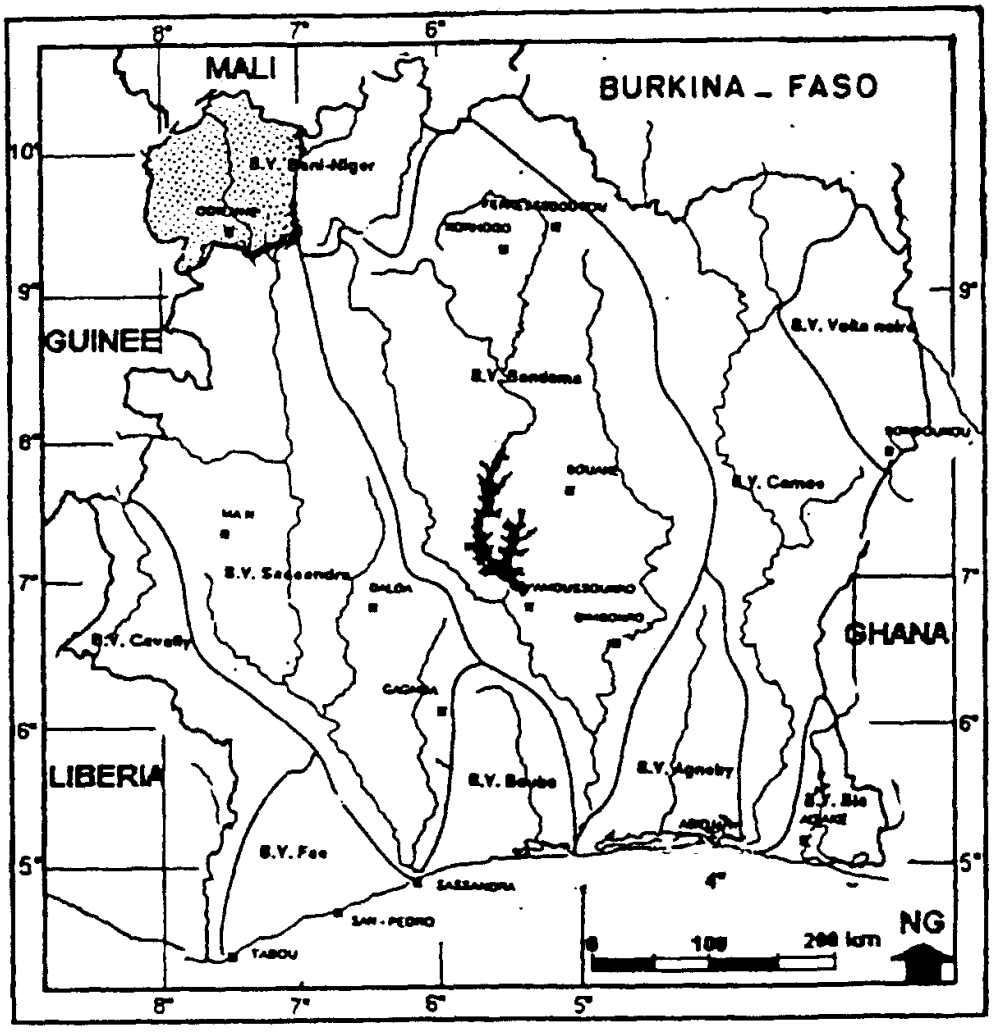


FIGURE 1 Localisation de la région étudiée. *Location of studied area*

manents, avec des débits d'étiage très faibles; les années sèches, leur cours supérieur se réduit souvent à une succession de mares en mars, avril, mai; à partir de juillet, les débits augmentent rapidement et la crue majeure a lieu en septembre avec la submersion des plaines alluviales.

En saison sèche, les eaux de surface, qui constituent la base de l'approvisionnement en eau, disparaissent, d'où la nécessité de mettre l'accent sur l'exploitation des forages et des puits dans le cadre de l'alimentation en eau potable de la population de cette région.

2.3. Contexte géomorphologique et géologique

À part quelques points culminants comme les chaînes de Foula (1 893 m), Tiémé (1 828 m), et Denguelé (1 813 m), le relief est dans l'ensemble

moderé avec des sols couverts de hautes herbes et d'arbustes de petites tailles en saison de pluie sauf autour des grands systèmes de drainage où on trouve des forêts-galeries.

Bien que les reliefs liés aux affleurements rocheux constituent 14,1 % du modelé (12,3 % pour les inselbergs et les petits dômes leucocrates, 1,8 % pour les chaînes en roches mélanocrates), la roche saine apparaît peu : les dolles ou les chaos couvrent moins de 1,5 % de la superficie de la région (Filleron, 1995).

La géologie du substratum rocheux est constituée de trois groupes de formation (Géomine, 1982). Le premier groupe est constitué de granitoïdes éburnéens composés de granites homogènes, de granite à deux micas, du granite migmatitique et du granodiorite. Le deuxième groupe formé d'un complexe volcano-sédimentaire du birrimien et comprend des formations volcaniques, des schistes et des grauwackes. Enfin, le troisième groupe formé de l'Archéen comprend du gneiss et de la migmatite ancienne. L'unité la plus importante dans l'exploration de l'eau souterraine est la formation granitique.

La carte géologique (figure 2) met en évidence l'importance des granites à biotite d'extension régionale qui occupent 42 % de la superficie, viennent en deuxième position les migmatites avec 30 % ainsi que les granites à biotite homogène, les granites à deux micas et les granodiorites qui occupent 11 %. Les métasédiments et les métavulcanites ainsi que les gneiss ont respectivement 5 % et 12 %. Les formations impliquées dans les orogenèses qui affectent la région d'Odienné peuvent être divisées en deux groupes (Pothin, 1988).

Entre la surface et le substratum rocheux, s'interpose le plus souvent un manteau de produits meubles ou parfois indurés. Ces formations superficielles sont. de deux types. Les unes, les plus fréquentes, sont formées pour l'essentiel de matériaux issus directement de l'altération des roches. Les autres en sont les produits indirects, résultats du remaniement plus ou moins profond des altérites : alluvions et colluvions fines ou grossières. Ce sont ces altérites qui sont pour la plupart captées par les puits et les forages dans les cas de l'hydraulique villageoise, offrant des débits qui varient entre 0,2 et 6 m^3/h.

3. MATÉRIEL ET LES MÉTHODES

3.1. Télédétection

Le secteur est couvert par trois images TM, prises en janvier 1986 en l'absence de nuages en saison sèche. Les images se composent des scènes

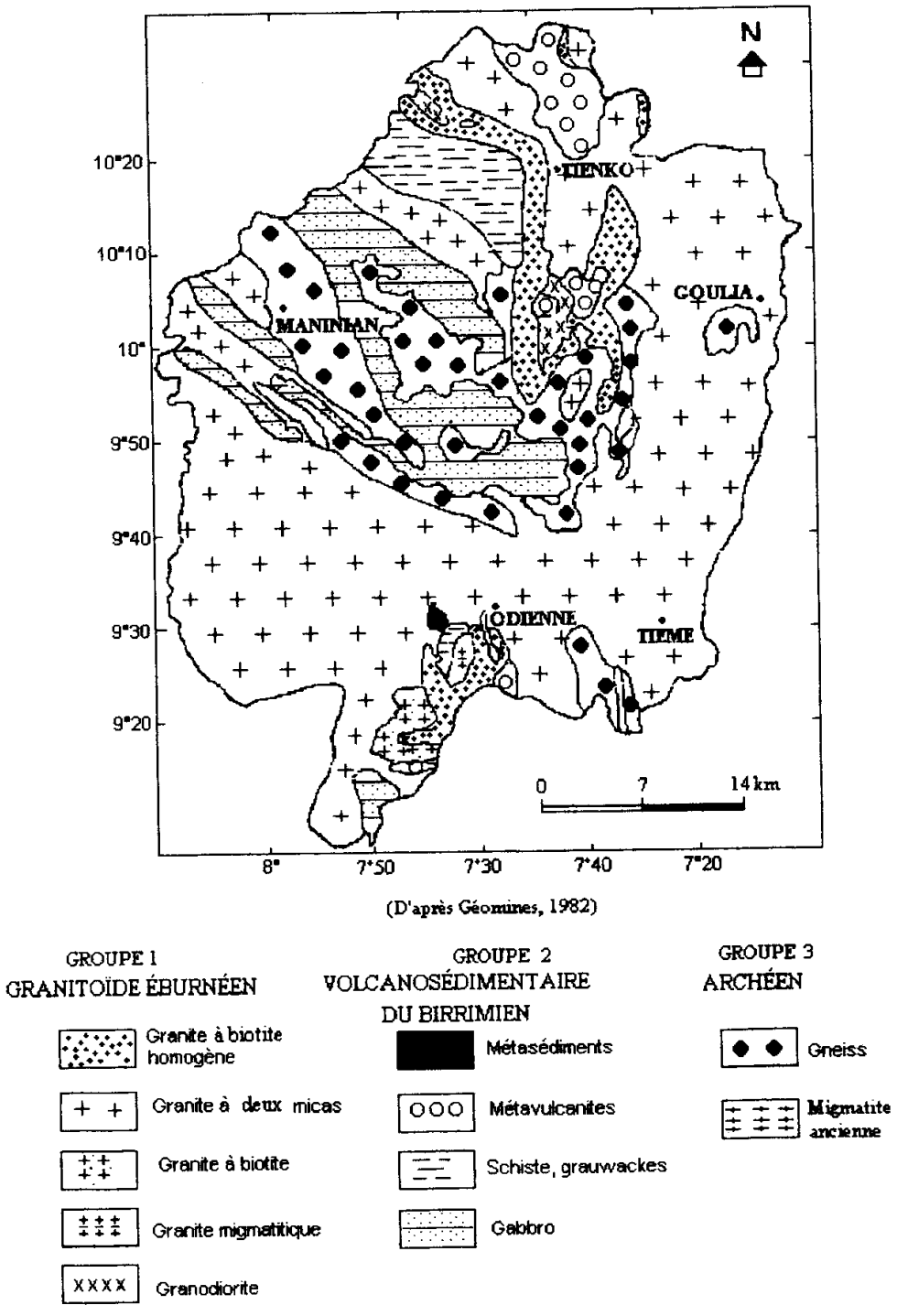


FIGURE 2 Carte géologique de la région d'Odienné. *Geologic map of Odienné area*

198–53 (quadrants 1 et 3), 198–54 (quadrants 1 et 2) et 199–53 (quadrants 2 et 4).

En plus de ces images, une représentation photosatellitaire du site à l'échelle 1:100 000 a été utilisée.

La création de la mosaïque a nécessité un calibrage radiométrique (ajustement de la moyenne et de l'écart-type entre les secteurs de recouvrement); la correction géométrique comporte un rééchantillonnage de la taille des pixels à 50 × 50 m, compte tenu de la grandeur de la superficie du secteur d'étude (13 340 km^2). Les bandes 4 (proche infarouge), 5 (infrarouge moyen) et 7 (infrarouge lointain) ont été retenues. Le traitement d'images a porté sur la recherche des combinaisons d'images rehaussées favorisant l'identification des ensembles lithologiques et la perception des linéaments sur les compositions colorées. Ainsi, l'étude géologique a été menée grâce aux composantes principales, le rapport des bandes TM7-TM4/TM7 + TM4 et la combinaison additive TM6 + TM7.

Le filtrage directionnel de Sobel, utilisant la matrice 3 × 3 ou 7 × 7, a permis de mettre en évidence et d'extraire les discontinuités images. Les images filtrées favorisent le rehaussement des discontinuités géologiques en fonction des directions tectoniques (figure 3). Les linéaments sont relevés sur une image au 1: 200 000 à l'intérieur du logiciel Arc-Info. À partir des discontinuités images révélées à la fois sur les photographies aériennes et sur les images TM, on a établi la carte de densité de discontinuités régionales.

Les études géomorphologiques et d'une partie des linéaments régionaux ont été faites sur plus de 200 photographies aériennes en noir et blanc, à l'échelle 1: 50 000, obtenues en 1979 par la mission NC-29 XI-XII, de l'Institut géographique de Côte d'Ivoire (IGCI). La densité de drainage a été calculée à partir de six images TM de Landsat de 1986 à l'échelle du 1: 100 000. Un maillage de dimension 1 km × 1 km de côté a été adopté pour chaque carré au centre duquel est portée la longueur totale des drains mesurés à l'intérieur du carré. La carte d'isovaleurs qui en découle donne des indications sur la densité de drainage potentiel du bassin.

3.2. Hydrologie

L'application de la méthode de Franciss (1970) pour le calcul des perméabilités induites par les fractures a nécessité une détermination, sur le terrain, de la conductivité hydraulique (K_f) et du coefficient empirique de proportionnalité (C) entre la longueur et l'ouverture des fractures de la région. En effet, des mesures effectuées à l'affleurement ont permis

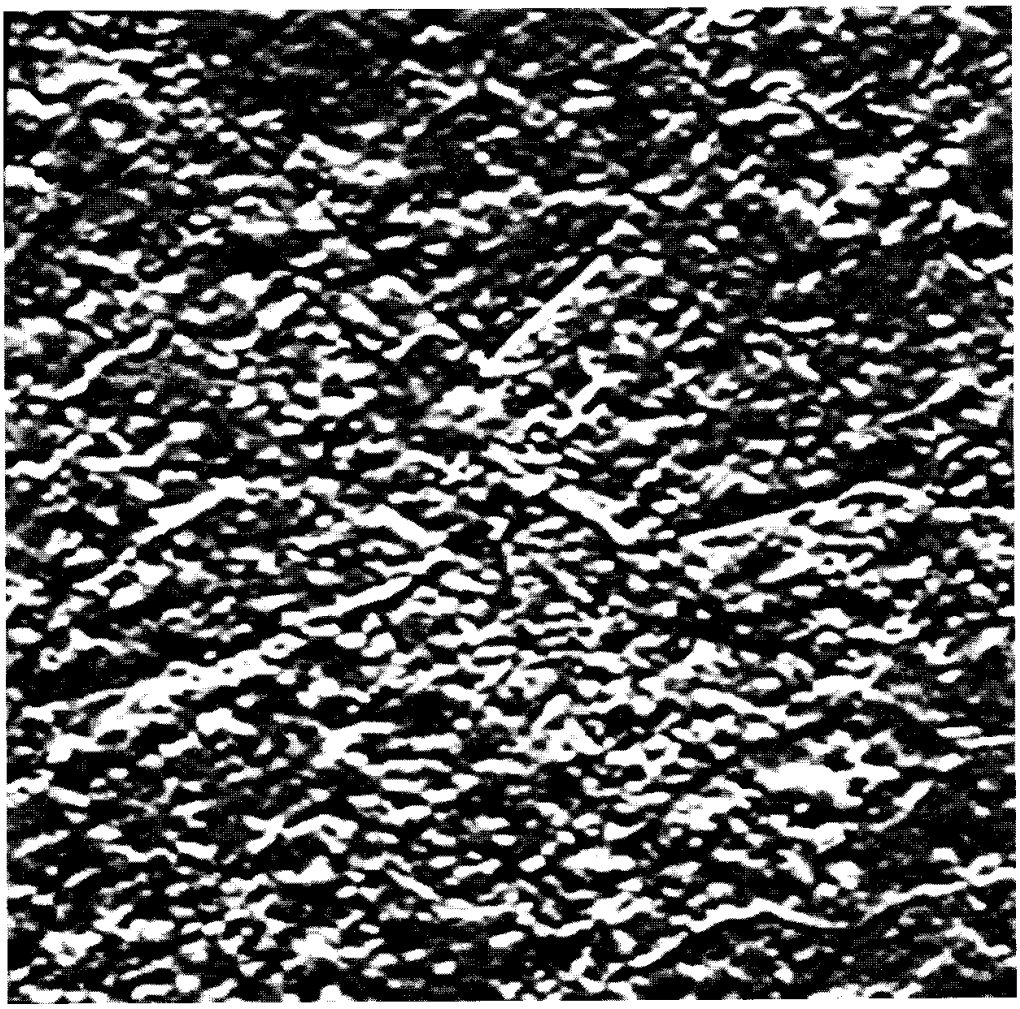


FIGURE 3 Filtrage directionnel de Sobel, matrice 3 × 3 permettant de rehausser les discontinuités images dans la direction NE. *Sobel filter, matrix 3 × 3 allowing enhancement image discontinuities in NE direction* (voir planche couleur IV en fin de revue)

d'estimer ces deux variables indispensables au calcul des perméabilités induites. La conductivité hydraulique (K_f) est assimilable à la perméabilité moyenne apparente caractérisant toute la surface étudiée. À partir de l'expression de la transmissivité dans une zone fracturée traversée par un forage :

$$T_i = K_f e_i \tag{1}$$

où T_i représente la transmissivité en mètres carrés par seconde de la zone, e_i l'épaisseur en mètres, K_i la conductivité en mètres par seconde.

La conductivité hydraulique K_f est donnée par la relation :

$$K_f(ms^{-1}) = T_i/e_i \tag{2}$$

Dans les forages à arrivées d'eau multiples, l'épaisseur de la zone fracturée peut être estimée à partir de la différence de profondeur entre la première et la dernière arrivée d'eau. Les valeurs de la transmissivité ont été calculées à partir des essais de pompage réalisés sur 62 forages, par les méthodes d'approximation de Gringarten et Bertrand (1978) et Thiery (1981).

Dans le cas de la variable (C), le problème de la mégafracture visible dans l'image satellitaire peut être envisagé à deux dimensions parce que l'épaisseur de la croûte terrestre fracturée est très négligeable par rapport à son étendue. En général, cette épaisseur ne dépasse guère 1 ni pour 1 km^2 de surface. Autrement dit, l'épaisseur varie dans un rapport $< 10^{-5}$ (Franciss, 1970). En conséquence, l'épaisseur de la zone broyée peut être considérée comme une fonction linéaire empirique de la longueur apparente de la mégafracture telle que :

$$e = CL \tag{3}$$

où e représente l'épaisseur de la zone broyée (m), L la longueur apparente de la mégafracture (m) et C le coefficient de proportionnalité empirique (sans dimension). La variable (C) a été déterminée sur le terrain à partir des mesures des longueurs et des ouvertures des fractures affectant les affleurements, et en faisant le rapport entre ces deux paramètres.

Le calcul de la perméabilité induite par les fractures a nécessité, au laboratoire, un maillage de la zone d'étude, 99 cercles de 12 000 m de diamètre, inscrits chacun à l'intérieur d'un carré dont le côté est égal au diamètre du cercle correspondant. À l'intérieur de chaque cercle, il a été calculé le nombre total des fractures, la longueur individuelle et totale des fractures, et l'orientation cas par cas des fractures. La perméabilité moyenne est obtenue par la relation :

$$K_{moy} = 1/2(K_{NN} + K_{NW}) \tag{4}$$

K_{NN} et K_{NW} étant les perméabilités par rapport aux axes NS-EO.

3.3. Le SIG

Pour établir les cartes d'accessibilité, d'indices de productivité et d'exploitabilité des aquifères et de forages de la région, nous avons fait appel à plusieurs groupes de facteurs : probabilité de succès dans les formations, profondeur d'extraction, niveau piézométrique, densité, longueur

totale et nombre de noeuds de fractures par kilomètre carré ainsi que débit et sens d'écoulement des eaux, etc. Ces facteurs ont fait l'objet d'une classification (tableau I) et ensuite ont été transformés en fichier matriciel avant d'être introduit dans le SIG.

TABLEAU I Un exemple de classification des données des différents facteurs. *An example of values classification of different factors*

Critère	*Probabilité de succès (%)*	*Profondeur d'extraction (m)*	*Niveau piézométrique (m)*	*Débit (m^3/h)*
Excellent	> 80	< 15	< 10	> 6
Bon	50–80	15–40	10–25	2 – 6
Médiocre	30–50	40–60	25–40	1 2
Mauvais	< 30	> 60	> 40	< 1

L'intégration des données de plusieurs facteurs dans le SIG a permis de faire une approche qualitative du rôle hydraulique des fractures dans la recherche de la productivité des ouvrages et d'élaborer des cartes thématiques telles que la carte d'accessibilité et la carte d'exploitabilité des nappes souterraines de la région.

4. RÉSULTATS, INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire, la carte détaillée des linéaments à l'échelle 1: 200 000 comporte 2 740 segments assimilables à des discontinuités-images réparties dans les quatre directions tectoniques d'Afrique (E-O ; NE-SO ; N-S et NO-SE) dont 36 % sont orientés N 60° E et 32 % N 130° E (figure 4). À l'échelle réduite (1: 500 000), la carte détaillée des fractures fait ressortir plus de 1 160 mégafractures d'intérêt régional choisies en fonction de leur longueur (supérieure à 30 km). Si l'on tient compte des critères d'implantation des forages dans le socle, on doit admettre que chaque forage réalisé est positionné par rapport à au moins un accident appartenant à une direction tectonique déterminée. Par conséquent, l'étude des relations entre forages et fractures peut s'avérer intéressante pour expliquer le rôle hydraulique de certaines directions d'accident.

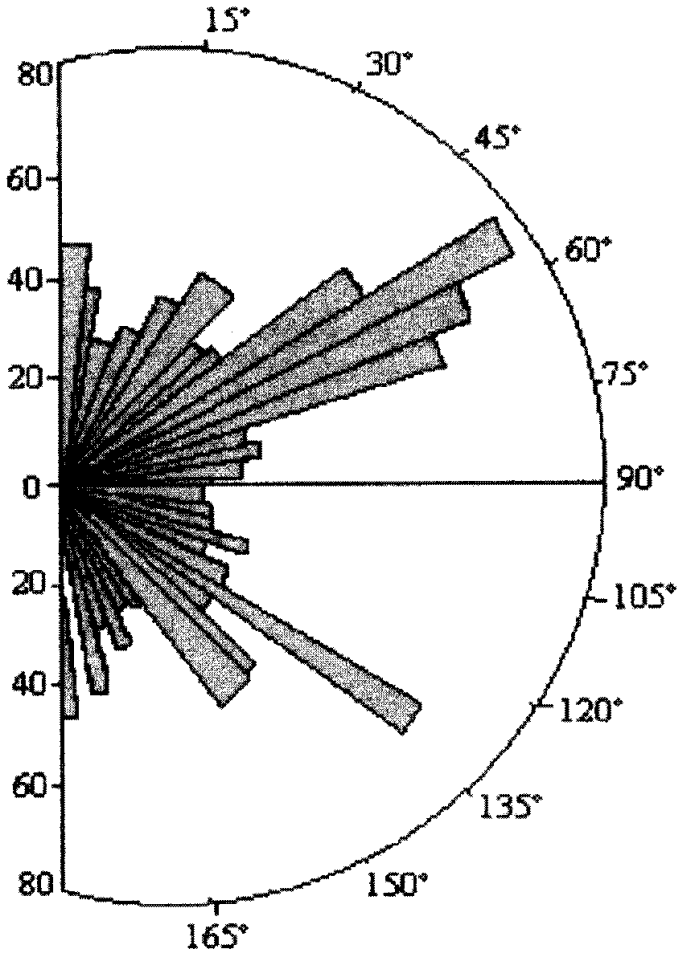


FIGURE 4 Diagramme de répartition de l'orientation des fractures. *Distribution diagram of fracture trends*

La carte de discontinuités réalisée à partir de l'image TM rehaussée par le filtrage, a été introduite dans le système Arclnfo (figure 5). Dans ce système nous avons classé les fractures selon les directions N-S, NE-SO, E-O et NO-SE. Sur ce fichier, nous avons superposé la base de données sur les ouvrages à la carte des discontinuités, après avoir produit une thématique représentant la distance de tout point de la zone d'étude par rapport à la discontinuité la plus proche. On a déterminé la distance séparant chacun des 134 ouvrages de la fracture la plus proche dans chacune des quatre directions précitées. Cette approche nous a permis de mener des études statistiques sur la productivité des ouvrages et les principales directions

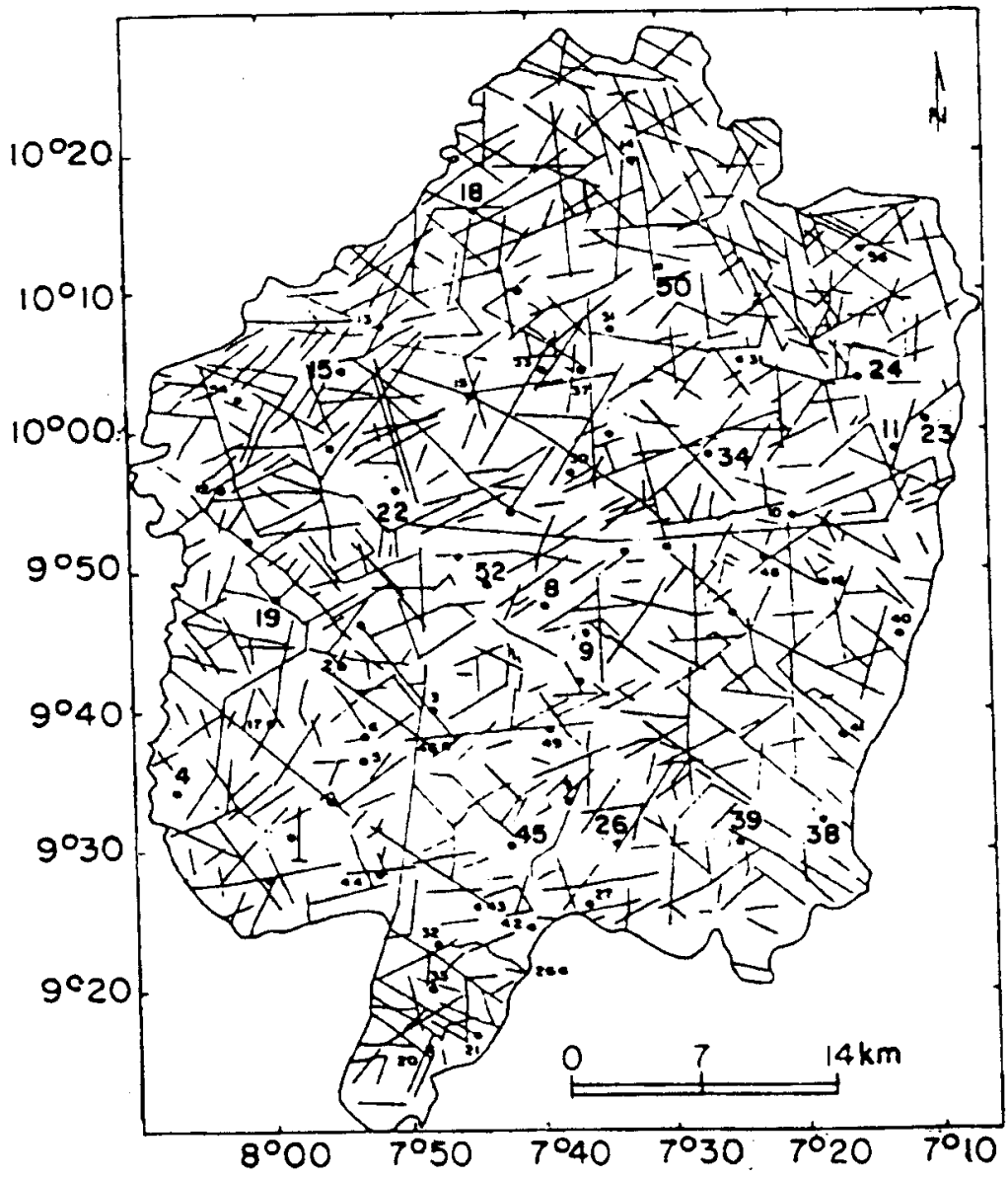


FIGURE 5 Carte des discontinuités régionales à rôle hydraulique du département d'Odienné.
Regional discontinuity map at hydraulic role in Odienné area

favorables à l'implantation des forages. Ainsi, les résultats permettent de classer les accidents en fonction de leur influence dans le positionnement des forages : NE-SO > NO-SE > E-O > N-S. Les accidents NE-SO et NO-SE, qui s'associent aux directions libériennes et éburnéennes d'Afrique, sont les mieux visibles sur les images satellitaires.

La conductivité hydraulique moyenne a été calculée à partir des essais de pompage à travers les localités de la région: Kf (m/s) = Ti/

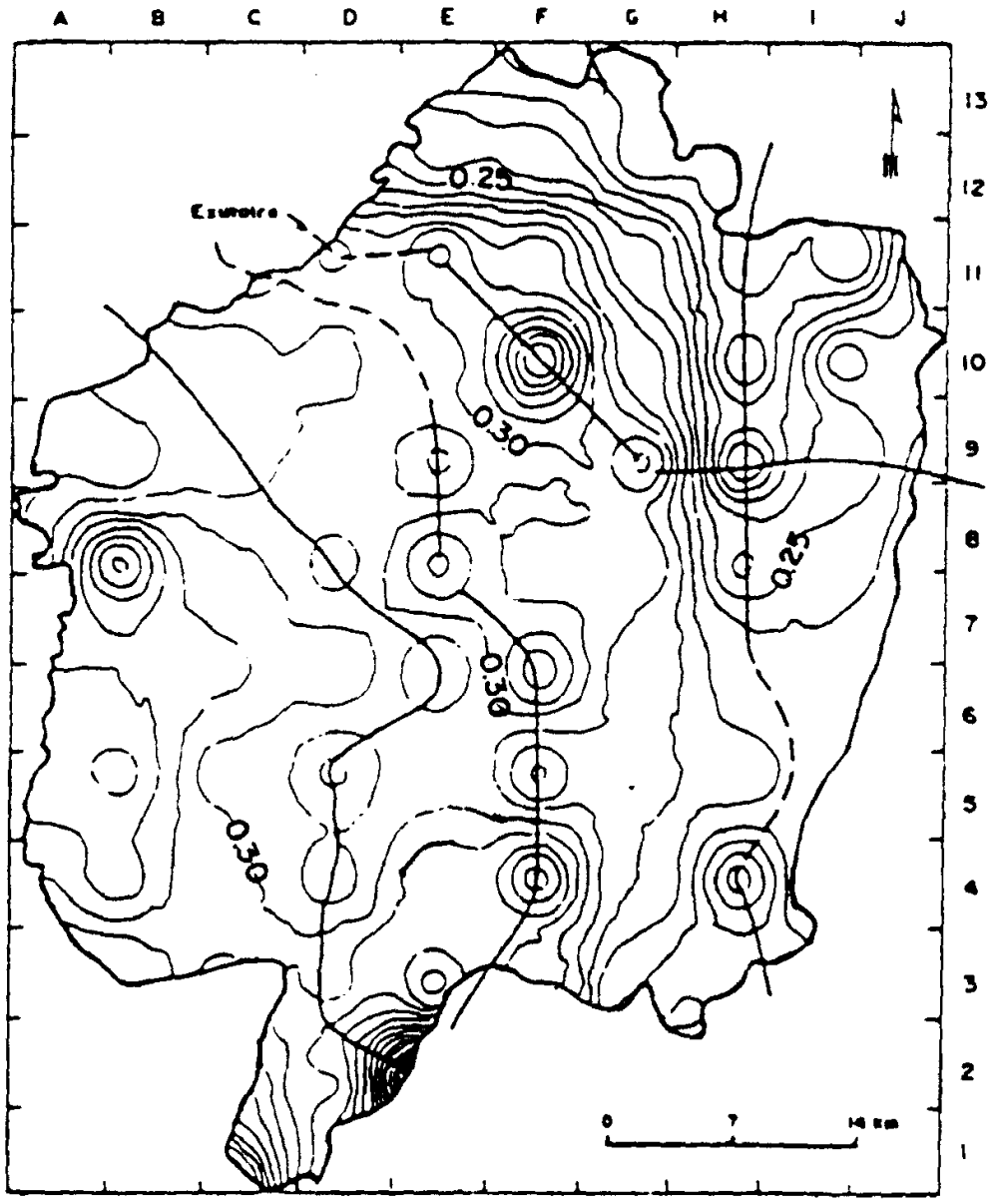


FIGURE 6 Variation spatiale des valeurs de perméabilités induites dans les aquifères de fissures d'Odienné. *Spatial variations of porosity values in fracture aquifers in Odienné area*

ei = 2,54 10^{-5}. Le rapport entre l'ouverture et les longueurs de fractures permet d'obtenir : C = e/L = 6,8 10^{-3}. Les valeurs de perméabilités induites de la région d'Odienné 0,1 10^{-11} à 1,7 10^{-11} m/s sont nettement faibles par rapport à celles de 10^{-4} m/s ou 10^{-8} m/s obtenues par les travaux antérieurs (Savadogo, 1984; Biémi, 1992). Il semblerait que, plus la densité des fractures observables par cercle augmente, plus les résultats

Les grands cours d'eau se superposent presque exactement à l'axe principal sud-nord de forte perméabilité induite, ce qui confirme le rôle joué par les fractures-drains dans la mise en place et le vidage des principaux cours d'eau en Afrique de l'Ouest.

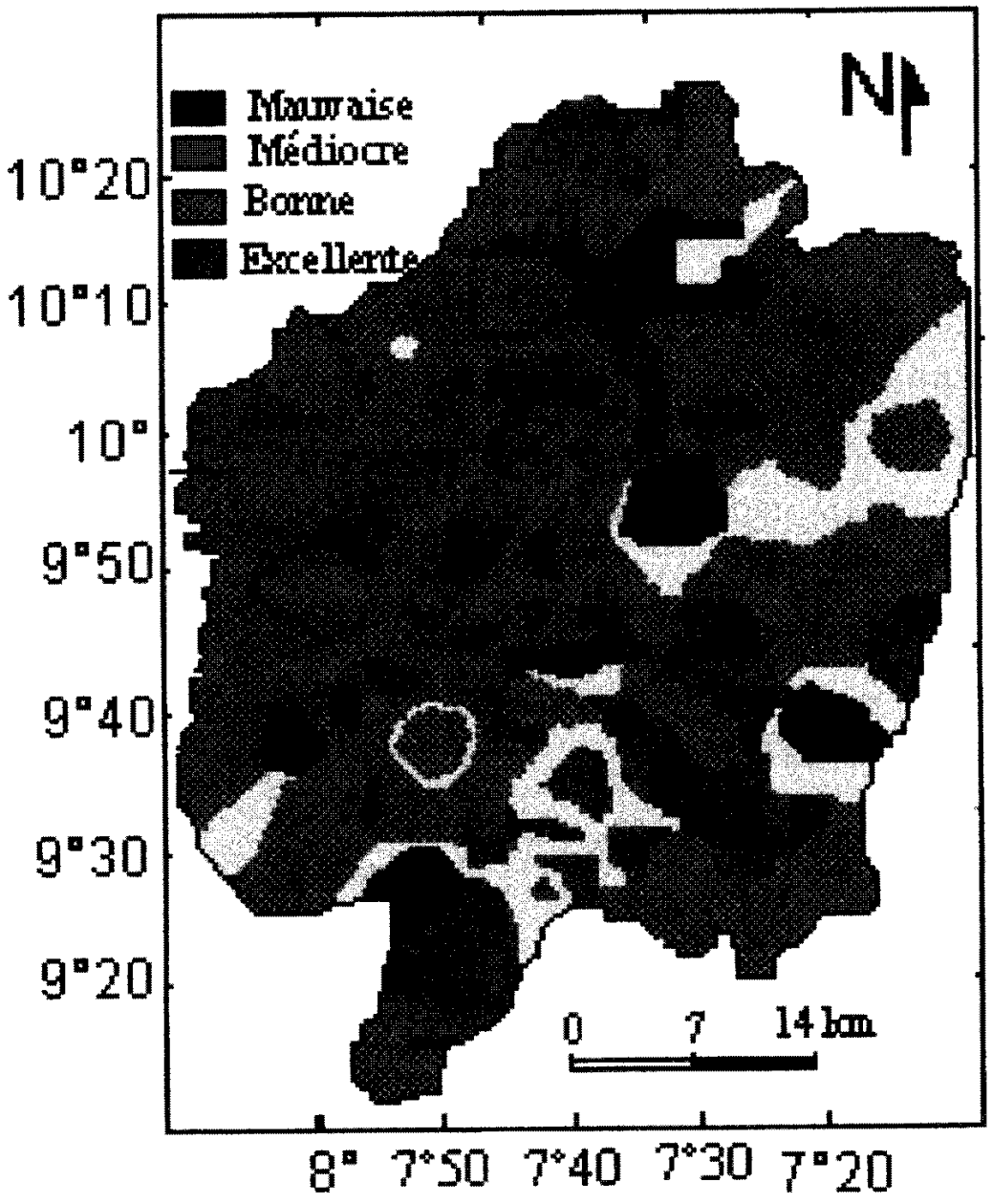


FIGURE 8 Carte d'accessibilité de la nappe souterraine d'Odienné. *Groundwater accessibility map in Odienné area* (voir planche couleur V en fin de revue)

Sur la carte d'accessibilité, le centre de la zone d'étude offre de meilleures conditions d'accessibilité des nappes (figure 8). C'est le domaine qui se caractérise par plus de 80 % de succès sur le forage, une profondeur d'extraction de l'eau inférieure à 15 m et un niveau piézométrique proche du sol de moins de 10 m. Cette zone occupe une position méridionale sur la carte avec une bifurcation vers le nord-ouest. Les zones à conditions d'accessibilité médiocre se rencontrent sur la bordure orientale (depuis Tienko au Nord jusqu'à Tiémé au Sud), la bordure sud-ouest aux environs de Guéléban et au nord-ouest de la région à Maninian.

La carte d'exploitabilité des nappes s'apparente assez bien à la précédente (figure 9). En effet, les nappes les plus accessibles sont de ce fait les plus exploitables hydrauliquement. Les zones de bonne exploitabilité se superposent presque entièrement à leurs homologues de bonne accessibilité.

5. CONCLUSION

Au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, l'étude d'hydraulicite des fractures par la télédétection et le SIG met en évidence que 36 % des linéaments qui affectent le socle cristallin sont orientés N60° contre 32 % dans la direction N130°. Les forages à gros débit sont implantés dans 29 % des cas par rapport aux fractures NE-SO, contre 22 % pour les fractures N-S les moins sollicitées en hydraulique villageoise.

Les principales mégafractures de la région constituent en même temps les couloirs souterrains de circulation d'eau dans les nappes de fissures. La superposition de la carte des perméabilités induites à celle de la densité de drainage laisse entrevoir une possibilité de mélange vertical entre eaux de surface et eaux souterraines aux droits des mégafractures. Les cartes d'accessibilité des aquifères de la région, établies à partir de la combinaison de critères adéquats mettent en évidence les zones favorables à l'implantation des forages d'eau dans le socle.

Ces résultats bien que prometteurs, ont besoin d'être validés sur le terrain dans toutes les formations géologiques. Il serait intéressant d'envisager des activités de recherche associant les techniques de télédétection, de GPS et les résultats du SIG afin d'évaluer les précisions de la méthode d'implantation des forages à partir des critères d'accessibilité et d'exploitabilité ainsi que les orientations des fracures. Cette démarche permettra de

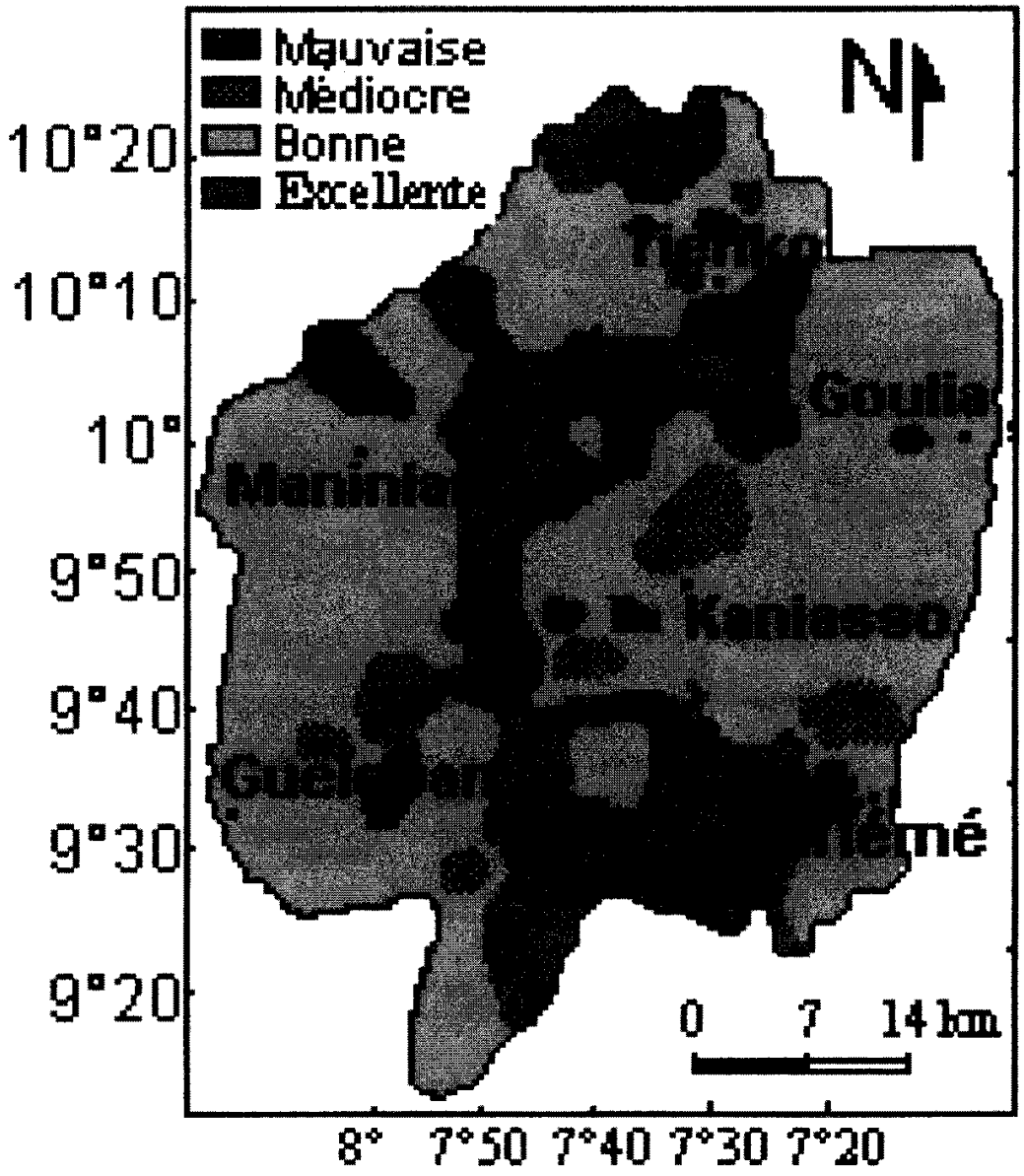


FIGURE 9 Carte d'exploitabilité de la nappe souterraine d'Odienné. *Groundwater availability map in Odienné area* (voir planche couleur VI en fin de revue)

corriger les marges d'erreur qui peuvent survenir pendant les collectes et les saisies des données. Elle permettra également de rentabiliser au mieux les futures campagnes de forage qui s'appuieront sur les différentes cartes thématiques élaborées.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'UREF (Université des réseaux d'expression française) pour nous avoir permis de réaliser ce travail grâce à une subvention de recherche partagée.

Références

Biémi, J. (1992) *Contribution géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons aires granitiques de la haute Marahone (Côte d'Ivoire).* Thèse de doctorat d'état, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 432 p.

Castaing. C., Dutartre, P., Gouyet, J.F., Loiseau. P. et Pointet, T. (1989) *Étude pluridisciplinaire d'un réseau de discontinuités images SPOT en milieu granitique couvert. Implications en hydrologie des milieux fissurés.* Bulletin S.F.P.T., no 13, p. 13–23.

Filleron, J.C. (1995) *Essai de géographie systématique: les paysages du nord-ouest de la Côte d'Ivoire.* Thèse de doctorat d'état, Université de Toulouse, Le Mirail, Tome 1, 668 p.

Franciss, F.O. (1970) *Contribution à l'étude du mouvement de l'eau à travers les roches.* Thèse de doctorat, Université Grenoble 1, 238 p.

Géomines, (1982) *Inventaire hydrogéologique.* A.C.A.D.I, cahier no 4, 24 p, 1 carte.

Gringarten. A. C. et Bertrand, L. (1978) *Détermination des caractéristiques hydrauliques des aquifères fissurés par pompage d'essai en régime transitoire. Application aux nappes de la craie.* Rapport BRGM, 78 SGN, 669 GEG, 34 p.

Lattman, L.H. and Parizek, R.R. (1964) *Relationship between fracture traces and the occurrence of groundwater in carbonate rocks.* Journal of Hydrology, vol. 2, p. 73–91.

Parizek, R.R. (1976) *Lineaments and groundwater.* In: Interdisciplinary Application and Interpretation of EREP Data within the Susqueana River Basin. in McMurtry, G.T. and Petersen G.W., (réd.) SKYLABEREP Investigation no 475. NASA contact no NAS 9 - 134076, ORSER-SSEL p. 59–86.

Pothin, K. B. K. (1988) *Pétrographie et géochimie des formations précambriennes de la région d'Odienné (nord-ouest de la Côte d'Ivoire).* Thèse de doctorat d'état, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 329 p.

Savadogo, N.A., (1984) *Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta. Étude régionale du bassin versant de la Sissili.* Thèse de doctorat d'état, Université de Grenoble 1, 352 p.

Setzer, J. (1966) *Hydrologie significance of technic fractures detectable on air photos.* Groundwater, vol. 4, p. 23–29.

Siddiqui, S.H. and Parizek, R.R. (1971) *Hydrogeologic factors influencing well yields in folded and faulted carbonate rocks.* Water Resources Research, vol. 7, p. 1295–1312.

Thiery, D. (1981) *Analyse statistique des conditions de succès des forages réalisés en région de socle fissuré, Application au Togo.* Rapport B.R.G.M. No 81 S.G.N 674 Eau, 67 p.