



CARACTERISATION DES INTERACTIONS ENTRE LES EAUX DE SURFACE ET LA NAPPE SUPERFICIELLE : CAS DE LA RETENUE DE BOURA AU BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN INGENIERIE DE
L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES

Présenté et soutenu publiquement le [25 juin 2014] par

Yaya KONE

Travaux dirigés par : **Dr. Mahamadou KOITA**

Enseignant-chercheur CCREC/LEAH

M. Tazen FOWE

CCREC/LEAH

Jury d'évaluation du stage :

Président : Prénom NOM

Membres et correcteurs : Prénom NOM

Prénom NOM

Prénom NOM

Promotion [2013/2014]



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Fondation 2iE - Rue de la Science - 01 BP 594 - Ouagadougou 01 - BURKINA FASO – IFU 00007748B

Tél. : (+226) 50. 49. 28. 00 - Fax : (+226) 50. 49. 28. 01 - Mail : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

DEDICACE

Je dédie ce travail de recherche

Aux grandes familles KONE et TOURE,

A Mon Père pour ses conseils,

A Ma Mère pour ses prières, ses bénédictions et ses encouragements,

A Mon oncle Moussa KONE pour son soutien incessant et ses conseils,

A Mes frères et mes sœurs qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

A mes amis Tcharnon CISSE, Adama COULIBALY et
Kiyacolotioloman COULIBALY ; merci pour leur soutien et leur
disponibilité

Mes camarades de promotion d'infrastructures et réseaux hydrauliques

REMERCIEMENTS

Avant d'exposer les résultats de mes travaux, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont cru en moi et qui m'ont apporté une aide précieuse pour l'établissement de ce document.

Je voudrais tout d'abord remercier M. Mahamadou KOITA pour son encadrement et sa contribution à ma formation académique.

Je remercie M. Tazen FOWE pour son encadrement et sa disponibilité permanente (par mail, par téléphone et surtout physiquement) pour l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements à M. Youssouf KOUSSOUBE qui n'a ménagé aucun effort pour m'apporter une assistance dans la compréhension de la télédétection.

J'adresse également mes sincères remerciements à Dimitri SORO, doctorant à 2iE en Cotutelle avec l'Université de Paris 6. Merci grand frère SORO de m'avoir soutenu et guidé pour la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier les enseignants et les étudiants du 2iE pour leur disponibilité, la qualité de la formation, la compréhension.

Je remercie ma famille, mes collègues étudiants, mes amis pour leurs prières et soutien inconditionnel.

Je remercie tous les partenaires financiers à travers le projet CPWF

Que tous trouvent ici la marque de ma gratitude.

RESUME

L'étude a porté sur le bassin versant de la retenue de Boura situé au Sud du Burkina Faso. La caractérisation des interactions entre la nappe phréatique et la retenue a été étudiée en procédant par plusieurs étapes. Tout d'abord, l'analyse des données géologiques, hydrogéologiques et climatiques a montré que le bassin reposait sur un socle granitique et que le niveau statique dans les ouvrages autour de la retenue variait entre 6 m et 8 m. En outre, la pluviométrie moyenne annuelle était de 914 mm pour la dernière décennie. Ensuite grâce aux différents traitements appliqués sur les images Landsat, des fractures pouvant être des lieux préférentiels d'écoulement d'eau souterraine, ont été identifiées. Enfin, les campagnes piézométriques ont montré que la cote du plan d'eau, à 279 m, était supérieure à celle des forages et puits ; donc la nappe serait alimentée par le lac.

L'application des méthodes géophysiques notamment la tomographie de résistivité électrique a été pratique et très efficace dans la validation de la carte des linéaments et la caractérisation du front d'humidité autour de la retenue. En effet, l'analyse des résultats de la géophysique a confirmé certaines fractures et en a relevé d'autre. Elle a également relevé des zones très conductrices en aval de la digue et autour de la retenue, et a permis d'établir une carte d'évolution de l'humidité. En outre la succession lithologique observée pourrait conduire à des fuites latérales a travers les formations géologiques. Enfin, la simulation numérique a été réalisée en régime permanent, à partir du modèle conceptuel tri-couche, en se basant sur les données climatiques et piézométriques d'avril 2014. Le modèle d'écoulement souterrain a été calé, en jouant sur les valeurs de recharge et de conductivité hydraulique ainsi que sur les conditions limites. Le bilan du modèle souterrain indique volume global de 14170 m³/jour qui sort de la retenue.

Mots clés : Boura, caractérisation, interaction, nappe, granitique, piézométrie, géophysique, conductivité hydraulique, lithologie, modèle, simulation.

ABSTRACT

The present study focused on the catchment area of the Boura impoundment, located in the South of Burkina Faso. The characterization of the interactions between the water table and the impoundment has been studied proceeding in stages. First the analyse of geological, hydrogeological and climatic data showed that the area stood on a granitic bedrock and that the water table in the hydraulic works varied from 6 m to 8 m. Furthermore, the mean annual rainfall was 914 mm for the last decade. Then, thanks to the different treatments applied to Landsat images, some fractures that are likely to be preferential areas for ground water flows were identified. Eventually piezometric campaign highlighted that the height of the water site, at 279 m, was above these of the boreholes and wells.

The implementation of a geophysical campaign has been useful and efficient for the validation of the lineaments map and the characterization of the humidity front. Indeed the results of geophysical analysis confirmed some fractures and revealed some new ones. It also revealed very conductive areas downstream the dam and on the banks, and allowed to generate a map of humidity evolution. Moreover the lithological structure that has been observed could result in lateral leakages trough the geological formations. The daily numerical simulation has been done in steady state, from the three-layers conceptual model, using the climatic and piezometric data collected in April 2014. The ground-water model has been implemented, adjusting recharge rates, hydraulic conductivities and border conditions. The daily water losses through the Boura reservoir are estimated about 14170 m³ from the water balance.

Key words: characterization, interaction, groundwater , granite , piezometry, geophysical conductivity hydraulic, lithology, model, simulation.

SIGLES ET ABREVIATIONS

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

CPWF : Challenge Program on Water and Food

DGRE : Direction Générale des Ressources en Eau

GEOFOR : Entreprise Internationale de Foration

GPS : Global Positioning System

IDL : Interactive Data Language

TM: Thematic Mapper

TRE : Tomographie de Résistivité Electrique

WA : wenner α

WB : wenner β

Table des matières

Liste des tableaux	3
Liste des figures	4
Introduction	6
Chapitre 1 : REVUE DE LA LITTEATURE	8
I. Présentation de la zone d'étude	8
I.1- Situation géographique de Boura	8
I.2- Historique du barrage de Boura	9
I.3- Milieu physique et naturel	9
I.4- Contexte climatique	10
I.5- Contexte géologie et hydrogéologique	12
II. Etat de l'art sur les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines...	15
Chapitre 2 : MATERIEL ET METHODES	16
I. Matériel	16
I.1- Données utilisées	16
I.2- Equipement hydrogéologique et géophysique	16
I.3- Outils informatiques.....	17
II. Méthodes	17
II.1- Cartographie des linéaments	17
II.2- Caractérisation du front d'humidité	21
II.3- Fluctuation piézométrique autour de la retenue.	25
II.4- Modélisation numérique des écoulements	27
Autres paramètres d'entrées	33
Chapitre 3 : RESULTATS	34
I. Carte des linéaments.....	34
I.1- Résultat des différents traitements	34
	0

I.2-	Validation de la carte des linéaments.....	35
II.	Description du sous-sol et identification des fractures	37
III.	Evolution de l’humidité	38
III.1-	Prospection en aval de la digue	38
III.2-	Prospection sur la rive droite.....	40
III.1-	Prospection sur la rive gauche.....	42
IV.	Piézométrie du bassin versant.....	45
IV.1-	Variation du niveau d’eau	45
IV.2-	Dynamique de l’écoulement.....	46
V.	Bilan de masse	48
Chapitre 4 : ANALYSES ET DISCUSSION.....		51
I.	Carte des linéaments.....	51
II.	Piézométrie	51
III.	Sections 2D des panneaux électriques.....	52
III.1-	Structure du sous-sol et identification des fractures.....	52
III.2-	Détection de fuites et évolution de l’humidité	53
IV.	Modélisation	54
Conclusion générale et recommandation		55
Conclusion.....		55
Recommandation.....		55
Bibliographie.....		57
ANNEXES		59
Annexe1 : Fiche synoptique du barrage de Boura		60
Annexe 2 : Evaporation a la station de Boura en 2013		61
Annexe 3 : Caractéristique des images satellitaires		62
Annexe 4 : Carte photo-géologique 1968		63

Annexe 5 : Fiche de forage	64
Annexe 5 : Distance entre linéament et forages	65
Annexe 7 : Essai de pompage courte durée.....	66
Annexe 8 : Données de forage	67
Annexe 9 : Données de forage	69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques physiques du bassin versant de la retenue de Boura... 9	9
Tableau 2: Caractéristique des profils électriques..... 23	23
Tableau 3 : Organigramme résumant les étapes des traitements des données géophysiques .. 24	24
Tableau 4 : Résistivités des eaux et des roches 25	25
Tableau 5: Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique dans divers sol 30	30
Tableau 6: Valeurs prépondérantes de résistivité sur les figures 16 et 17 44	44
Tableau 7 : Valeurs de conductivités hydrauliques retenues 49	49
Tableau 8: Bilan journalier des échanges entre l'eau de surface et l'eau souterraine 50	50

Liste des figures

Figure 1: Localisation géographique du barrage de Boura et de son bassin versant	8
Figure 2: Evolution de l'indice pluviométrique annuel à Boura sur la période 1990-2010.....	11
Figure 3: Variation de la pluviométrie moyenne mensuelle de la station de Boura (2012-2013)	11
Figure 4: Carte géologique de Boura	13
Figure 5: Profil d'altération typique au sein de roches de socle	14
Figure 6: Synthèse des traitements des images Landsat TM et de l'extraction des linéaments	21
Figure 7 : Mise en œuvre du dispositif Wenner β en Roll Along.....	21
Figure 8: Emplacement des profils géophysiques réalisés autour de la retenue de Boura.....	22
Figure 9: Répartition spatiale des forages	26
Figure 10: Coupe de forage de Leo (Savadogo, 1984)	28
Figure 11: Modèle a trois couches avec maillage 3D grid.....	31
Figure 12: Images issues des différents traitements;(a) composition colorée;(b) combinaison de bande; (c) filtre sobel; (d) filtre directionnel	34
Figure 13: Carte des linéaments issus du traitement des images Landsat.....	35
Figure 14:Rosace directionnelle des fractures relevées sur carte photo-géologique (a) et des linéaments issus du traitement des images (b)	35
Figure 15: Position des forages par rapport aux linéaments	36
Figure 16: Panneaux de validation des linéaments et confirmation de la lithologie (a) panneau 1 (b) panneau 2.....	37
Figure 17: Profils réalisés en aval de la digue; (a) profil 2, (b) profil.....	38
Figure 18: Profils électriques 2D sur la rive droite ; (a) panneau 4 ; (b) panneau 3 ; (c) panneau 5.....	41
Figure 19: Profils 2D sur la rive gauche; (a) panneau 6 , (b) panneau 7, (c) panneau 8, (d) panneau 9.....	43
Figure 20: Carte de l'évolution spatiale de l'humidité.....	45

Figure 21: Variation saisonnière du niveau d'eau dans les puits et forages autour de la retenue	46
Figure 22: Carte piézométrique autour de la retenue de Boura.....	47
Figure 23: Evolution de niveau statique autour de la retenue	48
Figure 24: Charges observées après simulation	49

Introduction

La gestion durable des ressources en eau partout dans le monde, est essentielle au développement économique et social d'une région. Ainsi, les eaux de surface et les eaux souterraines qui sont deux états de la ressource en eau, ne doivent pas être traitées de manière indépendantes, car dans la plupart des régions du monde, elles sont hydrauliquement connectées, et une connaissance de ces interactions est fondamentale pour la gestion efficace des ressources en eau (Sophocleous, 2002; Brodie et al. 2007). Cette gestion passe nécessairement par une maîtrise du bilan hydrique .Cependant, de nombreuses études du bilan hydrique des réservoirs ignorent la contribution des apports souterrains ou la considèrent comme négligeable. Il en est de même pour les infiltrations sous la cuvette des retenues d'eaux. En outre, le déficit hydrologique annuel au niveau des retenues est souvent attribué aux fuites à travers de la digue ou des infiltrations vers la nappe phréatique (Montoroi et al, 2001). Pendant que dans certaines régions les retenues d'eau assurent un apport considérable a la nappe, dans d'autres régions les eaux souterraines jouent un rôle de maintien des niveaux d'eau de surface.

Dans l'optique de faire un bilan hydrique complet d'une retenue, il est indispensable de savoir s'il existe une contribution de la retenue dans la recharge de la nappe des versants ou des flux souterrains vers le réservoir et d'estimer le flux des échanges. Une telle étude nécessite la connaissance du milieu souterrain à savoir la géologie, la géomorphologie et l'hydrogéologie (le sens des écoulements souterrains de la région).

C'est dans ce contexte que cette étude portant sur : **La caractérisation des interactions entre les eaux de surface et la nappe superficielle : Cas de la retenue de Boura au Burkina Faso** est menée dans le sud du Burkina Faso.

Ce thème s'inscrit dans le cadre du projet CPWF (Challenge Program on Water and Food) phase 2 du bassin versant de la Volta. Le projet vise à l'amélioration des conditions de vie des populations à travers une bonne Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) des petites et moyennes retenues au Burkina Faso et au Ghana. A cet effet, deux (2) réservoirs ont été retenus au niveau du bassin de la Volta. Il s'agit du barrage de Binaba au Ghana et celui de Boura au Burkina Faso qui fait l'objet de cette étude.

L'objectif général de cette étude est de caractériser les interactions et de quantifier les flux échangés entre la retenue et la nappe superficielle afin d'établir un bilan hydrique complet de la retenue Boura.

Pour atteindre ce résultat, plusieurs objectifs spécifiques ont été fixés:

- Identifier les grandes fractures de la zone d'étude car elles représentent les couloirs de circulation d'eau souterraine.
- Caractériser l'évolution du front d'humidité autour de la retenue. Cette caractérisation permettra d'évaluer le degré de saturation des différentes couches autour de la retenue.
- Caractériser les fluctuations piézométriques dans les environs de la retenue de Boura, et élaborer une carte piézométrique.
- Réaliser un modèle d'écoulement souterrain afin d'évaluer les flux verticaux d'eau entre la nappe et la retenue.

Afin d'atteindre les objectifs fixés, le présent mémoire s'articulera autour de quatre (04) chapitres.

Le chapitre 1 est consacré à la synthèse bibliographique. Ce chapitre est subdivisé en deux (02) parties : la présentation de la zone d'étude et l'état de l'art sur les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Le chapitre 2 décrit le matériel utilisé ainsi que les méthodes mises en œuvre pour atteindre les objectifs fixés.

Le chapitre 3 présente les différents résultats obtenus.

Le chapitre 4 est consacré à l'analyse des résultats et la discussion de ceux-ci. Il examine avec soins les résultats obtenus. Ce chapitre atteste la fiabilité ou remet en question les résultats.

Après le développement des différents chapitres, ce mémoire se terminera par une conclusion et des perspectives pour les études à venir.

Chapitre 1 : REVUE DE LA LITTERATURE

I. Présentation de la zone d'étude

I.1- Situation géographique de Boura

Le barrage de Boura est situé au Sud du Burkina Faso à 50 Km à l'Ouest de Léo, chef-lieu de la province de la Sissili, dans la région du Centre-Ouest. On peut y accéder en empruntant la route nationale N°20 à partir de Léo ou la route départementale N°158 à partir du Niabouri. Le bassin versant qui draine l'eau dans la retenue de Boura est un affluent du fleuve Mouhoun. Il couvre une superficie d'environ 150,3 Km² dont 106,1 Km² au Burkina Faso soit 70,6% et 44,2Km² au Ghana soit 29,4 Km² (Figure 1). Par ailleurs, il a un périmètre de 69 Km et est situé entre les coordonnées géographiques suivantes : entre 10°56'07" et 11°04'31" de latitude Nord et entre 02°22'00" et 02°31'00" de longitude Ouest.

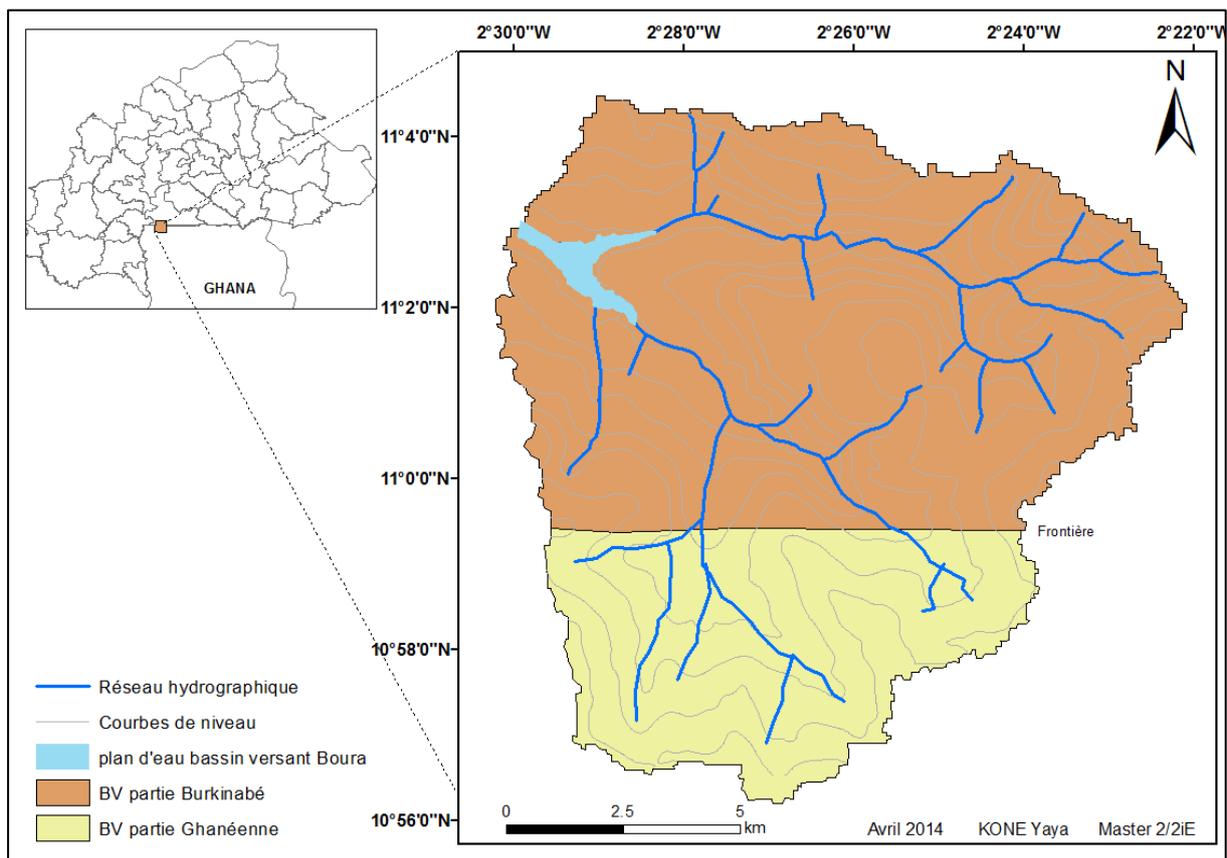


Figure 1: Localisation géographique du barrage de Boura et de son bassin versant

I.2- Historique du barrage de Boura

Le barrage de Boura a été réalisé en 1983 par l'ONBI (Office National des Barrages et de l'Irrigation). La capacité initiale du barrage de Boura était de 4,2 millions de m³ avec une superficie d'environ 200 ha à la cote du plan d'eau normale (Annexe 1 : les caractéristiques du barrage de Boura). Il est destiné à répondre à un triple besoin à savoir : les besoins humains, pastoraux et agricoles.

I.3- Milieu physique et naturel

La localité de Boura est caractérisée par une végétation de savane arborée. Le sol est hydromorphe sur matériaux sableux ou argilo-sableux par endroit. Dans la partie ghanéenne du bassin, on y trouve des sols ferrugineux lessivés et les sols riches en argile noire beaucoup plus concentrés au Sud-Est (Karambiri et al , 2011). Le réseau hydrographique est d'ordre 3 et présente une structure dendritique. Les principales caractéristiques physiques du Bassin sont résumés dans le tableau ci-dessous

Tableau 1 : Principales caractéristiques physiques du bassin versant de la retenue de Boura

Paramètres	Bassin versant de la retenue de Boura
Superficie (Km²)	150,3
Périmètre (Km)	69,1
Indice de compacité K_c	1,57
Altitude moyenne (m)	304
Altitude minimale (m)	268
Altitude maximale (m)	349
Indice global de pente (m/Km)	4
Pente moyenne	3,4%
Longueur du cours d'eau principal (Km)	14,07
Dénivelée spécifique (m)	37,24

I.4- Contexte climatique

Le bassin versant du barrage de Boura est située dans la zone climatique Sud-Soudanienne alternant entre une saison sèche et une saison de pluie, avec une moyenne mensuelle des températures qui dépasse 26°C (Karambiri et al. 2011).

I.4.1-Pluviométrie et climat

Les variations pluviométriques de Boura ont été appréciées grâce aux données pluviométriques du poste pluviométrique à Boura. Ces données au pas de temps mensuel ont été fournies par la Direction de la Météorologie du Burkina Faso et s'étalent sur la période 1961-2010

Les données pluviométriques annuelles de la période 1990-2010 ont été analysées avec l'indice de Nicholson (1980). Cette méthode permet de suivre les fluctuations des régimes pluviométriques. Cet indice pluviométrique s'exprime comme suit :

$$IP_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma}$$

Avec X_i = hauteur de pluie en mm de l'année i ; \bar{X} = hauteur de pluie en mm moyenne sur la période d'étude ; σ = écart type de la hauteur de pluie sur la période d'étude.

La pluviométrie annuelle varie entre 646,2 mm et 1242,9 mm avec une moyenne inter-annuelle de 913,7 mm. La décennie 2000-2010 a été plus humide que car elle comporte moins d'année déficitaire par rapport à la décennie 1990-2000. De plus, durant ces dernières décennies, l'année 2003 a été la plus pluvieuse avec 1242,9 mm. Contrairement à 2003, l'année 1992 a été la moins arrosée avec seulement 646,2 mm de pluie tombée. A partir de 2003, on constate une prédominance des années humides.

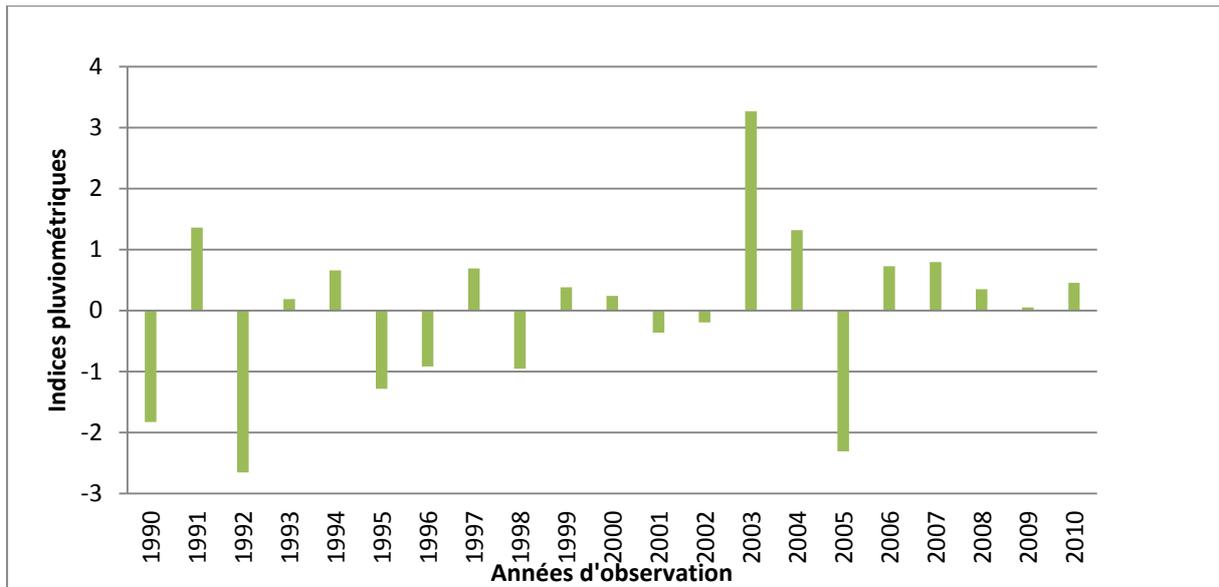


Figure 2: Evolution de l'indice pluviométrique annuel à Boura sur la période 1990-2010

La figure 3 présente la variation pluviométrique moyenne mensuelle sur les deux dernières années (2012 – 2013). Effet, elle montre une succession de deux saisons : une saison sèche et une saison humide. La saison des pluies commence généralement en Mai et prend fin en Octobre ou en Novembre. Commence ensuite la saison sèche. Les mois de juillet, Août et septembre totalisent à eux seuls plus de 61 % de la pluviosité annuelle. Le mois le plus humide est Aout avec 238 mm de pluie, tandis que Janvier est le mois le plus sec avec en moyenne interannuelle de 0,07 mm de pluie, considéré comme trace.

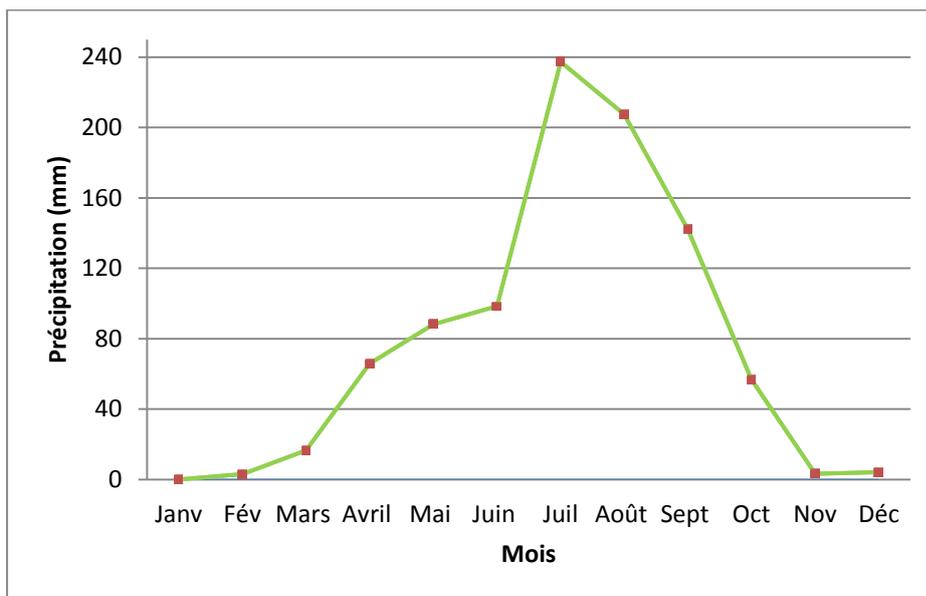


Figure 3: Variation de la pluviométrie moyenne mensuelle de la station de Boura (2012-2013)

1.4.2- Température

Les données sur les températures sont issues de la station de Boura située près de la retenue. Selon les données recueillies en 2013, la température moyenne mensuelle varie entre 26 °C et 32 °C. Le mois le plus chaud est Mars (38,5 °C). Tandis que les températures les plus basses sont observées en décembre (18,4 °C).

1.4.3- Evaporation

Durant la saison intense des pluies, de Juillet à Septembre, les pertes par évaporation sont minimales à cause de l'humidité de l'air (Karambiri et al, 2011). A la station de Boura, les valeurs d'évaporation journalière mesurées à partir du bac Colorado-ORSTOM sont plus faibles au cours de la saison des pluies précisément de Juillet à Août (4 mm/jour). L'évaporation croît rapidement dès que cessent les fortes pluies pour atteindre des valeurs dépassant 9 mm/jour de Mars à Juin (Annexe 3)

I.5- Contexte géologie et hydrogéologique

1.5.1- Contexte géologique

La province de la Sissili draine en territoire voltaïque une région occupée par trois types de formations cristallines : des migmatites, des granites et enfin des roches basiques et des filons de quartz. (Nidaoua, 1984). En ce qui concerne la localité de Boura, elle repose sur des formations essentiellement constituées par les granites à filon de quart ou à filon de pegmatite d'après la géologie des forages issus des données de la DGRE. De plus, les observations faites sur la carte géologique du degré carré de Po (SYSMIN, 2003) montrent des formations constituées de granites à amphibole et biotite avec des intercalations de dolérite. Ces observations ont été confirmées par les affleurements rocheux sur le terrain (Photos 1).



Photo 1 : Affleurements de granite sur le bassin de Boura

L'étude réalisée par Karambiri et al., (2011) indique que le sous-sol est en partie constitué de granites indifférenciés, de granites syntectoniques formant des batholites de grande étendue, de schistes comprenant des phyllades (roches métamorphiques), de tufs et de grauweekes (roches volcano-sédimentaires).

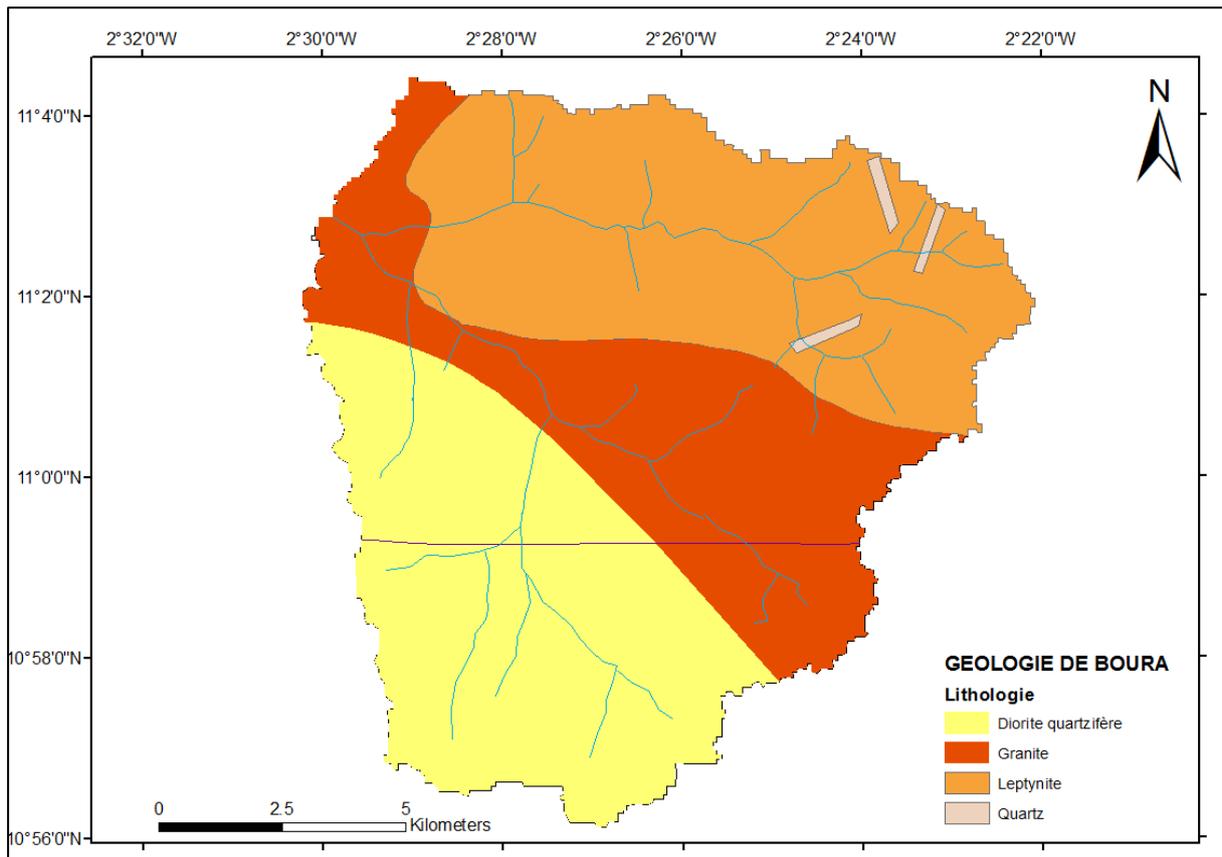


Figure 4: Carte géologique de Boura

1.5.2- Hydrogéologie du bassin versant

Le système aquifère observé à Boura par l'intermédiaire des logs de forage s'apparente au modèle conceptuel en milieu de socle proposé par Maréchal et al , 2003 (figure 5) .On y distingue deux types d'aquifères principaux : aquifères d'altérites et aquifères de fissures.

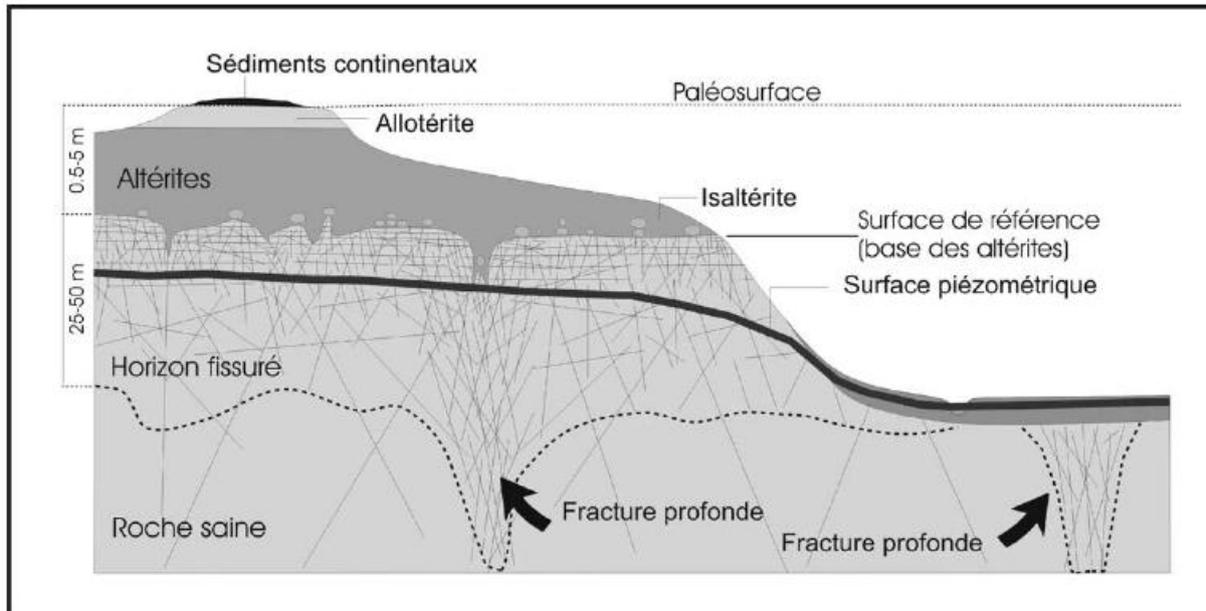


Figure 5: Profil d'altération typique au sein de roches de socle

a) Aquifères d'altérites

Dans les zones de granite, comme c'est le cas à Boura, les aquifères d'altérites sont peu productifs. Les puits qui captent uniquement l'altération tarissent en fin de saison sèche. Par ailleurs dans les bas-fonds et aux alentours de la retenue de Boura (< 500m), la nappe phréatique est accessible à 6 m en moyenne par rapport à la surface du sol. La retenue semble alimenter la nappe phréatique superficielle captée par les puits villageois car ces puits sont exploités pendant toute la saison sèche.

b) Aquifères de fissures

Contrairement, aux aquifères d'altérite qui ont un pouvoir capacitif, les aquifères de fissures ont un pouvoir transmissif. Ils sont atteints à des profondeurs dépassant souvent les 50 m et ils sont captés par de nombreux forages de Boura qui produisent des débits satisfaisants entre 1 m³/h et 7 m³/h pour l'approvisionnement des populations rurales.

II. Etat de l'art sur les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines

L'interaction entre deux entités peut se définir comme étant l'influence réciproque d'une entité sur l'autre (Dictionnaire Larousse). En hydrologique, les eaux de surface et les eaux souterraines sont deux catégories de ressources en eau, deux phases de cycle de l'eau. Elles présentent des relations et une interdépendance hydrologique si étroite qu'en fait toutes deux constituent une ressource unique (Castany, 1965). La relation entre ces ressources est caractérisée par des flux d'échanges d'eau. Plusieurs auteurs (Montoroi et al, 2001 ; Fares, 2011 ; Catherine, 2011) se sont intéressés à l'interaction entre ces deux types de ressources. Le rôle des petites retenues dans la recharge de la nappe est mis en évidence par Montoroi et al. (2001) à travers les approches géophysiques, géochimiques et les observations pédologiques. Ce qui a grandement contribué à l'équilibre du bilan hydrique qui devait faire. En effet, l'établissement du bilan hydrique des retenues d'eaux n'est pas toujours facile à faire à cause de certains paramètres difficiles à déterminer tels que l'infiltration et les apports souterrains.

Par ailleurs, la modélisation peut être utilisée pour réaliser le bilan hydrique. Telle est le cas dans une étude menée en 2011 par Catherine Guay à Havelock au Québec . Deux modèles ont été utilisés. Ce sont les modèles HELP (2D) et FEFLOW (3D) . Les résultats de l'étude ont été très satisfaisants.

Le problème de perte est récurrent sur les barrages, notamment les fuites au niveau des digues, les infiltrations sous le lit du lac ou de façon latérales. Walid (2011) a évalué les fuites d'eau dans le barrage d'Alfania en Syrie. La technique utilisée était la géophysique précisément la méthode électrique TRE. Celle-ci a été très efficace dans la détection de grave fuite dans la vallée principale du barrage. Linda (2011), les méthodes électriques sont jugées comme les techniques les plus prometteuses de détection des infiltrations d'eau dans les barrages en remblais.

De ces travaux précédents, il ressort que la géophysique et la modélisation sont des méthodes bien adaptées dans la caractérisation des interactions entre eaux de surface-eaux souterraines car elles ont fait beaucoup de sucés.

Chapitre 2 : MATERIEL ET METHODES

I. Matériel

I.1- Données utilisées

Dans ces études différents types de données ont été utilisées. Ce sont : une image satellitaire, des données de forages, des données climatiques.

Une image brute Landsat 4 TM (Thématique mapper) a fait l'objet de traitement. Il s'agit de la scène 195-051 acquise le 18 Novembre 1986. C'est une scène géo référencée selon le système de projection WGS 84 zone 30. L'image est présentée en 7 bandes.

Une base de données des forages de la province de Sissili a été fournie par la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE). C'est une base de données qui regroupe les forages de 1986 à 2009. Elle a été actualisée par une enquête réalisée sur le site en Mars et Mai 2014.

I.2- Equipement hydrogéologique et géophysique

Plusieurs outils ont été mis à contribution pour acquérir les informations *in situ*. Ce sont : une sonde manuelle, un GPS, un résistivimètre Syscal Pro, une boussole et un appareil photo.

La sonde manuelle a servi à mesurer le niveau piézométrique dans les forages et les puits.

Le GPS (Global) : a permis de géolocaliser les ouvrages hydrauliques et de prendre leur altitude.

La boussole pour orienter les profils géophysiques et donner la direction des fractures sur affleurement.

Le principal appareil utilisé est le Syscal Pro. C'est un résistivimètre multi-électrodes utilisé pour les mesures géophysiques. Le système est conçu pour réaliser des mesures de résistivité de manière automatique selon des séquences prédéfinies. Il permet d'obtenir une image des structures géologiques souterraines grâce à des mesures électriques en surface.



Photo 1 : Syscal R1 Plus 96:



Photo 2 : Déploiement du dispositif

I.3- Outils informatiques

Plusieurs logiciels ont été utilisés pour le traitement des données. Ce sont :

ENVI 4.3 : C'est un logiciel pour le traitement des images satellitaires. Il permet d'augmenter la lisibilité des images en vue de faire apparaître les éléments linéaires.

ArcMap10; Arc View 3.2a; QGIS: Ce sont des logiciels de visualisation, d'exploitation, de requêtes et d'analyses de données spatiales. Ils ont été utilisés pour l'analyse et l'exploitation des données de forage. Ils ont aussi été utilisés pour le géo référencement des cartes et des images. Ils ont permis de réaliser des requêtes et d'établir toutes les cartes.

X2IPI : c'est un logiciel qui permet de fabriquer les séquences de mesure tomographique.

ELECTRE II : Il permet de transférer les séquences et d'extraire les résultats dans le Syscal.

Res2Dinv : c'est un logiciel utilisé pour l'inversion des données de tomographie électrique.

GMS : un logiciel de modélisation des écoulements souterrains.

II. Méthodes

Afin d'atteindre les objectifs, plusieurs méthodes ont été utilisées. Celles-ci sont décrites ci-après.

II.1- Cartographie des linéaments

La cartographie des linéaments passe nécessairement par un certain nombre de traitements des images satellitaires dont les caractéristiques sont en annexe 3. Dans notre cas, nous avons

effectué les traitements suivant : compositions colorées, les combinaisons des bandes, les analyses en composante principale, etc

II.1.1- Compositions colorées

La composition colorée est une technique qui consiste à attribuer une couleur de base Rouge (R), Vert (V), Bleu (B), à trois canaux d'une image afin d'obtenir une image en couleur. Cette composition colorée a été réalisée à partir des combinaisons de bandes (1, 5, 7), (1, 4, 7) et (4, 5, 7) de l'image Landsat. Elle fait apparaître plus nettement les discontinuités structurales et texturales entre la végétation et les accidents géologiques, facilitant ainsi la discrimination visuelle des linéaments (Koita et al. 2010)

II.1.2- Rehaussements des images

a) Combinaison des bandes

Les combinaisons de bande utilisées sont des combinaisons arithmétiques (addition, soustraction et division) appliquées sur les bandes TM.

L'indice de clarté entre les bande 5 et 7 a été calculé à l'aide de la formule de langage IDL : $(\text{float}(b2) - \text{float}(b1)) / (\text{float}(b2) + \text{float}(b1))$ ou b1 et b2 représentent respectivement les bandes 7 et 5.

$$IC = \frac{(B5 - B7)}{(B5 + B7)}$$

Cette technique permet d'extraire les données de la végétation et d'augmenter le contraste de certains pixels sur la bande 7. Elle fait ressortir les structures géologiques.

b) ACP

Elle vise à éliminer la corrélation entre les données de sorte qu'elles soient indépendantes. Appliquée à une combinaison de bandes, cette technique permet de concentrer la quasi-totalité de l'information sur une ou deux bandes, les autres bandes ne renferment que les bruits.

c) Filtrage

Parmi les nombreuses techniques mises en œuvre pour éliminer le bruit dans les images satellitaire, la technique du filtrage est la plus utilisée et la plus pratique (Yunhan et al. 2000).

Les filtres directionnels et de Sobel seront appliqués sur les composantes de l'ACP qui renferment le plus d'information (plus grand pourcentage)

II.1.3- Validation des linéaments

Le processus de validation de la carte des linéaments s'est déroulé suivant deux approches. Tout d'abord, les directions des grandes familles de linéaments (issus du traitement des images Landsat) ont été comparées avec les directions des failles relevées sur la carte photo-géologique du degré carré de Léo datant de 1968.

Dans une seconde démarche, le processus de validation a consisté à évaluer la position des forages à gros débit par rapport aux linéaments issus du traitement d'images. En effet, cette démarche permet de superposer la carte des forages de la zone avec celle des linéaments.

Ces différents traitements ont permis de rehausser les discontinuités sur les images TM. Ces discontinuités sont validées par des informations sur le terrain et la carte géologique. En plus des données sur le terrain, certains linéaments ont été confirmés par des mesures géophysiques. Selon Kouamé (1999), la démarche recommandée pour la validation de la carte linéamentaire est la vérification sur le terrain des traits structuraux par les méthodes géophysiques.

Toutes les différentes étapes adoptées pour le traitement des images et la validation des linéaments sont résumées à la figure 6.

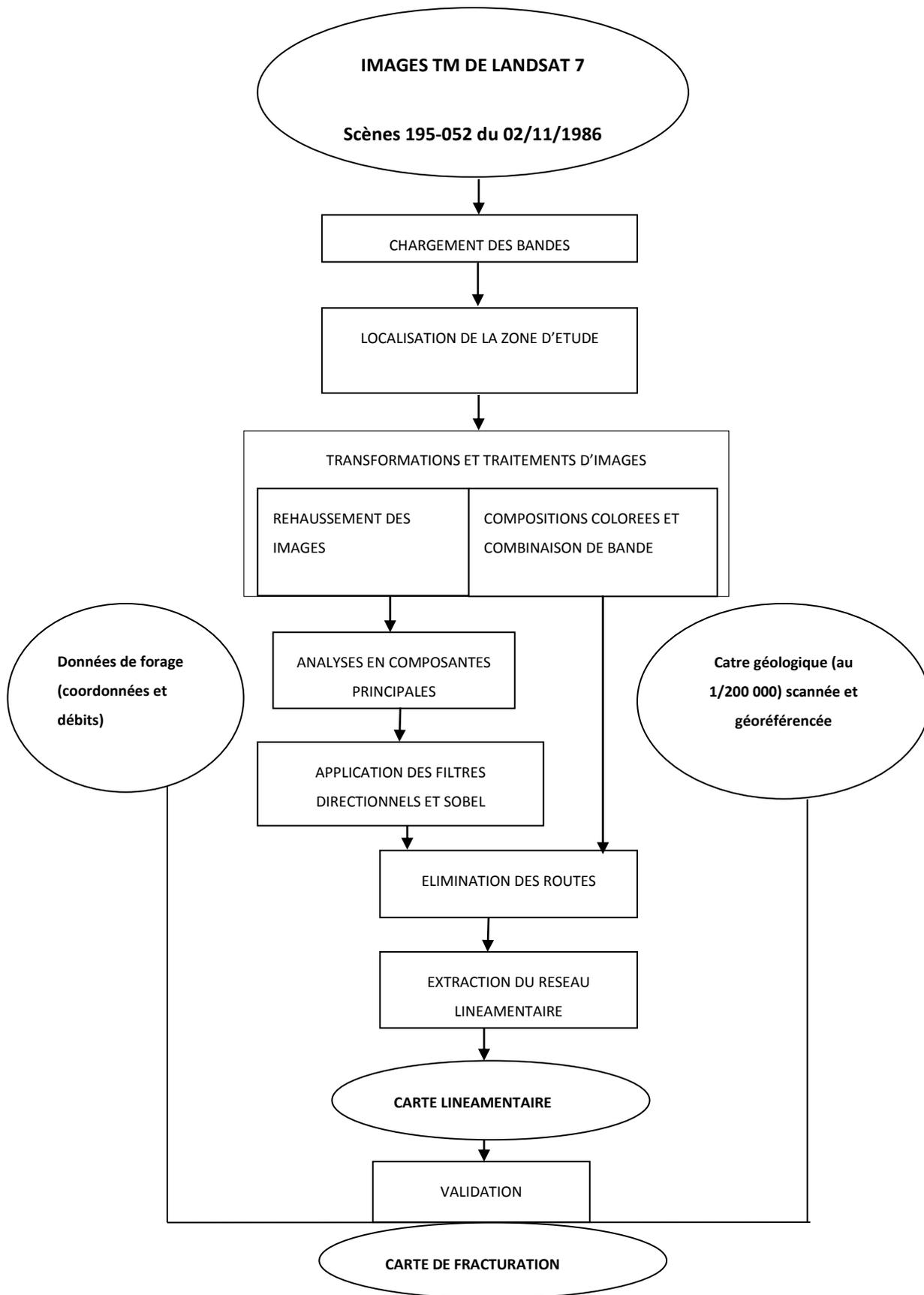


Figure 6: Synthèse des traitements des images Landsat TM et de l'extraction des linéaments

II.2- Caractérisation du front d'humidité

L'objectif des mesures géophysiques était d'abord de compléter la validation des linéaments et ensuite d'apprécier l'évolution de l'humidité et plus de détail sur la lithologie autour de la retenue. La technique géophysique utilisée dans cette étude est la tomographie de résistivité électrique (TRE). La TRE est l'une des techniques géophysiques qui a été rapidement développée et largement utilisée au cours de ces dernières années. Cette technique est devenue la méthode la plus courante appliquée dans les sciences de la terre précisément en hydrogéologie en raison de la qualité des données obtenues, et elle peut donner une couverture continue du sous-sol dans les espaces 2D et 3D (Fares, 2011). D'après Barker et al. (2001) cette technique facilite une distribution fiable en 2D ou 3D des résistivités des structures souterraines et en moins de temps.

La TRE est réalisée à partir de 96 électrodes rectilignes reliées entre-elles par un câble électrique et espacées de 5 m. Les dispositifs choisis pour enregistrer les mesures sont les séquences Wenner α et Wenner β introduites dans le Syscal en faisant des Roll Along. Tandis que le Wenner α est très sensible aux variations horizontales (structures tabulaires), le Wenner β quant à lui est mieux adapté pour détecter les structures verticales. Donc, le choix de ces dispositifs conviendrait mieux pour les prospections en milieu fissuré.

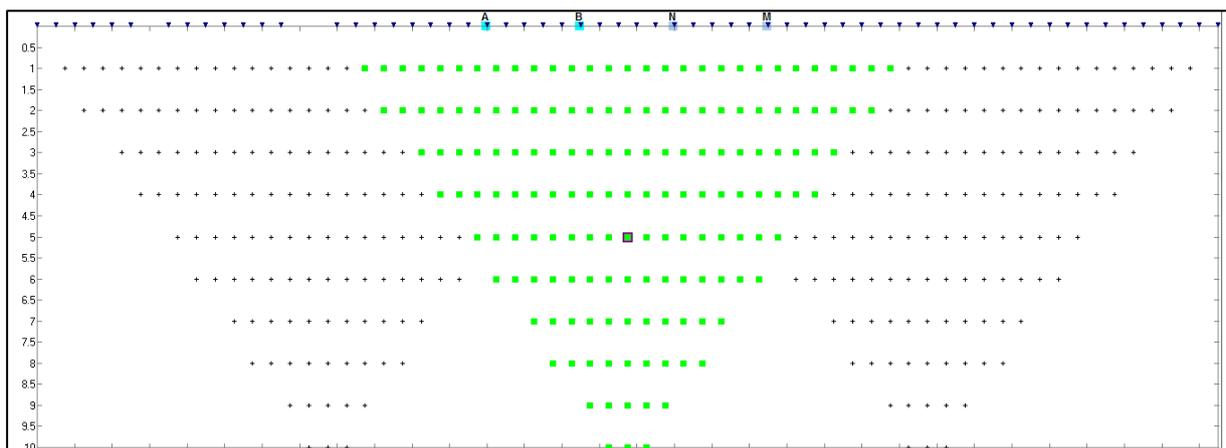


Figure 7 : Mise en œuvre du dispositif Wenner β en Roll Along

Neuf (09) profils ont été réalisés près de la retenue (Figure. 8). Quatre (04) sur la rive gauche, trois (03) sur la rive droite et enfin 02 profils en aval de la digue du barrage. La disposition des profils permet non seulement de recouper certaines structures supposées des fractures,

mais aussi d'apprécier l'évolution de l'humidité et de caractériser d'éventuelles fuites autour de la retenue. Le tableau 3 donne la longueur et la direction de chaque profil.

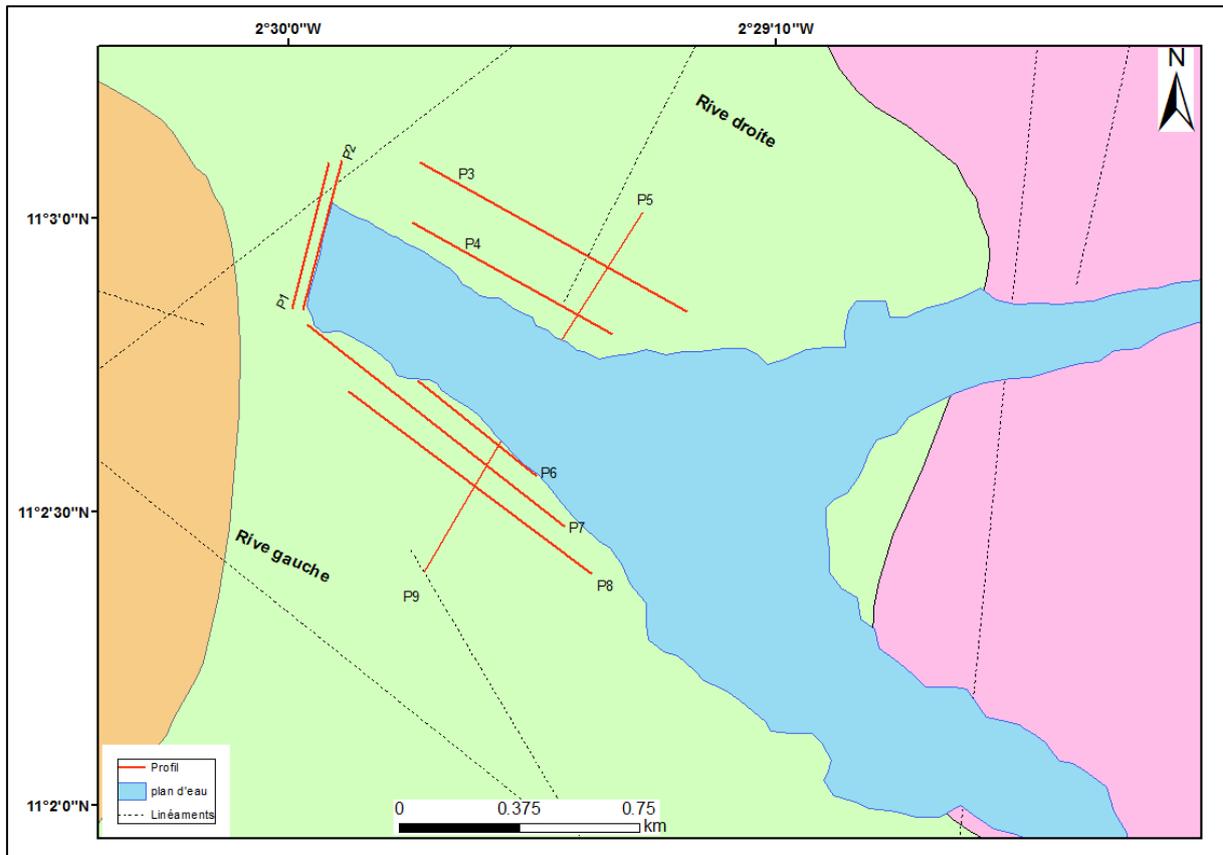


Figure 8: Emplacement des profils géophysiques réalisés autour de la retenue de Boura

Les données recueillies de chaque profil sont les valeurs de résistivité apparente. Ces données ont ensuite été inversées pour obtenir les résistivités réelles des couches du terrain en image 2D. Lors des mesures géophysiques, les coordonnées des extrémités et des jonctions de chaque panneau électrique ont été prises à l'aide d'un GPS (Global Position System) en projection UTM (Universal Transversal Mercator). Ces coordonnées ont été intégrées dans les résultats inversés pour mettre en évidence l'altitude de ces points. Tout le processus de mesure géophysique, de l'acquisition des données brutes jusqu'à l'obtention des images 2D des résistivités vrai du sous-sol, sont résumés dans l'organigramme ci-dessous.

Tableau 2: Caractéristique des profils électriques

Profil	Longueur (m)	Direction	Trajet	Nombre de panneau
P1	475	N15	Parallèle et distant 20 m de la digue	01
P2	475	N15	Parallèle a P1 et passant au pied du talus aval	01
P3	950	N120	Passant a environ 230m du plan d'eau rive droite	03
P4	715	N120	Passant a environ 80m du plan d'eau rive droite	02
P5	475	N32	Recoupe P3 et P4	01
P6	475	N130	Passant a environ 20m du plan d'eau rive gauche	01
P7	1190	N130	Passant a environ 60m du plan d'eau rive gauche	04
P8	950	N130	Passant a environ 100m du plan d'eau rive gauche	03
P9	475	N32	Recoupe P6 , P7 et P8	01

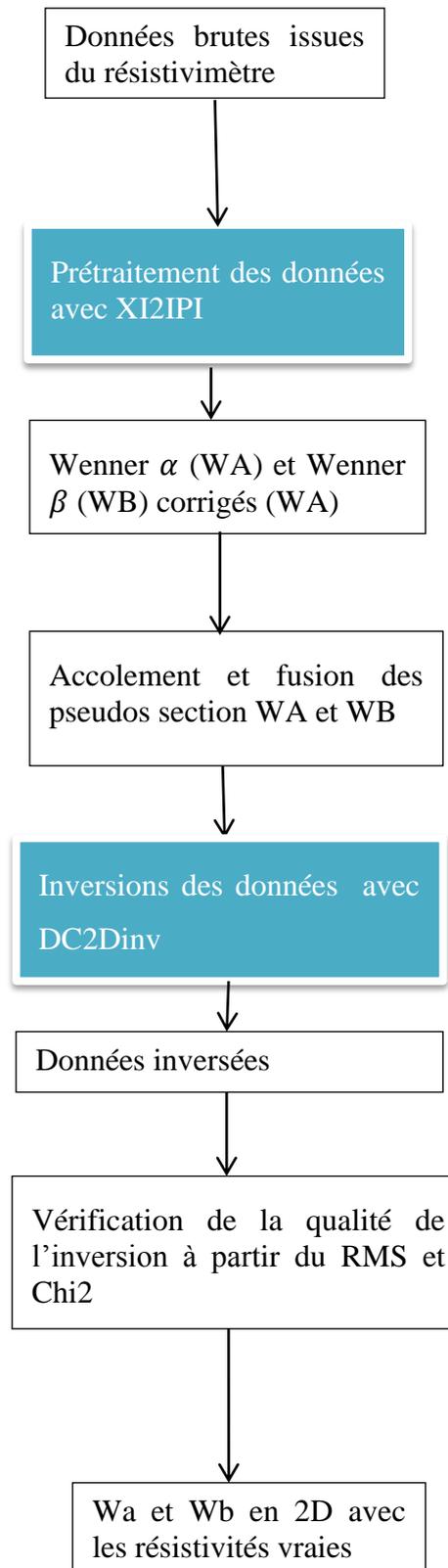


Tableau 3 : Organigramme résumant les étapes des traitements des données géophysiques

Les modèles 2D de résistivités du sous sol ont obtenues après inversion des speudo sections seront interprétés en fonction des gammes de résistivités de l'échelle ci-dessous proposées par Sam Diop, 1995

Tableau 4 : Résistivités des eaux et des roches

Roches	Perméabilité cm/s	Résistivité observée $\Omega.m$
Gravier	3.10^{-4}	200
Gravier et sable	1.10^{-5}	160
Sable	6.10^{-4}	125
Sable silteux	1.10^{-9}	60
Silt	9.10^{-9}	30
Argile	5.10^{-10}	10
Calcaires fissurés	---	83
Calcaires non fissurés	1.10^{-10} - 1.10^{-12}	2000 - 10000
Marne consolidés	1.10^{-8} - 3.10^{-9}	20 - 200

II.3- Fluctuation piézométrique autour de la retenue.

Autour de la retenue de Boura, on dénombre 14 ouvrages hydrauliques (Figure 9), dont 10 forages en bon état et 04 forages abandonnés repartis dans les différents villages qui la composent.

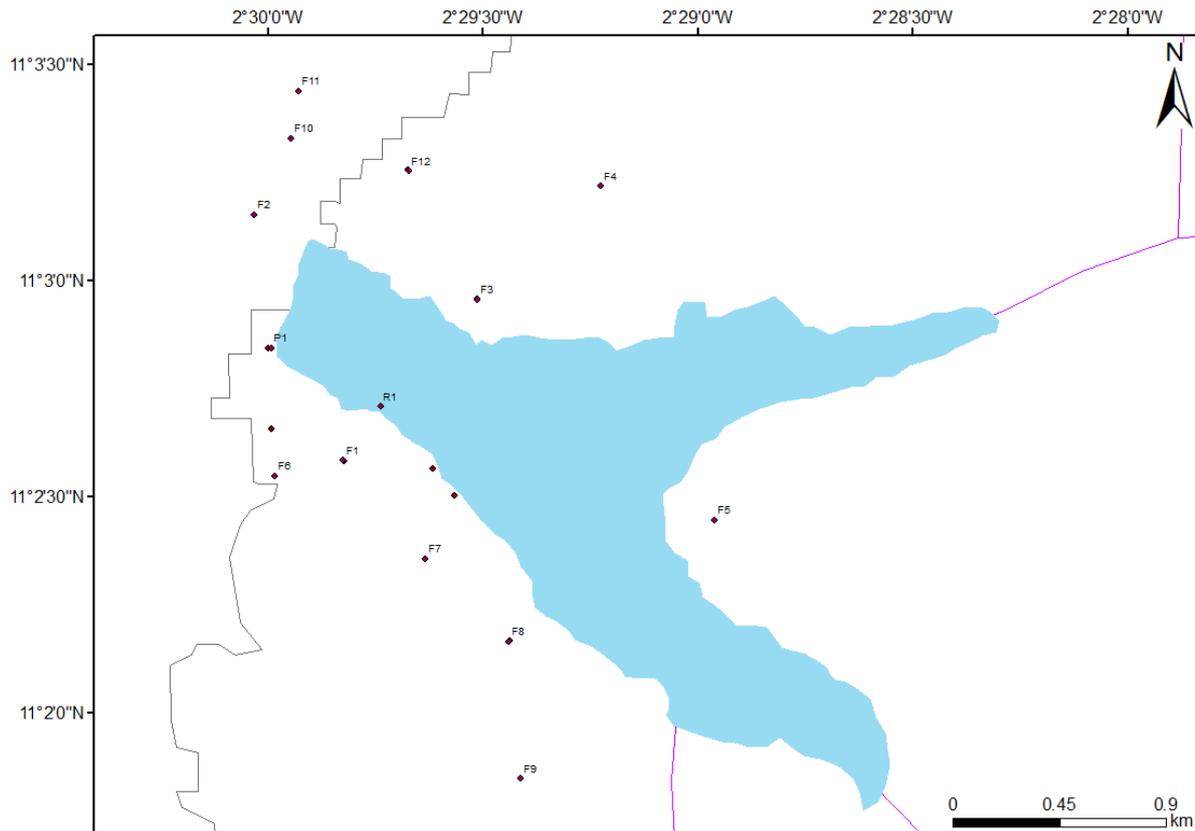


Figure 9: Répartition spatiale des forages

Les mesures piézométriques ont été effectuées sur ces ouvrages au cours des visites de terrain de Janvier 2014 puis d'Avril 2014. Sur le terrain, la mesure du niveau d'eau dans les forages a été prise à l'aide d'une sonde manuelle. Ensuite la cote des forages a été obtenue par un GPS. Les différentes cotes des forages ont été recalées par rapport à la carte topographique. A partir de cette référence, les hauteurs des margelles a été retranchées des cotes des forages recalées afin d'avoir les cotes piézométriques corrigées. Dans la pratique, le niveau piézométrique au niveau d'un ouvrage est donné par la relation suivante :

$$\text{Niveau piézométrique } (H) = \text{Altitude de l'ouvrage } (Z) - \text{Profondeur}(h)\text{de l'eau}$$

Cette relation est l'équation de Bernoulli où la vitesse d'écoulement a été négligée car c'est l'écoulement des eaux souterraines.

A partir des niveaux piézométriques (charge hydraulique), les isopièzes ont été tracées pour obtenir une carte piézométrique.

Une série de donnée des forages du bassin versant (partie Burkinabé) (Annexe 1) a permis de compléter les données recueillies sur le terrain. En effet, elle renseigne sur les caractéristiques

des forages qui sont nécessaires pour des études hydrogéologiques à savoir : la profondeur des forages, les différentes couches traversées et leurs épaisseurs, les venues d'eau, les niveaux statiques et dynamiques.

II.4- Modélisation numérique des écoulements

La modélisation d'un phénomène est une démarche qui vise à représenter par un moyen adéquat le comportement de ce phénomène. Dans les sciences de l'ingénieur, la modélisation permet de comprendre les variables qui influencent ce comportement. En écoulement souterrain, la modélisation numérique ne peut se faire sans passer par un modèle conceptuel géologique et hydrogéologique.

II.4.1- Modèles géologique et hydrogéologique

L'analyse des lithologs montre que la plupart des forages ont été réalisés sur des formations granitiques. Le profil d'altération dans les formations granitiques se décompose du haut vers le bas comme suit : la couche d'argile latéritique, la couche d'arène argileuse, la couche granite altéré, la couche de granite fissuré et le granite sain. Les couches de latérite, d'argile et de roches altérées constituent la couche altérite. L'épaisseur des différentes couches sur citées varie en fonction de la topographie.

- La couche altérite représente la roche mère très altérée. Elle durcie parfois en surface pour former la cuirasse latéritique. Elle a en moyenne 20 m d'épaisseur et peut atteindre 30m par endroit.
- La couche fissurée aussi appelé horizon fissuré, est une zone de transition située entre la couche altérite et le socle sain fracturé. Son épaisseur varie entre 15 et 20 m.
- Le socle sain représente les formations de granite sain. Il affleure dans le bassin de Boura. Il est atteint à plus de 35 m de profondeur. Il est parfois affecté par des fractures horizontales ou subverticales de taille variable.

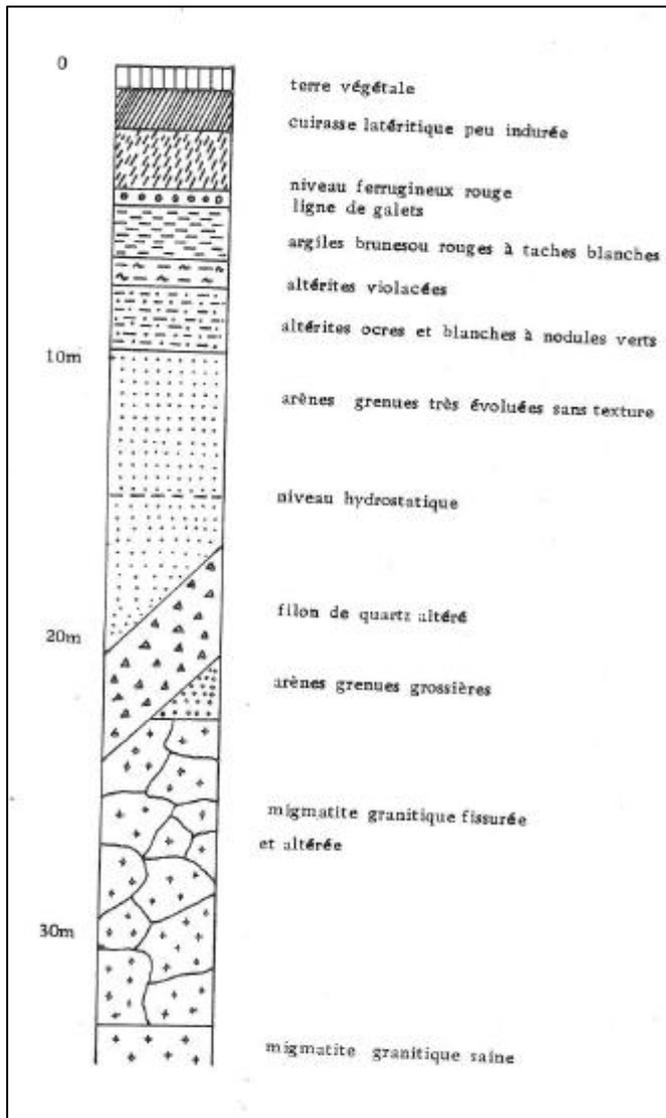


Figure 10: Coupe de forage de Leo (Savadogo, 1984)

II.4.2- Modèle numérique des écoulements

Dans cette étude, un modèle numérique sera utilisé pour étudier les interactions entre la retenue et la nappe phréatique. Le phénomène se mettra sous forme d'équation de diffusion exprimée par :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \text{div}(-K. \text{grad}H) = Q$$

Dans ce travail, la simulation sera réalisée en régime permanent. On parle d'un phénomène en régime permanent quand son évolution est indépendante du temps. Dans l'équation de la

diffusion, le terme $\frac{\partial H}{\partial t}$ est nul. Si on suppose que le coefficient de diffusion est constant dans toutes les directions de l'espace, l'équation devient

$$-K\Delta H = Q$$

ΔH : Laplacien de la charge hydraulique

Q : Prélèvements

II.4.3- Description du modèle GMS

Le logiciel GMS a été utilisé pour les simulations de l'écoulement souterrain. GMS est un modèle à base physique polyvalent et largement utilisé pour la modélisation 2D ou 3D en différences finies des écoulements souterrains. Il permet d'appréhender les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines et de quantifier les différents flux. Les simulations sont effectuées en régime permanent ou transitoire, et soit en nappe captive en nappe libre. Les données d'entrées du modèle MODFLOW comprennent la géométrie du domaine, les paramètres physiques des sols, les conditions initiales et les conditions aux limites.

a) Les paramètres dynamiques

Les valeurs utilisées pour les paramètres dynamiques sont celles du mois d'Avril qui correspond à la période d'étude.

- L'évaporation : c'est la quantité d'eau de la retenue transformée en vapeur. Le volume évaporé a été estimé à partir des mesures journalières de la station de Boura et la surface moyenne du plan d'eau de la retenue. Le volume évaporé est 7 mm/jour soit $7 \cdot 10^{-3}$ m/jour. Avec une surface moyenne d'environ 95 ha ; la retenue perdrait 6650 m^3 par évaporation par jour
Les précipitations sont en moyenne 65.2 mm/mois soit $2.17 \cdot 10^{-3}$ m/jour.
- La recharge : c'est le paramètre d'entrée le plus important. Il correspond à la quantité d'eau infiltrée dans la nappe phréatique. A cet effet, une zone de recharge a été définie, principalement la surface du plan d'eau et ses alentours.
- Les prélèvements : Ils correspondent à la quantité d'eau prélevée dans le barrage pour les travaux domestiques, agricoles et pour l'abreuvement des animaux. Cette quantité a été évaluée dans les études antérieures et elle est

estimée à $V = 840000 \text{ m}^3/\text{saïson}$ (Fowé et al, 2014, submitted). De juillet en novembre, les prélèvements sont considérés comme nuls car c'est la période pluvieux. Etant donné que la simulation se fait en régime permanent, les prélèvements seront fixés à **4900 m³/jour** toute l'année.

b) Les paramètres hydrodynamiques

Les essais de pompage répondent essentiellement à un objectif de connaissance des caractéristiques et performances des ouvrages de captage et des systèmes aquifères exploités. Les fiches des essais de pompages sur les forages de Boura ont été mises à notre disposition par l'entreprise GEOFOR (Annexe 5). Ce sont des essais à courte durée dits essais par paliers enchainés comprenant 2 ou 3 paliers à débit constant. Ces essais ne permettent pas d'estimer les paramètres hydrodynamiques des ouvrages (la transmissivité et la conductivité hydraulique) par les méthodes analytiques (Theis, Jacob, etc...). Les valeurs de conductivité hydraulique affectées aux différentes couches pour commencer la simulation, ont été choisies dans la littérature (Tableau 5).

Tableau 5: Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique dans divers sol

K (m/s)	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Perméabilité											
Types de sols	Gravier sans Sable ni éléments fins		Sable avec gravier		Sable grossier à sable Fin		Sable très fin Limons grossier à limon argileux		Argile limoneuse à argile homogène		
Infiltration	Excellente		Bonne		Moyenne à faible		Faible				

La couche d'altération composée essentiellement de sable et d'argile aura une conductivité hydraulique comprise entre 10^{-7} m/s et 10^{-5} m/s . En ce qui concerne la fissure du sous sol, elle

a une perméabilité supérieure à la couche d'altération. Des valeurs de conductivité hydraulique obtenues d'après les travaux de Koita (2010) sont : couche fissurée et granite fracturé est comprise entre $2,510^{-8}$ m/s et $3,210^{-6}$ m/s. Ces valeurs ont été obtenues après l'interprétation des essais de pompage dans les granites.

c) Structure du modèle

Le modèle est constitué de trois (03) couches superposées (figure 11). L'épaisseur de chaque couche varie à la fois en fonction de la topographie et en fonction de la lithologie des roches. A partir du modèle conceptuel géologique et hydrogéologique, la structure de l'aquifère se présente comme suit :

Une couche altérite : L'élévation de cette couche correspond la surface topographique du terrain naturel et sa base correspond au toit de la couche fissurée.

Une couche fissurée : Son toit correspond à la base de la couche altérite et sa base représente le toit du socle sous-jacent.

Le socle sain : c'est la dernière couche. Son épaisseur est si importante qu'aucun forage n'a pu la traverser (on suppose elle est infinie). Mais dans le modèle, son épaisseur est fixée à 100 m. Quelques fractures majeures obtenues lors du traitement des images sont introduites dans le socle sain.

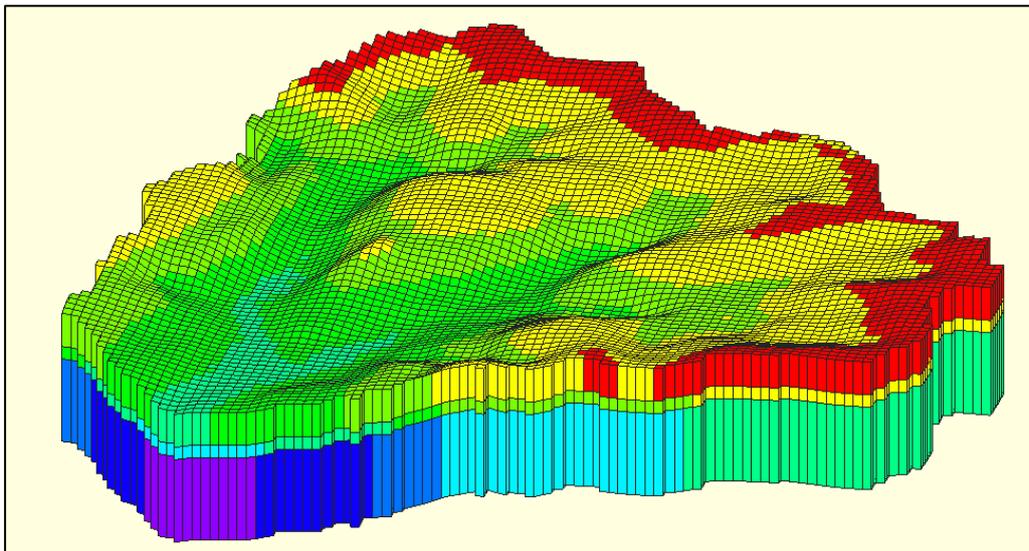


Figure 11: Modèle a trois couches avec maillage 3D grid

d) Conditions aux limites

En milieu fissuré, les lignes de crête des bassins versant coïncident généralement avec les remontées de socle. Donc, on supposera que le bassin hydrologique se superpose au bassin hydrogéologique dans ce travail. Les limites du modèle qui correspondent aux lignes de partage des eaux, sont considérées comme des limites à flux nul. C'est une condition de type Neuman homogène. Cette condition fixe la valeur de la dérivée de la charge sur les limites du bassin tel que :

$$\frac{\partial h}{\partial X} = \frac{\partial h}{\partial Y} = \frac{\partial h}{\partial Z} = 0$$

Des conditions aux limites imperméables sont appliquées à la digue du barrage. La retenue est considérée comme un lac artificiel à usage humain avec un paramètre de résistance à l'échange entre la retenue et la nappe phréatique (la drainance)

Les drains sont matérialisés dans le bassin. Ils représentent les principaux canaux drainant les eaux jusqu'à la retenue. La conductance du drain est déterminée à partir de la formule suivante :

$$C = \frac{K * A}{L}$$

C : la conductance ((m²/s)/m²)

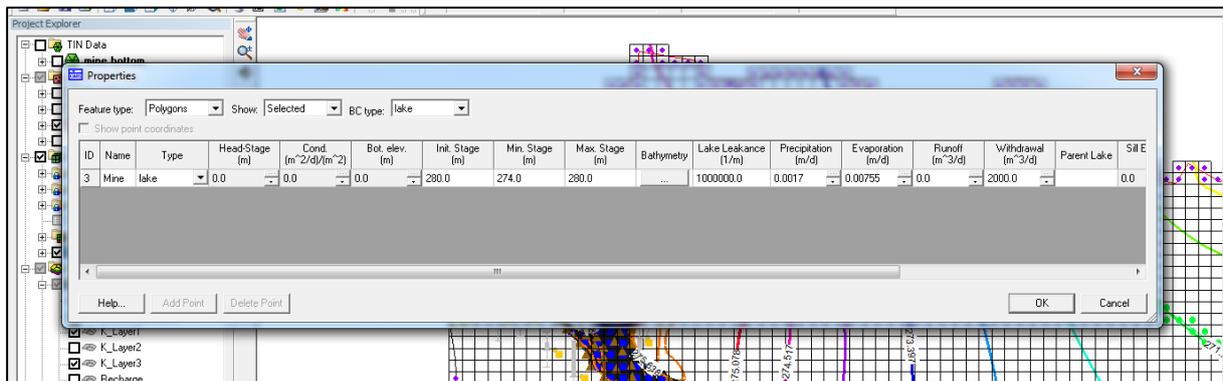
K : la conductivité hydraulique dans la couche altérite (m)

A : la Section du drain (m²)

L : la longueur du drain (m)

Autres paramètres d'entrées

PARAMETRES D'ENTRES	VALEUR
Charge spécifique du plan d'eau :	279m
La charge initiale du plan d'eau :	279m
La charge minimale :	278m
La charge maximale :	280m
Le ruissellement :	Nul
L'épaisseur de la couche d'infiltration du lit du lac :	1m
L'élévation de la partie inférieure de la couche d'infiltration :	274.3m



Chapitre 3 : RESULTATS

I. Carte des linéaments

I.1- Résultat des différents traitements

La figure 12 présente les résultats des différents traitements appliqués sur les images Landsat

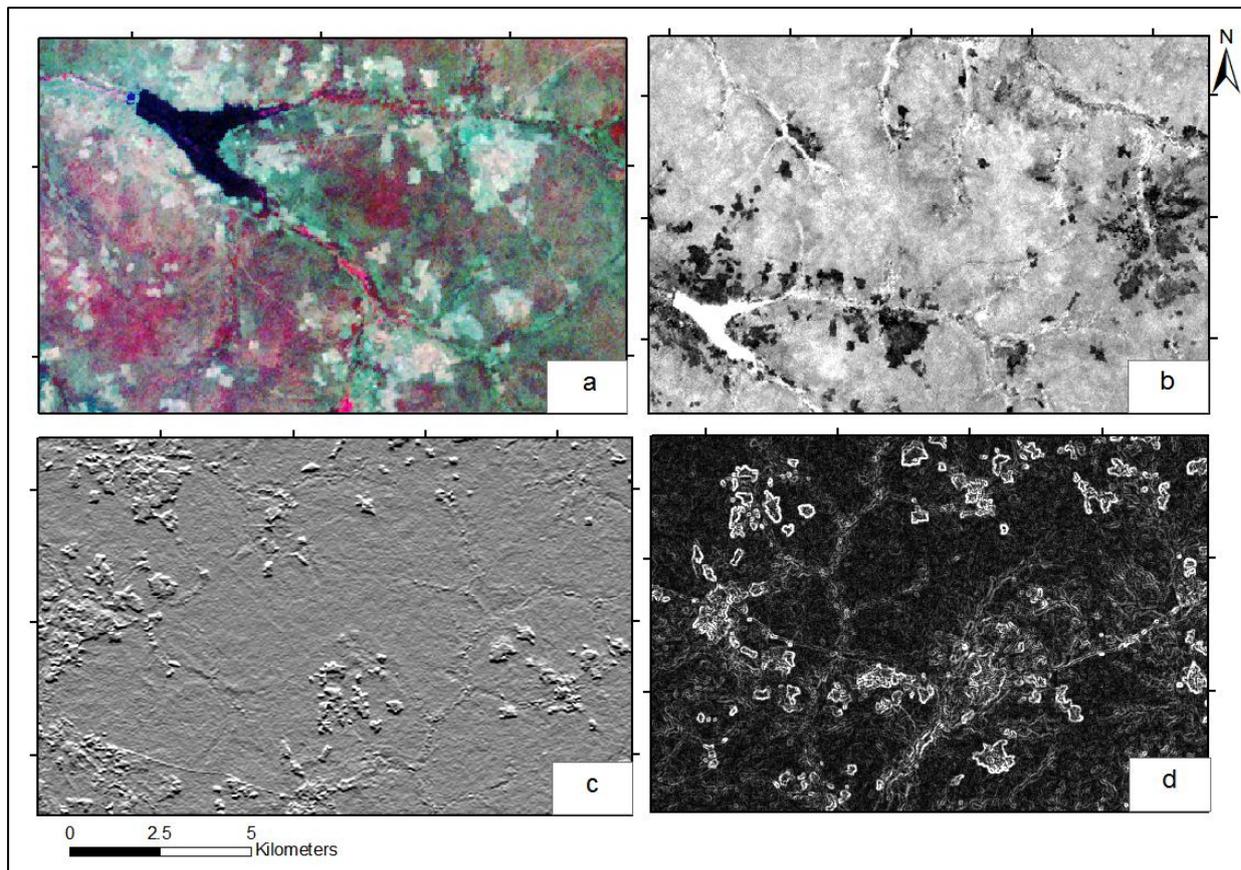


Figure 12: Images issues des différents traitements;(a) composition colorée;(b) combinaison de bande; (c) filtre sobel; (d) filtre directionnel

Le relevé de toutes les discontinuités images sur l'ensemble des images traitées à l'exception des routes, a permis de dresser la carte des linéaments détaillés de la zone d'étude (figure 12). Ces linéaments ont été validés à partir de la carte photo-géologique préexistante (Annexe 3) et de la position des forages à gros débit par rapport aux linéaments pour obtenir la carte des fractures majeures (figure 14).

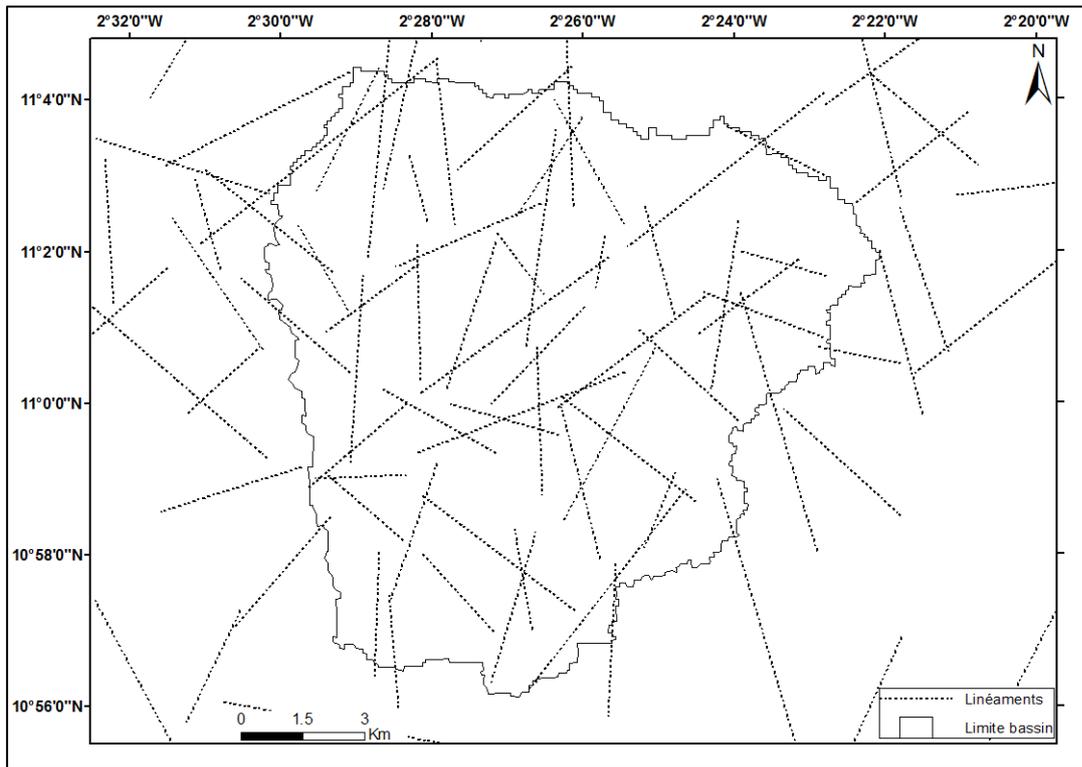


Figure 13: Carte des linéaments issus du traitement des images Landsat

I.2- Validation de la carte des linéaments

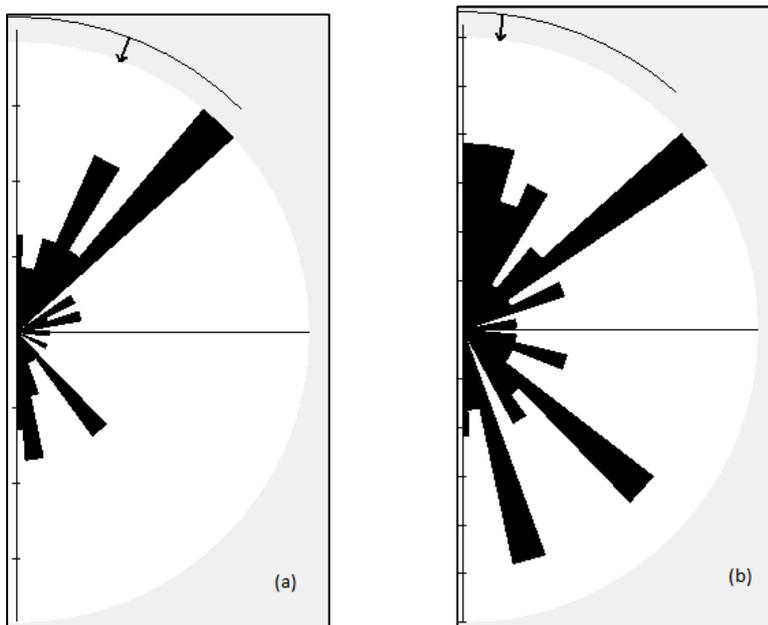


Figure 14: Rosace directionnelle des fractures relevées sur carte photo-géologique (a) et des linéaments issus du traitement des images (b)

Il ressort de l'observation des rosaces directionnelles (figure 14) que les directions principales des linéaments en nombre identifiés par le traitement des images sont : N0-N10, N10-N20,

N140-N150, N120-N130, N150- N160. Les directions prédominantes des fractures en nombres issues de la carte photo-géologique sont : N20-N30, N40-N50, N120-N130, N150-N160. Ces directions sont aussi représentées et presque identiques à celles relevées sur les images satellitaires.

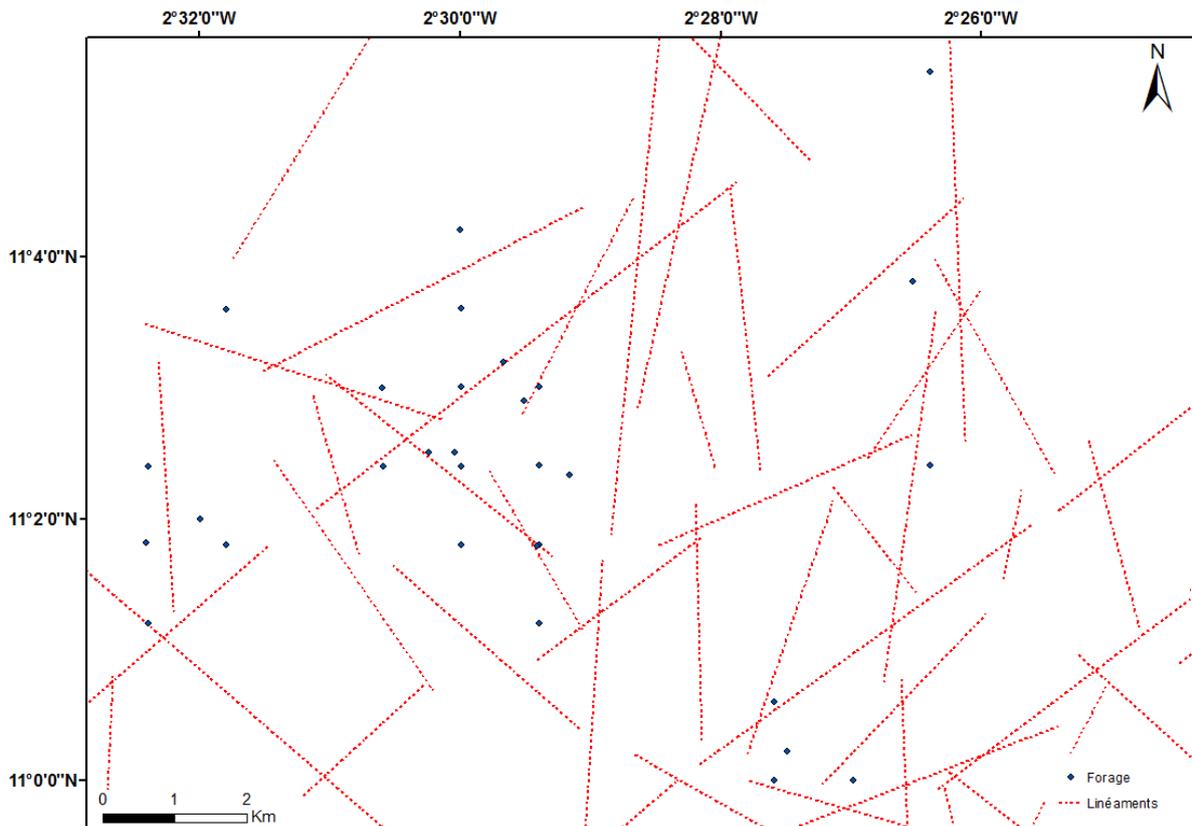


Figure 15: Position des forages par rapport aux linéaments

La superposition de la cartes de forage à la carte des linéaments (Figure 15) montre que la plupart des forages sont positionnés sur des linéaments ou à proximité de ceux-ci.

II. Description du sous-sol et identification des fractures

La figure 16 présente deux (02) panneaux ;(a) et (b) . Le panneau (a) est celui qui passe par le forage F3. Les valeurs de résistivité varient entre 10 et 500 Ω .m. Pour le panneau (b), réalisé pour apprécier la lithologie, les résistivités dominantes sont comprises entre 40 et 1000 Ω .m.

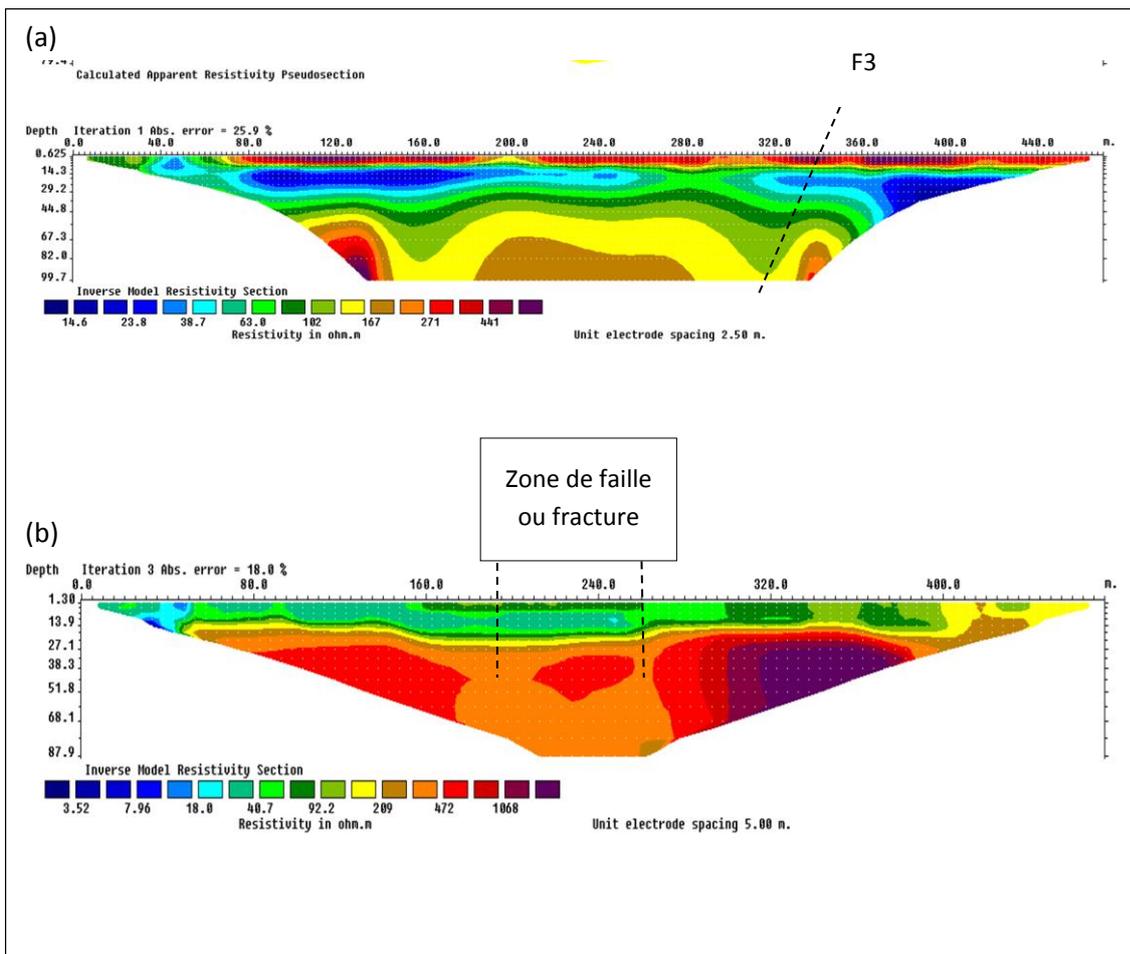


Figure 16: Panneaux de validation des linéaments et confirmation de la lithologie (a) panneau 1 (b) panneau 2

III. Evolution de l'humidité

III.1- Prospection en aval de la digue

Le profil 1 a été déployé à 20 m de la digue. Aucune électrode n'était implantée dans l'eau lors de la mesure. Le profil 2 a été réalisé au pied du talus aval de la digue. Les électrodes passant par le déversoir entre 290 m et 340 m étaient implantées dans de l'eau stagnante due aux dernières pluies. (Voir photo 2)

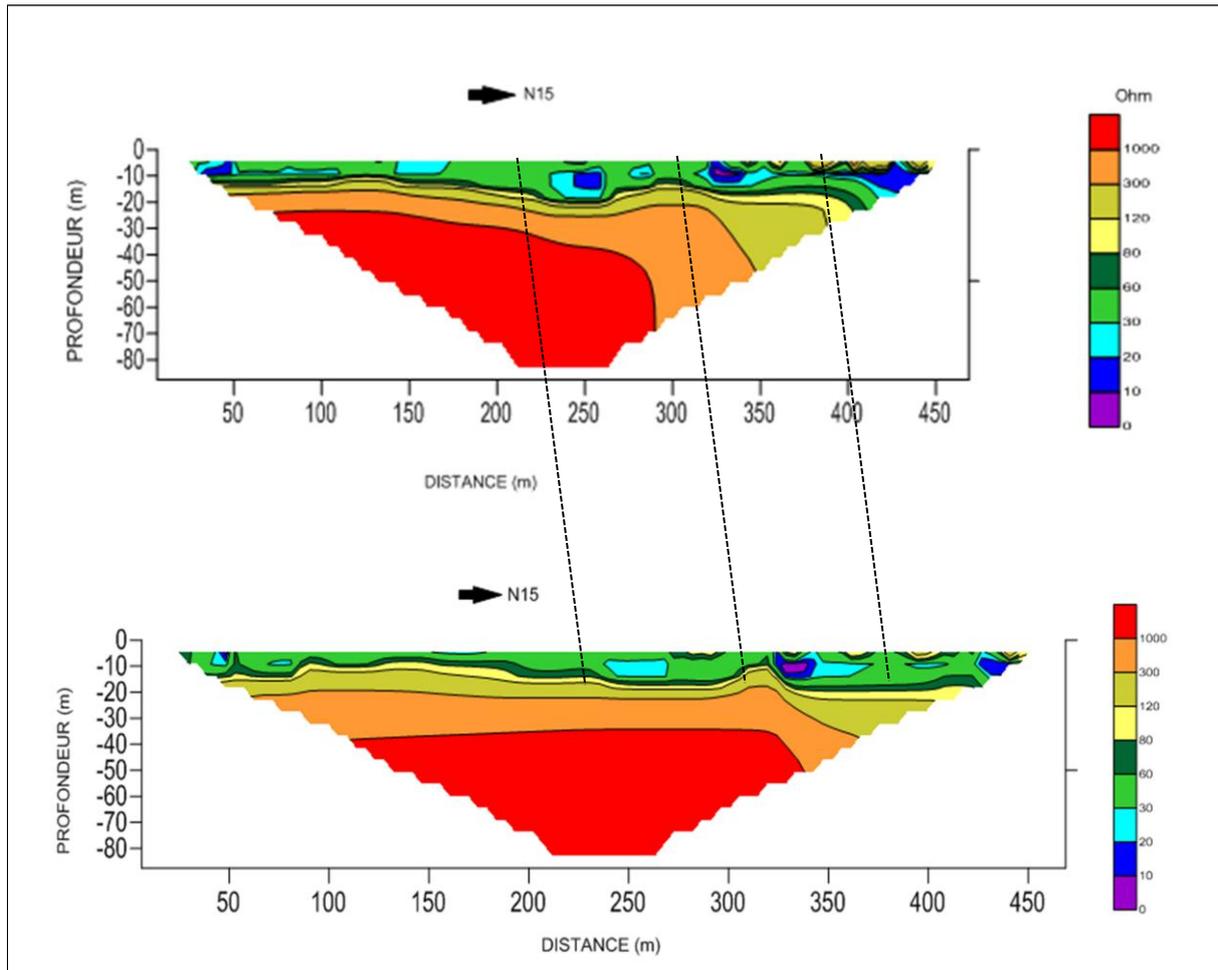


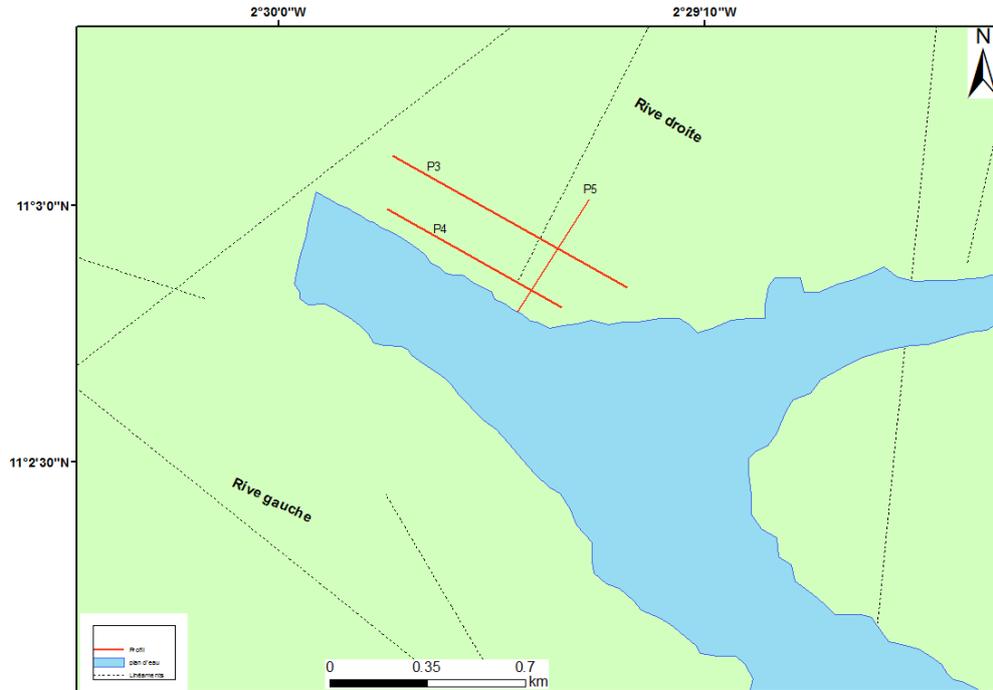
Figure 17: Profils réalisés en aval de la digue; (a) profil 2, (b) profil 1



Photo 2 : Disposition des panneaux en aval de la digue.

III.2- Prospection sur la rive droite

La figure 18 présente trois (03) profils réalisés sur la rive droite. P3 et P4 sont parallèles et P5 les recoupe avec une direction de N32. Ici, les valeurs de résistivité prépondérantes vont de 1 Ω .m à 100 Ω .m.



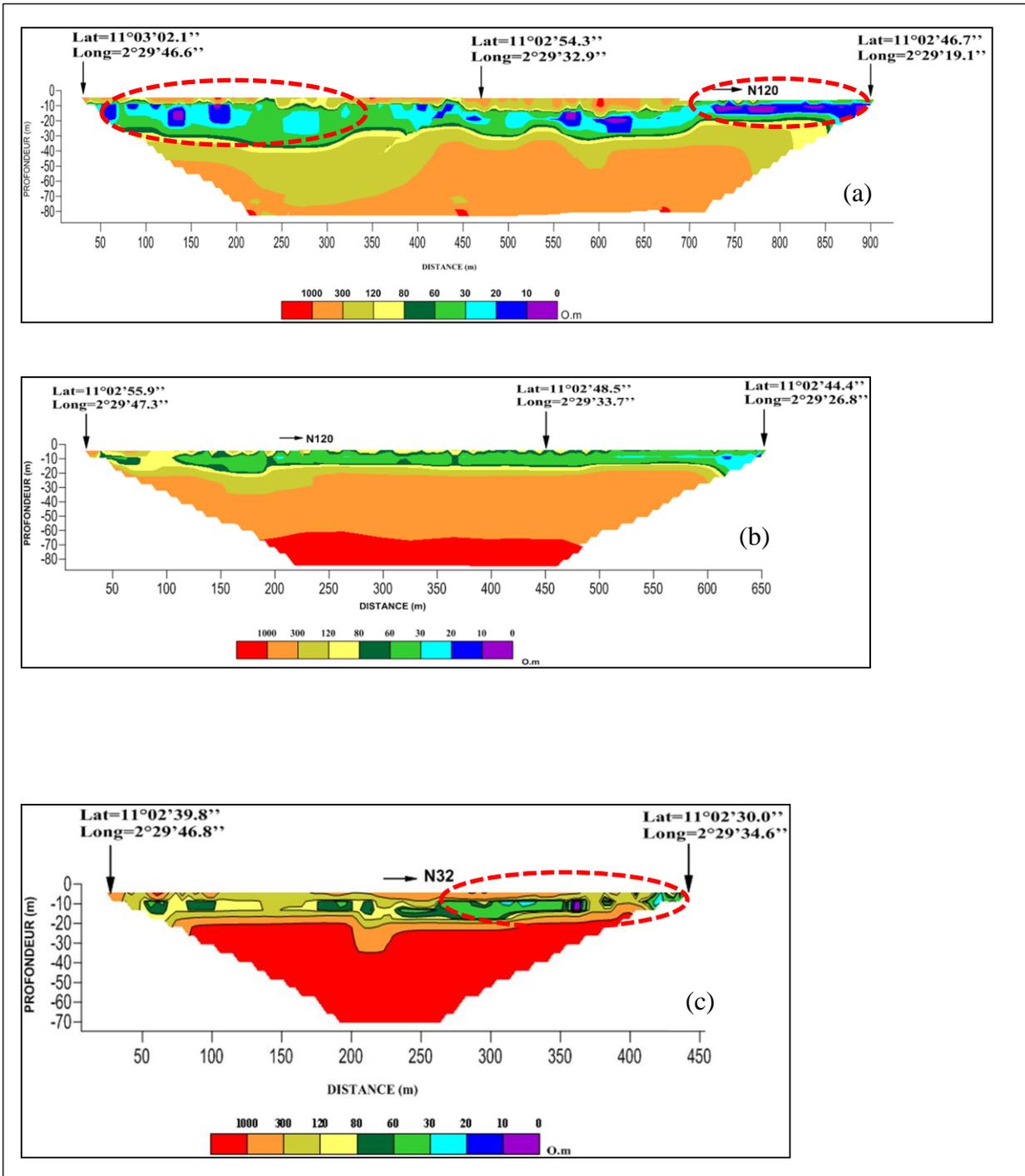
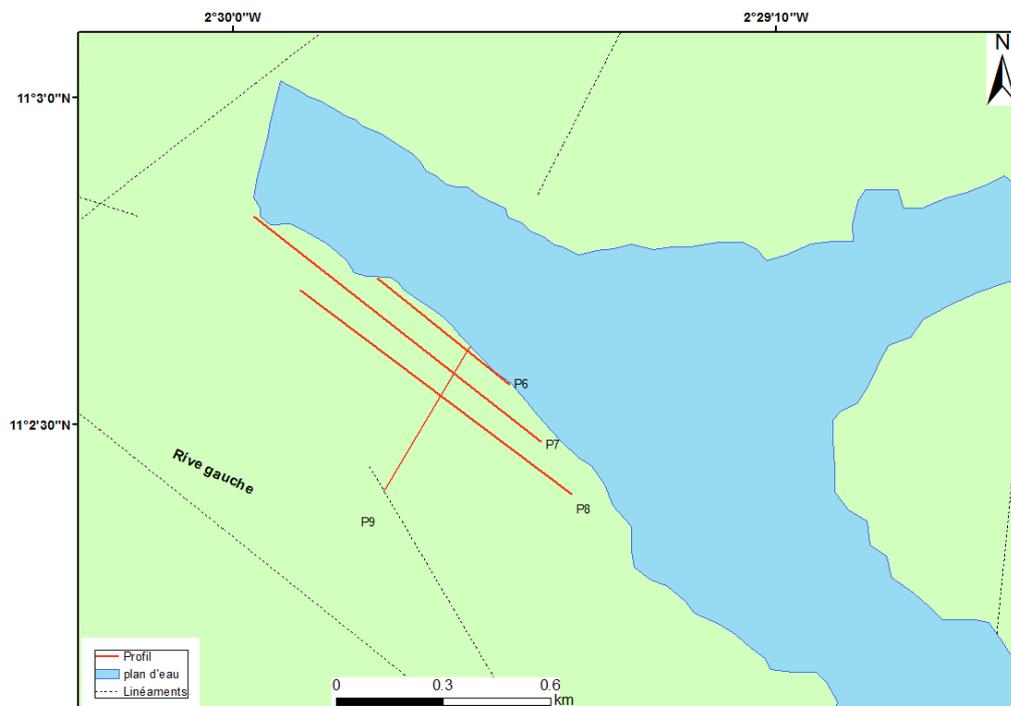


Figure 18: Profils électriques 2D sur la rive droite ; (a) panneau 4 ; (b) panneau 3 ; (c) panneau 5

III.1- Prospection sur la rive gauche

La figure 19 présente trois (03) panneaux parallèles et un (01) panneau recoupant les trois autres avec une direction de N32. Les résistivités prépondérantes sont celles inférieures à 100 $\Omega.m$



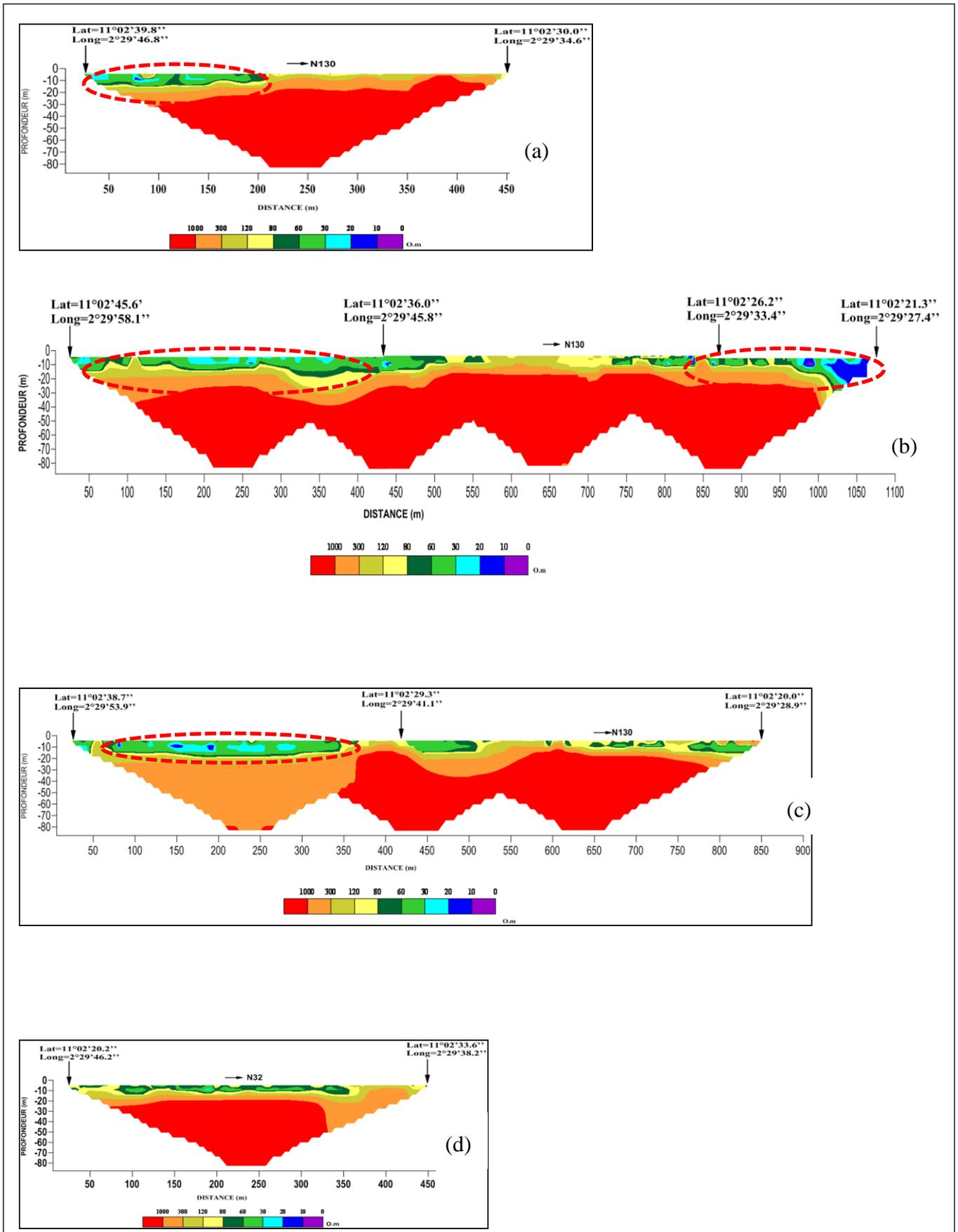


Figure 19: Profils 2D sur la rive gauche; (a) panneau 6 , (b) panneau 7, (c) panneau 8, (d) panneau 9

Tableau 6: Valeurs prépondérantes de résistivité sur les figures 16 et 17

	Numéro du profil	Couleur de la résistivité	Gamme de résistivité en $\Omega.m$
Rive gauche	P3	bleue	< 10 $\Omega.m$
		verte	10 $\Omega.m$ - 100 $\Omega.m$
	P4	bleue	< 20 $\Omega.m$
		verte	20 $\Omega.m$ - 100 $\Omega.m$
	P5	bleue	< 35 $\Omega.m$
		verte	35 $\Omega.m$ - 100 $\Omega.m$
Rive droite	P6	bleue	< 200 $\Omega.m$
		verte	200 $\Omega.m$ – 500 $\Omega.m$
	P7	bleue	< 35 $\Omega.m$
		verte	35 $\Omega.m$ - 160 $\Omega.m$
	P8	bleue	< 30 $\Omega.m$
		verte	30 $\Omega.m$ - 160 $\Omega.m$
	P9	bleue	<35 $\Omega.m$
		verte	35 $\Omega.m$ - 200 $\Omega.m$

Après avoir identifier les zones de faible résistivité électrique donc conductrices, l'épaisseur de ces zones a été prises sur chaque panneau réalisé. Une base de donnée a été constituée à partir de ces épaisseurs en attribuant à chaque électrode l'épaisseur de sa zone conductrice de surface. L'interpolation par la méthode de distance inverse de tous ces points obtenus, a permis d'établir une carte d'évolution de l'humidité (figure 20)

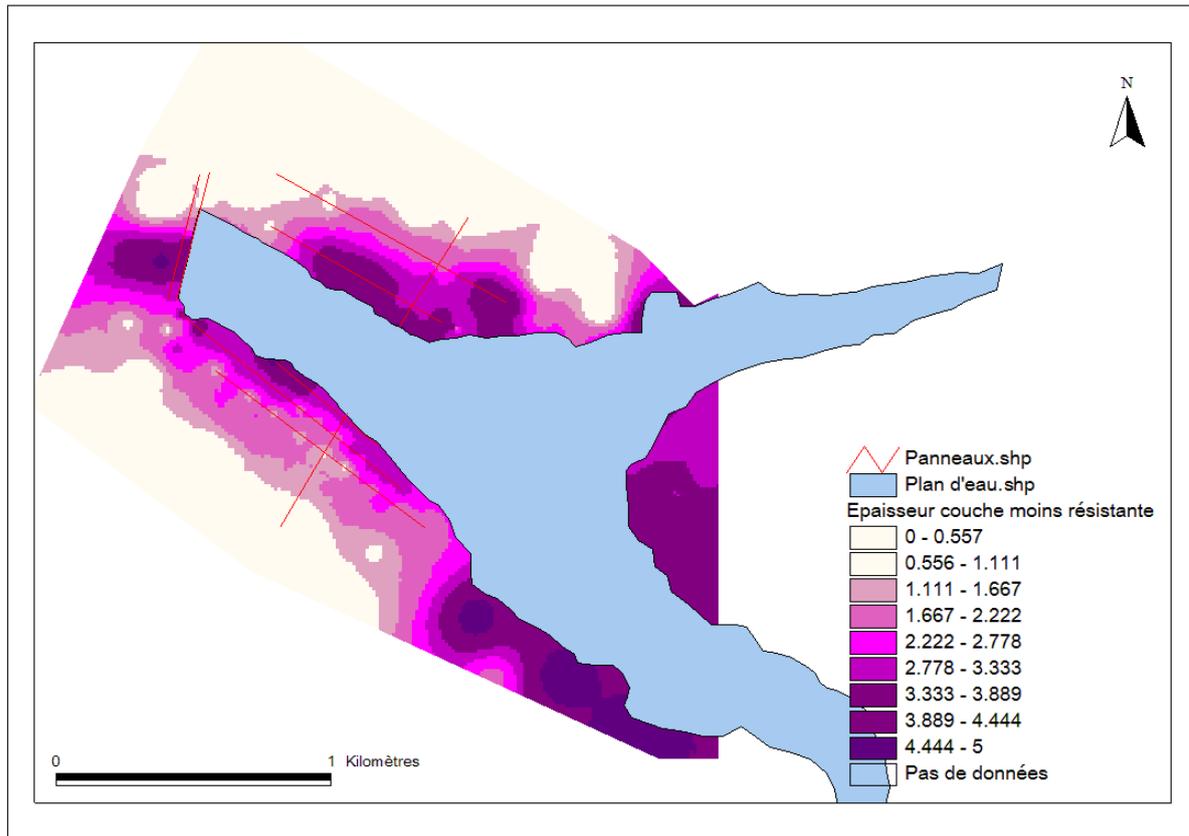


Figure 20: Carte de l'évolution spatiale de l'humidité

IV. Piézométrie du bassin versant

IV.1-Variation du niveau d'eau

Les variations du niveau d'eau dans les forages et puits ont été obtenues grâce à des mesures effectuées sur le terrain (figure 21). Les mesures piézométriques ont permis de suivre le niveau d'eau dans les forages en fonction de la variation de la cote d'eau de la retenue. Sept (07) ouvrages ont fait l'objet de test.

Ouvrages	F1	F8	P1	F2	F3	F5	F12
Distance (m)	270	180	35	280	144	200	460

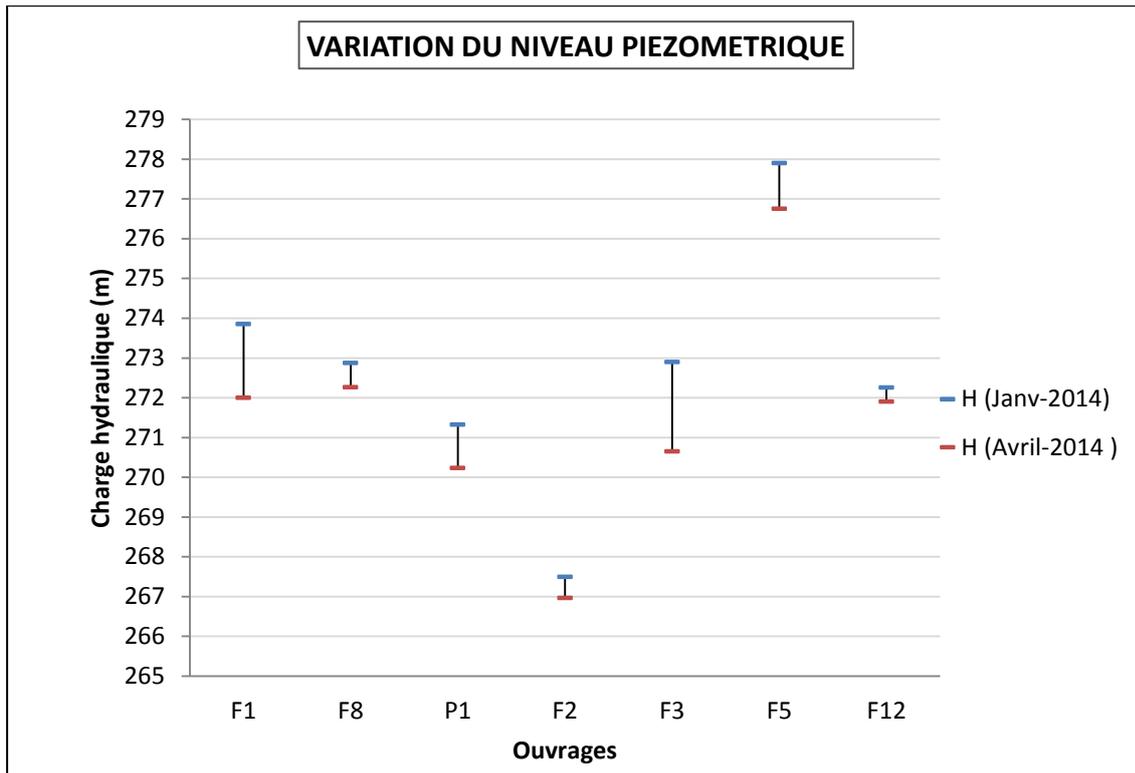


Figure 21: Variation saisonnière du niveau d'eau dans les puits et forages autour de la retenue

La baisse du niveau piézométrique est due au fait que les dernières mesures ont été prises dans le mois d'Avril, ce qui correspond à la fin de la saison sèche. Mais une variation du niveau piézométrique de plus de 1m (dans un intervalle de trois mois) des ouvrages autour de la retenue peut être liée à l'existence d'une interaction entre la retenue et la nappe phréatique, ce qui peut s'expliquer par le fait que lorsque le niveau de la retenue baisse cela entraîne une baisse des niveaux piézométriques.

Pour comprendre le sens de l'écoulement entre la retenue et la nappe phréatique, les lignes de courant ont été tracées à partir des niveaux piézométriques du 02 Avril 2014. (figure.22)

IV.2-Dynamique de l'écoulement

- En rive gauche les isopièzes présentent une concavité tournée vers le Sud-Ouest. Les lignes de courant sont divergentes et orientées NE-SO, donc fuyant la retenue (figure 21). Par ailleurs, l'espacement entre les courbes hydroisohypses augmente progressivement lorsqu'on s'éloigne de la retenue. Le gradient hydraulique diminue (passant d'environ de $1,57.10^{-2}$ à $1,85.10^{-2}$) ; ce qui entraîne une diminution de la vitesse. Donc sur cette rive, la nappe draine la retenue.

- Par manque de données en rive droite, les isopièzes n'ont pas été tracées. Néanmoins, les premières lignes de courant montrent un écoulement du lac vers la nappe phréatique.

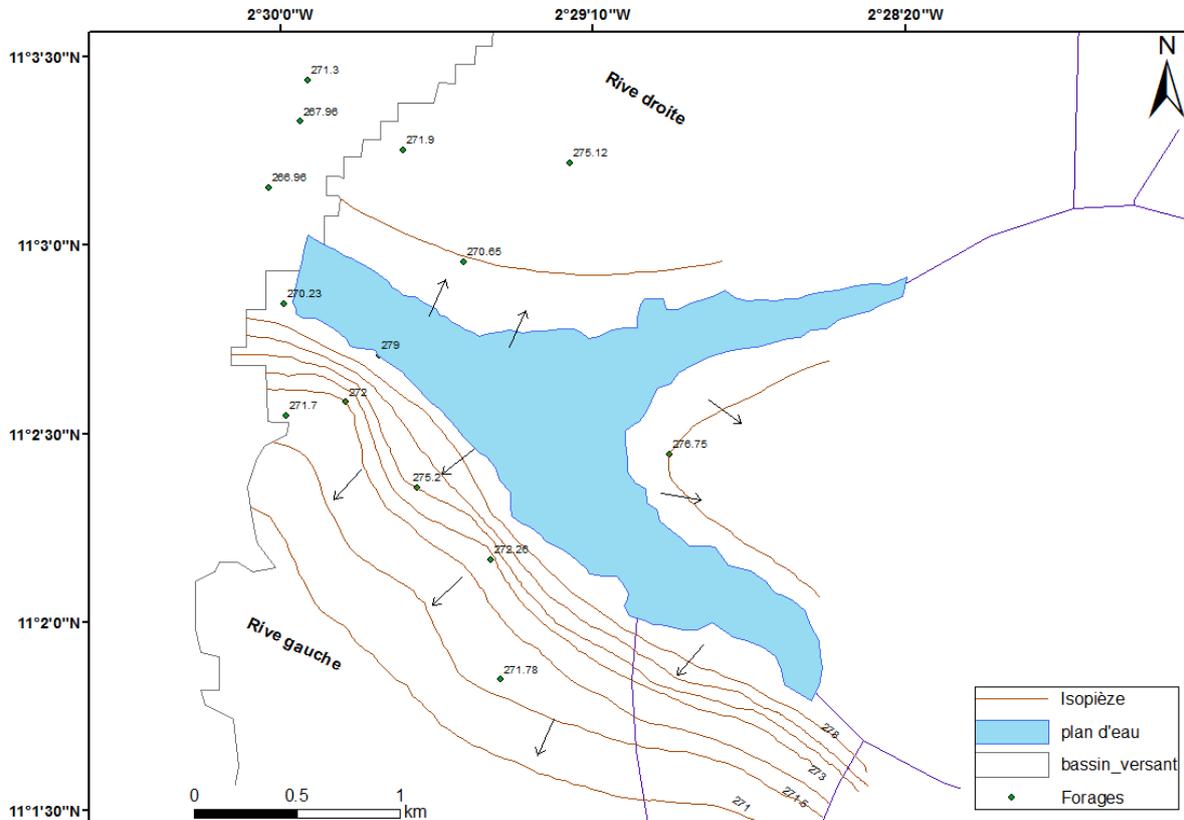


Figure 22: Carte piézométrique autour de la retenue de Boura.

La carte piézométrique autour de la retenue de Boura a été établie à partir des mesures piézométriques effectuées sur les ouvrages (puits et forages) de la commune rurale. Cette carte a permis de comprendre la dynamique des écoulements souterrains autour de la retenue. L'analyse de la carte piézométrique montre que la principale source d'alimentation de la nappe phréatique est la retenue. Que ce soit en rive gauche ou en rive droite, la charge au niveau du lac est plus élevée que celle des forages, donc la nappe drainerait le lac.

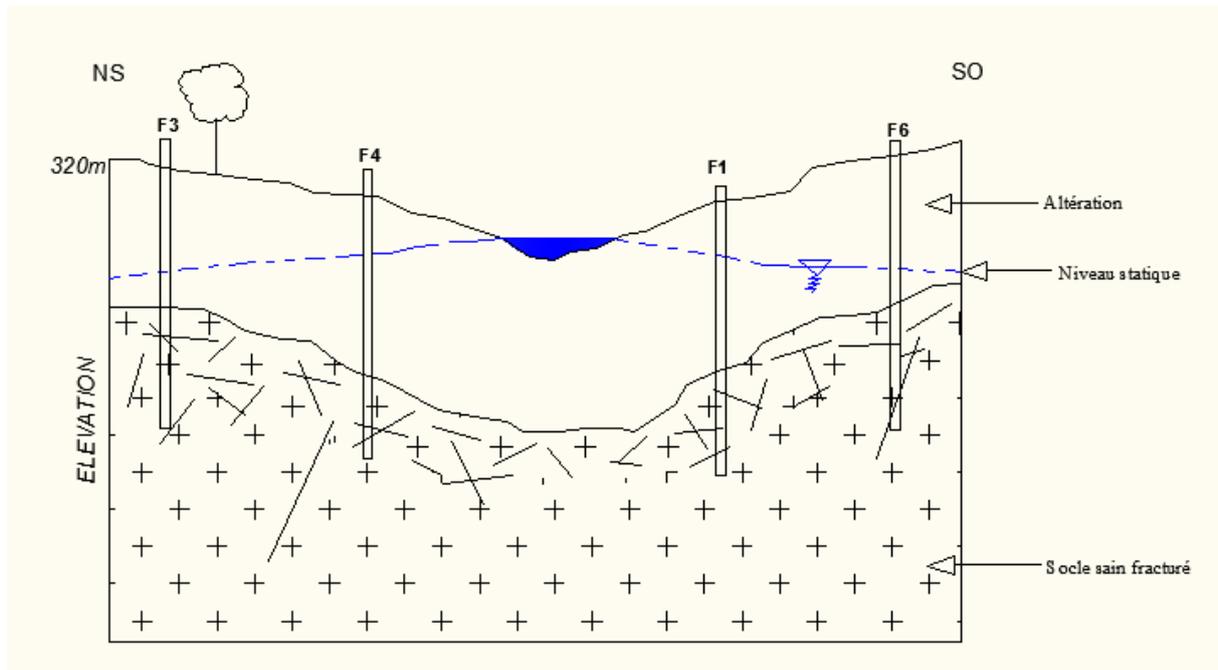


Figure 23: Evolution de niveau statique autour de la retenue

Pour quantifier le flux échangé entre la retenue et la nappe phréatique, un modèle numérique des écoulements souterrains sera réalisé en prenant en compte les paramètres de la retenue.

V. Bilan de masse

L'échange entre le lac et la nappe a été simulé en régime permanent. Les charges simulées sont proches de celles mesurées sur le terrain. L'écoulement souterrain se fait du lac vers la nappe phréatique. Les valeurs de conductivité hydraulique de départ ont peu varié après la simulation. Ainsi dans le socle, les fractures et l'horizon fissuré, les valeurs restent respectivement à $K_s = 10^{-7}$ m/s, $K_f = 10^{-4}$ m/s et $K_h = 10^{-6}$ m/s. Mais les conductivités hydrauliques ont augmenté dans la couche d'altération passant de $K = 10^{-7}$ m/s à $K_1 = K_3 = 10^{-6}$ m/s et $K_2 = 10^{-5}$ m/s pour les zones Z1, Z2 et Z3. Le bilan du modèle (Tableau 8) a enregistré un gain $222 \text{ m}^3 / \text{jour}$ et un flux sortant au niveau du lac de $14170 \text{ m}^3 / \text{jour}$. Le modèle a généré une recharge $14650 \text{ m}^3 / \text{j}$ ($3,310^{-5} \text{ mm/j}$).

Tableau 7 : Valeurs de conductivités hydrauliques retenues

		Conductivité Hydraulique (m/s)	Conductivité Hydraulique (m/J)
Couche altérite	Zone_1	10^{-6}	0.0864
	Zone_2	10^{-5}	0.864
	Zone_3	10^{-6}	0.0864
Couche fissurée		10^{-6}	0.0864
Socle sain		10^{-7}	0.00864
Fracture		10^{-4}	8.64

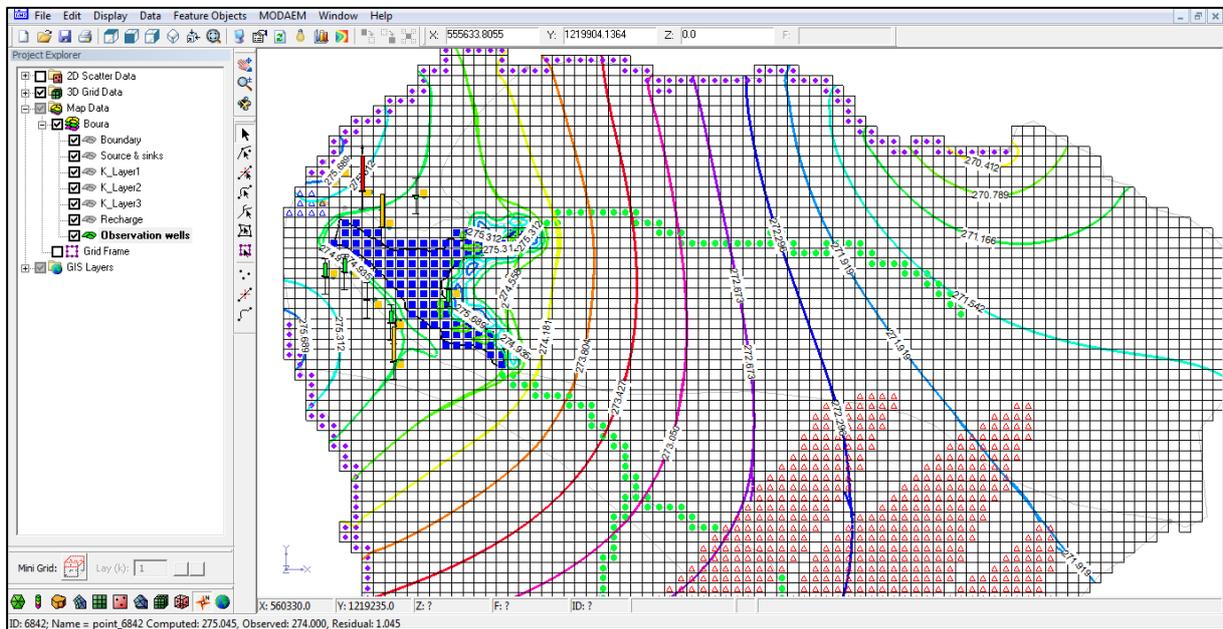


Figure 24: Charges observées après simulation

Tableau 8: Bilan journalier des échanges entre l'eau de surface et l'eau souterraine

Flow Budget

Cells | Zones

Number of selected cells: 30000

Sources/Sinks	Flow In	Flow Out
Storage		
Constant heads	6761.5701936556	-7482.321384089
Drains	0.0	0.0
General heads		
Rivers		
Streams		
Wells	0.0	-48.0
Recharge	14650.599365234	0.0
Evapotranspiration		
Lake	222.08931732178	-14170.40612555
Total Source/Sink	21634.258876212	-21700.72750963
Top	0.0	0.0
Bottom	0.0	0.0
Left	0.0	0.0
Right	0.0	0.0
Back	0.0	0.0
Front	0.0	0.0
Total Zone Flow	0.0	0.0
TOTAL FLOW	21634.258876212	-21700.72750963
Summary	In - Out	% difference
Sources/Sinks	-66.46863342232	-0.307237857338
Cell To Cell	0.0	0.0
Total	-66.46863342232	-0.307237857338

Chapitre 4 : ANALYSES ET DISCUSSION

I. Carte des linéaments

La carte des linéaments du bassin de Boura est le résultat de plusieurs traitements effectués sur les images satellitaires. Ces linéaments donnent un aperçu de la fracturation du milieu souterrain de la zone d'étude. Il faut noter que des erreurs peuvent survenir dans le relevé des linéaments. Ces erreurs peuvent être dues à une mauvaise appréciation des structures linéaires ou parfois à la qualité même des images. De plus certaines fractures présentes sur la carte photo-géologique n'ont pas été repérées lors du traitement des images satellitaires. Ce fait est certainement à mettre sur le compte de la photo interprétation car ces opérations sont souvent délicates et requièrent une attention particulière dans le relevé de ces linéaments (Sorokoby et al, 2000) cité par Kouamé (2009). Il peut se poser aussi le problème de résolution des images satellitaires.

II. Piézométrie

Les niveaux piézométriques calculés montrent que de Janvier à Avril le niveau d'eau a baissé en moyenne de 1 m (figure 22). La variation la plus importante est observée en F3 avec une baisse de 2,25 m de Janvier à Avril 2014. La distance la plus courte des forages par rapport à la retenue a été calculée afin d'apprécier la variation du niveau piézométrique en fonction de la distance forage-retenu. Il ressort de l'analyse que plus le forage est proche de la retenue, plus la baisse du niveau d'eau est importante. Le forage F12, le plus éloigné de la retenue, enregistre une baisse du niveau piézométrique de 0,35 m.

Les valeurs obtenues peuvent être imprécises car les mesures n'ont pas été faites dans les conditions optimales. En effet, la plupart des forages sont exploités par les populations de la localité pour s'alimenter en eau potable. Elles puisent l'eau chaque jour de 5h à 19h soit environ 14h/j, mais pas en continu. Une mesure piézométrique nécessite que la nappe soit en état d'équilibre. Lors de la prise des différentes mesures, il s'est trouvé que certains des forages avaient commencés à être pompés avant la prise des mesures. De ce fait, la nappe n'était plus en équilibre et les valeurs obtenues ont donc été sous évaluées. A cela, il faut ajouter l'imprécision du GPS ($\pm 4 m$), de la carte topographique disponible et l'insuffisance de forages et piézomètres qui ne permettent pas d'établir une carte piézométrique fiable du bassin. Cette piézométrie influencera les résultats de la modélisation.

III. Sections 2D des panneaux électriques

III.1- Structure du sous-sol et identification des fractures.

Le panneau 1 de la figure 16 montre la présence d'une couche résistante en surface à plus de 350m d'altitude. Cette couche de surface dont la résistivité est supérieure à 100 $\Omega.m$ correspond à l'altération sableuse composée essentiellement de sable et de gravier. Cette description est confirmée par les profils d'altération observés dans de nombreux puits et fosses abandonnés. La gamme des faibles valeurs de résistivité entre 5 et 28 $\Omega.m$ est presque liée à la présence du limon ou de l'argile qui repose sur une couche argilo-sableuse (50 à 100 $\Omega.m$). Par ailleurs, les couches profondes dont les résistivités sont supérieures à 250 $\Omega.m$ pourraient représenter le socle très fracturé et altéré.

Le panneau 2 met en évidence une zone d'intrusion indiqué par la flèche sur la figure 16. L'anomalie peut s'expliquer par une remontée importante du socle. La présence de la zone de discontinuité et l'existence d'interruption structurelle est probablement liée à des fractures ou des failles. De plus, les zones où l'épaisseur d'altération est importante et semble s'incruster dans la roche saine représentent également des fractures. Ces zones de discontinuité pourraient être considérées comme les principaux couloirs de circulation des eaux souterraines responsables de fuite verticale. Cette assertion est confirmée par le linéament qui passe par le forage F3.

Les modèles 2D de résistivité réelle confirment les informations disponibles sur la structure du sous-sol par les logs de forages, à savoir : une couche d'argile, de sable d'environ 20 m d'épaisseur reposant sur un substratum granitique très fissuré. La couche d'argile semble très homogène et les variations de résistivité dans cette couche peuvent être attribuées aux différences de teneur en eau. La succession lithologique et les caractéristiques hydrauliques des couches autour de la retenue contribuent efficacement aux fuites à travers la membrane des formations perméables de la zone d'étude.

III.2- Détection de fuites et évolution de l'humidité

III.2.1-Fuite au niveau de la digue

Dans le déploiement du profil 2 de la figure 16, les électrodes (60^{ème} et 67^{ème}) passant par le prolongement du déversoir étaient implantés dans une zone relativement humide. A partir de la 72^{ème} électrode, le sol était très dur avec les affleurements de cuirasse. A 60 m en face du profil, se trouve une mare qui persiste même en saison sèche. Du profil 2 au profil 1, la résistivité des couches varie brusquement. Cependant, les sections 2D montrent des zones de faibles résistivités qui demeurent constantes dans l'espace, précisément au niveau du centre de la digue et du déversoir. Le corps de la digue étant en bon état et ne présentant aucune fissure, en premier plan le phénomène de renard peut être écarté. La variation de la résistivité des couches est due à la teneur en eau dans le sol. Donc les endroits encadrés sur la figure 17 sont des zones très conductrices et peuvent être des couloirs par où s'échapperait l'eau du barrage pour alimenter la mare en aval.

III.2.2-Humidité sur la rive droite

Le profil 3 de la figure 18 est à environ 230 m du plan d'eau. Il est parallèle au profil 4 qui passe dans la zone inondable du cours d'eau. Le profil 4 est à 80 m du plan d'eau avec une direction N120. Le profil 5 avait sa première électrode implantée dans l'eau. Il recoupe les profils 3 et 4.

Les valeurs de résistivité qui varient entre 35 $\Omega.m$ et 250 $\Omega.m$ sont liées aux sables humides ou à de l'argile. Le profil 5 débute dans une zone humide qui s'étend sur 200 m. Bien que le profil 4 soit dans une zone inondable, les résistivités des couches superficielles, nettement élevées (170 $\Omega.m$ -250 $\Omega.m$) indiquent la présence de sable sec comme constaté sur le terrain. Cette couche de sable s'épaissit progressivement et devient de plus en plus sèche lorsqu'on s'éloigne de la retenue. La couche sous-jacente (35 $\Omega.m$ - 170 $\Omega.m$) assimilable aux sables humides ou à de l'argile évolue de la même manière.

III.2.3-Humidité sur la rive gauche

A proximité de la retenue, la résistivité des couches superficielles est faible surtout dans la partie gauche du profil 6. En effet, cette partie montre la présence d'une zone très humide qui a également été observée sur le terrain. A 40 m du profil 6, cette zone humide persiste avec des valeurs de résistivité comprises en 20 Ω .m et 120 Ω .m. Le profil 8 situé a 80 m du profil 6 faire apparaitre également cette zone. Mais les travaux sur le terrain semblaient masquer cet endroit puisqu'au-delà de la zone inondable de la retenue, le terrain est très sableux sans aucun signe d'humidité. Ainsi, la réapparition de cette zone peut laisser dire qu'elle est un couloir où s'écoule l'eau du lac. Au centre du profil 8, les résistivités augmentent. Ceci peut s'expliquer par la présence probable du socle.

IV. Modélisation

Les simulations ont été effectuées en s'appuyant sur les données d'un seul mois, puisque les données piézométriques étaient disponibles uniquement pour le mois d'avril 2014. Les résultats ont été obtenus en faisant des suppositions sur les limites hydrogéologiques du bassin. En effet, des conditions de charge imposée ont été utilisées. Ces conditions fixent les charges sur la limite du bassin versant. Ainsi, les flux échangés entre la retenue et la nappe sont assez importants de sorte à ne pas les négliger dans le bilan hydrologique. La quantité d'eau perdue par le lac comprend : la quantité d'eau pour les usages humains (irrigation, abreuvement des animaux, etc.), l'évaporation et la quantité d'eau perdue au profil de la nappe. Avec les prélèvements et l'évaporation estimés respectivement à 4900 m³ et 6650 m³, les pertes par infiltration seront donc 2620 m³/ jour. Le flux entrant dans le lac est du principalement à la précipitation, mais elle peut être du aussi à la résurgence d'aquifère régional. Avec la réalisation des piézomètres en dehors du bassin et l'établissement d'une carte piézométrique couvrant tout le bassin, une étude plus approfondie sur toute l'année et même sur plusieurs années serait intéressant afin d'évaluer les variabilités inter-annuelles.

Conclusion générale et recommandation

Conclusion

Cette étude a permis de caractériser les interactions et de quantifier les flux échangés entre la retenue et la nappe superficielle de Boura. Le traitement des images a permis de discriminer des structures linéaires supposées être des fractures souterraines, qui ont été validées par la suite, par des différentes méthodes. La variation des niveaux piézométriques observée dans les ouvrages a permis d'attester que la nappe phréatique et la retenue sont connectées hydrauliquement.

De plus, les isopièzes tracées à partir des charges hydrauliques des forages ont montré que la nappe drainait la retenue. Les résultats des mesures géophysiques ont contribué efficacement à déterminer des probables lignes de fuite au niveau de la digue du barrage. Cette méthode a mis en évidence des zones très conductrices, probablement des sables humides ou des fractures qui constituent les principaux chemins des fuites d'eau. Elle a également permis d'apprécier le front d'humidité autour de la retenue.

Pour finir, la modélisation numérique de ces écoulements a permis de comprendre l'hydrodynamisme dans le bassin versant et d'estimer les flux échangés entre la retenue et la nappe. Les valeurs de conductivités hydrauliques qui ont permis de reproduire la piézométrie réelle mesurées sur le terrain sont : 10^{-6} m/s ; 10^{-6} m/s et 10^{-5} m/s respectivement pour les zones Z1, Z2 et Z3 de la couche d'altération ; 10^{-6} m/s pour l'horizon fissuré et 10^{-7} m/s pour le socle fracturé. Le bilan du modèle a par ailleurs enregistré une perte par infiltration de 2620 m³ par jour, ce qui semble être une valeur acceptable par rapport à d'autres études. Enfin il a fourni de bon taux de recharge et révélé des gains acceptables pour la retenue (222 m³/jour)

Recommandation

En perspectives, il faut intégrer des données supplémentaires en vue de renforcer les résultats obtenus dans cette étude. Les données énumérées sont :

- L'utilisation de l'imagerie Radar en vue d'une meilleure identification des fractures est souhaitée pour mieux comprendre les relations qui lient les eaux souterraines au lac
- La réalisation de piézomètres autour de la retenue pour mieux apprécier les fluctuations saisonnières. Il est recommandé de faire la piézométrie à l'aide d'un GPS

différentiel afin d'avoir à une même référence pour tous les points et d'ainsi obtenir une carte piézométrique fiable.

- Faire des essais de pompage dans les ouvrages hydrauliques (forages et piézomètres) pour estimer les paramètres hydrodynamiques.
- Faire des levés topographiques sur tout le bassin et surtout la bathymétrie de la retenue afin de disposer d'une carte topographique précise.
- L'utilisation d'outils de modélisation plus performants comme le modèle Feflow et le modèle Cathy est vraiment nécessaire pour donner une estimation réelle des flux échangés entre la nappe phréatique et la retenue.

Bibliographie

- Brodie R., Sundaram B., Tottenham R., Hostetler S., & Ransley T. (2007). *An Overview of Tools for Assessing Groundwater-Surface Water Connectivity*. Canberra: Bureau of rural sciences.
- Castany G. (1965). Unicité des eaux de surface et des eaux souterraines, principe fondamental de la mise en valeur des ressources hydrologiques. *Hydrological Journal of Sciences* 10, pp.22-30.
- Guay C. (2011). *Caractérisation des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (Havelock, Québec)*. Havelock, Québec.
- Karambiri H.; Fowe T.; Barbier B.; Some Y C.; Ibrahim B.; Yacouba H.; Diarra A. (2011). *Hydrological Characterization of the sites of Boura (Burkina Faso) and Binaba II (Ghana)*. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Koita M. (2010). *Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire)*. Université de Montpellier, France.
- Kouamé K.F., Saley B., Bernier E.M., & Lasm T. L. (2009). Extraction linéaire par morphologie mathématique sur une image RSO de RADARSAT-1 : application au socle Archéen de la Côte d'Ivoire. *Journal scientifique (JAS09) de l'AUF Alger* Novembre, 15.
- Koussoubé Y. (2006). *Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso : Cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (province du Yatenga)*. Thèse de Doctorat à l'Université Cheikh Anta Diop. Dakar, Sénégal.
- Lienou G. (1999). Caractérisation des relations eaux de surface - eaux souterraines en milieu tropical sec : exemple du bassin de la Nema (Sine Saloum, Sénégal). *Journal Sud Sciences and Technologies* N°3.

- Linda A.T. (2010). *Détection de fuite dans les barrages en remblai par la méthode de polarisation spontanée et par tomographie électrique : cas de la jonction de deux barrages en remblai*. Université de Montréal.
- Ministère E.D. (2005). *Cadre stratégique régional de lutte contre la pauvreté*. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Montoroi J., Grünberger O., & Nasri S. (2001). Utilité des petits barrages dans la recharge des nappes phréatiques. Recueil des résumés, Séminaire international "Les petits barrages dans le monde méditerranéen. 43-44.
- Savadogo N. (1984). *Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haut Volta : Etude régionale du bassin versant de la Sissili*. Université scientifique et médicale de Grenoble, France.
- Sophocleous M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10, 147-160.
- Subash C., Benoit D., Sushobhan D., & Shakeel A. (2010). Geophysical model of geological discontinuities in a granitic aquifer: Analyzing small scale variability of electrical resistivity for groundwater occurrences. *Journal of Applied Geophysics* 71, 137-148.
- Walid A.F. (2011). Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria. *Journal of Applied Geophysics* 75, 464–471.

ANNEXES

Annexe 1 : **Fiche synoptique du barrage de Boura**

Annexe 2 : **Evaporation**

Annexe 3 : **Caractéristique des images satellitaires**

Annexe 4 : **Carte photo géologique**

Annexe 5 : **Fiche de forage**

Annexe 6 : **Distance linéaments forages**

Annexe 7 : **Essai de pompage**

Annexe 8 : **Données de forage**

Annexe1 : Fiche synoptique du barrage de Boura

La retenue

Cote Retenue Normale (m)	100
Cote Plus Hautes Eaux (m)	100,75
Volume à la cote Retenue Normale (m ³)	4 200 000
Surface plan d'eau à la cote Retenue Normale (ha)	200
Hauteur utile (m)	5

La digue

Type	Homogène en terre compactée
Cote de la crête (m)	101,25
Hauteur maximale (m)	6,25
Longueur en crête (m)	500
Largeur en crête (m)	3,50
Pente talus amont	1V / 2H
Pente talus aval	1V / 2H

L'évacuateur de crue

Type	Déversoir type creager
Débit de dimensionnement (m ³ /s)	60
Charge maximale sur le seuil (m)	0,75
Cote de calage (m)	100
Longueur bassin de dissipation (m)	35
Largeur bassin de dissipation (m)	5
Largeur chenal d'évacuation (m)	Entre 30 à35
Longueur chenal d'évacuation (m)	50

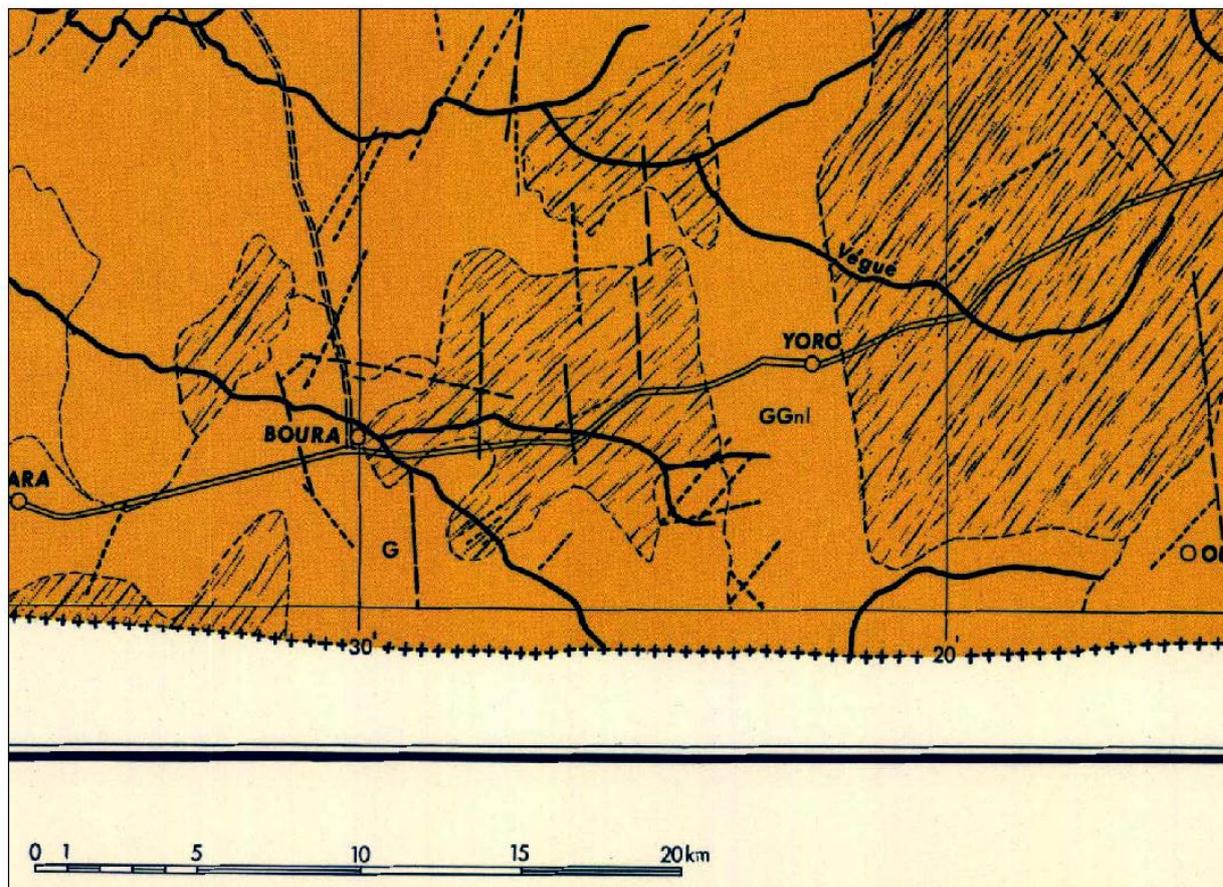
Annexe 2 : Evaporation a la station de Boura en 2013

Station : Boura												
Coordonnées		Lat	N 11°02,58'									
		Long	w 2°29,77'									
Evaporation moyenne journalière				(mm)								
Année	2013											
jours	Janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	Nov	Dec
1	6	7.4	6.3	9.3	9.2	11	9.8	5.8	3.4	3.8	7.2	5.7
2	5.6	6.7	4.6	9.6	9.3	8.1	10.4	4.2	4.2	4.7	7.3	6.6
3	6.2	7.5	7.6	9.7	9.5	9	7.9	5.4	5	4.8	7	7
4	6.8	7.4	8.2	6.5	10.4	9.9	9	5.4	6	4.1	6.8	6.5
5	6.5	7.2	8.3	6.3	9.4	10.1	8.4	5.7	5.7	5.1	7.8	6.1
6	7	7.5	8.9	7.6	10	8	7.4	5.4	4	5.1	8	6.5
7	6.3	6.7	7.6	8.3	9.2	9.7	8.9	4.9	4.8	6.6	7.5	6.5
8	7	7.7	8.4	7.6	9.9	10.6	7.3	3.1	3	4.8	5.6	6
9	6.5	8.2	8.9	9.4	9.3	8.4	5.1	5.5	4.1	4.8	5.4	6.2
10	6.8	7.1	8.8	10.4	10.1	8.9	6.5	4.7	4.8	5.3	5.2	6.7
11	5.3	8.1	8.8	8.9	9.3	10.5	6.4	4.6	3.1	6.9	6.8	6.1
12	6.4	8.2	9.6	9.8	10	9.6	7.9	5.1	4.7	4.5	6.6	6.3
13	7.1	7.9	8	7.6	8.3	8.8	5.9	3.8	4.9	5.9	6.6	6.3
14	6.3	8	8.7	8	9	9.5	8.2	4.3	4.7	6	6	6.5
15	6.8	8.3	8.8	8.3	8.8	10	6.6	4.7	3.7	6	6.4	6.9
16	6.9	7.6	8.1	8.9	8.1	10.4	7.1	4	4.9	6.7	6.7	6.1
17	6.5	8	8.5	7.8	10.1	11.1	7.6	4.8	4.6	6	6.9	6.7
18	7.1	7.9	9.9	8.5	8	7.7	8.8	4.3	5.3	6.3	5	6.5
19	6.6	7.9	6	8.5	9.1	9.4	8.3	4	6.3	6.1	5.5	6.5
20	7	7.3	7.2	9.4	10	8.3	6.8	3.9	6.7	6.4	5.8	6.6
21	6.4	8.2	8.6	9.6	10.5	11	7	3.1	6.9	6.6	6.5	6.2
22	6.4	8.2	8.5	7.1	9.7	8.4	5.5	1	7	6.4	7	5.9
23	6.2	8.3	7.9	8.6	9.5	9.8	5.7	3	6.1	6.1	6.5	6.7
24	6.8	8.2	8.1	8.3	8.6	9.6	6.6	3.7	5.6	6.5	7.3	6.2
25	6.6	8.4	9	9.1	9.4	8	3.9	4	4.6	7	7.5	6.5
26	6.9	8.3	8.6	9.2	9.9	8.7	4.4	3.4	4.2	7.2	6.5	6.8
27	6.8	8.6	8.6	8.6	10.7	9.5	5.6	3.7	4.5	7.3	6.1	6.4
28	7.4	7.5	9	9.1	7.9	9.5	7.2	4.1	4.5	6.7	5.6	6.7
29	7.1		8.5	8.6	8.8	7.7	6.2	3.1	4.1	6.3	6.3	6.3
30	6.7		9.2	9.5	9.8	8.5	4.5	3	5.2	6.5	5.8	6
31	6.3		9.6		10.1		5.5	3.6		7.4		6.2
Moyenne	6.60	7.80	8.24	8.60	9.39	9.32	7.03	4.19	4.89	5.88	6.51	6.40

Annexe 3 : Caractéristique des images satellitaires

Bandes	Domaine spectral (microns)	Application	Résolution spatiale(m)
TM 1	0,45-0,52 (bleu)	Discrimination entre sol et végétation, Bathymétrie/cartographie côtière; identification des traits culturels et urbains	30
TM 2	0,52-0,60 (vert)	Cartographie de la végétation verte (mesure le sommet de réflectance) ; identification des traits culturels et urbains	30
TM 3	0,63-0,69 (rouge)	Discrimination entre les espèces de plantes à feuilles ou sans feuilles ;(absorption de chlorophylle) ; identification des traits culturels et urbains	30
TM 4	0,76-0,90 (PIR)	Identification des types de végétation et de plantes ; santé et contenu de la masse biologique ; délimitation des étendues d'eau ; humidité dans le sol	30
TM 5	1,55-1,75(IR de courte longueur d'onde)	Sensible à l'humidité dans le sol et les plantes ; discrimination entre la neige et les nuages	30
TM 6	10,4-12,5 (IRT)	Discrimination du stress de la végétation et de l'humidité dans le sol liée au rayonnement thermique ; cartographie thermique	120
TM 7	2,08-2,35 (IR de courte longueur d'onde)	Discrimination entre les minéraux et les types de roches ; sensible au taux d'humidité dans la végétation	30

Annexe 4 : Carte photo-géologique 1968



Annexe 5 : Fiche de forage

10 Piézomètres			
Cadre institutionnel	Identification de la localité		Identification site
M. Ouvrage: MAHRH M. Oeuvre: DGRE M. Oeuv dé: BERA Financement: DANIDA	Provinces SISSILI Départem Léo	Village Léo Quartier Secteur 3	N° Forage: P45 Station: SE4B Coordonnées Longit (km) Latit (km)

FICHE DE FORAGE		
Entreprise : GEOFOR Atelier : T3W Sondeur : TEGUERA	Date des travaux Début : 18/08/2009 Fin : 19/08/2009 Débit fin foration (m3/h) : 0,15	Nature tube : Diamètres des tubes : Nature du massif filtrant : Granulométrie de : Nature du packer :

Profondeur (m)	Vitesse d'avancement (m/heure)	Coupe Géologique	Description géologique	Venus d'eau (m)	Q (m3/h)	Coupe technique (Rayon en pouces)				
						4.50	3.38	2.25	1.13	0
0	12 24 36 48 60		1 Terre végétale							
			4 Argile Latéritique							
			9 Arène argileuse							
010			15 Arène grenue altéré (e)							14.60
020			Granite fissuré (e)	22.0	+ 0.15					
030										
040			Granite sain							
050										
060										61.48
070										
080										
090										
100										

Développement		
Date :	Méthode :	Aspect de l'eau :
Durée (h) :	Débit fin (m3/h) :	NS (mss) :

Annexe 5 : Distance entre linéament et forages

ID	Village	X	Y	Q(m3/h)	Prof (m)	Alt.(m)	D(m)
I1	Poudiène	559173.89	1216432.21	7.2	45	25	527
I2	Boura	554613.34	1221553.64	3.6	41	18	94.6
I3	Boura	554159.71	1220631.46	0.85	63	39	47.6
I4	Boura	554523.89	1220632.06	2.88	49	26	277.7
I5	Boura	556132.54	1220327.62	3.6	45	18	648.9
I6	Yoro	569143.98	1223055.62	14.4	72	5	81
I7	Yoro	565541	1219362	9	54.16	36.53	92
I8	Boura	554615	1220448	1.8	42.00	24.73	192
I9	Poudiène	558991	1217138	0.5	51	20	133
I10	Bouara	544787	1218221	12	46.74	19.52	294
I11	Dangué	572068	1231540	0.94	49	16	1363
I12	Kia	574275	1221592	2.49	46	17	94.4
I13	Yoro	568811	1222686	7.71	40	25	331

Annexe 7 : Essai de pompage courte durée

Long.	Lat.	DEVELOPPEMENT			ESSAI DE DEBIT (2 à 3 paliers)								ANALYSE D'EAU	
		Q (m3/h)	Temps (h)	Date	Q1 (m3/h)	ND1 (m)	Q2 (m3/h)	m	Q3 (m3/h)	m	Date essai	NS (m)	Date anal. D'eau	Entreprise
002°35'23"W	11°01'12"N	14.12	2.30	12/01/2007	2.77	15.20	6.05	15.70	10.44	19.07	13/01/2007	11.44	19/01/2007	SN-ONPF
002°29'53"W	11°02'17"N	2.00	3.00	07/06/2006	0.90	17.28	1.80	21.61			08/06/2006	12.45	14/06/2006	SN-ONPF
002°24'33"W	11°13'11"N	5.14	2.15	13/01/2007	1.09	25.85	2.40	27.16	4.93	31.98	14/01/2007	24.99	19/01/2007	SN-ONPF
002°24'04"W	11°02'01"N	9.00	2.00	06/06/2006	2.00	20.22	4.00	27.85	6.00	28.16	07/06/2006	19.70	14/06/2006	SN-ONPF
002°27'48"W	11°12'47"N	2.40	3.00	14/04/2007	1.00	22.19	1.34	23.72	2.25	25.47	15/04/2007	20.36	02/07/2007	SN-ONPF

Annexe 8 : Données de forage

Village	X	Y	Profondeur	Q_m3_h_	Altitude__	Typeforage	Géologie
Longa	582516.32	1238138.02	68	0	9	Forage négatif	Plutonique Granite
Longa	582516.32	1238138.02	86	0	30	Forage négatif	Plutonique Granite
Hielà (Hela)	535017.76	1217103.84	66	0	-1	Forage négatif	Plutonique Granite
Pensiaka	550217.17	1219365.83	61	0	9	Forage négatif	Aucun Indice
Bon	527536.82	1236016.83	86	0.22	27	Forage négatif	Plutonique Granite
Kiétou	539084.07	1217016.34	67	0	22	Forage négatif	Plutonique Granite
Longa	581876.99	1239119.24	54	1.89	27	Forage positif	Plutonique Granite Fissuré
Boura	554613.34	1221553.64	41	3.6	18	Forage positif	Plutonique Granite Avec Filons de Quartz
Zamouna	558102.49	1238545.38	49	8.1	10	Forage positif	Plutonique Granite
Poudiène	559173.89	1216432.21	45	7.2	25	Forage positif	Plutonique Granite Avec Filons de Quartz
Yoro	569143.98	1223055.62	72	14.4	5	Forage positif	Plutonique Granite Fissuré
Yoro	560921.67	1223039.22	51	2.16	14	Forage positif	Plutonique Granite
Worou	581888.69	1234511.78	45	12	13	Forage positif	Plutonique Granite Avec Filons de Pegmatite
Dangue	574613.57	1232651.13	49	0.94	16	Forage positif	Plutonique Granite Fissuré
Kia	574634.74	1223436.28	46	2.49	17	Forage positif	Plutonique Granite
Sati	578235.62	1240031.65	50	0.72	11	Forage positif	Plutonique Granite
Sati	577508.82	1239599.95	49	0.96	17	Forage positif	Plutonique Granite
Bofian	558234.36	1232678.98	42	43.2	21	Forage positif	Plutonique Granite
Kala	564618.51	1240554.29	54	14.4	35	Forage positif	Plutonique Granite Fissuré
Bouara	543602.86	1219018.55	51	2.9	16	Forage positif	Plutonique Granite
Kalindou	544078.85	1226022.04	36	1.63	9	Forage positif	Plutonique Granite
Bon	527536.82	1236016.83	50	1.85	23	Forage positif	Plutonique Granite
Bon	527536.82	1236016.83	55	0.76	16	Forage positif	Plutonique Granite
Bon	527233.53	1236016.57	63	1.5	4	Forage positif	Plutonique Granite Fissuré
Kiétou	540054.11	1217846.69	46	7.2	10	Forage positif	Plutonique Granite
Kiétou	539084.07	1217016.34	45	3	21	Forage positif	Plutonique Granite

Bouara	545513.56	1219696.86	50	3.5	26	Forage positif	Plutonique Granite
Bouara	544088.3	1219019.2	45	1.33	10	Forage positif	Plutonique Granite Fissuré
Bozo	540051.86	1219689.72	50	2.23	19	Forage positif	Métamorphique Schiste
Kalindou	544382.78	1225623.28	85	0.48	36	Forage positif	Plutonique Granite
Pina	538578.93	1233509.61	49	9.25	21	Forage positif	Plutonique Granite
Kalindou	544382.78	1225623.28	55	1.5	9	Forage positif	Plutonique Granite
Hiea (Hela)	535017.76	1217103.84	51	0.85	15	Forage positif	Plutonique Granite
Boura	554159.71	1220631.46	63	0.85	39	Forage positif	Plutonique Granite Fissuré
Bon	527536.82	1236016.83	49	7.2	15	Forage positif	Plutonique Granite
Boura	554523.89	1220632.06	49	2.88	26	Forage positif	Plutonique Granite Fissuré
Sossoré	532658.53	1239615.25	49	2.81	22	Forage positif	Plutonique Granite
Pensiaka	550975.28	1219704.92	51	6.48	30	Forage positif	Plutonique Granite Fissuré
Boura	556132.54	1220327.62	45	3.6	18	Forage abandon technique	Plutonique Granite Avec Filons de Quartz

Annexe 9 : Données de forage

Village	TypePE	Longitude du village	Latitude du village	Année de réalisation	Profondeur totale	Apaisseur_ altération	Venue_ Eau	Crepine_ Haut	Crepine_ Bas	Profondeur_ équipement	Diamètre_ Tube	Niveau_ Statique	Debit_ Estimé
Bofian	Forage Positif	-2.47	11.15	20/04/1994	42	21		21.58	39.34	42		14.90	43.20
Bouara	Forage Négatif	-2.60	11.03	26/05/1995	86	41		0.00		0			0.00
Bouara	Forage Positif	-2.60	11.03	17/05/1994	50	26		26.60	44.00	50		19.24	3.50
Bouara	Forage Positif	-2.60	11.03	20/06/1984	45	10	18.00	15.00	45.00	45		6.50	1.33
Bouara	Forage Positif	-2.60	11.03	15/02/1995	51	16		23.60	38.36	51		1.80	2.90
Boura	Forage Positif	-2.50	11.04	19/04/1984	49	26	31.00	28.00	49.00	49	110	13.20	2.88
Boura	Forage Positif	-2.50	11.04	19/04/1984	63	39	49.00	36.00	63.00	63	110	11.30	0.85
Boura	FT	-2.50	11.04	10/06/1987	45	18	0.00	0.00	0.00	0	0	12.00	3.60
Boura	Forage Positif	-2.50	11.04	10/06/1987	41	18	27.00	26.00	38.00	38	112	12.80	3.60
Boura	Forage Positif	-2.50	11.04	31/05/1995	55	21		19.05	42.73	55	112	12.45	0.45
Bouyagué	Forage Négatif	-2.42	11.18	17/05/1995	80	30			0.00	0	0	0.00	0.00
Bouyagué	Forage Négatif	-2.42	11.18	20/04/1995	73	14			0.00	0	0	0.00	0.49
Bozo	Forage Positif	-2.67	11.04	19/05/1994	50	19		19.08	26.00	50	0	6.00	2.23
Dangué	Forage Positif	-2.34	11.14	13/06/1987	49	16	40.00	30.00	47.00	47	112	30.00	0.94

Goumou	Forage Positif	-2.43	11.13	16/05/1995	49	22		28.26	43.02	49	112	7.10	4.05
Goumou	Forage Négatif	-2.43	11.13	20/04/1995	73	12		0.00	0.00	0	0	0.00	0.38
Poudiéné	Forage Positif	-2.46	11.01	05/06/1987	45	25	0.00	30.00	41.00	41	112	14.60	7.20
Poudiéné	Forage Positif	-2.46	11.01	19/04/1994	51	20	-1.00	18.80	33.56	51	0	7.80	0.50
Zamouna	Forage Positif	-2.47	11.20	29/03/1994	49	10	-1.00	24.48	33.32	49	0	6.56	8.10

