#### **Chapitre II : APPORT DE LA TELEDETECTION A L'HYDROGEOLOGIE**

Ce chapitre présente l'intérêt de la télédétection, ou encore du traitement d'imagessatellitales, à l'étude hydrogéologique. La présence des fractures et des microfailles sera vérifié après la détermination des réseaux de linéaments. Un réseau de linéaments dense favorise l'infiltration des eaux de surface jusqu'à la nappe phréatique et indique une zone à forte potentialités en eaux souterraines.

#### **II-1 APPLICATION DE LA TELEDETECTION**

La télédétection a été largement utilisée dans différents domaines d'application. Le développement de la télédétection dans le domaine de l'eau s'est interposé entre 1978 et 1982 par le développement du programme SPOT et par l'achèvement de la mission de l'Opération Pilote Interministériellede Télédétection (PIEYNS S., 1996).Nombreux sont les publications et manuscrits de mémoire de fin d'étude ou de thèse de doctorat concernant l'utilisation de la télédétection à la cartographie géologique, à l'étude de l'occupation de sol ou à l'analyse des réseaux de fractures. On peut citer parmi eux le travail de Youan Taen2009 sur la cartographie des accidents géologiques par l'imagerie satellitalleLandsat 7 ETM+ et l'analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (nord-est de la Cote d'Ivoire); il y avait aussi d'autres chercheurs qui ont mis en évidence l'importance de la télédétection à la cartographie des réseaux de linéaments et de fractures (Garo Joelson 2012, Emmanuel Konan Kouadio 2008, K. Amri Novembre 2009, S. Djemai Novembre 2009) ou encore à la mise en évidence de la zone de contact entre deux formations géologiques différentes (Inzana 2003).

# **II-2 DONNEES ET OUTILS D'INTERPRETATION**

Les bases de données cartographiques utilisées pour cette étude comporte une carte topographique au 1/100.000ème, une carte géologique. On a utilisé aussi les images satellitalesLandsat 7 ETM+ de l'USGS (United States Geological Survey) acquises le 12 Mai 2000 et correspondant au début de la saison sèche, caractérisée par une quasi-absence de nuages (Cf. figure 12). Ces images satellitales ont été choisies du fait de leurs caractéristiques spectrales et spatiales permettant une bonne cartographie structurale à petite échelle. Il s'agit des bandes ETM+1 (bleu), ETM+2 (vert) ETM+3 (rouge), ETM+4 (proche infrarouge), ETM+5 (infrarouge moyen), ETM+7(infrarouge lointain) toutes avec des pixels carrés de 30 m.Le traitement de ces images a été fait à l'aide du logiciel ENVI 4.5. Après ce traitement, le traçage manuel des linéaments (nombre et orientation) a été établi à l'aide du logiciel ArcGIS version 10.0.



Figure 12: Image Landsat7 ETM+, source USGS (U.S Geological Survey) - FTM

# II-3 ANALYSE SPATIALE ET CARTOGRAPHIE DES RESEAUX DES LINEAMENTS

La phase préliminaire de traitement d'images consiste à couper l'image afin d'avoir une image correspondant uniquement à la zone d'étude. Ensuite, on a fait le filtrage spatial directionnel pour le rehaussement des images dans le but d'éliminer les bruits radiométriques dans les bandes ETM+.

Des techniques d'analyses et de traitements, déduites des études précédentes des chercheurs cités au paragraphe II-1 du Chapitre II, ont été appliquées surles bandes ETM+. Les méthodes appliquées par ces chercheurs ont été retenues car le contexte (géologie, géographie) de leur zone d'étude est plus ou moins similaire au notre. Plusieurs opérations mathématiques sur les bandes ETM+ ont été faites (band ratio, composition colorée) et filtrage des bandes ETM+ (filtre directionnel, filtre de Sobel, etc,...). L'objectif est de trouver des images montrant une bonne vision des linéaments. Après plusieurs essais, les réponses obtenues ont montré que la composition colorée TM5/TM7, TM5/TM1, TM5/TM4en RVB et aussi la composition colorée TM7, TM4, TM2 en RVB donne des résultats satisfaisants pour la cartographie des linéaments. La composition colorée 321 donnant l'image en couleur réelle et la bande 7 en niveau de gris ont aidé à améliorer la qualité d'identification des linéaments.



La figure 13 ci-dessous montre les images obtenues après les traitements des images et des applications des compositions colorées.

Figure13 : Les résultats obtenus après différents traitements des images

Les résultats obtenus ont permis, à terme, de ressortir les caractéristiques du réseau de fractures, à savoir, le nombre, la longueur, et l'orientation de fracturation.

# **II-4 RESULTATS ET INTERPRETATION**

Après le traitement d'image, les résultats obtenus ont été utilisés pour cartographier les linéaments de la zone d'étude. On a trouvé au total 331 linéaments caractérisés par leurs directions, leurs longueurs, et leur fréquences. La carte de linéaments de la zone d'étude est montrée ci-dessous



Figure 14 : Carte des linéaments de la zone d'étude tracés manuellement

La carte (figure 14) obtenue après les divers traitements compte environ 331 linéaments de tailles variables variant de 233m à 13418m avec une longueur moyenne de 1699m. La longueur totale des linéaments cartographiés sur la zone d'étude est environ égale à 562489m. Les linéaments les plus importants suivent généralement la direction N-S à NNE-SSW et la direction WSE-ENE dans la partie Est de la zone. Les linéaments les plus importants mesurent environ 91011 m. Statistiquement, 2,41% des linéaments ont une longueursupérieure à 5000m et 94,56% ont une longueur inférieure à 3500m. Il est donc évident que les petites fractures sont les plus nombreuses.

Les linéaments sont regroupés selon leur orientation en 18 classes d'orientation par croissant angulaire de 10 degrés. La fréquence et la densité des fractures par classe d'orientation ont été calculées. Les rosaces directionnelles de la fracturation exprimée en nombre (N = 331) et en longueur cumulée sont représentées à la figure 9a et 9b. L'histogramme circulaire de la fracturation présente un double intérêt. Il permet de faire ressortir les maxima directionnels, d'une part, et de réaliser une étude comparative des intensités relatives de chaque famille, d'autre part. Etudier l'orientation des fractures revient donc à distinguer les différentes familles de fractures caractérisées par une densité de fracturation en nombre et en longueur cumulée.

La distribution de la fracturation sur la rosace directionnelle est presque homogène. En effet, aucune famille de fractures ne dépasse les 13 % en fréquence. Les fréquences oscillent entre 1,51% et 12,08% %. Cependant certaines familles se démarquent de l'ensemble avec des fréquences proches et supérieur à 10%. Il s'agit des familles de fractures N0-10, N100-110,et N150-160 et dans une certaine mesure N120-130 dont la fréquence est de 7,25%. Ces familles de fractures peuvent être regroupées en deux grandes familles principales qui sont : NNW-SSW (N0-10) et WNW-ESE (N100-160). La première correspond à la direction des foliations des différentes formations qui sont généralement de direction N-S. La seconde correspond à la fracturation des formations voisinant les intrusions massif du groupe d'Ambatolampy et du granite de Behenjy sur la partie Est de la zone d'étude.

L'analyse de la distribution des fréquences de longueurs cumulées indique une forte similitude avec la distribution des fréquences en nombre de fractures. Ce résultat montre que les principales classes directionnelles de fractures identifies apparaissent les plus longues. Autrement dit les fractures les plus abondantes en fréquence sont aussi les plus longues.



Figure 15 : Diagramme des directions et des fréquences des longueurs cumulées

# II-5 VALIDATION DU RESEAU DE LINEAMENT PAR LES LIGNES SISMIQUES ET LA CARTE TECTONIQUE DE MADAGASCAR

La carte des linéaments obtenue par traitement d'image landsat ETM+ a été superposée avec les données sismiques du laboratoire de sismologie et infrason de l'IOGA(figure 16) pour la validation.

La superposition de la carte des linéaments avec la carte des lignes sismiques ainsi que la carte tectonique de Madagascar montre une bonne corrélation des linéaments qu'on a identifiésà partir du traitement d'image. Ces linéaments nouvellement identifiés affirment l'importance de l'outil traitement d'image à l'étude hydrogéologique en zone de socle fissuré comme le cas de notre zone d'étude.

La télédétection est un outil précieux pour le domaine de l'eau. Le traitement d'imageLandsat 7 ETM+ a permis, à terme, de cartographier les réseaux de linéaments ainsi que de mettre en évidence les caractéristiques de ces réseaux de linéaments. Ceci nous permettra par la suite de voir, après une analyse statistique des linéaments, la zone probablement potentielle en eau souterraine sur toute la zone d'étude.



Figure 16 : Superposition de la carte de linéaments nouvellement identifiés avec les points focaux des seismes de Madagascar.

On voit bien que les linéaments majeurs tracés coïncident avec des alignements des sources sismiques, par contre les failles identifiées par les études précédentes ne donnent pas la confirmation voulue. Néanmoins, la densité des sources sismiques dans la zone d'étude avance une possibilité d'existence de réseau de fracture important.

# Chapitre III : STRUCTURE GEOMETRIQUE DES NAPPES AQUIFERES PAR APPROCHE GEOPHYSIQUE

Ce chapitre est consacré à l'apport de la géophysique à la caractérisation géométrique des nappes aquifères de la zone d'étude. On développera dans ce chapitre la contribution de la méthode géophysique en hydrogéologique dans des études antérieures, le choix des méthodes appliquées pour, anis que les résultats et interprétations des données obtenues. On parlera à la fin de ce chapitre la géométrie des aquifères et la potentialité des ressources en eaux souterraines de la zone d'étude.

# **III-1. L' HYDROGEOPHYSIQUE**

L'hydrogéophysique est une nouvelle branche de la géophysique étudiant les eaux souterraines en complément de l'hydrogéologie.

# **III-1.1 LES METHODES DE L'HYDROGEOPHYSIQUE**

La géophysique est une branche des sciences de la terre. Elle concerne l'étude des paramètres physiques du sous-sol et de l'atmosphère et utilise des techniques de mesure indirectes et non destructives.

L'hydrogéophysique est l'étude des écoulements d'eaux souterraines par des méthodes géophysiques. Plusieurs méthodes et techniques peuvent être choisies mais ceci devrait être fonction de la structure géologique du milieu à étudier, de la condition de faisabilité d'application de la technique à mettre en œuvre et du contexte géomorphologique.

Les principales méthodes géophysiques sont :

- le sondage électrique : étude de la résistivité électrique en un point et suivant la profondeur
- le traîné électrique : étude de la résistivité électrique suivant un profil
- la tomographie électrique de résistivité : profil de résistivité électrique du sous-sol par assemblage de plusieurs sondages électriques suivant un profil
- l'électromagnétisme : étude de la conductivité électrique du sous-sol par l'induction d'un courant électrique
- étude de la polarisation spontanée et polarisation provoquée
- la sismique réfraction et la sismique réflexion
- et enfin, la résonance magnétique protonique : étude du signal électromagnétique émis par les protons (H<sup>+</sup>) présent dans l'eau du sous-sol

Généralement, la géophysique appliquée suit le processus simple de la figure 17 pour aboutir à l'obtention d'informations utiles.

#### EMMISION D'UN SIGNAL

(Courant électrique, choc, courant tellurique, etc.)

# $\downarrow$

# RECEPTION ET ENREGISTREMENT DE LA REPONSE

# $\downarrow$

#### TRAITEMENT DU SIGNAL ET INTERPRETATION

Figure 17 : Processus simple de l'application de la géophysique En hydrogéologie, les hydrogéophysiciens utilisent les techniques géophysiques

actives qui donneront les caractéristiques géométriques (profondeur, extension latérale, etc.) des différentes couches ou formations géologiques, leur permettant de différencier l'aquifère de l'aquitard ou encore de voir la présence ou non d'eaux souterraines.

La méthode de prospection électrique a été déjà connue vers la fin du 17<sup>ème</sup> siècle et a été appliquée pour la première fois à la prospection des minerais métalliques en Europe et aussi à la prospection de l'eau aux Etats Unis. De nos jours, cette technique a évolué et s'est dotée de technologie très avancée, et les chercheurs restent encore fidèles au choix de la méthode électrique à la recherche d'eaux souterraines.

Les méthodes électromagnétiques (EM) à source contrôlée visent à déterminer les distributions de la conductivité et permettant d'explorer le sous sol (Descloitres, 1998). Elles sont sensibles aux paramètres physiques électriques du sous-sol. Comme tout autre outil scientifique, ces méthodes présentent des avantages et inconvénients. Elles offrent une meilleure résolution des terrains conducteurs ; la mise en œuvre sur le terrain est rapide par rapport aux autres méthodes; elles définissent mal les terrains résistants. On distingue la méthode EM en domaine fréquentiel (FDEM) et la méthode EM en domaine temporel(TDEM).

Les sondages EM ont été utilisés pour la première fois aux USA vers 1930 mais n'a pas fourni les résultats attendus. Développés un peu plus tard avec succès par l'école russe, la méthode TDEM a été utilisée pour la prospection des corps conducteurs profonds et puis pour la prospection des eaux souterraines mais aussi d'autres ressources naturelles utiles dans le sous sol comme en prospection minière ou en prospection pétrolière.

#### **III-1.2 TECHNIQUES DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE UTILISEES**

Compte tenu du contexte géologique de la zone d'étude et des moyens matériels disponibles, on a utilisé la méthode électrique à courant continu (plus particulièrement le

sondage électrique et l'imagerie par tomographie électrique) pour les zones à relief latéritiqueet la méthode EM (Sondage TDEM) pour les plaines alluvionnaires composées de dépôts lacustres conductrices (argiles, tourbes, sables fins et sables grossiers). Pour la méthode EM, on cherche à trouver la profondeur du toit du substratum rocheux de la plaine alluvionnaire qui est estimée entre 25 à plus de 40m.

#### III-1.2.1 Le sondage électrique (SE)

Le sondage électrique est une technique permettant une investigation verticale du sous sol. Elle consiste à utiliser un dispositif de mesure à quatre électrodes dont les deux à l'extérieur (A et B) servent d'injection de courant et les deux autres à l'intérieur (M et N) d'électrodes de mesure de la différence de potentiel. Le point de mesure reste fixe au centre des quatre électrodes. La profondeur d'investigation est de plus en plus grande en écartant les électrodes d'injection de courant. La représentation des résultats de mesure de la résistivité apparente ( $\rho_a$ ) en fonction de AB/2 en coordonnées bilogarithmiques affiche les points expérimentaux, permettant le traçage de la courbe de sondage qui constitue le document d'interprétation.

#### III-1.2.2 Le Trainé électrique (TE)

Le trainé électrique est une investigation latérale du sous sol. Il permet de voir la variation de la résistivité suivant une direction latérale. Cette technique consiste à utiliser un dispositif de mesure à quatre électrodes avec une distance inter-électrode constante et à déplacer l'ensemble du dispositif suivant une direction donnée.

#### III-1.2.3 L'imagerie par tomographie électrique (ITE)

L'imagerie par tomographie électrique est une technique permettant l'imagerie 2D de la résistivité du sous-sol. C'est une combinaison de plusieurs sondages et trainés électriques. Elle consiste à implanter simultanément plusieurs électrodes suivant un profil. Comme en sondage électrique, quatre électrodes sont utilisées pour un point de mesure mais cette technique a l'avantage d'être rapide parce qu'il n'est pas nécessaire de déplacer le dispositif si on veut une investigation plus profonde. Les mesures s'effectuent automatiquement. Des types d'appareils de mesure de la résistivité permettent actuellement d'afficher directement le résultat de l'ITE sur un écran et d'avancer une interprétation préliminaire sans être obligé de retourner immédiatement au laboratoire après la réalisation des mesures sur terrain.

#### III-1.2.4 Le STDEM

Le sondage électromagnétique en domaine temporelou STDEM est une autre technique qui permet d'établir la distribution de la résistivité réelle du sous-sol à des profondeurs généralement plus élevées que celles en sondage électrique et qui vont jusqu'à 300 - 400 m. La configuration type d'un sondage électromagnétique est composée d'un émetteur connecté à une bobine de câble électrique (carrée, rectangulaire ou circulaire) disposée sur le sol et une bobine réceptrice, de la même taille, connectée à un récepteur. Les bobines émettrices et réceptrices pourraient aussi n'être qu'un (boucle coïncident). La taille de la bobine est proportionnelle à la profondeur d'investigation (une plus grande bobine permet une plus grande profondeur d'investigation).

Les enquêtes STDEM sont utilisées pour évaluer la présence d'eau souterraine (recherche des eaux profondes jusqu'à 300 - 400 m) et la profondeur du substrat rocheux. Ainsi, en considérant la genèse des dépôts alluvionnaires des basses altitudes, on a alors choisi d'utiliser cette méthode de prospection EM (le STDEM) pour étudier l'épaisseur de la formation lacustre qui renferme la nappe générale de la zone d'étude.

#### **III-2 MATERIELS ET METHODES**

Dans cette partie, on rappelle les principes des méthodes géophysiques et les matériels qui ont été utilisées pour cette étude.

#### La méthode électrique

La structure du sous-sol peut-être caractérisée par les études électriques des formations en présence. Le résistivimètre introduit un courant continu dans le sol par l'intermédiaire de deux électrodes A et B (électrodes d'injection de courant) et mesure la différence de potentiel entre deux autres électrodes M et N (électrode du potentiel). Le principe de cette méthode ainsi que l'allure des filets de courant qui relient les électrodes, placées à la surface du sol sont illustrées sur la Figure 18.

Le potentiel au point A dû à l'électrode A est : 
$$V_A = \frac{\rho . I}{2\pi . AM}$$
.

et le potentiel au point B dû à l'électrode B est :  $V_B = -\frac{\rho . I}{2\pi . BM}$ 

Ce qui permet de donner le potentiel au point M, V(M), la somme des potentiels en A et B :

et au point N, V(N): 
$$V_N = \frac{\rho . I}{2\pi} (\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN})$$

Donc la différence du potentiel entre M et N sera :

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)$$



Figure 18 : Dispositif quadripôle implanté à la surface du sol

La résistivité au centre du dispositif vaut :

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)I}$$

de la forme :

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

où :

 $\rho_a$ : s'exprime en Ohm.mètre : $\Omega$ .m

 $\Delta V$  : s'exprime en milliVolt : mV

- I : s'exprime en milliAmpère : mA
- K : coefficient géométrique fonction de la disposition des électrodes

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)}$$

En augmentant la longueur de ligne AB, les lignes de courant atteignent des couches de plus en plus profondes. Ce qui permettra une investigation de la résistivité du sous-sol suivant la profondeur. S'il n'existe pas de contrastesuffisant de résistivité entre les formations, la méthode est inapplicable. De plus, il faut que le courant électrique puisse atteindre les objets à étudier en profondeur et que les anomalies dues aux hétérogénéités du sous-sol soient mesurables.

Les applications de cette méthode sont nombreuses. Les classiques sont les prospections minières et la recherche de formations aquifères. Ces méthodes électriques peuvent aussi permettre de localiser fractures et cavités, de repérer des structures archéologiques, de mettre en évidence des pollutions ...

Vu les conditions géologique et hydrogéologique de la zone d'étude, la méthode électrique est la plus indiquée. Pour réaliser des imageries par tomographie électrique en 2D (2 dimensions : suivant la direction X et suivant la profondeur Z), on utilise un dispositif multi-électrodes constitué d'un sélecteur d'électrodes (multinodes). de câbles multiconductrices, d'un résistivimètre SYSCAL R2 d'Iris Instruments et d'un ordinateur de pilotage (voir Figure 12). On effectue les mesures en connectant le résistivimètre à une série d'électrodes (au nombre de 32) implantées dans le sol suivant une configuration choisie, le dispositif Wenner qui consiste à implanter les 32 électrodes à une distance inter-électrodes constante. On a choisi ce dispositif car il est recommandé pour les structures horizontales (Chouteau M., 2013).

Le résistivimètre est piloté par ordinateur. La séquence d'acquisition ou protocole de mesure réalisée à partir du programme Electre II sélectionne automatiquement les électrodes d'injection du courant et les électrodes de mesure du potentiel. La mesure est ensuite stockée dans la mémoire du résistivimètre.

Ce dispositif permet d'effectuer automatiquement plusieurs centaines de mesures successives. Tout d'abord, il réalise des mesures en utilisant un quadripôle dont l'espacement inter-électrodes est minimal (n=1; Cf. Figure 19).



Figure 19 : Schéma d'acquisition en ITE (Boulanger C., 2009)

On couvre ainsi l'ensemble du profil en utilisant des quadripôles qui présentent le même espacement inter-électrodes. Puis sur commande préalable enregistrée dans le programme de séquences, l'écartement inter-électrodes (n=2) est augmenté augmentant de fait la profondeur d'investigation. L'acquisition des données s'arrête dès lors que l'on a utilisé toutes les possibilités de mesures que permet la configuration des électrodes.

Les données obtenues sont présentées sous forme de pseudo-section (figure 20). Celle-ci est construite en plaçant chaque valeur de résistivité apparente mesurée à l'aplomb du centre du quadripôle AMNB, à une profondeur (appelée pseudo-profondeur) proportionnelle à l'écartement inter-électrodes. La figure 20illustre de haut en bas le modèle de résistivité mesuré, calculé et inversé.