



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

Fondation ZiE

CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE D'UN AQUIFERE EN MILIEU DE SOCLE FRACTURE CAS DE LA PROVINCE DU BAZEGA

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : EAU**

Présenté et soutenu publiquement le 25 Juin 2012 par

Vitrice NTSIEDEWO METSEYE

**Travaux dirigés par : Dr. Angelbert Chabi BIAOU
Dr. Mahamadou KOÏTA
Enseignant-chercheur à la Fondation ZiE
UTER GVEA**

Jury d'évaluation du stage

Président : **Mr. Angelbert Chabi BIAOU**
Membres : **Mr. Mahamadou KOÏTA**
Mr. Sewa DA SILVEIRA

Promotion [2012]

REMERCIEMENTS

Plaisir est pour moi d'exprimer mes remerciements et ma gratitude à tous ceux qui ont contribué au bon déroulement de ce travail.

Je profite de cette occasion pour adresser ma reconnaissance à l'ensemble du personnel enseignant de la Fondation 2iE pour la qualité de la formation reçue et au Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de la France pour le soutien financier.

Je tiens à remercier particulièrement mes encadreurs Dr. Angelbert Chabi BIAOU et Dr. Mahamadou KOÏTA qui ont par ailleurs proposé le thème de cette étude pour la confiance accordée dès le début. Ils ont fourni tous les documents nécessaires et les données disponibles et ont créé un environnement favorable à la réalisation de cette étude. Leur disponibilité et leur orientation m'ont été très bénéfiques.

Je remercie Dr. Dial NIANG et M. Sewa DA SILVEIRA pour leurs remarques pertinentes et leur plus grande rigueur dans l'élaboration de ce document.

Je tiens à remercier très sincèrement M. Corentin SOME pour ses précieuses aides et ses explications pour une meilleure utilisation des SIG.

Merci à Priva KABRE et Antoine SAWADOGO pour la collaboration et l'esprit de partage.

Je remercie SORO pour sa disponibilité et son aide dans le traitement des images satellitaires, à Emmanuel Mbouthieu et Aminata Sangaré pour leur soutien.

Ces remerciements vont également à l'endroit de tous les étudiants de la Fondation 2iE pour leur solidarité et l'esprit de sagesse qu'ils ont su préserver.

Merci aux membres de ma famille pour le soutien et les encouragements.

RESUME

La présente étude est réalisée dans la province du Bazéga au Centre-Sud du Burkina Faso. L'objectif principal de cette étude est d'identifier les cibles hydrogéologiques potentiellement favorables à l'implantation de futurs forages. Les techniques de traitement des images satellitaires Landsat TM ont été utilisées pour spatialiser les linéaments qui seraient les représentations surfaciques des accidents majeurs de la province. Ensuite ces linéaments ont été validés en comparant leur direction à celle des fractures relevées sur les affleurements dans un premier temps et en réalisant des panneaux électriques 2D perpendiculairement à un certain d'entre eux. Ces linéaments ont les directions préférentielles NE-SW et NW-SE, ce qui est en accord avec les directions de la fracturation mesurée sur les affleurements.

Une analyse des paramètres de forages a été réalisée. Les débits de foration varient entre 0,5 et 12 m³/h avec une moyenne de 2,9 m³/h. Les forages les plus productifs ont des profondeurs comprises entre 35 et 60 m, des épaisseurs d'altérites variant entre 15 et 36 m. L'analyse en composantes principales (APC) indique que le débit de foration a une corrélation peu significative avec ces paramètres de forages.

L'interprétation des données d'un essai par pompage longue durée réalisée par la méthode de la dérivée logarithmique du rabattement montre un écoulement pseudo-radial au début du pompage suivi par un écoulement à double porosité. On observe vers la fin du pompage la présence d'une limite à flux nul.

L'ensemble des résultats obtenus contribuera à améliorer la productivité des futurs forages dans la province du Bazéga.

Mots clés :

-
- 1- Landsat TM
 - 2- Linéaments
 - 3- Productivité des forages
 - 4- Dérivée logarithmique du rabattement
 - 5- Bazéga

ABSTRACT

This study was conducted in the province of Bazéga in Centre-South Region of Burkina Faso. The main objective of this study is to identify the hydrogeological targets potentially favorable for the implementation of future borehole. Processing techniques of Landsat TM satellite images were used to spatially distribute the lineaments which are the surface representations of major fractures in the province. These lineaments were then validated by comparing their direction to that of fractures observed on outcrops on the one hand and by carrying out perpendicular 2D electrical panels for some of them. These lineaments have NE-SW and NW-SE preferential directions, which is consistent with the directions of fracturing measured on outcrops.

Statistical analysis is conducted with well parameters. The borehole flow vary between 0.5 and 12 m³ / h with an average of 2.9 m³ / h. The most productive boreholes have depths of between 35 and 60 m, regolith thicknesses of between 15 and 36 m and a total basement thickness of 10 to 40m. The principal component analysis (PCA) indicates that the borehole flow has an insignificant correlation with the parameters of boreholes.

Interpretation of the data of a test carried out by long term pumping by the method of the logarithmic derivative of drawdown shows a general pseudo-radial flow model at the beginning of pumping followed by a double porosity or unconfined aquifer. We observed towards the end of pumping the presence of a zero flux limit.

The overall results will improve the productivity of future drills in the province of Bazéga.

Key words :

- 1- Landsat TM
- 2- Lineaments
- 3- Borehole productivity
- 4- Logarithmic derivative of drawdown
- 5- Bazega

SIGLES ET ABBREVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

ACP : Analyse en Composantes Principales

ACPN : Analyse en Composantes Principales Normées

AEP : Alimentation en Eau potable

CCT : Centre Canadien de Télédétection

CIEH : Comité Inter Etats d'Etudes Hydrauliques

CV : Coefficient de Variation

DGRE : Direction Générale des Ressources en Eaux

EA : Epaisseur des Altérites

EAS : Epaisseur des Altérites Saturés

NS : Niveau statique

PTF : Profondeur Totale du Forage

PVE : Profondeur de la Première Venue d'Eau

Qf : Débit de foration

TM : Thematic Mapper

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	II
RESUME	III
ABSTRACT	IV
SIGLES ET ABBREVIATIONS	V
LISTE DES TABLEAUX	3
LISTE DES FIGURES	4
INTRODUCTION GENERALE	5
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	7
I.1. Présentation de la zone d'étude	8
I.1.1. Situation géographique	8
I.1.2. Climat et végétation	9
I.1.3. Hydrographie et géomorphologie	10
I.2. Contexte géologique	11
I.2.1. Bref aperçu de la géologie du Burkina Faso	11
I.2.2. Géologie de la province du Bazéga	11
I.3. Contexte hydrogéologie	12
I.3.1. Caractéristiques hydrogéologiques générales	12
I.3.2. Les systèmes aquifères	13
Les aquifères d'altérites	13
Les aquifères de fissure	13
I.3.3. Fonctionnement hydrogéologique des aquifères	14
CONCLUSION PARTIELLE	14
DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES	15
II.1. Données et matériels	16
II.2. Méthodologie de la spatialisation des linéaments	17
II.2.1. Introduction	17
II.2.2. Traitement des images satellitaires	17
II.2.3. Extraction des linéaments	21
II.2.4. Validation géologique des linéaments	22
II.2.5. Validation hydro géophysique des linéaments	22

II.3. Méthodologie d'optimisation de la productivité des forages	24
II.3.1. Définition des paramètres de productivité	24
II.3.2. Analyse statistique des paramètres de forages	25
II.4. Méthodologie de caractérisation hydrodynamique de l'aquifère	26
II.4.1. Méthodes classiques d'interprétation des essais de nappe	26
II.4.2. Méthode de la dérivée logarithmique du rabattement	27
CONCLUSION PARTIELLE	28
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS	29
III.1. Caractérisation géologique	30
III.1.1. Spatialisation des linéaments	30
III.1.2. Analyse de la carte linéamentaire.....	32
III.1.3. Analyse directionnelle et validation géologique	34
III.1.4. Prospection hydro géophysique	36
III.2. Optimisation de la productivité des forages	40
III.2.1. Analyse de la productivité des forages.....	40
III.2.2. Etude des corrélations entre les paramètres de productivité	46
III.3. Interprétation des données de l'essai de nappe	48
III.3.1. Identification des régimes d'écoulement.....	48
III.3.2. Détermination des paramètres hydrodynamiques	50
CONCLUSION GENERALE	51
PERSPECTIVES	52
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53
ANNEXE	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Distribution des linéaments32
Tableau 2 : Correspondance entre résistivité électrique et géologie38
Tableau 3 : Statistiques des paramètres des forages de la province du Bazéga40
Tableau 4 : Matrice de corrélation des paramètres de forages46
Tableau 5 : Contribution des axes factoriels46
Tableau 6 : Contribution des variables (%).....46

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Présentation de la zone d'étude.....	8
Figure 2: Variation de la pluviométrie moyenne annuelle (1980-2010)	9
Figure 3: Variation de l'indice pluviométrique (1980-2010)	9
Figure 4: Pluviométrie moyenne mensuelle (1980-2010)	10
Figure 5 : Affleurement rocheux et fracturation dans la localité de Kombissiri	12
Figure 6: Carte géologique de la province du Bazéga.....	12
Figure 7 : Modèle géologique simplifié d'un aquifère de socle (Wyns et al., 2004).	13
Figure 8 : Organigramme des traitements d'images Landsat réalisés	18
Figure 9 : Mosaïque des trois scènes Landsat TM couvrant la zone d'étude.....	19
Figure 10 : Application du masque et extraction de la zone d'étude	19
Figure 11 : Principe de l'analyse en composantes principales	21
Figure 12 : Principe de calcul de la direction d'un linéament.....	22
Figure 13 : Principe d'un panneau électrique (dispositif Wenner-Schlumberger).....	23
Figure 14 : Linéament mis en évidence par les opérations de rehaussement d'images	30
Figure 15: Bande 7 de l'image Landsat TM faisant ressortir quelques linéaments	31
Figure 16 : Carte des linéaments issus du traitement des images Landsat TM.....	32
Figure 17 : Diagramme de distribution des types de linéaments.....	33
Figure 18 : a) Rosaces directionnelles des linéaments issus du traitement des images Landsat TM ; b) Affleurement rocheux	34
Figure 19 : Présentation des linéaments de référence pour la réalisation du panneau électrique.	36
Figure 20 : Localisation des profils de panneaux électriques : a) Profil 1, b) Profil 2.....	37
Figure 21 : Coupe de résistivité électrique de panneaux électriques réalisés a) profil 1 ; b) profil 2	38
Figure 22 : a) Distribution des débits de foration ; b) Corrélation entre Q_f et Q_{exp}	41
Figure 23 : Evolution des débits de foration en fonction de la profondeur totale du forage.....	42
Figure 24 : Evolution des débits de foration en fonction de l'épaisseur d'altération.....	43
Figure 25 : Evolution des débits de foration en fonction de l'épaisseur d'altération.....	44
Figure 26 : Evolution des débits de foration en fonction de la première venue d'eau	45
Figure 27 : Projection des variables dans les plans factoriels F1-F2	47
Figure 28 : Rabattement et Dérivée logarithmique du rabattement en fonction du temps.....	49

INTRODUCTION GENERALE

La disponibilité de l'eau potable a toujours été une préoccupation majeure tant pour les populations que pour les gouvernements. D'après le programme commun de l'Organisation Mondiale de la Santé et du Fonds des Nations Unies pour l'Enfance sur la surveillance de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement (OMS/UNICEF, 2004), l'Afrique subsaharienne est en retard pour l'atteinte des objectifs du millénaire pour le développement (OMD).

Au Burkina Faso, selon le Cadre Stratégique de Lutte contre la Pauvreté (CSLP), l'accès à l'eau potable fait partie des axes stratégiques majeurs parmi ceux identifiés pour la réduction de la pauvreté. C'est ainsi que le Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et d'Assainissement (PN-AEPA) a pour objectif d'atteindre en 2015 un taux d'accès à l'eau potable de 80% de la population en milieu rural et de 87% en milieu urbain. Cependant, les ressources en eau de surface sont rares et font de plus en plus défaut. En effet, dans les endroits où elles existent, elles sont vecteurs de nombreuses maladies (diarrhée, dysenterie, choléra, etc.), mettant en péril la santé des populations. L'exploitation des ressources en eaux souterraines devient donc indispensable. C'est ainsi que depuis les années 1970, plusieurs milliers de forages ont été réalisés au Burkina Faso dont près de 80% du territoire est situé en zone de socle (Sattran et Wenmenga, 2002). Mais une grande partie de ces ouvrages va connaître des difficultés d'exploitation et induire une faible productivité. Par exemple, sur un échantillon de 7946 forages en contexte de socle dans plusieurs régions du Burkina Faso, 30% de ces forages ont un débit inférieur à 0,5 m³/h et 56 % ont un débit compris entre 0,5 et 5 m³/h (Ricolvi, 1992). Cette faible productivité serait vraisemblablement liée à une connaissance peu approfondie des milieux de socle. En effet, N'go et al. (2009) indiquent qu'en milieu cristallin et cristallophyllien, les zones fracturées et/ou fissurées constituent les cibles idéales pour l'implantation des forages d'eau. Malgré la complexité de ses systèmes aquifères de socle (Engalenc et al., 1978), des études préalables, appropriées et approfondies de ces systèmes pourraient non seulement augmenter la productivité des forages, mais également réduire le taux de forages négatifs. C'est pour cette raison que ce présent travail se propose de mener une étude de caractérisation hydrogéologique des aquifères en zone de socle fracturé. Pour cela, la province du Bazéga est choisie comme site d'étude en raison de sa géologie qui est représentative des formations de socle fracturé du Burkina Faso. Ce choix est également motivé par les statistiques sur les problèmes d'eau dans

cette province où dans la localité de Kombissiri seule, on note un déficit journalier de 200 m³ d'eau pour l'alimentation des populations, des travaux expérimentaux déjà réalisés sur ce site (Toé, 2004), de l'existence des données et de la proximité de Ouagadougou pour les travaux de terrain.

L'objectif général de cette étude est d'identifier les cibles hydrogéologiques potentiellement favorables à l'implantation de forages à forts débits à l'échelle de la localité de Kombissiri et ses environs. L'atteinte de cet objectif permettra de contribuer à améliorer la productivité des forages lors des futurs programmes d'hydraulique. Spécifiquement, cette étude se focalisera sur trois axes principaux notamment : i) la spatialisation des linéaments majeurs susceptibles d'être en relation avec les couloirs de circulation d'eau souterraine ; ii) l'optimisation de la productivité des forages à travers l'identification des corrélations entre les données de forages ; iii) la cartographie des cibles hydrogéologiques pour les futures campagnes d'hydraulique.

Le présent document s'articule autour de trois grandes parties :

La première partie est axée sur les généralités. De façon sommaire elle présente les caractéristiques géographiques de la zone d'étude, les contextes géologique et hydrogéologique de l'étude.

La deuxième partie est consacrée à la méthodologie adoptée dans cette étude pour atteindre les objectifs fixés. Cette approche méthodologique concerne d'abord la caractérisation géologique à travers l'identification des linéaments sur les images satellitaires. Par la suite nous procéderons à une caractérisation hydrodynamique de l'aquifère par une interprétation des essais de nappe. En fin, une analyse des paramètres de forages sera réalisée afin d'optimiser la productivité des forages.

Le chapitre III présente l'ensemble des résultats et interprétations obtenus après analyses et traitement des images satellitaires, interprétation des essais de nappe et analyse des paramètres de forage.

L'étude s'achève par une conclusion générale et des recommandations.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

I.1. Présentation de la zone d'étude

I.1.1. Situation géographique

La présente étude est réalisée dans la région Centre-Sud du Burkina Faso, plus précisément dans la province du Bazéga. C'est une zone sahélo-soudanienne qui se situe entre les longitudes $0^{\circ}50'$ et $2^{\circ}30'$ Ouest et les latitudes $11^{\circ}30'$ et $12^{\circ}20'$ Nord (Figure 1). Elle couvre une superficie de 5395 km^2 et comporte 11 localités administratives dont la commune de Kombissiri. Cette dernière est chef-lieu de la province du Bazéga qui se trouve à environ 45 km de la capitale Ouagadougou.

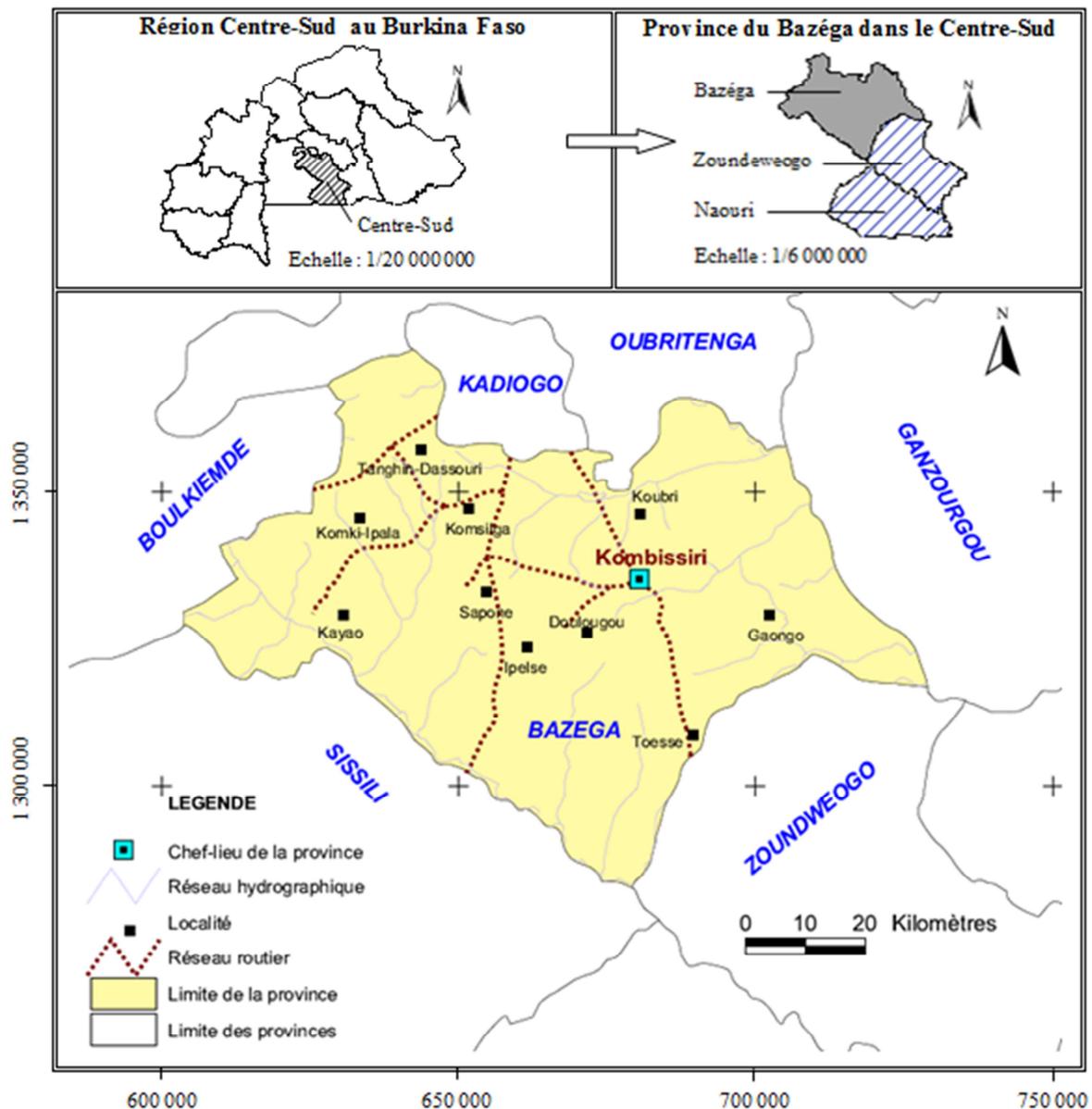


Figure 1: Présentation de la zone d'étude

I.1.2. Climat et végétation

Selon plusieurs études (Moustadraf et Razack, 2008 ; Allen et al. 2004), le facteur climat joue un rôle majeur sur les ressources en eau souterraines, et par conséquent sur l'existence et la productivité des aquifères. Au Burkina Faso, le climat est de type intertropical et on y distingue trois grandes zones climatiques à savoir la zone soudanienne ($P < 600 \text{ mm}$), la zone soudano-sahélienne ($600 \leq P \leq 1000 \text{ mm}$) et la zone sahélienne ($P > 1000 \text{ mm}$). Dans la province du Bazéga, le climat est de type soudano-sahélien. La pluviométrie varie considérablement d'une année à une autre (Figure 2) et la moyenne interannuelle est de 718 mm.

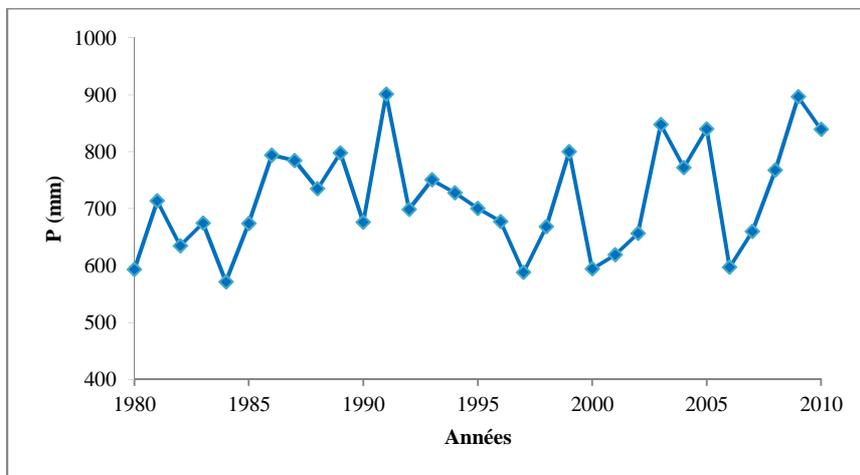


Figure 2: Variation de la pluviométrie moyenne annuelle (1980-2010)

L'analyse de l'indice pluviométrique (Figure 3) qui traduit un excédent ou un déficit pluviométrique (Paturel et al., 1998) nous indique une alternance de périodes humides et sèches.

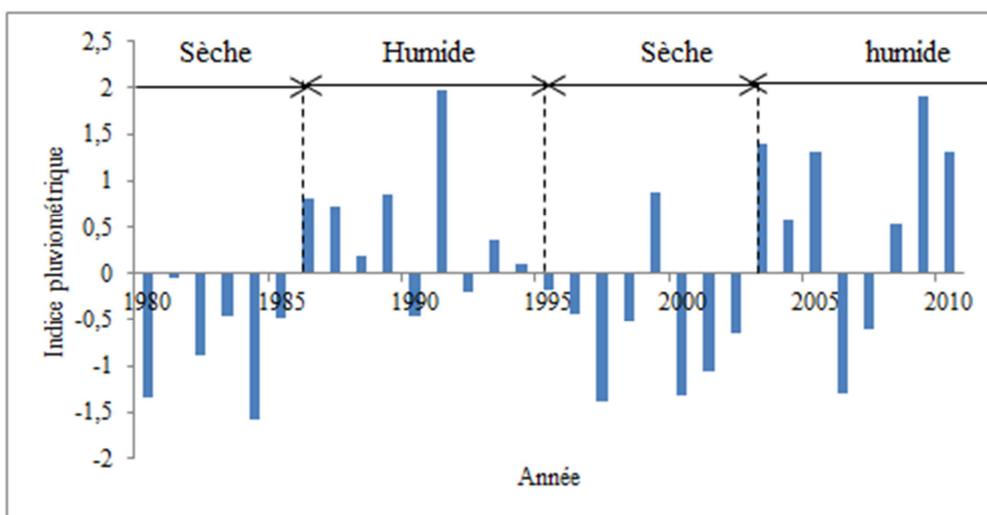


Figure 3: Variation de l'indice pluviométrique (1980-2010)

Cette pluviométrie est par ailleurs très contrastée avec une courte saison de pluie de Juin à Septembre caractérisée par de fortes précipitations (Figure 4). L'évapotranspiration est très importante et la moyenne annuelle sur la période 1991-2010 est de 2078 mm conduisant à des conditions de recharge difficiles des nappes et/ou à un tarissement rapide des réserves d'eau des aquifères superficiels. Cette recharge des nappes ne peut se faire que pendant les mois de Juillet et Août. Elle est estimée à 50 mm dans la région de Ouagadougou (Yaméogo, 2008), soit environ 7% de la pluviométrie totale. Les amplitudes thermiques sont très variables et oscillent entre 40°C en Avril et 17°C en Février. L'humidité varie de 13% en Février à plus de 94% en Août.

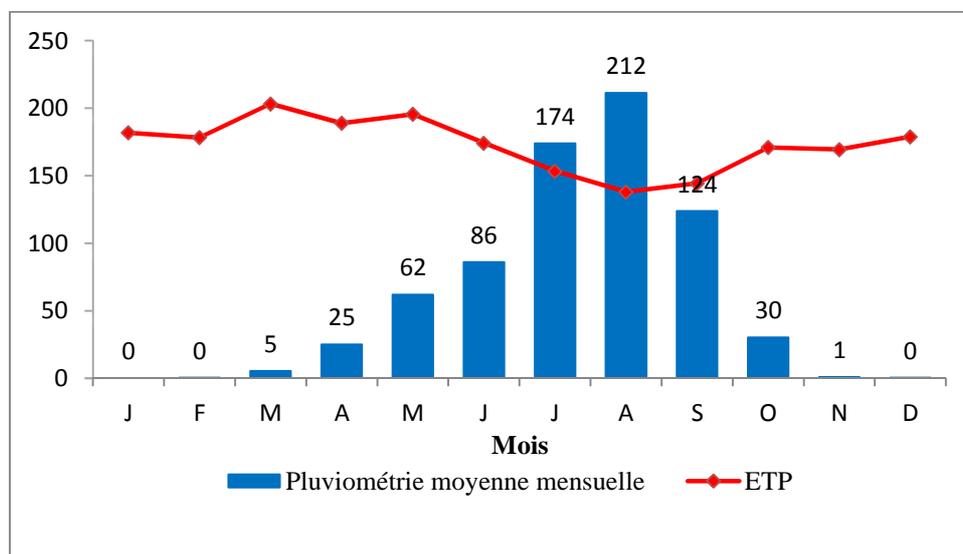


Figure 4: Pluviométrie moyenne mensuelle (1980-2010)

I.1.3. Hydrographie et géomorphologie

La province du Bazéga est située à cheval entre deux bassins versants. Elle est drainée au Nord par le fleuve Nakambé et au Sud par le Nazinon. Le réseau hydrographique est peu dense (Figure 1) et aucun cours d'eau n'est pérenne. L'organisation d'ensemble du relief précise une topographique couverte par une pénéplaine. Les plus hautes altitudes atteignent rarement 360 m et les différences d'altitude sont relativement faibles. Cependant, le relief a été arasé laissant quelques collines latéritiques, des affleurements rocheux et des plateaux cuirassés. Les principaux sols rencontrés sont des sols hydromorphes constitués de matériaux argilo-sableux et alluviaux et les sols minéraux bruts constitués de granite et cuirasse ferrugineuse. L'examen de la géomorphologie est en rapport étroit avec le contexte géologique.

I.2. Contexte géologique

I.2.1. Bref aperçu de la géologie du Burkina Faso

La géologie du Burkina Faso est représentée à 80 % par des formations cristallines. Cet ensemble cristallin fait partie du craton Ouest-Africain, daté de 2600 Ma à 1600 Ma. On y distingue trois principales unités lithologiques (Compaoré, 1997) à savoir : i) le socle paléo-protérozoïque ou Birrimien (2500-1600 Ma) composé de roches volcano-sédimentaires et de roches plutoniques. Ces roches ont été mises en place lors de l'orogénèse éburnéenne avec une fracturation suivant préférentiellement les directions NE-SO et NNE-SSW ; ii) la couverture sédimentaire néo-protérozoïque, qui repose en discordance sur le socle Birrimien dans plusieurs zones ; iii) les terrains cénozoïques du continental terminal constitués essentiellement de formations de quartz à grain fin, de calcaires, de grès et des produits de la décomposition de la cuirasse dont les argiles, les sables et les graviers. Ces roches cristallines sont surmontées par un manteau d'altérites qui résulte de l'altération physico-chimique des roches sous l'action de la température et de l'eau. Cette altération est favorisée par la fracturation de la roche et par la faible viscosité de l'eau (Engalenc et al., 1978).

I.2.2. Géologie de la province du Bazéga

Les formations géologiques appartiennent au domaine Birrimien. Par rapport à leur nature pétrographique, on y rencontre les migmatites, les granites et les séries métamorphiques à faciès Birrimien (Houin, 1990). Les migmatites sont très voisines des granites. Ces granites ont été mis en place durant les phases tectoniques qui ont marqué le Birrimien et constituent la plus importante formation si l'on s'en tient à sa répartition spatiale (Figure 6); on y distingue plusieurs faciès dont les granites à deux micas, les granites homogènes à biotite et les granites hétérogènes. Les séries métamorphiques à faciès Birrimien sont constituées des faciès suivants : les schistes, du quartz et les amphibolites. L'épaisseur d'altération recouvrant le substratum rocheux est variable et on observe souvent des affleurements rocheux essentiellement granitiques, marqués par des fissures (figure 5).



Figure 5 : Affleurement rocheux et fracturation dans la localité de Kombissiri

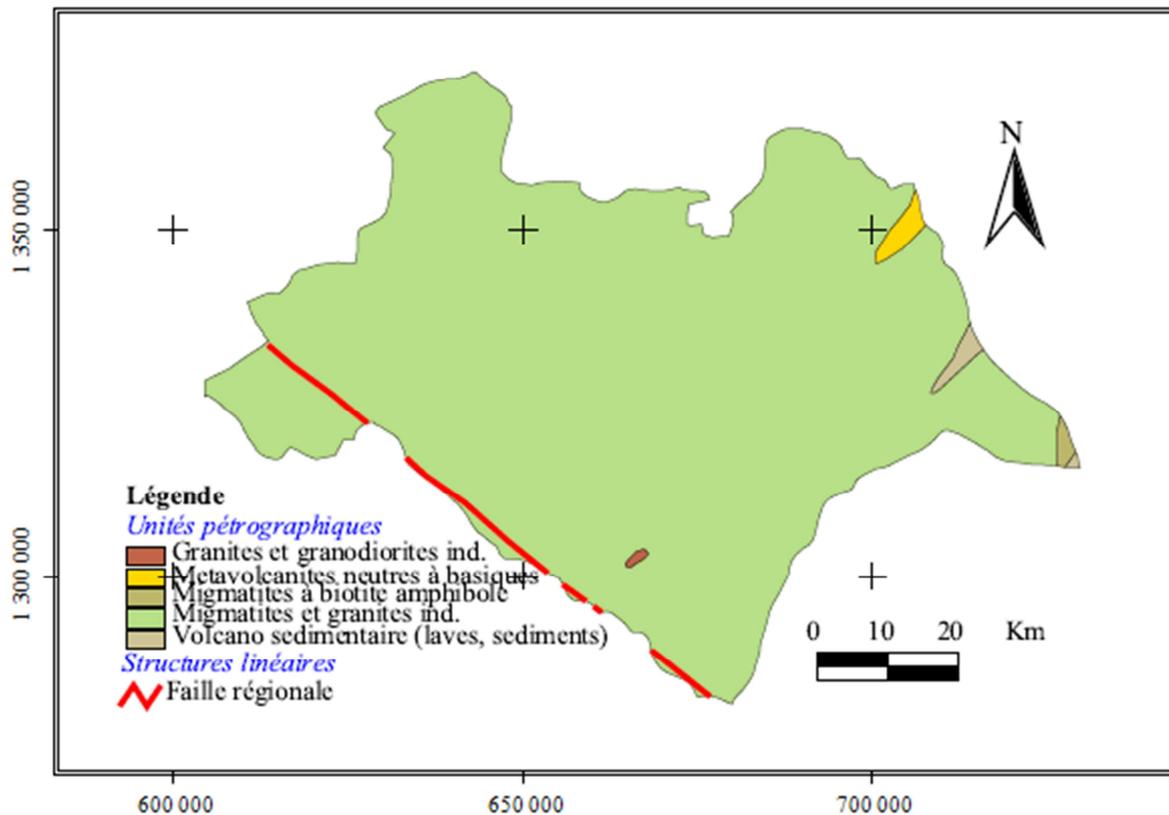


Figure 6: Carte géologique de la province du Bazéga

I.3. Contexte hydrogéologie

I.3.1. Caractéristiques hydrogéologiques générales

Compte tenu du contexte granitique, le profil d'altération se décompose de la cuirasse latéritique, de l'arène argileuse, d'une zone d'altération minérale, de l'arène sableuse et de la

zone fissurée et/ou fracturée. A cette lithologie correspond un modèle conceptuel d'aquifère de socle constitué de 3 couches. La partie supérieure est constituée des altérites, tandis que la partie inférieure est constituée de la roche saine plus ou moins fracturée. Une partie intermédiaire constituée de la roche fissurée est limitée aux altérites par le front d'altération.

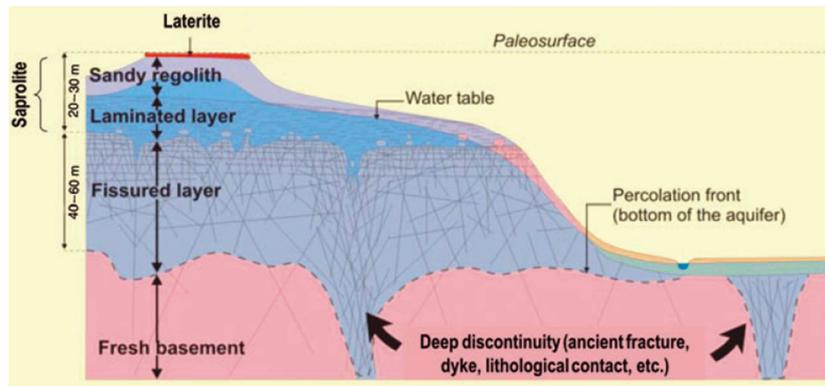


Figure 7 : Modèle géologique simplifié d'un aquifère de socle (Wyns et al., 2004).

I.3.2. Les systèmes aquifères

Les aquifères d'altérites

Les aquifères d'altérites se développent dans les arènes argilo-sableuses et correspondent à la partie altérée du socle. Leur épaisseur moyenne est de 22 m. Ces aquifères sont beaucoup tributaires des conditions climatiques et lorsqu'ils sont saturés, jouent un rôle essentiellement capacitif (Compaoré et al., 1997). En effet ils ont une forte porosité d'interstices (J-C Maréchal, 2003) constituant une réserve d'eau importante. Mais à cause de leur teneur assez élevée en argile, ils possèdent une perméabilité relativement faible rendant ainsi leur exploitation peu efficace. Leur recharge et leur échange avec les aquifères de fissure pourraient donc accroître la productivité des forages en zone de socle.

Les aquifères de fissure

Ces aquifères assurent une fonction conductrice (forte perméabilité). La circulation des eaux est conditionnée par l'organisation des réseaux de fissures et des flux avec les aquifères d'altérites. Leur épaisseur varie de quelques dizaines de mètres et les fractures sont majoritairement horizontales dans la partie supérieure (Courtois et al., 2010). Grâce à leur forte

transmissivité, ces aquifères constituent une cible hydrogéologique prioritaire pour l'exploitation des eaux souterraines en milieu de socle. Sattran et Wenmenga (2002) signalent en outre le caractère libre des nappes d'altérites et semi-captif des aquifères de fissures.

I.3.3. Fonctionnement hydrogéologique des aquifères

L'aquifère de la province du Bazéga présente une nappe d'eau dans les altérites. Seulement 50 mm de pluie sont susceptibles de s'infiltrer pour la recharge de la nappe, soit environ 7% de la pluviométrie totale. Le niveau statique qui est sous la forte influence saisonnière varie beaucoup et se situe entre 0,5 m et 30 m avec un niveau moyen de 11 m. Les principales venues d'eau sont plus profondes que les niveaux statiques et se situent généralement autour de 27 m. Cela est principalement dû au caractère semi-captif des aquifères de fissures. La transmissivité obtenue par l'interprétation des données de forages par la méthode de la dérivée logarithmique du rabattement est estimée à $4,74.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Tous les forages captent dans la zone fissurée et les débits d'exploitation rencontrés sont très variables et généralement faibles. La qualité physico-chimique des eaux est acceptable malgré la légère minéralisation.

CONCLUSION PARTIELLE

La province du Bazéga est caractérisée par un climat de type soudano-sahélien avec deux saisons très contrastées. Le relief est relativement plat et on y rencontre des affleurements rocheux. Le réseau hydrographique est peu dense. La géologie est majoritairement constituée de formations granitiques. Les ressources en eaux souterraines se rencontrent principalement dans les réseaux de fractures. Les conditions climatiques sévères font que les réserves d'eaux superficielles et peu profondes se tarissent rapidement.

DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES

La caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en zone de socle revient à identifier les structures géologiques ayant affectées ce milieu et d'en comprendre le fonctionnement. L'approche méthodologique adoptée dans cette étude pour atteindre les objectifs fixés comprend une caractérisation géologique de l'aquifère. Il s'agit d'identifier des structures qui peuvent être des lieux de circulation des eaux souterraines. Ces structures constituent des cibles pour l'implantation des forages. Cependant, la productivité des forages est sous l'influence de plusieurs autres facteurs. Une analyse des paramètres de forages permettra alors d'optimiser leur productivité. L'interprétation d'un essai de nappe permettra d'identifier la géométrie de l'aquifère ainsi que les différents régimes d'écoulement des eaux souterraines, et leur impact sur la productivité des forages. L'application de cette méthodologie a nécessité plusieurs données.

II.1. Données et matériels

La base de données utilisée contient trois scènes Landsat du capteur TM composée chacune de sept bandes. Une scène est une portion de la surface prise par le satellite en déplacement sur son orbite. Elle est caractérisée par sa fauchée qui est de 185 km x 185 km. Le choix de ces images Landsat TM est fait sur la base de leur résolution spatiale permettant une bonne cartographie linéamentaire à petite échelle (El Hadani, 1997 ; Youan et al., 2008) et de leur accessibilité. Ces images sont conformes au référentiel cartographique WGS-84, Zone 30 et apparaissent sans bruit radiométrique majeur (prises en pleine saison sèche). Les caractéristiques de ces images sont présentées en Annexe. Les données climatiques proviennent de la station synoptique de Ouagadougou. Ces données ont été mises à notre disposition par la direction de la Météorologie Nationale et s'étendent sur la période 1980 à 2010. Cette station se situe dans la même isohyète que la zone d'étude et est la plus proche. Les données hydrogéologiques concernent les caractéristiques des forages de la province du Bazéga fournies par la DGRE. Ces données de forages regroupent : les débits de foration, les profondeurs totales des forages, les épaisseurs des altérites, les premières venues d'eau, etc.

Le logiciel ENVI 4.1 a été utilisé pour le traitement des images satellitaires.

II.2. Méthodologie de la spatialisation des linéaments

II.2.1. Introduction

En milieu de socle, les réseaux de fractures constituent les cibles idéales pour l'implantation des forages. Ces fractures peuvent être cartographiées à partir des images satellitaires et/ou des photographies aériennes. Ces dernières ne sont pas toujours disponibles et celles existantes sont souvent sous forme de cartes non digitalisées. On a alors recours à la télédétection pour la spatialisation des linéaments par la mesure de la réflectance au sol. Ces linéaments que l'on cherche à identifier sont des alignements subrectilignes ou morpho-structuraux. Ils peuvent être des représentations surfaciques des phénomènes géologiques tels que les fractures et les failles. Ils ont longtemps été utilisés pour implanter les forages dans les zones à faible porosité primaire (Sander, 2007). L'application de la cartographie linéamentaire est influencée par les facteurs locaux et des dépôts meubles qui masquent le socle rocheux (altération, couvert végétal, fonction hydrologique, etc.) et rend la détection des fractures peu précise (Lachaine, 1999). La méthodologie adoptée pour la spatialisation des linéaments comprend les opérations de rehaussement (traitement) d'images, l'extraction manuelle des linéaments et la validation géologique et hydro géophysique de ces linéaments.

II.2.2. Traitement des images satellitaires

Les opérations de prétraitement visant à compenser les perturbations de la radiométrie des images brutes utilisées sont déjà requises. Le traitement ou rehaussement d'images satellitaires permet d'améliorer l'apparence pour en faciliter l'interprétation et l'analyse visuelles. L'organigramme de la Figure 8 récapitule les opérations utilisées pour aboutir à l'extraction des discontinuités-images (linéaments).

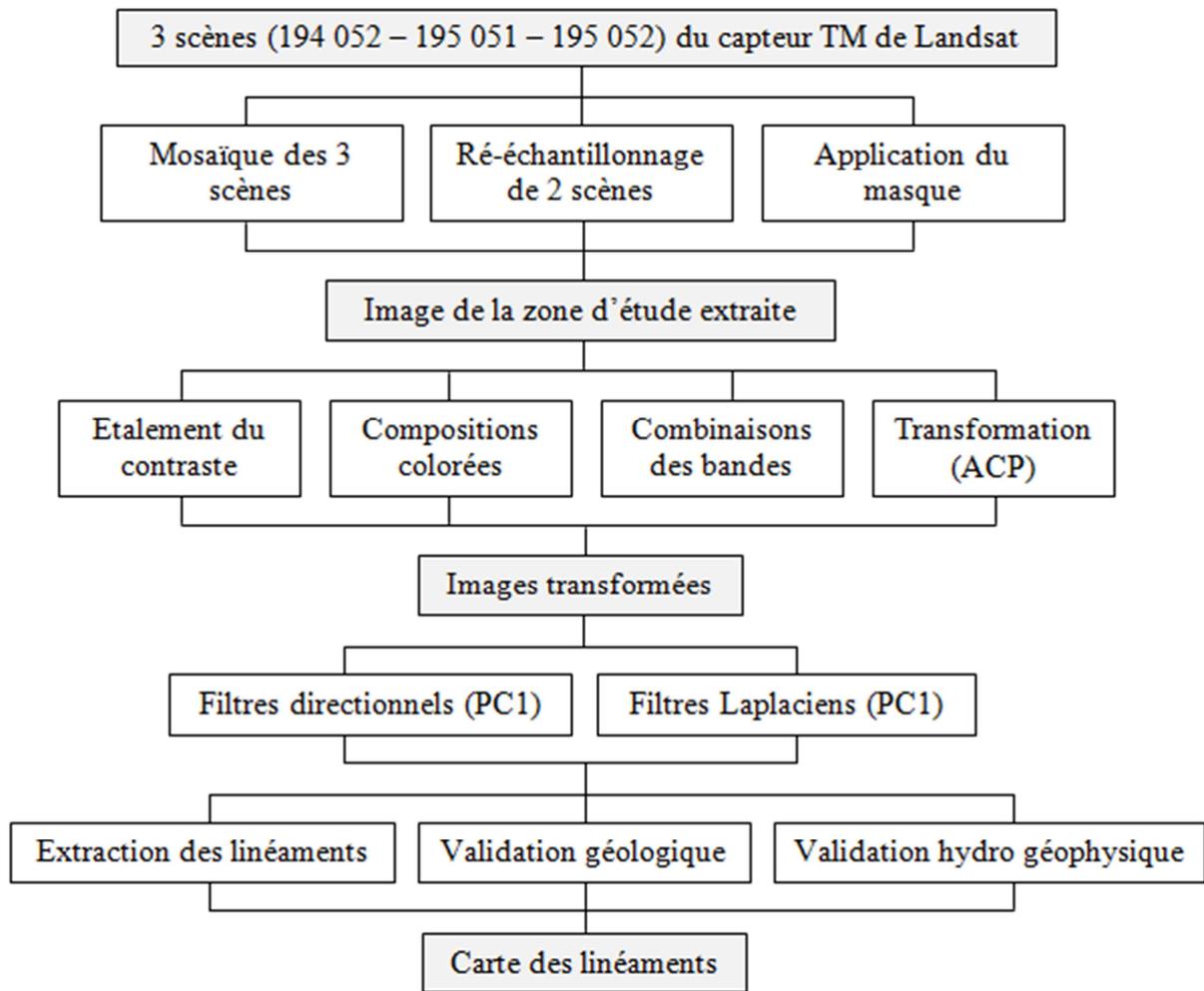


Figure 8 : Organigramme des traitements d'images Landsat réalisés

La mosaïque

La province du Bazéga étant située à cheval sur 3 scènes, une mosaïque a été créée pour couvrir toute la zone (Figure 9). Il s'agit de lier les 3 scènes séparées en une seule image. Avant cette opération, nous avons procédé par un rééquilibrage des contrastes et une harmonisation des histogrammes de sorte que l'image résultante ait pour un même objet les mêmes densités de gris. Un ré-échantillonnage des scènes 194 052 et 195 051 a été effectué pour ramener la taille de leurs pixels de 30 m à 28,5 m.

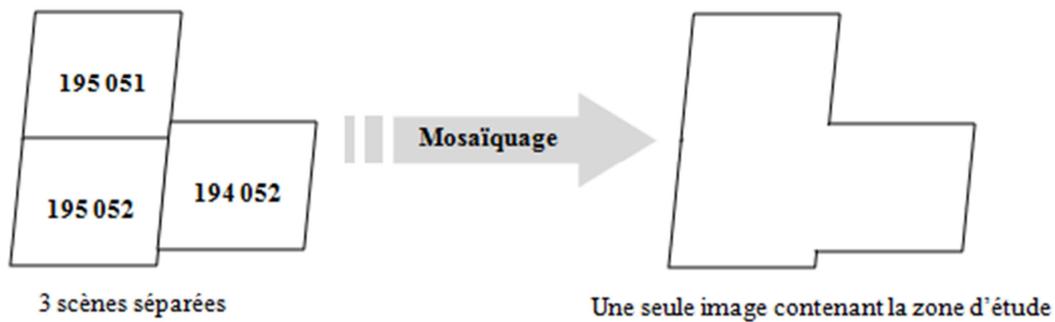


Figure 9 : Mosaïque des trois scènes Landsat TM couvrant la zone d'étude

Application de masque

Elle permet d'extraire la zone d'étude de l'image obtenue après la mosaïque. Pour cela, une région d'intérêt a été tracée autour du polygone constituant la limite de la zone d'étude. Une image binaire est alors créée constituée de pixels de valeur 1 à l'intérieur du polygone et 0 à l'extérieur. L'application du masque consiste en un produit de l'image « région d'intérêt » et de l'image binaire (Lacombe, 2008). Les pixels de l'image polygone associés à la valeur 1 du masque resteront visibles tandis que les autres pixels associés à la valeur 0 seront dissimulés.



Figure 10 : Application du masque et extraction de la zone d'étude

Étalement interactif du contraste

Cette technique est basée sur la méthode d'égalisation d'histogramme (Lacombe, 2008). Concernant la présente étude, une transformation linéaire a été appliquée à la radiométrie de l'image de telle sorte que l'ensemble des amplitudes occupe en sortie plus efficacement l'échelle de gris disponible (0 à 255 pour les données 8-bits), de façon à obtenir un histogramme plus étalé et donc des images plus contrastées que les images d'origines.

Composition colorée

Elle consiste à combiner dans la même image, les informations comprises dans trois bandes différentes en affectant à chaque bande composée une des couleurs de base (Rouge (R), Vert (V), Bleu (B)). Pour les systèmes satellitaires multi-bandes comme Landsat TM, un bon choix des bandes qui contrôlent les signaux RVB en cartographie géologique, est de sélectionner des bandes en fonction des caractéristiques spectrales attribuées à la présence des différents minéraux dans les roches (Yésou *et al.*, 1993). Les compositions colorées réalisées avec les bandes 4, 5 et 7 d'une part et les bandes 7, 3 et 1 font apparaître plus nettement les discontinuités structurales et texturales facilitant la discrimination visuelle des linéaments.

Combinaisons des bandes

Cette technique est basée sur des opérations mathématiques appliquées sur les différents canaux. Le rapport de bande $(TM4-TM3)/(TM4+TM3)$ permet de mettre en évidence plusieurs structures majeures, d'atténuer l'effet de relief, et de réaliser une meilleure cartographie de la végétation (Kouadio *et al.*, 2008 ; Lacombe, 2008). Le rapport $(TM6-TM7)/(TM6+TM7)$ a également permis d'identifier quelques linéaments.

Analyse en composante principale (ACP)

Cette technique permet de définir de nouveaux canaux résumant l'information contenue dans l'image (Lacombe, 2008). Il s'agit de maximiser la quantité d'information des données originales dans un nombre restreint de composantes (Figure 11), assurant ainsi l'absence de redondance entre les données multi spectrales des différentes bandes. En effet, les différentes bandes TM de Landsat ont une très forte corrélation entre elles (CCT, 2004). L'ACP a été réalisée avec toutes les bandes. Nous n'avons utilisé que la première composante (PC1) qui regroupe plus de 98% de l'information brute pour la cartographie structurale.

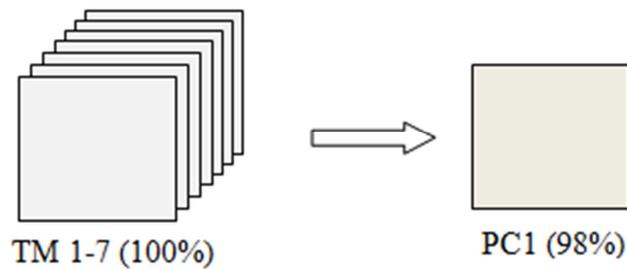


Figure 11 : Principe de l'analyse en composantes principales

Application des filtres

L'application d'un filtre permet d'éliminer les éventuels bruits ou de rehausser certains contours afin de mieux identifier certains linéaments. Georges et al. (1983) indiquent que les filtres directionnels sont les techniques les plus pertinentes et les plus utilisées pour le rehaussement des structures linéaires lors des travaux géologiques. La taille de la fenêtre du filtre utilisé a une influence sur la longueur des linéaments rehaussés et seuls les linéaments de taille supérieure à la moitié de la fenêtre de convolution du filtre sont détectés (Kouamé et al., 2009). Compte tenu de la résolution au sol des images utilisées, Djemai et al. (2009) propose une fenêtre de convolution de taille 3 x 3. Les directions d'application de ces filtres sont N105° et N135° à grâce au fort contraste obtenu dans les images. En effet, les linéaments identifiés sur un filtre sont perpendiculaires à la direction de ce filtre. Ces filtres directionnels ont été appliqués au néo canal PC1 issu de l'ACP. Nous avons également appliqué les filtres Laplaciens (3 x 3) qui permettent de souligner les zones à variation brusque d'intensité (Kouamé et al, 1999).

II.2.3. Extraction des linéaments

L'ensemble des discontinuités linéaires majeures observées ont été extraites manuellement en vue d'établir une carte de linéaments de la province du Bazéga. Ces linéaments sont représentés par des segments de droite et correspondent à des discontinuités images. Ceux d'origine anthropiques (routes, pistes, etc.) ont été éliminés et ceux restants correspondent vraisemblablement à la fracturation (Lasm *et al.*, 2004 ; Kouamé et al., 2005). Cependant, pour accorder à ces linéaments une origine géologique, nous avons procédé à une validation de ces linéaments.

II.2.4. Validation géologique des linéaments

La validation géologique des linéaments permet de leur donner une signification structurale et est classiquement faite par une analyse fréquentielle grâce aux rosaces directionnelles (Kouamé *et al.*, 1999). Les directions principales des linéaments identifiés à partir des images Landsat TM sont comparées à celles des accidents relevés sur les affleurements rocheux. Les directions des linéaments issus des images satellitaires sont déterminées par leur l'angle α par rapport au Nord (Figure 12) tandis que celles des fractures relevées sur le terrain sont obtenues directement à l'aide d'une boussole.

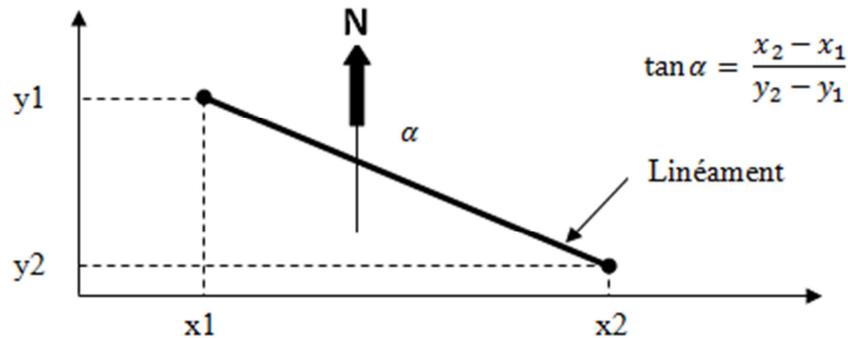


Figure 12 : Principe de calcul de la direction d'un linéament

Outre cette validation géologique, la prospection géophysique a été utilisée sur certains linéaments de taille importante.

II.2.5. Validation hydro géophysique des linéaments

Dans cette étude, la prospection géophysique est utilisée comme un moyen efficace pour confirmer le résultat sur la fracturation obtenu par le traitement des images satellitaires. Plusieurs méthodes de prospection géophysiques existent parmi lesquelles les méthodes électriques, l'électromagnétisme, le magnétisme, la résonance magnétique protonique, etc. La méthode électrique à travers la technique du panneau électrique est utilisée. Le paramètre étudié est la résistivité électrique et est en liaison indirecte avec les ressources en eaux souterraines ; elle dépend de la granulométrie de la formation géologique, de la teneur en eau, de la minéralisation de l'eau et de la teneur en argile (McNeill, 1980 ; Guérin, 2002) et est ainsi liée aux structures géologiques que l'on cherche à identifier. Cette technique a déjà fait ses preuves en contexte de socle (Sombo *et al.*, 2011) et sa simplicité et son faible coût la rendent populaire.

Principe et dispositif de mesure du panneau électrique

Le panneau électrique (imagerie ou tomographie de résistivité électrique) correspond à une succession de sondages électriques réalisés les uns à côté des autres. Un réseau de 72 électrodes est installé le long d'un profil rectiligne avec un espacement constant $a = 5$ m. Par la suite, un courant continu I (en Ampère) est injecté entre deux électrodes A et B et la différence de potentiel ΔV (en Volt) est mesurée entre les électrodes M et N.

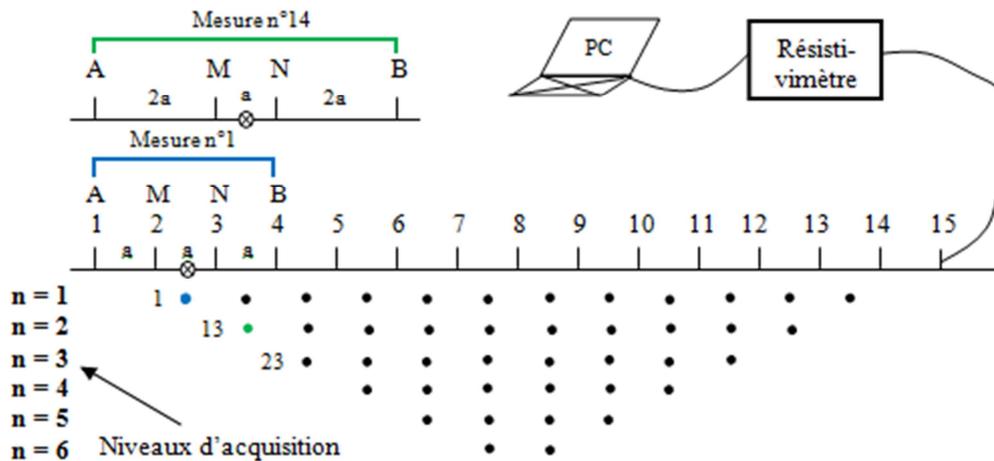


Figure 13 : Principe d'un panneau électrique (dispositif Wenner-Schlumberger)

L'acquisition des mesures se fait par succession pour chaque niveau d'acquisition et la résistivité apparente ρ_a au point de mesure est donnée par l'expression : $\rho_a = K \times \frac{\Delta V}{I}$

Où k est un coefficient géométrique dépendant de la disposition des électrodes :

$$K = 2\pi \times \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1}$$

Cette technique présente cependant des inconvénients dans la mesure où les profondeurs d'investigation escomptées ne sont atteintes qu'au centre de tout le système d'acquisition conduisant à un manque d'informations aux extrémités. Le choix du dispositif de mesure dépend de la structure à imager, du bruit de fond, de la sensibilité de l'appareil de mesure et des caractéristiques de ce dispositif. (Loke, 1994). L'emploi du dispositif Wenner – Schlumberger est lié à sa sensibilité aux variations verticales et horizontales du terrain (Guérin et al., 2002 ; Chouteau et Gloaguen, 2003). De plus c'est un dispositif généralement peu bruité (Hoareau et al., 2010) et l'arrangement des électrodes permet d'effectuer un nombre important de mesures conduisant à un modèle plus précis. A ce dispositif correspond une profondeur d'investigation effective Z_e telle que $Z_e/AB = 0,19$ (Barker, 1989).

Interprétation des mesures

Les mesures réalisées sont sous formes de pseudo-sections de résistivités apparentes. L'interprétation de ces panneaux électriques consiste à définir à l'aide d'une procédure d'inversion un modèle de structure du sol qui puisse reproduire les données mesurées. Cette inversion des pseudo-sections est réalisée à l'aide du logiciel RES2DINV et on obtient les résistivités vraies du sous-sol sous la forme d'un modèle synthétique de structure du sol. Avant l'inversion, nous avons procédé à un filtrage des données et la procédure d'inversion proprement dite est réalisée suivant un processus itératif (Loke et Barker, 1996). Cependant, on peut avoir pour les mêmes données mesurées (pseudo-section de ρ_a) une grande gamme de modèles 2D de structures du sous-sol qui génèrent la même pseudo-section de ρ_a lorsque pour deux modèles différents (ρ_1, z_1) et (ρ_2, z_2), on a $z_1 \times \rho_1 = z_2 \times \rho_2$: il s'agit du problème inverse. Ce problème d'équivalence est résolu à partir des connaissances à priori sur le terrain étudié permettant de contraindre l'interprétation.

L'utilisation combinée des fractures relevées sur les affleurements rocheux et de la prospection géophysique pour la validation des linéaments issus du traitement des images satellitaires nous permettra de confirmer la nature géologique de ces linéaments. Certaines des fractures ainsi obtenues peuvent être hydrauliquement actives et être le siège de circulation des eaux souterraines, constituant ainsi une cible hydrogéologique pour les futurs forages. Mais, la proximité d'un forage à un accident majeur ne garantit pas sa productivité. Celle-ci est sous l'influence de plusieurs paramètres.

II.3. Méthodologie d'optimisation de la productivité des forages

La productivité d'un forage est la capacité d'un aquifère à fournir pendant le pompage un débit minimal susceptible d'être exploité (Gombert, 1997). Cette productivité dépend de plusieurs paramètres pertinents dont la recharge, la transmissivité et le débit spécifique. Dans cette étude, seulement quelques paramètres disponibles ont été pris en compte.

II.3.1. Définition des paramètres de productivité

Plusieurs paramètres disponibles ont été pris en compte afin de mesurer leur influence sur la productivité des forages.

Le débit étudié est le débit en fin de foration (Q_f). En effet ces débits de foration ont des valeurs assez proches des débits maximums réels des aquifères, contrairement aux débits d'exploitation qui sont plutôt sous l'influence des stratégies de foration, des objectifs fixés et des pompes installées.

La profondeur totale des forages (PTF) a une influence sur le débit et est souvent déterminée par les études géophysiques. L'épaisseur d'altération ou des altérites (EA) constitue la partie capacitive de l'aquifère tandis que l'épaisseur des altérites saturées (EAS) conditionne la recharge de l'horizon fissuré. Le niveau statique (NS) représente le niveau d'eau dans le puits à l'état naturel. Les profondeurs des venues d'eau caractérisent les profondeurs hydrauliquement actives ; on les dénombre souvent jusqu'à quatre, mais dans cette étude, ce sont les profondeurs des venues d'eau maximales (PVE) qui sont prises en compte. Ces dernières indiquent la profondeur de l'horizon fissuré qui est suffisamment perméable et identifiable pendant la foration. Pour mieux apprécier les débits susceptibles d'être fournis par les forages et connaître la corrélation entre ces différents paramètres, une analyse statistique a été réalisée.

II.3.2. Analyse statistique des paramètres de forages

Il s'agit dans un premier temps d'étudier de façon détaillée l'influence des différents paramètres de productivité pris individuellement sur le débit de foration. Par la suite, une analyse en composantes principales normées (ACPN) permettra d'identifier les corrélations entre les différents paramètres pris dans leur ensemble et de confirmer les résultats sur l'analyse bi variée. L'interprétation de l'ACPN est essentiellement basée sur la matrice de corrélation entre variables, les valeurs propres pour déterminer le nombre de facteurs et les coordonnées des variables pour leur représentativité. L'ACPN est une méthode très efficace permettant d'analyser les corrélations entre plusieurs variables. Cependant elle a des limites dues au fait que c'est une méthode de projection, et que la perte d'information induite par la projection peut entraîner des interprétations erronées.

Une méthodologie de spatialisation des linéaments de la province du Bazéga suivie d'une optimisation de la productivité des forages constitue sans doute une base solide pour l'implantation de futurs forages. Mais qu'en est-il des écoulements dans le milieu souterrain ? Quelle est la réponse d'un aquifère face à une sollicitation telle que le drainage (pompage) ? La complexité de la géométrie de l'aquifère (hétérogénéité, anisotropie, etc.) s'accompagne d'une succession des régimes d'écoulement pendant le pompage.

II.4. Méthodologie de caractérisation hydrodynamique de l'aquifère

Il s'agit dans cette étude de déterminer les différents régimes d'écoulement de l'aquifère et la transmissivité qui est le paramètre hydrodynamique le plus important en hydrogéologie selon Meier et al. (1998). Cette caractérisation hydrodynamique est faite par l'interprétation d'un essai de nappe. Cette technique est la plus utilisée pour déterminer les propriétés hydrauliques d'un aquifère. Cette interprétation est généralement basée sur l'équation de diffusivité en régime d'écoulement transitoire :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Avec S le coefficient d'emmagasinement (sans unité), T la transmissivité de l'aquifère (en m²/s), h la charge piézométrique (en m), r la distance par rapport au puits de pompage (en m) et t le temps (en s).

II.4.1. Méthodes classiques d'interprétation des essais de nappe

L'interprétation des essais de pompage est généralement faite à partir de la solution de l'équation de diffusivité en régime transitoire proposée par Theis.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u} du}{u}, \text{ avec } u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

s (m) est le rabattement mesuré dans un piézomètre situé à la distance r (m) du puits pompé et Q (m³/s) le débit de pompage. Jacob propose en 1950 une forme simplifiée de la formule de Theis, permettant de déterminer rapidement T et S pour un temps de pompage suffisamment long ($u < 0,01$) et $r < 50$ m.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \times \ln \left(\frac{2,25 \times T \times t}{S \times r^2} \right)$$

Ces méthodes classiques reposent cependant sur de nombreuses contraintes. En effet, elles ne sont valables que si l'on suppose que la nappe est captive, que l'aquifère est homogène, isotrope, infini et d'épaisseur constante (écoulement radial vers l'infini), ce qui dans la pratique n'est pas toujours le cas. Il est alors indispensable de faire recours à de nouvelles méthodes plus performantes dont la méthode de la dérivée logarithmique du rabattement.

II.4.2. Méthode de la dérivée logarithmique du rabattement

La méthode de la dérivée logarithmique du rabattement est basée sur le calcul de la dérivée du rabattement par rapport au logarithme du temps. L'interprétation est faite à partir de la courbe diagnostique qui est une représentation simultanée de la courbe de rabattement s et de la dérivée logarithmique de ce rabattement $\frac{\partial s}{\partial \ln t}$ en fonction du temps dans un repère log-log ou semi-log. L'un des avantages de cette méthode est que la dérivée logarithmique du rabattement est extrêmement sensible à des subtiles variations des écoulements des eaux souterraines, ce qui permet de détecter des comportements de l'aquifère difficiles à identifier sur la courbe de rabattement toute seule (Renard et al., 2008); ces variations peuvent être provoquées par les hétérogénéités de l'aquifère. De plus, l'analyse de la courbe diagnostique facilite l'identification du modèle conceptuel approprié de l'aquifère. A partir de cette méthode, on peut ainsi non seulement déterminer les paramètres T et S , mais également identifier les différents régimes d'écoulement sur un seul graphique bi-logarithmique (Fleury et al., 2009). La dérivée logarithmique est évaluée numériquement à partir de la série de données (s, t) où s est le rabattement et t le temps depuis le début du pompage. Sachant que $\frac{\partial s}{\partial \ln t} = t \cdot \frac{\partial s}{\partial t}$, une approximation de cette dérivée au centre de l'intervalle $[t_{i-1}; t_i]$ est donnée par l'expression :

$$\left. \frac{\partial s}{\partial \ln t} \right|_{t_m} \approx \left(\frac{t_i + t_{i-1}}{2} \right) \left(\frac{s_i - s_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) \quad (\text{Renard et al., 2008})$$

Pour l'analyse de la courbe de remontée, le calcul de la dérivée logarithmique est fait à partir de la série de donnée $(b_t, \Delta t_e)$ qui sont respectivement les rabattements et les temps équivalents pendant la remontée avec $b_t = S_t - r_t$ et $\Delta t_e = \frac{t_p \Delta t}{(t_p + \Delta t)}$

t_p est la durée du pompage, Δt est le temps écoulé depuis la fin du pompage, S_t est le rabattement total à la fin du pompage et r_t le rabattement résiduel au temps.

L'interprétation de la courbe dérivée nous permettra d'identifier les différents régimes d'écoulement de l'aquifère. L'estimation de la transmissivité se fait lorsqu'un écoulement radial cylindrique est atteint, caractéristique d'un aquifère homogène et isotrope (Parks and Bentley, 1996). Cette estimation est fiable lorsque les données de l'essai de pompage permettent d'avoir une dérivée du rabattement constant sur au moins un cycle-log sur la courbe diagnostique.

$$T = \frac{Q}{4\pi \times d}$$

où d est la moyenne de la dérivée logarithmique sur la partie constante de la courbe ; Q est le débit constant de pompage pendant l'essai.

CONCLUSION PARTIELLE

L'ensemble des méthodes retenues dans cette étude sont adaptées au contexte local et dépendent des moyens disponibles. Leur mise en œuvre nous a permis d'aboutir à un ensemble de résultats présentés dans la partie suivante.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Caractérisation géologique

III.1.1. Spatialisation des linéaments

Un des moyens d'étudier les structures géologiques consiste à mettre en évidence et analyser les linéaments repérables sur des images satellitaires. L'ensemble des opérations de rehaussement des images Landsat TM nous a permis de relever des alignements subrectilignes ou morpho-structuraux en vue d'établir une carte linéamentaire de la province du Bazéga. La première composante CP1 des néo-canaux obtenus à partir de l'ACP des 7 bandes Landsat TM regroupe à elle seule plus de 98% de l'information initiale. Elle nous a permis de relever plusieurs linéaments de taille kilométrique.

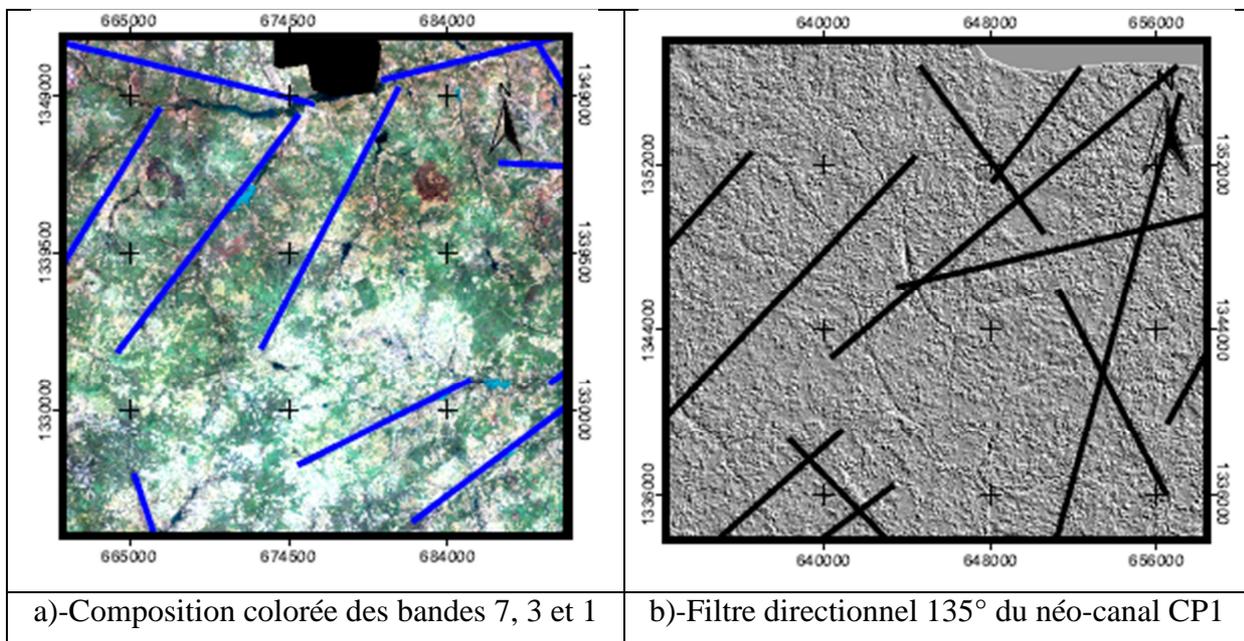


Figure 14 : Linéament mis en évidence par les opérations de rehaussement d'images

La bande 7 nous a également permis de relever plusieurs autres linéaments, compte tenu de sa spécificité de discrimination des roches telles que les granites à deux micas. Ces images infrarouges sont bien adaptées à une utilisation à caractère géologique (Lachaine, 1999).

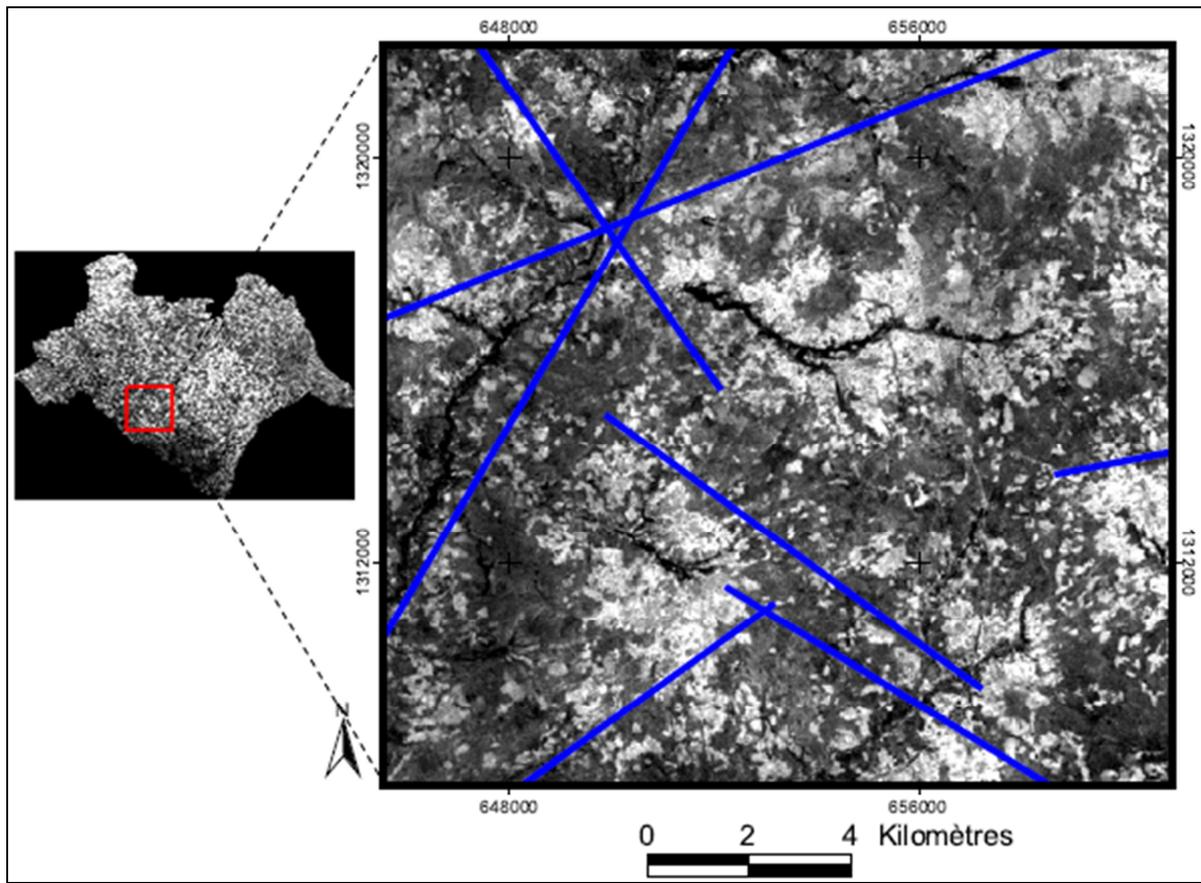


Figure 15: Bande 7 de l'image Landsat TM faisant ressortir quelques linéaments

Une interprétation de l'image traitée a permis de distinguer deux types de linéaments : les linéaments de dépression obtenus par l'étude du réseau hydrographique (Type A) et les linéaments hors dépression obtenus par les variations de niveaux de contrastes de tonalité et de texture de l'image satellitaire (Type B). Bien que ces derniers soient les plus importants, on peut aussi noter que les linéaments de dépression peuvent nous apporter des renseignements structuraux. En effet en zone de socle, le réseau hydrographique s'inscrit souvent dans le réseau de fracture. La figure suivante représente la carte de linéaments regroupant tous les linéaments de dépression et hors dépression nouvellement cartographiés.

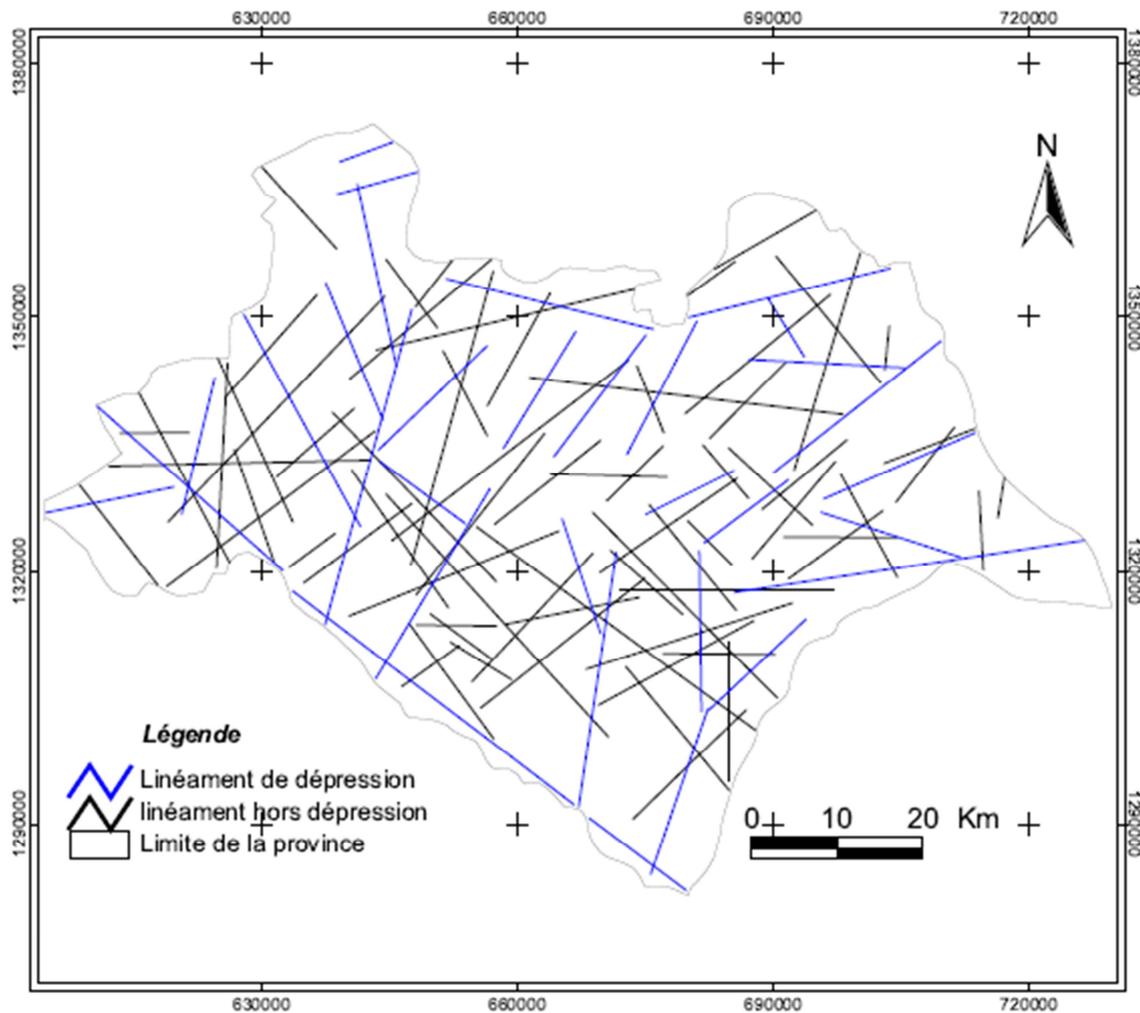


Figure 16 : Carte des linéaments issus du traitement des images Landsat TM

III.1.2. Analyse de la carte linéamentaire

La carte linéamentaire (figure 17) obtenue compte 103 linéaments tous de tailles kilométriques comprises entre 4,86 km et 41,69 km. La longueur totale des linéaments cartographiés est de 1927 km avec une longueur moyenne de 18,70 km. Seuls les linéaments de grande taille ont été relevés et près de 60% des linéaments identifiés ont une taille comprise entre 9 et 24 km. Cette classe de linéaments qui est plus représentée est répartie sur presque toute la zone d'étude.

Tableau 1 : Distribution des linéaments

Classe (km)	[4; 9[[9; 14[[14; 19[[19; 24[[24; 29[[29; 34[[34; 39[[39; 44[Total
Nbre de linéaments	13	24	24	14	13	6	6	3	103
Pourcentage (%)	13	23	23	14	13	6	6	3	100

Ces linéaments montrent la prépondérance des alignements hors dépression dans un contexte granitique du milieu d'étude. Ces derniers (linéaments hors dépression de contraste de tonalité et de texture) représentent 69 % des linéaments identifiés et ont une longueur totale de 1273 km.

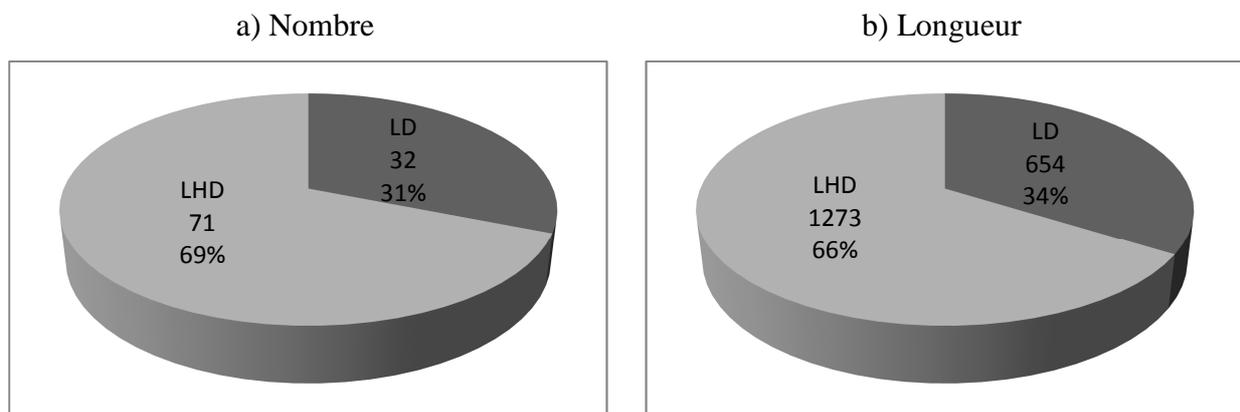


Figure 17 : Diagramme de distribution des types de linéaments

Cette forte représentativité des linéaments hors dépression s'explique essentiellement par le fait que dans la zone d'étude, le réseau hydrographique est moins dense. Cette représentativité serait sans doute accrue puisque certains linéaments de dépression se superposent avec les linéaments de contraste et de texture.

La densité de linéament (fracturation) est une caractéristique très importante dans la caractérisation géologique en zone de socle. Elle est de $0,357 \text{ km/km}^2$ et apparait comme une faible densité de linéament. Mais on peut noter que cette faible densité de linéament est essentiellement due au fait que seuls les linéaments de grande taille ont été relevés. Les images Landsat TM utilisées offrent la possibilité relever plusieurs autres structures linéaires de petite taille et qui sont très nombreuses, compte tenu de leurs résolutions spatiales de 28,5 m. Ces linéaments de petites tailles assimilables aux fractures secondaires jouent un rôle très important dans la circulation des eaux souterraines. En effet, ils servent d'interconnexions entre les fractures principales (Engalenc et al., 1978). L'ensemble des linéaments mis en évidence dans cette étude ont des directions variables et certains se croisent entre eux, constituant ainsi des conditions idoines pour l'implantation des forages.

III.1.3. Analyse directionnelle et validation géologique

L'analyse directionnelle de la carte linéamentaire s'est faite à partir des rosaces directionnelles. Ces rosaces directionnelles permettent de visualiser l'organisation spatiale des linéaments en faisant ressortir les directions les plus représentées d'une part et de faire une comparaison des différentes familles directionnelles d'autre part. Les principales familles directionnelles de linéaments issus des images satellitaires ont été comparées aux principales familles directionnelles mesurées sur les affleurements.

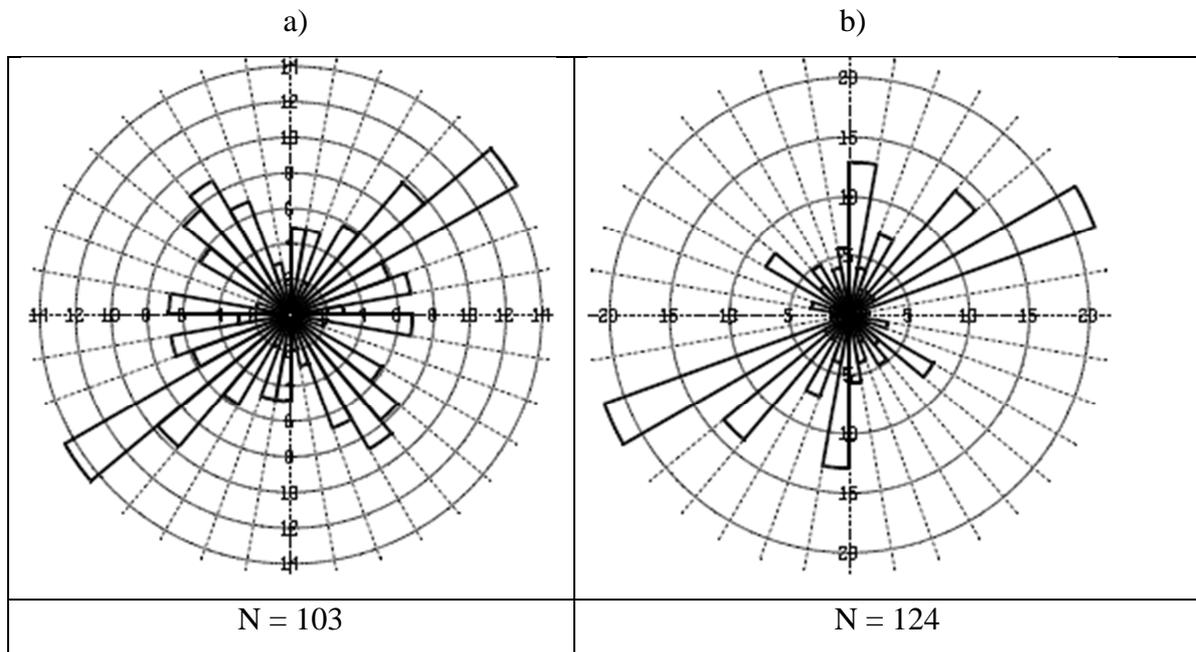


Figure 18 : a) Rosaces directionnelles des linéaments issus du traitement des images Landsat TM ; b) Affleurement rocheux

L'analyse de la répartition directionnelle des linéaments par classe de 10 degrés issus du traitement des images Landsat TM montre qu'il existe deux orientations principales ; on note une forte composante NE-SW et une autre NW-SE. La composante NE-SW est représentée par les classes directionnelles N40-N50 et N50-N60. Ces deux classes regroupent près de 25% de l'ensemble des linéaments identifiés, avec une longueur totale de 462 km, soit 24% de la longueur totale. Elles coïncident approximativement avec la direction de l'orogénèse éburnéenne responsable de la fracturation suivant la direction NNE-SSW. La composante NW-SE est mise en évidence par les directions N130-N140 et N140-N150 avec 16% des linéaments

identifiés, pour une longueur totale de 305 km. Le reste des linéaments est repartis inégalement autour des autres directions. Les classes directionnelles N70-N80, N90-N100, N120-130 et N150-N160 sont non négligeables et chacune d'elles représente environ 6% des linéaments identifiés.

L'analyse de la rosace directionnelles issue du relevé des accidents tectoniques sur les affleurements rocheux (Figure 19b) nous montre que les directions Nord-Sud, N40-N50, N60-N70 et N120-N130 sont les plus représentées. Une comparaison de cette rosace avec celle issue du traitement des images satellitaires (figure 19a) met en évidence une certaine similitude. Cependant, une différence apparaît sur les deux diagrammes. En effet, on remarque que les classes directionnelles N130-N140, N140-N150 et N150-N160 qui représente environ 22% des linéaments identifiés sur les images satellitaires sont moins représentées sur la rosace issue du relevé de terrain. Cela peut se justifier par le fait qu'il est impossible de couvrir tous les affleurements rocheux de la zone d'étude. De plus, le site choisi ne met pas toujours en évidence toutes les directions de fractures car certaines fractures n'affleurent pas et certaines de très petites tailles qui n'ont pas été prises en compte peuvent être des représentations surfaciques de grandes fractures. De plus en comparant les discontinuités images obtenues dans cette étude et la carte géologique, on constate que l'unique faille représentée sur cette carte est soulignée par un linéament de dépression. Cette similitude peut s'expliquer par le fait que certaines sections du réseau hydrographique se superposent parfaitement avec certaines discontinuités linéaires majeures (Kouamé et al., 1999). Ceci nous amène à conforter l'idée selon laquelle en zone de socle, le réseau hydrographique s'inscrit dans le réseau de fracture. La carte de linéaments obtenue apporte ainsi des informations supplémentaires et il apparaît que la télédétection est un outil indispensable pour la cartographie structurale. Les résultats de cette étude sur la spatialisation des linéaments sont en accord avec ceux obtenus par Toé (2004) dans la localité de Kombissiri et ses environs, à partir de la composition colorée dans les trois canaux principaux des images ASTER. En effet, les deux cartes ont des linéaments en commun et les rosaces directionnelles issues des deux cartes sont presque similaires. Malgré les similitudes directionnelles mises en évidence entre les linéaments et d'une part les microfissures relevées sur les affleurements et d'autres par sur la carte géologique, peut-on assimiler ces linéaments à des fractures d'origines géologiques ? Les résultats de la campagne géophysique nous permettront de répondre à cette question.

III.1.4. Prospection hydro géophysique

Deux profils de panneaux électriques ont été réalisés dans le cadre de cette étude dans les villages Lamzoudo (Profil 1) et Pibsé (Profil 2). La propriété du sous-sol mesurée est la résistivité électrique et permet d'imager d'éventuelles hétérogénéités structurales afin de confirmer les résultats sur la fracturation. Ces profils ont été réalisés perpendiculairement aux directions de deux linéaments de référence selon la figure suivante :

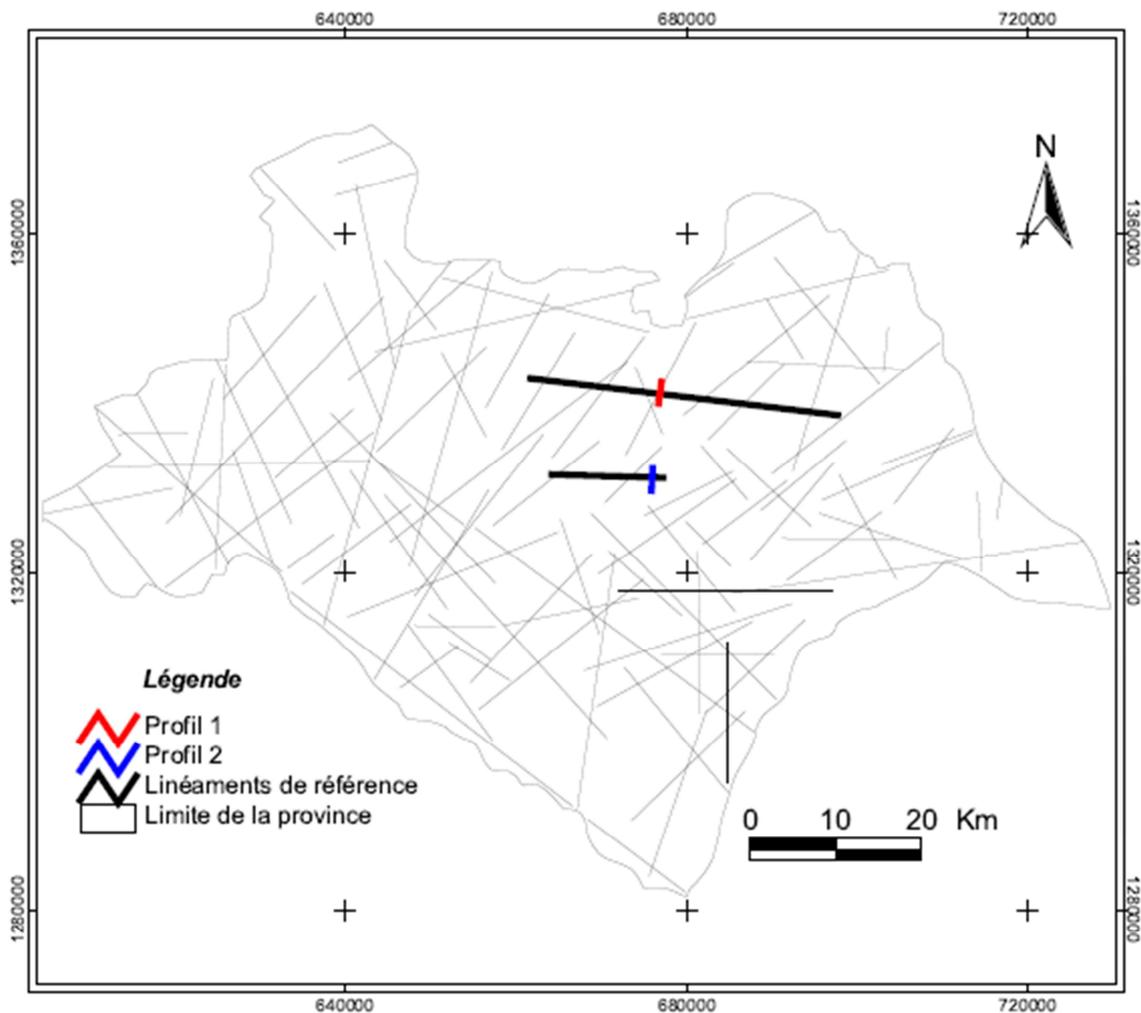


Figure 19 : Présentation des linéaments de référence pour la réalisation du panneau électrique

Les deux panneaux électriques réalisés sont localisés à la figure 20.

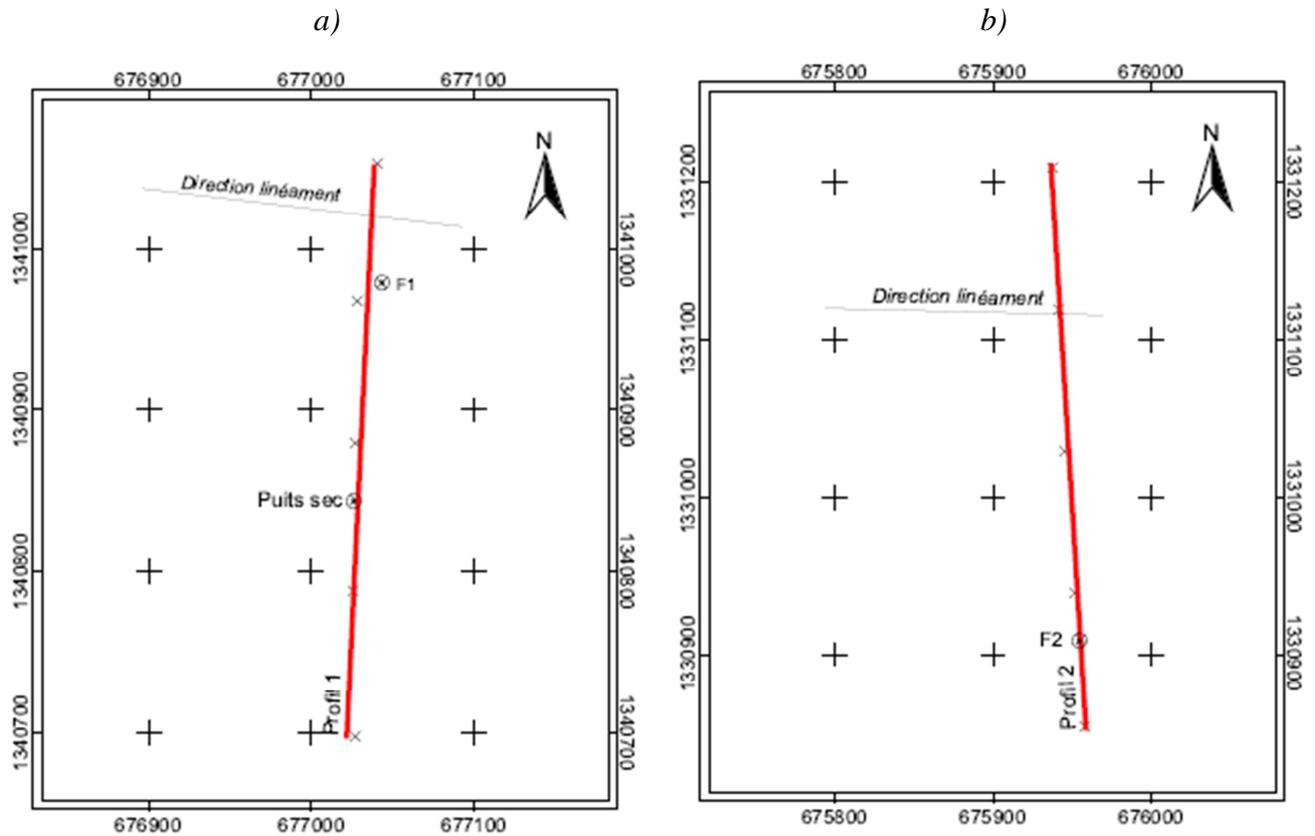


Figure 20 : Localisation des profils de panneaux électriques : a) Profil 1, b) Profil 2.

L'inversion des données de terrains est faite avec le logiciel RES2DINV et on obtient un modèle du sous-sol suivant une échelle de profondeur vraie. La fiabilité des modèles obtenus est bonne pour les deux profils (RMS 1 = 6,4% ; RMS 2 = 4,3%). Les coupes de résistivités électriques des deux profils sont présentées à la figure suivante.

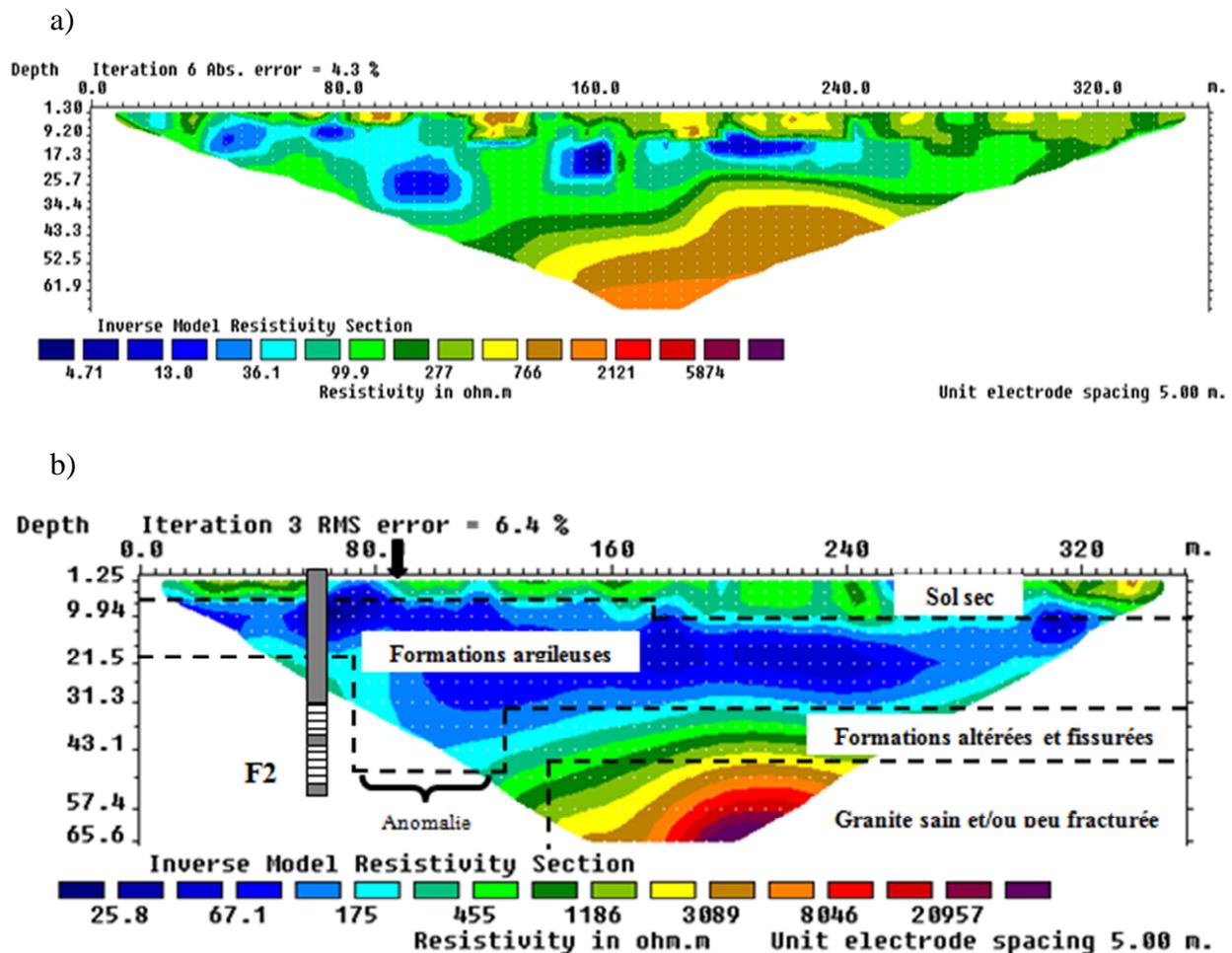


Figure 21 : Coupe de résistivité électrique de panneaux électriques réalisés a) profil 1 ; b) profil 2

Interprétation géophysique

En tenant compte des informations géologiques de la zone d'étude, nous avons établi une correspondance entre les différentes gammes de résistivité électrique et les formations géologiques.

Tableau 2 : Correspondance entre résistivité électrique et géologie

Gamme de résistivité ($\Omega \cdot m$)	Type de roche
Moins de 100	Formations argileuses
Entre 100 et 400	Formations altérées et arènes sableuses
Entre 400 et 1000	Formations fissurées
Plus de 1000	Roche saine et/ou peu fissurée

Interprétations géologique et hydrogéologique

L'interprétation du profil 2 nous permet d'envisager la présence de plusieurs formations réparties comme suit, du haut vers le bas: i) un recouvrement superficiel moins conducteur de résistivité ($500 \Omega.m$), d'épaisseur variant entre 0,0 et 6-9 m, correspondant à un sol sec ; ii) une couche plus conductrice variant de 6-9 m à 21-50 m ; il s'agit des formations argileuses et sont peu perméables ; ces formations sont susceptibles de contenir de l'eau ; iii) une zone intermédiaire (horizon fissuré) limitée aux argiles par le front d'altération sans doute constituée de formations altérées et fissurées avec des résistivités électriques variant entre 400 et $1000 \Omega.m$; iv) enfin une zone très résistante située plus en profondeur avec une résistivité supérieure à $1000 \Omega.m$ définissant la présence du socle sain moins fracturé.

Ce profil final met également en évidence une variation horizontale de la résistivité électrique. En effet l'épaisseur d'altération est peu variable le long de tout ce profil 2. Mais autour de l'abscisse $x = 90 m$, on observe une épaisseur de formations altérées beaucoup plus marquée. Cette épaisse couche d'altération met en évidence la présence d'une anomalie géologique. Ces poches altérées se sont développées à la faveur de la fracturation puisque le mécanisme de l'altération est sous la dépendance de la fracturation (Engalenc et al., 1978). Les eaux s'infiltrent préférentiellement au niveau des anomalies et ces dernières constituent des cibles favorables à l'implantation des forages. Le linéament de référence utilisé pour la réalisation de ce profil se trouve à la position $x = 85 m$ sur le profil 2. Il y a donc concordance entre les résultats du traitement des images satellitaires et ceux issus de l'interprétation géophysique. Le forage F2 (figure 21) implanté à proximité du profil 2 (abscisse $x = 65 m$ sur le profil) montre une bonne corrélation entre les analyses faites du modèle obtenu et des informations tirées de ce forage. En effet, ce forage a une profondeur totale de 55,45 m et pénètre la zone fissurée sur une épaisseur d'environ 26 m. De plus les zones de crépine coïncident parfaitement avec les profondeurs de faibles résistivités électriques. Cependant la productivité de ce forage aurait dû être plus importante si elle était implantée à l'abscisse $x = 150 m$, compte tenu de l'épaisse couche de l'horizon fissuré.

Les panneaux électriques apportent dans ce contexte un argument supplémentaire sur la nature géologique des linéaments identifiés par des images satellitaires et permettent d'avoir une idée sur la géométrie des réservoirs potentiels. Toutefois, l'incertitude sur la présence d'une eau

souterraine mobilisable reste entière car les valeurs de résistivité électriques ne signent aucunement la présence d'une telle eau.

III.2. Optimisation de la productivité des forages

Dans cette étude, 158 forages réalisés dans la province du Bazéga ont été utilisés dans un contexte majoritairement granitique. Sur chaque forage étudié, outre le débit en fin de foration Q_f (m^3/h), quatre autres paramètres ont été analysés : la profondeur totale du forage PTF (m), l'épaisseur des altérites EA (m), l'épaisseur des altérites saturées EAS (m) et la profondeur de la venue d'eau maximale PVE (m). Les données statistiques de ces paramètres de forages sont synthétisées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Statistiques des paramètres des forages de la province du Bazéga

Paramètres	Min.	Max.	Médiane	Moy. arith.	Ecart-type	CV (%)	Moy. géo.
Q_f (m^3/h)	0,49	12,00	3,00	3,79	2,74	72,17	2,90
PTF (m)	32,00	85,00	48,00	48,92	8,77	17,93	48,22
EA (m)	1,00	50,00	22,00	21,90	9,75	44,50	18,53
EAS (m)	0,00	37,28	8,98	10,44	9,56	91,57	10,05
PVE (m)	12,00	59,00	30,00	30,91	8,60	27,81	29,73

III.2.1. Analyse de la productivité des forages

Analyse des débits

Dans la province du Bazéga, les débits de foration varient entre 0,49 et 12 m^3/h avec une moyenne géométrique de 2,9 m^3/h . Le coefficient de variation de 72,2% traduit une forte dispersion des données autour de leur moyenne arithmétique. Cette variabilité des débits de foration dépend de plusieurs facteurs dont la géomorphologie, la variation spatiale de la densité de fracturation, l'hétérogénéité dans les aquifères de socle, la perméabilité, des objectifs fixés lors des différentes campagnes hydrauliques, etc. Pour mieux apprécier la distribution des débits de forage, nous nous sommes basés sur la classification du CIEH. Les résultats de l'histogramme de la distribution des débits de foration (Figure 24a) nous montrent que les très faibles débits (7,6%) et les débits faibles (36,1%) représentent 43,7% de l'ensemble des débits de la province et que 30,4% des forages ont des forts débits (supérieurs à 5 m^3/h). Au vue du critère « productivité » = débit de foration défini par Gombert (1997), il apparait que la productivité de

l'ensemble des forages réalisés dans la province est moins satisfaisante, compromettant ainsi l'alimentation en eau des populations.

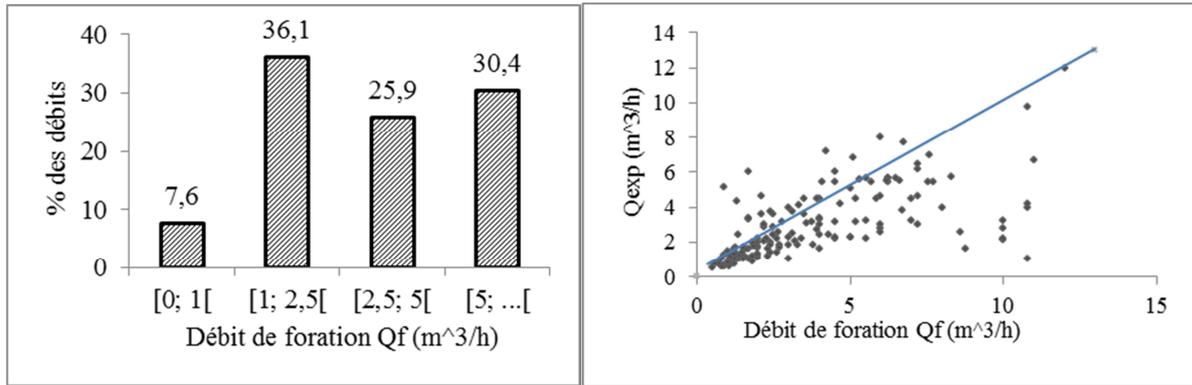


Figure 22 : a) Distribution des débits de foration ; b) Corrélation entre Q_f et Q_{exp}

Ces débits de foration ne sont pas toujours atteints pendant l'exploitation. En effet les corrélations entre les débits en fin de foration et les débits d'exploitation (Q_{exp}) (Figure 22b) mettent en évidence une légère différence entre les débits de foration et les débits d'exploitation lorsque ceux-ci sont inférieurs à $2 m^3/h$. Quand le débit de foration devient grand, on note une baisse considérable des débits d'exploitation. Il conviendrait alors de porter une attention particulière sur les forages à gros débits (AEP, périmètre irrigué) par l'interprétation des essais de nappe longue durée. Cela peut s'expliquer par le fait que ces forages sont généralement des ouvrages « imparfaits » c'est-à-dire que l'aquifère n'est pas capté sur toute son épaisseur.

Relation entre le débit de foration et la profondeur totale du forage

Dans la province du Bazéga, la profondeur des forages réalisés varie entre 32 et 85 m avec une profondeur moyenne de 48,2 m. Le coefficient de variation est faible (17,9%) traduisant une certaine homogénéité de ces profondeurs. La répartition des débits de forage en fonction de la profondeur totale des forages est présentée à la figure ci-dessous.

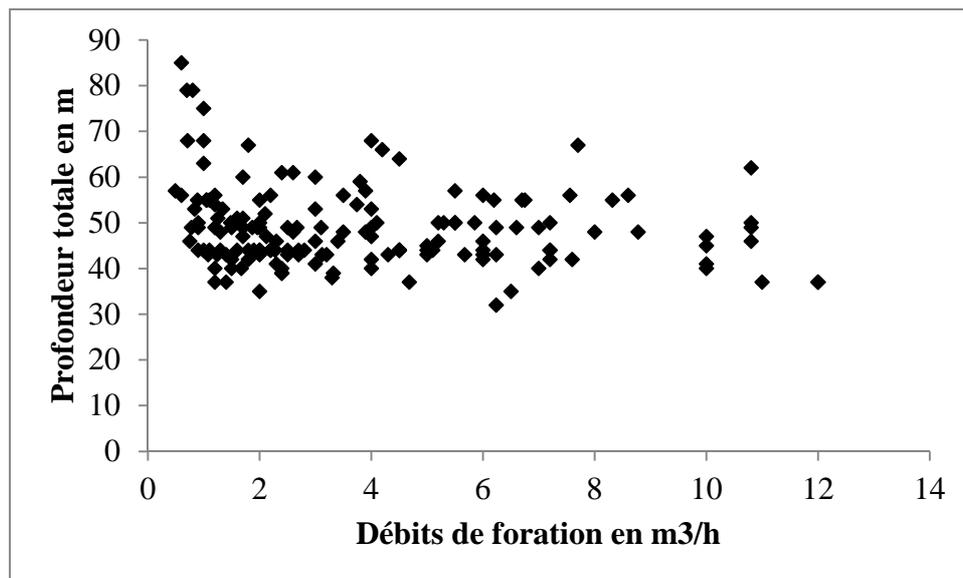


Figure 23 : Evolution des débits de foration en fonction de la profondeur totale du forage

L'analyse de cette figure montre que la plupart des débits se rencontrent entre 30 et 70 m. On remarque également que les forages à forts débits (supérieurs à 5m³/h) ont des profondeurs comprises entre 35 et 60 m tandis que les forages à faibles débits ont des profondeurs très variables et les profondeurs atteignant 70 m ont des débits très faibles (inférieurs à 1 m³/h). En effet, en zone de socle, l'alimentation des forages se fait par des venues d'eau de profondeurs variables se trouvant dans des discontinuités lithologiques de forte perméabilité ; ce qui peut nous amener à croire que plus le forage est profond, plus sera grand le nombre de venues d'eau et donc la productivité. Mais, la perméabilité diminue rapidement avec la profondeur, due à une diminution de la densité de fracturation avec la profondeur (Girousse, 1984). Donc ce résultat obtenu s'explique par le fait que dans les granites, les venues d'eau profondes produisent moins que les venues d'eau supérieures. Aussi les débits en fin de foration ne correspondent qu'à des venues d'eau captées qui peuvent être moins profondes que la profondeur totale forée, puisque pour une campagne d'hydraulique, cette dernière est généralement fixée avant le début de la campagne. On peut dire dans l'ensemble que les bons débits sont générés pour des profondeurs comprises entre 35 et 60 m. Il est alors indispensable pendant la foration de s'assurer de ne pas forer à plus de 70 m de profondeur si aucune venue d'eau importante n'est rencontrée.

Relation entre le débit et l'épaisseur des altérites

Dans la province du Bazéga, les épaisseurs des altérites varient entre 1 et 50 m avec une moyenne de 18,4 m. Ces épaisseurs sont très variables (CV = 44,5%) et faibles en général et peuvent s'expliquer par les affleurements rocheux qu'on observe de part et d'autre sur le site d'étude. La figure 24 présente la variation du débit de foration en fonction des épaisseurs des altérites.

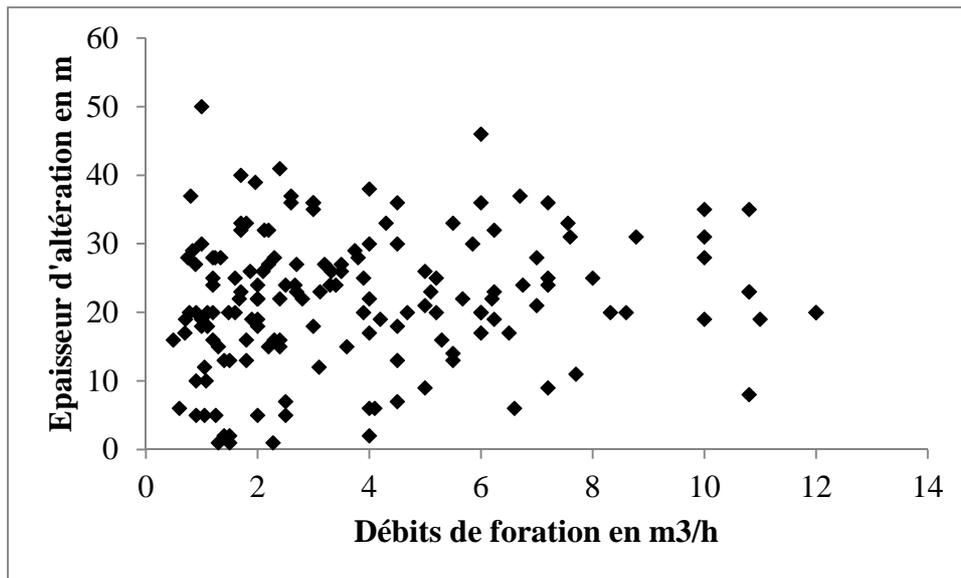


Figure 24 : Evolution des débits de foration en fonction de l'épaisseur d'altération

On remarque que les épaisseurs d'altérites les plus représentées se situent dans entre 10 et 30 m avec une fréquence de plus de 66 %. Au regard de cette figure, aucune tendance générale ne se dégage. Néanmoins, on peut constater que pour les forages à forts débits, l'épaisseur d'altération varie entre 15 et 36 m. En plus 14 forages de faibles débits ont des épaisseurs d'altération inférieures à 10 m tandis que 71% des forages ayant une épaisseur d'altération supérieure à 36 sont de faibles débits. Ces résultats nous amènent à dire que le débit de foration est faible lorsque l'épaisseur d'altération est très faible ou très forte. Cette très forte épaisseur d'altération improductive peut induire pendant la foration une faible épaisseur de l'horizon fissuré, et donc moins de chance de rencontrer plusieurs venues d'eau. Il semble donc que l'épaisseur d'altération est un paramètre qui influence sur la productivité des forages. Une épaisseur des altérites variant entre 15 et 36 m constituerait un plus dans la réussite du forage. Cette relation entre l'épaisseur d'altération et la productivité est d'une importance capitale. En

effet, elle justifie la recherche des zones d'altérations lors des campagnes de prospection hydro géophysique utilisant les trainés électriques et les panneaux.

Relation entre le débit et l'épaisseur des altérites saturées

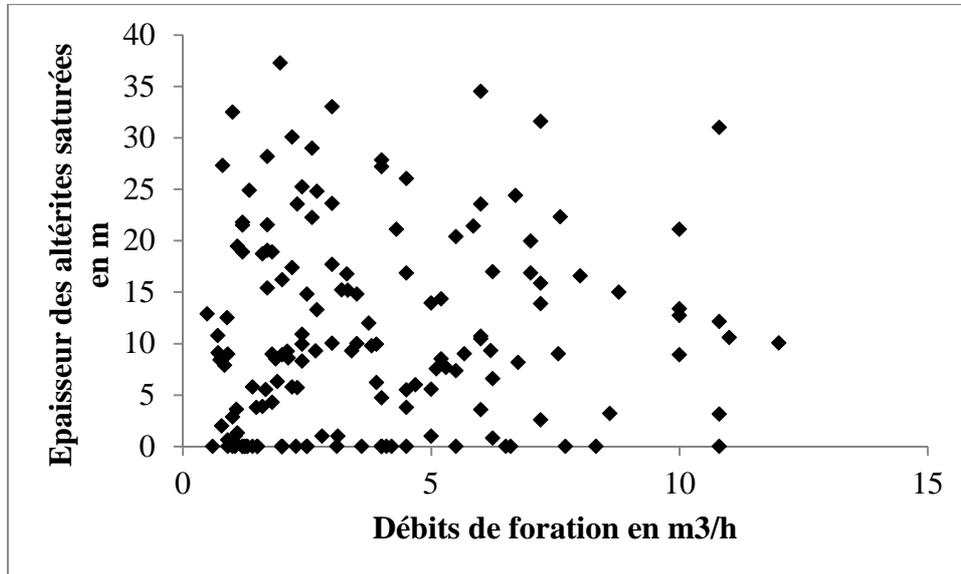


Figure 25 : Evolution des débits de foration en fonction de l'épaisseur d'altération

L'épaisseur des altérites saturées varie de 0 à 37,3 m avec une moyenne de 10,0 m. Le coefficient de variation très élevé (91,6%) traduit une forte variabilité de ce paramètre. Cette variabilité est due au fait que le niveau d'eau dans les aquifères des terrains granitiques soit souvent soumis aux fluctuations saisonnières à cause de la faiblesse de l'épaisseur d'altération constatée au niveau de ces formations. Cette partie saturée des altérites représente 54% des altérites totales et conditionne la recharge de l'horizon fissuré.

L'organisation d'ensemble de la distribution des débits de foration en fonction de l'épaisseur des altérites saturées ne laisse pressentir aucune tendance. Mais une remarque intéressante est que 12 forages ont des débits moyens et forts avec une épaisseur des altérites saturées nulles. Cela veut dire que la recharge de l'horizon fissuré sous-jacent se fait plutôt latéralement et non à travers la couche des altérites supérieures. En effet, en zone de socle, les réseaux de fractures secondaires jouent un rôle primordial dans la circulation des eaux souterraines ; ils servent d'interconnexion entre les différentes fractures principales. Ce qui peut justifier la productivité de certains horizons fissurés en l'absence d'une couche d'altérites saturées. Aussi, un autre constat se dégage : plus de 81% des forages ayant une épaisseur des altérites saturées ont des débits de foration inférieurs à 5 m³/h. Ce résultat paraît contradictoire quant au rôle même des altérites saturées. Mais la justification à ce résultat vient du fait qu'à

cause du caractère argileux des altérites et donc de la faible perméabilité, la circulation des eaux n'est pas toujours assurée vers l'horizon fissuré où le forage capte l'eau souterraine. De manière générale, on peut dire que les forts débits sont générés entre 0 et 25 m des épaisseurs des altérites saturées.

Relation entre le débit et la profondeur de la venue d'eau maximale

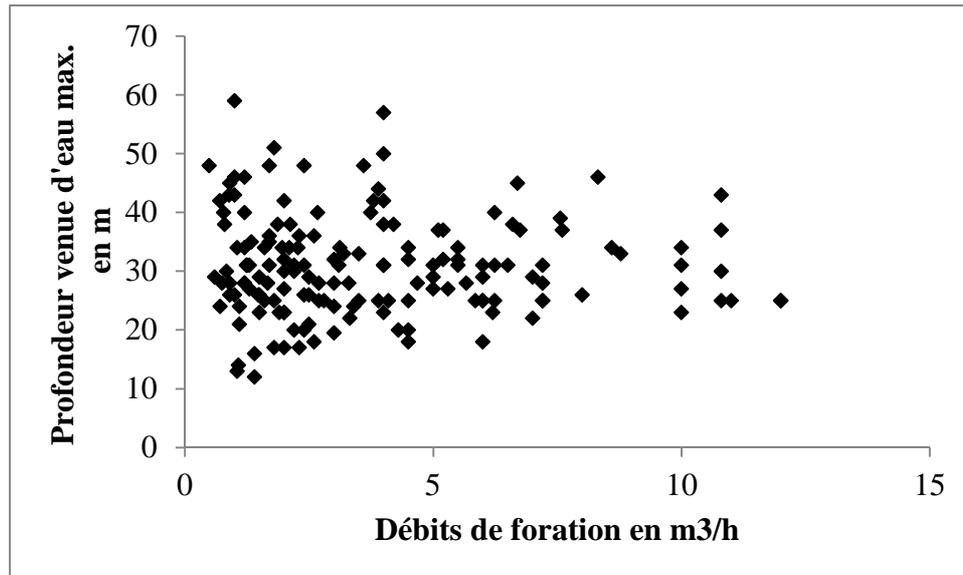


Figure 26 : Evolution des débits de foration en fonction de la première venue d'eau

La distribution des profondeurs des venues d'eau maximales dans l'aquifère de la province du Bazéga varie de 12 à 59 m, avec une moyenne de 29,7 m. L'analyse de la variation du débit en fonction des profondeurs des venues d'eau maximales nous montre que la classe de profondeur variant de 20 à 40 m semble la plus favorable pour obtenir un assez bon débit de foration puisque plus de 90% des forages à forts débits ont des premières venues d'eau dans cette tranche. Mais on constate que 76% des forages réalisés dans la province se situent également dans cette tranche. Ces différences de débit peuvent être dues au nombre de venues d'eau capté par le forage et à l'hétérogénéité l'horizon fissuré. En effet, le forage doit pour être productif recouper une ou plusieurs zones fracturées où la perméabilité est largement supérieure à celle de la roche saine. Une autre remarque pertinente concerne les profondeurs des venues d'eau maximales supérieures à 40 m; les forages qui y sont associés sont à plus de 87% de faibles débits, confirmant ainsi que les venues d'eau supérieures à environ 40 m sont moins productives.

Cela est essentiellement dû au fait que la pression exercée par la charge lithostatique entraîne une fermeture progressive des fractures surtout celles qui sont horizontales. Lors de l'implantation des futurs forages, il serait bénéfique d'arrêter un forage sec à plus de 60 m et de refaire une autre tentative plutôt que de poursuivre la foration sur le forage sec.

III.2.2. Etude des corrélations entre les paramètres de productivité

L'étude des corrélations entre les paramètres de productivité a été réalisée à partir d'une ACPN. Le tableau suivant présente la matrice de corrélation obtenue pour ces différents paramètres.

Tableau 4 : Matrice de corrélation des paramètres de forages

	Qf	PTF	EA	EAS	PVE
Qf	1,00				
PTF	-0,15	1,00			
EA	0,13	0,20	1,00		
EAS	0,10	0,09	0,80	1,00	
PVE	0,00	0,59	0,28	0,05	1,00

Ces paramètres de forage ont été projetés sur les différents axes factoriels. Chaque axe factoriel regroupe une quantité d'informations initiales et les contributions de ces axes sont présentées dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : Contribution des axes factoriels

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	2,03	1,46	0,94	0,40	0,16
% variance	40,61	29,22	18,89	8,00	3,28
% cumulé	40,61	69,83	88,72	96,72	100,00

L'interprétation des plans factoriels est faite à partir des facteurs F1 et F2. En effet, l'analyse du tableau 5 nous montre que les facteurs F1, F2 ont des valeurs propres supérieures à 1 et regroupent à eux seuls 69,8% des variables exprimées pour l'ensemble des forages traduisant ainsi la bonne qualité de la projection dans le premier plan factoriel. Chaque paramètre contribue à la formation des axes factoriels ainsi retenus.

Tableau 6 : Contribution des variables (%)

	Qf	PTF	EA	AES	PVE	Total
F1	0,62	15,45	37,73	28,84	17,36	100
F2	13,17	32,84	8,71	18,51	26,77	100

La projection des différents paramètres dans le plan F1-F2 est présentée dans la figure ci-dessous

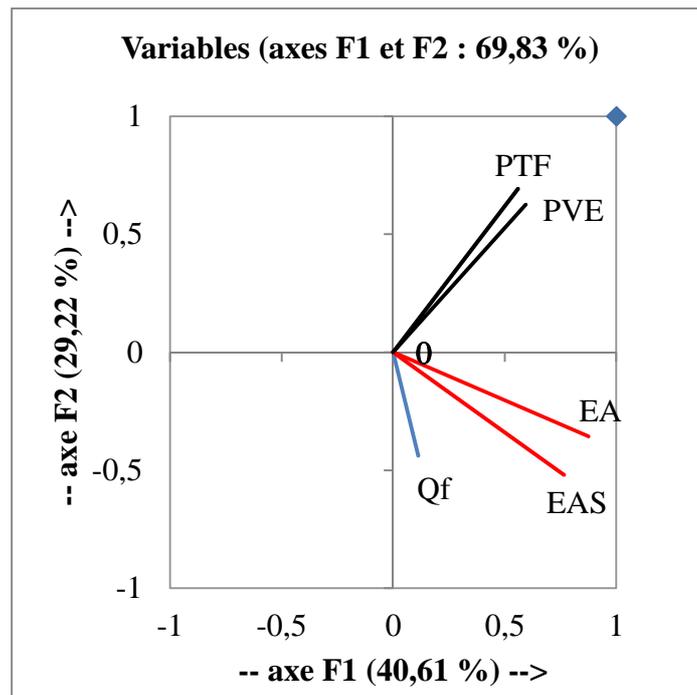


Figure 27 : Projection des variables dans les plans factoriels F1-F2

L'analyse de la matrice de corrélation (Tableau 4) montre que le débit de foration n'a aucune corrélation significative avec les autres paramètres de productivité. Cette faible corrélation peut s'expliquer par le fait qu'il existe d'autres facteurs contrôlant le débit des forages (densité de fracturation, transmissivité, etc.) qui ne sont pas exprimés dans cette analyse (Kouassi et al., 2012). Cependant, on note une faible corrélation négative avec la profondeur totale du forage (-0,15), ce qui signifie que lorsque la profondeur augmente, le débit de foration diminue. Ce résultat confirme ce qui a déjà été énoncé dans la partie précédente. On constate également une très forte corrélation entre les paramètres EA et EAS (0,80). Cette forte corrélation montre que plus l'épaisseur d'altération est grande, plus sa partie saturée est importante. Or cette dernière conditionne la recharge de l'aquifère de fissure puisque le réseau de fractures joue un rôle de drain et collecte l'eau dans les zones altérées et l'achemine au site de pompage. Ce qui rejoint l'idée en Afrique de l'ouest selon laquelle les altérites jouent un rôle

prépondérant dans la productivité des forages. On constate également une assez bonne corrélation entre la profondeur totale des forages et la profondeur de la venue d'eau maximale. (0,58). En effet, on a plus de chances de rencontrer la venue d'eau maximale lorsqu'on va plus en profondeur. Mais de cette venue d'eau en profondeur conditionne parfois le prix de l'ouvrage.

L'analyse de la projection des variables dans le plan factoriel F1-F2 (Figure 27) fait un état des lieux entre les paramètres de productivité pris en compte dans cette étude. On note un rapprochement entre l'épaisseur des altérites EA et l'épaisseur des altérites saturées EAS d'une part et la profondeur totale des forages PTF et la profondeur de la venue d'eau maximale PVE d'autre part, confirmant ainsi les résultats sur la matrice de corrélation. L'axe 1 est préférentiellement défini par EA et EAS tandis que l'axe 2 est préférentiellement défini par PTF et PVE. Donc l'axe 1 représente la couche altérée saturée qui conditionne la recharge de l'aquifère et l'axe 2 représente l'horizon fissuré indiquant la présence d'une eau souterraine mobilisable. Le paramètre expliqué c'est-à-dire le débit de foration n'a aucune contribution significative pour la formation des deux premiers axes (proximité de l'origine des axes ou petite taille).

Conclusion partielle

Les paramètres locaux tels que la profondeur forée, les épaisseurs des altérites et des altérites saturées ainsi que les premières venues d'eau pourraient avoir une influence sur la productivité des ouvrages dans la province du Bazéga. Les forages réalisés dans la province du Bazéga ont des débits variant entre 0,49 et 12 m³/h. Les plus productifs ont une profondeur totale comprise entre 35 et 60 m avec une épaisseur d'altérites variant entre 15 et 36 m. Une profondeur de venue d'eau maximale comprise entre 20 et 40 m permettra d'obtenir d'avantage des forages à forte productivité.

III.3. Interprétation des données de l'essai de nappe

Les données de l'essai de pompage utilisées ont été mesurées pendant un pompage de 96 h à un débit constant de 6 m³/h. L'interprétation par la méthode de la dérivée logarithmique du rabattement permettra de caractériser le réservoir de socle à proximité du puits pompé.

III.3.1. Identification des régimes d'écoulement

Le graphique bi-logarithmique (Figure 28) présente l'évolution du rabattement observé pendant la descente dans le puits KB023 pendant l'essai de pompage longue durée ainsi que les courbes de dérivée logarithmiques de ces rabattements lors de la descente (pendant le pompage) et la remontée (après le pompage) des niveaux d'eau.

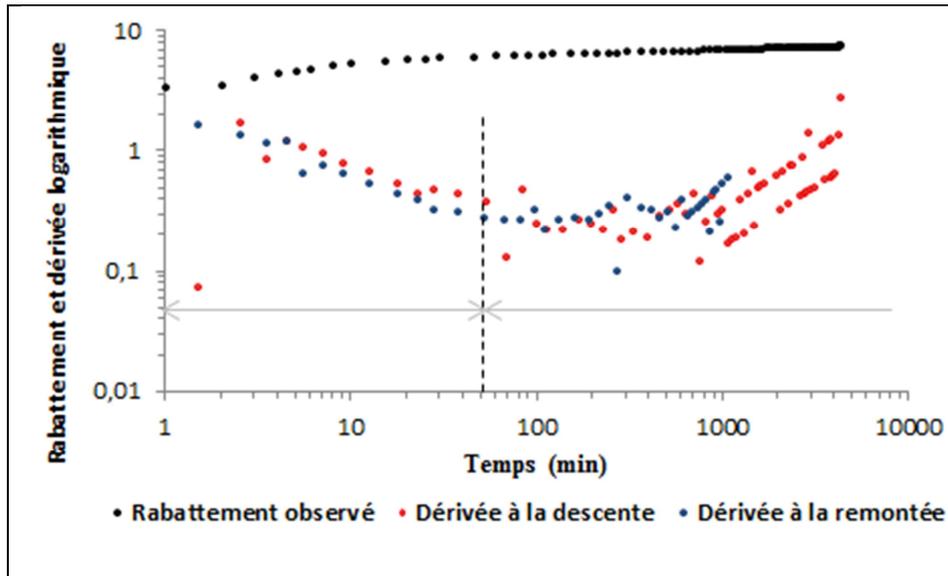


Figure 28 : Rabattement et Dérivée logarithmique du rabattement en fonction du temps

L'analyse de cette figure permet d'identifier une géométrie d'écoulement pseudo-radial de dimension supérieure à 2 au début de l'essai, modifiée rapidement par un phénomène de double porosité. En effet, au début du pompage, le forage pompe directement l'eau présente dans la nappe (semi-captive). Une légère diminution de la dérivée logarithmique et donc une augmentation du niveau de l'eau dans la nappe correspond à un phénomène de drainance ou de limite alimentée par un réservoir plus transmissif. Par la suite, on observe une alternance entre augmentation et diminution de la dérivée logarithmique. Cela atteste l'arrivée d'une source d'eau complémentaire. Dans ce cas, une diminution du rabattement pourrait correspondre à l'effet du drainage d'une deuxième porosité au sein du même réservoir. Cette solution à double porosité simule les écoulements au sein d'un milieu constitué d'un réseau de fractures transmissives et peu capacitifs, recoupant des blocs de matrice rocheuse peu transmissifs mais relativement plus capacitifs (Hoareau, 2009). L'écoulement y est assuré en premier lieu par le réseau de fractures, puis, au fur et à mesure que la charge y diminue, par les blocs rocheux. On note cependant à la

fin du pompage une augmentation progressive de la dérivée logarithmique du rabattement, pouvant attester la présence d'une limite à flux nul.

La méthode de la dérivée logarithmique du rabattement met ainsi en évidence un écoulement radial de dimension supérieure à 2 au début du pompage suivi d'un écoulement à double porosité lors du pompage du forage KB023 dans la localité de Kombissiri. La succession de ces deux régimes d'écoulement est caractéristique des aquifères de socle.

III.3.2. Détermination des paramètres hydrodynamiques

L'interprétation de la courbe diagnostique nous permet également de déterminer les valeurs des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère notamment la transmissivité. Elle est estimée pour un écoulement radial et est caractéristique des réseaux de fractures. La valeur moyenne de la dérivée logarithmique du début du pompage au temps $t = 52$ min étant de 0,64 m, la transmissivité est estimée à $T = 8,29 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette valeur de transmissivité est relativement bonne et peut justifier l'utilisation de ce forage pour l'alimentation en eau potable de la ville de Kombissiri. En outre, cette transmissivité est sensiblement égale à la valeur $T = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ trouvée par Vouillamoz (2003) sur le même forage KB0203.

CONCLUSION GENERALE

La télédétection est une technique qui par l'acquisition des images satellitaires permet d'obtenir des informations à la surface de la terre. C'est un outil indispensable pour la caractérisation hydrogéologique d'un aquifère. Elle est bien adaptée pour la recherche des eaux souterraines dans un milieu fracturé. Le traitement des images satellitaires Landsat TM nous a permis de spatialiser un réseau de linéaments majeurs de la province du Bazéga. Ces linéaments ont les directions préférentielles NE-SW et NW-SE et sont similaires à celles relevées sur les affleurements rocheux. L'ensemble de ces linéaments est dans une moindre mesure assimilé à un réseau de fractures, compte tenu des résultats de la géophysique qui ont donné à ces linéaments une nature géologique. Ce réseau de fractures présente un intérêt certain pour les futures campagnes d'hydraulique villageoise. En effet, l'obtention de bons débits de forages dépend de la position des fractures.

Les débits forages réalisés dans la province du Bazéga oscillent entre 0,49 et 12,00 m³/h avec une moyenne de 2,90 m³/h. Les classes des débits faibles représentent 43,7% des débits des forages de la province tandis que les forts débits représentent seulement 30,4% de ces forages. Ces résultats constituent un compromis pour l'alimentation en eau des populations semi-urbaines et rurales. Les débits de forages sont sous l'influence de plusieurs paramètres. Dans le cadre de cette étude, on peut retenir de manière générale que les forages productifs de la province du Bazéga ont une profondeur totale comprise entre 35 et 60 m avec une épaisseur d'altérites variant entre 15 et 36 m. Une épaisseur des altérites saturées jusqu'à 25 m permettrait d'obtenir d'avantage des forages à forte productivité. Il convient alors de noter qu'un forage implanté à proximité d'une fracture surmontée par une bonne épaisseur d'altération perméable assurerait sa productivité. Il est recommandable que lors de l'implantation des futurs forages dans la province du Bazéga, il serait mieux d'arrêter un forage sec à plus de 60 m de profondeur et de refaire une autre tentative plutôt que de poursuivre la foration sur le forage sec.

L'étude des linéaments présente quelques limites dans leur interprétation ; on doit notamment tenir compte du facteur humain puisque pendant l'interprétation, ce ne sont pas toujours les directions exactes des linéaments qui sont relevées.

PERSPECTIVES

Malgré la carte de fracturation tirée des images satellitaires Landsat TM, il faut cependant reconnaître que cette étude n'a pas permis de savoir si les fractures identifiées constituent effectivement des réservoirs d'eaux souterraines. Pour cela, un couplage de ces réseaux de fractures et les données hydrogéologiques fiables seraient la bienvenue. Cette approche devrait nous permettre de cartographier avec plus de certitude les structures géologiques favorables à l'implantation de futurs forages pour l'approvisionnement en eau potable des populations semi-urbaines et rurales de la province du Bazéga. La nécessité de réaliser une nouvelle carte de linéaments basée sur une utilisation combinée des images satellitaires Landsat ETM+ et Radar permettrait de relever un grand nombre de discontinuités linéaires majeures et secondaires. Il conviendrait pendant l'interprétation de la nouvelle carte linéamentaire de faire une analyse approfondie des discontinuités issues des images satellitaires et celles issues du réseau hydrographique. Ce résultat devrait constituer une base appréciable pour mettre en évidence la corrélation entre l'écoulement de surface et le réseau de fractures souterrain dans un milieu sec. L'utilisation de la RMP au droit des fractures permettrait d'améliorer le taux de succès des forages et de faire une bonne prévision sur la gestion de la ressource en eau souterraine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

❖ Ouvrages et Articles

- Allen D.M., Mackie D.C. & Wei M. (2004)**, Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada. *Journal of Hydrogeology*, 12, 270–290.
- Barker R.D. (1989)**, Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54, 8, pp1031-1037.
- Compaoré G. (1997)**, Évaluation de la fonction capacitive des altérites, site expérimental de Sanon : socle granito-gneissique sous climat de type soudano-sahélien, Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 173p.
- Compaoré G., Lachassagne P., Pointet T. & Travi Y. (1997)**, Evaluation du stock d'eau des altérites: expérimentation sur le site granitique de Sanon (Burkina Faso), *Hard Rock HydroSystems (Proceedings of Rabat Symposium S2)*, IAHS Publ.no. 241, pp37-46.
- Courtois N., Lachassagne P., Wyns R., Blanchin R., Francis D. Bougairé F. D., Somé S. & Tapsoba A. (2010)**, Large-Scale Mapping of Hard-Rock Aquifer Properties Applied to Burkina Faso, *GROUND WATER*, Vol. 48, No. 2, pp269–283.
- Djemai S., Bendaoud A., Haddoum H., Ouzegane K., Kienast J-R. (2009)**, Apport des images Landsat 7 TM+ pour la cartographie géologique des terrains archéens en zone aride : Exemple du terrane de l'In Ouzal (Hoggar occidental), Algérie. *Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF Alger Novembre 2008*.
- Edwards L.S. (1977)**, A modified pseudo-section for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 5, pp1020-1036.
- El Hadani D. (1997)**, Télédétection et Systèmes d'Information Géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. *Géo-Observateur*. Les Rapport Thématiques, n°1, 28 p.
- Engalenc M., Grillot J.C. & Lachaud J.C. (1978)**, Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Édition Géohydraulique, Volume 1, 190p.
- Engalenc M., Grillot J.C. et Lachaud J.C. (1979)**, Méthodes d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches de l'Afrique de l'Ouest. Édition Géohydraulique, Vol. 2, 193p.

- Fleury P., Ladouche B., Dewandel B., Le Strat P., Grunenwald G., Izac J.L., Cubizolles J.,** (2009), Rapport de fin de travaux du forage de reconnaissance hydrogéologique de Salses-le-Château. Rapport final. BRGM/RP-57606-FR, 53 p, 19 ill.
- Georges M., Motti E. & Pointet T. (1983),** Application de la télédétection à la prospection hydrogéologique en zones arides, BRGM, Service Géologique National, Dpt. Eau, 35p.
- Girousse B. (1984),** Critères d'implantation et productivité des forages d'eau en milieux fissurés, Rapport du B.R.G.M., 84 SGN 209 Eau, 104p.
- Gombert P. (1997),** Variabilité spatiale de la productivité aquifère du socle sahélien en hydraulique rurale, Hard Rock Hydro-Systems, IAHS Publ.no. 241, pp 113-122.
- Guérin R., Panissod C., Thiry M., Benderitter Y., Tabbagh A. & et Huet-Taillanter S. (2002),** La friche industrielle de Mortagne du Nord (59) - III-Approche méthodologique d'étude géophysique non-destructive des sites pollués par des eaux fortement minéralisées Bull. Soc. géol. France, 2002, t. 173, no 5, pp. 471-477.
- Hoareau J., Lapegue J. & Livovschi I. (2010),** Utilisation du SYSCAL dans le cadre de missions de prospection géophysique, ACF – International.
- Himyari S.M., Hoepffner C., Benzakour M., El Hadani D. (2002),** Étude structurale du Haut Atlas Oriental (Maroc) à l'aide de l'analyse linéamentaire des images HRV (XS) de SPOT, Télédétection, 2002, vol. 2, n° 4, p. 243-253.
- Houin G. A. (1990),** Hydrogéologie de la province du Bazéga : hydrologie du bassin versant, implantation et méthodes d'exécution des ouvrages de captage, essais de pompage, piézométrie, hydrochimie. Mémoire de fin d'étude, 107p
- Jourda J.P., Djagoua E.V., Kouamé K., Saley M.B., Gronayes C., Achy J-J., Biémi J., Razack M. (2006),** Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : apport de l'imagerie ETM+ de Landsat, Télédétection, 2006, vol. 6, n° 2, p. 123-142.
- 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). Hydrol. Sci. J. 55(5), 805–820.
- Kouamé, K. F. Gioan, P., Biémi, J. et Affian, K. (1999),** Méthode de cartographie des discontinuités-images satellitaires : Exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Télédétection, Vol. 2, p.139-156.

- Kouamé K.F., Akaffou A.G., Lasm T., De Dreuzy J.R., Davy P. & Bour O. (2005)**, Simulation des écoulements dans les réservoirs fracturés : application au socle Archéen de Touba (Nord Ouest de la Côte d'Ivoire). Actes du Colloque Internationale SITIS 05, Yaoundé (Cameroun), 27 Nov.-1er Déc. 2005, p. 39-46.
- Kouamé K. F., Lasm T., Saley M. B., Tonyé E., Bernier M., Wade S. (2009)**, Extraction linéamentaire par morphologie mathématique sur une image RSO de RADARSAT-1 : application au socle Archéen de la Côte d'Ivoire, Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF, Alger Novembre 2009, 7p.
- Kouassi A. M., Ahoussi K. E., Yao K. A., Ourega W. E., Yao K. S. B., Biémi J. (2012)**, Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 10, Mars 2012, pp. 57-74.
- Kedowide C.G. (2007)**, Fondements et bases physiques de la télédétection, Groupe EIER/ETSHER, 621.367 Techniques photographiques. Télédétection
- Lachaine G. (1999)**, Structures géologiques et linéaments, Beauce (Québec) : apport de la télédétection, Mémoire de Maître ès sciences (M.Sc.), Université de Sherbrooke, p105.
- Lacombe J-P. (2008)**, Initiation au traitement d'images satellitaires, Travaux dirigés : Cahier 2, Ecole Nationale Supérieures Agronomique de Toulouse, p92.
- Lasm T., Kouamé F., Soro N., Jourda J. P. R. & Biémi J. (2004)**, Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie 5, p. 135-154.
- Loke M.H. & Barker R.D. (1996)**, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical prospecting, pp131-152 .
- McNEILL J.D. (1980)**, Electrical conductivity of soil and rocks, Technical note TN-5, Geonics Limited, 22 p.
- Moustadraf J. & Razack S.M. (2008)**, Evaluation of the impacts of climate changes on the coastal Chaouia aquifer, Morocco. *Using numerical modelling*. Hydrogeology Journal 16(7):1411–1426.
- Neukum C. & Azzam R. (2012)**, Impact of climate change on groundwater recharge in a small catchment in the Black Forest, Germany. Hydrogeology Journal.

- N'go A.Y., Lasm T., Koita M. & Savane I. (2009)**, Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambien de la région de Dimbroko (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), *Revue Télédétection*, 2010, Vol.9.n°1, p.33-44.
- Parks K. P. and Bentley L. R. (1996)**, Derivative-assisted evaluation of well yields in a heterogeneous aquifer, Department of geology and geophysics, University of Calgary, Calgary, AB, T2N 1N4, Canada, pp 458-469.
- Paturel J. E., Servat E., Delattre M. O. & Lubes-Niel H. (1998)**, Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique, ORSTOM / Programme FRIEND AOC, Abidjan, Montpellier, *Journal des Sciences Hydrologiques*, pp937-946
- Renard P., Glenz D. & Mejias M. (2009)**, Understanding diagnostic plots for well-test interpretation, *Hydrogeology Journal* (2009), pp589–600.
- Ricolvi M. (1992)**, Document-guide pour l'implantation et la mise en exploitation des forages à gros débits en zone de socle cristallin. Document BRGM R3591 4s /eau.
- Sander P. (2007)**, Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations, *Hydrogeology Journal* (2007) 15, pp 71–74.
- Sattran V. & Wenmenga U. (2002)**, Géologie du Burkina Faso, Praha – Ouagadougou – London, 2002, 136p.
- Savané I., Goze B., Biemi J. ()**, Evaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat (bassin d'Odienné, Côte d'Ivoire), *Université nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan, Côte d'Ivoire*.
- Sombo A. P., Kouassi F. W., Sombo B. S., Kouamé L. N. & Kouassi E. G. (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*, ISSN 1450-216X Vol.64 No.2 (2011), pp. 206-219.
- Soro G., Soro N., Ahoussi K. E., Lasm T., Kouamé F. K., Soro T. D., Biémi J. (2010)**, Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristalline et métamorphique dans la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire), *Estudios Geológicos*, 66(2), ISSN: 0367-0449, pp. 227-242.

Toé G. (2004), Apport de nouvelles techniques géophysiques à la connaissance des aquifères de socle : Tomographie électrique, électromagnétisme fréquentiel, résonance magnétique protonique. Application au Burkina Faso, Thèse de doctorat, Université Paris 6, 282p

Yameogo O. S. (2008), Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso : qualité et vulnérabilité, Thèse de doctorat en sciences, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 254p

Youan T.M., Lasm T., Jourda J.P., Kouamé F.K., Razack M. (2008), Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire), *Revue télédétection*, 2008, vol. 8, n° 2, p. 119-135.

Castaing, C, P Chevremont et al (2003). Notice explicative de la carte Géologique au 1/200 000. *Feuille ND-30-V de Ouagadougou. 1ère édition.*

Wyns R., Baltassat J. M., Lachassagne P., Legchenko A., Vairon J., & Mathieu F. (2004), Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 175(1), pp 21–34.

❖ *Sites Internet*

<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/indexf.html>

<http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>

<http://www.europeanjournalofscientificresearch.com>

<http://www-ig.unil.ch/cours/>

ANNEXE

Caractéristiques des images satellitaires

Les trois scènes Landsat TM utilisées dans cette étude ont les caractéristiques suivantes :

Paths	Rows	TM	Résolution spatiale	Date d'acquisition
194	052	TM5	28,5 m	11 Décembre 1989
195	051	TM4	30 m	18 Décembre 1986
195	052	TM4	30 m	18 Décembre 1986

Les périodes d'acquisition correspondant à la pleine saison sèche sont caractérisées par l'ensoleillement et l'absence de nuages, constituant de meilleures conditions atmosphériques pour la télédétection passive. Ces images de différentes dates n'ont aucun effet sur les résultats attendus sachant que la mise en place des fractures s'est effectuée il y a de cela des millions d'années (Jourda et al., 2006b). Chaque scène est composée de 7 bandes et leurs principales spécificités sont récapitulées dans le tableau suivant.

Bandes	Résolution spectrale (μm)	Domaine spectrale	Spécificité
TM1	0,45 - 0,52	Bleu	Pénétration dans l'eau, matériaux en suspension, différenciation sol-végétation
TM2	0,52 - 0,60	Vert	Vigueur de la végétation, révélateur secondaire de la forte teneur en métal
TM3	0,63 - 0,69	Rouge	Analyse structurale
TM4	0,76 - 0,90	Proche IR	Stress de la végétation induit par les phénomènes géologiques, détection d'oxyde de fer
TM5	1,55 - 1,75	Moyen IR	Indicateur sur la teneur cartographie en eau des sols et de la végétation, des argiles, indicateur secondaire des altérations hydrothermales
TM6	10,4 - 12,5	IR thermique	Discrimination des roches silicatées et non silicatées, contenu en eau des sols, analyse des stress de la

*Caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé.
Cas de la Province du Bazéga au Burkina Faso*

			végétation
TM7	2,08 - 2,35	Moyen IR	Discrimination de certaines roches, telle que l'argile et les micas dans les niveaux silicatés, la kaolinite et la montmorillonite dans les sols