

Apport de la télédétection et des SIG dans l'identification des ressources en eau souterraine dans la région de Daoukro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)

[Contribution of the remote sensing and GIS in the underground identification of the water resources in Daoukro region (east-central Côte d'Ivoire)]

Kanohin Fulvie epse Otchoumou¹, Saley Mahaman Bachir², Aké Gabriel Etienne², and Savané Issiaka¹

¹Laboratoire Géosciences et Environnement,
Université Nangui Abrogoua,
Abidjan, Côte d'Ivoire

²Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement,
Université Felix Houphouet Boigny,
Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2012 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The access to drinking water, in particular in the rural areas and semi-rural in Ivory Coast, constitutes a paramount factor in economic development, the improvement of the standard of living of the populations and their stabilization. The present study aims to raise the unequal distribution of the water supply points for the area of Daoukro and to make a contribution in the research of the zones favorable with the establishment of the productive water supply points in order to allow a good cover of the water needs. The adopted methodological approach is summarized in two stages: initially design of the chart of the water requirements (the access to drinking water) which highlights the zones of deficits followed by the cartography of the sites of establishment of the future water supply points. The knowledge of the space distribution of the population and amongst water supply point by locality made it possible to calculate the access to drinking water of the populations. The analysis of the chart set of themes of the storage areas reveals that nearly 80% of the total surface areas are occupied by zones favorable to the existence of groundwater. The various suitable zones with the establishment of work to large flows were charted and more than 150 sites favorable to the future establishments were selected.

KEYWORDS: Drinking water, population, cartography set of themes, remote sensing, GIS.

RESUME: L'accès à l'eau potable, notamment dans les zones rurales et semi-rurales en Côte d'Ivoire, constitue un facteur primordial dans le développement économique, l'amélioration du niveau de vie des populations et leur stabilisation en zone rurale. La présente étude a pour objectif de relever l'inégale répartition des points d'eau dans la région de Daoukro et d'apporter une contribution dans la recherche des zones propices à l'implantation des points d'eau productifs afin de permettre une bonne couverture des besoins en eau de la région. La démarche méthodologique adoptée se résume en deux étapes : d'abord la conception de la carte des besoins en eau qui met en évidence les zones de déficits suivie de la cartographie des sites d'implantation des futurs points d'eau. La connaissance de la répartition spatiale de la population et du nombre de point d'eau par localité a permis de calculer l'accès à l'eau potable des populations. Les différentes zones convenables à l'implantation d'ouvrage à gros débits ont été cartographiées et plus de 150 sites favorables aux futures implantations ont été sélectionnés.

MOTS-CLES: Besoin en eau, population, cartographie thématique, télédétection, linéaments, SIG, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

L'eau est une ressource essentielle aux besoins fondamentaux de l'homme et à son environnement. Les eaux souterraines constituent une ressource vitale pour satisfaire les besoins en eau douce des collectivités. La région de Daoukro objet de la présente étude se trouve dans une situation d'accessibilité difficile aux ressources en eau souterraine à cause de la forte épaisseur d'altérites qui recouvre le socle. En effet les ouvrages hydrauliques déjà réalisés ont des débits en général faibles et sont inégalement répartis. Aujourd'hui, le taux de desserte en eau potable dans la région en zone rurale est de 30 %. Actuellement, l'accès aux sources d'eau améliorées (hydraulique villageoise améliorée) est limité à travers la région de Daoukro [1]. L'objectif de cette étude est de relever l'inégale répartition des ouvrages hydrauliques et d'identifier des sites favorables pour implanter des forages à gros débits à l'aide de la télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG). Les connaissances hydrogéologiques et géologiques traitées grâce à un Système d'Information hydrogéologique à Référence Spatiale (SIHRS) pourront aider à la cartographie des réservoirs souterrains et des sites favorables à l'implantation d'ouvrages à gros débits.

1.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Située au Centre-Est de la Côte d'Ivoire, la zone d'étude (Daoukro) est comprise entre la longitude 3°29' et 4°34' Ouest et la latitude 6°55' et 7°32' Nord (fig. 1). La zone d'étude est moyennement arrosée avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1103 mm. Les pluies sont moins importantes, irrégulières et mal réparties. Le paysage de la zone d'étude se caractérise par des reliefs de flyschs éburnéens formant de petites collines allongées et à pentes très faibles. La région est drainée par deux cours d'eau principaux, le N'zi à l'Ouest et le fleuve Comoé à l'Est qui ont des crues très modestes. La végétation et le sol sont favorables aux cultures d'exportations, de même qu'aux cultures vivrières [2]. Le département a une superficie de 3745 km² et une population estimée à 112188 habitants, soit une densité de 38 habitants/km² [3]. Cette population essentiellement agricole est constituée d'Agni, de Baoulé et d'une minorité d'allogènes. D'après les études géologiques antérieures, les roches de la zone d'étude appartiennent au domaine paléoprotérozoïque. Ces formations géologiques sont subdivisées en deux ensembles que sont les formations antébirimienues et les ensembles volcano-sédimentaires [4]. La région dispose de deux types d'aquifères qui sont les aquifères d'altérites et les aquifères du socle fissuré. Cependant, ce socle est recouvert d'épaisses couches d'altérites (plus de 100 m par endroit) qui réduit considérablement le taux de succès des forages [1].

2 MÉTHODES

Cette étude a nécessité l'utilisation de plusieurs types de données dont les cartes géologiques et topographiques des degrés carrés de M'Bahiakro et Agnibilékrou dari à l'échelle 1/200 000 réalisées respectivement par la Direction de la Géologie et par le Centre de Cartographie et de Télédétection de Côte d'Ivoire (CCT) ; les images satellitaires ETM+ de Landsat-7 (scènes 196-055 du 29 janvier 2002) ont été utilisées pour la cartographie du réseau linéaire. Les images satellitaires ont été traitées au Centre Universitaire de Recherche et d'Application en télédétection (C.U.R.A.T) de l'Université de Cocody (Abidjan-Côte d'Ivoire) ; les données hydrogéologiques comportent les fiches techniques des forages issues de l'antenne d'hydraulique villageoise de Yamoussoukro. De 1976 à 2004, 443 forages d'eau ont été réalisés dans la région de Daoukro; les données de populations de 1998 (dernier recensement) proviennent de l'institut national de statistique (INS).

2.1 CARTOGRAPHIE DES LINÉAMENTS

La cartographie des linéaments a été rendue possible grâce aux différents traitements appliqués à l'image corrigée Landsat ETM+ scène 196-055 du 29 janvier 2002. Les méthodes utilisées pour le traitement de l'image comprennent l'analyse en composante principale (ACP), les combinaisons d'images (additions et rapports de bandes), les compositions colorées et les techniques de filtrage spatial (les filtres de Sobel). L'organigramme de la fig. 2 résume les grandes lignes de toutes ces opérations.

- **Analyse en composante principale**

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une opération effectuée sur plusieurs canaux, dans le but d'améliorer la qualité des images, de supprimer les redondances d'informations et de compiler les données [5]. Le résultat prend la forme de plusieurs nouveaux canaux présentant un intérêt explicatif décroissant. Dans cette étude, elle a été réalisée avec les bandes ETM+ de landsat 7. L'état de corrélation entre les différentes bandes est représenté par le tableau I. L'analyse de ce tableau permet de retenir les néo-canaux ACP1, ACP2 et ACP3 qui contiennent respectivement 82,05 %; 9,73 % et 4,22 %

d'informations. Il en résulte donc que 96 % d'information sur l'image de la zone d'étude sont contenues dans ces trois néo-canaux. La technique de l'étalement linéaire a ensuite été appliquée à ces néo-canaux pour une amélioration du contraste.

- **Combinaisons d'images et compositions colorées**

Certains détails contenus dans l'image ont pu être observés grâce à l'application de la technique de combinaison d'image dont le principe est basé sur les opérations mathématiques qui permettent de générer des rapports de bande ($ETM+5 / ETM+4$), des indices normalisés ($(ETM+6 - ETM+4) / (ETM+6 + ETM+4)$) et des additions de bandes ($PC1+ETM7+ETM4$). Plusieurs compositions colorées ont été réalisées avec les bandes ETM+ brutes, mais aussi en utilisant leurs associations avec les bandes issues des différentes techniques d'analyses en composantes principales et des rapports de bandes ($ETM+7, 4, 5$; $ACP1, ETM+7,5$ et $ACP1, ACP2, ACP3$). Les informations obtenues à partir de toutes ces techniques sont complémentaires, ce qui facilite la mise en évidence de certains ensembles lithologiques diffus.

- **Les techniques de filtrage spatial**

Dans la présente étude, les filtres directionnels de Sobel (de types 7×7) ont été utilisés pour identifier les linéaments, parce qu'ils nous ont permis de mieux les discriminer, afin de cartographier l'essentiel des linéaments de la région de Daoukro. Les filtres directionnels de Sobel sont conçus de façon à faire ressortir ou masquer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur fréquence liée à la texture [6]. Les filtres directionnels de Sobel accentuent les discontinuités lithologiques et structurales dans les quatre directions N-S ; NE-SO ; NO-SE ; E-O (Tableau II) [7], [8]. Les discontinuités lithologiques et structurales correspondantes à des linéaments structuraux ont été relevées manuellement suivant une analyse visuelle à l'écran. Cette méthodologie nous a donc permis d'extraire les linéaments de la zone d'étude.

- **Contrôle et validation des linéaments structuraux**

Diverses cartes géologiques et photo-géologiques ont été exploitées pour la validation des résultats obtenus à partir du traitement des images satellitaires. Il s'agit des cartes Géomines [9] au 1/200 000, des cartes photo-géologiques [10] établies au 1/200 000 pour les localités d'Agnibilékrou et de M'Bahiakro. La carte des directions productives (obtenue à partir des forages à débits élevés) et celle du réseau hydrographique ont également servi de support à la validation de la carte de fracturation de Daoukro. La démarche a consisté à identifier et à répertorier toutes les failles parallèles aux segments de cours d'eau rectilignes, à prendre en compte les linéaments identiques sur les différentes cartes et ceux proches des forages à haut débits. En effet, les travaux de [7], [11], [12] ont révélé que les forages les plus productifs sont situés sur les accidents majeurs et peuvent donc être un outil essentiel à la validation des linéaments.

2.2 CARTOGRAPHIE THEMATIQUE DES RESSOURCES ET BESOINS EN EAU

La démarche méthodologique adoptée pour la cartographie des ressources en eau dans le cadre de ce travail a suivi les étapes suivantes : l'identification des critères de décisions, la classification et la standardisation de ces critères en vue de l'élaboration des indicateurs conformément aux objectifs à atteindre et enfin la pondération des critères et leur agrégation suivant la démarche multicritère.

- **Identification des critères de décision**

En référence aux travaux de [12], [13], [14], un certain nombre de critères a été identifié, pour l'établissement des différentes cartes thématiques des ressources en eau. Ces critères sont la pente (%), la densité du réseau hydrographique (km/maille), l'épaisseur d'altération (m), la densité de fracturation (km/maille), la recharge efficace (mm), la probabilité de réussite (%), la profondeur totale (m), le débit d'exploitation (m³/h) et le niveau statique (m).

- **Classification et standardisation des critères**

La classification des différents critères s'est faite en tenant compte des études antérieures réalisées par les références [15], [16]. Trois types de techniques ont été utilisés pour la spatialisation selon que le critère est représenté par des points, des polygones ou des polygones. Ainsi les points tels que la profondeur des ouvrages, et l'indice de succès ont été interpolés grâce à la commande « interpolate grid » du logiciel ArcView 3.3 ; les polygones tels que la pente a été exporté sous format raster à partir du logiciel Envi 4.2 et convertis en « grid » sur ArcView 3.3 pour faciliter la combinaison ; les polygones telles que la densité de drainage ont été converties en points sur le logiciel LinWin et exportées sur ArcView 3.3 pour leur

interpolation. Les différentes surfaces obtenues à la suite de ces opérations ont été réparties en cinq classes comme l'indique le Tableau III.

Lors de la standardisation, la classe très défavorable a toujours la note la plus faible et la classe très favorable, la note la plus élevée. Toutefois, ces notes dépendent aussi de la qualité du facteur. A titre d'exemple, si le facteur remplit les conditions les plus intéressantes comme c'est le cas de l'indice de succès, où nous avons une bonne partie des valeurs qui sont maximales (100 %), la classe très favorable prend la note 10. Dans le cas contraire (la classe très défavorable) prend la valeur 1 (tableau IV).

- **Pondération des facteurs d'appréciation**

Elle s'est faite à partir de la méthode des comparaisons par paire développée par les références [13], [17], dans le cadre du processus d'analyse hiérarchique (Analytical Hierarchy Process). Elle permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1 (tableau V). Ainsi la combinaison obtenue avec cette méthode est estimée de la façon suivante :

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

Une fois que les couches des facteurs d'appréciation ont été établis, et leur coefficient de pondération déterminé, il est aisé de les combiner. Ainsi, la pente, la densité de drainage, la densité de fracturation, l'épaisseur d'altérite et la recharge ont été combinées pour obtenir la carte de disponibilité. La profondeur totale et l'indice de succès ont permis d'obtenir l'accessibilité. Le débit d'exploitation et le niveau statique ont permis d'obtenir l'exploitabilité. Ces trois indicateurs combinés ont abouti à la carte des zones potentielles d'implantations des points d'eau.

- **Conception de la carte de la couverture des besoins en eau potable de Daoukro**

La couverture des besoins en eau représente le taux de desserte, l'approvisionnement en eau potable des populations rurales et semi-rurales. La norme utilisée par l'administration de l'hydraulique (DHH) pour aboutir à un bon taux de desserte est d'offrir un point d'eau à une population de 400 habitants. Pour réaliser cet objectif, nous avons recensé le nombre de point d'eau existant et fonctionnel dans chaque localité. A ces données, nous avons ajouté celle de la population par localité. Les cartes résultantes de ces données ont été combinées pour obtenir la carte de couverture des besoins en eau potable et mettre ainsi en évidence les zones de déficits.

3 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

3.1 CARTOGRAPHIE DES LINEAMENTS STRUCTURAUX DE DAOUKRO

L'analyse de certaines images traitées (ACP1 ; ACP1_ETM+7_ETM+4 ; ETM+4_ETM+5_ETM+7) a permis de mettre en évidence de nombreux accidents géologiques régionaux dont les principaux sont :

- l'accident de Dimbokro (DIM) de direction N20° ;
- le couloir allant de N'da kpanikro à Amorikro (NA) de direction N40° ;
- l'accident allant de Kpobikro à Daoukro (KD) de direction N130° ;
- l'accident allant de Gbékékéro à Katimansou (GK) de direction N80° ;
- un réseau d'accidents de directions N110° et N120°.

La fig. 4 présente les résultats du filtre de direction E-W rehaussant quelques accidents N-S. Ces filtres directionnels rehaussent les linéaments ou les contours perpendiculaires à leur direction de convolution. L'addition des bandes ACP1, ETM+7 et ETM+4 ainsi que les compositions colorées ETM+4_ETM+5_ETM+7 et ETM+7_ETM+3_ETM+1 ont permis la cartographie du réseau hydrographique et notamment la mise en évidence des fractures gouvernant certains bras de cours d'eau (fig. 5). Le relevé de toutes les discontinuités images sur l'ensemble des images traitées (à l'exception des routes, des lignes de haute tension etc.) a permis de dresser la carte des linéaments détaillés de la zone d'étude (fig. 6). L'exploitation de la carte du relevé détaillé des linéaments permet d'élaborer de nombreux fichiers thématiques tels que la densité de fracturation et l'orientation des linéaments, etc... Au sein d'un système d'Information Géographique (SIG), ces couches thématiques sont intégrées et associées à d'autres informations de nature diverse dans la perspective d'une modélisation hydrogéologique. La fig. 7 présente la carte de synthèse des accidents majeurs de Daoukro, établie à partir des images ETM+ traitées de Landsat 7. Ces accidents appartiennent pour la plupart aux grandes directions suivantes : N-S, NE-SO, E-O et NO-SE.

- **Validation de la carte de fracturation**

La validation de la carte détaillée des linéaments est une étape très importante qui conditionne l'utilisation de la carte pour les prospections hydrogéologiques futures. Elle permet d'attribuer à l'ensemble des linéaments retenus, la valeur de fracture. Cette importante phase a été effectuée à partir des données de fractures obtenues après l'exploitation de la carte photo-géologique de la région d'étude, établie par la direction de la géologie [4]. Sur la même portion de la zone d'étude, une comparaison a été faite entre la carte de fractures issue de la carte photo-géologique (Fig. 8 a) et celle issue des images Landsat 7 d'ETM+ (Fig. 8b). En procédant ainsi, on a la facilité de reconnaître les linéaments identifiés et vectorisés à la fois sur les deux supports. Ils sont représentés en rouge sur la fig. 8. Ainsi sur l'ensemble de la zone d'étude, un grand nombre de linéaments (environ 30%) issus des photo-aériennes ont été reconnus sur les images dérivées. Cependant, cette carte photo-géologique est celle du degré carré de M'bahiakro qui comprend seulement la moitié du département de Daoukro. On a également comparé les fractures détectées par les études de géophysique réalisées dans la région par le projet "Don japonais" à celles issues des images Landsat 7 d'ETM+. La fig. 8 présente ces résultats. 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: la direction N-S avec des débits allant de 9 à 25 m³/h, la direction NE-SO avec des débits importants pouvant atteindre 43 m³/h, et la direction NO-SE avec des débits pouvant atteindre 10 m³/h. Ces directions sont interconnectées avec d'autres fractures, formant ainsi des nœuds (fig. 9).

- **Analyse statistique des linéaments**

L'analyse des rosaces directionnelles (fig. 10) présente une répartition hétérogène des linéaments. A part la direction majeure NO-10 (16%), l'évolution des fréquences en nombre des familles de fractures est similaire à celle des fréquences en longueur cumulée. Les familles directionnelles N-S (16%), NO-SE (7%) et NE-SO (7%) sont majoritaires. La direction N-S est celle des plans de schistosité dans les formations volcano-sédimentaires du Nord et Nord-Est de la région. Dans la région, on note également la présence des linéaments de direction N 20-30, N 30-40 et N 70-80. Ils présentent des fréquences en nombre et en longueur cumulée de 6%, ils sont minoritaires.

3.2 CARTOGRAPHIE DES BESOINS EN EAU

La connaissance de la répartition spatiale de la population et du nombre de point d'eau par localité a permis de calculer l'accès à l'eau potable des populations. La carte de la couverture des besoins en eau potable des populations (Fig. 11) présente les zones globalement déficitaires sur le département. La carte de la couverture des besoins en eau a été répartie en quatre classes : mauvaise, moyenne, bonne et excellente. La classe des mauvaises couvertures occupe une proportion de 16 %. Il s'agit des zones de plus de 1000 habitants qui bénéficient d'un seul point d'eau. C'est le cas de Ananda kouadiokro à l'ouest de la région (1481 habitants pour un point d'eau de 2m³/h), alors qu'un point d'eau est attribué à une population de 400 habitants. Ces localités sont pour la plupart loin des sous-préfectures. Ces villages sont confrontés à des pannes fréquentes de pompes et se retrouvent sans point d'eau fonctionnel. Ainsi, les habitants se dirigent vers les villages voisins parfois distants d'un à deux kilomètres pour s'approvisionner en eau potable. On retrouve les plus grandes plages de cette classe dans la sous-préfecture d'Ettrokro et d'Ouéllé. La classe de couverture moyenne est la plus fortement représentée dans le département. Elle couvre 47 % de la zone d'étude et occupe les zones de plus de 1000 habitants bénéficiant de 2 points d'eau. Elle est plus présente dans la partie Ouest de la zone d'étude. Nous distinguons aussi une plage assez importante au Nord d'Ettrokro et à l'Ouest de Daoukro. De nombreuses localités de la région de Daoukro devraient bénéficier d'une hydraulique villageoise améliorée (HVA), mais malheureusement ces villages ne sont pas électrifiés. L'hydraulique villageoise améliorée (HVA) est un système d'adduction d'eau potable qui nécessite que la localité soit lotie, électrifiée et ait un ouvrage d'un débit supérieur à 3 m³/h. Les classes de couverture bonne occupent 35 % de la zone d'étude. Ce sont des zones qui bénéficient d'un système d'hydraulique villageoise améliorée et qui ont plus de 4 pompes villageoises fonctionnelles. Ce sont les localités d'Ettrokro, Ananda, Ouéllé, Kongoti et kouakoussekro. Ces localités sont proches des différentes sous préfectures. Cependant, les châteaux d'eau de Kongoti et d'Ettrokro sont confrontés à des pannes intempestives. Les classes d'excellente couverture (2%) sont alimentées par le système d'hydraulique urbaine. Ce sont les localités de Daoukro, Agniassikassou, Anoumabo, Dengbé et Dengbé Pépressou. Ce sont de gros villages très proches de la sous-préfecture de Daoukro qui sont alimentés par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI).

3.3 CARTOGRAPHIE THEMATIQUE DES RESSOURCES EN EAU

- **Disponibilité des ressources en eaux souterraines**

La carte de disponibilité (fig. 12) a été réalisée à partir de la combinaison des paramètres suivants : la densité de drainage, la densité de fracturation, l'épaisseur d'altération, l'infiltration efficace. Elle se caractérise par quatre classes. Les disponibilités mauvaise et médiocre occupent 17% du domaine et caractérisent les zones à faible densité de fracturation et à densité de drainage élevée. Ces zones sont à déconseiller pour l'implantation de forages car un réseau dense est défavorable à l'alimentation de la nappe. Les classes de disponibilité bonne (3%) et excellente (80%) caractérisent les zones favorables à l'implantation des forages. Elles traduisent une bonne alimentation des nappes; la fracturation y est intense et participe à la recharge de la nappe souterraine.

- **Accessibilité aux ressources en eaux souterraines**

Les réserves d'eau souterraine ne sont véritablement utilisables que lorsque certains facteurs réunis rendent possible leur accès. Les plus importants restent la profondeur des ouvrages et la probabilité de succès. L'étude de ces paramètres a permis de générer la carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine dans la région de Daoukro (Fig. 13). Celle-ci est caractérisée par quatre classes d'inégale répartition. Les zones d'accessibilité mauvaise et médiocre représentent 21% du domaine d'étude et sont caractérisées par de faibles probabilités de succès (débits très faibles) et des profondeurs comprises entre 90 m et 98 m. La densité de fracturation dans ces zones est faible. Les classes de bonne et excellente accessibilité occupent 80% de la superficie de Daoukro. Cela traduit les bonnes conditions d'accessibilité aux ressources en eau souterraine sur toute la zone d'étude. Les ouvrages ont des profondeurs généralement faibles et à fortes probabilités de succès. Toutes les localités proches des cours sont caractérisées par des profondeurs relativement faibles et des probabilités de succès supérieures à 80 %. Dans ces zones la nappe est alimentée par le cours d'eau.

- **Exploitableté des ressources en eau**

Pour réaliser la carte d'exploitableté (fig. 14), nous avons utilisé les facteurs que sont : les débits d'exploitation et le niveau statique avec une très grande importance accordée aux débits d'exploitation. Les zones d'exploitableté mauvaise (24 % du territoire) regroupent les secteurs où les ressources ne sont généralement pas exploitables bien qu'elles soient probablement disponibles. En effet, elles sont caractérisées par des débits d'exploitation très faibles ($< 1 \text{ m}^3/\text{h}$) et un niveau statique très profond ($> 25 \text{ m}$). Ces zones constituent le seuil de survie des ouvrages de captage. La poche la plus importante se localise dans la partie Nord de Ouéllé (Tiokonou) et à l'Est de la ville de Daoukro avec des niveaux statiques très profonds. La classe à exploitableté médiocre est la plus représentative du secteur d'étude avec une proportion d'occupation estimée à 56 %. Elle exprime une relative difficulté dans l'exploitation des ressources souterraines et se retrouve dans tous les secteurs de la zone d'étude. Cette classe regroupe les zones qui constituent le domaine favorable à l'hydraulique villageoise. Les classes à bonne et excellente exploitableté sont caractérisées par des débits moyens et forts accompagnés de niveaux piézométriques moins profonds (7-15 m). Elles occupent 20 % de la zone d'étude et sont localisées à Ananda et à Daoukro. Ces zones constituent les domaines favorables à l'approvisionnement en eau potable de centres secondaires et aussi pour l'hydraulique urbaine.

- **Zones potentielles d'implantation des points d'eau**

La combinaison des trois indicateurs que sont la disponibilité, l'exploitableté et l'accessibilité a permis de produire la carte thématique des zones d'implantation (fig. 15). Les zones d'implantations mauvaise (1% du domaine d'étude) et médiocre (24% du domaine d'étude) sont présentes dans la partie sud de la zone d'étude. Nous distinguons également une plage au nord du côté d'Ouéllé dans les localités de Tiokonou et Zanzansou. Ce sont des zones à densité de fracturation faible, caractérisées par une recharge médiocre de la nappe. Dans ces zones, la nappe est en profondeur. Ces zones sont cependant appropriées pour l'implantation des forages dont les débits sont acceptables dans le cadre de l'hydraulique villageoise. Les zones d'implantations bonne (57% du domaine d'étude) et excellente (18% du domaine d'étude) sont présentes sur la quasi-totalité de la région. Dans ces zones, les ouvrages sont moins profonds et à succès probable. Ces zones sont caractérisées par une densité de fracturation élevée. La ressource en eau est disponible avec une pente relativement faible qui permet une bonne recharge de la nappe. Ces zones sont favorables à l'implantation de forage dans le cadre de l'hydraulique villageoise améliorée (HVA) ainsi que des forages à gros débits (hydraulique urbaine).

- **La carte des futurs points d'eau**

La carte des futurs points d'eau est obtenue après superposition de la couche des mégas fracture sur celle des zones potentielles d'implantation. La carte des futurs points d'eau réalisée (fig. 16) présente les intersections des méga fractures à proximité des localités en tenant compte des directions productives. Ce sont des éléments qui devraient aider à l'identification des sites favorables pour implanter des forages à gros débits. Ainsi, une centaine de sites favorables ont été cartographiés et seraient susceptibles de fournir de gros débits. Ces sites seront les plus visés lorsque d'autres campagnes d'hydraulique seront lancées. Ainsi, ces cartes permettront aux opérateurs d'optimiser le temps et les ressources financières pour réaliser des ouvrages qui ont beaucoup de chance d'être productifs.

4 DISCUSSION

Cette étude a permis de montrer la bonne concordance entre les différents forages productifs et les linéaments cartographiés par les images satellitaires. Les traits structuraux majeurs et les morpho-structures détectées sur les images correspondent à des accidents véritables qui affectent le socle de Daoukro. La distribution des orientations et les cartes de densité de fracturation ont permis de définir des "domaines structuraux", dont l'intérêt est primordial dans la cartographie des zones à forte probabilité de circulation des eaux. L'utilisation de la télédétection, du SIG et de l'analyse multicritère dans la région de Daoukro a abouti à la production des cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité des ressources d'eau souterraine. Les méthodes d'analyse multicritère ou plus exactement les méthodes d'aide multicritères à la décision ont été utilisées par de nombreux auteurs. Elles ont permis la cartographie des zones favorables à l'implantation des forages à gros débits [8], [12], [15], [16] et la sélection de meilleurs sites de stockages de déchets [13], [18], [19]). La région de Daoukro possède une bonne disponibilité en eau souterraine (80 % de la superficie totale). La carte des futurs points d'eau obtenue après superposition de la couche des mégas fracture sur celle des zones potentielles d'implantation, se présente comme une base de données très importante pour l'aide à la décision. Elle constitue une pré-prospection qui évite les phases de recherches lourdes, lentes et coûteuses comme l'ont indiqué les travaux de la référence [20]. Ainsi, la carte hydrogéologique obtenue à Daoukro permet de remarquer que les débits importants sont issus des forages situés ou réalisés au niveau des nœuds des méga-fractures. Cette carte présente l'avantage de présenter ainsi sur un seul support cartographique, plusieurs éléments hydrogéologiques (épaisseur d'alterite, débits, fracturations, densité de drainage, etc).

L'étude des rapports entre population et eau (la couverture des besoins en eau potable) met en relief les problèmes relatifs à la pénurie d'eau et à l'inégalité de sa répartition. On constate qu'en général, on accorde rarement toute l'attention nécessaire aux processus démographiques, alors que les conséquences de la dynamique spatiale de la population dictent, entre autres, l'organisation des stratégies de gestion de cette importante ressource [21]. A cela nous ajoutons le taux de desserte qui baisse à cause des nombreuses pannes affectant les points d'eau (points d'eau non fonctionnels). Au niveau de Daoukro, sur trois pompes villageoises réalisées, une à deux pompes sont en panne. A cela s'ajoute le vieillissement des ouvrages et la baisse du débit des forages dans les villages.

Les SIG et l'analyse multicritère présentent de nombreux atouts, car ils apportent une contribution incontestable à la gestion des ressources en eau et les prises de décisions rationnelles. Cependant, ils présentent des limites. L'estimation des paramètres manque souvent de précision du fait de l'insuffisance ou de l'absence totale de données en certains endroits de la zone d'étude.

5 TABLEAUX ET FIGURES

5.1 TABLEAUX

Tableau I : Corrélation entre différents canaux de l'image multispectrale ETM+

Bandes	ETM+1	ETM+2	ETM+3	ETM+4	ETM+5	ETM+7
ETM+1	1					
ETM+2	0,959388	1				
ETM+3	0,864901	0,923554	1			
ETM+4	0,716842	0,690287	0,494016	1		
ETM+5	0,7936	0,857582	0,91163	0,540385	1	
ETM+7	0,650575	0,739985	0,879895	0,266946	0,910055	1

Tableau II : Filtrés directionnels de Sobel (matrice 7x7)

N-S							E-O						
1	1	1	2	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1	-1	-1	-2	0	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1
NE - SO							NO - SE						
0	1	1	1	1	1	2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	0
-1	0	2	2	2	3	1	-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-1	-2	0	3	4	2	1	-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1	-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1	-1	0	2	2	2	3	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	1	1	2

Tableau III : Appréciation des différentes classes selon le sens de variation de la fonction

Classe	Fonction croissante	Fonction décroissante
Classe très défavorable	Très faible	Très fort
Classe défavorable	faible	fort
Classe moyennement favorable	Moyen	Moyen
Classe favorable	fort	faible
Classe très favorable	Très fort	Très faible

Tableau IV : Classification et standardisation de la probabilité de succès

Probabilité de succès	Notes	Classes de succès
0-20 %	1	Très défavorable
20-40 %	3	Défavorable
40-60 %	5	Moyennement favorable
60-80 %	8	Favorable
80-100 %	10	Très favorable

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

Carte de	Critères	Poids	Total
Disponibilité	Pente	0,5	1
	Recharge	0,25	
	Drainage	0,13	
	Fracturation	0,08	
	Epaisseur d'altérite	0,04	
Accessibilité	Profondeur totale	0,25	1
	Indices de succès	0,75	
Exploitabilité	Débits d'exploitation	0,25	1
	Niveau statique	0,75	

5.2 LES FIGURES

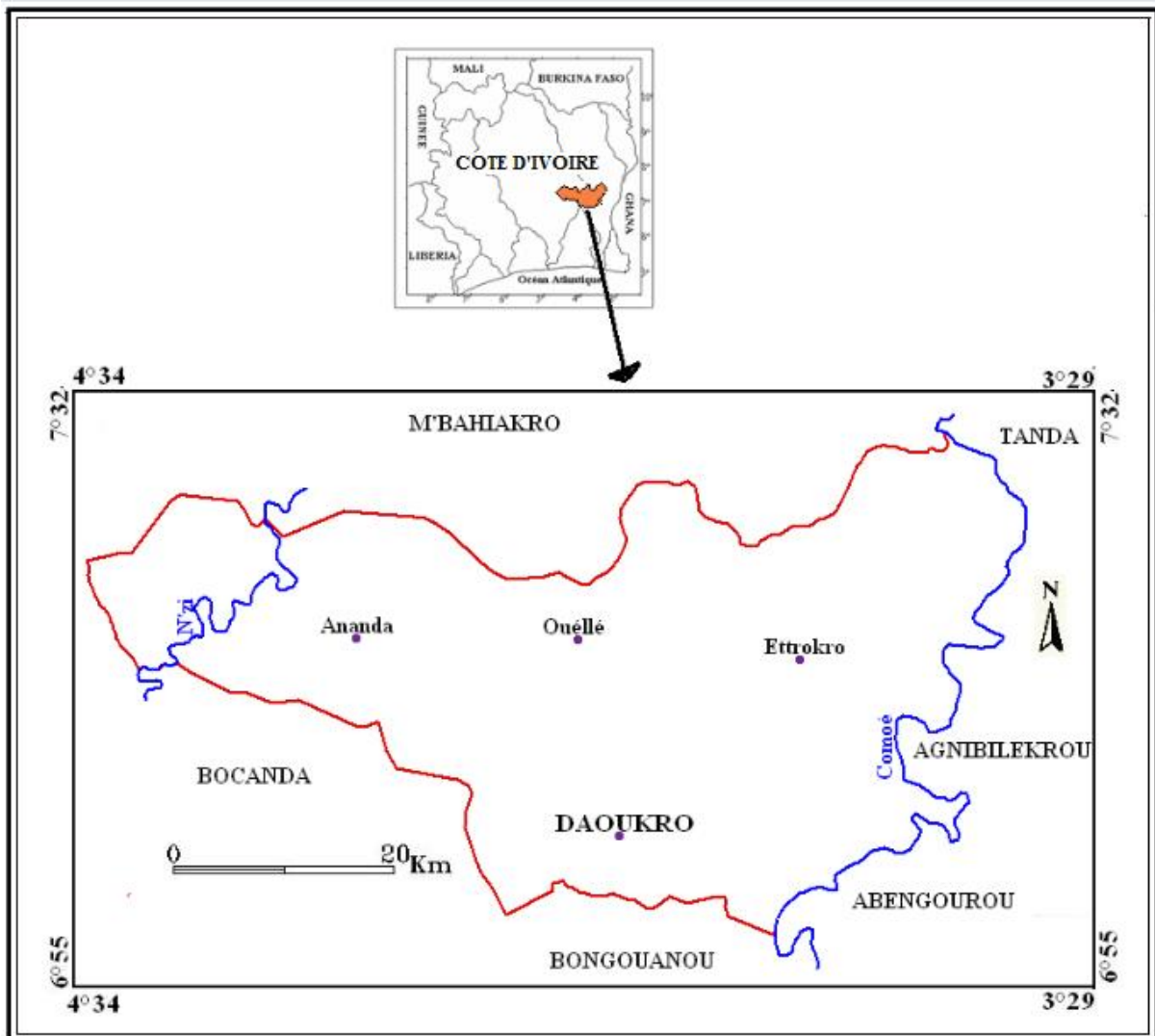


Fig. 1 : Carte de présentation du département de Daoukro

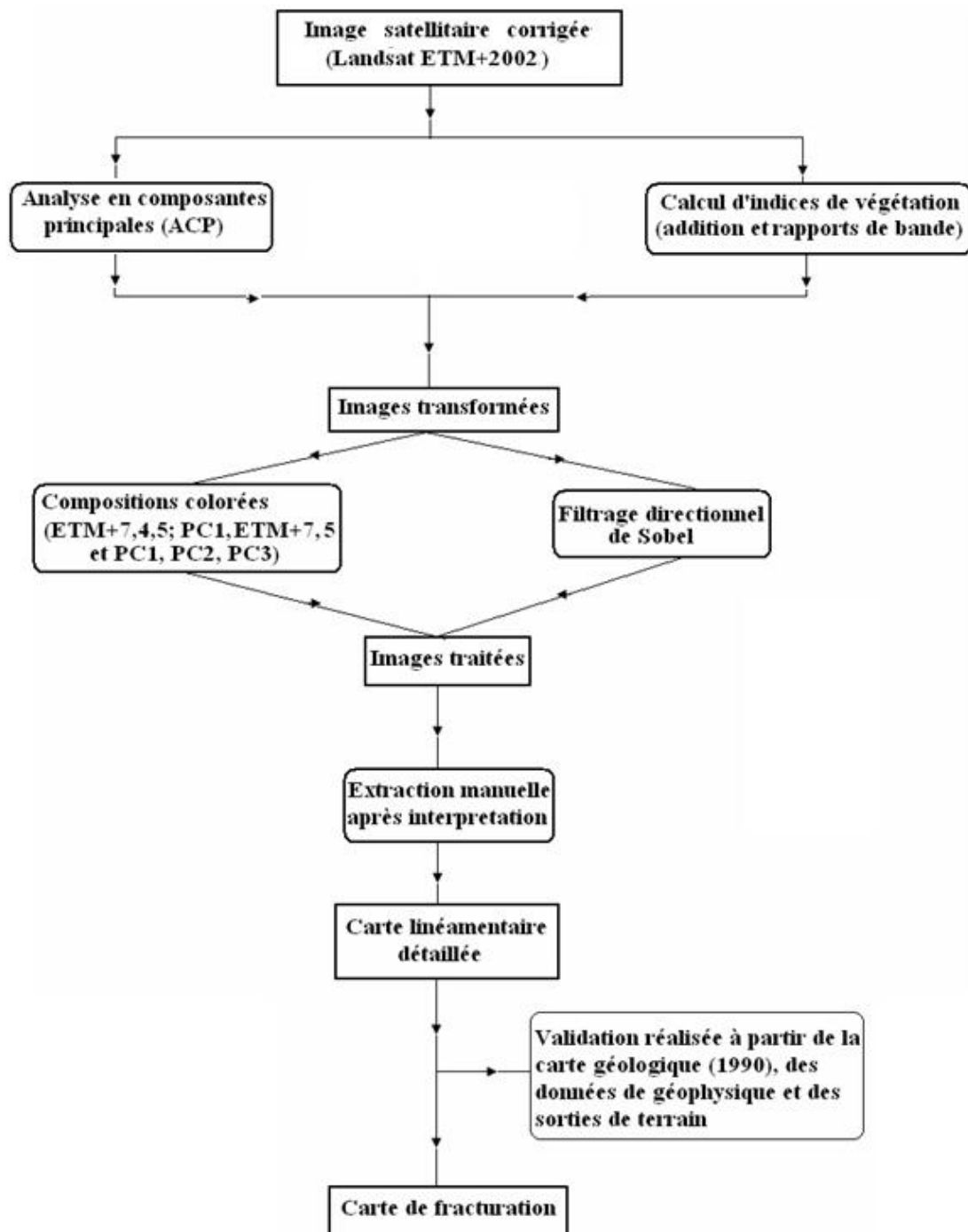


Fig. 2 : Organigramme descriptif des traitements de l'image satellitaire pour l'élaboration de la carte de fracturation

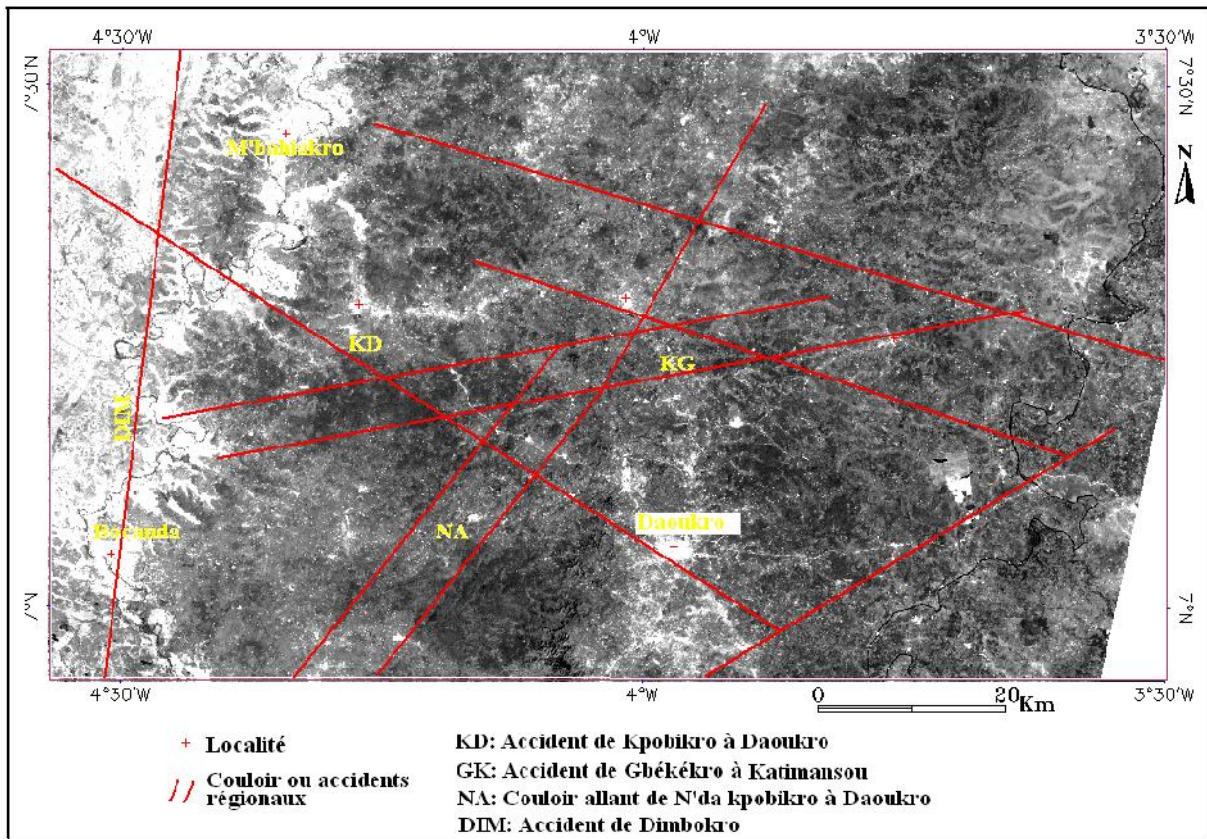


Fig. 3 : ACP1 rehaussant les principaux couloirs

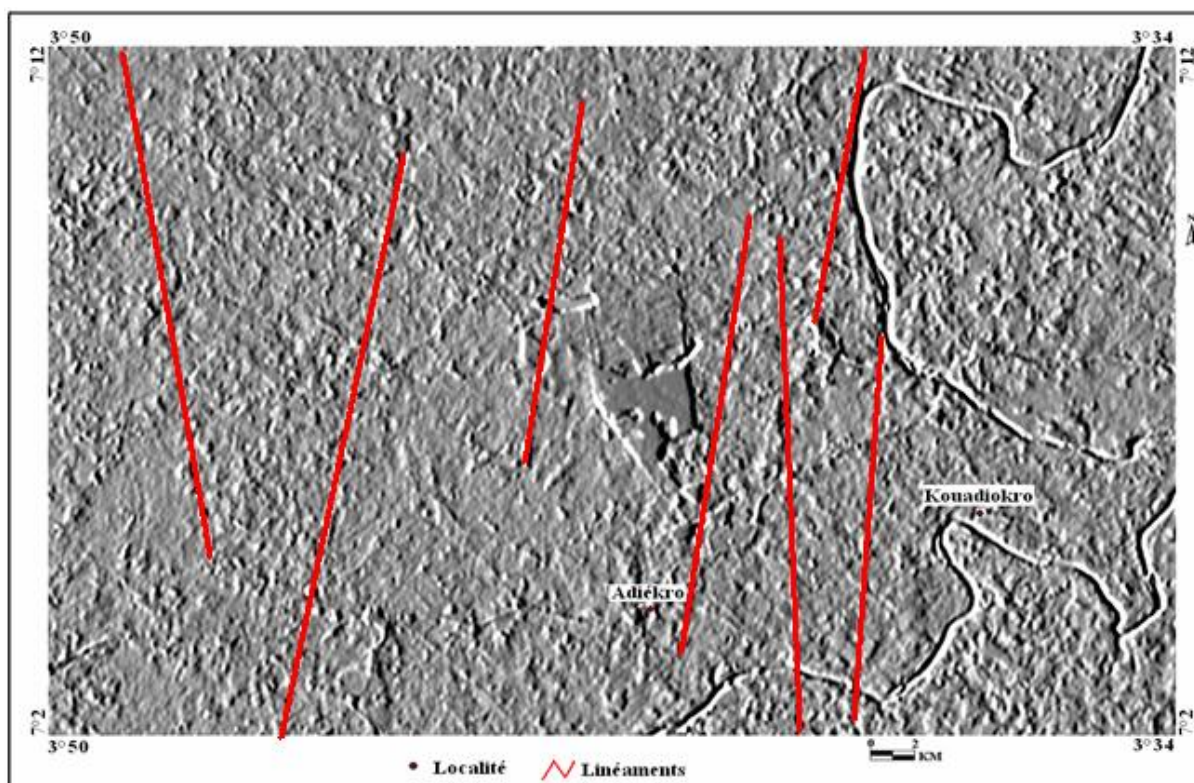


Fig. 4 : Filtre Sobel de direction E-W rehaussant les linéaments de direction N-S

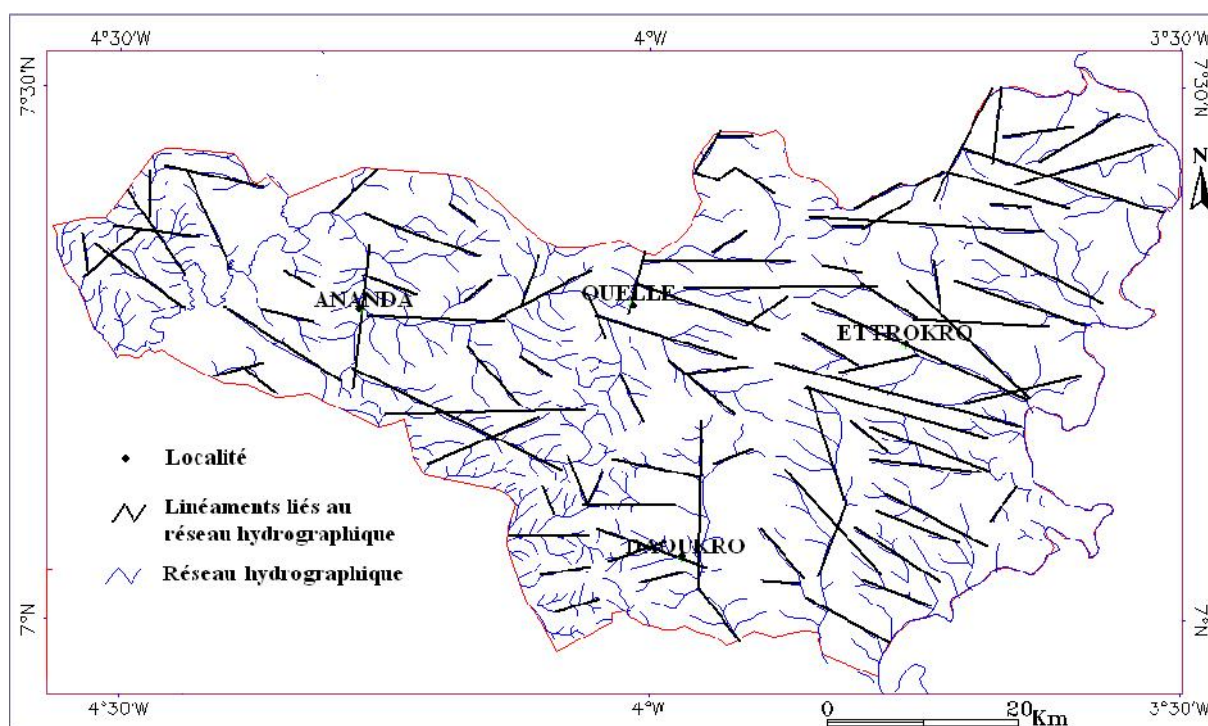


Fig. 5 : Carte des linéaments liés au réseau hydrographique de la région de Daoukro

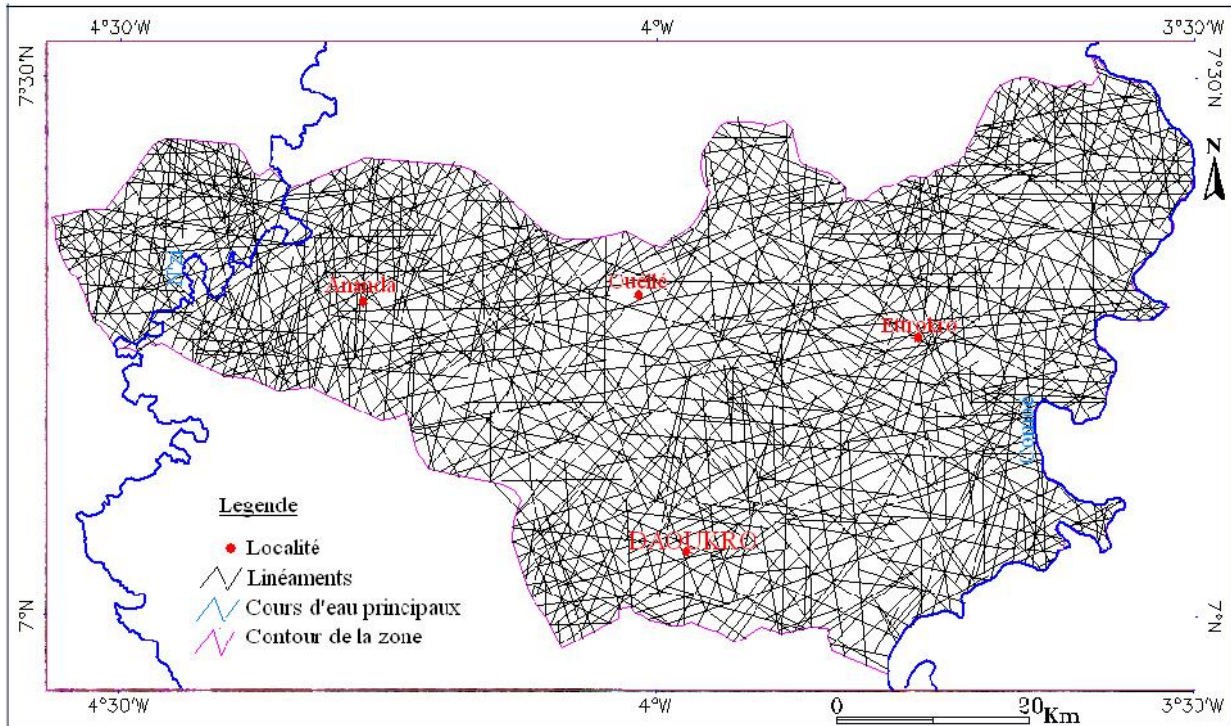


Fig. 6: Carte détaillée des linéaments de Daoukro

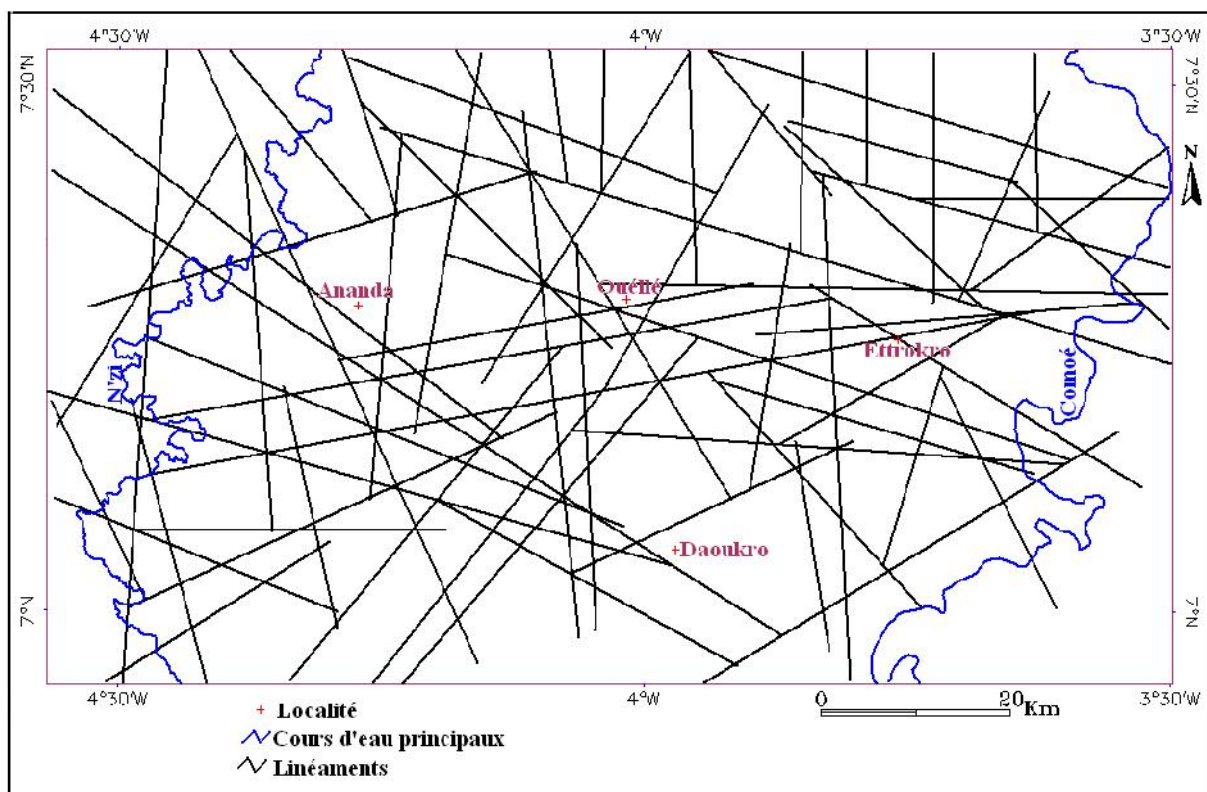


Fig. 7 : Carte des linéaments majeurs

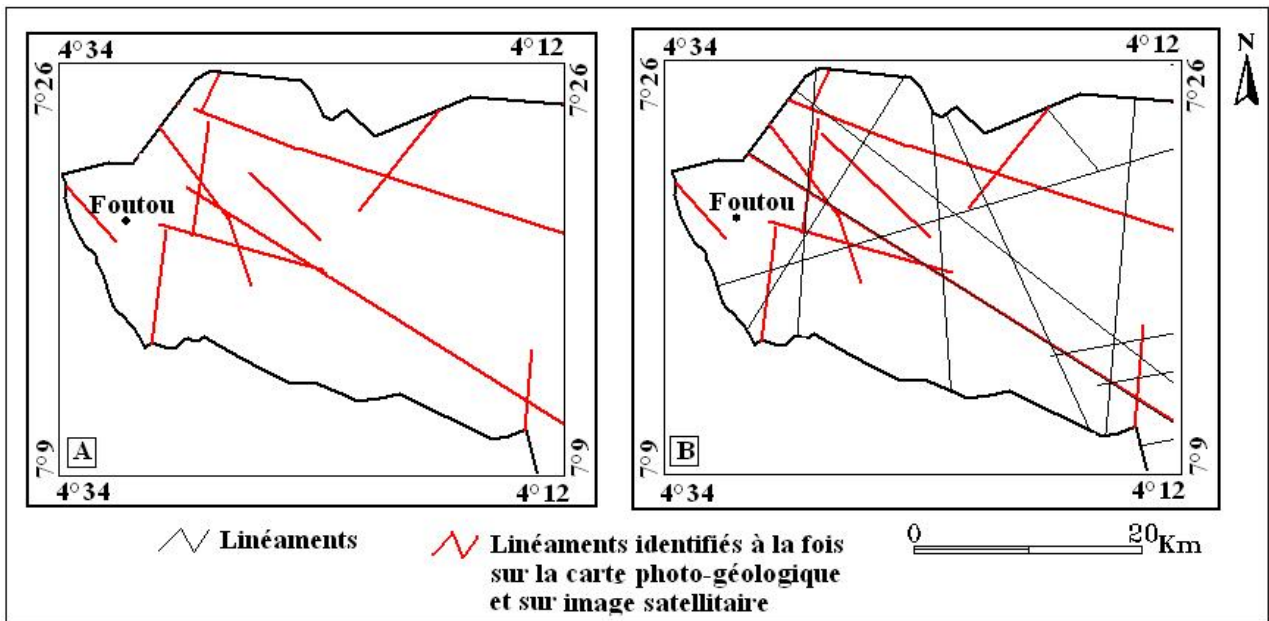


Fig. 8 : Exemple de comparaison entre la carte de fracturation issue de la carte photogéologique (a) et celle issue des images satellitaires (b)

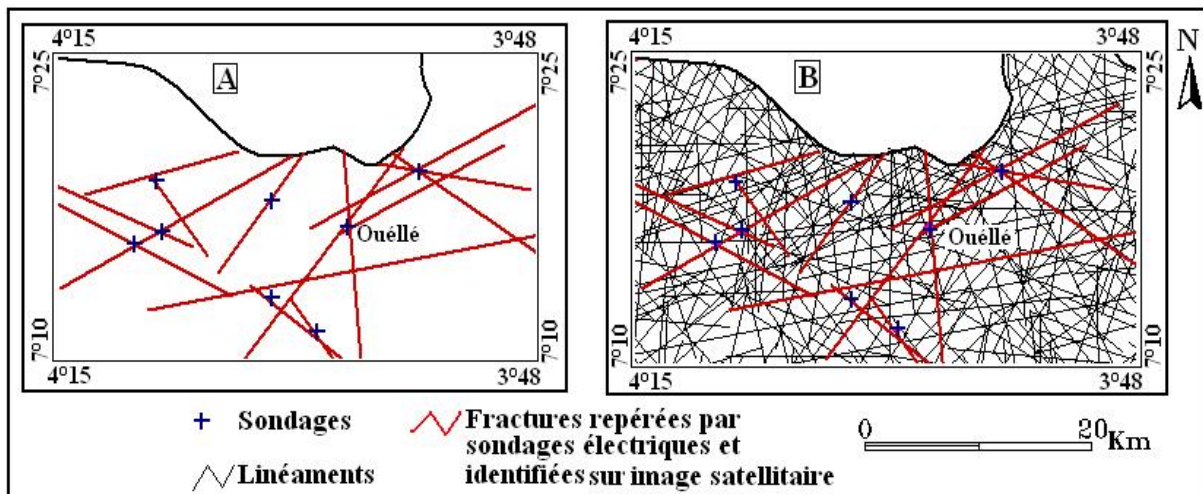


Fig. 9 : Exemple de comparaison entre la carte de fracturation issue du positionnement des sondages électriques (a) et celle issue des images satellitaires (b)

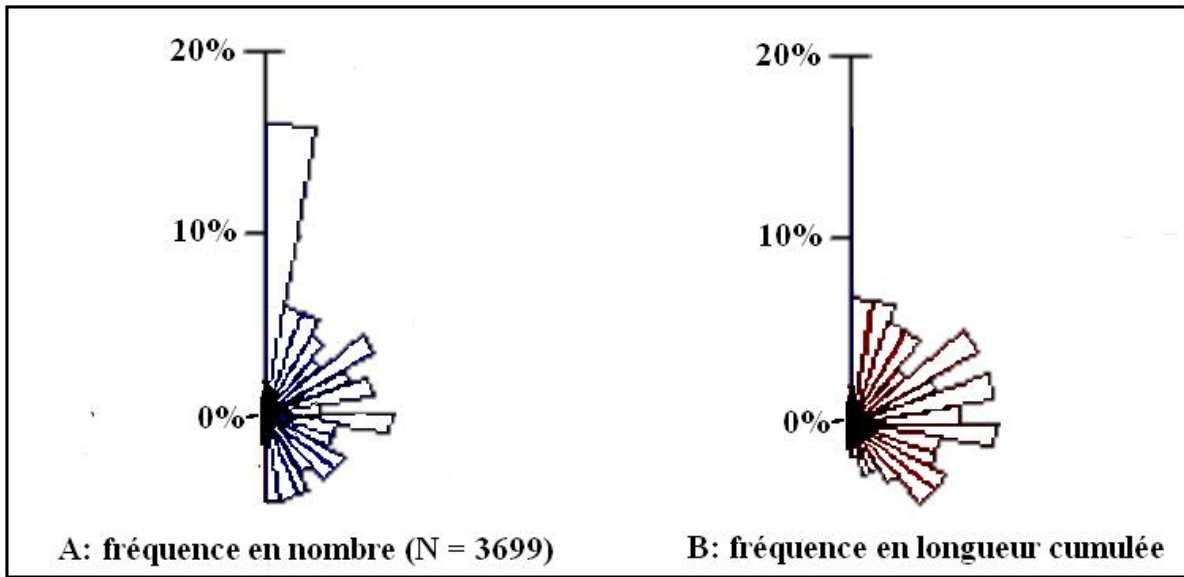


Fig. 10 : Rosaces directionnelles des fractures issues des images satellitaires

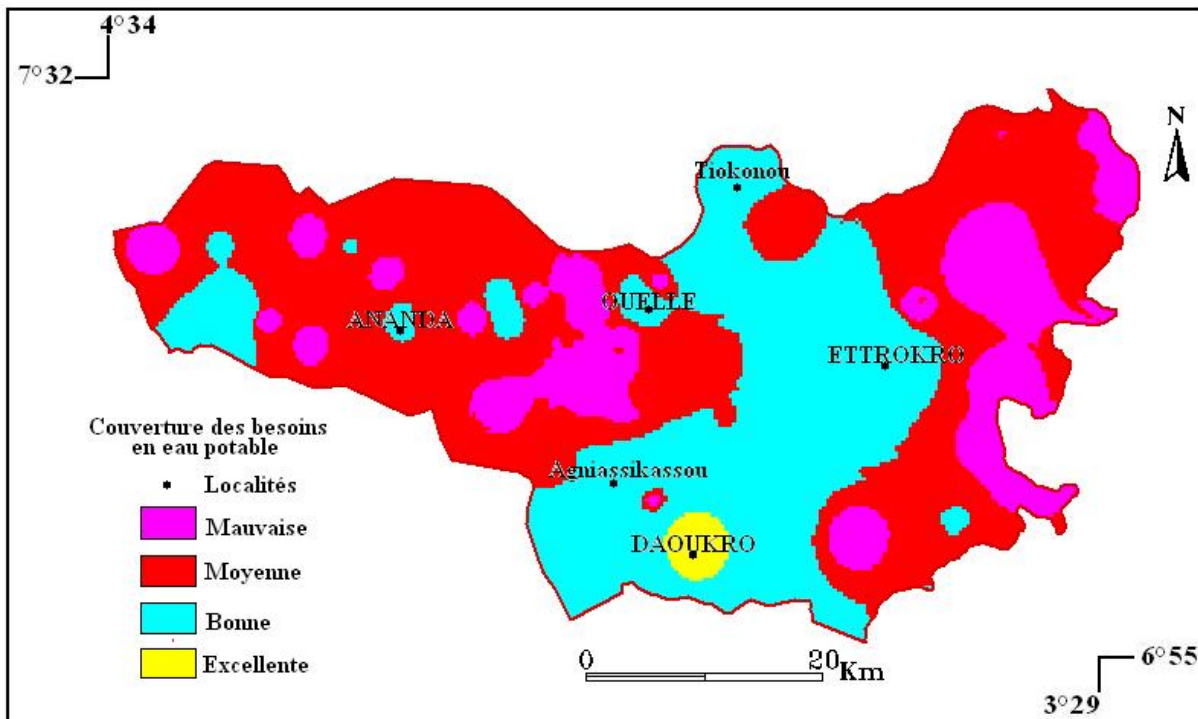


Fig. 11 : Carte de la couverture des besoins en eau potable

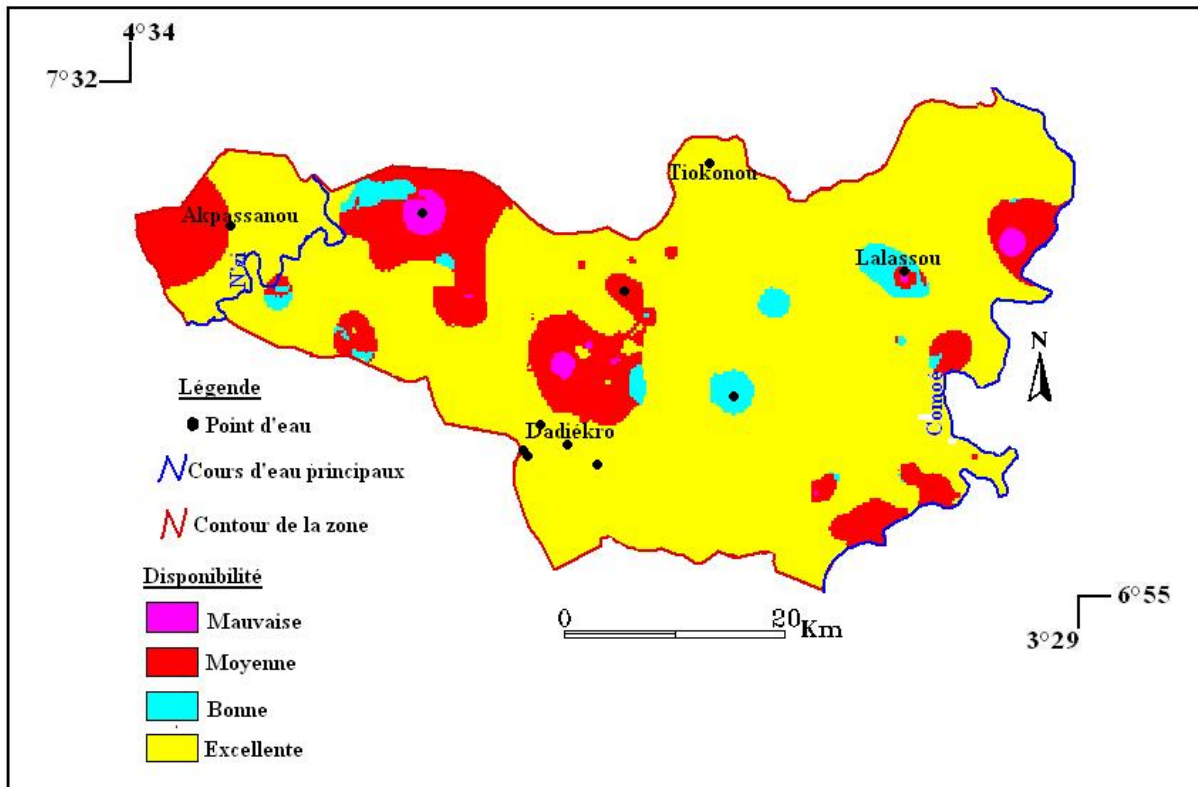


Fig. 12 : Carte de disponibilité des ressources en eau souterraine

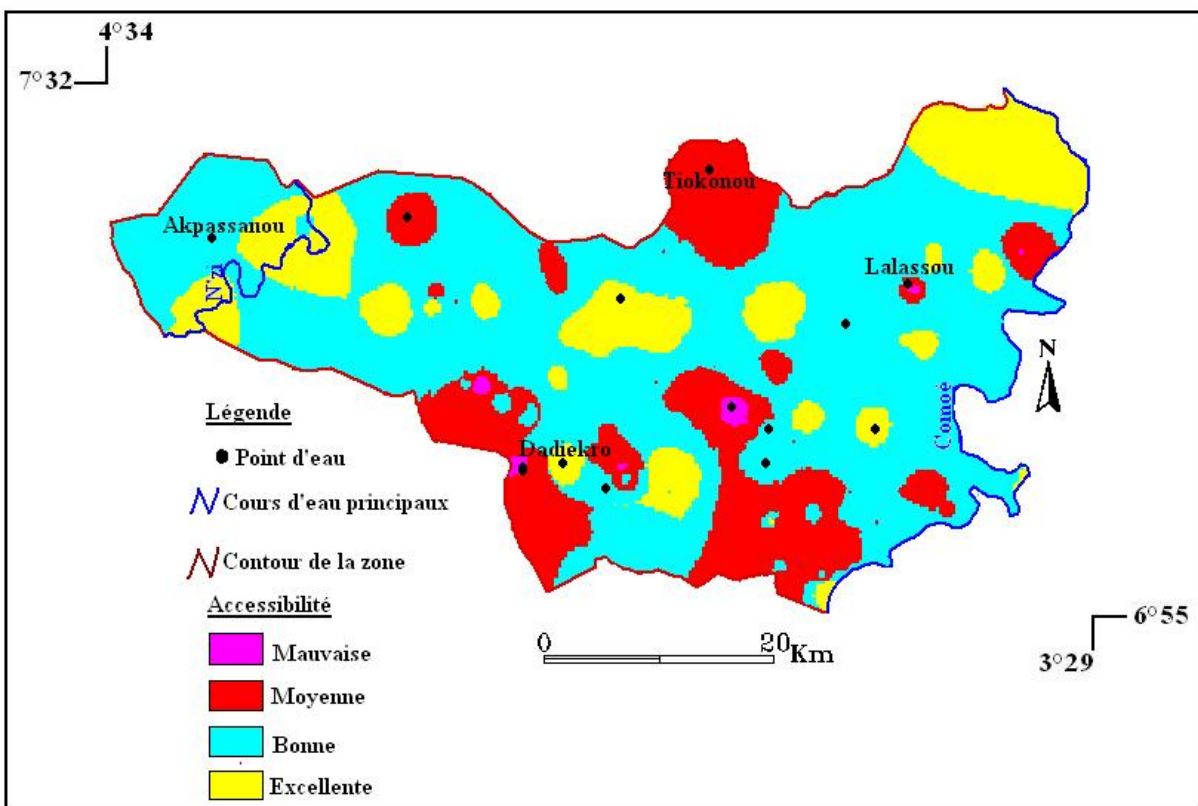


Fig. 13 : Carte d'accessibilité aux ressources en eau souterraine

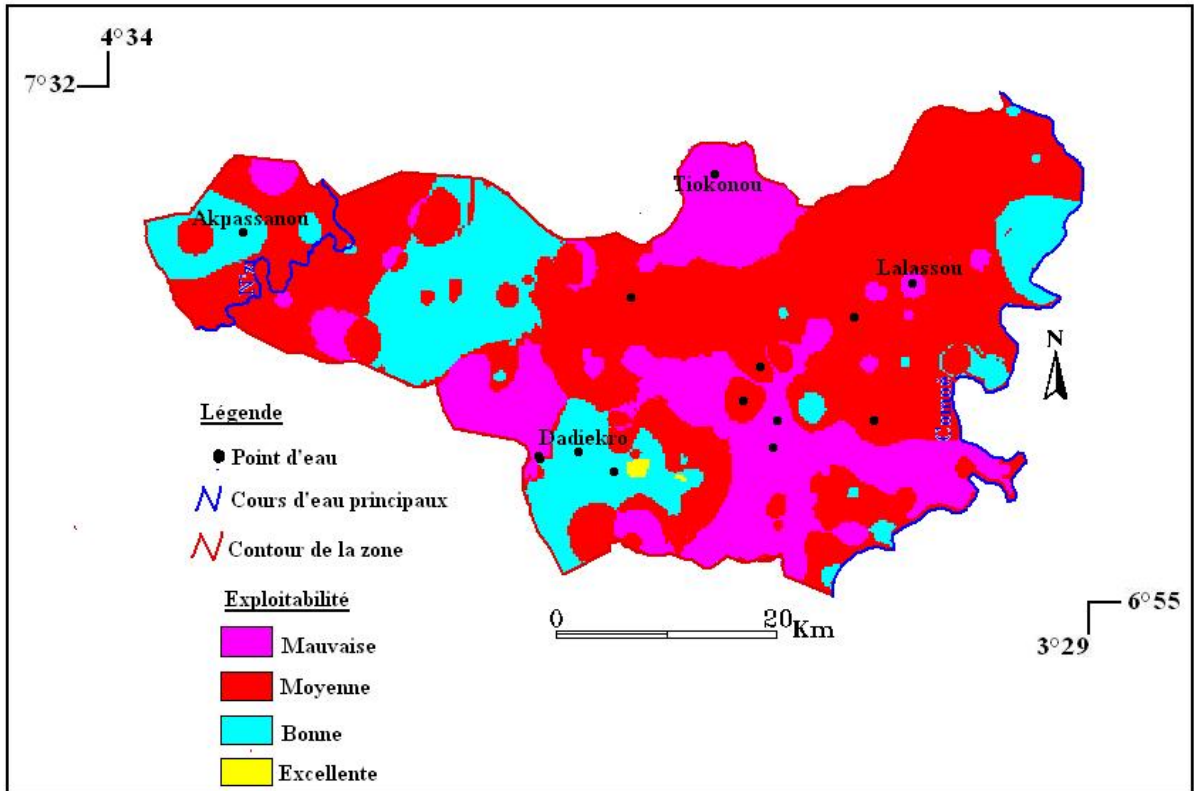


Fig. 14: Carte d'exploitabilité des ressources en eau souterraine

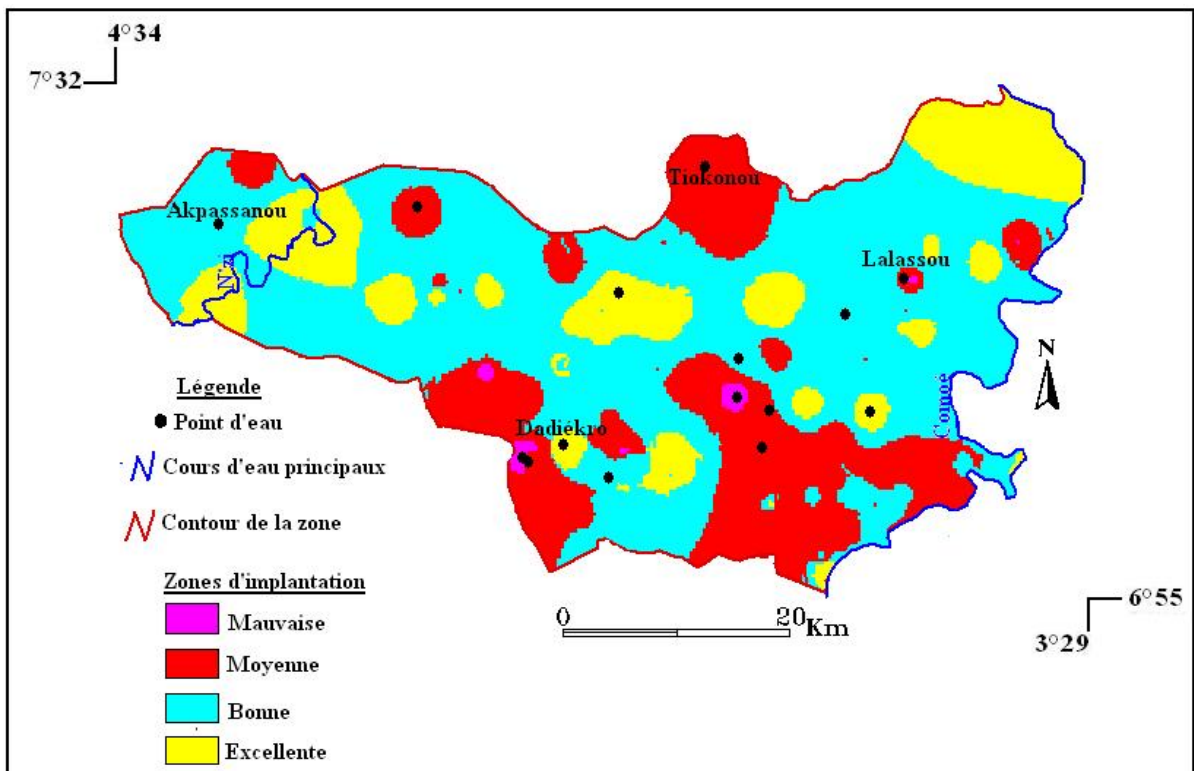


Fig. 15 : Carte des zones d'implantations potentielles des points d'eau

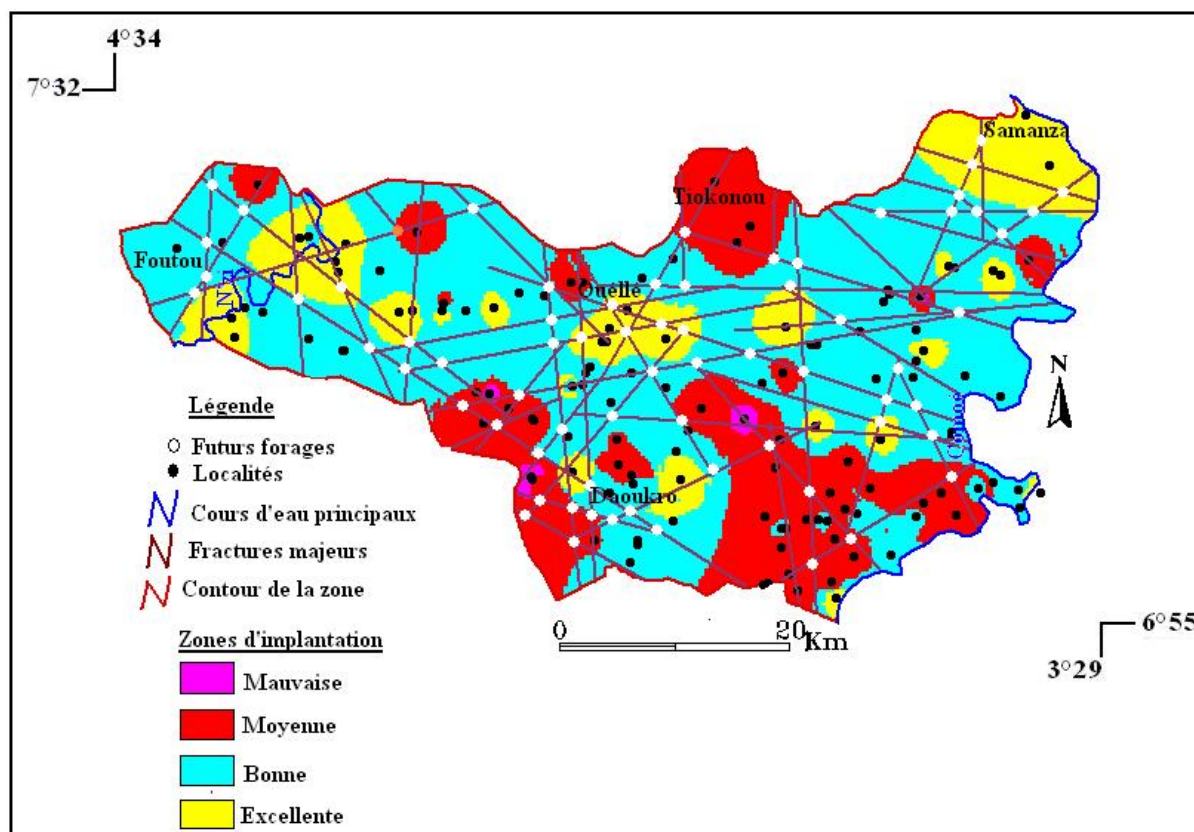


Fig. 16 : Carte des futurs points d'eau

6 CONCLUSION

Les images Landsat ETM+7 ont permis la cartographie des réservoirs d'eau de la région de Daoukro. Ainsi a été élaborée la carte de fracturation. Cette carte fait ressortir les principales directions de la zone d'étude qui sont les directions N 0-10 (16%), N50-60 (7%) et N90-100 (7%). On note également la présence des linéaments de direction N20-30 (6%), N30-40 (6%) et N70-80 (6%). La validation des linéaments structuraux est effectuée à l'aide des données auxiliaires disponibles (cartes géologique, photo-géologique, données de forages existants et données de campagne de géophysique). Les aquifères de la région de Daoukro regorgent d'importantes ressources d'eau souterraine. Plus de 80 % de la zone d'étude présente une excellente disponibilité en eau souterraine. Les différentes zones convenables à l'implantation d'ouvrage à gros débits ont été cartographiées et plus de 150 sites favorables aux futures implantations ont été sélectionnés. Différentes directions productrices ont été identifiées. Il s'agit des directions NE-SO, NO-SE et NS. L'utilisation de cet outil pourrait, en effet, limiter l'obtention des faibles débits et réduire fortement le taux d'échec.

RÉFÉRENCES

- [1] F. Kanohin, "Mobilisation des ressources en eau de surface et souterraine dans un contexte de changement climatique dans la région de Daoukro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)". *Thèse unique de Doctorat. Université d'Abobo-Adjamé*, 144 p, 2010.
- [2] INS (Institut national de la statistique) "Recensement général de la population et de l'habitat de Côte d'Ivoire. Rapport de synthèse, volume des fiches monographiques des localités : région du N'zi-Comoé". *INS Abidjan*, 50 p, 2001.
- [3] DCGTX (Direction et contrôle des grands travaux) "Projet local de développement agricole de Daoukro". DCGTx, Côte d'Ivoire, 147 p, 1995.
- [4] C. Delor, Y. Simon, M. Vidal, Z. Zeade, Y. Koné, "Carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, feuille Agnibilékrou-dari", *Mémoire n°9 de la Direction des Mine et de la Géologie, Abidjan*, 1995.

- [5] H. Ranjbar, M. Honarmand, Z. Moezifar, "Analysis of ETM+ and Airborne Geophysical Data for Exploration of Porphyry Type Deposits in the Central Iranian Volcanic Belt, Using Fuzzy Classification. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS applications, and Geology III*"W, SPIE, pp 165-173, 2004.
- [6] S. Himyari, C. Hoepffner, M. Benzakour, D. E. Hadani, "Etude structurale du haut atlas oriental (Maroc) à l'aide de l'analyse linéaire des images HRV (XS) de Spot", *Téledétection*, Vol. 2, n°4, p. 243-253, 2002
- [7] J. Biemi, S. Deslandes, Q. H. J. Gwyn, P. Jourda, "Influence des linéaments sur la productivité des forages dans le bassin versant de Ta Haute Marahoué (Côte d'Ivoire): Apport de la télédétection et d'un système d'information à référence spatiale", *Téledétection et Gestions des Ressources*, vol. 7, pp 41-49, 1991.
- [8] M.B. Saley, "Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo- image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)". *Thèse unique de doctorat, université de Cocody*, 209 p, 2003.
- [9] Géomines Ltée, "Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise", *Minist. T. P. & Transp., Direct. Centr. Hydraul., République de Côte d'Ivoire, carte d'Agnibilékrou-dari Cahier n°. 20*, 30 p, 1982.
- [10] F. G. Caldini, M. Posavec, M. J. Azuelos, "Carte photogéologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, Feuille d'Agnibilékrou-dari", *Commission du Canada, Société pour Développement Minier de la Côte d'Ivoire (SODEMI)*, 1978.
- [11] A. N. Sawadogo, "Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta". Etude régionale du Bassin versant de la Sissil. *Thèse Doctorat ès Sci. Nat., Univ. Grenoble 1, Inst. Dolomieu*, 350 p, 1984.
- [12] P. Jourda, M. B. Saley, E. M. Djagoua, K. J. Kouamé, J. Biémi, M. Razack, "Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire): Approche par analyse multicritère et test de validation", *Revue Internationale de Téledétection*, Vol. 5, n°4, pp 339-357, 2006.
- [13] Z. El Moorjani, "Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc)". *Thèse de doctorat, Université de Genève. Terre et Environnement*, Vol. 42, 300 p, 2003.
- [14] I. Hentati, M. Zairi, H. B. Dhia, "Utilisation des SIG pour l'évaluation de la vulnérabilité environnementale des aquifères phréatiques : Cas de la nappe de Sfax- Agareb (Sud-Est tunisien)". *Communication SIG Environnement/Eau, Conférence Francophone ESRI*, 2005
- [15] I. Savane, "Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale". *Thèse d'Etat, Université de Cocody*, 396 p, 1997.
- [16] P. Jourda, "Méthodologie 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 des zones tests de la Côte d'Ivoire". *Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody*, 430 p, 2005.
- [17] T.L. Saaty, "A scaling method for priorities in hierarchical structures". *Journal of Mathematical Psychology*, n° 15, pp 234-281, 1977
- [18] B. Roy, "Méthodologie multicritère d'aide à la décision". *Economica*, XXII, Paris, 423 p, 1995.
- [19] K. J. Kouamé, 2007. "Contribution à la gestion intégrée des ressources en eaux (GIRE) du district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution". *Thèse unique de doctorat, Université de Cocody*, 225 p.
- [20] C. Langevin, F. Pernel, T. Pointet, "Aide à la décision en matière de prospection hydrogéologique. L'analyse multicritère au service de l'évaluation du potentiel aquifère, en milieu fissuré (granite de Huelgoat, Finistère, France)". *Hydrogéologie*, n°1, pp. 51-64, 1991.
- [21] L. M. Samman, "Education et sensibilisation aux interrelations entre la dynamique de la population et les besoins en eau". *Congrès international de Kaslik-Liban*, 8 p, 18-20 juin 1998.