

## **Apport de la télédétection et des SIG à l'identification des zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques dans le Département de Téra, Ouest du Niger**

**Issaka BOUBACAR ALI<sup>1\*</sup>, Mahaman Bachir SALEY<sup>2</sup>, Vano Mathunaise SOROKOBY<sup>2</sup>  
et Aimé KOUDOU<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Université Felix Houphouët Boigny, (UFHB), Centre Universitaire de Recherche et d'Application à la Télédétection CURAT), Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Laboratoire Associé Francophone (LAF n° 401), 22 BP 801 Abidjan, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup> *Université Felix Houphouët Boigny, Laboratoire des Sciences du Sol de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG), 22 BP 582 Abidjan, Côte d'Ivoire*

<sup>3</sup> *Université Jean Lorognon Guédé (UJLoG), Laboratoire des Sciences et Technologie de L'Environnement (LSTE) BP 444, Daloa-Tazibouo 2, Côte d'Ivoire*

(Reçu le 10 Février 2022 ; Accepté le 09 Mai 2022)

---

\* Correspondance, courriel : [issakabou@gmail.com](mailto:issakabou@gmail.com)

### **Résumé**

La présente étude a pour objectif d'identifier les zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques productifs, afin de permettre une bonne couverture des besoins en eau de la région et de réduire le taux d'échec des forages. La démarche méthodologique est basée sur les techniques de télédétection et du système d'information géographique pour l'identification des fractures et la cartographie des structures permettant une meilleure connaissance de l'environnement hydrogéologique. Les résultats de l'étude sont la carte de fracturation et la carte des zones favorables à l'implantation de forage de la région. La carte de fracturation validée indique les différentes directions N-S ; E-O ; NE-SO et NO-SE. La combinaison des différents paramètres conditionnant l'existence de réservoirs en milieu de socle dans un SIG, a facilité l'analyse spatiale et a permis d'élaborer la carte de potentialité en eau souterraine. Les différentes zones convenables à l'implantation d'ouvrage à gros débits ont été cartographiées et plus de 102 sites favorables aux futures implantations ont été sélectionnés.

**Mots-clés :** *télédétection, SIG, analyse multicritère, forages hydrauliques, Niger.*

### **Abstract**

**Contribution of remote sensing and GIS to the identification of favorable areas for the establishment of hydraulic borehole in the department of Tera (Western Niger)**

This study aims to identify the favorable zones for water pumping borehole implementation, in order to allow a good coverage of the water needs of the region and to reduce the failure rate of drilling. The methodological

approach is based on remote sensing techniques and geographic information system to identify the cracks and mapping of structures allowing a better knowledge of the hydrogeological environment. The results of the study take into account the cracking map and the map of the favorable locations for drilling in the region. The validated fracturing map shows the different directions N-S; E-W; NE-SW and NW-SE. The combination of the many parameters which reveal the existence of reservoirs in the basement environment in a GIS, allowed the spatial analysis and bring out a map of potential groundwater stock. The suitable areas for the implementation of large water flow were mapped and more than 102 sites suitable for future implementations were noticed.

**Keywords :** *remote sensing, GIS, multi-criteria analysis, boreholes drilling, Niger.*

## 1. Introduction

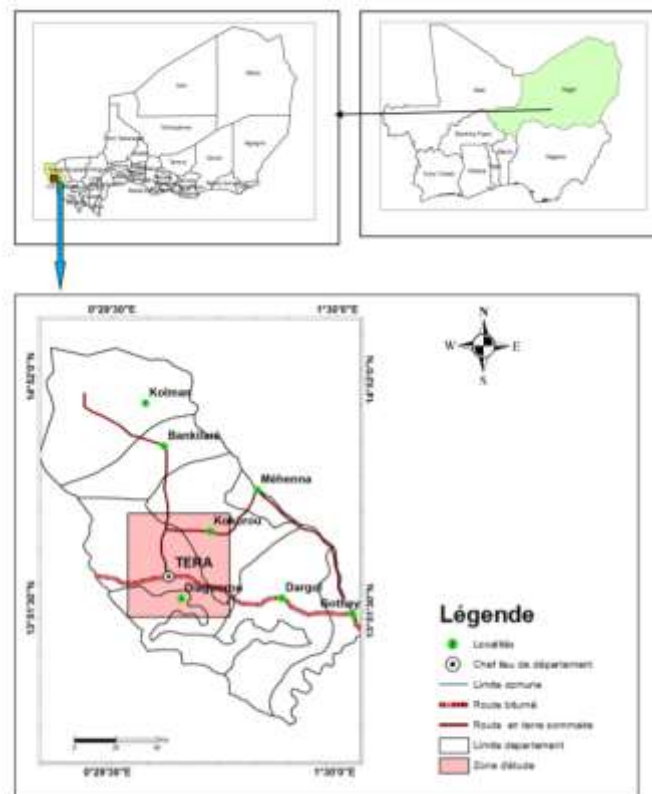
L'eau douce, source de vie, sur terre apparaît comme l'un des problèmes les plus critiques qui se pose à l'humanité en matière de ressources naturelles [1]. Les ressources en eau constituent actuellement, et à l'échelle mondiale, un enjeu de premier ordre pour les grandes institutions internationales [2]. Les pays sahéliens connaissent depuis les années 1970 une dégradation de plus en plus inquiétante, du fait de l'insuffisance et de la mauvaise répartition des pluies dans le temps et dans l'espace [3]. Cette situation a provoqué un assèchement généralisé des cours d'eau et un tarissement de la majorité des puits et forages [4]. La région de Téra, qui constitue la zone d'étude est située dans la partie sud-ouest du Niger sur le socle du Liptako. Cette région est confrontée à un problème d'eau. Le contexte géologique de la région associé au problème climatique, font que cette zone enregistre un faible taux de couverture en eau potable. Les populations de la région manquent du précieux liquide pendant une bonne période de l'année. Les forages au niveau desquels les populations s'approvisionnent ont un débit très faible ( $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$  à  $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$ ) pour plus de 50 % de forages [5]. Cet état de fait cause beaucoup de problèmes aux populations pour l'approvisionnement en eau. En période de saison sèche, tous les forages tarissent. Ainsi, pour faire face au dramatique problème d'eau que vivent les populations de la région de Téra, l'Etat nigérien a décidé d'orienter sa politique d'approvisionnement en eau potable des populations à partir des eaux souterraines, captées au moyen des forages. Cependant, malgré ces efforts louables de l'Etat et de ses différents partenaires au développement, les besoins en eau d'alimentation se posent avec acuité, car 49, 23 % de la population n'a pas encore accès à l'eau potable [6]. L'étude de la qualité des eaux souterraines réalisée [3] montre que 40 % d'ouvrages ont des teneurs en nitrates comprises entre 50 et 690 mg/L (normes OMS 50 mg/L). Pour améliorer la couverture en eau potable de la population, des nouvelles investigations s'imposent pour retrouver des nouveaux points d'eau [7]. Il devient nécessaire de mener des études de télédétection et des SIG qui sont des outils d'aide à la décision afin de localiser les fractures et de cartographier les ressources en eau souterraine. Parmi les techniques visant à optimiser la localisation de nappes d'eau souterraine, les campagnes de terrain avec des mesures aux sols apparaissent comme étant les plus efficaces mais elles s'avèrent coûteuses d'un point de vue financier (matériel de forage, compétences diverses,) et en temps. Les techniques basées sur le traitement d'images de télédétection et l'analyse multicritère offre une alternative intéressante. Elles permettent de cartographier les zones à forte potentialité en eau souterraine pour l'implantation des forages à gros débit. L'objectif de cette étude de relever l'inégale répartition des points d'eau dans le département de Téra 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.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Zone d'étude

La zone d'étude est située dans le département de Téra, comprise entre les coordonnées géographiques latitudes : 13°54' et 14°14' et longitudes, 6°11' et 5°33. Elle couvre une superficie d'environ 2440 km<sup>2</sup> et s'étend sur trois communes du département de Téra à savoir la commune rurale de Diagorou, la commune rurale de Kokorou, et la commune urbaine de Téra (*Figure 1*). Elles sont réparties dans les cinq cantons Téra, Gorouol, Diagorou, Dargol, Kokorou. Il est limité à l'Est par le département de Kollo, à l'Ouest par le Burkina Faso, au Nord par le département de Tillabéry, au Sud par le département de Say. Le climat de la région de Téra est particulièrement aride et caractérisé par deux grandes saisons distinctes : une saison pluvieuse de juin à septembre et une saison sèche d'octobre à mai. Deux principaux vents soufflent au cours de l'année [8] :

- L'harmattan, un alizé continental très sec, qui souffle du Nord-est au Sud-ouest, d'octobre à février ;
- La mousson, chargée d'humidité qui souffle du Sud-ouest au Nord-est de mars à septembre, est générateur de pluies.



**Figure 1** : Localisation de la zone d'étude

### 2-2. Matériel

#### 2-2-1. Données images

Dans le cadre d'un projet 2144 data de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), pour l'étude des potentialités minières et hydrogéologiques de l'Afrique centrale et de l'ouest : Cameroun, Tchad et du Niger, le CURAT a

bénéficié des scènes d'images Radar du satellite ALOS PALSAR. Ces images ont été remises à notre disposition. Deux scènes d'images radar PALAR en bande L en orbite ascendant, couvrant la région de Téra a été utilisées. Le **Tableau 1** présente les différentes caractéristiques des données images radar PALSAR de l'étude.

**Tableau 1 : Caractéristiques des données Radar PALSAR**

Produits	Identifiant scène	Acquisition	Niveau	Résolution	Mode
Scène 1	ALPSRP122950260	20015-05-15	1,5	20 m	HV
Scène 2	ALPSRP122950270	20015-05-15	1,5	20 m	HV

### 2-2-2. Données cartographiques

Pour cette étude, nous avons utilisé une carte géologique du Niger 1/200000 [9]. Cette carte a permis d'extraire la géologie de la région de Téra. Une carte structurale [3] est utilisée pour la validation de la carte de fracturation de notre zone d'étude.

### 2-2-3. Données hydrauliques

Les données hydrauliques provenant de la direction de l'hydraulique du Niger concernent les fiches techniques des forages (au nombre de 193) réalisés dans la région de Téra de la période 1982-20015. Ces fiches fournissent de précieuses informations relatives à l'épaisseur d'altération, aux débits d'exploitation, à la profondeur des forages, aux niveaux statiques etc.

## 2-3. Méthodes

### 2-3-1. Réduction du chatoiement ou speckle

Le chatoiement correspond à un fort bruit multiplicatif, né d'un nombre élevé d'interférences de répartition spatiale désordonnées des réponses, de très nombreuses micro-cibles. Sa présence dégrade la qualité de l'image, réduisant ainsi la possibilité de discriminer les structures fines. Le filtrage du speckle a pour but de supprimer le bruit et augmenter la lisibilité de l'image. A cet effet, les filtres les plus efficaces sont les filtres adaptatifs, dont le fonctionnement est adapté aux variations spatiales du signal, en utilisant les statistiques locales du signal bruité. Les filtres Lee, Frost, et Sigma ont été utilisés dans cette étude parce qu'ayant donné les meilleurs résultats [10, 11]. Il est donc difficile de déterminer l'image la mieux débruitée pour la suite des traitements. Pour ce faire, nous avons procédé à l'analyse des coefficients de variation (C) pour évaluer l'efficacité du filtrage à partir de *l'Équation 1*.

$$C = \frac{\delta}{m} \quad (1)$$

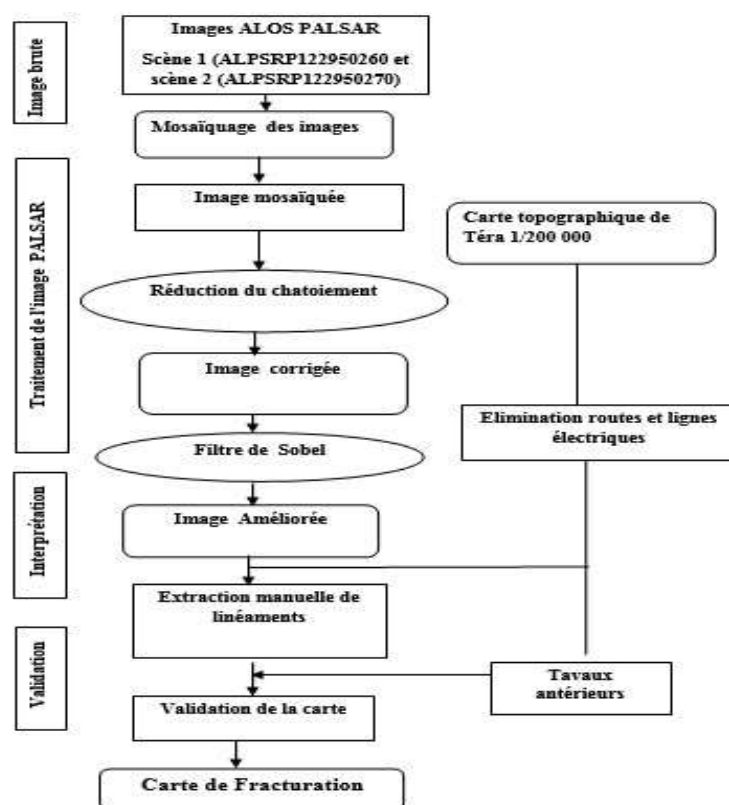
$\delta$  et  $m$  représentent respectivement l'écart type et la moyenne de la distribution de l'image.

### 2-3-2. Mosaïquage

Le mosaïquage est une technique qui consiste à juxtaposer deux ou plusieurs images en vue d'obtenir une seule image. Cette technique est utilisée lorsque le secteur d'étude ne tient pas sur une seule image. Dans ce travail, nous avons utilisé deux images PALSAR/ALOS ont été mosaiquée. Le mosaïquage a été fait à l'aide du logiciel Envi 5.3

### 2-3-3. Cartographie linéamentaire

L'extraction des linéaments peut se faire automatiquement par utilisation d'un algorithme mathématique [12]. Mais dans cette étude nous avons utilisé l'approche par interprétation visuelle après accentuation des discontinuités [13, 14] a été utilisée pour extraction des linéaments de la zone d'étude. L'extraction manuelle des discontinuités images a été réalisée sur l'image Radar PALSAR à issu du filtrage directionnel de Sobel. Ce tracé des segments (linéaments) se fait directement sur l'écran en procédant à la fois à des grossissements localisés pour les structures difficilement observables. Cette opération met en œuvre à la fois les capacités d'observation et de raisonnement du photo-interprète, mais elle demande aussi, une bonne connaissance de la région [3]. La méthodologie d'extraction des linéaments est présentée à la **Figure 2**.



**Figure 2 :** Organigramme de traitement d'image et d'extraction des linéaments

#### 2-3-3-1. Filtres directionnels de Sobel

Dans la présente étude, les filtres directionnels de Sobel (de types  $7 \times 7$ ) ont été utilisés pour identifier les linéaments, parce qu'ils permettent de mieux les discriminer, afin de cartographier l'essentiel des linéaments de la région de Téra. 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 [15]. Les filtres directionnels de Sobel accentuent les discontinuités lithologiques et structurales dans les quatre directions N-S ; NE-SO ; NO-SE ; E-O (**Tableau 2**) [16]. 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

**Tableau 2 : Filtrés directionnels de Sobel (matrice 7 x 7)**

N - S						
1	2	3	4	3	2	1
2	3	4	5	4	3	2
3	4	5	6	5	4	3
0	0	0	0	0	0	0
-6	-4	-5	-6	-5	-4	-3
-2	-3	-4	-5	-4	-3	-2
-1	-2	-3	-4	-1	-2	-1

E - O						
1	2	3	0	-3	-2	-1
2	3	4	0	-4	-3	-2
3	4	5	0	-5	-4	-3
4	5	6	0	-6	-5	-4
3	4	5	0	-5	-4	-1
2	3	4	0	-4	-3	-2
1	2	3	0	-3	-2	-1

NO - SE						
4	3	3	2	2	1	0
3	5	4	4	3	0	-1
3	4	6	5	0	2	-2
2	4	5	0	0	-3	-2
2	3	0	-5	-3	-4	-3
1	0	-3	-4	-2	-5	-3
0	-1	-2	-2	-1	-3	-4

NE - SO						
0	1	2	2	3	3	4
-1	0	3	4	4	5	3
-2	-3	0	5	6	4	3
-2	-4	-5	0	5	4	2
-3	-4	-6	-5	0	3	2
-3	-5	-4	-4	-3	0	1
-4	-3	-3	-2	-2	-1	0

### 2-3-3-2. 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 [9] à 1/200 000, des cartes linéamentaires [4]. 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 Téra. La démarche a consisté à identifier et à répertorier toutes les fractures 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, 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 [17, 18].

### 2-3-4. Cartographie thématique des ressources et besoin d'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.

#### 2-3-4-1. Identification des critères de décision

Un certain nombre de critères a été identifié, pour l'établissement des différentes cartes thématiques des ressources en eau [19, 20]. Ces critères sont la pente (%), la densité du réseau hydrographique (m), l'épaisseur d'altération (m), la densité de fracturation (km/km<sup>2</sup>), la recharge efficace (mm), la probabilité de réussite (%), la profondeur totale (m), le débit d'exploitation (m<sup>3</sup>/h) et le niveau statique (m)

#### 2-3-4-2. Classification et standardisation des critères

La classification des différents critères s'est faite en tenant compte des études antérieures réalisées [21]. 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 Arcgis 10.5 Les polygones tels que la pente a été exporté sous format raster à partir du logiciel Envi 5.3 et convertis en « grid » sur Arcgis 10.5 pour faciliter la combinaison. Les polygones telles que la densité de drainage a été convertie en points sur le logiciel LinWin 2.0 et exportées sur Arcgis 10.5 pour leur interpolation. Les différentes surfaces obtenues à la suite de ces opérations ont été réparties en cinq classes comme l'indique le **Tableau 3**.

**Tableau 3 :** *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

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. Ces notes dépendent aussi de la qualité du facteur. A titre d'exemple, c'est le cas de l'indice de succès, qui a 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 4**).

**Tableau 4 :** *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

### 2-3-4-3. Pondération des facteurs d'appréciation

Elle s'est faite à partir de la méthode des comparaisons par paire développée dans le cadre du processus d'analyse hiérarchique (Analytical Hierarchy Process), [22, 23]. Elle permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1 (**Tableau 5**). Ainsi la combinaison obtenue avec cette méthode est estimée de la façon suivante **Équation 2**:

$$S = \sum W_i X_i \tag{2}$$

*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'altérité 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.

**Tableau 5 : Attribution de poids aux différents critères selon la nature de la carte**

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

#### 2-3-4-4. Conception de la carte de la couverture des besoins en eau potable de Téra

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, recensé le nombre de point d'eau existant et fonctionnel dans chaque localité a été recensé. A ces données, ont été ajoutée 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

#### 3-1. Mosaique des images ALOS PALSAR

La zone d'étude est répartie entre les scènes (ALPSRP122950260 et ALPSRP122950270). La mosaique de celles-ci a permis l'extraction de la zone d'étude (*Figure 3*).



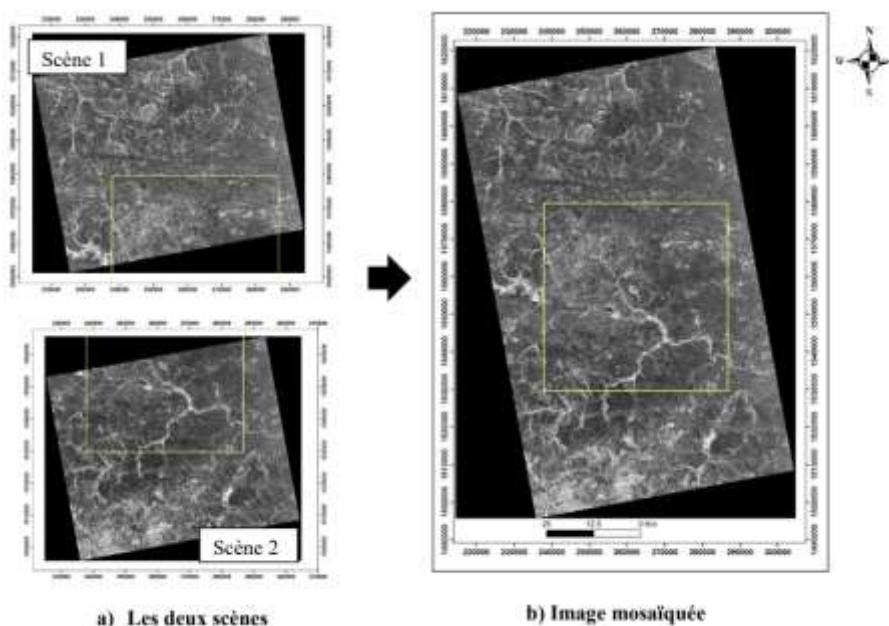


Figure 3 : Mosaïquage des deux images Radar PALSAR /ALOS

### 3-2. Réduction du chatoiement sur les l'image ALOS PALSAR

Le **Tableau 6** présente l'évaluation statistique de la réduction du chatoiement des filtrages adaptifs sur l'image Radar PALSAR de la zone d'étude. L'analyse du résultat de l'application des filtres adaptatifs montre que la réduction du chatoiement dans les images Radar PALSAR est liée à la taille du filtre. Plus la taille du filtre augmente, plus la réduction du chatoiement est importante et devient claire.

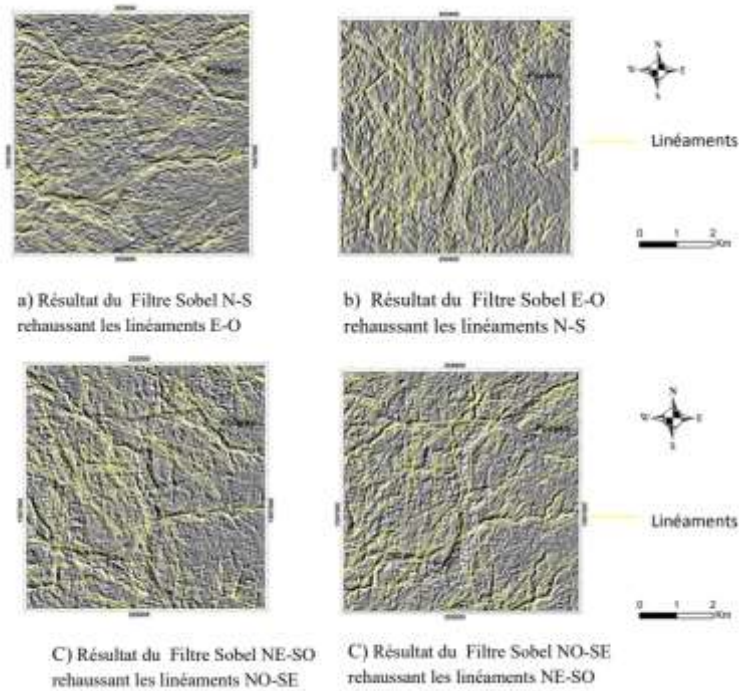
Tableau 6 : Coefficient de variation de l'image

Filtre spatiale	Taille matrice	Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation (CV)
Image originale	3X3	68,65	54,51	0,79
LEE	3X3	67,84	34,49	0,60
	7X7	68,14	51,60	0,50
SIGMA	3X3	67,95	48,75	0,75
	7X7	67,95	48,75	0,71
FROST	3X3	65,10	48,75	0,69
	7X7	68,57	44,54	0,64

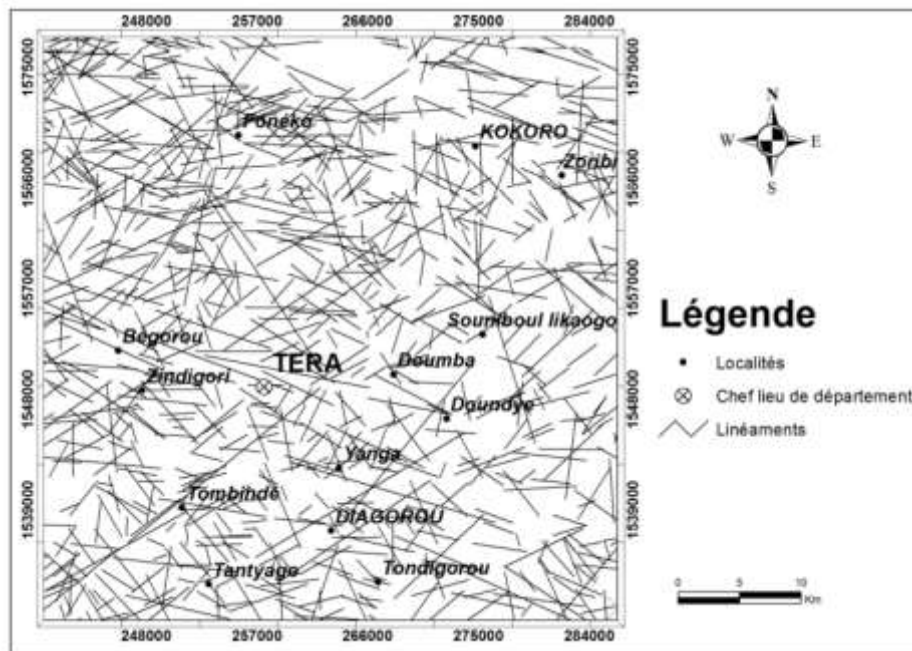
### 3-3. Cartographie des linéaments structuraux

La **Figure 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. Le relevé de toutes les discontinuités images sur l'ensemble des images traitées (à l'exception des routes, des lignes de haute tension etc.) a permis de dresser la carte des linéaments détaillés de la zone d'étude (**Figure 5**). 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. La **Figure 6** présente la carte de synthèse des accidents majeurs de Téra, établie à partir des images PALSAR ALOS. Ces accidents appartiennent pour la plupart aux directions suivantes : N-S, E-O, NE-SO, et NO-SE.



**Figure 4 :** Filtre directionnels de Sobel 7 X 7



**Figure 5 :** Carte de fracturation détaillée de la zone d'étude

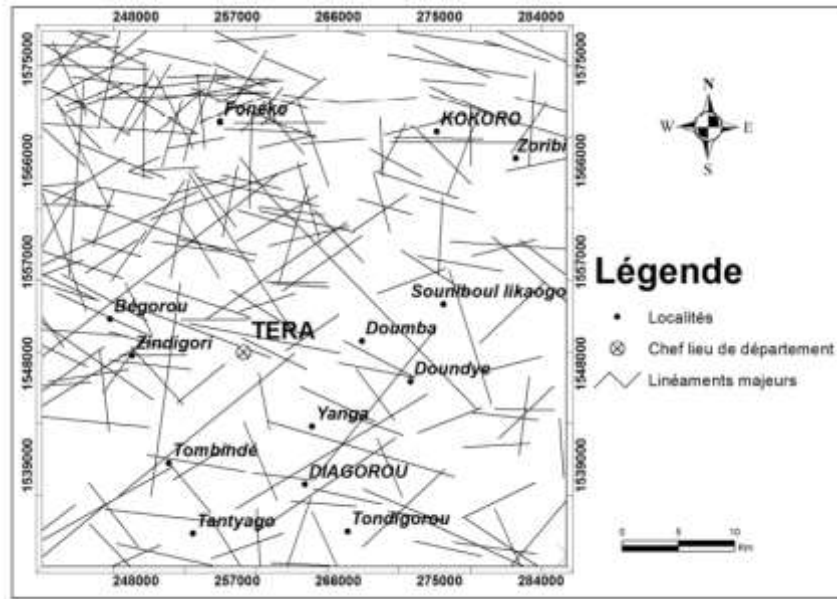


Figure 6 : Carte de fractures majeures de la région de Téra

**3-3-1. 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. Il s'établit plus ou moins une similitude entre les linéaments identifiés sur la région de Téra et les fractures majeures mises en évidence sur la zone. Les principales directions qui ressortent de la rosace des fractures (Figure 7a) de la zone d'étude sont : NS-10, N30-40, N60-70, N50-60, N60-70, N70-80, N100-110, N110-120, N130-150 N160-170 et Les principales directions des fractures majeures provenant de la carte de Abdou, 2012 (Figure 7b) sont : N50-60 N70- N80, N100- N120. La correspondance effective des fractures majeures d'orientation N50-N60 et N100-120 illustrent bien la concordance des résultats provenant des deux supports. Toutefois, certains linéaments se croisent et d'autres ne coïncident pas. Cette importante phase de validation montre que les linéaments extraits correspondent aux fractures de la région de Téra.

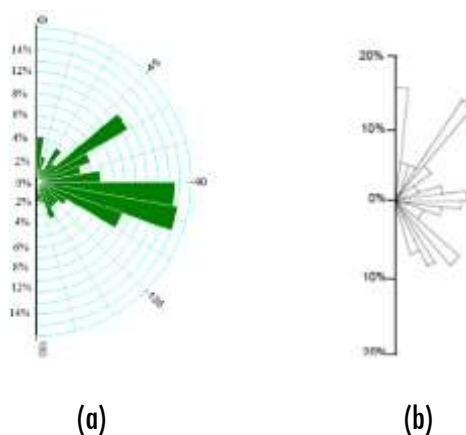
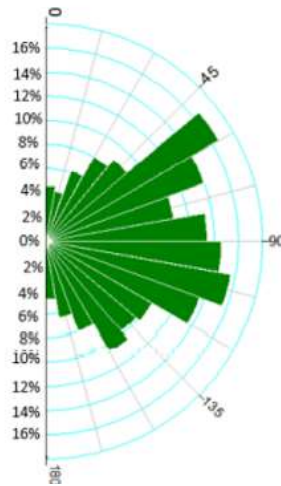


Figure 7 : Distribution des directions des fractures majeures relevées sur l'image (a) et Distribution des directions des fractures relevées à l'affleurement [4] (b)

### 3-3-2. Analyse statistique des linéaments

La **Figure 8** présente la distribution des principales directions des linéaments exprimées en pourcentage de nombre des linéaments et en longueurs cumulées. La rosace directionnelle montre une distribution relativement hétérogène des principales directions observées. L'analyse rosace directionnelle des fractures en nombre montre que lorsque les proportions sont supérieures à 10 % nous avons une direction majeure. Les directions secondaires correspondent à 8 % et 12 %. Les autres directions dites mineures présentent des proportions variant entre 1 et 6 %.



**Figure 8 :** Rosace directionnelle des linéaments en nombre  $N = 1200$

### 3-4. Cartographie thématique des ressources en eau

#### 3-4-1. Accessibilité aux ressources en eau souterraine

La carte d'accessibilité de la zone d'étude est présentée par la **Figure 9**. Elle présente quatre classes d'accessibilité de superficie variable. La classe d'accessibilité mauvaise représente 22 % de la superficie de la zone d'étude et se localise au Nord-est, Nord-ouest et Sud-ouest du territoire dans les localités de Zobori et Tombidé. Elle est caractérisée par une faible probabilité de succès (débit très faible) et une profondeur forte. La classe d'accessibilité médiocre et représente 36 % de la superficie de la zone d'étude. La classe d'accessibilité bonne à excellente occupe 42 % et se localise au centre dans les localités de Dumbia et Diagorou au Sud-ouest de la zone d'étude. Cela traduit les bonnes conditions d'accessibilité aux ressources en eau souterraine sur toute la zone d'étude.

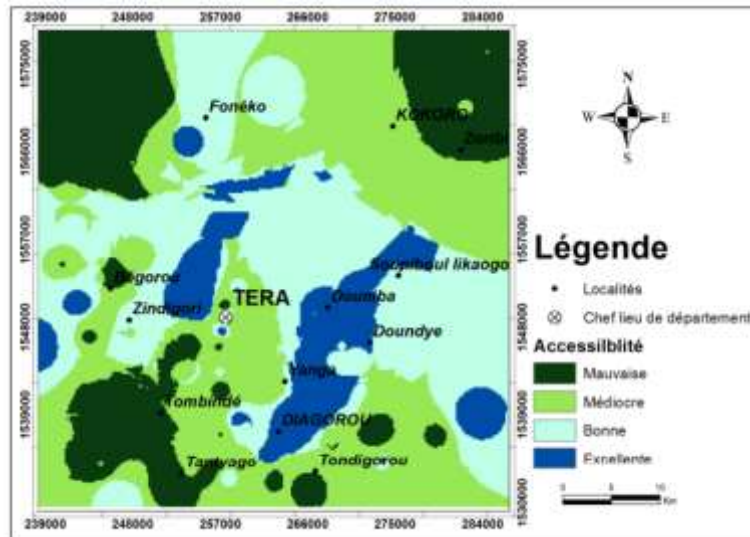


Figure 9 : Carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine

### 3-4-2. Exploitableté des ressources en eau

La carte d'exploitation des ressources en eau souterraine est présentée à la **Figure 10**. Elle est caractérisée par quatre classes de superficie variable. La classe d'exploitableté mauvaise représente 22,52 % de la superficie de la zone d'étude. Ces zones d'exploitableté mauvaise regroupent les secteurs où les ressources ne sont généralement pas exploitables bien qu'elles soient probablement disponibles. Elles sont caractérisées par des débits d'exploitation très faibles. La classe d'exploitableté bonne à excellente représente 41,48 %, et se caractérise sous forme de plage un peu partout sur la zone d'étude. Ces zones constituent les domaines favorables à l'approvisionnement en eau potable. Les classes médiocres représentent 36 %. Ce sont des zones à très faible densité de fracturation et de forte densité de drainage et la disponibilité en eau est légèrement meilleure.

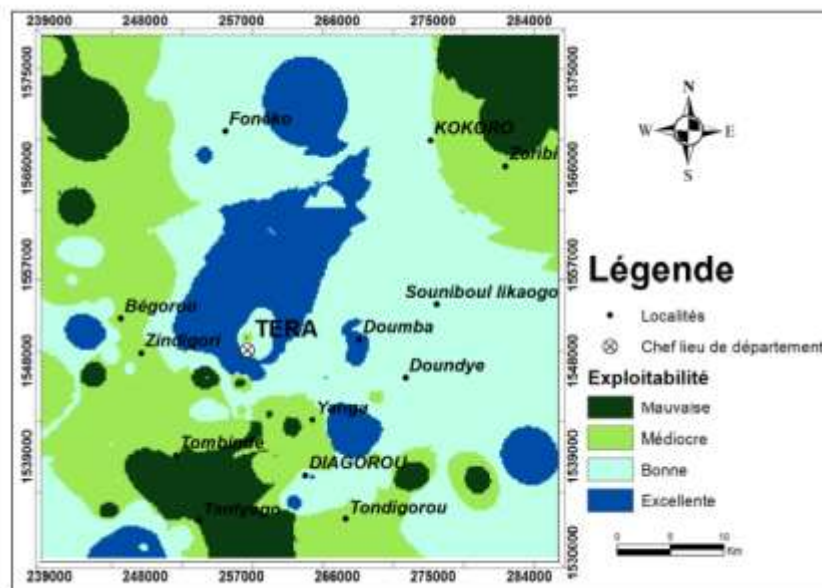


Figure 10 : Carte d'exploitableté des ressources en eau souterraine

### 3-4-3. Potentialité en ressources en eau souterraine

La carte de potentialité en eau souterraine de la région de Téra est présentée à la **Figure 11**. La carte de potentialité en eau souterraine met en relief les facteurs potentiels susceptibles de révéler la présence de l'eau souterraine dans un aquifère. Cette carte est caractérisée par quatre classes de potentialité, mauvaise, médiocre, bonne et excellente. La classe de potentialité mauvaise : représente 14 % de la superficie de la zone d'étude et se localise au Nord-ouest et au Nord-est du territoire dans les localités de Fenéko et Bégori. Ces zones sont caractérisées par une faible densité de fracturation, une faible recharge de la nappe et une forte pente. La classe de potentialité médiocre couvre 33 % de la zone d'étude. Elle se localise partout sur le territoire sous forme de petite plage. Ces zones sont défavorables à l'implantation des points d'eau. La classe de potentialité bonne représente 37 % du territoire. Elle est répartie sur l'ensemble de la zone d'étude. Ces zones sont favorables à l'implantation des forages. La classe de potentialité excellente est la plus importante, elle couvre 16 % de la superficie du territoire. Elle se localise au Centre de la zone d'étude. Ces zones sont caractérisées par une faible pente, une forte densité de fracturation, et une forte recharge de la nappe. Ces zones sont très favorables à l'approvisionnement en eau potable.

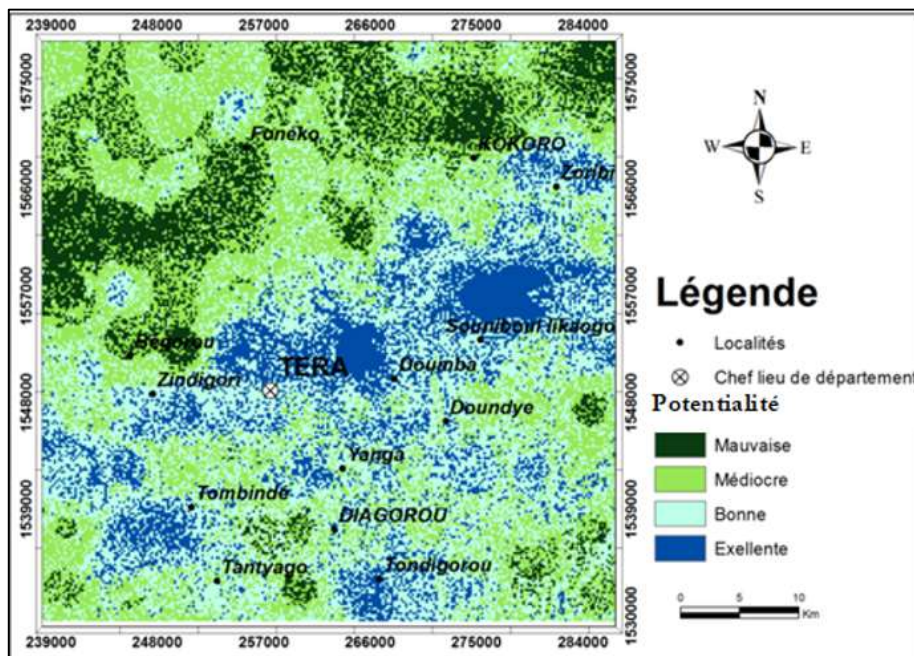


Figure 11 : Carte de potentialité en eau souterraine de la région de Téra

### 3-4-5. Zones potentielles d'implantation des points d'eau

La combinaison des trois indicateurs que sont la disponibilité, l'exploitabilité et l'accessibilité a permis de produire la carte thématique des zones d'implantation (**Figure 12**). La carte des zones d'implantations potentielle réalisée présente les intersections des méga fractures à proximité des localités. Ce sont des éléments qui devraient aider à l'identification des sites favorables pour implanter des forages à gros débits. En effet plus de 102 sites favorables ont été cartographiés et seront susceptibles de fournir de gros débits. 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). Ces zones seront les plus visés lors des campagnes d'hydraulique. 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.

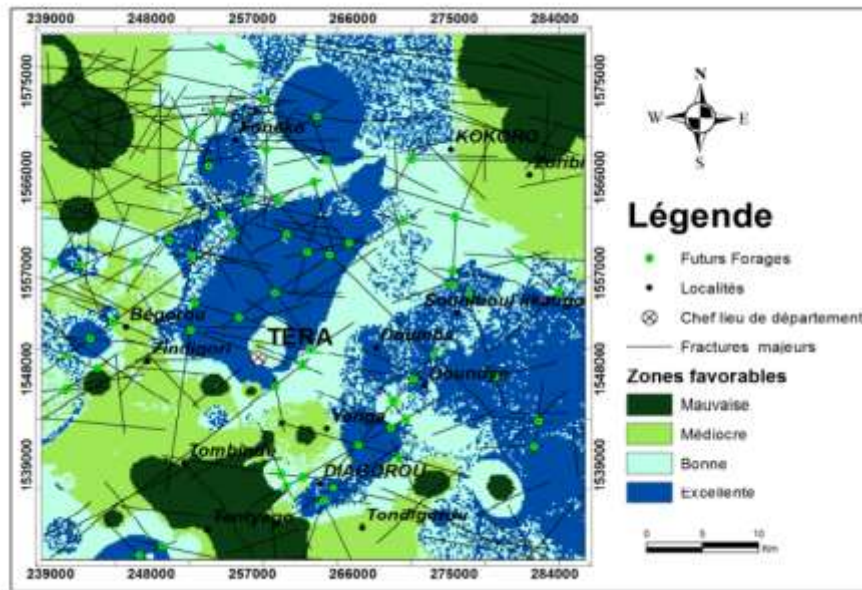


Figure 12 : Carte des sites favorables à l'implantation des forages à gros débits

#### 4. Discussion

Cette étude a permis de montrer la bonne concordance entre les différents forages productifs et les linéaments cartographiés par les images Radar PALSAR. La carte des linéaments de Téra est le résultat de plusieurs traitements effectués sur les images Radar PALSAR de la zone. Les traits structuraux majeurs et les morphostructures détectées sur les images correspondent à des accidents véritables qui affectent le socle de Téra. Ces résultats sont conformes aux travaux de [4] qui confirment la fracturation de Terra. La similarité entre les rosaces directionnelles des linéaments avec les rosaces directionnelles des données des études antérieures [4], confirment bel et bien que ces linéaments correspondent à des fractures tectoniques comme le suggère [25, 26]. 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. En effet, les travaux antérieurs [13, 21] ont montré que l'utilisation de la carte de forages à gros débits est plus judicieuse et efficace pour la validation des linéaments. Plusieurs travaux [1, 11, 20] ont montré que les forages les plus productifs se trouvaient proches ou à l'intersection de fractures. L'utilisation de la télédétection, du SIG et de l'analyse multicritère dans le département de Téra 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 [1, 13, 14], et la sélection de meilleurs sites de stockages [27, 28]. La région de Téra possède une bonne disponibilité en eau souterraine (52 % 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 [29]. Ainsi, la carte hydrogéologique obtenue à terra 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'altérité, débits, fracturations, densité de drainage). 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.

## 5. Conclusion

Les images Radar PALSAR ont permis la cartographie des réservoirs d'eau du département de Téra. Ainsi a été élaborée la carte de fracturation. La méthodologie mise en place de cette étude a permis d'atteindre les objectifs fixés et d'obtenir des résultats fiables. Les différents traitements effectués sur l'image Radar PALSAR ont permis de cartographier des réservoirs d'eau du département de Téra. Cette carte fait ressortir les principales directions de la zone d'étude qui sont les directions N 0-10 (4 %), N50-60 (14 %) et N90-100 (16 %). On note également la présence des linéaments de direction N20-30 (6 %), N30-40 (7 %) et N70-80 (12 %). La validation des linéaments structuraux est effectuée à l'aide des données auxiliaires disponibles (cartes géologique, données de forages existants). L'identification des potentialités en eau souterraine de département de Téra a été effective par l'usage de la télédétection, de l'analyse multicritère et d'un SIG. Les aquifères de la région de Téra regorgent d'importantes ressources d'eau souterraine. Plus de 54 % de la zone d'étude présente une excellente à bonne disponibilité en eau souterraine. La classe bonne à excellente donnent 64 % des zones d'implantations potentielles de la zone. Les différentes zones convenables à l'implantation d'ouvrage à gros débits ont été cartographiées et plus de 152 sites favorables aux futures implantations ont été sélectionnés.

## Références

- [1] - 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, (2003) 209 p.
- [2] - M. V. SOROKOBY, "L'étude hydrologique et hydrogéologique de la région de Soubré (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique", Thèse unique de doctorat, université de Cocody, (2013) 187 p.
- [3] - J. ALBERGEL, "Fonctionnement hydrologique des bas-fonds Synthèse préliminaire ORSTOM ". in ZEPPEFELDT et VLAAR-CIEH, 1990 : Mise en valeur des bas-fonds, (1988) 28 p.
- [4] - B. ABDOU, "Evaluation des ressources en eau de bassin de Dargol (Liptako-nigérien)", Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, Université de Liège, (2012) 244 p.
- [5] - B. OUSMANE, S. DJIBO, I. SOUMANA, et A. SOUSSOU, "Étude préliminaire de la pollution bactériologique des eaux des aquifères discontinus du socle du département de Téra /Liptako nigérien", *Afrique Science*, Vol. 6, N°3 (2010) 27 - 36
- [6] - MHE, "Atlas des ressources hydrauliques du département de Tillabéri, Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement de la république du Niger", Niamey, Niger, (2013)
- [7] - T. V. ASSOMA, "Variabilité hydroclimatique et évaluation des ressources en eau du bassin côtier de l'Agneby au Sud-est de Cote d'Ivoire : Apport des outils statistiques de la modélisation de la télédétection optique et radar", Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, (2013) 224 p.
- [8] - SAADOU, "La végétation des milieux drainés Nigériens à l'est du fleuve Niger", Thèse de doctorat Université de Niamey, Niger, (1990) 393 p.
- [9] - MACHENS, "Notice explicative sur la carte géologique du Liptako à l'échelle du 1/2 000 000. Ministère des Travaux publics, des Transports, des Mines et de l'Urbanisme de la république du Niger", BRGM Paris, France, (1964)
- [10] - V. T. ASSOMA, K. K. FERNAND, J. P. RUDANT, BIEMI, "Réduction du chatoiement et apport des données ASAR ENVISAT et MNE SRTM à la cartographie hydrostructurale du bassin côtier de l'agneby (Sud-Est



- de la Côte d'Ivoire)", *Photointerprétation European journal of applied remote sensing*, Vol. 47, N° 2011/4 (2012) 120 p.
- [11] - KOUAME, "Apport de la fusion d'image optique et Radar par analyse multi résolution et transformation en ondelettes à la cartographie des unités géologiques et structurales du socle précambrien de l'Afrique de l'Ouest : Cas du degré carré de Korhogo au Nord de la Cote d'Ivoire ", Thèse de Doctorat, Université Cocody, (2013) 251 p.
- [12] - G. C. ADON, S. OULARE, K. A. KOUAME, M. B. SALEY et K. F. KOUAMEY, "Extraction automatique des linéaments à l'aide d'images satellitaires optique et radar en milieu de socle précambrien (Haute Marahoué, Côte d'Ivoire)", *Int. J. Eng. Sci. Invent. IJESI*, 8 (01) (2019) 24 - 32
- [13] - M. V. SORAKOBY, M. B. SALEY, K. F. KOUAME, E. V. DJAGOUA et J. BIEMI, "Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubre-Meagui (sud-ouest de la côte d'ivoire) : contribution à la gestion des ressources en eau souterraine", *Revue Télédétection*, Vol. 9, N°3 - 4 (2010) 209 - 223
- [14] - A. KOUDOU, F. F. KOUAME KOUAME, TA. YOUAN, M. B. SALEY, J. P. JOURDA et J. BIEMI, "Contribution des données ETM+ de Landsat, de l'Analyse Multicritère et d'un SIG à l'identification de secteurs à potentialité aquifère en zone de socle du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire)", *Photo-Interpretation European Journal of Applied Remote Sensing*, N°2010/3- 4, Vol. 46, (2010) 98 - 115
- [15] - S. HIMYARI, C. HOEPFFNER, M. BENZAKAROUR, D. E. HADANI, "Etude structurale du haut atlas oriental (Maroc) à l'aide de l'analyse linéamentaire des images HRV (XS) de Spot", *Télédétection*, Vol. 2, N°4 (2002) 243 - 253
- [16] - TA YOUAN, "Contribution de la Télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques à la prospection Hydrogéologique sur le socle Précambrien d'Afrique de l'Ouest : Cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire)", Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan, (2008) 237 p.
- [17] - J. BIEMI, S. DESLANDES, Q. H. J. GWVN, P. J. 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", *Télédétection et Gestions des Ressources*, Vol. 7, (1991) 41 - 49
- [18] - J. P. JOURDA, M. B. SALEY, E. V. DJAGOUA, K. KOUAME, J. BIEMI et 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 de Télédétection*, Vol. 5, N° 4 (2006) 339 - 357
- [19] - I. HENTATI, M. ZAJIRI, H. B. DAHIA, "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)
- [20] - 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, (1997) 396 p.
- [21] - 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, (2005) 430 p.
- [22] - 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, (2003) 300 p.

- [23] - P. BRUNNER, H-J. HENDRICKS FRANSSEN, L. KGOTLHANG, P. BAUER-GOTTWEIN and W. KINZELBACH, "How can remote sensing contribute in groundwater modeling", *Hydrogeology Journal*, 15 (1) (2007) 5 - 18
- [24] - A. SOUMANA, "Étude structurale, pétrographique et géochimique de la ceinture de Diagorou-Darbani, Liptako, Niger occidental (Afrique de l'Ouest)", Thèse de l'Université de Franche-Comté, (2000) 253 p.
- [25] - MACHENS, "Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la République du Niger", Mémoire BRGM, N° 82 (1973) 167 p.
- [26] - K. F. KOUAME "Hydrogéologie des régions de Montagne : apports des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané", Thèse de l'Université, Université de Cocody d'Abidjan, (1999) 215 p.
- [27] - N. HAMMAD, "Cartographie géologique et analyse linéamentaire de la région d'El Kseibat (Sahara du sud-ouest) à partir des images spatiales. Incidence sur l'exploration minière", Thèse de doctorat, Université KASDI MERBAH - OUARGLA, (2016) 228 p.
- [28] - K. J. Kouamé, "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*, (2007) 225 p.
- [29] - 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 (1991) 51 - 64