



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE D'UN AQUIFÈRE
EN MILIEU DE SOCLE FRACTURÉ
CAS DE LA PROVINCE DU KOURWÉOGO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER D'INGENIERIE EN EAU ET ASSAINISSEMENT

Présenté et soutenu publiquement le 25/06/2012

Par Wendgouda Priva KABRE

Travaux dirigés par : Dr. Angelbert Chabi BIAOU

Enseignant-chercheur UTER LEAH

Dr. Mahamadou KOÏTA

Enseignant-chercheur UTER LEAH

Jury d'évaluation :

Président : M. Angelbert BIAOU

Membres et Correcteurs :

M. Mahamadou KOITA

M. Sewa DASILVEIRA

Promotion [2010-2012]

DEDICACES

A ma famille : Papa, Maman, Prisca, Pétronille, Pélagie.

Papa tu m'as appris le sens du sacrifice,

Maman, on sait combien tu nous aimes,

Les sœurs, vous me donnez le sourire à tous les coups.

On ne choisit pas sa famille, moi j'ai l'impression de vous avoir choisi !

Je n'oublie pas les amis,

Vous savez partager, vous avez été là !

Aux camarades de promo !

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements aux :

Dr. Angelbert Biaou ;

Dr. Mahamadou Koïta ;

Enseignant-chercheurs du Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH) du 2iE.

Pour leur disponibilité et leur engagement pendant ce mémoire. Pour m'avoir donné un cadre d'expression et d'apprentissage.

Je pense également à tous les enseignants du 2iE qui ont participé à ma formation pendant ces 5 dernières années.

RESUME

La province du Kourwéogo au centre Nord du Burkina est située sur un socle Antébirrimien. Les fractures et fissures du socle constituent les zones d'écoulement préférentiel pour les réserves d'eaux souterraines.

Afin de mettre en évidence ces fractures, une étude linéamentaire a été menée à partir d'images Landsat TM5. La carte des linéaments obtenue a été validée par des tomographies électriques recoupant certains des linéaments relevés. Cette carte montre que les directions dominantes sont Nord-Sud, N20-30° et N140-150°. Cette carte pourra être utilisée dans les prochaines campagnes d'hydraulique comme document de base pour l'implantation des forages.

Une étude statistique de l'influence des paramètres de forages (profondeur totale, profondeur de venue d'eau, épaisseur d'altération, épaisseur d'altération saturée, débit spécifique) sur le débit a été réalisée. L'ensemble de ces paramètres a ensuite fait l'objet d'une Analyse en Composante Principale (ACP). Cette analyse révèle que la profondeur totale n'a pas d'effet sur la productivité des forages. Une forte épaisseur d'altération augmente par contre les chances d'avoir un débit important. Et au-delà de 30 mètres de profondeur dans la roche fissurée, les chances d'obtenir un débit conséquent diminuent.

Ces résultats améliorent la connaissance de l'aquifère fracturé du Kourwéogo. Ils orientent les futures campagnes d'hydraulique pour une meilleure implantation des ouvrages de captage.

Mots clés :

-
- Socle fracturé
 - Télédétection
 - linéament
 - Tomographie électrique
 - Productivité de forage
 - Kourwéogo

- Burkina

Faso

ABSTRACT

The Kourwéogo area (Center-North of Burkina Faso) is located on a “pre-birimian” basement. And groundwater flows are controlled by fractures. This study aims to identify these fractures by exploring lineaments on Landsat TM5 image. To validate the lineaments map obtained electric tomography has been used. The map of lineaments reveals that the main directions are N-S, N20-30° and N140-150°. This map can be used to improve further hydraulic programs in the Kourwéogo province.

Statistical analysis based on Principal Component Analysis (PCA) is conducted to identify the correlation between well parameters (the depth of wells, the thickness of the weathered zone, the saturated alteration, the specific capacity) and well efficiency. It shows that well efficiency is not really influenced by the well depth. On the other hand, the thickness of weathering layer improves chances to obtain an important discharge rate. It has also been shown that beyond 30 meters in the hard-rock, boreholes are less and less productive. These results increase the knowledge of Kourwéogo aquifer. Based on those, further hydraulic programs can be more efficient.

Key words:

-
- Fractured hard-rock
 - Remote sensing
 - lineament
 - electric tomography
 - borehole productivity
 - Kourwéogo
 - Burkina Faso

LISTE DES ABBREVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

ACPN : Analyse en Composantes Principales Normée

CIEH : Comité Inter Etats d'Etudes Hydrauliques

CV : Coefficient de Variation

DGRE : Direction Générale des Ressources en Eau

GPS : Global Positioning System

SIG : Système d'Information Géographique

TM : Thematic Mapper

Contenu

DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT	vi
LISTE DES ABBREVIATIONS	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	2
LISTE DES FIGURES.....	3
INTRODUCTION.....	4
PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	6
Introduction	7
Chapitre I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	7
I. Contexte géologique et hydrogéologique du Burkina Faso.....	7
II. Situation géographique et milieu physique du Kourwéogo	9
III. Contexte géologique et hydrogéologique du Kourwéogo	10
Chapitre II : METHODOLOGIE DE CARACTERISATION DE L'AQUIFERE	12
I. Données	12
II. Télédétection	13
III. Prospection géophysique	17
IV. Analyse statistique des données de forages	20

DEUXIEME PARTIE : RESULTATS, INTERPRETATION ET DISCUSSION.....	21
Chapitre I : Traitement des images et extraction des linéaments.....	22
I. Traitement des Images.....	22
II. Validation de la carte linéamentaire par Tomographie électrique	27
III. Analyse du réseau linéamentaire.....	31
Chapitre II : Analyse statistique des données de forage.....	33
II. Relation entre débit et paramètres d'ouvrages.....	34
III. Analyse en composantes principales (ACP)	38
IV. Synthèse	40
CONCLUSION	41
PERSPECTIVES.....	42
Références	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Statistique descriptive des paramètres de forage.....	33
Tableau 2: Tableau des coefficients de corrélation	35
Tableau 3: Valeurs propres, pourcentages et pourcentage cumulé des principaux facteurs	39
Tableau 4: Coordonnées des variables sur les axes principaux	39
Tableau 5: Matrice de corrélation des variables.....	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de situation et géologie du Kourwéogo.....	10
Figure 2: Mise en évidence des linéaments sur la première composante principale (ACP1) ..	22
Figure 3: Linéaments mis en évidence par le filtre Sobel 3×3 sur l'ACP1	23
Figure 4: Linéament identifiés sur la combinaison (TM6 - TM7) / (TM6 + TM7)	24
Figure 5: Composition colorée (TM7, TM5, TM2) faisant ressortir des linéaments.....	25
Figure 6: Carte des linéaments du Kourwéogo	26
Figure 7: Situation des tomographies réalisées	27
Figure 8: Pseudo-section du profil 1 (site de Sanon)	28
Figure 9: Pseudo-section du profil 2	29
Figure 10: pseudo-section du profil 3	30
Figure 11: Histogramme circulaire (rosace directionnelle) en nombre des linéaments issus du traitement de l'image Landsat.....	32
Figure 12: Graphes de variation des paramètres de forages en fonction du débit.....	35
Figure 13: Graphe de la profondeur de venue d'eau dans le socle en fonction du débit	38

INTRODUCTION

Problématique et contexte de l'étude

Dans un pays en développement tel que le Burkina Faso, l'accès à l'eau potable pour les populations reste parmi les défis des années à venir. Le contexte du Burkina est aggravé par des conditions climatiques particulièrement défavorables marquées par une pluviométrie faible posant un problème de disponibilité de la ressource.

Les principales ressources en eaux sont les eaux de surfaces et les eaux souterraines. La qualité bactériologique et physico-chimique des premières n'est pas souvent garantie, elles nécessitent par conséquent des traitements onéreux que ne peuvent se permettre les communautés à revenu faible. C'est dans un tel contexte que les eaux souterraines présentent un sérieux potentiel. En effet, les recherches de l'eau en milieu cristallin ont été orientées vers une meilleure connaissance des aquifères des fissures qui sont censés être à l'abri des fluctuations saisonnières et moins exposés aux phénomènes de pollution. Et Contrairement aux aquifères alluviaux ou karstiques, des sites favorables à l'implantation de forages en roche de socle sont susceptibles d'être trouvés à l'échelle de chaque commune (Lachassagne et Wyns, 2005).

Il est donc d'actualité d'améliorer la connaissance de cette ressource afin d'organiser au mieux sa mobilisation pour les populations. Connaissance qui nécessite des études de caractérisation dont il est question dans le présent mémoire.

Contexte scientifique

L'objectif d'une caractérisation hydrogéologique est de comprendre le fonctionnement de l'aquifère et d'en estimer les paramètres. Le souci de compréhension du fonctionnement d'un aquifère suscite des questions sur sa géométrie d'une part, et les paramètres descriptifs de ses principales fonctions hydrauliques d'autre part : la fonction de stockage de l'eau et la conduite du flux.

Le stockage de l'eau est mesuré par la porosité et le coefficient d'emménagement, la conduite du flux par la perméabilité, la Transmissivité et les débits (Vouillamoz, 2003).

En contexte de socle les questions qui se déclinent sont essentiellement : l'épaisseur des zones d'altération et de fissures/fractures et les limites de leur extension latérale, la quantité d'eau stockée dans les différents horizons et leurs potentiels de production.

D'un point de vue pratique la caractérisation devra aboutir à l'identification de zones dites favorables à l'implantation d'ouvrage de captage. Ces zones en contexte de socle allient capacité de stockage (épaisseur d'altérations saturée) et capacité de production (présence de fractures sous-jacentes drainantes).

La caractérisation de l'aquifère ainsi définie passe par la mise en œuvre d'outils dont les résultats sont complémentaires : c'est dans cette optique que la télédétection, l'hydrogéophysique et l'analyse statistique de données seront utilisés dans cette étude pour la caractérisation de l'aquifère de Socle du Kourwéogo.

Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude de caractérisation est l'identification des linéaments et leur validation comme occurrence de fractures profondes à travers la géophysique.

Des analyses statistiques permettront ensuite d'établir les liens éventuels entre les différents paramètres et la productivité des forages.

Les résultats de cette étude pourront servir à mieux orienter les futures campagnes d'hydrauliques de la province du Kourwéogo.

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Cette synthèse bibliographique présente les concepts des outils utilisés pour la caractérisation de l'aquifère du Kourwéogo, leurs conditions de mise en œuvre, leurs limites et leurs apports respectifs dans la procédure de compréhension des aquifères de socle. Elle rapporte aussi les résultats intéressants obtenus par des études antérieures sur des sites de nature similaire au contexte du Kourwéogo.

Chapitre I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I. Contexte géologique et hydrogéologique du Burkina Faso

1. Contexte Géologique

Le Burkina Faso est situé sur le socle cristallin et cristallophyllien du Craton Ouest Africain. On y distingue trois grandes familles lithologiques (CEFIGRE, 1990 ; Compaoré, 1997) :

- Les formations de l'antébirrimien ou précambrien D (2800-2600 Ma, orogénèse libérienne) : constitués de granites et migmatites indifférenciés, de Gneiss, de leptynites, d'amphibolites et de métagabbros ;
- Les formations du Birrimien ou Précambrien C (2170- 1500 Ma, orogénèse éburnéenne) : constitué des roches volcano-sédimentaires et des roches plutoniques ;
- Les formations du précambrien supérieur et du tertiaire : ce sont les formations de grès, de calcaire, et de schistes de l'infra-cambrien puis les grès argileux du continental terminal du tertiaire.

Les roches cristallines et cristallophylliennes sont recouvertes par un manteau d'altérites issu de l'altération des roches sous l'action chimique l'eau et celle physique de la température. L'épaisseur des altérites varie significativement d'une région à une autre. Cette altération est plus marquée au droit des zones de fractures ; elle est utilisée dans le cadre de prospection hydrogéologique, pour la localisation de ces dernières du fait du fort contraste de résistivité électrique existant entre le socle résistant et les formations altérées conductrices (Compaoré, 1997). Deux profils types d'altérations sont identifiés au Burkina : le profil type de l'altération des granito-gneiss et le profil type de l'altération des schistes.

L'histoire de la tectonique du Burkina a entraîné des fracturations dont les directions prédominantes sont NE-SW et NNE-SSW (Yaméogo, 2008).

2. L'hydrogéologie en zone de socle

Les formations de socle sont des roches cristallines et cristallophylliennes caractérisées par une faible porosité primaire. Ces formations sont recouvertes par un manteau d'altérites, résultats de processus d'altération et de phénomènes tectoniques.

En zone de socle, le model conceptuel généralement adopté est celui d'un aquifère à trois types de réservoir. (Maréchal et Dewandel, 2004 ; Wyns et Lachassagne, 2005 ; Dewandel et al, 2006). Du haut vers le bas on retrouve :

- Le manteau d'altérites (saprolite ou rigolite) provenant de la décomposition du socle. Cette couche est généralement poreuse mais peu perméable, elle est de nature capacitive.
- La couche fissurée portant des fissures horizontales dans les premiers mètres, des fissures sub-verticale et subhorizontale plus en profondeur. La densité des fractures diminue avec la profondeur.
- La roche saine, perméable localement au droit des fractures profondes. La densité des fractures est beaucoup plus faible par rapport aux fissures de la couche sus-jacente. Si bien que cette couche peut être considéré comme imperméable et de capacité d'emmagasinement faible.

Les aquifères les plus productifs correspondent ainsi généralement aux ensembles dans lesquels un horizon d'altération suffisamment épais formé de matériaux grossiers est drainé par une zone de fissuration et/ou fracturation. (Vouillamoz, 2003).

Pour l'exploitation des eaux souterraines dans ces contextes, mise à part quelques puits traditionnelles qui captent les altérites, les programmes d'hydrauliques s'orientent surtout vers l'implantation dans les horizons fissurés/fracturés. Les nappes captées en zones de socle peuvent être considérés comme semi-captives pour peu que les fractures soient recouvertes par une couche imperméable d'altérites.

Les paramètres hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emménagement) déterminés pour ces aquifères représentent le complexe altérites/fractures. En effet, pendant les essais de pompages qui permettent de les caractériser, c'est l'ensemble altérites/fissures-fractures qui participe à l'écoulement de l'eau vers le puits de pompage. Les fractures drainant l'eau libérée par les altérites.

II. Situation géographique et milieu physique du Kourwéogo

La Province du Kourwéogo est située au Nord-Ouest de Ouagadougou dans la région du plateau central. C'est une zone relativement plate, où les altitudes varient autour de 400.

Elle est influencée par le climat de la zone soudano-sahélienne, l'une des 3 zones climatiques qui caractérisent le Burkina. Le climat est marqué par une courte saison de pluie (Juin-Septembre) et une longue saison sèche (Octobre-Mai). Les vents caractéristiques sont l'harmattan chaud et sec qui souffle en saison sèche et la mousson, un vent frais et sec qui caractérise la saison pluvieuse. La pluviométrie annuelle varie entre 700 et 900 mm en moyenne tandis que les températures oscillent entre 15 et 40° C.

La Province du Kourwéogo est partagée entre le Bassin du Nakambé au Nord et le bassin du Nazinon au Sud.

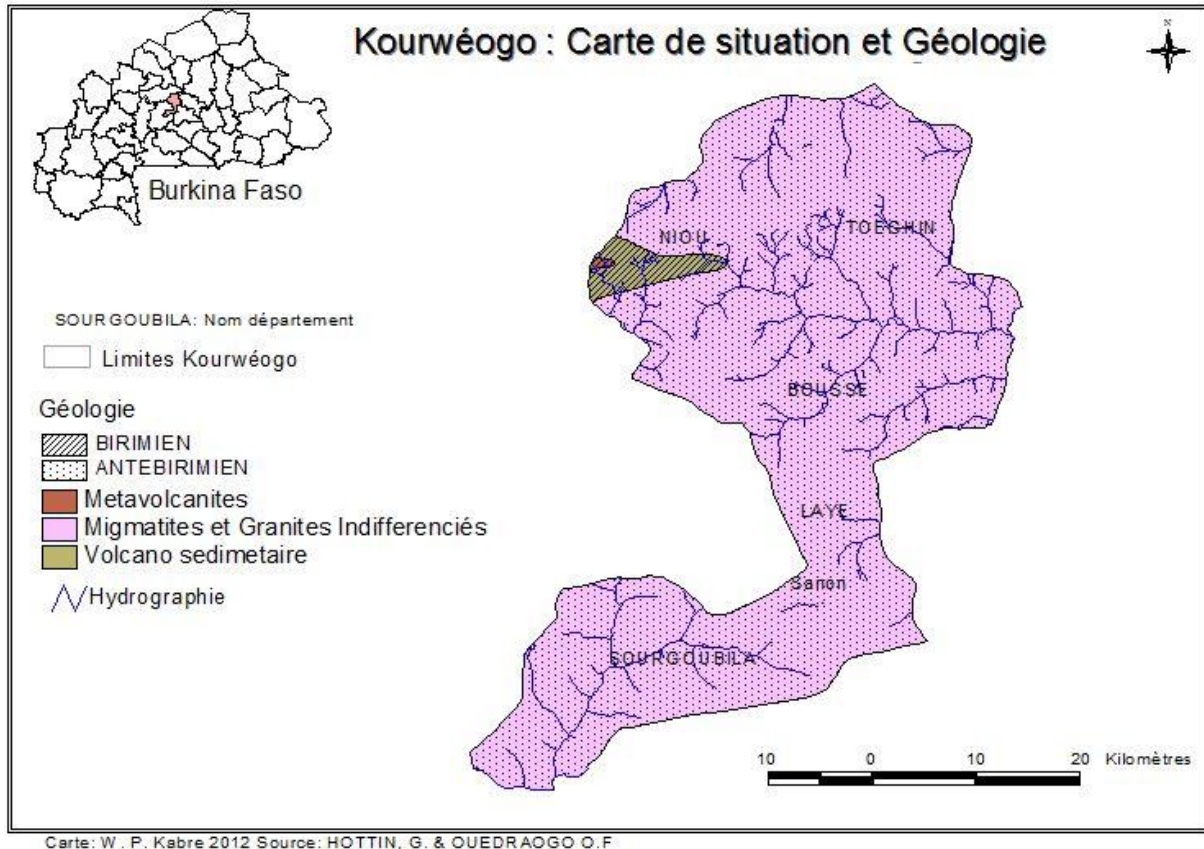


Figure 1: Carte de situation et géologie du Kourwéogo

III. Contexte géologique et hydrogéologique du Kourwéogo

La géologie et l'hydrogéologie du site expérimentale de Sanon sont décrites par Compaoré (1997) qui s'est également appuyé sur les travaux BRGM-AQUATER(1991) dans le cadre du projet milieu fissuré II.

Sanon est un village situé au Nord de la province du Kourwéogo. L'étude de la géologie et de l'hydrogéologie de la province se basera sur les résultats de Sanon en supposant qu'il y a peu de différence de faciès géologique lorsqu'on passe du village à la province.

1. Géologie du Kourwéogo

A l'instar de Ouagadougou et de ses environs, le Kourwéogo est situé sur des formations Birimiennes et antébirimiennes. D'après les coupes géologiques des forages, on distingue des formations d'amphibolites à filons de quartz, de gneiss, de migmatites et de granites.

L'épaisseur du manteau d'altérite qui recouvre le socle fissuré varie entre 7 et 78m. Les altérations sont composées d'argiles vertes à chlorites-serpentine lorsque le substratum a un caractère amphibolique et d'arènes granitiques type arkoses associées à des argiles kaoliniques lorsque le substratum est constitué par des migmatites ou des granitoïdes.

La présence d'une cuirasse dans certaines localités de la province comme Sanon témoigne du fait que le profil latéritique est très peu érodé. Ce qui permet de reconstituer le profil d'altération complet car la cuirasse constitue une couche protectrice. Le profil latéritique est le suivant:

- 0-2m : cuirasse latéritique
- 2-6m : Silt-Algile latéritique de couleur rouge ou jaune
- 6-30m : Argile Kaolinique
- 30-50 : arènes argilo-sableuse, à grenu.

Les zones riches en biotites et amphiboles (amphibolites) sont plus associées à des argiles verdâtres.

Trois grandes familles directionnelles de discontinuités images et de photo-fractures ont été identifiées dans la localité de Sanon (Sud Kourwéogo) : ce sont N55-N75° E, N115-N125°E et N145-N165°E.

2. Hydrogéologie du Kourwéogo

On retrouve dans le Kourwéogo les trois types de réservoir caractéristiques d'une bonne partie du Burkina. Il s'agit du socle granito-gneissique fracturé, surmonté par le réservoir de fissures recouvert par un manteau d'altérites. L'aquifère supérieur des altérites capté par les puits villageois produit des débits faibles par rapport à ceux produits par les forages qui captent l'aquifère fissuré/fracturé sous-jacent (4m³/h en moyenne et localement 18m³/h obtenu sur 2 forages).

La variation du niveau statique est très marquée, il varie de quelques mètres à près de 50 m localement. La moyenne des niveaux statique est de 17m.

Des essais par pompages réalisés à Sanon et interprétés par la solution analytique de Theis donnent des transmissivités comprises entre $4,2.10^{-5}$ et $8,2.10^{-4}$ m²/s. les coefficients d'emmagasinement varient entre $2,9.10^{-4}$ et $4,4.10^{-2}$.

Chapitre II : METHODOLOGIE DE CARACTERISATION DE L'AQUIFERE

L'objectif d'une caractérisation hydrogéologique est de comprendre le fonctionnement d'un aquifère et d'en estimer les paramètres. La caractérisation d'un aquifère est classiquement réalisée à partir d'études géologiques, piézométriques et de pompages d'essai. Ces outils de présentent cependant des limites de différentes natures. Limites qui peuvent être réduites par une approche par des techniques complémentaires. Dans le cadre de cette étude la télédétection et la géophysique puis la statistique seront utilisées pour la caractérisation de l'aquifère du Kourwéogo. Ces méthodes sont présentées dans le présent chapitre.

I. Données

Les données utilisées pour les études sont : les images satellitaires, les données de forages, les logiciels de traitement et enfin le SYSCAL comme matériel de mesure terrain.

1. L'image satellitaire

Une image Landsat 5 TM (Thématique mapper) codée sur bits (256 niveaux de gris) a fait l'objet de traitements. Il s'agit de la scène 195-051 du 18 Novembre 1986. L'image est composée de **7312 × 7747** pixels de 28,5 m de résolution. Elle a une fauchée de 85 Km. c'est une scène géo référencée selon le système de projection WGS 84 zone 30.

2. Le Syscal de chez IRIS

La prospection hydro géophysique par tomographie électrique a été menée avec le résistivimètre *Syscal R1 Plus Switch*. Cet appareil permet l'utilisation d'un réseau de 72 électrodes au maximum. Il est constitué d'une unité centrale combinant les fonctions

d'injection de courant et de mesure de la différence de potentiel engendrée. Les électrodes sont reliées à cette unité par le biais de câbles multi électrodes branchés.

3. Les données de forages

La base de données utilisée pour l'étude statistique dans ce mémoire provient de la DGRE. Elle est fournie sous forme de feuille Excel qui recense les forages de la province du Kourwéogo réalisés entre 1982 et 2002. Sur 220 forages recensés, 134 avaient tous les enregistrements nécessaires et ont donc fait l'objet de l'analyse.

4. Les logiciels de traitement

Les logiciels utilisés dans cette étude sont les suivants :

ENVI 4.3 pour le traitement des images satellites ;

ELECTRE II pour créer des séquences de mesure tomographique sous Syscal

Res2Dinv pour l'inversion des données de tomographie électrique ;

ArcView 3.2a pour l'analyse des linéaments ;

Excel et le logiciel complémentaire XLSTAT ont servi pour la statistique des données de forages.

II. Télédétection

1. La télédétection appliquée à l'hydrogéologie en contexte de socle

La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour l'acquisition d'informations sur un objet sans qu'il y ait un contact matériel entre l'instrument d'acquisition et l'objet de l'étude.

Plusieurs études hydrogéologiques ont été menées dans les contextes de socle à travers l'utilisation de la télédétection ; Savané et al (1997), Savané et Biémi (1998), Kouamé et al (1999), Ta et al (2008), Ngo et al (2010), Koita et al (2010). Elles avaient pour objectifs

majeurs la proposition de méthodologies de caractérisation des accidents tectoniques et la détermination de leur rôle dans les écoulements souterrains. Toutes ces études s'orientent vers l'identification et la caractérisation de linéaments sur les images satellitaires.

Les linéaments sont des objets rectilignes ou curvilignes identifiables sur les images satellitaires qui traduisent des phénomènes géologiques profonds tels que les fractures, les failles ou les contacts géologiques. L'identification des linéaments dans les images satellitaires est tributaire de la capacité qu'a le capteur à détecter les légères variations de la réflectance associées à ces phénomènes géologiques (Dubois, 1999).

Selon El Hadani (1997), l'étude des linéaments permet de répondre à deux objectifs:

- l'orientation des campagnes de reconnaissance en définissant des zones potentiellement favorables,
- la sélection de sites ponctuels pour l'implantation de forages.

La télédétection a l'avantage d'offrir une vue synoptique sur de grandes surfaces, en plus les données existant en nombre important et sous forme numérique facilitent le stockage et permettent le croisement de plusieurs sources. A ces avantages s'ajoute l'existence d'image libre d'accès. L'utilisation des images satellitaires peut dès lors constituer l'un des tout premiers moyens d'étude des aquifères avant la mise en œuvre des autres méthodes telles que la prospection géophysique ou les essais de pompages pour confirmer et/ou compléter éventuellement les résultats.

2. Les techniques de traitement des images Landsat

Le traitement d'image est la mise en œuvre d'un ensemble de techniques permettant d'améliorer une image ou d'en extraire des informations. Elle se fait à l'aide de logiciels plus ou moins spécialisés comme ERDAS, IDRISI, SPRING ou encore ENVI qui est utilisé dans le cadre de ce projet. Le choix des techniques de traitements dépend essentiellement des objectifs de l'opérateur. D'ordre général, on peut dégager les étapes suivantes dans le processus de traitement d'images : le prétraitement, le rehaussement ou traitement proprement dit, l'analyse et l'interprétation.

Nous présentons ici les principales opérations utilisées pour extraire l'information des images Landsat, étant entendu que les traitements réalisés dépendent toujours de la qualité de l'image de départ et des objectifs poursuivis par l'opérateur.

2.1. Les combinaisons de bandes

Ce sont des opérations arithmétiques effectuées sur 2 ou plusieurs bandes. Cette technique utilise des opérateurs de type ponctuel, c'est-à-dire qu'il traite le compte numérique (valeur du niveau de gris) dans chaque pixel indépendamment des comptes numériques des autres pixels de l'image. Cette opération est souvent utile pour mettre en évidence les informations ou différences d'une même scène acquises dans des bandes spectrales différentes.

Des linéaments ont été mis en évidence par les combinaisons suivantes : $(TM7 + TM6)$, $(TM4 + TM6)$, $(TM5/TM4)$, $(TM6 - TM7) / (TM6 + TM7)$; Kouamé et al (1999), Ta et al (2008), N'Go et al (2010). Ces différentes combinaisons ont été utilisées dans le cadre de cette étude.

2.2. La composition colorée

Elle utilise le codage RVB qui représente l'espace des couleurs à partir de 3 couleurs ; Rouge (700,0 nm), Vert (546,1 nm), et Bleu (435,8 nm). Le résultat est une image colorée qui superpose 3 bandes, chaque bande étant affectée à l'une des couleurs du codage RVB. La composition colorée est souvent dite en « fausses couleurs » car on ne n'utilise pas toujours les 3 bandes du visible pour cette opération.

Les compositions suivantes : $(TM4, TM5, TM7)$, $(TM7, TM5, TM2)$, $(TM5, TM4, TM3)$ facilitent la discrimination visuelle des linéaments d'après Dickens (2005), N'Go et al (2010), et Koita et al (2010).

2.3. L'analyse en composante principale

L'ACP permet de dé-corréler l'information contenu sur les différentes bandes puis de les regrouper sur un minimum de nouvelles bandes appelées néocanaux. Elle permet ainsi de réduire le nombre de bande à manipuler par la suite. Les résultats de plusieurs études ont

montré que généralement les 3 premières bandes résultantes de l'ACP concentrent l'essentielle de l'information (plus de 95%) des 7 bandes. Scanvic (1983), Assoma (2005), Ngo et al. (2010), Koita et al. (2010).

Ta et al. (2008) propose une ACP sélective qui consiste à utiliser les bandes 3 par 3, par exemple les bandes 1,2 et 3 puis 4, 5 et 6 pour la réalisation de plusieurs ACP.

Dans le cadre de cette étude une analyse en composante principale utilisant toute les 7 bandes a été adoptée.

2.4. Le filtrage

Le filtrage est une opération qui a pour but d'extraire une information ou d'améliorer l'aspect de l'image, par exemple en éliminant un bruit ou en améliorant les contours d'une image floue.

En fonction des opérations mathématique réalisées on peut dégager plusieurs types de filtre : filtre de convolution (passe bas, Sobel, Gradient), filtre morphologique, filtre adaptatif, filtre par transformer de fourrier etc.

Les filtres les plus utilisés pour l'identification des linéaments sont des filtres de convolutions de de types Sobel, Gradient et Laplacien.

Savané et al. (1997), Savané et Biémi (1998), Kouamé et al. (1999), Dickens (2005), Ta et al. (2008), Koita et al (2010), Ngo et al. (2010) ont pu identifier des linéaments avec les filtres Sobel de fenêtre 3×3 , 7×7 , et 11×11 .

2.5. L'extraction manuelle des linéaments

Cette étape est la dernière partie dans le traitement d'images en vue de l'identification des linéaments. Après l'application des techniques ci-dessus citées, l'image est rehaussée et les contours et limites sont mis en évidence. Avant l'extraction des linéaments les éléments linéaires d'origine anthropique (routes, pistes, fils électriques et téléphoniques) sont recensés et superposés aux images afin d'éviter de les considérer comme des linéaments.

L'identification et le tracé des linéaments se fait ensuite à l'écran.

Sur les images filtrées, les linéaments sont matérialisés par les limites formées par les zones sombres et claires (Ta et al, 2010). Les discontinuités et les changements brusques de tonalité observés sur les images rehaussées sont représentés par des segments de droite (Koita et al, 2010). Selon Saley (2003) l'échelle d'observation peut jouer sur le nombre de linéaments identifiés, parfois sur la direction dominante d'une classe de linéaments et suggère l'échelle 1/200 000 pour une identification maximale des linéaments.

2.6. Validation de la carte de linéaments

Les linéaments identifiés devront être validés. En effet les linéaments sont des discontinuités images qui sont censés traduire des phénomènes tectoniques profonds mais ce n'est pas toujours le cas. D'où la nécessité de valider la carte de linéaments obtenus suite à un traitement d'images par confirmation de la relation supposée entre linéaments et fractures.

Les techniques classiques de validation reposent sur l'utilisation des cartes géologiques et les relevés de fractures sur affleurements rocheux. On compare ainsi les directions principales mises en évidence avec les directions relevées sur les affleurements ou sur la carte géologique de la zone d'étude.

Ces techniques présentent cependant des limites lorsqu'on ne dispose pas de cartes géologiques détaillées de la zone ou lorsque l'épaisseur de l'altération est telle que des affleurements ne sont pas observables. C'est précisément le cas dans le Kourwéogo, ou du moins aux alentours du site expérimentale de Sanon. La géophysique sera alors utilisée pour l'étude de validation de certains linéaments qui auront été relevés. La méthode géophysique utilisée sera la Tomographie qui permet d'identifier les fractures en milieu de socle fracturé.

III. Prospection géophysique

1. La géophysique appliquée à l'hydrogéologie

La géophysique est l'application d'un ensemble de méthodes et techniques pour l'étude et la caractérisation physique de la terre par des mesures indirectes.

Lorsque la géophysique est appliquée à la recherche d'eau souterraines et à l'étude des aquifères on parlera plus d'hydro géophysique. Elle est basée sur l'étude faite à la surface du sol d'un paramètre physique lié à la constitution des roches du sous-sol comme par exemple la densité, la vitesse de propagation des ondes élastiques, les propriétés électriques et magnétiques (CEFIGRE, 1990).

La géophysique est un outil essentiel aux études hydrogéologiques dans l'identification des structures et formations du sous-sol, susceptibles de contenir et de drainer les eaux souterraines. Par ailleurs suite à une étude et identification de fractures sur une image satellite, la géophysique est une méthode complémentaire qui permet de matérialiser ces fractures sur le terrain.

Il existe une multitude de méthodes géophysiques qui dépendent des propriétés physiques mesurées en surface. Les méthodes électriques et électromagnétiques sont les plus employés pour l'hydrogéologie car le principal paramètre opérationnel (la résistivité ou son inverse la conductivité) est influencé par la nature des roches mais également par la quantité et la qualité de l'eau d'imbibition (Mc Neil, 1980 in Vouillamoz, 2003).

2. Les méthodes électriques (méthodes de résistivités électriques)

Principe

Les méthodes électriques représentent l'ensemble des méthodes basées sur l'étude des propriétés électriques des formations géologiques. Ces propriétés sont essentiellement la résistivité électrique et son inverse la conductivité.

La conductivité d'une roche et donc sa résistivité va dépendre de la géométrie des pores, la quantité de l'eau d'imbibition dans l'unité de volume de la roche, et la qualité de l'eau (quantités de sels dissous, température).

Le principe consiste à injecté en surface un courant (I) à travers deux électrodes d'injection (A et B). Le passage du courant dans le sol se fera par des filets rectilignes et produira une différence de potentiel influencée par la résistivité du terrain.

Cette différence de potentiel (ΔV) est mesurée à travers deux électrodes de réceptions (M et N). La profondeur de terrain investigué est proportionnelle à l'écartement des électrodes A et B soit $z = AB/2$.

Sur le terrain on peut calculer immédiatement une résistivité apparente des formations selon la formule $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$,

Où K est un facteur géométrique qui dépend de la position relative des électrodes d'injection et de mesure. $K = \frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$

L'arrangement des électrodes du quadripôle ABMN définit un dispositif de mesure : Schlumberger, Wenner, Pole-Pole, Pole-dipôle etc.

On distingue 3 techniques de prospection électrique. Le trainé électrique, le sondage électrique et la tomographie électrique.

Le trainé électrique met en évidence des contrastes de résistivités latérales (zones faillées, contact lithologique et d'autres accidents tectoniques) des faciès, selon une épaisseur d'investigation constante ; tandis que l'interprétation des données de sondage va permettre de déterminer ponctuellement l'épaisseur de la zone altérée, puis de la zone fissurée ou de discontinuité du socle (Sombo et al, 2011).

La tomographie électrique, technique utilisée dans cette étude réalise à la fois un sondage et un trainé.

3. La tomographie électrique

Elle consiste à mettre en œuvre un très grand nombre de quadripôles de dimensions différentes et de positions différentes, le long d'un ou de plusieurs profils. Ce très grand nombre de mesures indépendantes réalisées sur une superficie donnée permet une différenciation maximale des formations géologiques, latéralement et verticalement (Toé, 2004). La multitude d'électrodes dites intelligentes est contrôlée par un système automatique qui sélectionne les électrodes actives, certaines pouvant jouer le rôle d'électrodes de courant, d'autres celui d'électrodes de potentiel. Les données récupérées de l'appareil de mesure sont inversées par des logiciels (Res2Dinv par exemple) avant interprétation.

La tomographie fournit une image électrique 2D du sous-sol encore appelé pseudo-section qui reflète qualitativement les variations spatiales de la résistivité apparente. Sur cette image 2D on peut repérer les fractures caractérisées par une résistivité plus faible par rapport à celle de la roche saines et aux droits desquelles l'altération est plus marquée.

Les problèmes d'inversion : équivalences et hétérogénéités localisées

L'inversion des résultats d'une tomographie n'est pas unique. En effet il existe un phénomène d'équivalence qui fait que deux terrains différents de résistivités ρ_1 et ρ_2 et d'épaisseurs Δz_1 et Δz_2 peuvent donner la même réponse pour peu que $\Delta z_1 \cdot \rho_1 = \Delta z_2 \cdot \rho_2$.

Par ailleurs, l'existence de couches à résistivité peu contrasté peut ne pas apparaître, ce phénomène est appelé suppression. Enfin, les couches superficielles minces peuvent également créer des perturbations et conduire à une mauvaise interprétation des résultats.

La sélection du modèle « correct » parmi les solutions nécessite donc des connaissances a priori sur le terrain (géologie, télédétection) étudié, ou l'acquisition d'informations complémentaires permettant de contraindre cette interprétation (Hoareau, 2009).

IV. Analyse statistique des données de forages

Lors de l'exécution d'un forage, plusieurs informations sont enregistrées par les équipes de foration afin de mieux comprendre l'ouvrage et de faciliter son exploitation à long terme. Ainsi sur les fiches de forages on peut trouver des informations telles que : la profondeur totale forée, le niveau statique de la nappe, l'épaisseur d'altération, les profondeurs de venues d'eau etc.

Ces informations sont disponibles sous forme de base de données à la DGRE.

Afin de mieux apprécier l'influence des paramètres ci-dessus cités sur les débits des forages des analyses statistiques sont réalisées sur les données de forages de l'ensemble de la province du Kourwéogo.

Il s'agit d'analyser la variation de la profondeur d'ouvrage, de l'épaisseur d'altération, de la profondeur de venue d'eau, de l'épaisseur d'altération saturée en fonction du débit de l'ouvrage.

On recherche également une corrélation sur l'ensemble de ces paramètres à partir d'une analyse en composantes principales.

Toutes ces analyses permettront de mettre en évidence les liens ou l'absence de liens entre l'évolution des différents paramètres. La connaissance de ces relations et leur interprétation permettra d'orienter au mieux les futures campagnes d'hydraulique dans la zone d'étude.

DEUXIEME PARTIE : RESULTATS, INTERPRETATION ET DISCUSSION

Chapitre I : Traitement des images et extraction des linéaments

I. Traitement des Images

- Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales a permis de décorréler les bandes et de rassembler l'information sur la première bande de L'ACP à savoir l'ACP1. En effet ce néo-canal concentre à lui seul 99% de l'information. Il a d'ailleurs contribué à l'identification de la majorité des linéaments. La figure 2 présente une partie de ce canal. Les linéaments mis en évidence sont représentés en rouge.

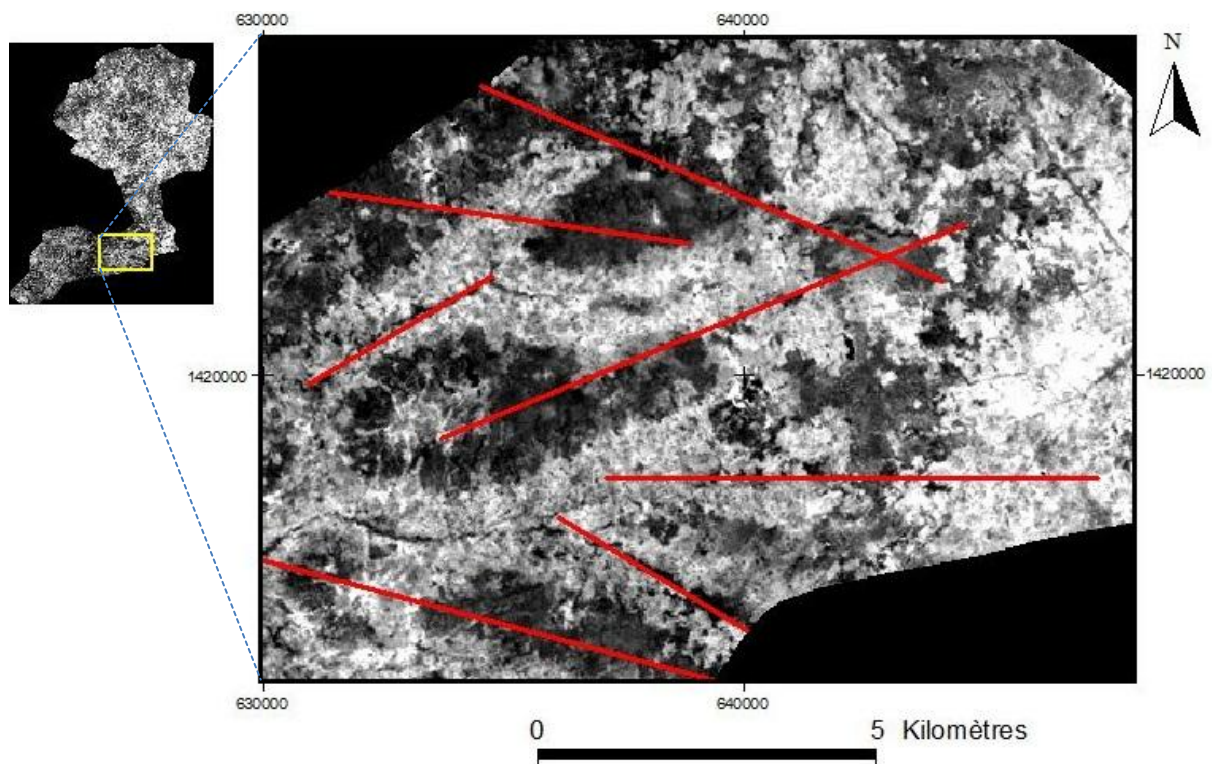


Figure 2: Mise en évidence des linéaments sur la première composante principale (ACP1)

- L'application des filtres

Les filtres Sobel et Laplace 3×3 ainsi que des filtres directionnels d'angles variables ont été appliqués aux différentes bandes de l'image. Le filtre Sobel 3×3 a ensuite été appliqué à la combinaison de bande (TM6 - TM7) / (TM6 + TM7) et au néo-canal ACP1.

L'application de ces filtres a permis d'identifier quelques linéaments mais la majorité des linéaments à ce niveau mis en évidence sur le résultat du filtrage directionnel 60° , Sobel 3×3 sur ACP1, Sobel 3×3 sur la combinaison (TM6 - TM7) / (TM6 + TM7).

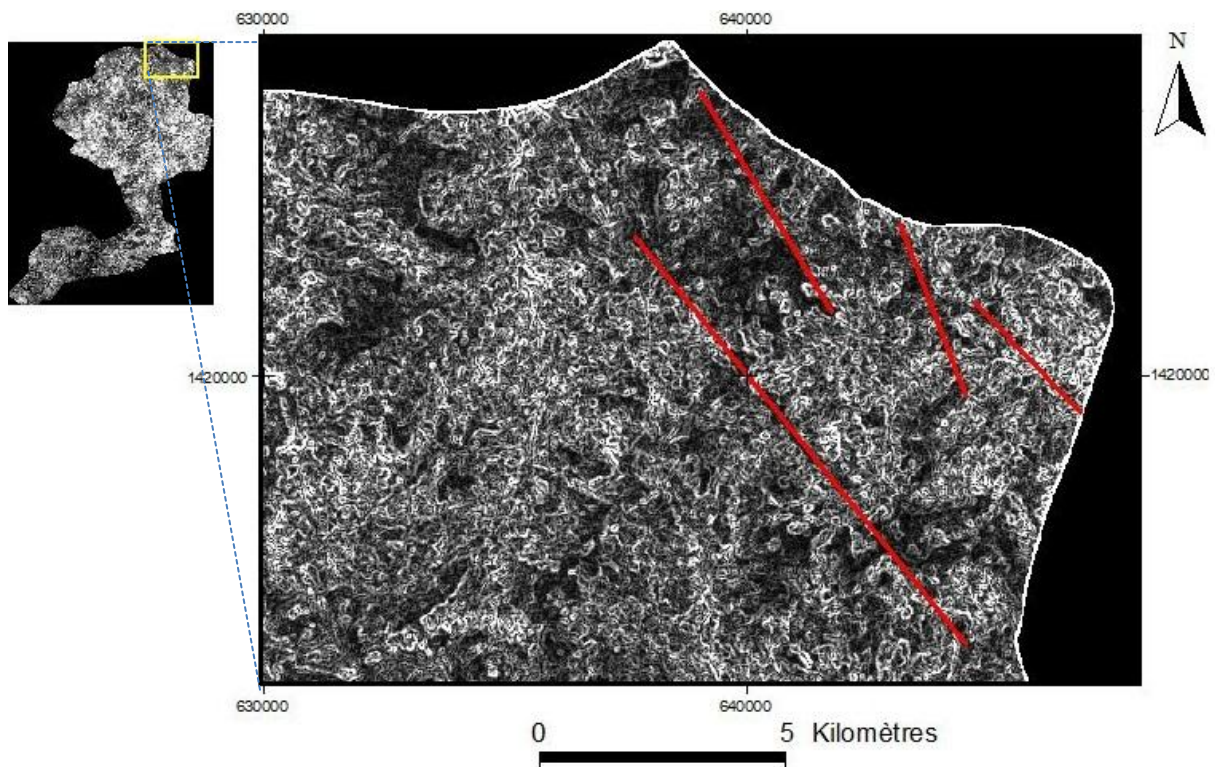


Figure 3: Linéaments mis en évidence par le filtre Sobel 3×3 sur l'ACP1

- Les combinaisons de bandes

Les combinaisons suivantes ont été étudiées : (TM7 + TM6), (TM4 + TM6), (TM5/TM4), (TM6 - TM7) / (TM6 + TM7). Des linéaments ont été identifiés sur les combinaisons (TM5/TM4) et (TM6 - TM7) / (TM6 + TM7).

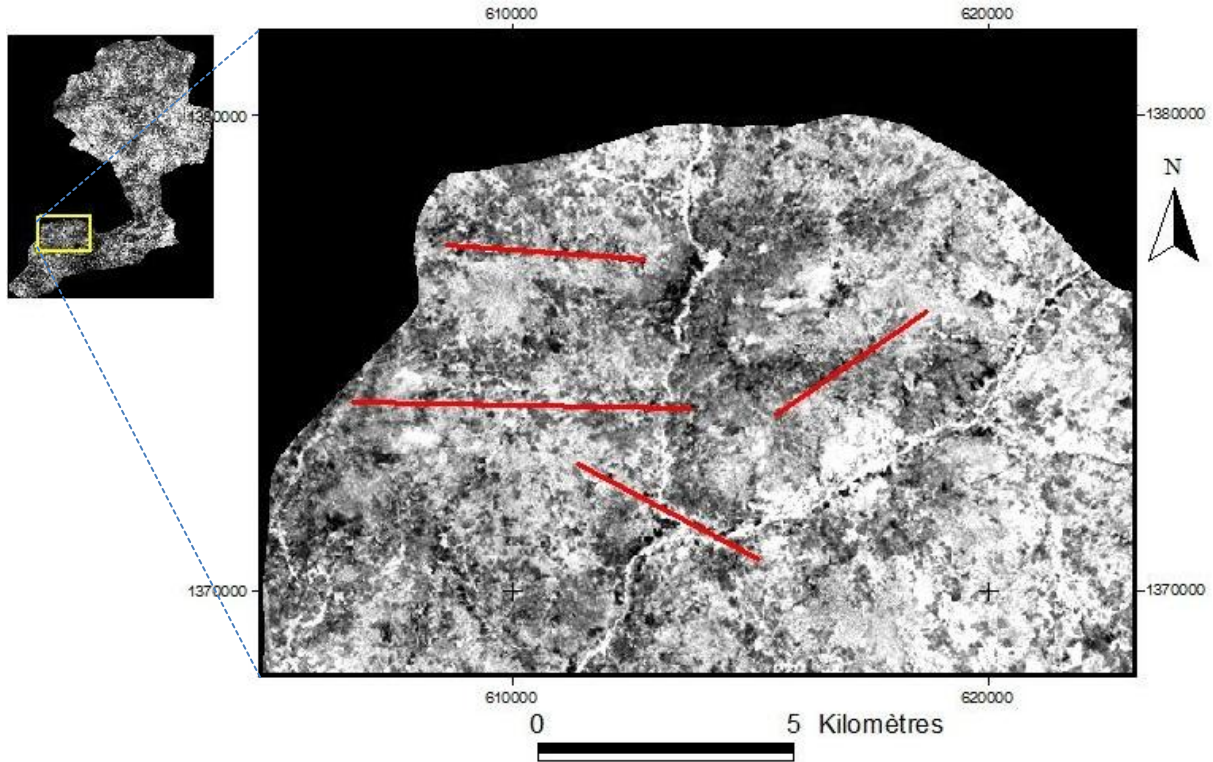


Figure 4: Linéaments identifiés sur la combinaison (TM6 - TM7) / (TM6 + TM7)

- Les compositions colorées

La composition colorée (TM7, TM5, TM2) a permis de mettre en évidence certains linéaments.

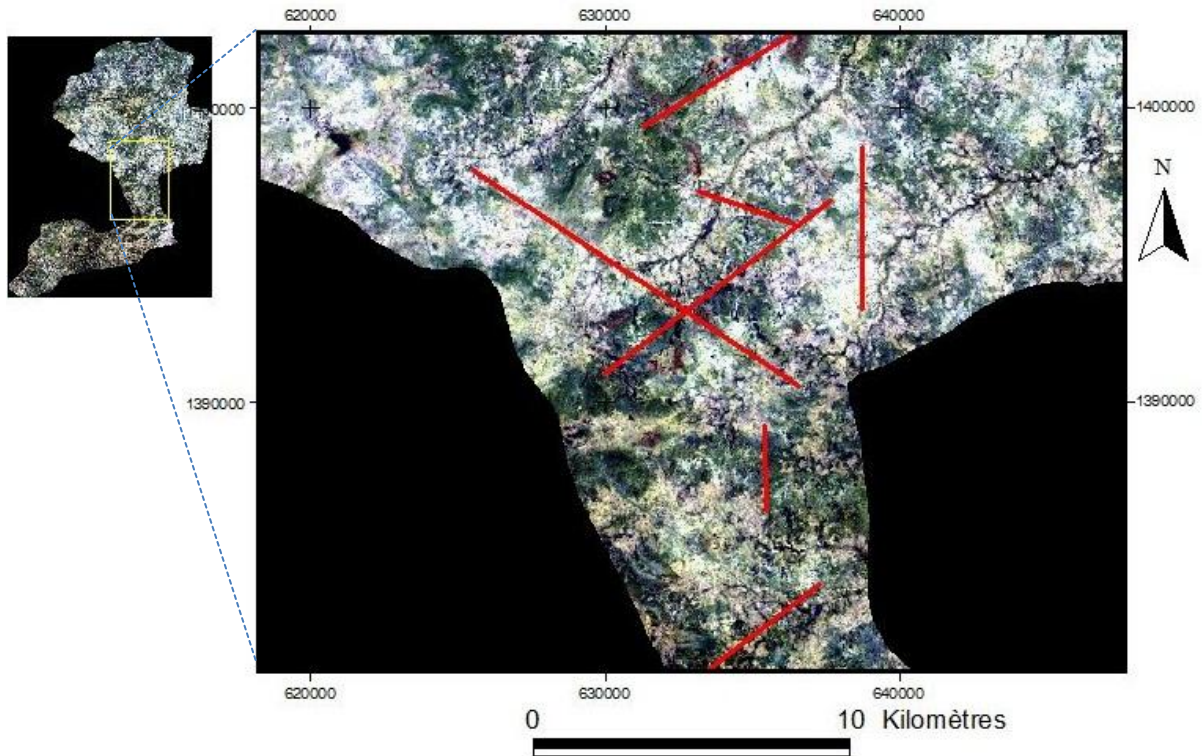


Figure 5: Composition colorée (TM7, TM5, TM2) faisant ressortir des linéaments

La carte des linéaments (figure 6) a été réalisée suite à l'interprétation des images issues des différentes techniques de traitement. Elle compte 113 linéaments de longueurs variables allant de quelques centaines de mètres à des dizaines de kilomètres.

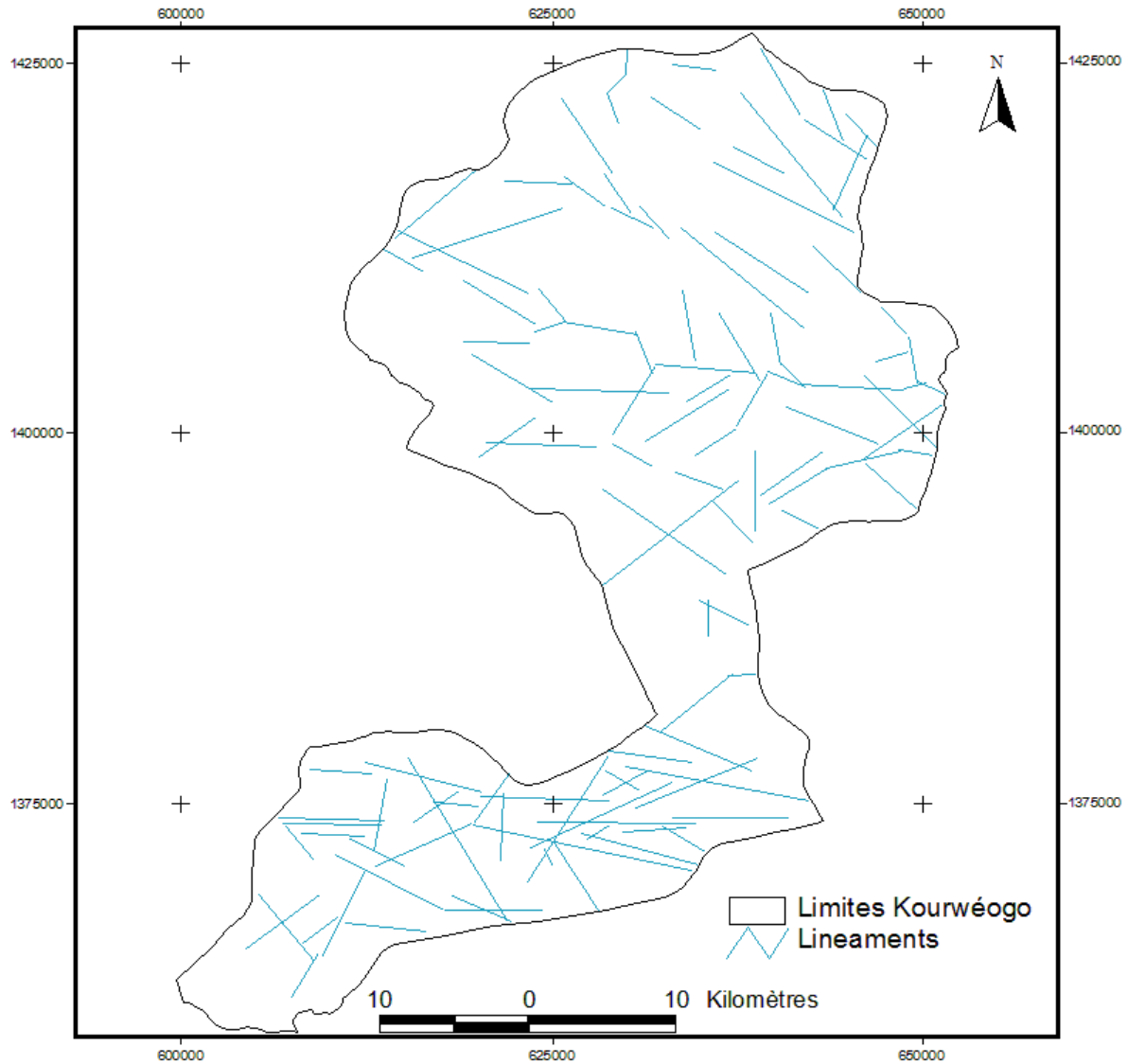


Figure 6: Carte des linéaments du Kourwéogo

II. Validation de la carte linéamentaire par Tomographie électrique

Pendant 2 jours de terrain, trois profils ont été réalisés avec le Syscal dans le Kourwéogo aux environs du site expérimental de Sanon. Ces profils sont implantés perpendiculairement aux linéaments identifiés sur l'image Landsat afin de vérifier le lien de ces linéaments avec les fractures. Les profils ont également été implantés près des forages existant pour vérifier si ces forages ont été implantés suite à l'identification de structures particulières.

La figure 7 présente la situation des profils.

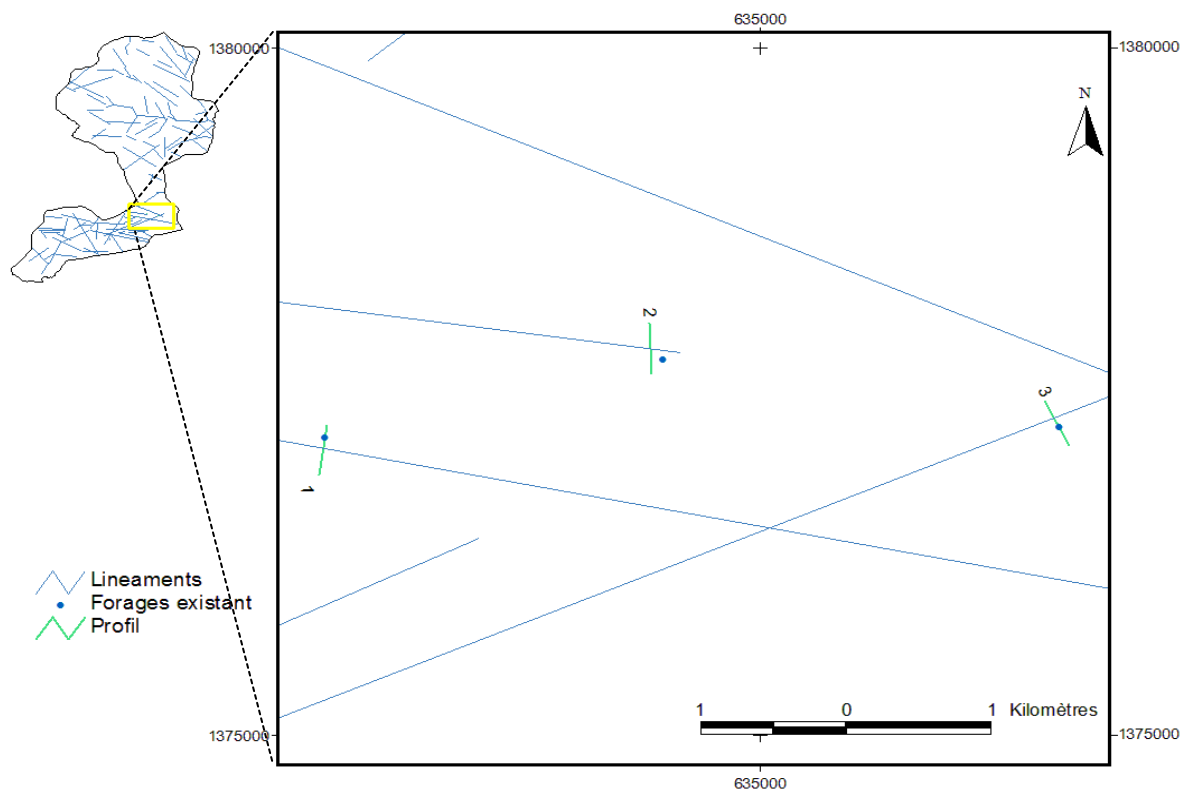


Figure 7: Situation des tomographies réalisées

L'inversion des mesures avec le logiciel Res2dinv donnent des pseudo-sections illustrées sur les figures 8,9 et 10.

A partir de la connaissance à priori que nous avons de la géologie du Kourwéogo, on peut essayer de reproduire la succession des différentes couches de terrain sur ces pseudo-sections. Le profil général identifiable sur ces pseudo-sections est le suivant :

De la surface vers le bas :

- Cuirasse latéritique (si elle existe)
- Altération (plutôt argileuse)
- Socle fissuré
- Socle sain

Les linéaments qui étaient recherchés à travers la géophysique sont représentés sur les images 2D par des zones où l'épaisseur d'altération est plus importante et semble s'incruster dans la roche saine. En effet le front de l'altération commence au niveau des fractures. Ce qui explique qu'au droit de celles-ci l'altération est plus poussée.

Profil 1

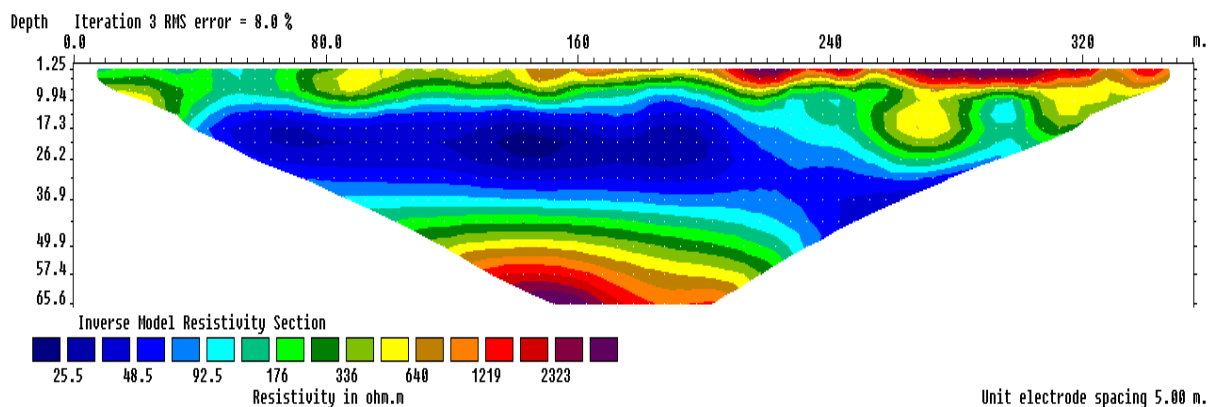


Figure 8: Pseudo-section du profil 1 (site de Sanon)

Sur le profil 1, on note la présence d'une cuirasse latéritique en surface avec des valeurs de résistivité moyenne de 1000 $\Omega.m$. Cette cuirasse repose sur une épaisse couche d'altération (10-40m) de nature plutôt argileuse vue les faibles valeurs de résistivité (autour de 80 $\Omega.m$, couleur bleue). Les valeurs de résistivités remontent ensuite avec la profondeur traduisant le milieu fissuré (de 200 à 700 $\Omega.m$; vert-jaune). Au-delà de 60 m le socle sain commence à apparaître (2000 $\Omega.m$).

Autour de 240m (électrode 48) sur le profil, l'horizon altéré argileux est plus épais et semble être plus profond. La pseudo-section n'est pas assez profonde à ce niveau mais cette structure

montre l'occurrence d'une fracture profonde, celle qui a été identifiée sur l'image Landsat et qui était recherchée par la réalisation de ce profil.

La présence du forage existant situé au niveau de l'électrode 18 (80 m) n'entraîne pas de structure particulière sur le profil. Si ce forage a été implanté sur une fracture la profondeur de la pseudo-section à ce niveau ne permet pas de la mettre en évidence.

Profil 2

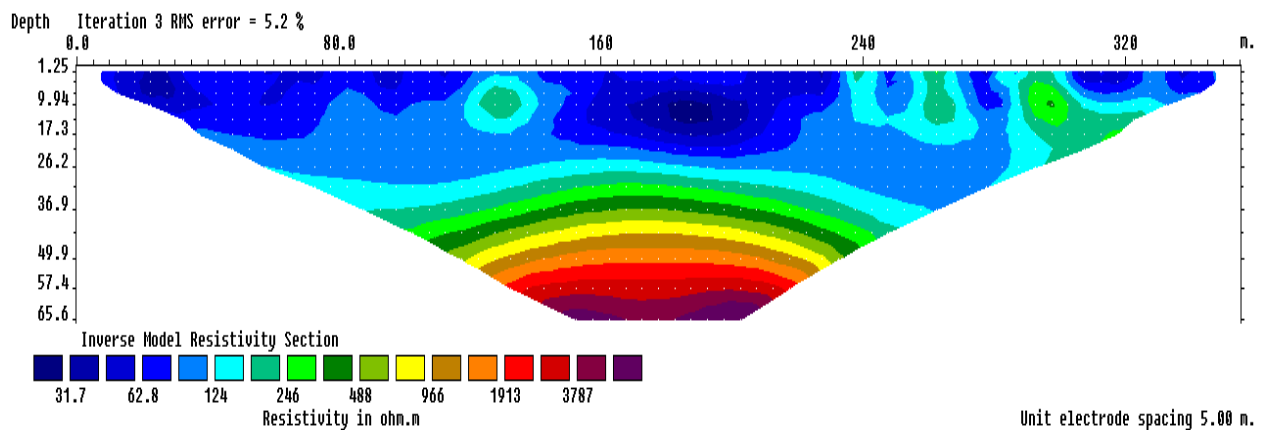


Figure 9: Pseudo-section du profil 2

Ce profil n'a pas de cuirasse latéritique en surface. La succession des couches est similaire à celle du profil 1. Le socle commence à apparaître autour de 60 m. Le linéament recherché pourrait se situer vers 250 m le long du profil. Cette partie est marquée par une couche d'altération plus épaisse et qui pénètre plus en profondeur. Un profil centré sur cette partie aurait permis de mieux cerner cette particularité.

Il n'y a pas de structure particulière à l'emplacement du forage existant (électrode 18 ; 80m).

Profil 3

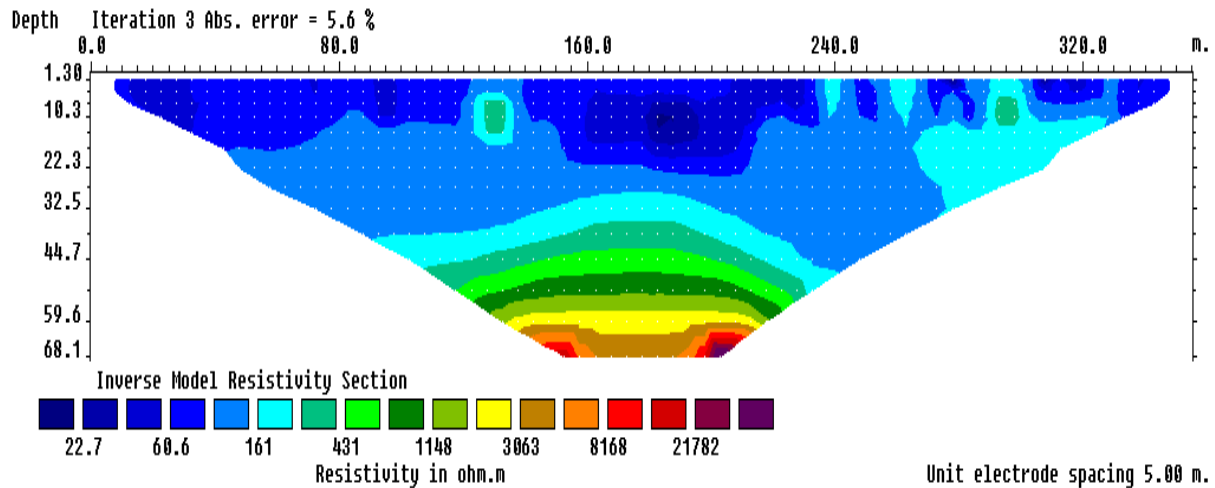


Figure 10: pseudo-section du profil 3

Le profil 3 ne présente pas de cuirasse latéritique en surface. Il semble moins argileux que les 2 profils précédents. Le linéament visé semble excentrer vers la droite aux environs de 240 m sur le profil où l'altération est plus marquée et semble plus profonde.

Sur ce profil la situation du forage existant (électrode 54 ; 270 m) est marquée par une altération moins argileuse avec des valeurs de résistivité un peu plus élevées (150 Ω .m). C'est ce qui a peut être justifié le choix de ce site pour l'implantation du forage en question.

Synthèse

Les trois profils présentés reproduisent en général la structure du sous-sol du Kourwéogo. Les linéaments qui étaient recherchés apparaissent mais sont malheureusement excentré sur le profil et ne permettent pas d'apprécier le phénomène plus en profondeur. Ce décalage peut être dû à un problème de compatibilité entre le géo référencement de l'image Landsat utilisé et le GPS qui a servi à matérialiser les linéaments sur le terrain. En général les profils réalisés sont excentrés par rapport au linéament recherché.

Néanmoins il semble que la validation des linéaments par tomographie électrique est tout à fait possible au vu des résultats obtenus.

Il est suggéré à l'avenir de géo référencer les images Landsat à partir de point connus sur le site d'étude avant de procéder au traitement. Ce traitement préalable permettra de mieux situer les linéaments sur le terrain.

III. Analyse du réseau linéamentaire

1. Distribution des directions de fracturation (rosace directionnelle)

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. (Ta et al, 2008). Pour ce faire l'angle des linéaments a été calculé sous SIG avec la formule suivante :

$$\tan\alpha = \frac{|X_{End} - X_{Start}|}{|Y_{End} - Y_{Start}|}$$

Avec X_{End} , Y_{End} et X_{Start} , Y_{Start} les coordonnées des extrémités du linéament. α , l'angle par rapport au Nord du linéament, exprimé en radian.

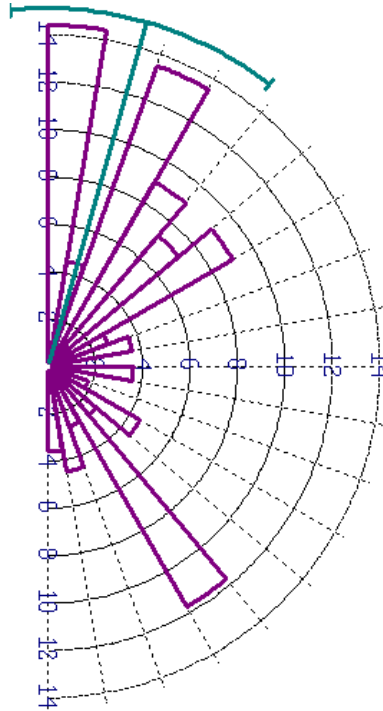


Figure 11:Histogramme circulaire (rosace directionnelle) en nombre des linéaments issus du traitement de l'image Landsat

Les principales directions de linéaments représentées sur la rosace directionnelle sont : Nord-Sud (N0-N10°) ; N20-30° et N140-150°.

Dans une proportion plus faible les directions N30 - 40°, N40-50° et N50-60° sont également représentées.

2. Comparaison avec des résultats antérieurs

La tectonique du Burkina est dominée par des fractures de directions NE-SW et NNE-SSW. Ces 2 directions sont représentées sur la carte linéamentaire du Kourwéogo par les directions N40-50° et N20-30°. Par ailleurs l'étude BRGM-AQUATER (1990) sur le site expérimentale de Sanon au Sud de la province du Kourwéogo a mis en évidence les directions N55-N75° E, N115-N125°E et N145-N165°E. Par rapport à la présente étude, les directions N55-N75° E et N145-N165°E sont représentées respectivement par les directions N50-60° et N140-150°. La différence réside au niveau de la direction N115-N125°E qui n'est pas représentée sur la carte linéamentaire du Kourwéogo. Cette différence peut être due à un biais d'échelle.

Les principales directions présentes sur la carte linéamentaire sont presque identiques à celles des études précédentes. Une différence apparaît au niveau de la direction N0-N10° qui est bien représentée dans cette étude mais pas dans les études antérieures. Cette direction est néanmoins l'une des 4 directions d'Afrique de l'Ouest (E-O ; NE-SO ; N-S et NO-SE).

Chapitre II : Analyse statistique des données de forage

I. Description des paramètres

Une analyse statistique a été menée à partir de données de 134 forages réalisés dans le Kourwéogo. Les paramètres statistiques qui caractérisent ces forages sont consignés dans le tableau 1.

Les débits des forages (débits estimés) varient entre 0,4 m³/h et 18 m³/h avec une moyenne de 3,4m³/h. Sur la population de 134 forages 67 (soit 50%) ont un débit supérieur à 2 m³/h. Ce débit est considéré comme significatif par Savané (1997). 24% des débits sont supérieurs à 5m³/h qualifié de débit fort par le CIEH. Le débit spécifique moyen vaut 0,4 m²/h avec des extrêmes allant de 0,01 à 17,2 m²/h. Les paramètres débit et débit spécifique ont des coefficients de variation supérieurs à 100%. La dispersion de ces deux paramètres expliquée par le coefficient de variation traduit l'hétérogénéité des milieux fissurés.

Dans le Kourwéogo, les profondeurs des forages réalisés varient entre 40m et 103m avec une profondeur moyenne de 59m. Pour ce qui est de l'épaisseur d'altération, avec un minimum de 7m, le maximum d'altération culmine autour de 78m. Cette couche d'altération est souvent sèche en témoigne les valeurs nulles au niveau de l'épaisseur d'altération saturée. L'altération est cependant saturée localement sur près 72m. Enfin les profondeurs de fractures hydrauliquement actives caractérisées ici par les profondeurs de venues d'eau varient entre 13m et 79m pour une moyenne de 42m. Les coefficients de variation pour l'ensemble de ces paramètres sont inférieurs à 100%. Ce qui met en évidence une certaine homogénéité des variables donc une faible dispersion.

Tableau 1: Statistique descriptive des paramètres de forage

	Qest (m ³ /h)	Qspé (m ² /h)	Pt (m)	EpAlt (m)	EpSat (m)	Pve (m)
Minimum	0.4	0.01	40.0	7.0	0.0	13.0

Maximum	18.0	17.2	103.0	78.0	72.0	79.0
Moyenne	3.4	0.4	59.3	36.5	20.3	41.9
Ecart-type	3.3	1.5	12.0	13.2	14.0	10.9
CV	1.0	4.2	0.2	0.4	0.7	0.3

Pt : Profondeur totale de l'ouvrage

Qest : Débit estimé

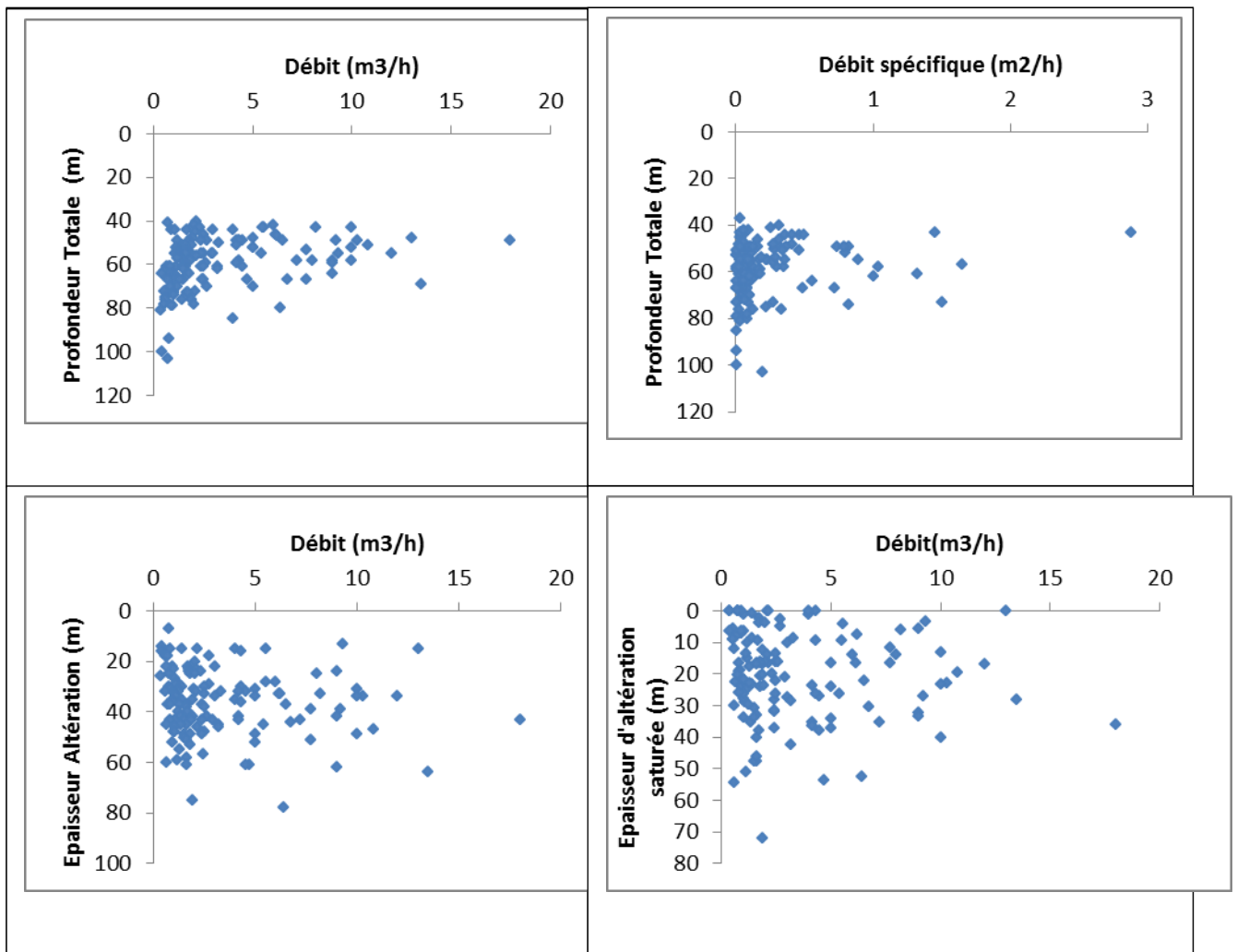
EpAlt : Epaisseur de la couche d'altération

EpSat : Epaisseur d'altération saturée

Qspé : Débit spécifique

Pve : Profondeur de venue d'eau

II. Relation entre débit et paramètres d'ouvrages



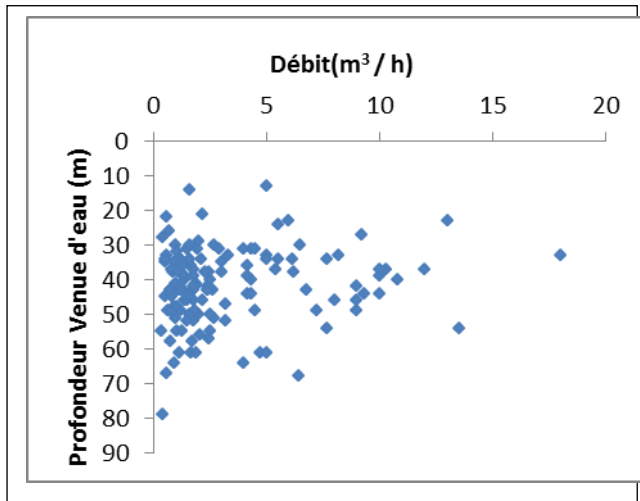


Figure 12: Graphes de variation des paramètres de forages en fonction du débit

Tableau 2: Tableau des coefficients de corrélation

Couple de Paramètres	Coefficient de corrélation
Débit-Profondeur Totale	-0.30
Débit spécifique-Profondeur Totale	-0.08
Débit-Epaisseur d'altération	0.11
Débit-Epaisseur Saturée	0.08
Débit-venue d'eau	-0.14

Le tableau 2 montre une absence de relation significative entre les différents paramètres pris individuellement avec le débit. Cela se traduit par des valeurs de coefficients de corrélation faibles. Néanmoins dans la suite nous montrons que des tendances peuvent se dégager sous certaines conditions lorsqu'on observe les nuages de points.

Les commentaires suivants s'appuient sur les graphes de la figure 12.

- Profondeur totale en fonction du débit

Il n'existe pas de tendance particulière sur ce graphe. Pour la majorité des forages la profondeur totale se situe entre 40 et 80 m. Dans cette frange on retrouve aussi bien des débits importants que des débits faibles. On peut remarquer que les débits les plus forts ($>5\text{m}^3/\text{h}$) ne

correspondent pas aux profondeurs les plus élevées, l'essentiel de ces débits se situent entre 40 et 60m. On note cependant que tous les forages de profondeur supérieure à 85 m ont un débit inférieur à 1 m³/h. Ce qui semble indiquer qu'au-delà de 85 m si un débit conséquent n'est pas obtenu, il n'est pas nécessaire de continuer la foration. En effet à partir d'une certaine profondeur, les fractures deviennent moins denses et certaines se referment ou se colmatent réduisant ainsi les chances de rencontrer de débits importants (Lachassagne & Wyns, 2005). A cet égard Bidi et al (2004) soutient que les forages les plus productifs se situent entre 40 et 60 m dans une étude menée en contexte de socle en Côte d'Ivoire. Dans le même contexte de socle Ngo et al (2005) et Koita et al (2010) suggèrent les profondeurs comprises entre 40 et 70m comme profondeurs optimales.

En général, la profondeur maximale forée lors des programmes d'hydraulique est fixée dès le départ du projet ainsi qu'un débit jugé positif. Si ce débit positif est atteint, la foration est arrêtée immédiatement sans tenir compte de la possibilité de trouver des débits plus conséquents en profondeur. Dans le cas contraire certains forages sont prolongés à la recherche du débit imposé. Ce qui explique que les forages les plus profonds ont été occasionnés par l'absence de débit conséquent dans les premiers mètres. Il n'y a donc aucune considération scientifique dans le choix de la profondeur du forage.

- Profondeur totale en fonction du débit spécifique

Le passage du débit estimé au débit spécifique ne change pas l'allure du nuage de points. C'est toujours dans la plage 40-80 m de profondeur, que se situe la majeure partie des ouvrages. Au-delà de 85 m tous les débits spécifiques deviennent faibles. L'évolution du débit spécifique est similaire à celle du débit estimé. On pourra dans la suite de l'analyse se consacrer à l'analyse du débit estimé par rapport aux autres paramètres. Dans les aquifères fracturés des formations cristalline et métamorphique du centre de la Cote d'Ivoire, Soro et al (2010) a également montré l'absence de corrélation entre ces deux paramètres. Il explique par ailleurs que les débits spécifiques les plus élevés correspondent aux forages les moins profonds.

- Epaisseur d'altération en fonction du débit

Sur ce graphe, il est difficile de dégager une tendance. Si des débits importants sont obtenus entre 10 m et 50 m, la majorité des forages à faible débit se retrouve également dans cette plage. Au-delà de 60 m tous les débits sont supérieurs à $4 \text{ m}^3/\text{h}$, exception faite d'un forage qui produit moins de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ sous 75 m d'altérites. Il semble que le paramètre épaisseur d'altération à lui seul ne saurait garantir l'obtention d'un débit important mais que l'épaisseur d'altération augmente la probabilité d'obtenir des débits importants. Ces résultats sont similaires à ceux mis en évidence par Kouassi et al (2012). Cet auteur stipule que dans les formations granitiques, la majorité des forages productifs se situe entre 5 et 45 m. Par ailleurs, de façon générale lorsque la profondeur d'altération est importante la probabilité d'obtenir un débit important est très grande. Néanmoins il fait remarquer que cette relation n'est pas linéaire car dépendant de la nature de la formation sous-jacente. Dans le même ordre d'idée, Koïta et al (2010) soutient qu'une couche d'altération est généralement présente dans les localités où des débits importants sont implantés.

En effet dès lors que la couche d'altération est assez importante et considérée comme un acquis, la productivité du forage dépendra de la quantité d'eau contenue dans cette altération, de sa capacité à libérer l'eau qu'elle contient, puis de la capacité des fractures sous-jacentes à drainer le réservoir d'altérites. Une analyse de l'évolution du débit en fonction de l'épaisseur d'altération saturée donnera plus de détails sur ces hypothèses.

Cependant Bidi et al (2004) soutient que la productivité des aquifères dans les formations granitiques n'est pas influencé par l'épaisseur d'altération.

- Epaisseur d'altération saturée en fonction du débit

L'épaisseur d'altération saturée est comprise pour l'essentiel de la population de forages entre 0 et 40 m. Des forages à faibles débit existe même pour une épaisseur saturée supérieur à 40 m et allant jusqu'à 60 m. Ce qui confirme la conclusion du paragraphe précédent. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la capacité à libérer l'eau contenue dans les altérites dans ces zones est très faible. Paradoxalement, des débits intéressants existent où la couche d'altération n'est pas du tout saturée. Le réseau de fractures capté par ces forages semble drainer d'autres réservoirs d'altérites situés plus à l'amont.

- Profondeur de venue d'eau en fonction du débit

La distribution des points sur ce graphe a à peu près la même structure que sur le graphe de la profondeur totale en fonction du débit ou celui de l'épaisseur d'altération en fonction du débit. Il n'y a pas de tendance particulière, la profondeur de venue d'eau pour le maximum de forages se situe entre 30 m et 60 m. On a donc des venues d'eaux plus ou moins importantes à toutes les profondeurs.

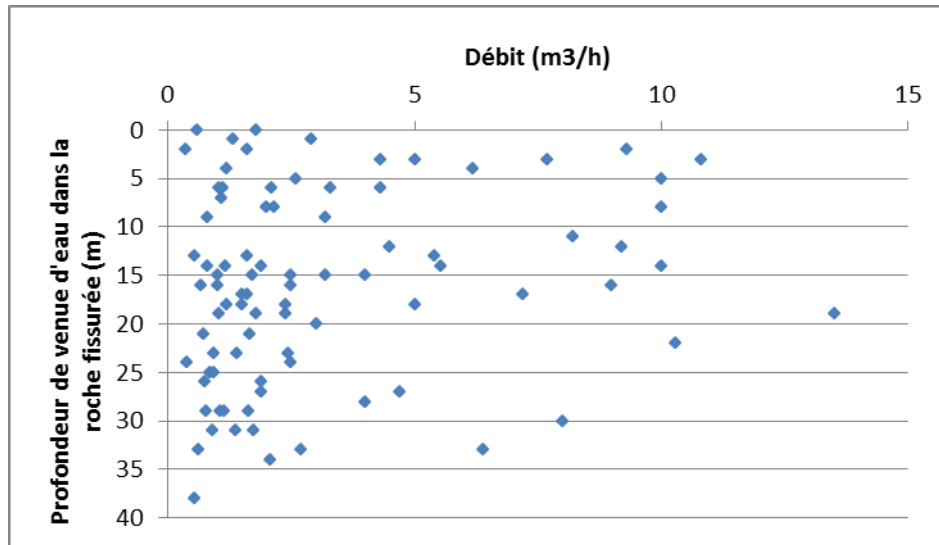


Figure 13: Graphe de la profondeur de venue d'eau dans le socle en fonction du débit

En considérant cette fois-ci non plus la profondeur de venue d'eau à partir du sol mais la profondeur de venue d'eau dans la roche (fracturée/fissurée) tel que illustré par le graphe de la figure 9 on fait le constat suivant : La quasi-totalité des débits supérieurs à 5m³/h sont obtenus dans les 20 premiers mètres.

Ce qui tend à confirmer le résultat énoncé précédemment ; à partir d'une certaine profondeur les fractures sont moins dense et commencent à se refermer. Cette profondeur serait de l'ordre de 30 m sous l'altération dans le Kourwéogo.

III. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse ACP considère toutes les variables prises individuellement dans l'analyse précédente. Elle permet donc d'étudier simultanément les relations entre l'ensemble de ces variables et de déceler éventuellement les variables influencés par plusieurs paramètres.

Tableau 3: Valeurs propres, pourcentages et pourcentage cumulé des principaux facteurs

	F1	F2
Valeur propre	1.892	1.223
% variance	32	20
% cumulé	32	52

Tableau 4: Coordonnées des variables sur les axes principaux

	F1	F2
Profondeur totale	0.849	0.027
Débit	-0.445	0.389
Épaisseur altération	-0.066	0.461
Épaisseur saturée	0.236	0.810
Débit spécifique	-0.400	0.412
Profondeur venue Eau	0.868	0.178

Les facteurs F1 et F2 sont associés à des valeurs propres supérieures à 1 (tableau 3). Selon le principe de l'ACPN seuls les axes associés aux valeurs propres supérieures à 1 sont significatifs. Ces axes dans notre cas expliquent 52% des variables. Ils détiennent ainsi l'essentiel des informations.

Selon les valeurs ayant servi à la réalisation des axes factoriels et consignés dans le tableau 4, le facteur 1 est déterminé par la profondeur totale et la profondeur de venue d'eau. Il existe une corrélation entre ces deux paramètres, confirmé par le coefficient de corrélation le plus élevé (0,64) de la matrice de corrélation (tableau 5). Cette légère corrélation pourrait signifier que quand la profondeur de venue d'eau augmente, la profondeur totale de l'ouvrage augmente. En effet, la foration n'est arrêtée qu'après obtention d'une venue d'eau significative. La profondeur de venue d'eau significative conditionnerait donc la profondeur totale de l'ouvrage.

Le facteur 2 est déterminé par les paramètres épaisseur d'altération et épaisseur d'altération saturée. Ce facteur exprimerait la variation du niveau d'eau dans le réservoir d'altérites. Cependant il n'y a pas de corrélation entre ces deux paramètres d'après la matrice de corrélation.

Tableau 5: Matrice de corrélation des variables

	Profondeur totale	Débit	Epaisseur altération	Epaisseur saturée	Débit spécifique	Profondeur venue eau
Profondeur totale	1	-0.30	-0.01	0.08	-0.13	0.64
Débit		1	0.03	0.08	0.10	-0.14
Epaisseur altération			1	0.11	0.02	-0.06
Epaisseur saturée				1	0.12	0.26
Débit spécifique					1	-0.27
Profondeur venue eau						1

L'analyse de la matrice de corrélation montre qu'il n'y a pas de corrélation significative entre les différents paramètres en général. Néanmoins par rapport aux autres coefficients de la matrice, il existerait une faible corrélation entre la profondeur totale de l'ouvrage et le débit (-0,30). Cette corrélation signifierait que plus la profondeur de l'ouvrage augmente, moins le débit attendu est important. Ce qui confirme une conclusion énoncée plus haut ; à partir d'une certaine profondeur (85 m ou encore 30 m sous les altérites), les chances de rencontrés des débits importants s'amenuisent.

IV. Synthèse

La profondeur d'un ouvrage n'est pas le gage d'un débit important. Aussi à partir de 85m de profondeur ou 30 m sous les altérites, les chances de rencontrer des débits importants sont réduites. Les venues d'eau importantes sont observées dans les 20 premiers mètres de la roche fissurée. La puissance des altérations influence positivement la productivité des ouvrages, seulement il faut que les altérations soit saturée et assez perméables pour libérer l'eau qu'elles contiennent dans une couche sous-jacente fissurée. En général les forages implantés sous plus de 60 m d'altération ont un débit supérieur à 4 m³/h.

CONCLUSION

La cartographie linéamentaire a mis en évidence des linéaments de directions majeures Nord-Sud ; N20-30° et N140-150°. La tomographie électrique a permis de confirmer le lien de certains linéaments avec les fractures profondes qui sont des couloirs de circulation des eaux. La technique d'identification des linéaments par imagerie satellitaire suivie d'une validation par la géophysique semble adaptée à l'étude des aquifères de socle fracturé.

Dans la province du Kourwéogo les débits oscillent entre 0,36m³/h et 18m³/h avec une moyenne de 3,4 m³/h. La productivité des ouvrages dans cette province est généralement bonne avec la moitié des ouvrages ayant des débits supérieurs à 2m³/h pour 24% ayant des débits de plus de 5m³/h. Le débit est marqué par une forte variabilité qui traduit l'hétérogénéité de l'aquifère étudié. Les débits ne sont généralement pas influencés par la profondeur totale de l'ouvrage plus influencées par les directives de projets que par des considérations scientifiques. Au-delà de 85m ou 30m dans la roche fissurée, il n'est plus économiquement rentable de poursuivre la foration. La puissance de l'altération associée à une bonne perméabilité et à une fissuration sous-jacente augmente la productivité des forages. L'analyse des données de forage met ainsi en évidence la nécessité de rechercher des zones où une couche d'altération saturée et suffisamment transmissive est drainée par un important réseau de fissures et fractures.

Ces connaissances doivent maintenant servir à des choix plus judicieux dans les prochaines campagnes de forages dans le Kourwéogo.

Une analyse spatiale aurait pu mettre en évidence le rôle des linéaments dans les écoulements souterrain et confirmer ainsi le fait que ces linéaments sont l'expression en surface des événements tectoniques. Malheureusement cette étude n'a pas pu être menée car les coordonnées marqués comme coordonnées des forages sont le plus souvent ceux du village le

plus proche. Ce qui rendait difficile la localisation de la plupart des ouvrages dans l'espace. Il apparaît important de remédier à ce problème dans les futurs projets vu l'intérêt que peut présenter la spatialisation de l'information hydrogéologique pour les études de caractérisation.

PERSPECTIVES

Dans des études à venir, une analyse des paramètres hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emmagasinement) et leur influence sur la productivité des ouvrages permettra de compléter la connaissance de l'aquifère du Kourwéogo. La détermination des paramètres hydrodynamiques pourra utiliser la méthode de la dérivée du rabattement. Cette méthode est très utilisée pour les puits de pétrole, moins utilisée par les hydrogéologues, mais des études récentes ont montré qu'elle pourrait être intéressante pour l'hydrogéologie.

L'extraction du réseau linéamentaire par traitement d'images satellitaires suivie d'une validation par prospection géophysique pourra être appliquée sur d'autres sites du Burkina afin d'en étudier la pertinence. Le géo référencement des images Landsat à partir de points connus sur le site d'étude permettra de mieux situer les fractures présumées et d'améliorer la validation par tomographie électrique. Le principe consisterait à repérer à l'aide d'un GPS unique des points particuliers comme les intersections de routes dans la zone d'étude. Ces points serviront à caler l'image satellitaire avant de procéder à l'étude du réseau linéamentaire.

Références

- Assoma, T. V. (2005). *Combinaison d'images ROS de RADARSAT-1 et d'ERS-2, et ETM+ de Landsat 7 pour la cartographie des potentialités hydrogéologiques des aquifères de socle fracturé: cas du bassin versant du Koué à l'Ouest de la Cote d'Ivoire*. DEA.
- CEFIGRE. (1990). *L'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest: synthèse des connaissances , socle cristallin et cristallophyllien et sédimentaire ancien* (éd. 2e).
- Compaoré, G. (1997). *Evaluation de la fonction Capacitive des altérites, Site expérimentale de sanon: Socle Granito-gnessique sous climat de type Soudano-Sahélien*. Thèse de Doctorat.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J., & Krishnamurthy, N. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*(330), 260-284.
- Dibi, B., Inza, D., Goula, B., Savané, I., & Biémi, J. (2004). analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud-Est de la Cote d'Ivoire). *Sud Sciences & Technologies*(13), 22-31.
- Dickens, A. (2005). *Détermination des sites potentiels à l'implantation de forage par Télédétection et SIHRS: cas de Dimbokro*. DEA.
- Dubois, J. (1999). *Identification des linéaments dans les images satellitaires par ajustement et suivi de segments*. Maitrise M. ING.
- El Hadani, D. (1997). Télédétection et système d'information géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. *Proceedings of Rabat Symposium S3, April 1997. IAHS Publ*(242), 197-204.

- Hoareau, J. (2009). *Utilisation d'une approche couplée hydrogéophysique pour l'étude des aquifères: Applications aux contextes de socle et côtier sableux*. Thèse de doctorat.
- Koita, M., Jourde, H., Ruelland, D., Koffi, K., Pistre, S., & Savane, I. (2010). Cartographie des accidents régionaux et identification de leur rôle dans l'hydrodynamique souterraine en zone de socle. Cas de la région de Dimbokro-Bongouanou (Côte d'Ivoire). *Hydrological Sciences Journal*, 55(5), 805-820.
- Kouamé, F., Gioan, P., Biémi, J., & Affian, K. (1999). Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitaires: exemple de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. *Téledétection*, 1, 139-156.
- Kouassi, A.M.; Ahoussi, K.E.; Yao, K.A; Ourega, W.E.J.A; Yao, K.S.B; Biemi, J. (2012) Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région de Nzi-Comoé (Centre-est de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 10, 57-74
- Lachassagne, P., & Wyns, R. (2005). Aquifères de socle : nouveaux concepts, Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Géosciences*(2), 32-37.
- Maréchal, J., & Dewandel, B. (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 40(11508).
- Ngo, A. Y., Lasm, T., Koita, M., & Savané, I. (2010). extraction par télédétection des réseaux de fracture majeures du socle Précambrien de la Région de Dimbroko (Centre Est de la Côte d'Ivoire). *Revue Télédétection*, 9(1), 33-42.
- Savané, I., GOZE, B., & Gwin, Q. (1997). Evaluation de la productivité des ouvrages dans le socle par l'étude des fractures et le GIS dans la région nord-ouest de la Côte d'Ivoire. *Hard Rock Hydrosystems (Proceedings of Rabat Symposium S2, May 19)*(241).
- Savané, I., & Biémi, J. (1998). Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord Ouest de la Côte d'Ivoire). *Téledétection*, 1, 47-64.
- Scanvic, J. Y. (1983). *Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre*. BRGM.
- Sombo, A. P., Kouassi, F., Sombo, B., Kouamé, L., & Kouassi, E. (2011). Contribution de la Prospection Électrique à l'identification et à la Caractérisation des Aquifères de

Socle du Département de Sikensi (Sud de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 64(2), 206-219.

Ta, M., Lasm, T., Jourda, J., Kouamé, K., & Razack, M. (2008). Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des Réseaux de fracture du socle Précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Cote d'Ivoire). *Revue Télédétection*, 8(2), 119-135.

TOE, G. (2004). *Apports de nouvelles techniques géophysiques à la connaissance des aquifères de socle, Tomographie électrique, électromagnétisme fréquentiel, Résonnance Magnétique Protonique: application au Burkina Faso*. Thèse de doctorat.

Vouillamoz, J. (2003). *La caractérisation hydrogéologique des aquifère par une methode non invasive les sondages par Résonnance Magnétique Protonique*. Thèse de Doctorat.

Yaméogo, S. (2008). *Ressources en eau souterraines du centre urbain de Ouagadougou au Burkina faso, Qualité et Vulnérabilité*. Thèse de Doctorat.