



Détermination des taux de succès de réalisation des forages en zone de socle à l'aide des méthodes géophysiques électriques : Cas de la province du BAZEGA. (Burkina Faso)

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER

SPÉCIALITE GÉNIE CIVIL ET HYDRAULIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 21 janvier 2019 par

Missum Anicet Berenger BAGRE (20160397)

Directeur de mémoire et Encadreur : Dr. Mahamadou KOITA, enseignant-chercheur en hydrogéologie, Maître de Conférences CAMES

Maître de stage : Sayoba KAFANDO, hydrogéologue BUMIGEB

Structure d'accueil du stage Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Prof. Harouna KARAMBIRI

Membres et correcteurs : Dr. Angelbert BIAOU

Mme Raadégonde RUSAGARA

Promotion [2017/2018]

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes parents qui ne ménagent aucun effort pour me soutenir.

AVANT - PROPOS

Ma structure d'accueil le Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB) est une société d'État qui a connu le jour en 1960 sous le nom de Direction Générale des Mines (DGM). Il a pour missions principales la collecte, le traitement et la diffusion de l'information géologique et minière de base et le maintien de la sécurité des établissements privés. Ses compétences s'étendent à 04 principaux domaines :

- ✚ La recherche minière qui englobe la cartographie géologique, la prospection et la recherche minière, les levés géophysiques, les levés topographiques, les sondages et forages, l'exploration hydrogéologique, l'implantation des points d'eau, les travaux de dessins assistés par ordinateur,
- ✚ Le laboratoire d'analyses où l'on effectue des analyses géochimiques, l'analyse des eaux, la préparation mécanique, les études pétrographiques et les essais de traitements,
- ✚ Les sondages miniers regroupant les sondages carottés, les sondages à circulation inverse et les sondages à mototarière,
- ✚ La sécurité industrielle, minière et des hydrocarbures.

Nous avons travaillé au sein de la Direction de la Recherche Géologique et Minière (DRGM) dans le Service des Études Géophysiques et Hydrogéologiques (SEGH).

Le BUMIGEB est doté de moyens techniques et des méthodes pour l'exécution de forages profonds. Il a réalisé des forages de plus de 200 m de profondeur à Bobo Dioulasso.

Remerciements

Aux termes de ces travaux, je tiens tout particulièrement à exprimer ma profonde gratitude à :

- 2iE pour les connaissances dont il m'a dotées et cela dans un cadre convivial et chaleureux.
- Mon directeur de mémoire et encadreur, Dr. Mahamadou KOITA, Enseignant-chercheur en hydrogéologie à 2iE pour sa disponibilité et ses conseils avisés.
- BUMIGEB pour l'accueil qu'ils m'ont réservé et l'assistance dans mes travaux.
- Mon maître de stage, Monsieur Sayoba KAFANDO, qui n'a ménagé aucun effort pour satisfaire nos multiples sollicitations et ses remarques très pertinentes.

Mes remerciements à la Banque Mondiale et au Ministère de l'Enseignement Supérieur du Burkina pour le programme d'excellence dont je suis bénéficiaire.

Ma gratitude à Monsieur Nestor COMPAORE pour m'avoir assisté dans mes travaux.

Mes remerciements vont également à mes promotionnaires pour leur collaboration fort enrichissante et confraternelle.

Résumé

La province du Bazèga, située dans la région du Centre-Sud du Burkina, est caractérisée par un taux d'échec élevé en ce qui concerne les forages. Ce fort taux d'échec s'explique entre autres par la faible capitalisation des informations disponibles. La présente étude s'inscrit dans le cadre de l'optimisation de l'implantation de futurs forages à travers la géophysique en milieu de socle. La méthodologie adoptée a consisté, à travers l'analyse en composantes principales (ACP) et les tableaux croisés, à la caractérisation de l'existence de corrélations éventuelles entre la géomorphologie et les paramètres géophysiques d'une part et entre l'hydrogéologie et ces mêmes paramètres géophysiques d'autre part. Les résultats issus de ces différentes analyses révèlent que l'association l'altitude de la zone du forage (300-320m) à l'épaisseur de l'altération d'une part (20-40m) d'une part, d'autre part la considération de la géologie du site, la résistivité de la cible, le type de sondage et l'épaisseur de l'altération permet d'accroître le taux de succès des forages en zone de socle. En plus, l'épaisseur de l'altération oriente sur la profondeur des venues et le débit potentiel du forage.

Mots Clés :

1 – Forage d'eau

2 - Géologie

3 - Géomorphologie

4 - Géophysique

5 - Hydrogéologie

ABSTRACT

Bazega province is located in the inner south of Burkina. It is characterized by a huge rate of failure in boring field. That high rate of failure can be explained by the low capitalization of available data. Our study intends to optimize the selection of well sitting through geophysics. The method has consisted through Analysis on Principals Components (ACP) and cross tabs, in the characterization of existence correlation between geomorphology and geophysical parameters one hand and hydrogeology and the same geophysical parameters on the other. The results of these analyses acknowledge that the association of potential boreholes sitting elevation (300-320m) to the thickness the alteration (20-40m) on the one hand and the consideration of geology of the site, resistivity of the target, type of vertical electrical sounding and the thickness of alteration, on the other hand, allows to ameliorate the success of boreholes in crystalline area. Furthermore the association of alteration directs on deep of water producing zones and the borehole discharge.

Key words :

1 - Water borehole

2 - Geology

3 - Geomorphology

4 – Geophysics

5 - Hydrogeology

Liste des abréviations

- ACP** : Analyse en composante Principale
- BERA** : Bureau d'Études et de Recherches Appliquées
- BUMIGEB** : Bureau des Mines et de Géologie du Burkina
- CCE** : Compartiment Conducteur Etroit
- CCL** : Compartiment Conducteur Large
- CEDP** : Contraste Entre Deux Paliers
- CIEH** : Comité Inter – Etats d'Études Hydrauliques
- CNDIE** : Centre National de Documentation et d'Information sur l'Eau
- DGM** : Direction Générale de Mines
- DGRE** : Direction Générale des Ressources en Eau
- DEIE** : Direction des Études et de l'Information en Eau
- EA** : Épaisseur d'altération
- EF** : Épaisseur fissurée
- GIRE** : Gestion Intégrée des Ressources en Eau
- IGB** : Institut de Géographie du Burkina
- ONEA** : Office National de l'Eau et de l'Assainissement
- ORSTOM** : Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
- PC** : Palier Conducteur
- PNUD** : Programme des Nations Unies pour le Développement
- 2IE** : Institut International de l'Eau et de l'Environnement

SOMMAIRE

I.	Introduction.....	4
II.	Objectifs	5
III.	Présentation de la zone d'étude	6
III.1	Situation géographique	6
III.2	Climat et Végétation.....	6
III.3	Hydrographie et géomorphologie.....	7
III.4	Géologie.....	8
III.5	Contexte hydrogéologique	9
IV.	Données, Matériels et Méthodes	11
IV.1	Collecte de données.....	11
IV.2	Logiciels utilisés.....	11
IV.3	Identification des paramètres d'analyses	12
IV.4	Analyse des paramètres	19
V.	Résultats et discussions	21
V.1	Analyse descriptive	21
V.2	Paramètres géophysiques et productivités	27
V.3	Approche multicritères des paramètres étudiés pour l'accroissement du succès.....	29
VI.	Conclusion - Perspectives	37
VII.	Recommandations.....	38
VIII.	Bibliographie.....	39
IX.	Annexes.....	42

Liste de tableaux

Tableau I : Matrice de corrélation entre paramètres géophysique et le débit pour l'ensemble des forages.	27
Tableau II : Matrice de corrélation entre paramètres géophysique et le débit pour les forages positifs.....	28
Tableau III : Tableau récapitulatif général	36

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du site d'étude	6
Figure 2 : Hydrographie du site d'étude	7
Figure 3 : Géomorphologie du site d'étude	8
Figure 4 : Géologie du site d'étude	9
Figure 5 : Modèle géologique simplifié d'un aquifère de socle (Wyns et al., 2004).	10
Figure 6 : Illustration des différents types d'anomalies géophysiques : (a) Anomalie de type compartiment conducteur large (b) étroit (c) Anomalie de type palier conducteur (d) contact entre deux paliers.....	13
Figure 7 : Illustration des différentes formes d'anomalies géophysiques (CIEH,1988)	14
Figure 8 : Sondage type cloche fond de bateau.....	15
Figure 9 : Sondage type cloche dans fond de bateau.....	16
Figure 10 : Sondage type cloche puis fond de bateau	16
Figure 11 : Sondage type cloche dans fond de bateau.....	17
Figure 12 : Sondage type cloche dans fond de bateau.....	17
Figure 13 : Intensité des relations entre variable corrélées.....	20
Figure 14 : Répartition des forages dans la zone d'étude.....	21
Figure 15 : Proportion de forage positif selon l'altitude du point de foration	22
Figure 16 : Proportion de forage positif selon le type de l'anomalie	22
Figure 17 : Proportion de forage positif selon la forme de l'anomalie	23
Figure 18 : Proportion de forage positif selon la résistivité de la cible forée	24
Figure 19 : Proportion de forage positif selon le type de sondage.....	24
Figure 20: Proportion de forage positif selon la lithologie	25
Figure 21 : Proportion de forage positif selon l'épaisseur d'altération	26
Figure 22 : Proportion des débits	26
Figure 23 : Relation entre altitudes du point de forage, épaisseur d'altération et taux de succès	29
Figure 24 : Relation entre résistivité de la cible, lithologie et taux de succès	31
Figure 25 : Relation entre résistivité de la cible, type de sondage et taux de succès	32
Figure 26 : Relation entre Type de sondage, lithologie et taux de succès.....	34
Figure 27 : Relation entre Profondeur des premières venues d'eau et épaisseur d'altération ..	34
Figure 28 : Relation entre épaisseur d'altération et débit	35

I. INTRODUCTION

Situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest, le Burkina Faso peine à satisfaire ses besoins en eau. En effet le pays appartient au climat subsaharien caractérisé par des précipitations sont faibles et inégalement réparties dans le temps. Aussi l'évaporation dans cette zone climatique est importante. Ces contraintes climatiques, associé la platitude du relief Böckh et al. (1989) accroissent la difficulté de mobilisation des eaux de surfaces en quantité suffisante.

Les regards sont de nos jours tournés vers l'exploitation des eaux souterraines et la faiblesse de la demande consommatrice par rapport à l'infiltration permet d'envisager un prélèvement de cette eau (Ministère de l'environnement et de l'eau 2001). Cependant le territoire Burkinabè est à 80% en milieu de socle cristallin, milieu qui reste à nos jours peu connu malgré la multitude des études (notamment celles du CIEH) qui y ont été faites. Des études récentes comme celles de Kafando et al. (2016) continuent de faire ressortir de nouveaux paramètres pour une implantation réussie des forages.

La disponibilité et la mobilisation des ressources en eau souterraine en milieu de socle en vue de la satisfaction des besoins en eau des populations constituent donc une problématique majeure pour les autorités en charge des programmes d'hydraulique. Une meilleure stratégie pour appréhender le milieu de socle s'impose. La réussite de ce travail passe entre autres par la capitalisation des données de forages réalisées jusque-là qui feront l'objet des synthèses géophysiques et hydrogéologiques. Notre étude est donc orientée dans ce sens. Elle est intitulée comme suit : **Détermination des taux de succès de réalisation des forages en zone de socle à l'aide des méthodes géophysiques : Cas de la province du Bazèga.** Cette province a été choisie du fait du taux d'échec élevé de forages dans la zone, de la disponibilité et de la qualité des données tant bien géomorphologique, géophysique et hydrogéologique.

II. OBJECTIFS

Cette étude vise à améliorer le taux de succès de réalisation des forages en zones de socle au Burkina à travers l'utilisation de la géophysique. Il s'agira spécifiquement de :

- Identifier les paramètres hydrogéologiques, géologiques, géomorphologiques et géophysiques influençant la productivité des aquifères,
- Mettre en évidence l'existence des corrélations éventuelles entre géomorphologie et géophysique, entre géologie, géophysique et productivités.
- Etablir un guide pour l'implantation de forages.

Le travail sera structuré comme suit :

- ✓ Une première partie portant sur les généralités. Elles consisteront à la présentation de la zone d'étude et de ses caractéristiques physiques,
- ✓ Une seconde partie qui traite des matériels et méthodes à savoir la méthode de collecte de données, les méthodes d'analyse et les logiciels utilisés pour ces analyses,
- ✓ Une dernière partie qui présente les principaux résultats obtenus y compris la discussion de ces derniers avec des études similaires dans ce type de milieu,
- ✓ Enfin, nous terminerons notre étude par une conclusion générale suivie des recommandations.

III. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Dans cette partie, nous présenterons les caractéristiques physiques du site d'étude à savoir : la situation géographique, le climat et la végétation, les sols, les unités géomorphologiques et géologiques.

III.1 Situation géographique

La zone d'étude (figure 1) se situe dans la région du centre-sud du Burkina Faso, entre les longitudes 2.05° et 0.89° Est et les latitudes 11.59° et 12.20° Nord. La province Bazèga regroupe les départements de Doulogou, de Gaongo, d'Ipelcé, de Kayao, de Kombissiri, de Saponé et de Toécé. Elle couvre une superficie de 5395km².

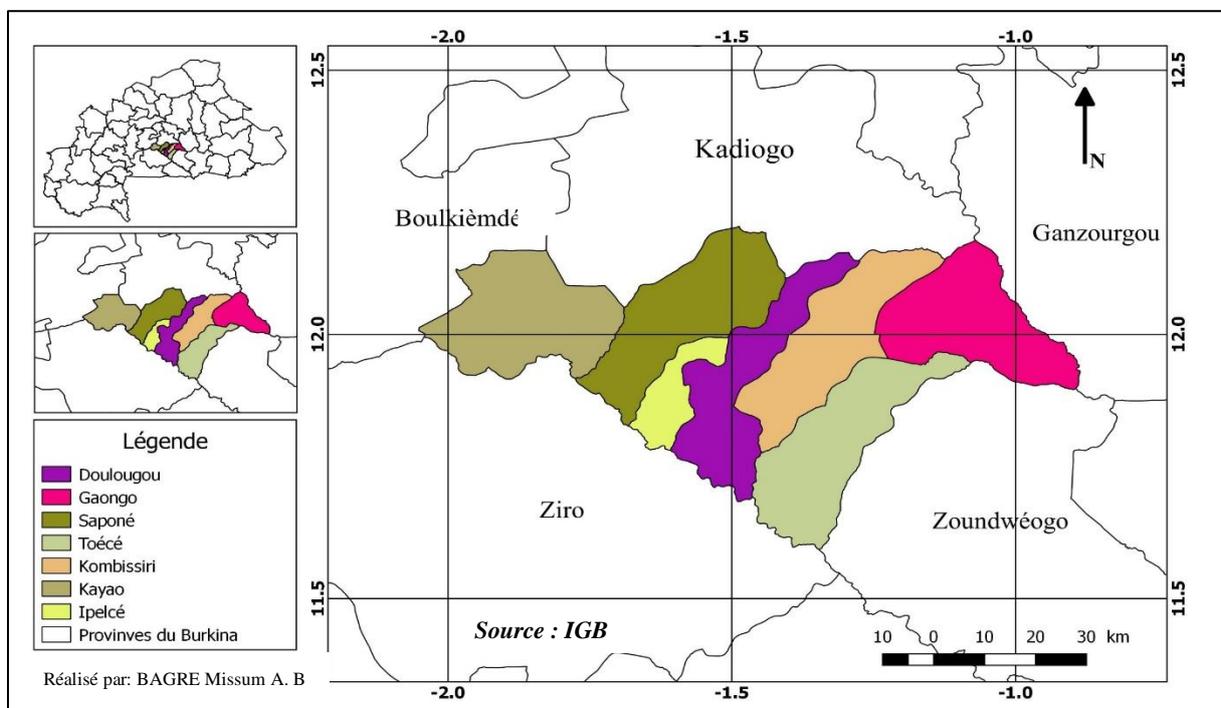


Figure 1 : Localisation du site d'étude

III.2 Climat et Végétation

La pluviométrie de la zone varie considérablement d'une année à l'autre. La moyenne interannuelle est de 718 mm pour les années de 1981-2010 et d'environ 735 mm de 2000-2010 Karama (2012). L'évapotranspiration est très importante. La moyenne annuelle sur la période 1991-2010 est de 2078 mm conduisant à une recharge difficile des nappes et/ou à un tarissement rapide des réserves d'eau des aquifères superficiels (Ntsiedewo Metseye (2012)). Selon plusieurs études « Moustadraf et Razack, Allen et al. in Ntsiedewo Metseye (2012) », le facteur climat joue un rôle majeur sur les ressources en eau souterraine, et par conséquent sur

l'existence et la productivité des aquifères. Le climat de la province du Bazèga est de type nord-soudanais avec alternance d'une saison sèche et d'une saison humide.

Point de vue de la végétation, la zone se trouve dans le domaine du secteur soudano-sahélien « unité 15 Fontes et al, in Karama (2012) », caractérisé par la savane arborée à arbustive de potentiel ligneux moyen à faible et de taux d'occupation fort, avec cultures sous parcs. Les dépressions et les zones bordières des cours d'eau ont une végétation plus dense. La culture du sol et les coupes de bois de chauffage ont dégradé en de nombreux endroits la population végétale naturelle.

III.3 Hydrographie et géomorphologie

La province du Bazega se trouve dans le bassin transfrontalier de la Volta précisément dans celui national du Nakambé à cheval entre les sous-bassins versants du Nakambé et du Nazinon (figure 2). Elle est drainée au Nord par le fleuve Nakambé et au Sud par le Nazinon. Le réseau hydrographique est peu dense et aucun cours d'eau n'est pérenne.

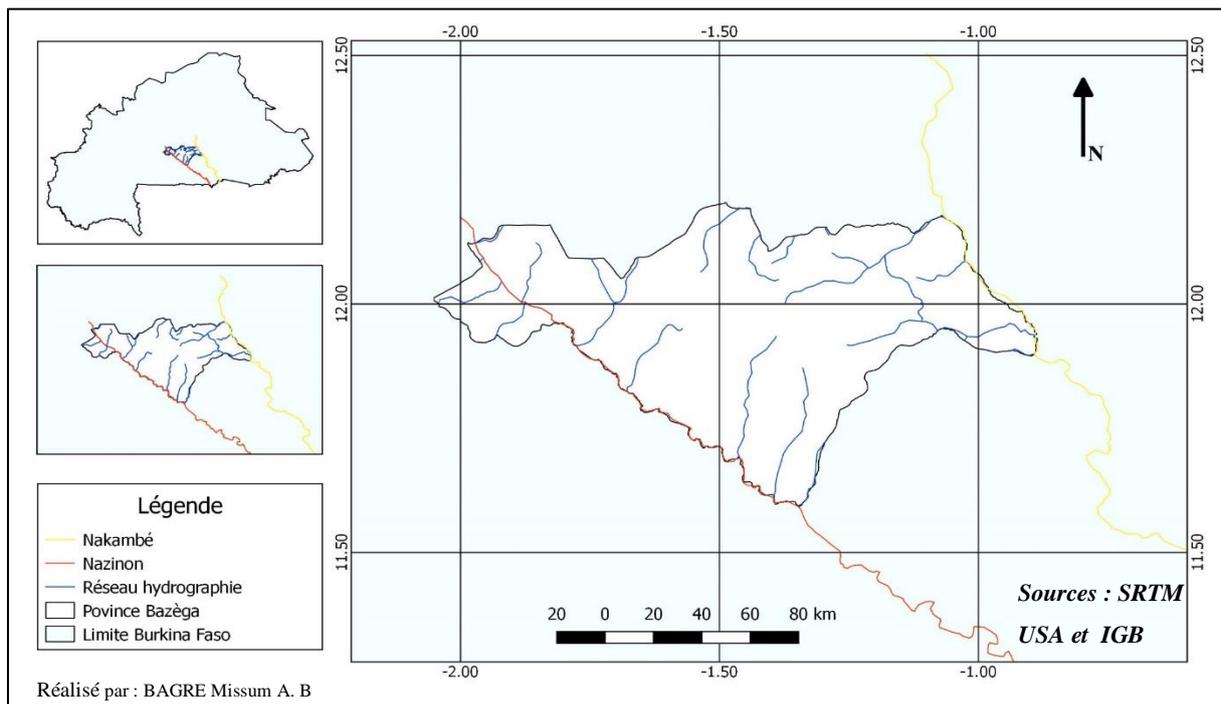


Figure 2 : Hydrographie du site d'étude

Du point de vue géomorphologique, cette région appartient au plateau mossi, une pénéplaine soumise à l'érosion et de laquelle s'élèvent des buttes-témoins et des dorsales du Birrimien Böckh et al. (1989). Le relief de la zone a été arasé (par l'érosion) laissant çà et là quelques collines latéritiques, de vastes plateaux cuirassés et quelquefois des affleurements rocheux Houin (1990). Les hautes altitudes n'excèdent pas 350 mètres (Figure 3).

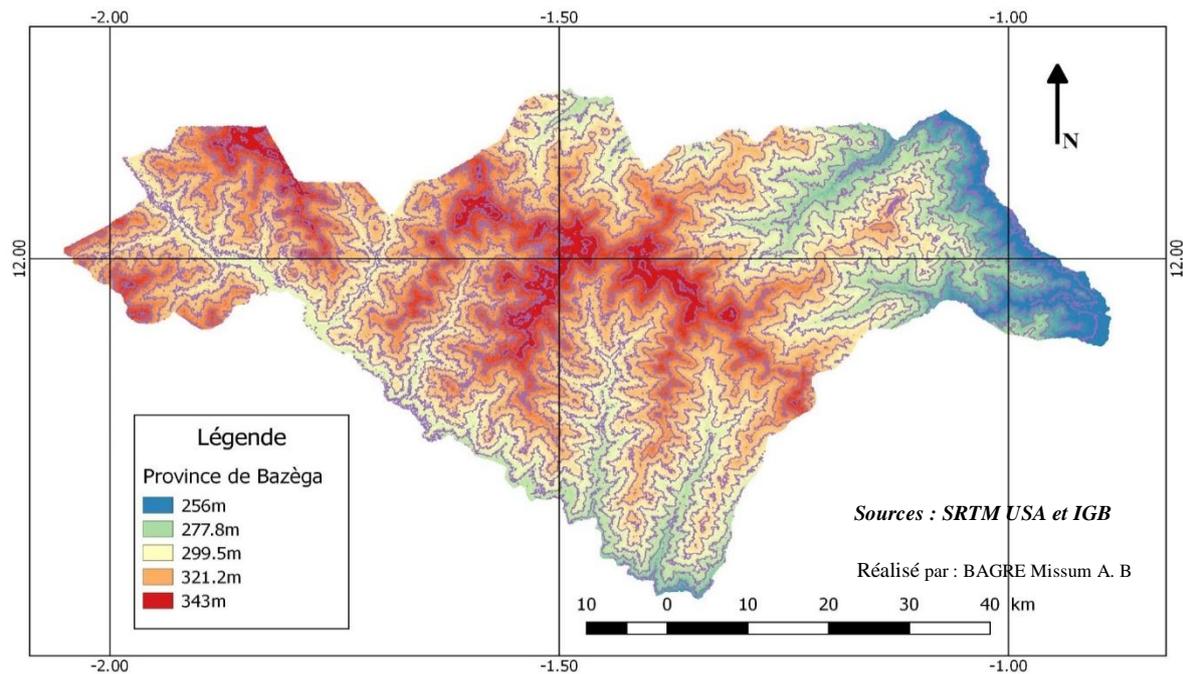


Figure 3 : Géomorphologie du site d'étude

Par ailleurs, les études menées par l'ORSTOM sur les différents sous bassins du Nakambé confirment la planéité du relief. Les principaux sols rencontrés sont des sols hydromorphes constitués de matériaux argilo-sableux et alluviaux et les sols minéraux bruts constitués de granite et de cuirasse ferrugineuse Karama (2012). L'organisation structurale dressée par Tagini (in Houin (1990)) indique que la tectonique de notre zone d'étude évolue dans celle du bloc C correspondant au bloc mossi. Les fractures y sont orientées NE-SW, hormis la grande fracture supposée du Nazinon. Houin (1990) dégagait après une analyse des graphes de distribution des directions linéamentaires entre $N90^\circ$ et $N120^\circ$. Ntsiedewo Metseye (2012) quant à lui note une forte composante NE-SW représentée par les classes $N40-N50$ et $N50-N60$ et une autre NW-SE représentée par les classes $N130-N140$ et $N140-N150$.

III.4 Géologie

La géologie de la zone d'étude (Figure 4) appartient à la partie centrale du bloc cristallin de Boulé-Mossi. Par rapport à leur nature pétrographique, les formations géologiques qu'on y rencontre se répartissent en quatre principaux ensembles Houin (1990). Ce sont :

- ✓ les migmatites subdivisées en deux composantes les migmatites acides et les migmatites neutres.
- ✓ Les granites dont la mise en place est consécutive aux phases tectoniques qui ont marqué le Birrimien. On distingue plusieurs faciès dont les principaux sont les granites à deux micas et les granites porphyroïdes à biotite et les granites hétérogènes.

- ✓ Les séries métamorphiques à faciès Birrimien. On y rencontre les faciès suivants : les schistes non différenciés, les amphibolites, les quartzites et les schistes et quartzites indifférenciés.
- ✓ Et les éruptifs basiques surtout composés de gabbros et de Dolérites.

Essentiellement, les migmatites et granites indifférenciés sont attribués au précambrien D. On note aussi, mais en minorité des roches du précambrien C : les Meta volcanites neutre à basiques, les volcano sédimentaires, les Meta sédiments argileux ou argilo-gresseux, les granodiorites et tonalité indifférenciées Engalenc (1978).

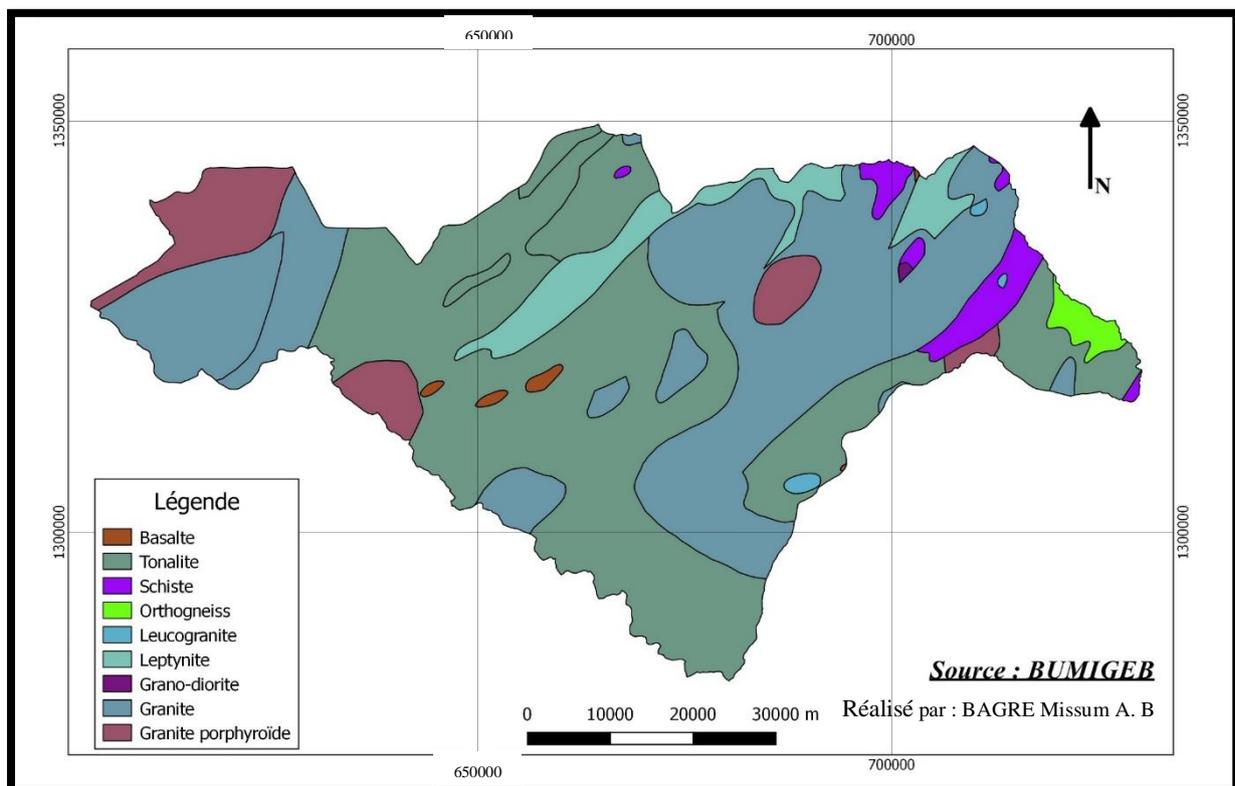


Figure 4 : Géologie du site d'étude

III.5 Contexte hydrogéologique

La province du Bazega se trouve dans le bassin national du Nakambé qui a une potentialité en eaux souterraines totale de 80 milliards de mètres cubes (Ministère de l'environnement et de l'eau 2001). Compte tenu du contexte granitique, le profil d'altération se décompose en cuirasse latéritique, arène argileuse, zone d'altération minérale, arène sableuse et zone fissurée et/ou fracturée. Cette lithologie correspond au modèle conceptuel d'aquifère de socle (figure5). La partie supérieure est constituée d'altérites et celle 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 source.

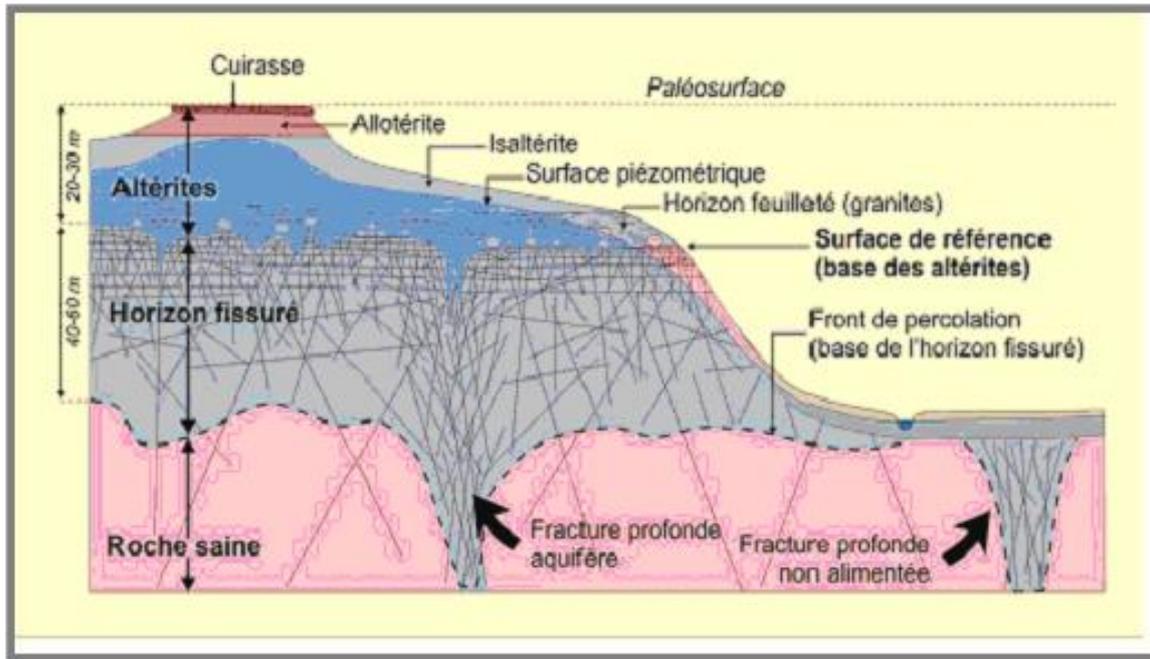


Figure 5 : Modèle géologique simplifié d'un aquifère de socle (Wyns et al., 2004).

On rencontre deux systèmes d'aquifères :

Les aquifères d'altérites : ils se développent dans les arènes argilo-sableuses et correspondent à la partie altérée du socle. Ces aquifères sont beaucoup tributaires des conditions climatiques et lorsqu'ils sont saturés, jouent un rôle essentiellement capacitif. Ils ont une forte porosité d'interstices. 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. Leurs épaisseurs varient de quelques dizaines de mètres et les fractures sont majoritairement horizontales dans la partie supérieure (Courtois et al. (2010)).

Conclusion partielle :

Situé dans la région du centre-sud du Burkina Faso, la province du Bazèga se trouve dans un milieu de socle à prédominance granitique. Les sols y sont essentiellement hydromorphes et sont couverts par la savane arborée à arbustive. Les conditions climatiques sévères entraînent le tarissement rapide des réserves d'eaux superficielles. Les ressources en eaux souterraines se rencontrent principalement dans les réseaux de fractures.

IV. DONNEES, MATERIELS ET METHODES

Il s'agira à cette étape de la collecte des données permettant d'identifier les paramètres géophysiques, géomorphologiques et hydrogéologiques pouvant influencer la productivité ensuite d'indiquer le processus de collecte de données puis de spécifier la méthodologie d'analyses des paramètres et enfin d'énumérer les logiciels pour ce faire.

IV.1 Collecte de données

La recherche des données nous a menés en plus de notre structure d'accueil (BUMIGEB) vers les structures ci-dessous :

- ✚ la DGRE, la DGEP et La DEIE
- ✚ La CNDIE
- ✚ BERA

Les données retenues pour cette étude ont été essentiellement celles obtenues auprès de la DGRE. Ce choix a été motivé par la multitude et la qualité d'informations fournies pour chaque site :

- ✓ Les coordonnées GPS du site
- ✓ Les liens Google du site
- ✓ Le plan de situation du site
- ✓ Les données géophysiques du site
- ✓ Fiches de sondages interprétées du site
- ✓ Les résultats de sondages interprétés et consignes de foration
- ✓ Le transfert sur le site
- ✓ Les travaux de forages
- ✓ Les essais de pompages
- ✓ Les résultats à la suite de l'essai de pompage
- ✓ Les travaux de construction de la superstructure
- ✓ Les travaux d'installation de la pompe
- ✓ La réception provisoire
- ✓ Et le rapport d'achèvement

IV.2 Logiciels utilisés

Pour mener à bien cette étude, nous avons eu recours à plusieurs logiciels. Ce sont :

QuantumGIS : C'est un outil permettant la manipulation aisée des données spatiales et la réalisation des requêtes pour SIG. Il servira à la réalisation des cartes de ce document. Cela à travers la visualisation, l'analyse et l'exploitation des données spatiales.

Microsoft Office Excel : Pour la saisie des données, les calculs numériques, l'analyse des données et les représentations graphiques. Dans notre étude il sera utilisé pour montre d'éventuelles corrélations entre les variables.

Microsoft Office Word : Pour la rédaction du présent document

Tanagra : Pour la recherche de corrélations entre les différents paramètres d'étude.

IV.3 Identification des paramètres d'analyses

Les paramètres géophysiques et hydrogéologiques ont été mis à contribution par différents auteurs pour déterminer les facteurs de productivité des aquifères. On peut citer entre autres Konkobo (2006), Toussou (2009), Mandeng Nyobe (2012), Ntsiedewo Metseye (2012) et Diabaté (2013), Kafando (2014) et Koita et al. (2016). Kafando et al. (2016) ont en particulier étudié le lien entre la géomorphologie et la productivité des aquifères.

IV.3.1. Paramètres géomorphologiques

Principalement, deux types de paramètres dits géomorphologiques ont été identifiés par Kafando et al. (2016) comme étant des paramètres susceptibles d'influencer la productivité des ouvrages de captages. Il s'agit :

IV.3.1.1 Direction de fracture

L'identification de zones de discontinuité est un facteur crucial dans la recherche d'eau en milieu de socle et les méthodes géophysiques pour la prospection hydrogéologique sont d'ailleurs tournées dans ce sens. Ces fractures ont selon le contexte des directions privilégiées liées aux évènements tectono morphologiques survenus dans le milieu considéré.

IV.3.1.2 Côte du point du forage

Les études menées par le Comité Inter-Etats d'étude Hydraulique (CIEH) en 1989 soulignent l'importance des conditions favorables de renouvellement ou de recharge de l'eau souterraine dans le choix des points de forages. Ces conditions peuvent être remplies entre autres près des cours d'eau et les zones inondables. On peut aussi trouver des conditions favorables au renouvellement des eaux en bordure de retenues naturelles ou artificielles d'eaux superficielles. Kafando et al. (2016) ont associées donc la topographie du site et l'épaisseur d'altération à la productivité des aquifères.

IV.3.2. Paramètres géophysiques

Pour ce qui concerne les paramètres géophysiques, la présente étude s'est intéressée uniquement à ceux obtenus par les méthodes électriques 1D. Les prospections électriques sur le terrain se limitent principalement à deux types d'investigation : latérale (trainé électrique) et verticale (sondage électrique). Les données issues des investigations latérales sont le type

d'anomalie, la forme d'anomalie, l'épaisseur de l'anomalie et la résistivité de la cible. Le type de sondage a été considéré au niveau de l'investigation verticale.

IV.3.2.1 Type d'anomalie

L'anomalie traduit de la présence d'une zone de faiblesse synonyme de fracture. Les fractures constituent les cibles idéales pour l'implantation des ouvrages de captage des eaux souterraines en milieu de socle. Ces fractures du socle se manifestent sur les profils de résistivité apparente (traînés électriques) par des zones de faibles résistivités électriques dans un environnement beaucoup plus résistant. Selon Van Der Stricht (1988), en fonction de l'allure du profil de variation de la résistivité, on peut mettre en évidence plusieurs types d'anomalies (figure 6) :

- ❖ Anomalie de type « Compartiment Conducteur » étroit ou large
- ❖ Anomalie de type « Palier Conducteur »
- ❖ Anomalie de type « Contacte Entre Deux Paliers »

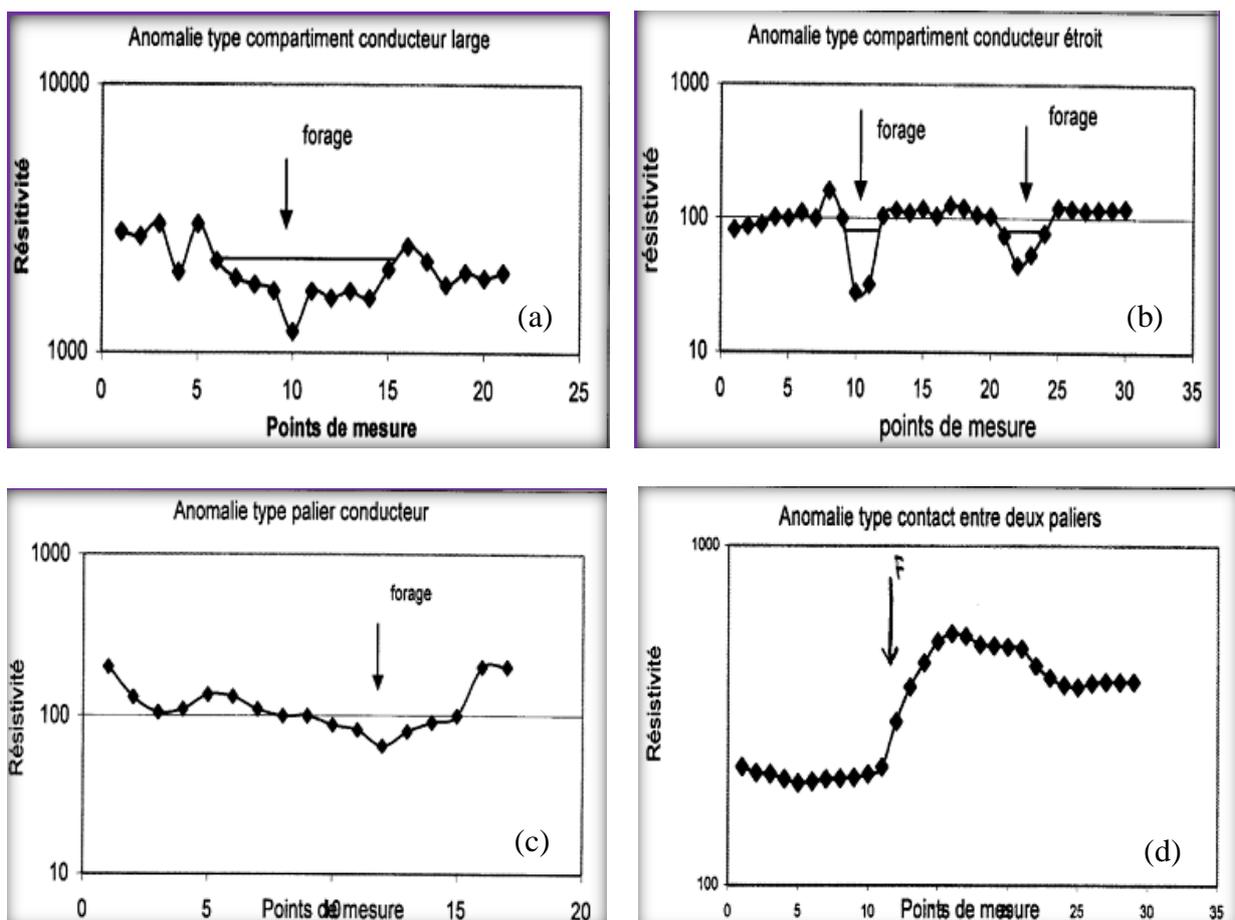


Figure 6 : Illustration des différents types d'anomalies géophysiques : (a) Anomalie de type compartiment conducteur large (b) étroit (c) Anomalie de type palier conducteur (d) contact entre deux paliers.

IV.3.2.2 Forme de l'anomalie

Selon Van Der Stricht (1988), en fonction de l'allure de la courbe de variation de la résistivité, on peut également mettre en évidence plusieurs formes d'anomalies (figure 7) à savoir :

- Les anomalies de forme V : anomalie pointue,
- Les anomalies de forme U : anomalie arrondie,
- Les anomalies de forme W : anomalie dont la partie conductrice est perturbée par un ou plusieurs corps résistants,
- Les anomalies de forme M : anomalie qui peut être en V ou en U, mais qui est encadrée par d'autres anomalies conductrices,
- Les anomalies de forme K : anomalie qui est en W, mais dont la dernière partie conductrice à une résistivité plus faible que les autres. Elle est très souvent confondue avec l'anomalie de forme W.

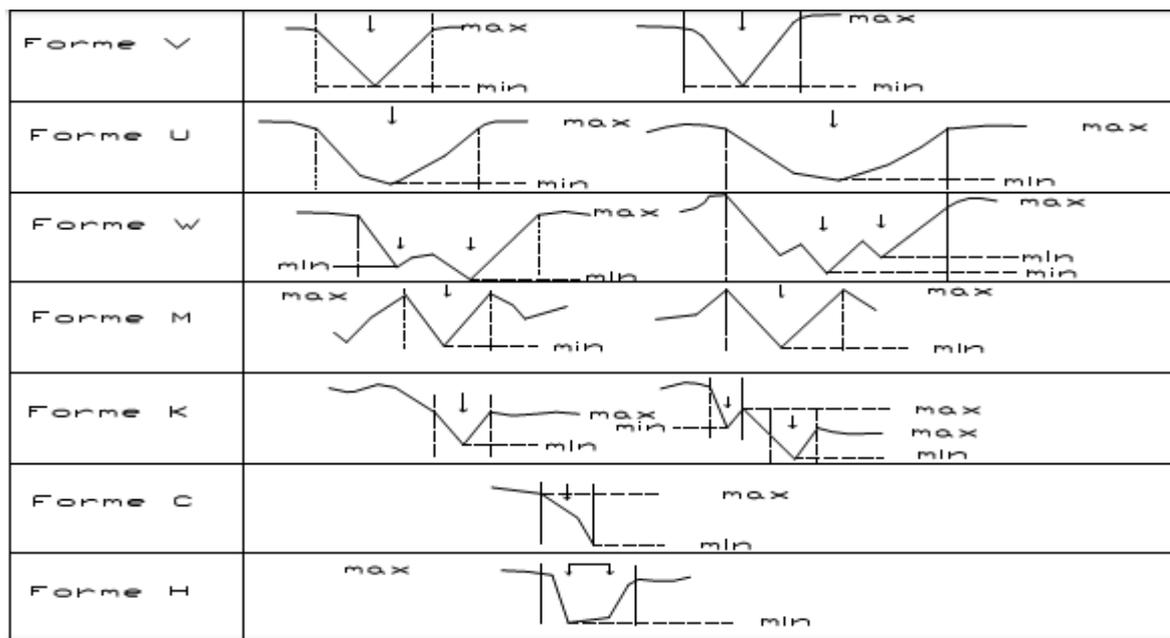


Figure 7 : Illustration des différentes formes d'anomalies géophysiques (CIEH,1988)

IV.3.2.3 Épaisseur de l'anomalie

Elle témoigne dans une certaine mesure de l'ouverture de la fracture. En se basant sur la forme de l'anomalie on peut déduire l'épaisseur de chaque anomalie à travers les limites à sa forme (cf. figure 7).

IV.3.2.4 Résistivité de la cible

La résistivité électrique (apparente) réduite des zones altérées provoque des écarts des valeurs mesurées par rapport à la roche dure encaissante, moins altérée ou saine. L'eau souterraine emmagasinée dans les fractures ou fissures participe relativement peu à la création des

anomalies. Le choix du point de sondage est basé sur les résultats du trainée. La résistivité de la cible représente ici la résistivité minimale sur l'anomalie considérée pour le sondage (figure 7). Kafando (2014) soulignait l'importance de la considération de ce facteur dans la prise de décision ou le choix des sites pour l'exécution d'un forage.

IV.3.2.5 Type de sondage

Le sondage permet de déterminer les différentes successions rocheuses et oriente vers l'estimation de la profondeur du socle sain. Diouf (1999) distingue cinq types de courbes de sondages électriques. Cette classification s'inspire de celle proposée par Koussoubé en 1996 dans le bassin de Bidi (Burkina Faso) dans un contexte géologique de socle cristallin et cristallophyllien. Elle tient son origine de manière générale des sondages électriques réalisés dans le cadre du projet « CAMPUS » ORSTOM en 1996 et des programmes PNUD, UNICEF et le Ministère de l'hydraulique de 1994 et 1998.

🚦 Courbes de sondages électriques en « fond de bateau »

Ces courbes (Figure 8) caractérisent les régions à cuirasse latéritique (ou carapace latéritique). Ce cas de figure est très répandu dans la zone où la couverture latéritique est généralisée. L'interprétation globale de ce type de courbe montre une structure à trois couches de terrain distinctes. Le recouvrement superficiel correspondant généralement à la cuirasse latéritique. Le complexe aquifère conducteur qui est représenté sur la courbe de sondage par le « fond de bateau » et le début de la phase de remontée. Il est souvent associé à une altération argileuse. Et le socle résistant qui représente la partie de la courbe de sondage qui remonte avec une pente de 45°. Il correspond au socle sain ou à la roche peu fissurée.

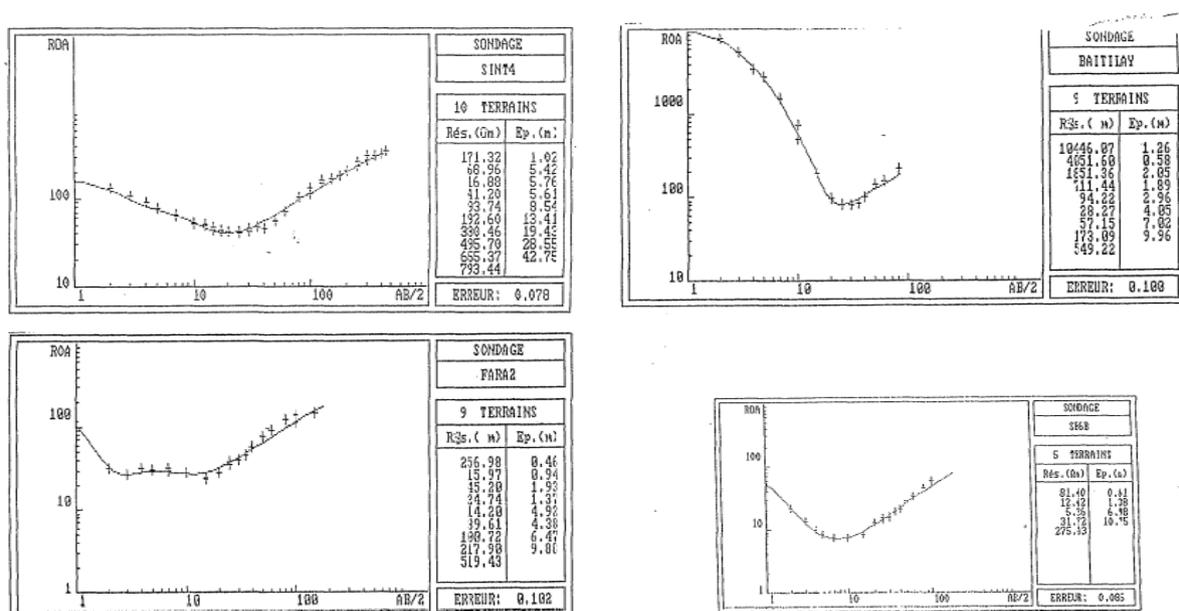


Figure 8 : Sondage type cloche fond de bateau

⚡ Courbes de sondages électriques en « cloche dans fond de bateau »

C'est une variante du type de courbe de sondage électrique précédente se traduisant par une remontée en cloche dans le fond de bateau (figure 9). Cette modification peut être liée à la présence d'un horizon d'argiles sèches ou d'argiles gravillonnaires.

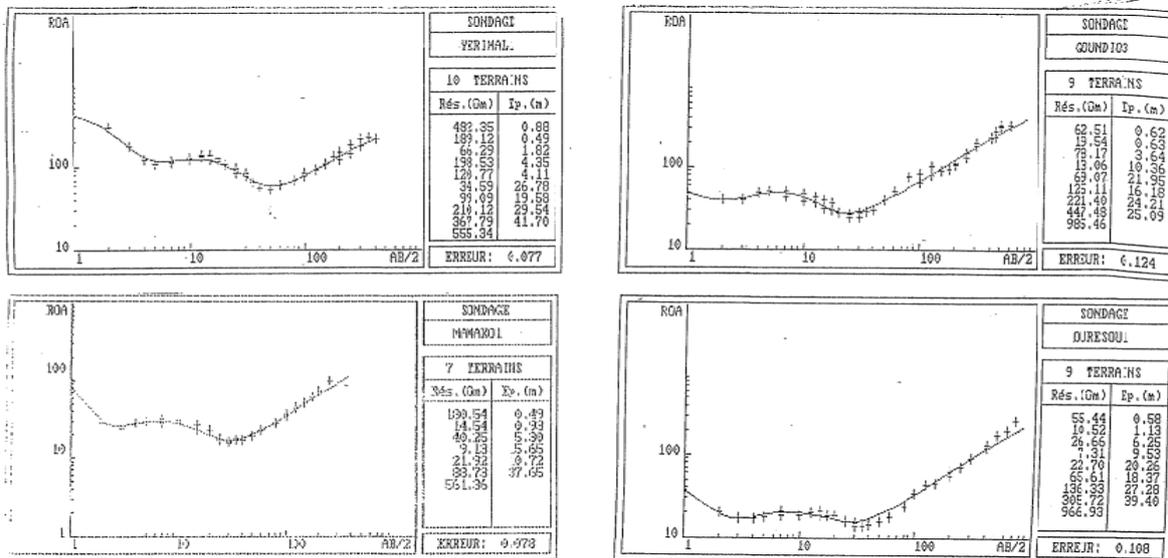


Figure 9 : Sondage type cloche dans fond de bateau

⚡ Courbes de sondages électriques en « cloche puis en fond de bateau »

C'est une variante du type en « fond de bateau ». Quatre terrains peuvent être distingués (figure 10). La couche de terrain superficiel est représentée par un recouvrement arable sableux de champs des cultures. Les autres terrains sous-jacents sont les mêmes que ceux définis dans les courbes en « fond de bateau ».

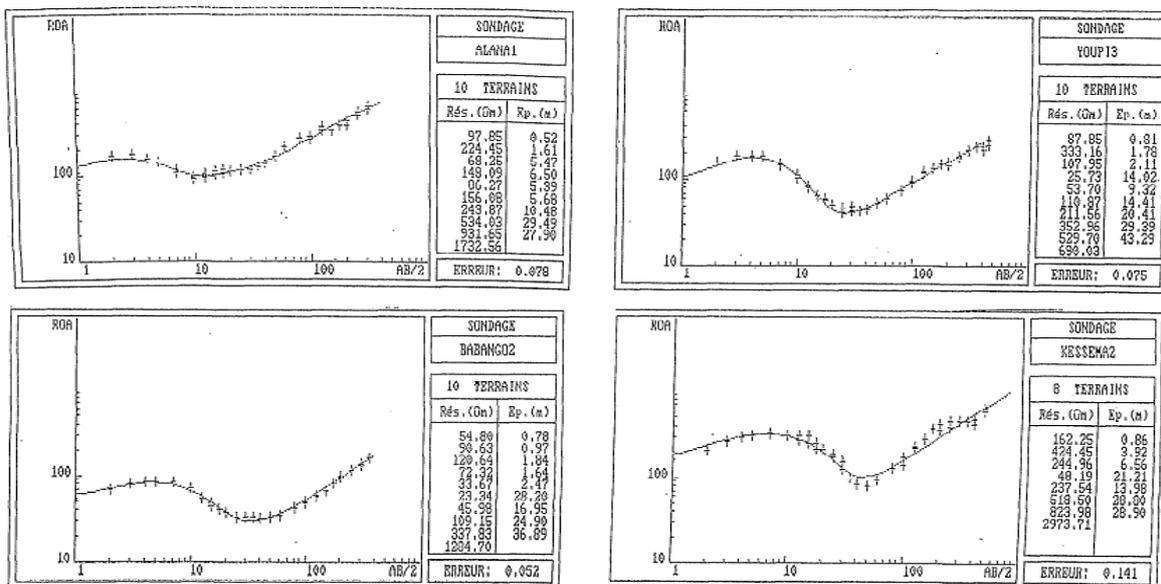


Figure 10 : Sondage type cloche puis fond de bateau

✚ Courbes de sondages électriques à une « seule branche »

Ce type de courbe (figure 11) indique un terrain à deux couches. La forme de cette courbe suppose l'absence de couche latéritique qui correspond à la première partie de la courbe en « fond de bateau ».

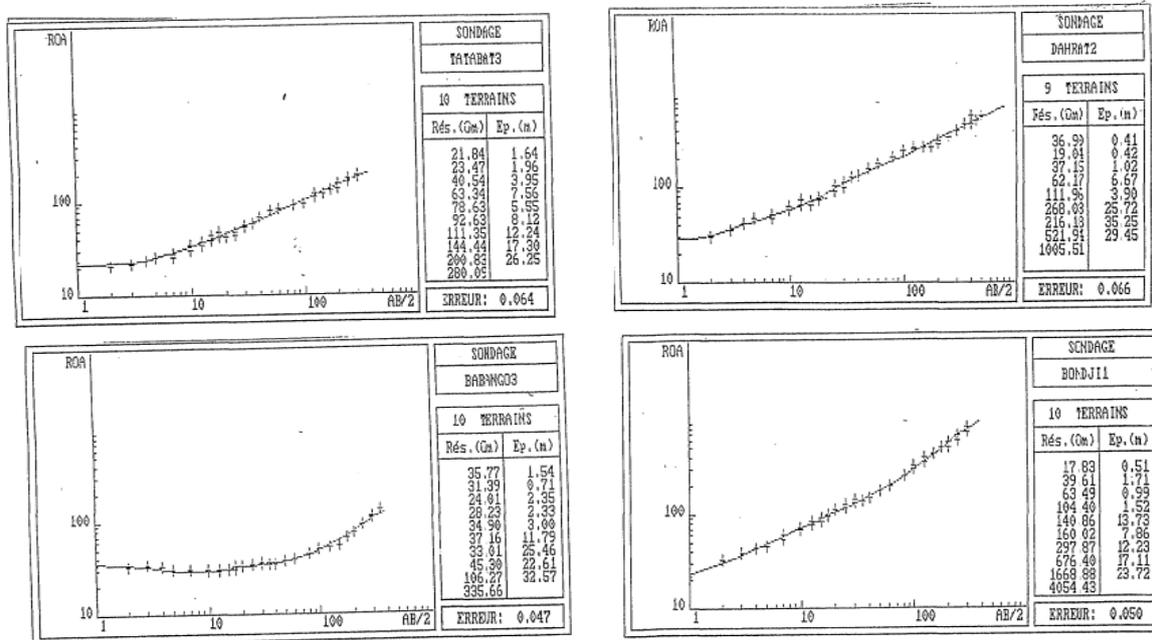


Figure 11 : Sondage type cloche dans fond de bateau

✚ Courbes de sondages électriques à « remontée trainante »

Plus l'épaisseur du socle fissuré est grande, plus elle s'exprime sur la courbe par une remontée trainante marquée. Ce type de sondage (figure 12) est lié à l'influence de méga fractures.

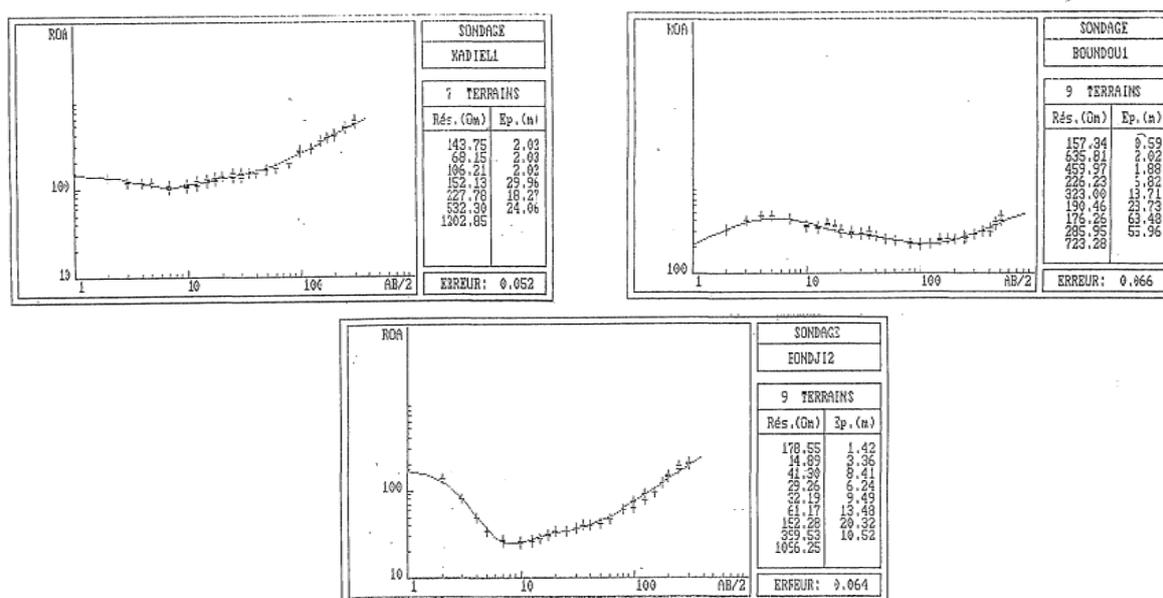


Figure 12 : Sondage type cloche dans fond de bateau

IV.3.2.6 Épaisseur de l'altération

Cette épaisseur est déterminée de façon théorique par le géophysicien par interprétation de la courbe de sondage. Les altérites forment un ensemble présentant plus une succession graduelle que des horizons bien individualisés. Toutefois on peut distinguer d'une part les argiles vers le sommet et d'autre part les arènes vers la base du profil. La partie supérieure contient à l'inverse de la partie inférieure des nodules ou concrétions ferrugineux. L'arène est l'unité où l'on passe progressivement de l'argile à minéraux primaires dispersés à la roche par suite d'une diminution graduelle de l'argilification d'ensemble, puis les diaclases Diouf (1999).

IV.3.3. Paramètres hydrogéologiques

IV.3.3.1 Épaisseur d'altération réelle

On arrive à faire une estimation réelle de l'épaisseur d'altération grâce au cutting du forage, donc par interprétation de la coupe lithologique du forage. L'épaisseur d'altération constitue la couche qui se trouve au-dessus du socle (frange fissurée + roche saine). Elle est considérée par entre autres auteurs : Savadogo (1984), Nakolendousse (1991) et Kafando (2014) comme un facteur crucial dans l'alimentation de la nappe en raison de son rôle capacitif.

IV.3.3.2 Débit du forage

Le débit (après développement) est un critère important d'analyse. Un forage est donc déclaré positif s'il a un débit minimum après équipement supérieur à celui du projet.

IV.3.3.3 Profondeurs des venues d'eau

Elles donnent une estimation sur les profondeurs à forer pour atteindre l'aquifère. Ces données orientent donc sur la profondeur maximale et de désespoir des forages. Armond et al. (1983) et Kafando (2014) ont utilisé ce paramètre dans la détermination de la frange productive des aquifères.

IV.3.3.4 Lithologie

Considérée par entre autres Savadogo (1984), Nakolendousse (1991) et Kafando (2014) comme un facteur important de productivité, elle renseigne sur la géologie de l'horizon fissuré. Il permet de faire ressortir la géologie de l'aquifère et donc oriente la prospection suivant la géologie.

IV.4 Analyse des paramètres

IV.4.1. La statistique descriptive

C'est une méthode qui permet de résumer les données d'une variable statistique pour les rendre plus explicites. Il s'agira d'une part de présenter les taux de succès en fonction des paramètres d'étude. Cela consistera à des regroupements par plage de variation pour les variables quantitatives et par type pour les variables qualitatives. D'autre part nous observerons la dispersion des valeurs de certains paramètres autour de la valeur moyenne. L'illustration graphique de ces résultats se fera à travers des histogrammes et des nuages de points. Pour les variables quantitatives, on utilisera:

Moyenne arithmétique : $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^p n_i X_i$ avec $\sum_{i=1}^p n_i = n$ (1)

Coefficient de variation : faisant partie des paramètres de dispersion, il nous permettra d'apprécier la pertinence de la moyenne calculée plus haut. C'est le rapport de l'écart type (σ) sur la moyenne (\bar{X}). L'écart type mesure la dispersion d'une variable aléatoire. Le coefficient de variation nous permettra donc de percevoir la distribution des valeurs autour de la moyenne.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad \text{avec} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^p n_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

IV.4.2. Analyse en Composante Principale

La méthode ACP est un outil exploratoire qui consiste à chercher des combinaisons linéaires entre des variables quantitatives. Elle a permis de former des axes factoriels en vue de : détecter les individus se ressemblant, mettre en évidence une typologie d'individus, détecter les relations linéaires entre les différentes variables, mettre en évidence une typologie de variables. L'ACP cherche d'une façon générale à établir des liaisons entre deux typologies.

Le tableau de corrélation ou tableau de Bravais Pearson teste l'association de deux variables ainsi que le niveau de significativité de la corrélation. Ce coefficient permet de détecter la présence ou l'absence d'une relation linéaire entre deux caractères quantitatifs continus.

Pour calculer ce coefficient, il faut tout d'abord calculer la covariance (cov). La covariance est la moyenne du produit des écarts à la moyenne.

$$Cov(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})^2 \quad (3)$$

Le coefficient de corrélation linéaire (r) de deux caractères X et Y est égal à la covariance de X et Y divisée par le produit des écarts types de X et Y.

$$r(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (4)$$

Le signe de r indique donc le sens de la relation tandis que la valeur absolue de r indique l'intensité de la relation c'est-à-dire la capacité les valeurs de Y en fonctions de celles de X .

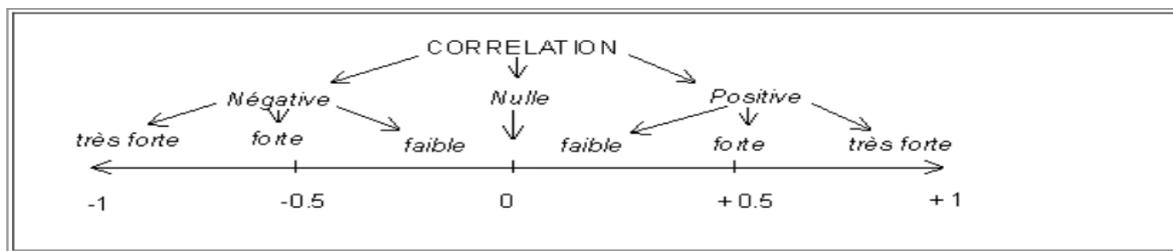


Figure 13 : Intensité des relations entre variables corrélées

Les variables corrélées ici sont les variables quantitatives : l'épaisseur de l'anomalie, la résistivité de la cible, l'épaisseur d'altération, la profondeur des venues d'eau et le débit.

IV.4.3. La méthode des tableaux croisés

C'est une méthode de la statistique exploratoire. Le tableau croisé ou table de contingence est l'une des formes de structuration des données les plus courantes dans l'analyse des variables qualitatives. En confrontant deux partitions d'une même population ou d'un même échantillon, le tableau croisé permet en effet de travailler sur des variations par catégorie, éléments indispensables en vue d'une première interprétation des résultats. Les analyses et descriptions de tableaux croisés sont d'ailleurs à la base du traitement statistique des données d'enquêtes (Carpentier in Nikiéma (2012)). Dans ce cas d'étude, les variables de regroupement seront : la côte du forage, le type d'anomalie, l'épaisseur de l'anomalie, la forme d'anomalie, la résistivité de la cible, le type de sondage, l'épaisseur d'altération, la lithologie, la profondeur des venues d'eau et le débit après développement.

Nous avons donc dans un premier temps cherché à faire ressortir le lien entre géomorphologies, la productivité et la géophysique. Nous avons pour ce faire vérifié l'existence d'éventuelles corrélations entre les paramètres suivants : altitude des points de forages, débit et épaisseur d'altération.

Puis nous avons déterminé le taux de réussite des forages à partir des implantations géophysiques en y associant la géologie et l'hydrogéologie. Pour cela, nous avons vérifié l'existence d'éventuels liens entre : le type d'anomalie, la forme d'anomalie, la résistivité de la cible, le type de sondage, l'épaisseur d'altération, la profondeur des venues d'eau et le débit.

V. RESULTATS ET DISCUSSIONS

À cette étape on présentera les résultats issus de la méthodologie décrite plus haut. Ils seront comparés lorsque possible à ceux d'études antérieures et des conclusions pourront être tirées.

V.1 Analyse descriptive

Notre étude a porté sur 103 forages (Annexe 2) dont 59 forages positifs et 44 forages négatifs soient un taux de succès de près de 57%. La figure 14 nous présente la répartition spatiale des différents forages considérés pour l'étude.

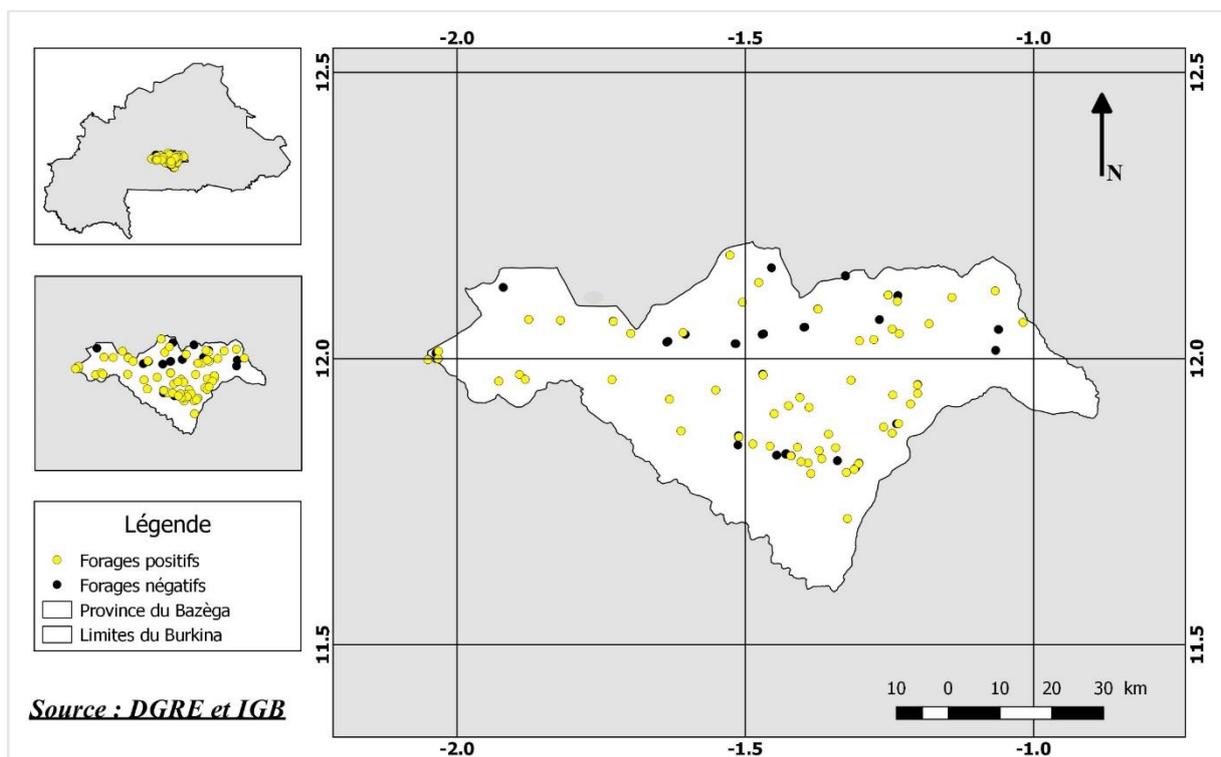


Figure 14 : Répartition des forages dans la zone d'étude

V.1.1. La côte du point du forage et taux de succès

La zone d'étude se trouvant sur un plateau, nous avons regroupé les côtes de forages par tranche de 10m. Les tranches les plus représentées sont celles [300-310m] et [310-320m] à hauteur de 21.4% et 30.1% respectivement ; ensuite viennent les tranches [290-300m] et [320-330m], 14.6% et 15.5% respectivement (figure 15). De façon générale, on note que l'on peut trouver de l'eau en n'importe quelle altitude. Néanmoins la tranche [310-320m] vu sa récurrence se démarque des autres tranches avec une proportion de succès de 77%. Des tranches faiblement représentées, celle [280-290m] est très intéressante en termes de succès

(100%). N'ayant qu'un seul forage au niveau de la tranche [260-270m] , son taux de succès n'a donc pas été considéré

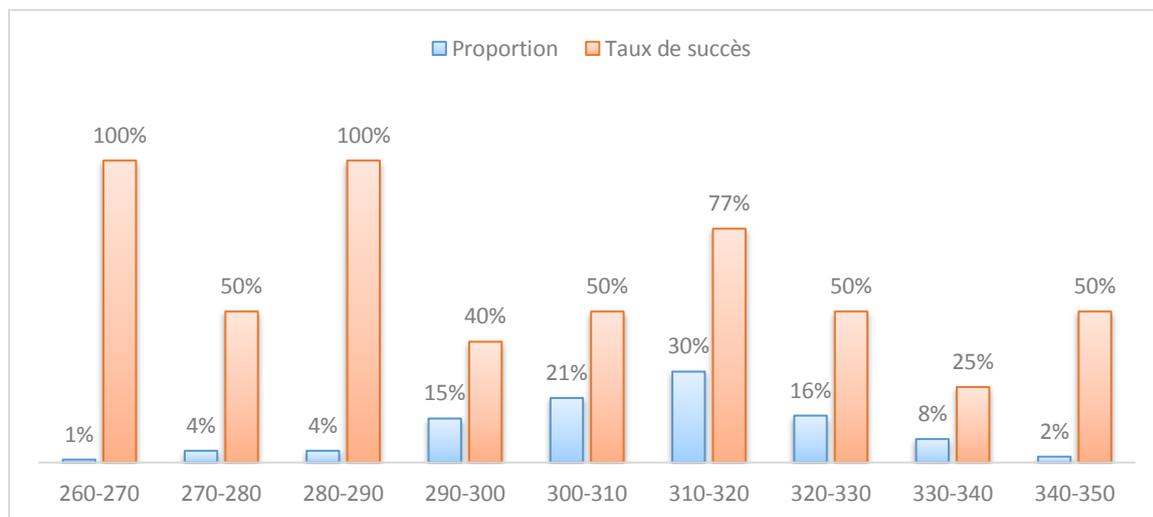


Figure 15 : Proportion de forage positif selon l'altitude du point de foration

V.1.2. Le type de l'anomalie et taux de succès

Des différents types d'anomalies (figures 16), le type CCL est le plus rencontré avec une proportion de 68.0%, suivent les types PC et CCE à hauteur 16.5% et 10.7%. Ces différences de proportion dépendent beaucoup de l'appréciation des anomalies du trainé électrique par le géophysicien (de la différence qu'il fera entre un PC et un CCE ou CCL ou encore entre CCE ou CCL). Pour ce qui concerne la réussite des forages, les types CCL et PC ont des taux de succès élevés, 56% et 82% respectivement. L'envergure de ces anomalies favorise la collecte des eaux infiltrées.

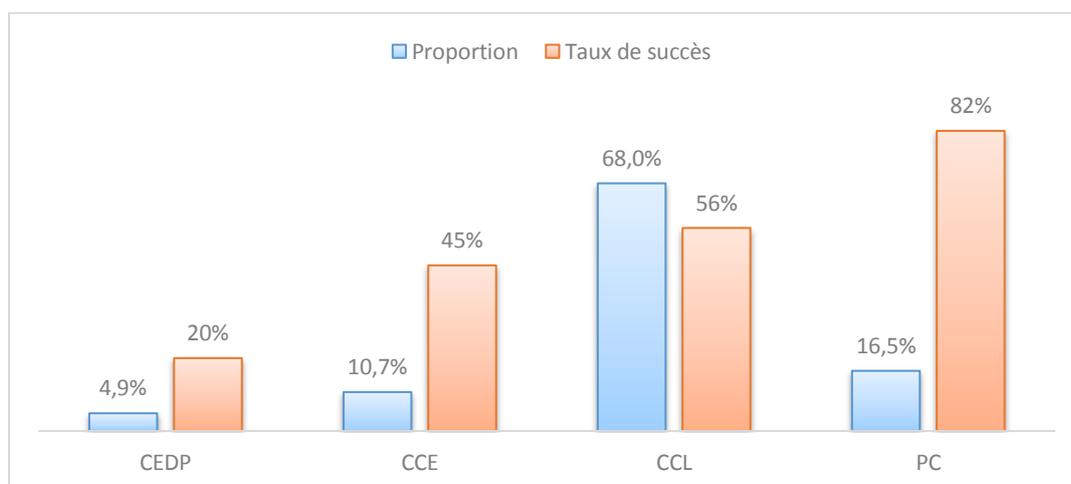


Figure 16 : Proportion de forage positif selon le type de l'anomalie

V.1.3. La forme de l'anomalie et taux de succès

Il ressort des formes d'anomalies (figure 17) que les formes en K, en U et en W sont les plus rencontrées, représentant 41.7%, 30.1% et 13.6% de l'ensemble des forages étudiés. La proportion de forages positifs (taux de succès) est notoire pour les formes C, H et V bien qu'il ne soit pas trop rencontré durant l'étude. Des formes couramment rencontrées (K, U et W) celles en U et W sont celles indiquées pour une campagne de foration.

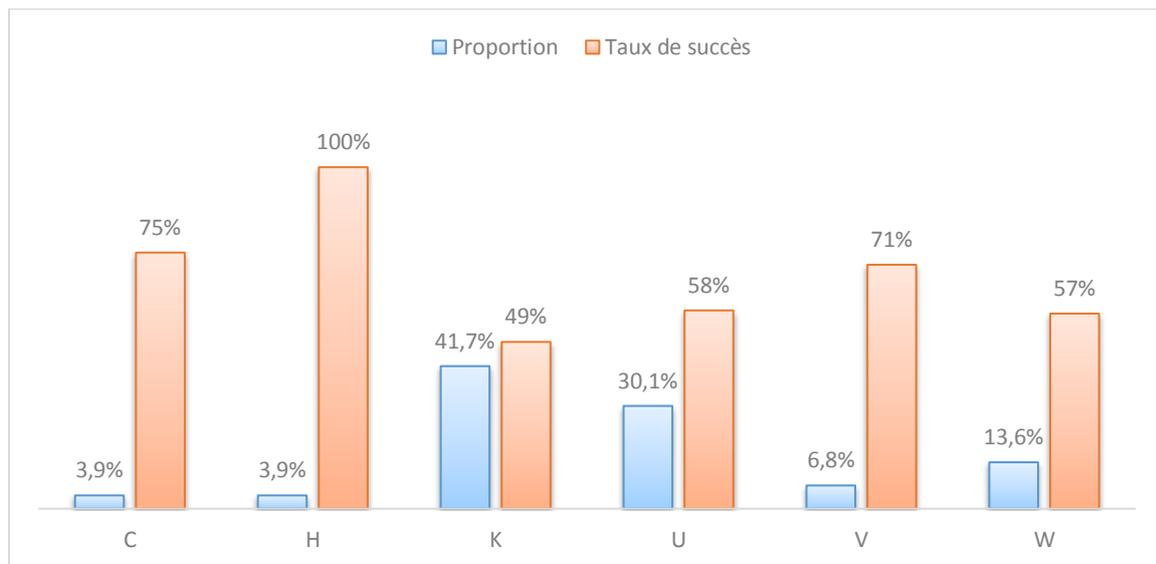


Figure 17 : Proportion de forage positif selon la forme de l'anomalie

V.1.4. La résistivité de la cible et taux de succès

La résistivité des points choisis pour la foration (résistivité apparente de l'endroit où l'anomalie a été identifiée) varie entre 21 à 500 ohms.m. La résistivité moyenne est de 80.1 ohms.m. La faible valeur du coefficient de variation (0.71) indique une concentration des différentes valeurs autour de la moyenne. Des tranches couramment rencontrées (figure 18) celles [0-50[[50-100[et [100-150[respectivement 13.6%, 38.8% et 24.3% de l'échantillon étudié, la tranche [0-50[est celle qui présente une proportion de forages positifs élevée (57%). Des tranches les moins rencontrées [150-200[[200-250[et >250 ohms.m, la tranche [200-250[mène le plus à des forages positifs (67%).

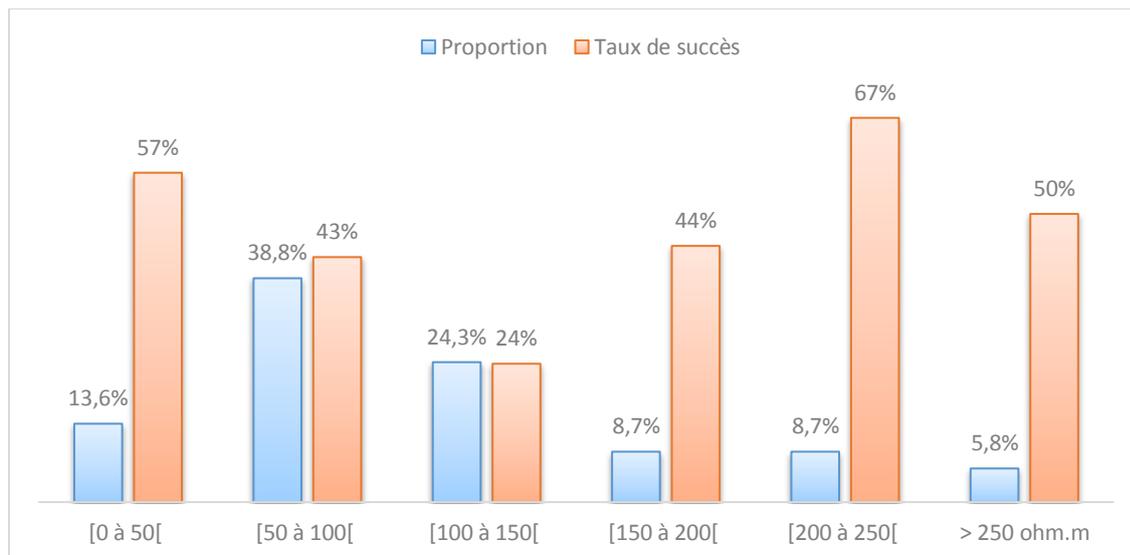


Figure 18 : Proportion de forage positif selon la résistivité de la cible forée

V.1.5. Le type de sondage et taux de succès

Des différents types de sondages rencontrés dans la zone étudiée (figures 19), le type de sondage FB est celui qui a la plus forte récurrence (74.8%). Le taux de succès associé à ce type de sondage est de 56%. En ce qui concerne les autres types de sondage, les forages positifs font essentiellement suite au type de sondages CFB et FCB (54% et 75% respectivement). Ayant rencontré qu'un sondage de type RT nous n'avons donc pas considéré son taux de succès.

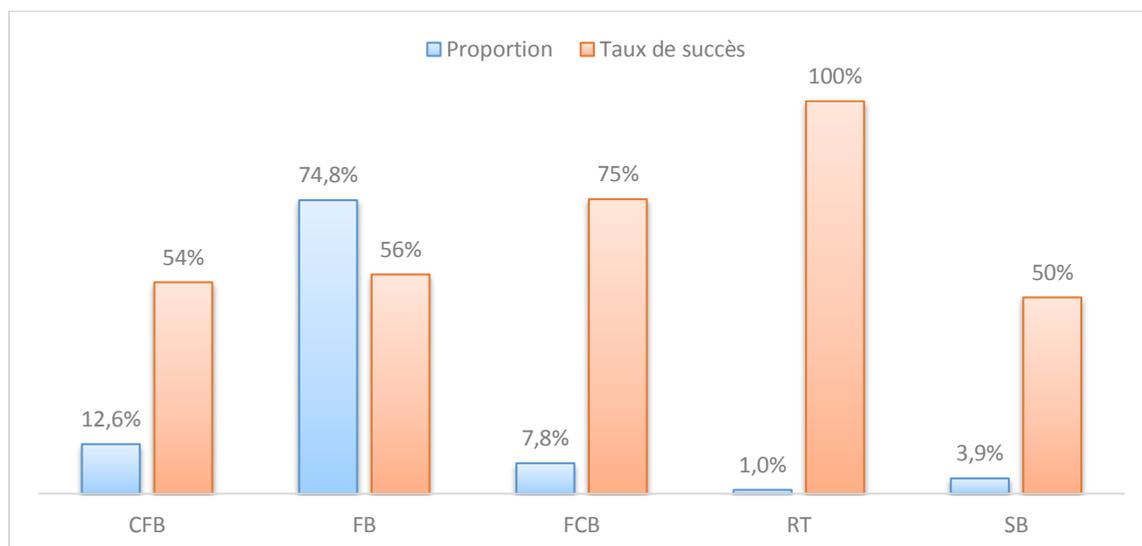


Figure 19 : Proportion de forage positif selon le type de sondage

V.1.6. La lithologie et taux de succès

Après analyse des données (figure 20), nous avons dénombré (04) quatre types de lithologies à savoir : les granites, les roches vertes, les schistes et les grès. Il est important de noter qu'on parle ici des types de roche rencontrés dans les aquifères. La forte proportion du granite 72.8% traduit bien sa présence en zone de socle. La proportion de forages positifs dans le granite est de 59%. Les grès (essentiellement des grès schisteux ici) caractéristiques du milieu sédimentaire sont localement rencontrés à faible proportion dans la zone d'étude. Le taux de succès associé est de 86%.

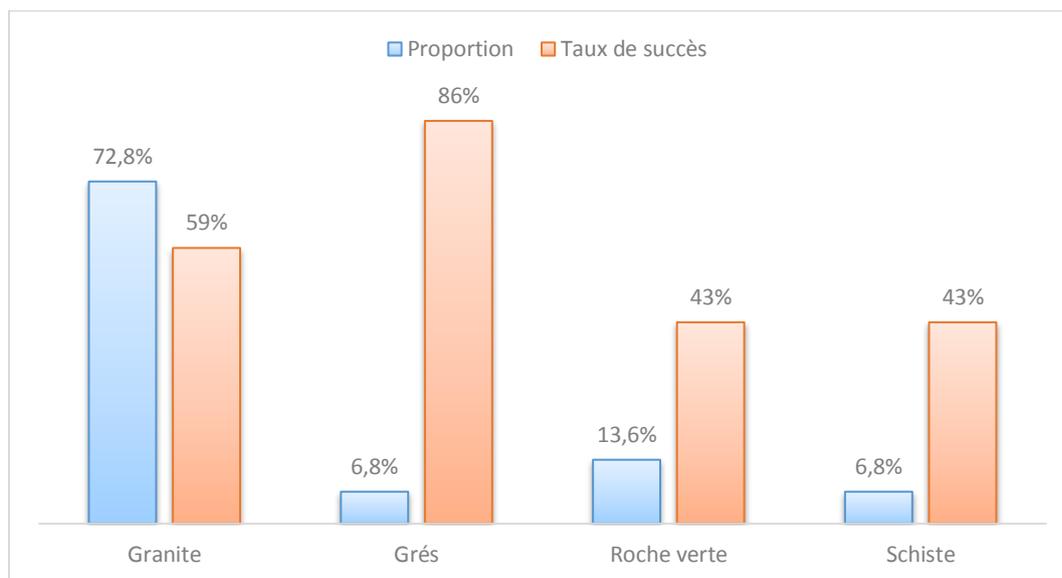


Figure 20: Proportion de forage positif selon la lithologie

V.1.7. L'épaisseur d'altération réelle et taux de succès

L'épaisseur d'altération évolue entre 3.07m et 61.65m (figure 21). L'altération moyenne est de 23.16m. Le coefficient de variation (0.43) montre une concentration des différentes valeurs autour de la moyenne. Les classes d'altération [10-20m[, [20-30m[et [30-40m[sont les plus représentatifs de l'échantillon étudié soient respectivement 35.0% , 31.1% et 20.4%. De façon générale, la proportion de forages positifs croît avec l'altération. Les tranches d'altération [20-30m[, [30-40m[et >40m sont cependant les plus prometteuses avec des proportions de forages positifs respectivement de 66%, 62% et 80%.

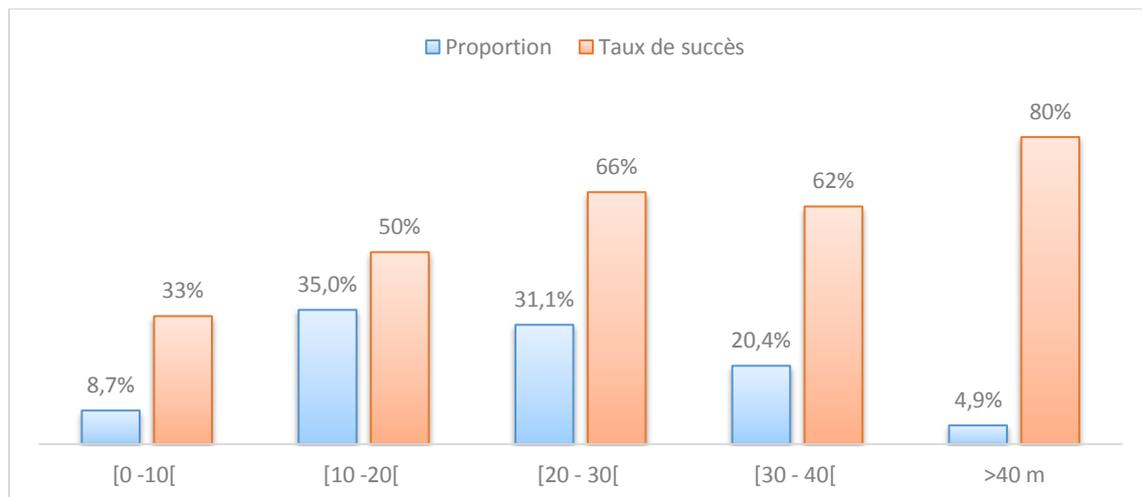


Figure 21 : Proportion de forage positif selon l'épaisseur d'altération

V.1.8. Débit

Avec une moyenne de 4.31 m³/h, les débits dans la zone étudiée oscillent entre 1 et 12m³/h. Comme le coefficient de variation (0.74), nous sommes dans une distribution bien répartie autour de la moyenne. Le regroupement par classe (figure 22) a permis de découvrir que la grande majorité des débits, 61% se trouvent dans la plage de [1-5[m³/h ; suivent les classes [5-10[et [10-15[soient respectivement 25.4% et 6.8%.

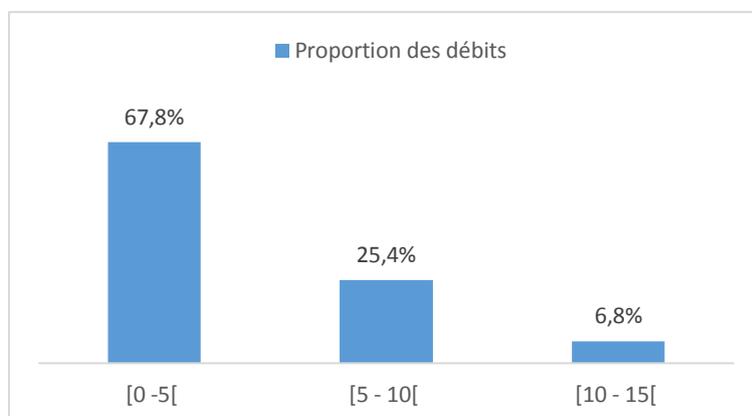


Figure 22 : Proportion des débits

Conclusion partielle

Pour un taux de succès de plus de 57% dans le cadre de notre étude, les aquifères dans le socle sont majoritairement constitués de granite fissuré (72.8%) et des roches vertes (13.6%) pour des taux de succès respectifs de 59% et 43%. Les forages ayant des altitudes variant de [280-290m[d'une part et de [310-320m[d'autre part induisent des taux de succès intéressants. Et s'il ressort que les anomalies de types CCL et PC induisent un taux de succès de plus d'un

forage sur deux, les formes U, V et W engendrent des taux de réussite comparables. Les résistivités de la cible de forations sont d'un grand intérêt lorsqu'ils évoluent de [0-50ohms.m] et de [200-250ohm.m]. Par ailleurs les types de sondages CFB, FB et FCB sont celles qui entraînent le plus de forage positif. Finalement, notons que plus l'altération augmente (>20 m), plus on a de chance d'obtenir un forage positif.

V.2 Paramètres géophysiques et productivités

Il s'agira ici comme énoncé dans la méthodologie de faire ressortir les éventuelles corrélations pouvant exister entre les paramètres géophysiques de la cible et la productivité de l'aquifère. Cette analyse se fera en deux étapes.

V.2.1. ACP sur l'ensemble des forages

Le tableau ci-dessous (Tableau I) présente la matrice de corrélation issue de l'analyse combinée des paramètres géophysiques (résistivité de la cible, l'épaisseur d'altération géophysique, l'épaisseur de l'anomalie) et la productivité (débit).

Tableau I : Matrice de corrélation entre paramètres géophysique et le débit pour l'ensemble des forages.

	Résistivité de la cible	Épaisseur de l'altération	Épaisseur de l'anomalie	Débit
Résistivité de la cible	1,000	-0,235	0,036	0,026
Épaisseur de l'altération		1,000	-0,005	-0,043
Épaisseur de l'anomalie			1,000	0,014
Débit				1,000

L'analyse de la matrice de corrélation révèle qu'il n'existe quasiment pas de corrélation (cf. figure 13) entre les différents paramètres étudiés. Ces résultats sont en adéquations avec ceux obtenus par Diabaté (2013). Cependant il est important de faire ressortir que l'analyse regroupe à la fois de forages positifs et des forages négatifs. En effet les paramètres d'entrées sont limités cela parce qu'on doit les retrouver à la fois sur les forages positifs et négatifs. De plus, il faut préciser qu'un forage négatif peut être le plusieurs facteurs et principalement des erreurs humaines. En revanche même si peu significative (cf. figure 13), on note une corrélation négative entre l'épaisseur de l'altération et la résistivité. Cela traduit le fait que ces deux paramètres évoluent en sens inverse.

V.2.2. ACP sur les forages positifs

Le tableau ci-dessous (Tableau II) montre la matrice de corrélation entre les paramètres géophysiques et le débit des forages positifs. Contrairement à l'analyse précédente, des corrélations même si elles sont jugées peu significatives (cf. figure 13) existent entre l'épaisseur et chacun des paramètres profondeur des venues d'eau, débit, résistivité de la cible d'une part, entre le débit et les profondeurs des venues d'eau. Hormis l'épaisseur d'altération et les profondeurs des venues d'eau qui évoluent dans le même sens, le débit évolue en sens inverse avec les paramètres : profondeurs des venues d'eau, l'épaisseur d'altération (Annexe 1). Cela implique que plus l'épaisseur d'altération est grande, plus la profondeur de venues d'eau est importante; le débit pour sa part varie en sens inverse de l'accroissement de la profondeur de venues d'eau et de l'épaisseur d'altération. En ce qui concerne les corrélations qui sont jugées faibles (cf. figure 13), qu'elles soient positives ou négatives traduisent le fait que l'on ne peut pas se baser sur l'un des deux paramètres pour prévoir le comportement de l'autre.

Tableau II : Matrice de corrélation entre paramètres géophysique et le débit pour les forages positifs.

	Profondeur Première venue d'eau	Profondeur dernière venue d'eau	Épaisseur de l'altération	Débit	Résistivité de la cible	Épaisseur de l'anomalie
Profondeur première venue d'eau	1,000	0,747	0,428	-0,290	-0,087	-0,067
Profondeur dernière venue d'eau		1,000	0,229	-0,255	-0,089	-0,048
Épaisseur de l'altération			1,000	-0,282	-0,284	-0,090
Débit				1,000	0,090	-0,037
Résistivité de la cible					1,000	0,101
Épaisseur de l'anomalie						1,000

Conclusion partielle

L'analyse en composantes principales a mis en évidence l'existence de corrélations, même celles qui sont jugées peu significatives, entre paramètres géophysiques et productivité en ce qui concerne les forages positifs. On note donc des corrélations même entre l'épaisseur d'altération et les paramètres profondeur des venues d'eau, débit, résistivité de la cible d'une

part, entre le débit et les profondeurs des venues d'eau d'autre part. Ces corrélations nous donnent des indications sur la manière dont les paramètres géophysiques et de productivité évoluent. Par conséquent ces corrélations nous guident sur l'interprétation de paramètres géophysiques lors de la prospection. Leur mise en évidence de ces corrélations concourent donc une amélioration du taux de succès des forages.

V.3 Approche multicritères des paramètres étudiés pour l'accroissement du succès

Les variables mises en relation sont : la côte du forage, la résistivité de la cible, le type de sondage, l'épaisseur d'altération, la lithologie, la profondeur des venues d'eau, la nature du forage (positif ou négatif) et le débit.

V.3.1. Géomorphologie, géophysique et productivité

La figure 23 montre l'évolution de l'épaisseur d'altération en fonction de l'altitude de la zone d'implantation du forage aussi bien pour les forages positifs que pour les forages négatifs.

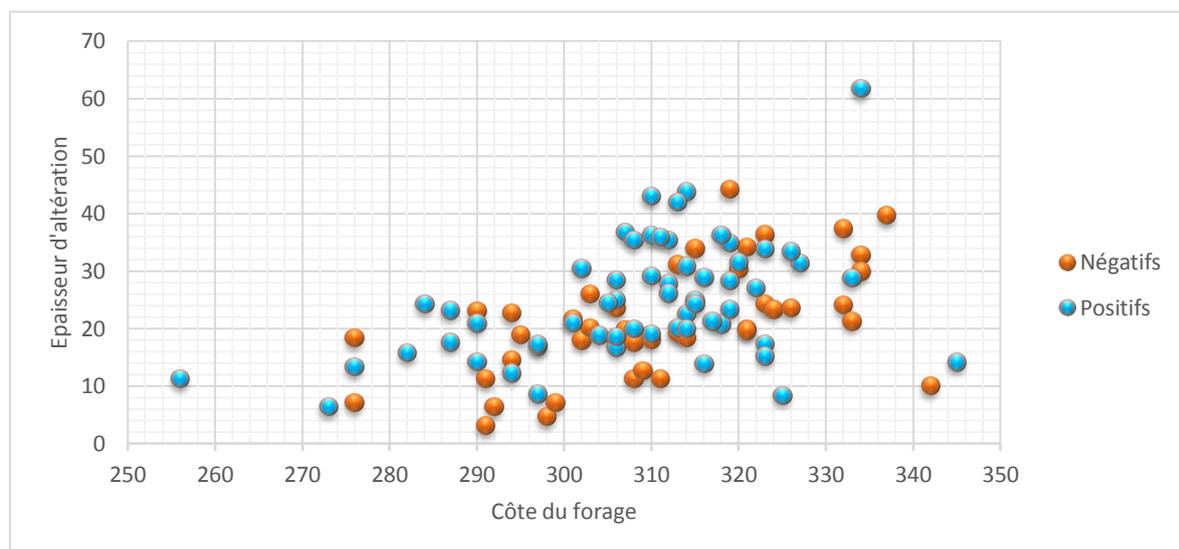


Figure 23 : Relation entre altitudes du point de forage, épaisseur d'altération et taux de succès

Les forages situés dans la plage d'altitudes 300 à 320m et présentant une altération oscillante entre 20 et 40m sont ceux qui ont le plus de chance d'être positifs (81.3%). La productivité des aquifères est influencée par les altitudes associées aux épaisseurs d'altération comme le soulignait Kafando et al. (2016). Ils identifiaient ainsi les plateformes les plus productives entre 290 et 340 mètres. La tranche que nous avons donc identifiée (300-320 m), plus restreinte et apportant plus précision notamment sur l'altération recommandée (20-40m) fait partie de la

tranche que Kafando et al. (2016) définissaient. La prise en compte de la géomorphologie dans l'identification des points de forages est donc bénéfique. Elle prend en compte des éléments essentiels comme la topographie de surface, qui doit être favorable à l'alimentation de la nappe et la topographie du toit du socle sous l'altération, qui doit permettre de stocker puis canaliser les eaux infiltrées vers les réservoirs sous-jacents.

V.3.2. Géophysique, lithologie et productivité

Dans cette partie, nous présentons dans un premier temps, pour chacune des formations géologiques du site d'étude, l'évolution du taux de succès en fonction de la résistivité de la cible, du type de sondage. Dans un second temps, la productivité sera analysée en fonction de chacun des paramètres : épaisseur d'altération et épaisseur de la zone fissurée.

✚ Résistivité de la cible, lithologie et taux de succès

L'analyse pour chacune des formations géologiques du site d'étude de l'évolution du taux de succès en fonction de la résistivité de la cible (figure 24) révèle que :

- Pour les forages en zone granitique (83% de l'échantillon), les points préférentiels sont ceux ayant une résistivité de la cible [100 à 150 ohms.m]. Le taux de succès associé est de 83%. Ce taux est supérieur à la proportion obtenue en estimant le succès selon la lithologie (59%) uniquement sans toutefois faire référence de la résistivité de la cible (cf. figure 20). De même, ce taux est supérieur à celui obtenu en estimant le succès selon la résistivité de la cible (76%) uniquement sans toutefois faire référence de la lithologie (cf. figure 18).
- Pour les grès (7% de l'échantillon), l'intérêt se porte sur la tranche [50 à 100 ohms.m]. Le taux de succès associé est de 83%. Ce taux est plus grand que celui obtenu en estimant le taux de succès selon la résistivité de la cible (58%) uniquement sans toutefois faire référence de la lithologie (cf. figure 18). Ce taux est cependant sensiblement inférieur à la proportion de forages positifs obtenue lorsque le rapprochement est fait avec la lithologie (86%) uniquement sans toutefois faire référence de la résistivité de la cible soit 86% (cf. figure 20).
- Pour les schistes (7% de l'échantillon), la tranche [50 à 100 ohm.m] est celle d'intérêt. Le taux de succès associé est de 100%. Ce taux est supérieur à celui obtenu lorsque le rapprochement est fait avec la résistivité de la cible (58%) uniquement sans toutefois faire référence de la lithologie (cf. figure 18). Ce taux est également supérieur au taux estimé se basant sur la lithologie (43%) uniquement sans toutefois faire référence de la résistivité de la cible (cf. figure 20).

- Pour les roches vertes (14% de l'échantillon) la tranche [0 à 50 ohms.m [est celle d'intérêt. Le taux de succès associé est de 50%. Ce taux est supérieur à celui est estimé en fonction de la lithologie (43%) uniquement sans toutefois faire référence de la résistivité de la cible (cf. figure 20). Ce taux est cependant inférieur à celui obtenu en estimant la proportion de forages positifs en fonction de la résistivité de la cible (58%) uniquement sans toutefois faire référence de la lithologie 58% (cf. figure 18).

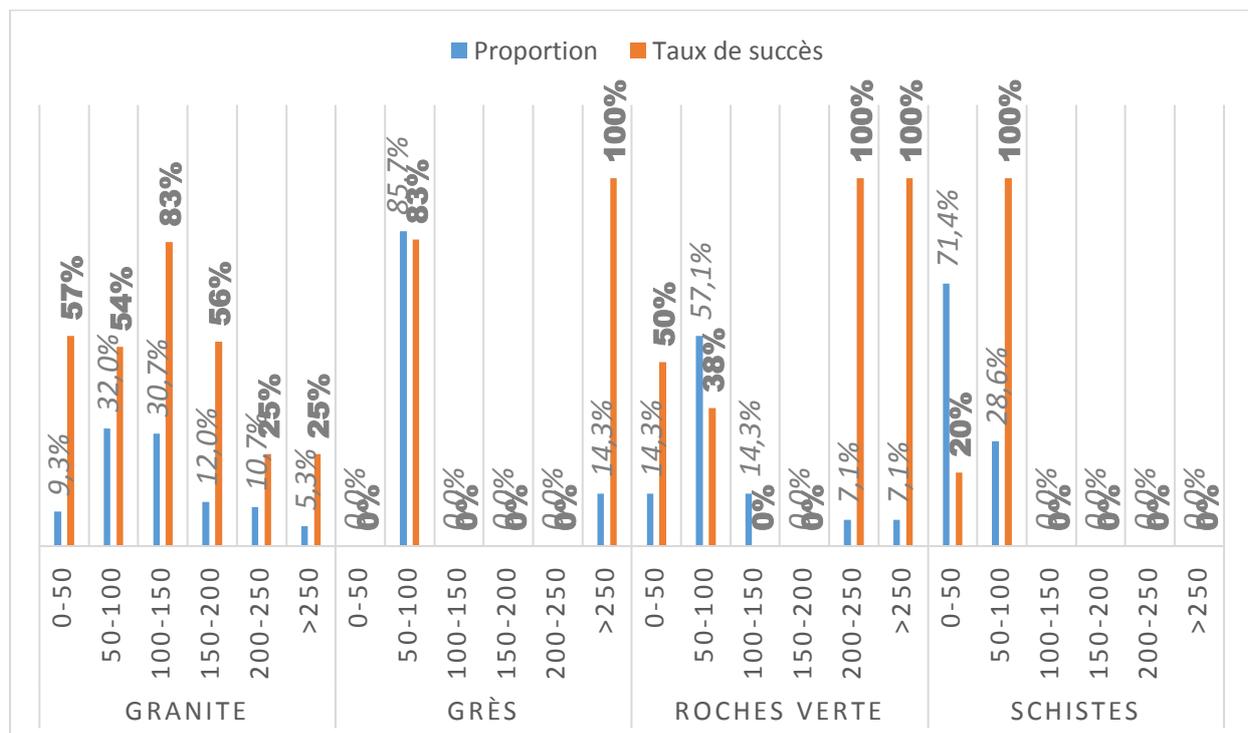


Figure 24 : Relation entre résistivité de la cible, lithologie et taux de succès

En général, il ressort de cette analyse que l'association de la résistivité de la cible à la géologie induit un meilleur taux de succès que lorsque ces paramètres sont pris séparément pour l'implantation d'un forage.

✚ Type de sondage, résistivité de la cible et taux de succès

L'analyse pour chacun des types de sondage du site d'étude de l'évolution du taux de succès en fonction de la résistivité de la cible (figure 25) révèle que :

- Le type de sondage FB est très prometteur lorsqu'il est rencontré sur anomalies présentant des résistivités [100 à 150 ohms.m]. La proportion de forages positifs est de 79%. Ce taux est supérieur au taux de succès lié au type de sondage (56%) uniquement sans toutefois faire référence de la résistivité de la cible (cf. figure 19). De même, ce taux de succès est supérieur à celui associé à la résistivité de la cible (76%) uniquement sans toutefois faire référence du type de sondage (cf. figure 18).

- Le type FCB est conseillé pour la tranche de résistivité [100 à 150 ohms.m]. Le taux de succès est de 75%. Ce taux est égal au taux de succès obtenu lorsque l'analyse est faite sur type de sondage (75%) uniquement sans toutefois faire référence de la résistivité de la cible (cf. figure 18). Ce taux est légèrement inférieur à celui obtenu de l'analyse des valeurs de résistivité de la cible (76%) uniquement sans toutefois faire référence du type de sondage (cf. figure 17).
- Le type CFB est conseillé dans la tranche de résistivité [100 à 150 ohms.m]. Le taux de succès correspondant est de 75%. Ce taux est supérieur à celui obtenu lorsque l'estimation du succès des forages en fait en fonction du type de sondage (54%) uniquement sans toutefois faire référence de la résistivité de la cible (cf. figure 19). Ce taux est légèrement inférieur à la proportion de forages positifs estimée en fonction de la résistivité de la cible (76%) uniquement sans toutefois faire référence du type de sondage (76%) (cf. figure 18).
- Les types de sondage RT et SB n'ont pas été pris en compte dans l'analyse du fait du nombre réduit de forages (respectivement un et quatre forages) présentant ces types de sondages.

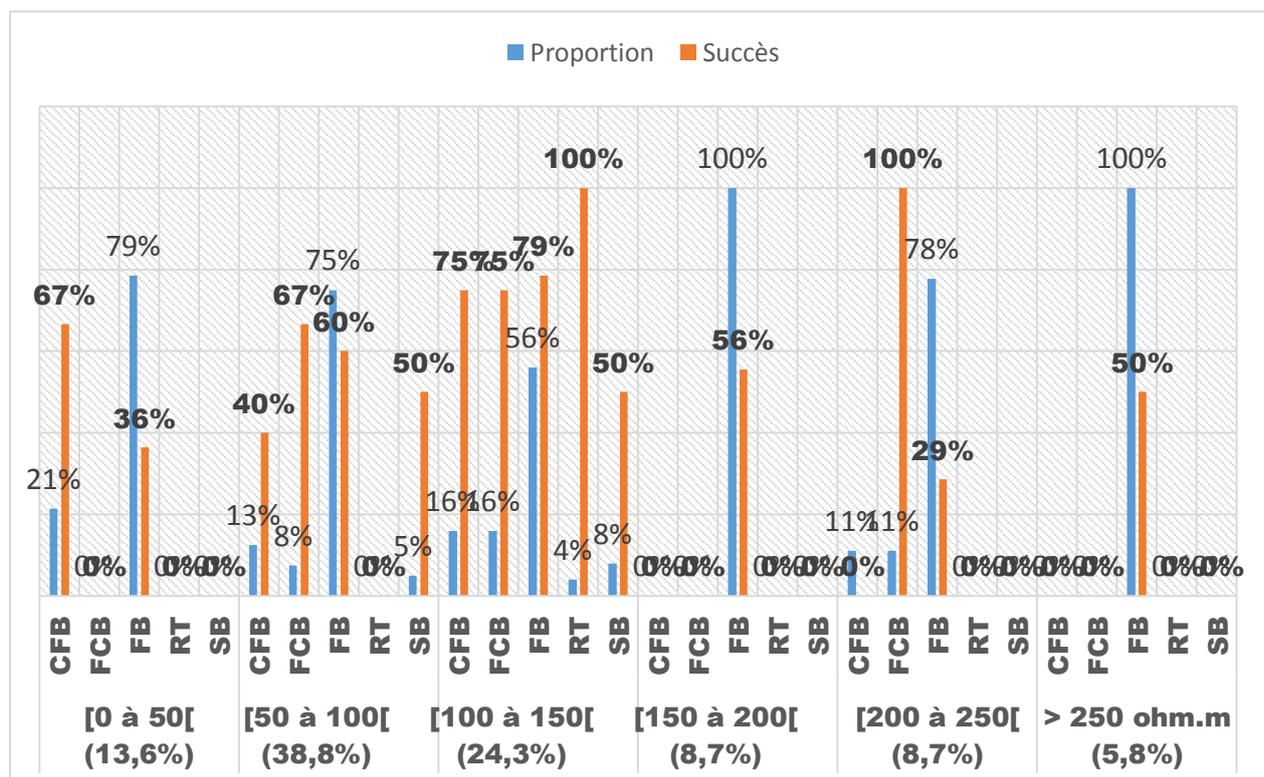


Figure 25 : Relation entre résistivité de la cible, type de sondage et taux de succès

En général, en ce qui concerne le succès des forages, on constate que l'association du type de sondage à la résistivité de la cible dans le choix du point à forer induit un meilleur taux de forages positifs que lorsque ces paramètres sont pris séparément dans l'implantation d'un forage.

Lithologie, type de sondage et taux de succès

L'analyse pour chacune des formations du site d'étude de l'évolution du taux de succès en fonction du type de sondage (figure 26) révèle que :

- Sur les forages en zone granitique (83% de l'échantillon) les points présentant un sondage de type FB sont les plus intéressants avec un taux de succès de 57%. Ce taux est inférieur à celui obtenu en estimant le succès des forages en fonction de la lithologie (59%) uniquement sans toutefois faire référence du type de sondage (cf. figure 20). Ce taux est cependant légèrement supérieur à celui obtenu en estimant le succès des forages en fonction du type de sondage (56%) uniquement sans toutefois faire référence de la lithologie (56%) (cf. figure 19).
- Pour les roches vertes, le sondage de type 'FB' est le plus rencontré. La proportion de forages positifs associée est de 44%. Ce taux est inférieur à celui obtenu lorsqu'on fait l'estimation du taux de succès des forages en fonction du type de sondage (56%) uniquement sans toutefois faire référence à la lithologie (cf. figure 19). Cependant, ce taux est légèrement supérieur à celui obtenu en estimant le succès des forages se basant sur la lithologie uniquement (43%) sans toutefois faire référence à la typologie du sondage (cf. figure 20).
- Pour les grès (7% de l'échantillon), le taux de succès est de 80% pour les sondages de type FB. Ce taux est inférieur à celui obtenu lorsque l'estimation du succès est faite selon la lithologie (86%) uniquement sans toutefois faire référence du type de sondage (cf. figure 20). Ce taux est égal à la proportion de forages positifs estimée en fonction du type de sondage (80%) uniquement sans toutefois faire référence de la lithologie (cf. figure 19).
- Pour les schistes (7% de l'échantillon), le sondage de type 'FB' est plus rencontré. Le taux de succès est de 33%. Ce taux est inférieur à celui obtenu lorsque le succès des forages est estimé selon la lithologie (43%) uniquement sans toutefois faire référence au type de sondage (cf. figure 20). Il est de même inférieur à la proportion de forages positifs obtenue en tenant compte du type de sondage (56%) uniquement sans toutefois faire référence à la lithologie (cf. figure 19).

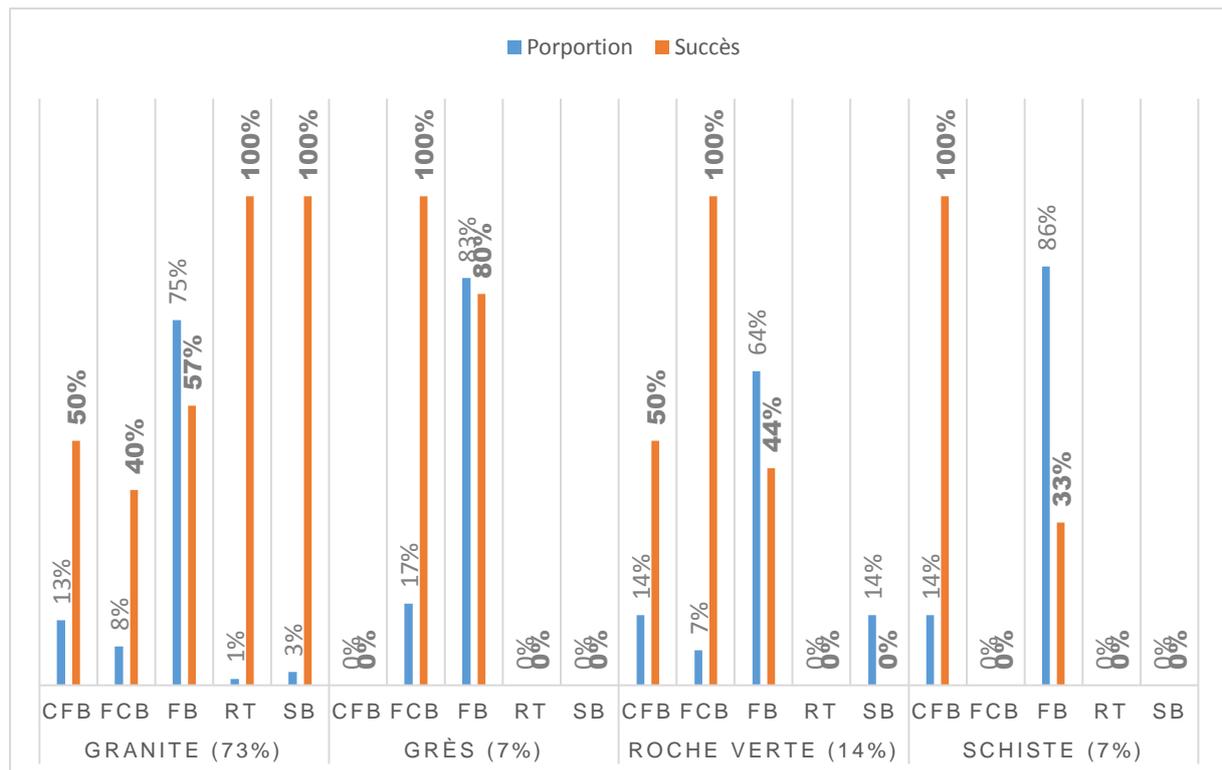


Figure 26 : Relation entre Type de sondage, lithologie et taux de succès

En général, il ressort pour le choix du point à forer que l'association de la géologie et du type de sondage induit un moins bon taux succès que lorsque ces paramètres sont pris séparément pour l'implantation des forages.

✚ Productivité et épaisseur d'altération

La figure 27 montre que dans notre zone d'étude la profondeur de premières venues d'eau situe entre [20 à 30m[lorsque altération évolue de [10 à 20m[et entre [30 à 50m[pour une frange d'altération allant de [20 à 40m[.

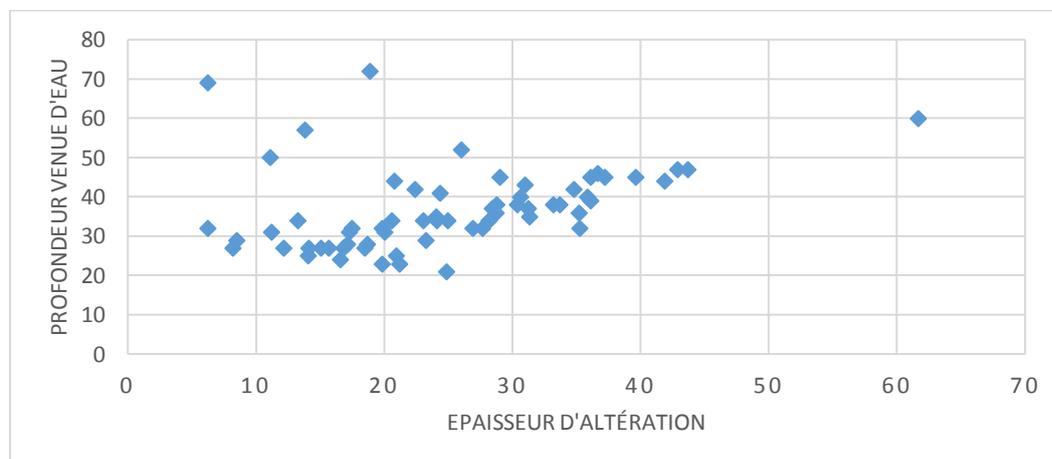


Figure 27 : Relation entre Profondeur des premières venues d'eau et épaisseur d'altération

La figure 28 nous indique que les forages ayant une altération évoluant de [10 à 20m] ont de fortes chances d'aboutir à gros débit c'est-à-dire de plus de 5m³/h. Par contre les franges altérées [20 à 30m] et [30 à 40m] sont intéressantes pour la recherche de débit compris entre 1 et 5 m³/h.

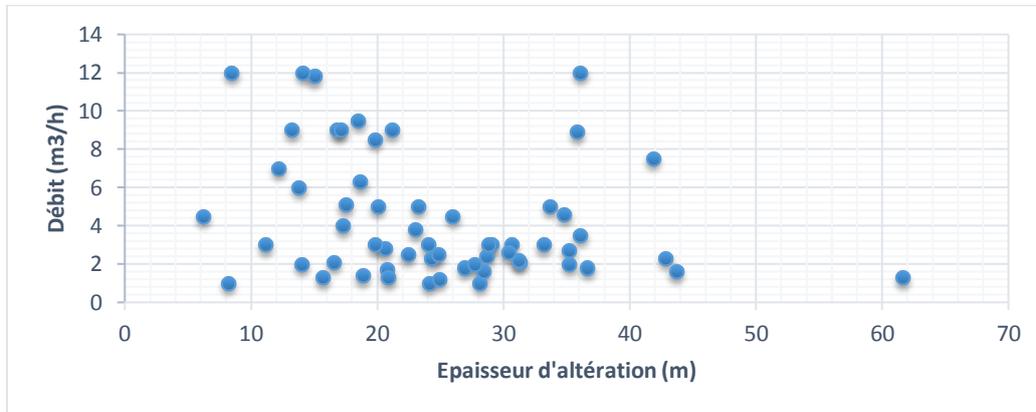


Figure 28 : Relation entre épaisseur d'altération et débit

Ces résultats appuient les corrélations mises en évidence (cf. Tableau II) entre géophysique et productivité.

Conclusion partielle

La prise en compte de la géomorphologie dans l'identification des points de forages est donc bénéfique comme le soulignaient Kafando et al. (2016). La tranche d'altitude [300-320 m] ayant une altération de [20-40m] ressort dans notre zone d'étude comme à privilégier lors l'implantation de forages. Des différentes simulations entre résistivité de la cible, type de sondage et géologie de l'aquifère il ressort qu'après la topographie du site on considèrera la géologie du site puis la résistivité de la cible et le type de sondage pour le choix du point à forer (Tableau III). À travers le sondage, le géophysicien estime l'épaisseur de l'altération qui de ces corrélations avec profondeur des venues d'eau, et débit (cf. Tableau II) est indicatrice sur la profondeur de venues d'eau (donc la profondeur de désespoir) et débit potentiel du futur forage.

Tableau III : Tableau récapitulatif général

ÉTAPE 1 : Géomorphologie et Succès					
Altitude préconisée			300-320 m		
ÉTAPE 2 : Géologie, Géophysique et Succès					
	Résistivité de la cible (ohms.m)		Type de sondage		Épaisseur d'altération
Granite	1er choix	100-150	1er choix	FB	Estimation de l'épaisseur d'altération par le géophysicien
			2ème choix	FCB ou CFB	
	2eme choix	50-100	1er choix	FB	
			2ème choix	FCB	
Grès	1er choix	50-100	1er choix	FB	
			2ème choix	FCB	
	2eme choix	>250	1er choix	FB	
			2ème choix	-	
Roches Verte	1er choix	0-50	1er choix	CFB	
			2ème choix	-	
	2eme choix	>200	1er choix	FCB	
			2ème choix	FB	
Schiste	1er choix	50-100	1er choix	FB	
			2ème choix	FCB	
	2eme choix	-	1er choix	-	
			2ème choix	-	
ÉTAPE 3 : Géophysique, Hydrogéologie et Succès					
Épaisseur d'altération		Venues d'eau		Débit (m3/h)	
10 à 20m		20 à 70m		>1	
20 à 30m		20 à 50m		1 à 5	
30 à 40m		30 à 40m		2 à 5	
40 à 50m		40 à 50m		1 à 3	

VI. CONCLUSION - PERSPECTIVES

Au terme de ce travail, il ressort des données étudiées que la province du Bazèga présente un taux d'échec relativement élevé (43%). Face à ce constat, notre étude dont l'objectif est l'accroissement du taux de succès des forages à travers la géophysique vient à point nommée.

Une tranche d'altitude et d'épaisseur altérée induisant un fort taux de succès a été mise en évidence. Aussi la géologie sera associée à la résistivité de la cible et cette dernière au type de sondage pour optimiser l'implantation des forages. Enfin, il ressort à travers les corrélations mises en évidence que l'épaisseur d'altération est indicatrice sur la profondeur des venues d'eau et le débit potentiel du forage.

Pour une implantation réussie de forage dans la province du Bazèga, un guide a été établi. Il prend en compte l'altitude de la zone, sa géologie, la résistivité de la cible, le type de sondage et l'épaisseur altérée.

Les difficultés rencontrées pour l'élaboration de ce travail sont la disponibilité des données en ce qui concerne l'implantation des forages, le faible archivage des données de forations. Il faut enfin préciser que le guide proposé plus haut n'a pas pu être testé sur le terrain.

VII. RECOMMANDATIONS

Comme recommandations, nous préconisons la prise en compte des critères favorables qui découlent de la géophysique pour l'implantation de futurs forages dans le Bazega (cf. Tableau III). Cependant, ces différentes étapes ne devraient pas se faire sans la phase préalable de reconnaissance de terrain et l'interprétation des images satellitaires pour l'identification d'indices favorables à la présence d'eau.

Une étude poussée et étendue sur la partie cristalline du Burkina (80% du territoire) pourrait donc faire ressortir des résultats d'une grande utilité en ce qui concerne la foration avec la méthode électrique traditionnelle ou 1D qui est la plus utilisée par les bailleurs de fonds et les entreprises du fait de sa rentabilité (faible coût).

VIII. BIBLIOGRAPHIE

Armond, C., Le Gac, H., & Sourisseau, B. (1983). *Hydraulique villageoise dans l'ORD du Sahel. Haute Volta. Deuxième phase. Rapport final* (BRGM). BRGM. Consulté à l'adresse http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/

Böckh, E., Grisseman, C., Siebenhuner, M., & Kolodziey, A. (1989). *Contribution à la méthodologie de prospection des eaux souterraines sur le Bouclier Cristallin d'Afrique de l'Ouest. Études hydrogéologiques et géophysiques au Burkina Faso. (Janvier-Avril 1987* (CIEH BGR). Afrique: CIEH BGR.

Diabaté, A.-L. (2013). *Caractérisation des paramètres géophysiques en relation avec la productivité de la cible hydrogéologique dans la Boucle du Mouhoun au Burkina Faso.* (Mémoire de Master). 2iE, Ouagadougou. Consulté à l'adresse http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/

Diouf, S. (1999). *Hydrogéologie en zone de socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental : Application de la méthode électrique 1D et 2D à la localisation et à la caractérisation des aquifères du Batholite de Saraya et ses environs.* (Thèse). UCAD, Sénégal. Adresse consultée Bibliothèque IRD.

Engalenc, M. (1978). *Méthodologie d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines en Afrique de l'Ouest* (CIEH). Afrique: CIEH. Consulté à l'adresse http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/

Houin, G. A. (1990). *Hydrogéologie de la Province du Bazega* (Mémoire de Master). UO, Ouagadougou.

Kafando, S. (2014). *Amélioration des connaissances des ressources en eau souterraine au Burkina Faso : cas de la carte hydrogéologique de la région du sahel* (Mémoire de Master). UO, Ouagadougou.

Kafando, S., Nakolendousse, S., Nikièma, J., Koussoubé, I., Yaméogo, S., Compaoré, Y., & Milogo, C. (2016). Géomorphologie et productivité des aquifères en milieu de socle cristallin : cas de la région du centre du Burkina Faso. *Presses Universitaires de Ouagadougou*, 012, 46-74.

Karama, I. W. (2012). *Proposition d'un aménagement hydroagricole à l'aval du barrage de Ipelcé (Province du Bazega)* (Mémoire de Master). 2iE, Ouagadougou. Consulté à l'adresse http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/

Koita, M., Yonli, H. F., & Nikièma, D. G. C. (2016). Optimising the Interpretation of Sub-surface Resistivity in relation with Borehole Productivity in Basement Area Applied to Seno Province (Burkina Faso). *Journal of Environmental Science and Engineering*, (B5), 560-583.

Konkobo, T. C. (2006). *Apport des méthodes de prospection géophysique électrique l'amélioration du taux de succès de réalisation des forages d'eau dans deux types de formations géologiques du socle paléoproterozoïde du Burkina Faso : les schistes et les granites.* (Mémoire de Master). 2iE, Ouagadougou. Consulté à l'adresse http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/

Mandeng Nyobe, B. A. (2012). *Détermination de la productivité des aquifères en zone de socle à l'aide des méthodes géophysiques : Cas de la Province du Passoré au Burkina Faso* (Mémoire de Master). 2iE, Ouagadougou. Consulté à l'adresse http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/

Ministère de l'environnement et de l'eau. (2001). *État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion.* Ouagadougou: Ministère de l'environnement et de l'eau. Consulté à l'adresse www.peabf.org/domaine_428/pdf/burkina_gire_etat_des_lieux.pdf

Nakolendousse, S. (1991). *Méthodes d'évaluation de la productivité des sites d'aquifères au Burkina Faso Géologie-Géophysique-Téledétection* (Thèse). UJF-Grenoble I, France.

Nikièma, D. G. C. (2012). *Essai d'optimisation de l'implantation géophysique des forages en zone de socle : cas de la province de Séno, Nord Est du Burkina Faso.* (Mémoire de Master). 2iE, Ouagadougou. Consulté à l'adresse http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/

Ntsiedewo Metseye, V. (2012). *Caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : Cas de la province du Bazega* (Mémoire de Master). 2iE, Ouagadougou. Consulté à l'adresse http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/

Savadogo, A. N. (1984). *Géologie et hydrogéologie des roches cristallines en Haute-Valta. Études régionales du bassin versant de la Sissili* (Thèse). Université de Grenoble, France.

Toussou, S. A. G. (2009). *Contribution à l'amélioration du taux de succès des forages en zones difficiles : Cas du département des collines au Bénin*. (Mémoire de Master). 2iE, Ouagadougou. Consulté à l'adresse http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/

Van Der Stricht, M. (1988). Bulletin de liaison du CIEH. Étude statistique sur l'implantation photo-interprétation et géophysique de 875 forages en zone granitique et volcanosedimentaire. *Octobre 1988 - janvier 1989, n°74-75, 58.*

IX. ANNEXES

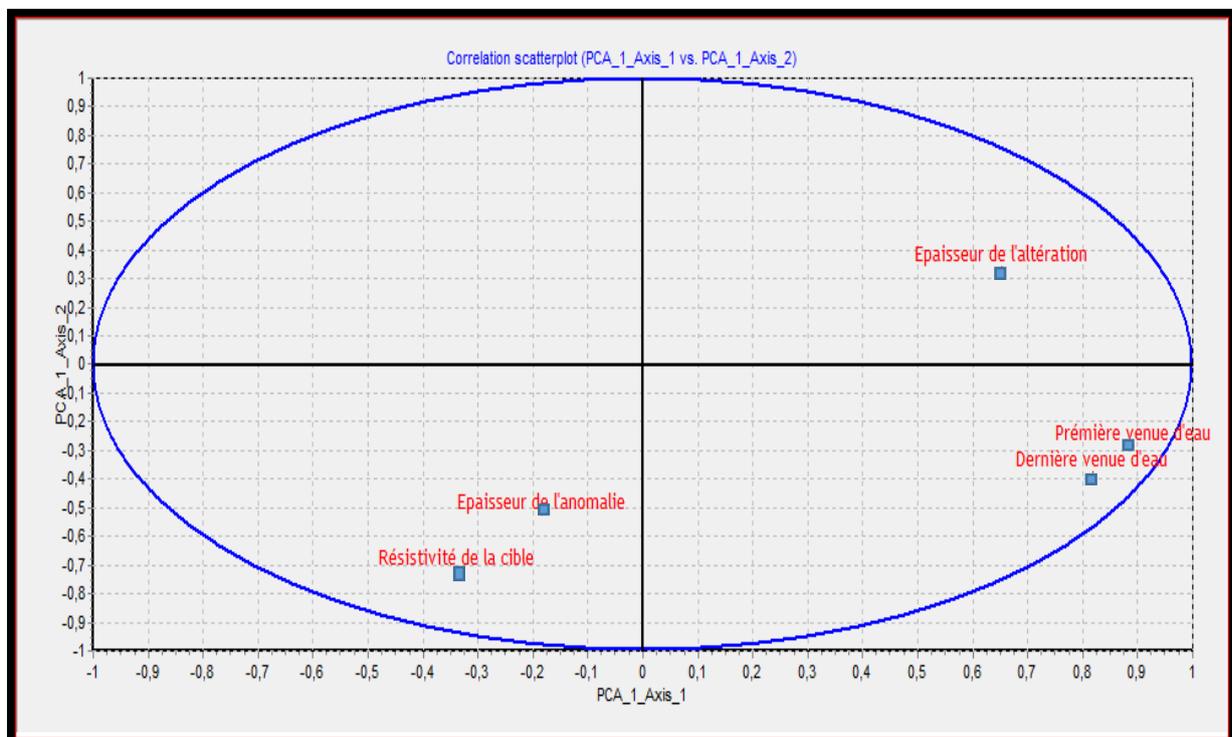
Annexe 1 : Représentation des variables des forages positifs dans le cercle de corrélation	43
Annexe 2 : Base de données	44

Annexe 1 : Représentation des variables des forages positifs dans le cercle de corrélation

Le tableau ci-après fait ressortir la corrélation des différents paramètres en fonction des axes.

Attribut	Axis_1		Axis_2		Axis_3		Axis_4	
	Corr.	% (Tot. %)						
Première venue d'eau	0,869	75 % (75 %)	0,242	6 % (81 %)	-0,211	4 % (86 %)	0,153	2 % (88 %)
Dernière venue d'eau	0,792	63 % (63 %)	0,325	11 % (73 %)	-0,280	8 % (81 %)	0,235	6 % (87 %)
Épaisseur de l'altération	0,658	43 % (43 %)	-0,337	11 % (55 %)	0,249	6 % (61 %)	-0,068	0 % (61 %)
Débit	-0,540	29 % (29 %)	-0,116	1 % (31 %)	-0,433	19 % (49 %)	0,644	41 % (91 %)
Résistivité la cible	-0,321	10 % (10 %)	0,714	51 % (61 %)	-0,326	11 % (72 %)	-0,389	15 % (87 %)
Épaisseur de l'anomalie	-0,137	2 % (2 %)	0,575	33 % (35 %)	0,710	50 % (85 %)	0,377	14 % (100 %)
Var. Expl.	2,229	37 % (37 %)	1,131	19 % (56 %)	0,983	16 % (72 %)	0,792	13 % (86 %)

Le cercle de communauté ci-dessous fait ressortir le regroupement (corrélations) des paramètres en fonction des axes 1 et 2.



Annexe 2 : Base de données

Départements	Longitude (°)	Latitude (°)	Direction du profil (°)	Type d'anomalie	Forme d'anomalie	Épaisseur de l'anomalie (m)	Résistivité de la cible (ohms.m)	Type de sonde	Côte du forage (m)	EA réelle (m)	EA par le géophysicien (m)	Réestimation de EA (m)	EF (m)	Première VE (m)	Dernière venue d'eau (m)	Profondeur forée (m)	lithologie	Débit (m3/h)
Doulouou	-1,326	12,144	0	C	K	90	36	FB	311	11,11	8	10	24	-	-	75,00	Schiste	-
Doulouou	-1,326	12,145	0	C	K	70	78	FB	308	11,11	8	7	30	-	-	70	Granite	-
Doulouou	-1,374	12,087	173	CCL	K	70	81	FB	310	18	10	11	17	-	-	54,70	Granite	-
Doulouou	-1,512	11,862	28	CCL	K	80	101	FB	319	44,15	30	25	10	-	-	64,95	Granite	-
Doulouou	-1,374	12,086	173	CCL	U	70	101	SB	314	19,85	17	10	19	23	29	49,85	Granite	8,51
Doulouou	-1,487	11,851	214	PC	K	60	103	FB	306	28,4	20	17	10	37	39	59,90	Granite	1,6
Doulouou	-1,469	11,971	237	CCL	U	80	104	CFB	319	23,25	20	12	16	29	44	49,90	Granite	5
Doulouou	-1,511	11,863	28	CCE	K	50	106	FCB	320	31,33	32	20	15	35	35	55,98	Granite	2,1
Doulouou	-1,47	11,973	165	PC	K	60	107	FCB	321	34,05	35	33	16	-	-	59,85	Granite	-
Doulouou	-1,398	12,055	91	PC	K	70	200	FB	321	19,6	7	5	13	-	-	64,9	Granite	-
Doulouou	-1,397	12,055	91	CCE	U	40	204	FB	324	23,2	5	12	11	-	-	59,85	Granite	-
Doulouou	-1,512	11,865	238	CCL	W	100	240	FB	321	19,75	25	12	10	-	-	59,90	Granite	-
Doulouou	-1,513	11,849	322	CCL	W	60	299	FB	323	24,1	26	20	16	-	-	59,90	Granite	-
Gaongo	-1,066	12,118	270	CCL	W	140	65	FB	273	6,24	5	8	50,3	32	48	53,30	Schiste	4,5
Gaongo	-1,066	12,014	340	CCL	K	70	66	FB	291	3,07	14	16	62	-	-	70	Roche verte	-
Gaongo	-1,066	12,015	340	CCL	K	60	70	FB	292	6,23	8	10	73	69	69	79	Roche verte	-
Gaongo	-1,06	12,051	110	CCL	U	100	71	SB	276	18,2	16	12	47	-	-	65,00	Roche verte	-
Gaongo	-1,233	12,044	120	CCL	W	80	72	FB	282	15,69	14	21	20	27	27	50,26	Granite	1,3

Gaongo	-1,061	12,051	110	CCL	K	80	105	SB	276	6,98	10	10	26	-	-	60,00	Roche verte	-
Gaongo	-1,201	11,955	87	C	C	70	115	FB	306	23,48	13	8	10	-	-	75,00	Granite	-
Gaongo	-1,201	11,954	166	PC	K	80	160	FB	306	16,56	13	12	23	24	33	50,7	Granite	2,1
Gaongo	-1,142	12,107	100	CCL	W	180	350	FB	276	13,26	10	14	43,56	34	34	56,45	Grès	9
Gaongo	-1,018	12,063	30	C	C	60	350	FB	256	11,18	11	15	35	31	46	65,00	Roche verte	3
Gaongo	-1,181	12,061	0	CCL	U	70	500	FB	287	17,48	30	14	39,3	32	32	56,30	Granite	5,1
Ipelcé	-1,611	11,873	234	CCL	K	80	53	FB	308	35,2	20	28	10	36	36	60,00	Granite	2,72
Ipelcé	-1,551	11,945	140	CCL	U	70	130	RT	334	61,65	50	40	13	60	65	84,95	Granite	1,3
Kayao	-2,033	12	1	CCL	K	80	21	FB	326	33,21	32	20	28,88	38	38	61,88	Granite	3
Kayao	-1,92	12,124	303	CCL	K	100	26	FB	315	33,78	22	10	27	-	-	70	Granite	-
Kayao	-2,036	12,009	211	CCL	K	150	26	FB	320	30,28	30	25	30	-	-	70,00	Schiste	-
Kayao	-2,032	12	265	CCE	K	30	30	FB	326	23,43	30	20	33	-	-	70	Schiste	-
Kayao	-2,032	12,013	24	CCL	H	60	42	CFB	327	31,23	31	22	25,25	37	37	31,23	Schiste	2,2
Kayao	-2,036	12,01	211	CCL	K	70	42	FB	323	36,23	30	24	39	-	-	75	Schiste	-
Kayao	-1,729	12,065	170	CCL	K	60	46	FB	311	35,83	32	25	15	40	40	55,96	Granite	8,9
Kayao	-1,92	12,125	303	CCL	K	60	48	FB	313	19,09	21	8	9	-	-	70	Granite	-
Kayao	-1,82	12,067	276	CCE	K	50	62	FCB	314	30,65	30	23	30,62	40	53	63,62	Grès	3
Kayao	-1,763	12,105	310	CCL	U	80	64	FB	318	36,1	36	27	26	45	45	61,95	Granite	12
Kayao	-2,05	11,998	97	CCL	W	120	68	CFB	333	28,73	30	18	29	36	36	61,88	Granite	2,4
Kayao	-1,928	11,96	104	PC	K	50	74	FB	310	18,89	15	20	41	72	72	77,41	Granite	1,4
Kayao	-1,876	12,068	338	CCE	W	50	82	CFB	313	41,86	31	35	10	44	47	55,83	Granite	7,5

Kayao	-1,729	12,065	170	CCE	K	50	84	FB	313	31	20	27	29	43	63	80	Granite	-
Kayao	-1,699	12,044	181	PC	U	80	100	CFB	310	42,89	40	25	8	47	50	61,95	Granite	2,3
Kayao	-1,731	11,963	38	CCL	K	80	104	FCB	310	29,05	30	22	40,6	45	60	67,6	Granite	3
Kayao	-1,892	11,972	322	CCL	K	70	160	FB	307	36,65	35	25	16	46	46	61,9	Granite	1,8
Kayao	-1,882	11,964	153	CCL	U	80	160	FB	308	19,85	12	10	25	32	32	56,40	Granite	3
Kombissiri	-1,252	12,111	72	CCL	U	60	33	FB	290	22,95	22	11	47	-	-	70	Roche verte	-
Kombissiri	-1,236	12,109	205	CCL	U	90	35	CFB	291	11,12	18	18	38	50	50	67,12	Granite	-
Kombissiri	-1,236	12,1	85	PC	U	40	46	CFB	287	23,05	24	23	29,46	34	50	52,46	Roche verte	3,8
Kombissiri	-1,267	12,068	2	CCL	K	60	57	FB	298	4,58	10	13	46	-	-	70	Roche verte	-
Kombissiri	-1,252	12,111	162	PC	U	80	58	FB	290	20,79	18	23	52,25	44	60	73,25	Granite	1,7
Kombissiri	-1,235	12,11	205	CCL	U	80	62	CFB	294	14,5	24	30	20	-	-	70,00	Granite	-
Kombissiri	-1,268	12,068	2	CCE	K	50	62	CFB	299	7	11	12	51	-	-	70,00	Roche verte	-
Kombissiri	-1,277	12,033	332	CCL	K	90	80	FB	290	14,11	12	12	33	27	37	50,65	Granite	12
Kombissiri	-1,45	11,904	95	PC	V	70	90	FB	314	43,68	40	35	21	47	47	67,55	Grès	1,6
Kombissiri	-1,245	12,052	42	CCL	K	70	100	FB	284	24,13	14	13	26	34	50	56,25	Granite	1
Kombissiri	-1,409	11,845	262	CCL	K	80	105	FB	312	26,03	25	19	52,85	52	69	78,9	Granite	4,5
Kombissiri	-1,405	11,932	241	CCL	K	80	105	FB	318	20,6	15	22	42	34	48	62	Granite	2,8
Kombissiri	-1,317	11,962	81	PC	C	40	105	FB	323	17,3	12	30	33	31	31	61,52	Granite	4
Kombissiri	-1,389	11,915	165	PC	K	50	130	FB	314	22,42	15	18	40	42	54	62,05	Granite	2,5
Kombissiri	-1,457	11,847	97	PC	U	60	140	FB	297	17,13	17	13	33,8	28	28	50,8	Granite	9
Kombissiri	-1,302	12,031	278	CCL	U	70	140	FCB	297	16,83	20	21	29	27	38	56,3	Granite	9
Kombissiri	-1,446	11,831	153	CCL	K	70	150	FB	295	18,81	12	10	41	-	-	60	Granite	-

Kombissiri	-1,445	11,831	234	CCL	U	80	160	FB	294	22,55	12	11	34	-	-	70	Granite	-
Kombissiri	-1,429	11,834	354	CCL	W	70	170	FB	303	19,98	16	12	25	-	-	70	Granite	-
Kombissiri	-1,421	11,83	256	CCE	W	50	200	FB	306	24,94	16	10	20	34	34	56,35	Granite	1,2
Kombissiri	-1,425	11,918	59	PC	V	30	200	FCB	317	21,17	26	14	19	23	30	56,25	Granite	9
Kombissiri	-1,42	11,83	256	CCE	V	50	220	FB	306	17,92	7	7	9	-	-	60	Granite	-
Kombissiri	-1,43	11,833	301	CCL	U	90	240	CFB	302	17,81	14	12	27	-	-	60	Granite	-
Saponé	-1,527	12,181	181	CCL	K	180	34	FB	312	35,25	30	10	14	32	32	59,8	Granite	2
Saponé	-1,505	12,098	180	CCL	U	60	38	FB	315	24,85	10	10	19	21	33	49,85	Granite	2,5
Saponé	-1,455	12,159	23	CCL	U	90	51	FB	307	19,67	15	10	51	-	-	70,00	Granite	-
Saponé	-1,468	12,043	165	C	K	50	52	FB	332	37,2	17	12	19	45	52	67,56	Granite	-
Saponé	-1,608	12,045	196	CCL	H	80	56	FB	345	14,05	14	20	20	25	25	49,85	Granite	2
Saponé	-1,632	11,929	177	CCL	U	70	60	FB	310	36,1	36	25	18	39	39	60	Granite	3,5
Saponé	-1,516	12,026	222	CCL	U	120	65	FB	334	29,8	20	15	15	-	-	64,90	Granite	-
Saponé	-1,518	12,026	119	CCL	U	60	71	CFB	334	32,65	30	12	6	-	-	59,95	Granite	-
Saponé	-1,636	12,028	55	CCL	W	60	72	FB	332	24,05	22	15	8	-	-	64,85	Granite	-
Saponé	-1,477	12,133	167	CCL	V	60	72	FB	312	27,68	30	10	9	32	32	52,41	Roche verte	2
Saponé	-1,634	12,03	55	CCE	W	50	75	FCB	333	21,1	21	20	11	-	-	64,85	Granite	-
Saponé	-1,454	12,158	75	CCL	K	60	80	FB	307	19,67	15	30	21	-	-	70	Granite	-
Saponé	-1,471	12,042	250	CCL	U	80	104	CFB	337	39,6	40	40	16	45	50	64,90	Granite	-
Saponé	-1,604	12,042	226	CCL	U	70	220	FB	342	9,9	10	10	17	-	-	59,85	Granite	-
Toécé	-1,303	11,817	35	CCL	K	60	50	FB	303	25,92	26	20	19	-	-	70	Grès	-

Toécé	-1,201	11,939	211	PC	C	50	60	FB	297	8,48	11	17	38,84	29	34	46,84	Grès	12
Toécé	-1,355	11,868	35	CCL	U	70	60	FB	319	34,82	18	10	31,28	42	47	66,28	Grès	4,6
Toécé	-1,303	11,816	35	CCL	H	80	62	FB	304	18,69	25	9	14	28	28	48,29	Schiste	6,3
Toécé	-1,244	11,936	35	CCL	K	60	67	FCB	306	18,5	22	24	27	27	27	56,25	Roche verte	9,5
Toécé	-1,372	11,839	301	CCL	K	60	70	SB	323	15,05	14	11	41,3	27	38	56,30	Granite	11,81
Toécé	-1,324	11,801	126	PC	K	80	70	FB	302	30,4	36	21	20,52	38	38	50,52	Roche verte	2,6
Toécé	-1,26	11,88	40	CCL	U	80	81	FB	319	28,17	20	18	12	34	40	56,30	Granite	1
Toécé	-1,343	11,844	147	CCL	V	60	90	FB	313	20,03	25	28	36,15	31	56	56,15	Grès	5
Toécé	-1,386	11,799	261	CCL	U	80	96	FB	322	26,94	21	23	23	32	42	56,25	Granite	1,8
Toécé	-1,391	11,818	163	CCL	V	80	100	FB	323	33,71	36	32	39	38	57	62,00	Granite	5
Toécé	-1,311	11,806	7	PC	H	80	104	FB	301	20,92	15	10	29,52	25	44	50,52	Granite	1,3
Toécé	-1,367	11,825	276	CCL	W	140	110	CFB	316	28,79	14	15	31,05	38	46	62,05	Granite	3
Toécé	-1,238	11,886	329	CCL	W	80	120	FB	314	18,28	20	26	32	-	-	70	Roche verte	-
Toécé	-1,213	11,921	248	CCL	W	80	130	FB	294	12,17	10	11	43	27	53	61,96	Granite	7
Toécé	-1,323	11,72	40	CCE	U	50	140	FB	305	24,35	20	22	42,61	41	46	66,61	Granite	2,3
Toécé	-1,403	11,82	187	CCL	K	160	150	FB	315	24,08	27	23	27,35	35	56	56,35	Granite	3
Toécé	-1,309	11,809	93	PC	U	80	155	FB	301	21,55	11	11	25	-	-	60	Granite	-
Toécé	-1,245	11,87	189	CCL	U	100	165	FB	325	8,21	7	20	32	27	27	56,3	Granite	1
Toécé	-1,234	11,886	250	CCL	K	80	210	FB	316	13,82	8	7	44	57	57	61,95	Roche verte	6
Toécé	-1,34	11,822	19	CCL	V	60	260	FB	309	12,56	14	8	31	-	-	60	Granite	-
Toécé	-1,34	11,821	19	CCL	K	80	350	FB	308	17,45	35	12	22	-	-	60	Granite	-

