



**CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE D'UN
AQUIFÈRE EN MILIEU DE SOCLE FRACTURÉ: CAS DU
SITE DE SANON (RÉGION DU PLATEAU CENTRAL AU
BURKINA FASO)**

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGÉNIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RÉSEAUX HYDRAULIQUES

Présenté et soutenu publiquement le 23 Juin 2014 par

Eli OUTOUMBE

Travaux dirigés par :

Dr. Mahamadou KOÏTA

Enseignant Chercheur au LEAH

M. Dimitri SORO

Doctorant au LEAH

Jury d'évaluation du stage :

Président : M. Angelbert BIAOU

Membres et correcteurs : M. Mahamadou KOÏTA

M. K. Sewa Da SILVEIRA

M. Youssouf KOUSSOUBÉ

Promotion [2012/2014]



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

AVANT-PROPOS

Ce travail de mémoire de fin d'études a été réalisé dans un projet interafricain de recherche sur la ressource en eau souterraine dénommé **GRIBA (Groundwater Resources in Basement Rock of Africa)**. Lancé en 2012, ce projet durera 3 ans et réunit des partenaires de 3 pays africains: au Bénin l'Université d'Abomey Calavi, au Burkina Faso l'Université de Ouagadougou et le 2iE, En Ouganda la Direction de l'Eau et l'Université Makerere ; ainsi que deux partenaires européens, à savoir la Queen's University de Belfast en Irlande du Nord et l'IRD. Dans le but de mieux connaître les ressources en eau souterraine en zone de socle africain, le projet GRIBA s'est fixé les objectifs suivants :

- **Quantifier les propriétés hydrogéologiques des aquifères de socle** (y compris les volumes d'eau qui y sont stockés) grâce au développement d'une nouvelle approche qui s'appuie sur des outils complémentaires, notamment la méthode de Résonance Magnétique des Protonique (RMP) ;
- **Élaborer des scénarios de gestion des eaux souterraines**. La nouvelle connaissance des propriétés hydrogéologiques des aquifères permettra de construire des modèles prédictifs pour définir des scénarios d'exploitation appropriés ;
- **Soutenir la mise en place d'un réseau de chercheurs africains concernés par les aquifères de socle.**

REMERCIEMENTS

Qu'il me soit permis ici de remercier des personnes physiques ou morales, qui ont activement contribué de près ou de loin à l'élaboration du présent mémoire.

Je tiens tout d'abord à témoigner ma profonde gratitude mon directeur de mémoire, Dr. Mahamadou KOÏTA, enseignant chercheur au Laboratoire LEAH à 2iE, pour le suivi régulier et l'aide qu'il m'a apportée tout au long de mon stage.

Je remercie mon co-encadreur Dimitri SORO, doctorant à 2iE, pour sa disponibilité et son aide durant le parcours de combattant qu'on a mené ensemble. Courage à toi pour la suite de la thèse.

Je tiens à remercier Dr. Jean Michel VOUILLAMOZ, responsable du projet GRIBA à l'IRD Benin, pour sa disponibilité et toutes les aides qu'il a nous apportées malgré la distance qui nous sépare.

Je remercie Christian ALLE, doctorant à l'Université d'Abomey Calavi de Benin, alias « apprenti sorcier » pour avoir accepté séjourné à Ouagadougou pour partager son savoir faire en géophysique.

Mes remerciements sont aussi adressés à toute l'équipe GRIBA du Benin : Mireille BIBIAS, Dr. Marc DECLOITRES, Dr. Nicaise YALO pour leur accueil et leur disponibilité.

J'exprime ma gratitude au « commando » MAÏGA et à M. ZONGO pour leur aide sur le terrain.

Je remercie Yaya KONE et Abi ATTOUMANE, étudiants en master 2 à 2iE, pour leur collaboration.

J'adresse également mes remerciements au corps enseignant de la Fondation 2iE pour m'avoir accueilli et formé pendant 5 ans, sans oublier tout le personnel administratif. C'est une expérience inoubliable.

Je remercie la Banque Africaine de Développement (BAD), pour m'avoir octroyé une bourse d'études pour les 5 ans de formation à travers le programme Facilité Africaine de l'Eau (FAE).

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les étudiants 2iE qui constituent ma deuxième famille.

J'exprime mon grand remerciement à mes parents, frères et sœurs qui ont toujours cru en moi, m'ont fait confiance et n'ont cessé de me témoigner leur amour.

Je ne saurais terminer mes remerciements sans remercier Allah, le Dieu tout puissant, qui veille nuits et jours sur moi, et dont je bénéficie la grâce tous les jours.

RÉSUMÉ

La présente étude est menée sur le bassin versant de Sanon dans la province de Kourwégo au Plateau central du Burkina Faso. Elle a pour objectif principal de définir la géométrie et les paramètres hydrodynamiques du milieu étudié. L'approche géophysique a été utilisée pour identifier et définir la géométrie du milieu d'une part, et valider les discontinuités d'autre part ; tout ceci afin de proposer une carte des linéaments validés. La technique de mesure par tomographie électrique a été employée à cause de la disponibilité du matériel et des capacités de la méthode à mettre en évidence les formations résistantes. Les dispositifs Wenner α et Wenner β ont été combinés.

Les résultats de l'étude montrent que la combinaison de ces dispositifs est bien adaptée au milieu, car elle a pu définir la géométrie du milieu (épaisseurs d'altération, d'horizon fissuré et de socle sain) qui est en parfaite cohérence avec les coupes lithologiques des forages réalisés. Elle a également mis en évidence des discontinuités identifiées par la télédétection faite dans les études antérieures.

L'interprétation des essais de pompage par la dérivée logarithmique du rabattement montre que la transmissivité T est plus faible en zone hors dôme piézométrique ($4.78 \cdot 10^{-6} < T < 1.45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) qu'en zone de dôme piézométrique ($5.36 \cdot 10^{-5} < T < 4.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$). Le coefficient d'emmagasinement est plus élevé en zone de hors dôme piézométrique ($1.39 \cdot 10^{-2} < S < 4.93 \cdot 10^{-2}$) qu'en zone de dôme piézométrique ($3.55 \cdot 10^{-4} < S < 3.71 \cdot 10^{-3}$). L'écoulement quant à lui est du type double porosité ou aquifère libre avec un effet de stockage en début de pompage et un écoulement radial en fin de pompage.

Mots clés :

1. Tomographie électrique de résistivité
2. Discontinuité
3. Sanon
4. Dérivée logarithmique du rabattement
5. Essai de pompage

ABSTRACT

This study was conducted on the watershed of Sanon in the province of Kourwego Central Plateau of Burkina Faso. Its main objective is the defining of the geometry and hydrodynamic parameters of the site. The geophysical approach was used to identify and define the geometry of the environment on the one hand and validate discontinuities on the other in order to propose a validated lineaments card. The electrical tomography resistivity technique was used because of the availability of equipment and capacity of the method to identify resistant formations. Wenner α and Wenner β array are used.

This work shows that the combination of these arrays is well adapted to the site. It defined the geometry of the site (thickness of weathering, fissured and basement rock) that is fully consistent with the lithology of achieved wellbores. It also highlighted discontinuities identified by remote detection made by previous studies.

The interpretation of pumping test by the logarithmic derivative of the drawdown shows that the transmissivity is lower in the outside area of water level dome ($4.78 \cdot 10^{-6} < T < 1.45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) than in water level dome area ($5.36 \cdot 10^{-5} < T < 4.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$), the storage coefficient is higher in the outside area water level dome ($1.39 \cdot 10^{-2} < S < 4.93 \cdot 10^{-2}$) in area of water level dome ($3.55 \cdot 10^{-4} < S < 3.71 \cdot 10^{-3}$). The flow meanwhile is the double porosity or unconfined aquifer guy with a stocking effect in early pumping and radial flow at the end of pumping.

Key words:

1. Electrical tomography resistivity
2. Discontinuity
3. Sanon
4. Logarithmic derivative
5. Pumping test

SIGLES ET ABBRÉVIATIONS

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

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

ERT : Electrical Resistivity Tomography

GPS : Global Positioning System

GRIBA : Groundwater Ressources in Basement Rock of Africa

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

LTHE : Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologies et Environnement

OMS : Organisation Mondial de la Santé

PN-AEPA : Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et Assainissement

RMP : Résonance Magnétique des protons

RMS : Root-Means-Squared

S : coefficient d'emmagasinement

T : Transmissivité

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des ouvrages utilisés pour la réalisation des essais de pompage en zone de dôme piézométrique	29
Tableau 2: Caractéristiques des ouvrages utilisés pour la réalisation des essais de pompage en hors dôme piézométrique	30
Tableau 3: Récapitulatif des paramètres hydrodynamiques en basses eaux en zone de dôme	41
Tableau 4: Récapitulatif des paramètres hydrodynamiques en hautes eaux en zone de dôme	44
Tableau 5: Récapitulatif des paramètres hydrodynamiques en zone hors dôme	47

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation du site de Sanon.....	6
Figure 2: Carte géologique du Burkina Faso (Hottin et Ouédraogo, 1975).....	8
Figure 3: Profil d'altération typique au sein de roches de socle (Maréchal et al., 2004).....	9
Figure 4: Carte géologique du bassin versant de Sanon	10
Figure 5: Carte des résistivités apparentes (BRGM, 1991).....	11
Figure 6: Carte linéamentaire du bassin versant de Sanon (BRGM-AQUATER, 1991).....	12
Figure 7: Carte de répartition spatiale des piézomètres	13
Figure 8: Syscal Pro Figure 9: Syscal R1 plus 72 switches.....	15
Figure 10: Carte linéamentaire (BRGM, 1991).....	17
Figure 11: Carte linéamentaire (Priva, 2012).....	17
Figure 12: Carte linéamentaire (Koussoubé, 2014)	18
Figure 13: Construction d'une pseudo-section pour un protocole Wenner (Marecost, 2004)	19
Figure 14: Organigramme de la modélisation synthétique	20
Figure 15: Modèle synthétique du piézomètre S1	21
Figure 16: Roll Along (IRIS instruments, 2003).....	24
Figure 17: Traitement des données mesurées.....	25
Figure 18: Panneaux assemblés de 1-4 du profil ERT_aval du bassin versant	26
Figure 19: Organigramme d'interprétation des essais de pompage.....	29
Figure 20: Diagramme d'identification des régimes d'écoulement (Ehlig-Economides et al., 1994b) <i>in</i> (Schlumberger, 2002).....	30
Figure 21: Carte de profils ERT	32
Figure 22: modèles synthétiques inversés	33
Figure 23: Profil ERT 1 Sud-Nord 15°	34
Figure 24: Profil ERT 2 Sud-Nord 8°	35
Figure 25: Carte de validation des linéaments proposés par BRGM.....	36
Figure 26: Carte de validation des linéaments proposés par Priva	37
Figure 27: Carte de validation des linéaments proposés par Koussoubé	37
Figure 28: Carte des linéaments validés.....	38
Figure 29: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S2	39
Figure 30: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S17	40
Figure 31: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S18	40
Figure 32: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S1	41
Figure 33: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S1	42
Figure 34: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S17	42
Figure 35: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S18	43
Figure 36: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S2	44
Figure 37: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S18	45
Figure 38: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S20	46
Figure 39: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S9	46
Figure 40: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S8	47

Table des matières

AVANT-PROPOS	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	iv
SIGLES ET ABBRÉVIATIONS	v
LISTES DES TABLEAUX	vi
LISTES DES FIGURES	1
INTRODUCTION	3
PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS	5
I Présentation de la zone d'étude	6
I.1 Situation géographique	6
I.2 Climat	7
I.3 Végétation	7
I.4 Géologie du site de Sanon	7
I.5 Hydrogéologie du site de Sanon	8
II Synthèse bibliographique des études antérieures sur le site de Sanon	9
DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIELS ET MÉTHODES	14
I Matériels	15
II Méthodes	16
II.1 Méthodologie de caractérisation géologique	16
II.2 Méthodologie de caractérisation hydrodynamique de l'aquifère	27
TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION	31
I Résultats et interprétations	32
I.1 Caractérisation géologique de l'aquifère	32
I.2 Caractérisation hydrodynamique	38
II Discussions	49
CONCLUSION	50
PERSPECTIVES	51
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	52
ANNEXES	54

INTRODUCTION

Problématique et objectifs

L'un des Objectifs du Millénaire des Nations Unies pour le Développement est de réduire de moitié le nombre de personnes n'ayant pas accès à l'eau potable d'ici 2015. Le défi est immense sur le continent africain. Avec plus de 300 millions d'africains qui n'ont pas accès à l'eau potable (WaterAid, 2014). Compte tenu de la forte croissance démographique attendue (2 milliards d'habitants en 2050), le risque est de voir le fossé se creuser encore davantage entre l'offre et la demande en eau potable. (AFD, avril 2014).

Au Burkina Faso, la mise en œuvre du Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et d'Assainissement (PN-AEPA) pour atteindre les Objectifs Millénaire pour le Développement (OMD) a permis d'enregistrer en fin 2012 un taux d'accès à l'eau potable de 63% en milieu rural pour un objectif fixé à 76% à l'horizon 2015 (OMS/UNICEF, 2013). Cela permettra de réduire considérablement le nombre de décès liés aux maladies hydriques (diarrhée, dysenterie, choléra, etc.) qui est très importants à l'heure actuelle dans les pays du Sud. Au Burkina Faso, plus de 12 000 enfants de moins de 5 ans meurent chaque année de maladies hydriques (WaterAid, 2014). Afin de solutionner ce problème, de nombreux ouvrages sont réalisés en milieu rural aussi bien par les partenaires techniques et financiers du Burkina Faso que par l'État. Malheureusement, la réalisation des forages dans les zones de socle dont la géologie du Burkina est constituée à plus de 80% (Hottin et Ouédraogo, 1975) *in* (Compaoré 1997 ; Toé, 2004), est laborieuse à cause de la complexité de ce milieu (J.-C. Maréchal et al, 2004; Wyns et Lachassagne, 2005 ; Dewandel et al., 2010). En effet, une étude a révélé en 2010 (Courtois et al., 2010) que plus de 40% des forages réalisés en milieu de socle sont négatifs, et environ 30% ont un débit inférieure à 0.5 m³/h.

Par ailleurs, l'utilisation des eaux de surface pour l'approvisionnement des populations n'est pas indiquée à cause de la mauvaise qualité de ces eaux dont le traitement est onéreux. Aussi, ces eaux ne sont pas pérennes car elles sont confrontées aux aléas climatiques.

Dans le souci de fournir de l'eau en quantité suffisante et de bonne qualité aux populations en zone de socle, il est nécessaire d'améliorer notre connaissance de ce milieu. C'est dans cette optique que cette étude a été initiée dont le thème est : **caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en zone de socle fracturé.**

Elle a pour objectif principal de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère de socle de Sanon. Il s'agira spécifiquement de faire une caractérisation hydrogéophysique et de déterminer des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.

Organisation du document

Ce document s'articule autour de trois (03) grandes parties :

La première partie est consacrée à la synthèse bibliographique, dans laquelle sont sommairement présentés le contexte géologique et hydrogéologique du Burkina Faso et du site d'étude, les outils, méthodes et résultats obtenus par les études antérieures sur le site. La deuxième partie présente le matériel utilisé et la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs fixés. Et enfin la troisième partie est axée sur les résultats obtenus et la discussion de ces derniers.

PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS

I Présentation de la zone d'étude

I.1 Situation géographique

Le site expérimental de Sanon (figure 1) est situé dans la province du Kourweogo (dans la région du plateau central), à 30 km au nord-ouest de la ville de Ouagadougou. Il est accessible en toutes saisons par une route bitumée sur environ 20 kilomètres jusqu'à Laye, puis par une piste secondaire en bifurquant par la gauche. Localisé par deux points de coordonnées géographiques $12^{\circ}26'18''N$; $1^{\circ}48'47''W$ et $12^{\circ}28'11''N$; $1^{\circ}43'81''W$, le site se situe dans une entité hydrologique (sous-bassin versant du Nazinon ou Volta Rouge) d'environ une dizaine de kilomètres carrés caractérisée par un relief très peu contrasté. Des cuirasses latéritiques culminant entre 350 et 370 m constituent les limites de cette entité hydrologique. La partie centrale du site est caractérisée par une large vallée à fond relativement plat de pente orientée de l'Est vers l'Ouest.

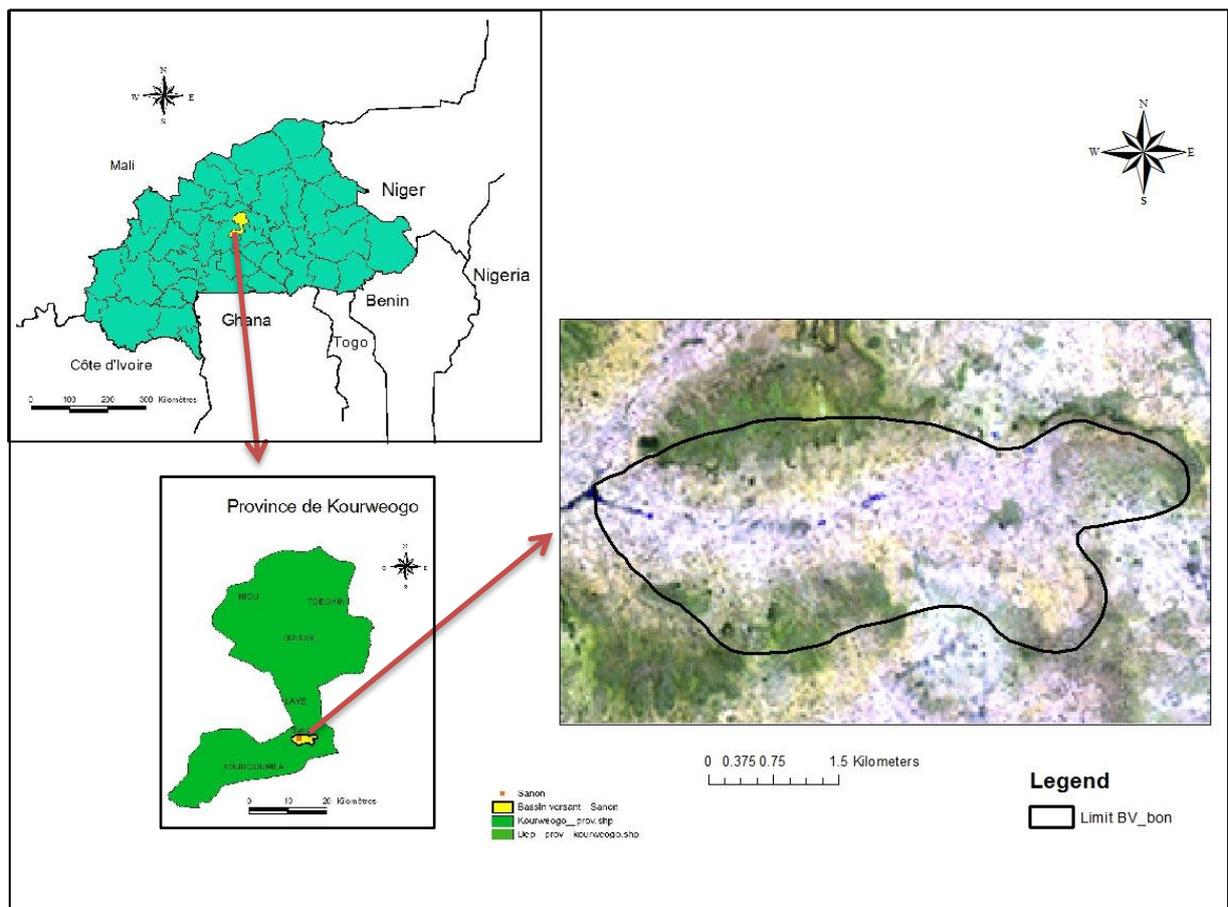


Figure 1: Carte de localisation du site de Sanon

Les caractéristiques physiques du bassin versant du site sont données par le tableau 1 :

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du bassin versant de Sanon

Superficie S	14 Km ²
Périmètre P	17 Km
Indice de forme K _G	1.27
Densité de drainage D _d	0.29

I.2 Climat

Le climat du site est du type soudano-sahélien. Il est marqué par une saison de pluie de courte durée (juin-septembre) et une longue saison sèche (octobre-mai). La pluviométrie annuelle varie entre 700 mm et 900 mm. Les périodes les plus chaudes de l'année se situent entre mars et mai. Les températures maximales moyennes atteignent environ 45°C. Elles subissent une baisse sensible en saison des pluies (32°C). Les températures minimales moyennes quant à elles, sont beaucoup influencées par l'harmattan qui souffle pratiquement de novembre à février (15°C à 20°C). (Compaoré, 1997).

I.3 Végétation

La végétation du site est du type savane à steppe arbustive. Les espèces telles que *Khaya senegalensis*, *Lanea acida*, *Ziziphus mauritania*, *Anogneis leocapus*, *Acacia albida*, *Ficus gnaphalocarpa* sont plus répandues (Ringtounda, 1991 in Toé, 2004). Les arbustes du genre *Pilostigma* abondent dans les zones non cultivées situées dans la vallée.

I.4 Géologie du site de Sanon

La géologie du Burkina Faso est constituée à plus de 80% de socle Cristallin et Cristalloyphyllien (figure 2) et recouvert en discordance par des formations sédimentaires sur les frontières avec le Mali, et le Niger au Nord, le Benin et le Togo au sud. Selon la carte géologique générale du Burkina Faso de 1975 (Hottin et Ouédraogo, 1975 in Toé (2004); Comparé (1997)). Le site de Sanon fait partie de cette zone cristalline.

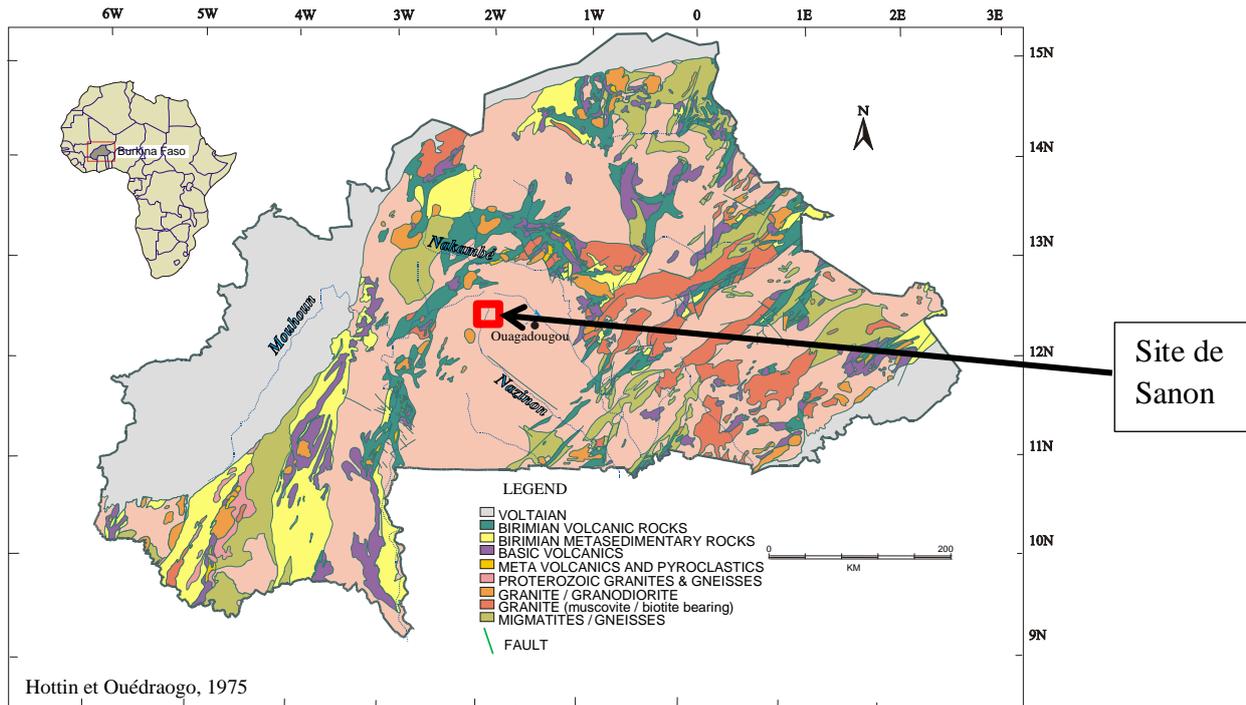


Figure 2: Carte géologique du Burkina Faso (Hottin et Ouédraogo, 1975)

I.5 Hydrogéologie du site de Sanon

L'hydrogéologie du site de Sanon s'apparente au modèle conceptuel stratiforme proposé par J.-C. Maréchal et al, 2004; Wyns et Lachassagne, 2005 ; et Dewandel et al., 2010. Ce modèle conceptuel d'aquifère à 3 couches (figure 3) est décrit du bas vers le haut comme suit :

- La roche saine, n'est perméable que très localement là où elle est affectée par des fractures d'origine tectonique, le plus souvent sub-verticales. La densité des fractures est plus faible que celles des fractures de la couche sus-jacente (Maréchal et al., 2004).
- La couche intermédiaire fissurée caractérisée par des fissures sub-horizontales et sub-verticales où la densité décroît avec la profondeur (Delwandel et al, 2006) et assure une fonction transmissive (Chandra et al, 2008). En terme de production d'eau souterraine, les aquifères fissurés constituent une cible hydrogéologique prioritaire car ils assurent une fonction conductrice (forte transmissivité). Ils sont captés par de nombreux forages produisant des débits plus importants ($4.5\text{ m}^3/\text{h}$ en moyenne et localement $18\text{ m}^3/\text{h}$).
- Le manteau d'altérites (saprolite ou rigolite) provenant de la décomposition de la roche saine. C'est une couche poreuse, peu perméable et de nature capacitive (Wyns et al, 1999 ; Taylor and Howard, 2000 *in* Maréchal et al., 2004). Les aquifères des altérites quant à eux jouent un rôle capacitif (Compaoré, 1997). Ils ont une forte porosité d'interstices (Maréchal et al., 2004) constituant un réservoir d'eau important, mais malheureusement ils ne libèrent

pas assez à cause de leur faible perméabilité. Capté par une dizaine de puits traditionnels (11 m de profondeur), il donne un débit d'exhaure faible (moins de 500 l/h).

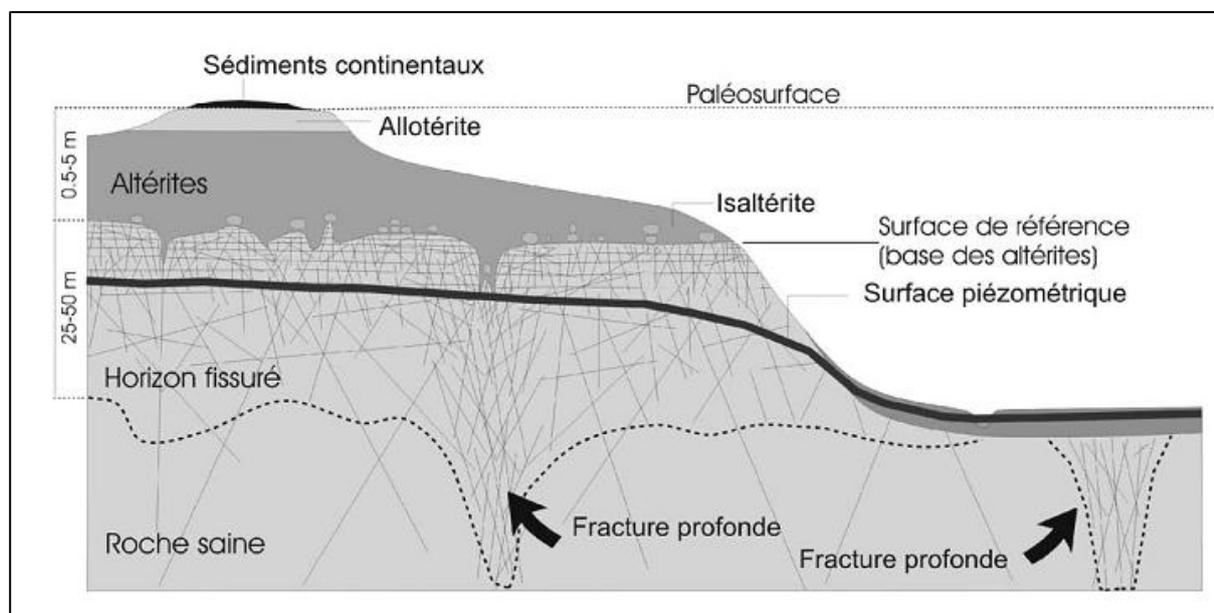


Figure 3: Profil d'altération typique au sein de roches de socle (Maréchal et al., 2004)

II Synthèse bibliographique des études antérieures sur le site de Sanon

Le site a fait l'objet de plusieurs études à savoir BRGM-AQUATER en 1991 ; Compaoré en 1999 ; Vouillamoz en 2003 ; et Toé en 2004). Toutes ces études n'avaient pas le même objectif.

En effet, les premiers travaux sur le site ont été réalisés entre 1988 et 1991 par le groupement BRGM-AQUATER. La recherche des zones favorables pour la réalisation des forages à débit élevé était au centre de ces travaux. Les résultats des travaux étaient mitigés et tout le bassin versant n'a pas été étudié. La seconde étude effectuée à Sanon, celle de Compaoré en 1999, avait pour objectif l'étude de la fonction capacitive de la zone altérée. Et pour finir, les travaux de Vouillamoz réalisés en 2003 et de Toé en 2004 avaient pour objectif de tester la capacité de certains appareils géophysiques à faire des bonnes mesures sur un milieu granitique à forte épaisseur d'altération comme le site de Sanon.

Les résultats de ces travaux sont présentés sous forme de synthèse suivant 2 grandes thématiques : la géologie et l'hydrogéologie.

Les coupes géologiques des forages obtenues lors de la campagne de forage réalisée par BRGM-AQUATER en 1991, indiquent que le sous-sol est constitué par des formations amphibolites à filonnets de quartz, de gneiss, de migmatitiques et granites. Il y aurait une

prédominance granito-gneissique voire migmatitique dans lesquelles s'intercalent des roches vertes (amphibolites) (figure 4). Le substratum est recouvert par un manteau d'altération d'épaisseur variable tournant autour de 30 à 50 m dans la vallée, et 25 m dans la partie Ouest. Le profil altéritique recoupé dans le secteur de Sanon ne diffère pas significativement des profils types décrits dans la littérature (Compaoré, 1997). Le profil type est le suivant :

- 0 - 2 m ; cuirasse latéritique,
- 2 – 6 m ; silt-argile latéritique de couleur rouge ou jaune
- 6 – 30 m ; argile kaolinique
- 30 – 50 m ; arènes argilo-sableuse, à grenues

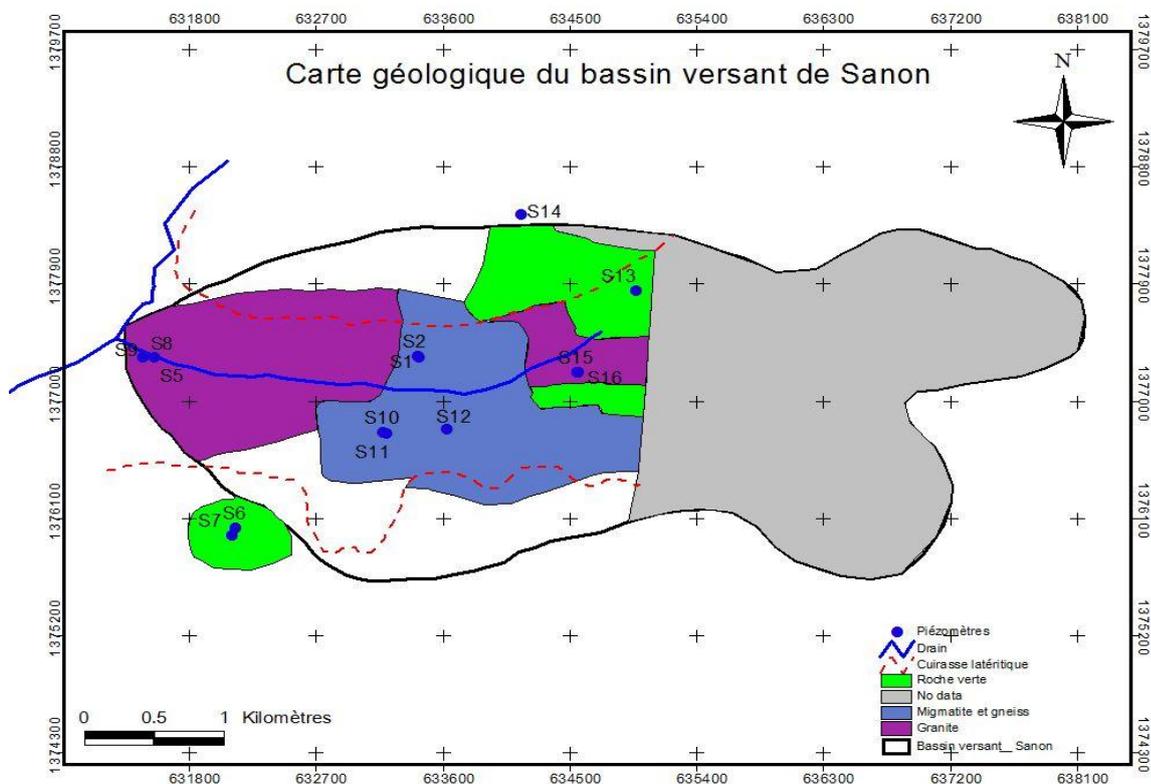


Figure 4: Carte géologique du bassin versant de Sanon

L'approche géophysique est également utilisée pour caractériser la géologie du site, notamment par les méthodes électrique, électromagnétique et la résonance magnétique protonique (RMP). Les méthodes électriques et électromagnétiques ont été massivement employées sur le site : 31 km de profil électromagnétique, 10 km de profil électrique (tomographie), 33 sondages électriques et 2 boucles RMP (BGRM, 1991 ; Toé, 2004).

En tomographie électrique, le dispositif Schlumberger (AB = 150 m et MN = 20 m) réalisé par BRGM (1991) a montré une bonne correspondance des valeurs des résistivités apparentes avec

celles de l'électromagnétisme. Par contre le dispositif Wenner α réalisé par Toé (2004) n'a pas donné de bons résultats (pas de cohérence entre le résultat obtenu et les logs de forages réalisés). Ces dispositifs n'ont pas fourni d'informations sur la géologie en profondeur à cause de la faible profondeur d'investigation. Les sondages électriques repartis sur un maillage régulier avec AB max = 840 m et les profils électromagnétiques réalisés (HLM, interspace 40 m, pas = 20 m) indiquent une bonne correspondance entre le max des résistivités et la position de la ligne de partage des eaux de surface aux limites nord et sud du bassin versant (figure 5).

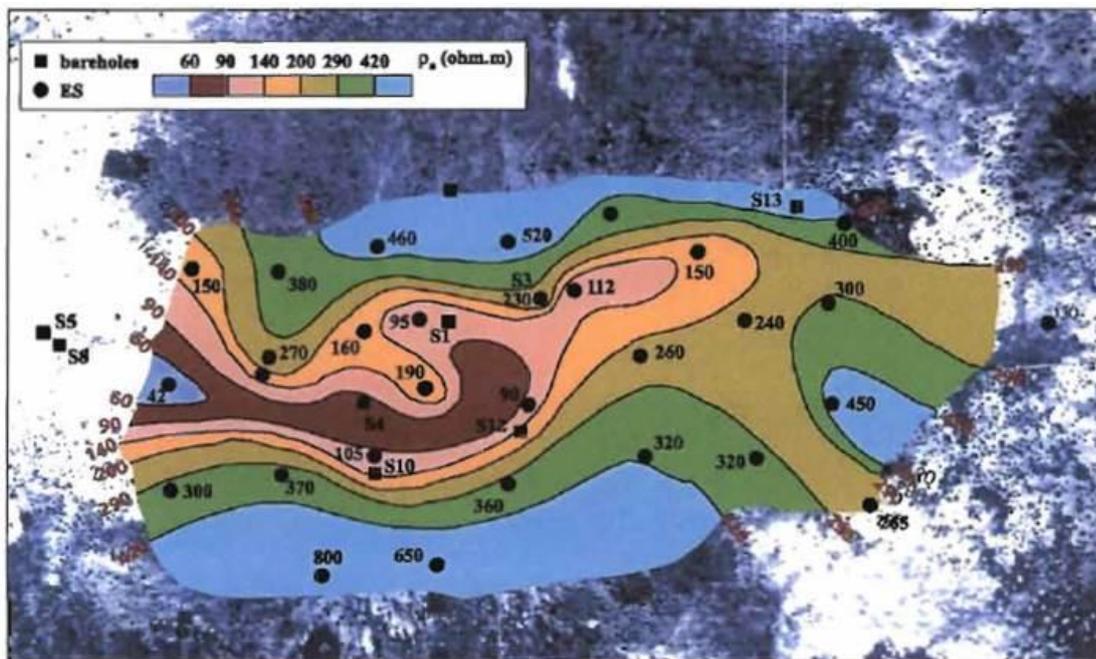


Figure 5: Carte des résistivités apparentes (BRGM, 1991)

La RMP, seule méthode géophysique permettant avant forage de prédire la présence d'eau en quantité suffisante et de caractériser à priori le réservoir potentiel (Toé, 2004) a montré une certaine cohérence avec les sondages électriques et une bonne corrélation avec les résultats des essais de pompages.

La carte linéamentaire (figure 6) établie par BRGM (1991) basée sur l'interprétation des images SPOT (du 17/02/1987), et des photographies aériennes montrent qu'il y a 3 familles directionnelles de discontinuités : N55 à N75°E, N115 à N125°E et N145° à N165°E.

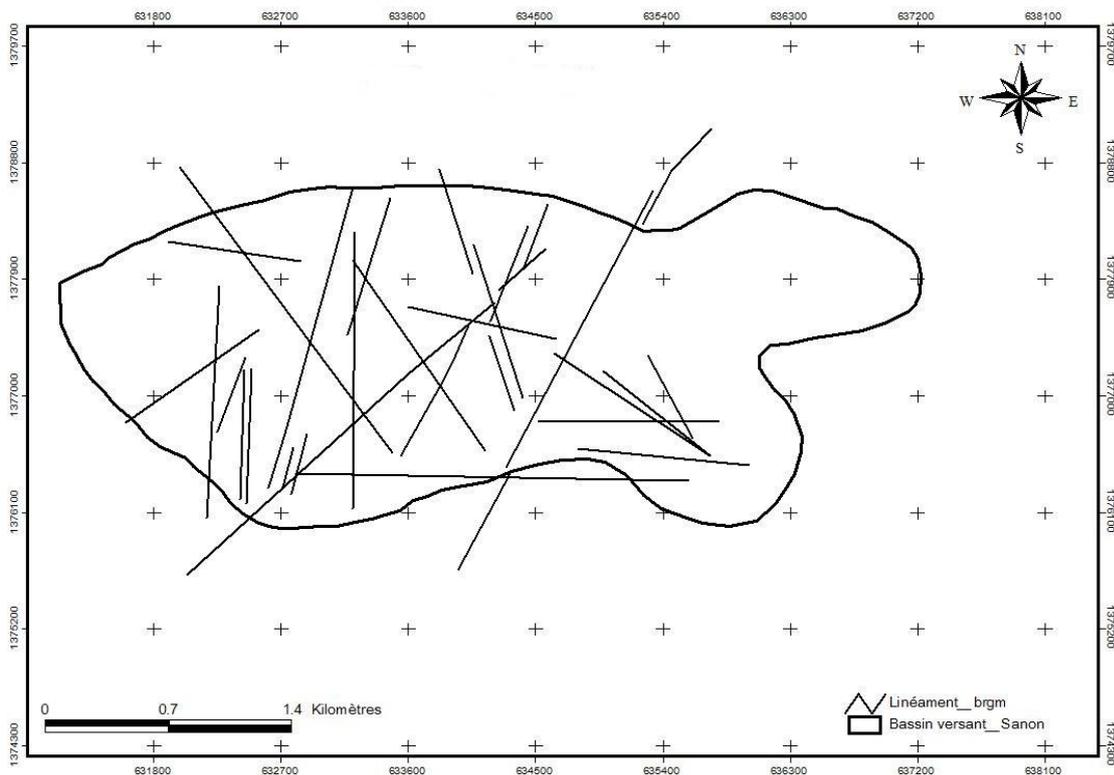


Figure 6: Carte linéamentaire du bassin versant de Sanon (BRGM-AQUATER, 1991)

La carte piézométrique établie correspondant aux périodes de basses eaux et hautes eaux des années 1993, 1994 et 1995 présente une surface piézométrique de la nappe peu profonde (6 à 10 m en basses eaux). L'étude de cette carte indique également l'existence d'un dôme piézométrique dans la zone centrale de la vallée du site. Ceci confirme que la recharge s'effectue bien dans la zone centrale (Comparé, 1997).

Pour étudier les propriétés hydrodynamiques, trois (03) essais de pompage de longue durée (72h) suivi de 24h d'observation de la remontée dont deux (02) en zone de dôme piézométrique et un (01) hors zone dôme piézométrique ont été réalisés par Comparé en 1997. Ces essais ont été faits sur des forages captant uniquement l'altérite et ceux captant le socle fracturé. Ceci dans le but d'évaluer la fonction capacitive des altérites. L'interprétation de ces essais a été faite par la solution analytique de Theis.

Les résultats obtenus à l'issue de cette interprétation montrent que la transmissivité du site est comprise entre $4.2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et $8.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et le coefficient d'emménagement varie entre $2.9 \cdot 10^{-4}$ et $4.4 \cdot 10^{-2}$. La transmissivité déduite dans le socle fracturé est légèrement plus élevée que celle des essais dans les altérites en raison des bonnes propriétés de fracture.

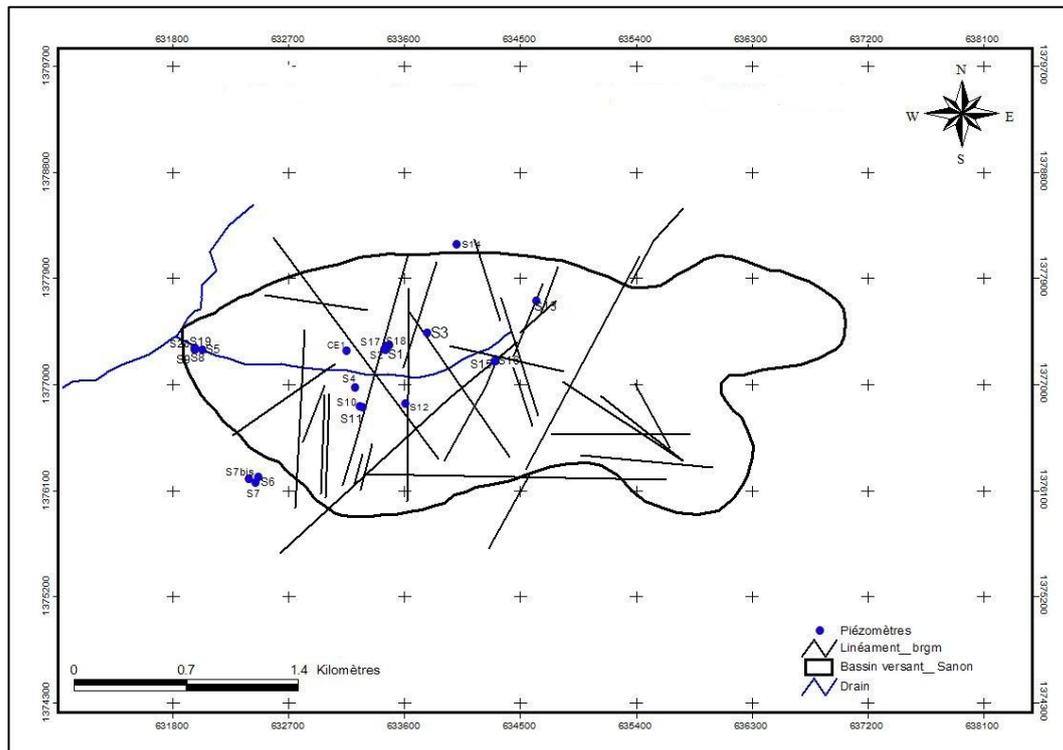


Figure 7: Carte de répartition spatiale des piézomètres

DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIELS ET MÉTHODES

I Matériels

- Travaux de terrain

Pour les travaux sur le site, le matériel ci-dessous a été utilisé :

- La prospection géophysique par tomographie électrique est menée avec les résistivimètres *Syscal R1 plus 72 switches* (figure 8) et *Syscal Pro* (figure 9) de chez IRIS. Ces appareils peuvent fonctionner en mode multi électrode et au maximum utilisent respectivement 72 et 96 électrodes. En fonction de la séquence assignée, ils injectent le courant et mesurent la différence de potentiel engendrée à travers des câbles qui sont en contact avec le sol par le biais des piquets.



Figure 8: Syscal Pro



Figure 9: Syscal R1 plus 72 switches

- Une boussole est utilisée pour l'orientation des profils ERT
- Un GPS Garmin de type *GPSMAP 64s* de précision 3 m est utilisé pour relever les coordonnées géographiques des positions des électrodes et faire un levé topographique du profil.
- Pour avoir en image le milieu physique observé sur le terrain, un appareil photo numérique est utilisé.

- Travaux de bureau

Les logiciels ci-dessous sont utilisés pour les transferts de données ordinateur/appareil et appareil/ordinateur, pour les traitements et le rendu des résultats.

- ArcView 3.2 et ArcGIS 10 pour analyser les données et concevoir des cartes ;

- Electre II, Electre Pro et Prosys II pour créer les séquences, charger les séquences dans le résistivimètre, télécharger les données du résistivimètre et convertir les formats des fichiers (bin en dat) ;
- X2ipi pour créer les séquences, faire un pré traitement (supprimer les mauvaises mesures, assembler les panneaux etc.) ;
- DC2DInvRes et Res2Dinv pour l'inversion des résistivités apparentes ;
- Grapher 10 pour faire sortir les rendus des panneaux inversés ;
- AQTESOLV Pro pour interpréter les données des essais de pompages ;
 - Données utilisées

Les données d'essai de pompage utilisées pour l'interprétation sont celles de Compaoré (1997), qui a réalisé trois essais de pompage de longue durée (72 h), dont deux (02) sur le même forage S2 situé en zone de dôme piézométrique, à des périodes différentes (basses eaux et hautes eaux). Le troisième essai a été effectué sur le forage S19 situé hors dôme piézométrique, en période basses eaux. Ces essais de pompage ont été réalisés avec des débits faibles (environ 500 l/h au puits S2 et moins de 100 l/h au puits S19).

II Méthodes

II.1 Méthodologie de caractérisation géologique

Pour caractériser la géologie du milieu, nous avons eu recours à la géophysique, qui nous a permis de valider les linéaments observés par BGRM (figure 10), Priva (figure 11), et Koussoubé (figure 12), et nous a permis également de définir la géométrie de ce milieu.

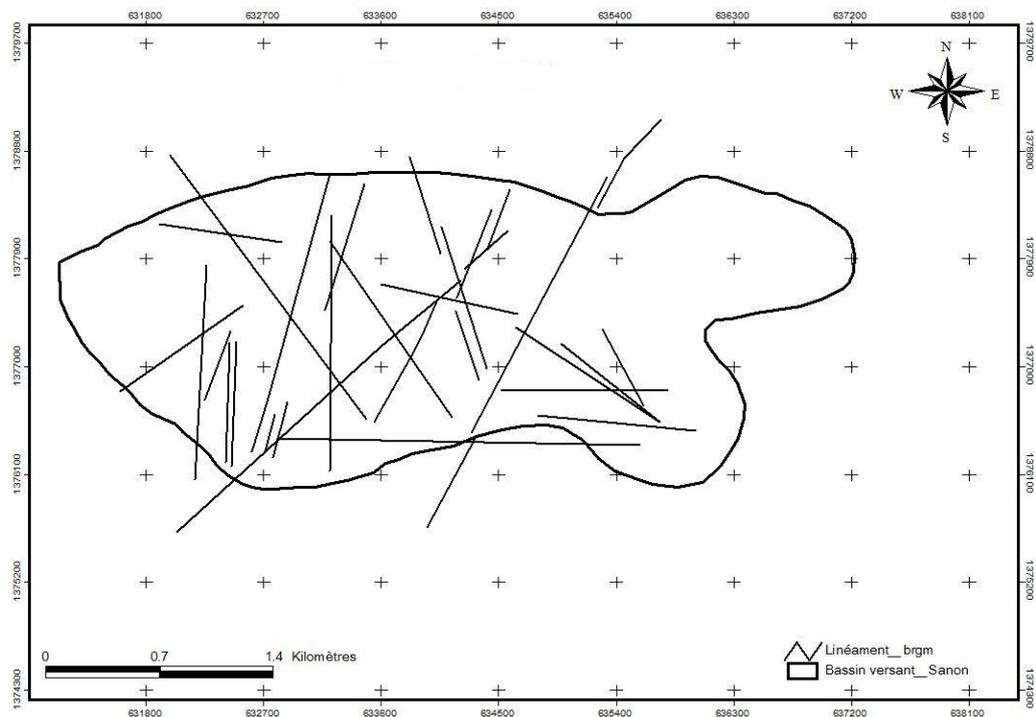


Figure 10: Carte linéamentaire (BRGM, 1991)

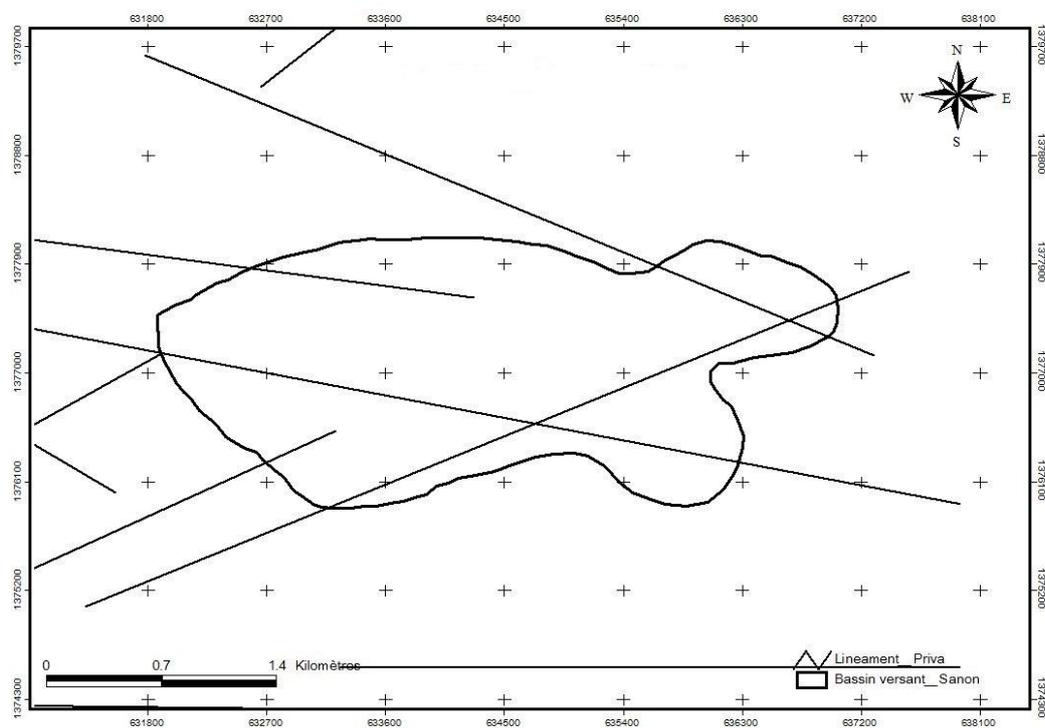


Figure 11: Carte linéamentaire (Priva, 2012)

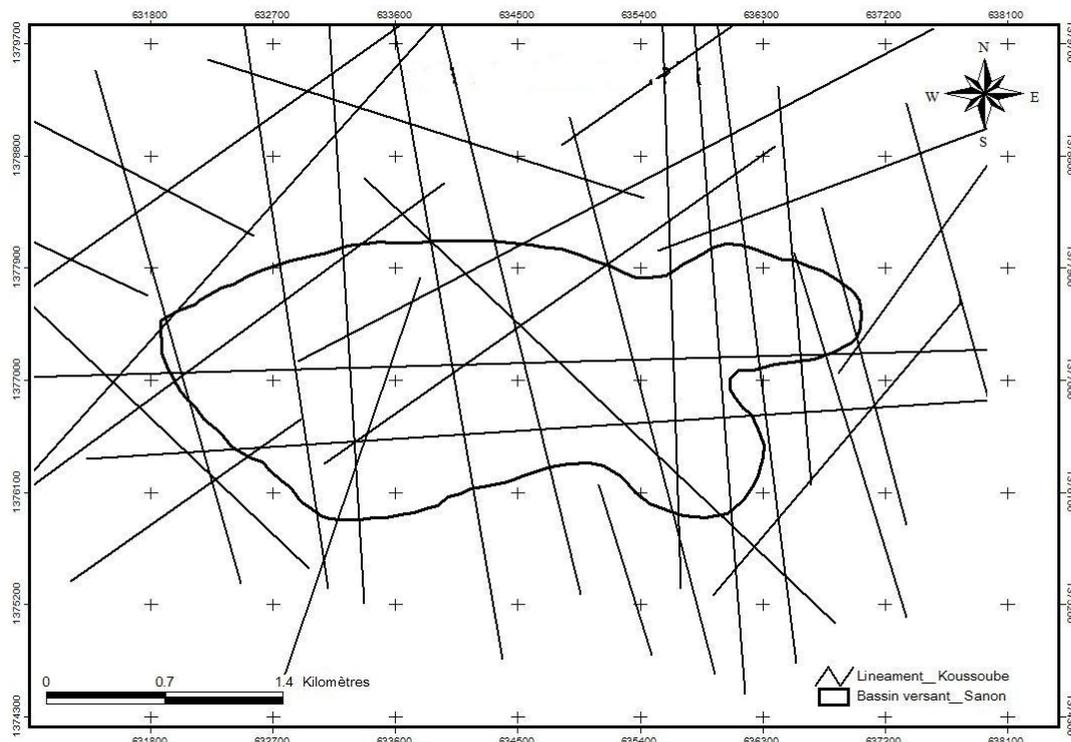


Figure 12: Carte linéamentaire (Koussoubé, 2014)

La méthode géophysique utilisée est l'électrique. Cette méthode est utilisée à cause de la disponibilité du matériel et des capacités de la méthode à mettre en évidence les formations résistantes.

Elle consiste à injecter le courant électrique dans le sol entre deux électrodes, et de mesurer la différence de potentiel induite entre deux autres électrodes (électrodes de potentiel), et donc de déterminer la résistivité apparente du sol. Cette résistivité apparente dépend de la configuration des électrodes de courant et des électrodes de potentiel. La résistivité électrique apparente peut être exprimée en fonction de la différence de potentiel et l'intensité du courant (Ward, 1990 in Penz, 2012) :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Avec} \quad K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1}$$

La résistivité électrique apparente ρ_a est exprimée en $\Omega.m$ (ohm mètres) ; le courant électrique d'intensité I exprimé en A (ampères) et la différence de potentiel ΔV exprimée en V (volts)

K : facteur géométrique qui dépend de la configuration des électrodes (dispositif).

Plusieurs types de dispositifs d'électrodes sont utilisés : Wenner α , Wenner β , Schlumberger (appelés dispositifs quadripolaires), Pôle-Pôle, Dipôle-Dipôle et Pôle-Dipôle (appelés dispositifs polaires). Les avantages et les limites de ces dispositifs sont détaillés plus loin dans ce document (configuration des électrodes).

Dans le cadre de cette étude, la technique de mesure par tomographie électrique des résistivités, encore appelée *Electrical Resistivity Tomography (ERT)* est préférée aux autres techniques de mesure électriques existantes (sondage électrique et trainé électrique), car elle permet d'obtenir un modèle de la résistivité du sous-sol où la répartition de la résistivité varie verticalement et horizontalement le long du profil (Dahlin, 2001 in Rémi, 2010). La tomographie fait à la fois le sondage et le trainé électrique, elle donne une image 2D du sous-sol. La figure 11 donne le principe d'acquisition des mesures de cette technique.

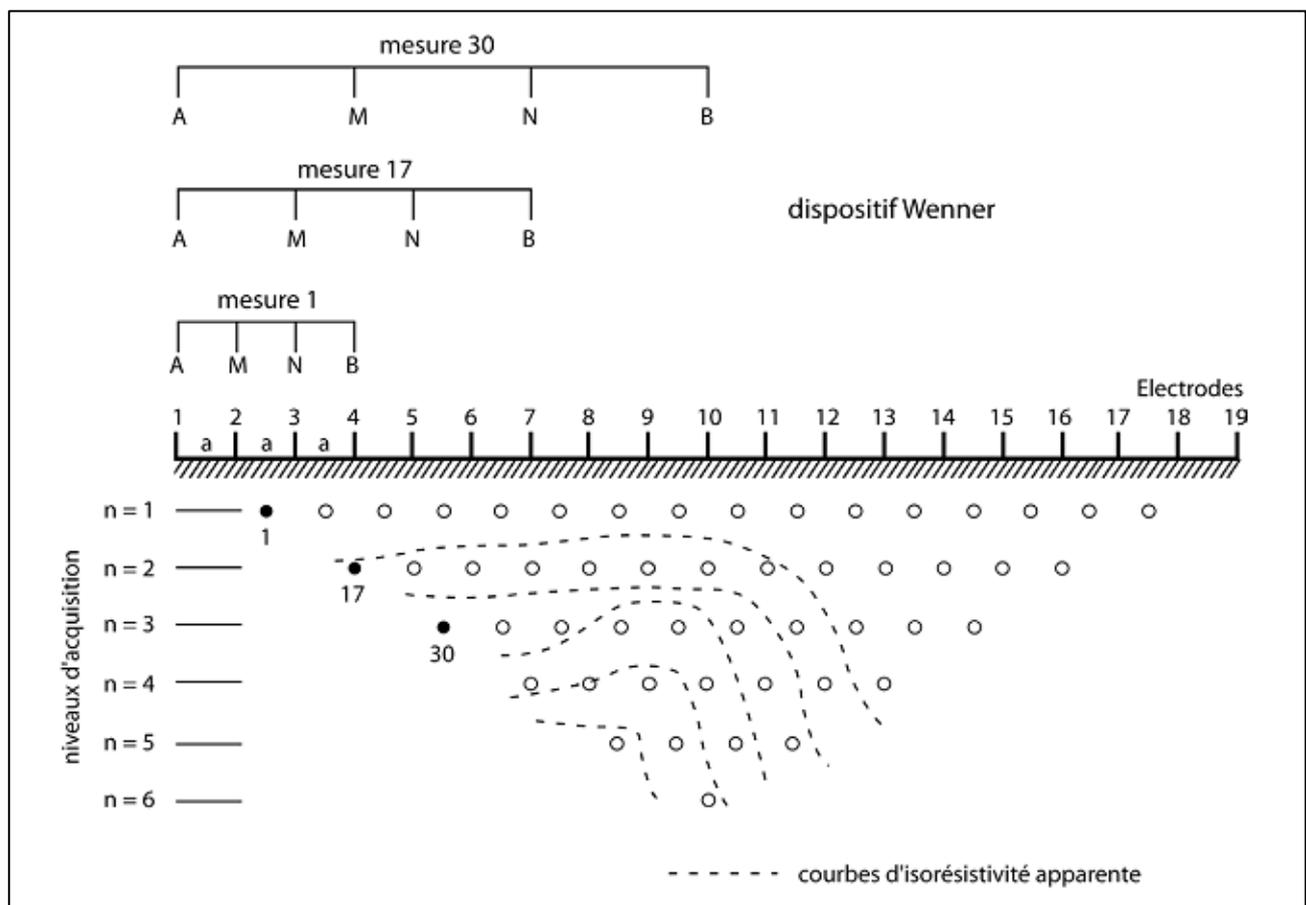


Figure 13: Construction d'une pseudo-section pour un protocole Wenner (Marecost, 2004)

La démarche méthodologique adoptée dans cette phase se subdivise en trois (03 étapes) à savoir :

- Modélisation synthétique de l'aquifère ;
- Mesures géophysiques;

– Traitements, inversion et calibration des données.

- **Modélisation synthétique de terrain**

Le modèle synthétique permet de choisir le dispositif à utiliser et les bons paramètres d'inversion car le choix du meilleur dispositif dépend de la structure à imager (Loke, 1994), du bruit de fond et de la sensibilité de l'appareil de mesure. Cette démarche se résume dans l'organigramme de la figure 12.

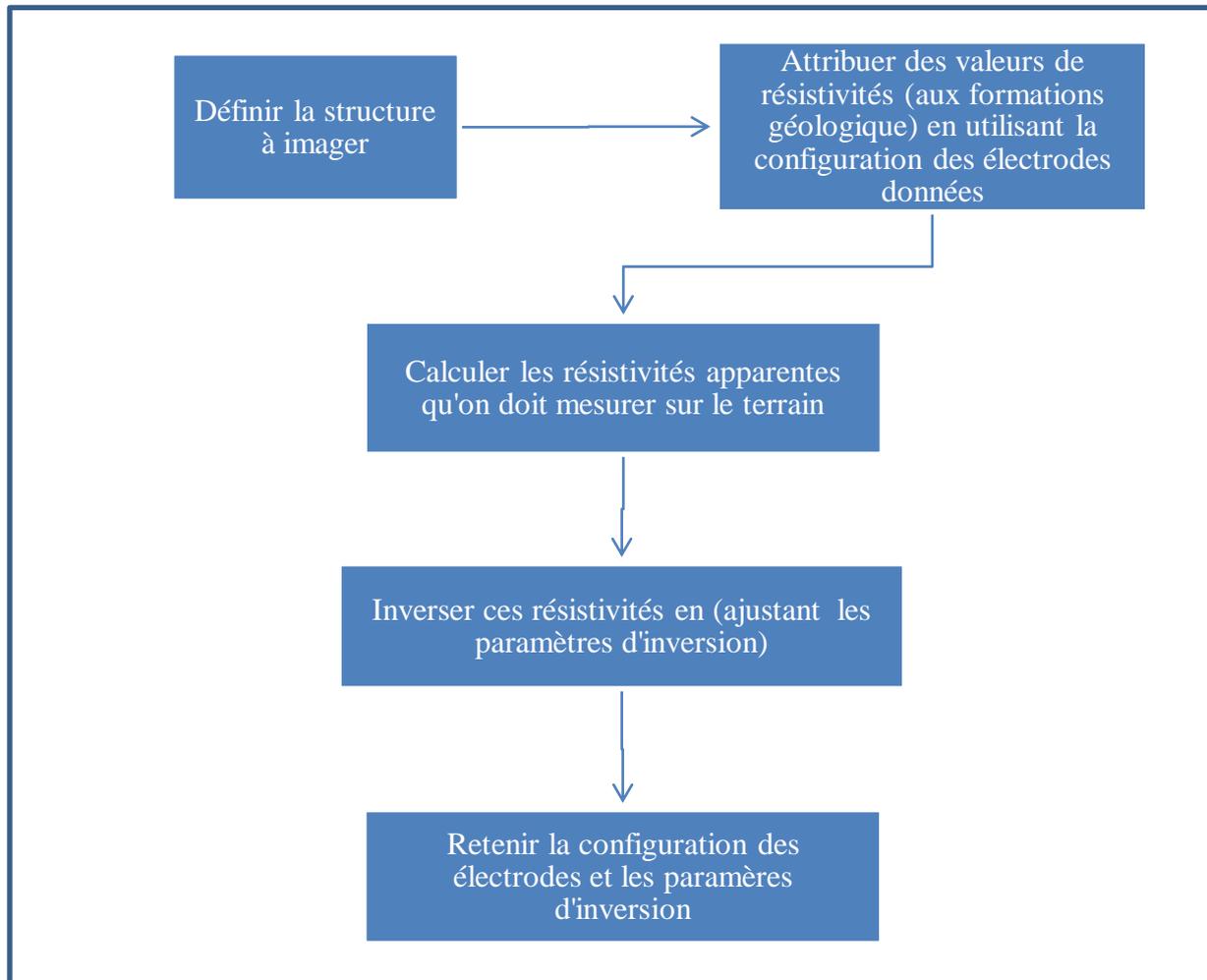


Figure 14: Organigramme de la modélisation synthétique

- **Structure à imager**

Les logs de forage permettent de donner une idée sur la structure à imager mais se limitent seulement sur la géométrie. Dans le cadre de la présente étude, un des deux profils ERT passe par le forage (S1). Ce forage a été choisi à cause de sa position dans le bassin versant (vallée) et de sa profondeur de foration (il capte le socle fracturé). À travers son log (annexe), il est représenté dans la figure 13.

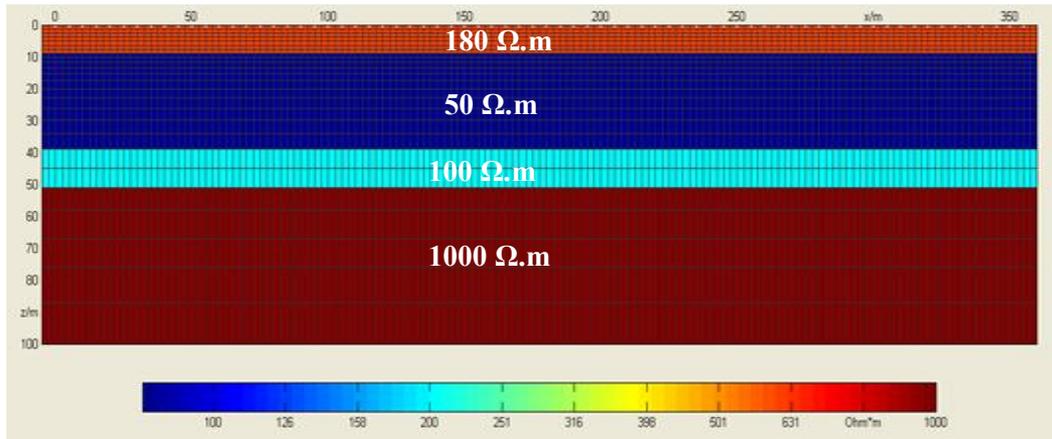


Figure 15: Modèle synthétique du piézomètre S1

- *Inversion des résistivités apparentes*

Il existe deux types de modélisation : la modélisation directe qui calcule les résistivités électriques apparentes à partir des résistivités vraies en solutionnant la loi d'Ohm et l'équation de Laplace (Rémi, 2010); et la modélisation inverse qui consiste à obtenir les résistivités vraies à partir des résistivités apparentes mesurées sur le terrain de façon itérative. Des logiciels dans lesquels sont implémentés mathématiquement ce processus d'inversion sont utilisés pour faire ces calculs de façon automatique (Rémi, 2010). Les logiciels les plus utilisés sont Res2DInv (Loke, 1994 ; Loke and Barker, 1996a) et DC2DInvRes (Günther, 2004). Les deux logiciels utilisent la méthode des moindres carrés (Gauss-Newton). Rémi Clément (2010) dans ses travaux de thèse a eu à faire une étude de comparaison de ces deux logiciels (tableau de comparaison en annexe 1). À l'issue de cette étude, il en ressort que le logiciel Res2DInv est adapté aux processeurs multi-cœur, et sa conception permet une rapidité dans l'exécution des calculs d'inversion. Par sa fonctionnalité à l'utilisation, DC2DInvRes présente une interface graphique très intuitive et permet la réalisation de modélisation directe de manière très simple. Dans la présente étude, DC2DInvRes a été choisi pour la modélisation directe. L'inversion des données ERT a été faite par les deux logiciels à savoir RES2DInv et DC2DInvRes. Ces inversions sont contrôlées par des paramètres d'inversion qui permettent d'amortir et d'adoucir l'inversion en fonction du type des données acquises.

- *Paramètres d'inversion*

En ce qui concerne les paramètres d'inversion, DC2DInvRes propose des options semblables à celles de RES2DInv.

Least square inversion tend à minimiser le carré de la différence des valeurs de résistivités apparentes et calculées.

Robust inversion : une contrainte d'inversion des données, est utilisée si le jeu de données est très bruité car il est sensible aux données bruitées et propose une inversion avec une RMS sensiblement plus élevée. Il tend à minimiser la différence absolue dans les valeurs de résistivités. Ce paramètre tend également à produire des modèles avec des interfaces bien dessinées entre les zones de résistivités différentes, et à l'intérieur de ces zones les gammes de valeurs de résistivités tendent à être les mêmes.

No constraint : les pseudo-sections sont inversées indépendamment les unes des autres.

Least-square smoothness constrain : ce paramétrage contraint l'inversion de telle manière que les variations spatiales des résistivités calculées soient lissées selon la méthode des moindres carrés. Il tend à minimiser le carré de la variation entre les valeurs mesurées et calculées.

Robust smoothness constrain : contraint l'inversion de telle manière que les variations absolues soient lissées.

Blocky model : produit des modèles avec des variations abruptes à l'interface de différentes régions de résistivité, et dans chacune de ces régions la valeur de la résistivité est rendue plus homogène. Très efficace dans les zones de socle.

Lambda λ : facteur d'amortissement, permet de définir l'intensité de la contrainte Smooth dans l'inversion.

Z-weight : paramètre qui contrôle l'hétérogénéité du terrain, il permet d'ajouter une contrainte de déformation dans l'inversion. Par défaut, le coefficient est égal à 1, c'est-à-dire que la contrainte verticale est identique à la contrainte horizontale.

Les paramètres λ et z-weight qui contrôlent la fonction qui contrôle l'évolution des résistivités suivante :

$$f = (\rho_{cal} - \rho_{mes})^2 + \lambda \left(\frac{d\rho}{dx} + z \frac{d\rho}{dz} \right) \quad (\text{Günther et al, 2004})$$

Pour λ plus grand (60-100) : les variations de résistivité plus prononcées et peu amorties.

Pour λ plus petit (0-10) : les variations de résistivité seront lissées et amorties.

Z-weight plus fort (2) force le programme à produire un modèle avec une élongation verticale

Pour valeur de Z-weight plus petit (0.5), le programme produit un modèle avec une élongation horizontale.

❖ *Qualité d'inversion*

La qualité d'inversion est contrôlée par le RMS et le χ^2 , qui sont donnés par les formules ci-dessous :

$$RMS = \sum (\rho_{cal} - \rho_{mes})^2$$

$$\chi^2 = \frac{(\rho_{cal} - \rho_{mes})}{\varepsilon}$$

RMS (Roots-Means-Squared) mesure la différence entre les résistivités électriques apparentes calculées et les résistivités électriques mesurées.

χ^2 ressemble au RMS mais est normalisé par l'erreur propre de chaque quadripôle de mesure ε (erreur estimée en fonction du dispositif utilisé, de l'espacement inter-électrodes, du voltage injecté et des valeurs des résistivités apparentes mesurées).

Pour avoir un modèle qui reproduit mathématiquement les résistivités apparentes mesurées, il faut que le RMS soit le plus faible possible. Il est plus difficile d'obtenir un RMS faible quand les données sont très bruitées car il existe de forts contrastes de résistivités apparentes dans le modèle. Par conséquent, les valeurs extrêmes influencent l'estimation du RMS (cas des mesures de mauvaises qualités, erreur importante). Dans une telle situation, le χ^2 est une meilleure valeur à utiliser car il permet d'avoir une estimation de l'erreur représentative de l'ensemble des résistivités (Günther, 2004).

Les panneaux du modèle synthétique (conceptuel) sont inversés sous DC2DInvRes en jouant sur les paramètres d'inversion jusqu'à obtenir des épaisseurs de couches (avec des gammes de résistivités) rapprochant au mieux les logs de forage à côté desquels passent ces panneaux.

• *Configuration des électrodes*

Les propriétés d'un dispositif peuvent être étudiées en évaluant la sensibilité de la mesure en un point par rapport à une variation des propriétés électriques du terrain (Barker, 1979). L'expérience et les études antérieures ont permis de ressortir les avantages et les limites des différents dispositifs (annexe 2). Dans le cadre de cette étude, seuls les dispositifs Wenner α et Wenner β ont été utilisés.

Le dispositif Wenner α (figure 14) est sensible aux hétérogénéités horizontales, le dispositif Wenner β (figure 14) quant à lui est très sensible aux hétérogénéités superficielles, et donne une bonne résolution verticale. (Loke et Barker, 1995 *in* Gomez, 2004)

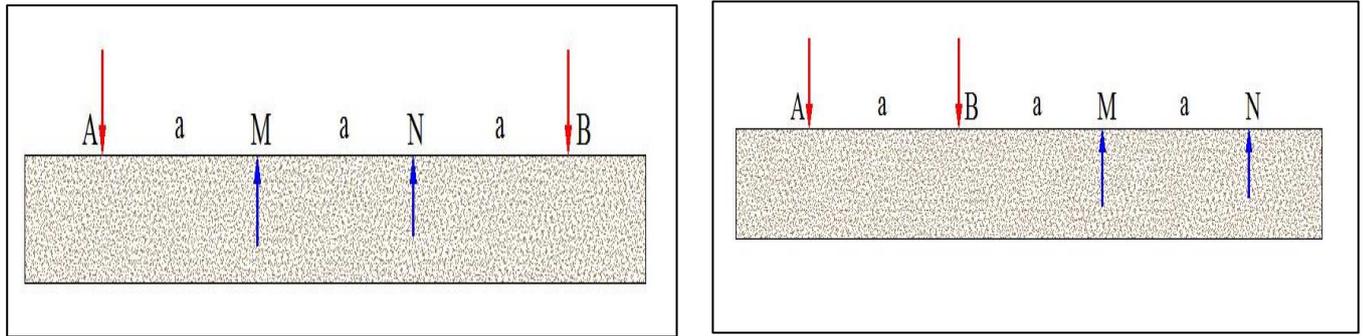


Figure 14: Dispositifs Wenner α et Wenner β

Décrit précédemment dans le modèle de socle, les couches géologiques se comportent en structure tabulaire et les fractures d'origine tectoniques en structure sub-verticale. Loke (2011) recommande le dispositif Wenner α pour la caractérisation des structures horizontales (milieux tabulaires) et le dispositif Wenner β (ou dipôle-dipôle) pour la recherche des structures verticales (failles).

- *Les mesures géophysiques*

Les panneaux sont orientés perpendiculairement à l'orientation majeure des discontinuités et recourent le maximum des discontinuités identifiées. À défaut de matériel pour faire la diagraphie, les profils ERT passent à côté de certains forages du site. La motivation de ce choix est détaillée un peu plus loin. Un profil ERT est composé de plusieurs panneaux, pour pouvoir concaténer ces panneaux, le passage d'un panneau à un autre se fait avec un déplacement d'un demi dispositif (Roll Along $\frac{1}{2}$) ceci permet d'avoir un bon compromis entre la profondeur d'investigation au niveau du recouvrement et la facilité de mise en œuvre.

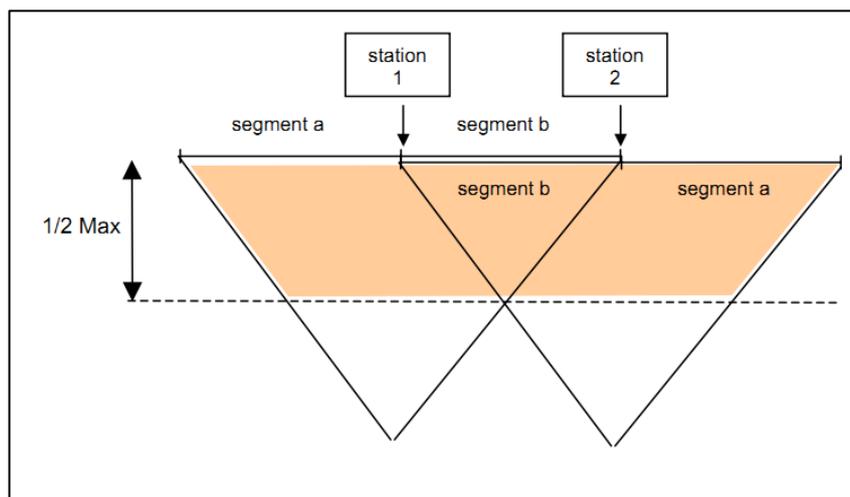


Figure 16: Roll Along (IRIS instruments, 2003)

- **Traitements, inversion et calibration des données.**

Les données sont traitées (suppression des anomalies de mesures) (figure 17) avant toute inversion. Les panneaux sont ensuite assemblés pour former un seul profil (figure 18 et annexe 3). Les panneaux passant par des forages sont d'abord inversés et les valeurs de résistivités électriques et les épaisseurs des formations rencontrées sont comparées au log de ce forage afin d'ajuster les paramètres d'inversion jusqu'à ce que la géométrie des formations rencontrée corresponde au log du forage, cette démarche est appelée la calibration. Ensuite, les autres panneaux du profil sont inversés avec les mêmes paramètres.

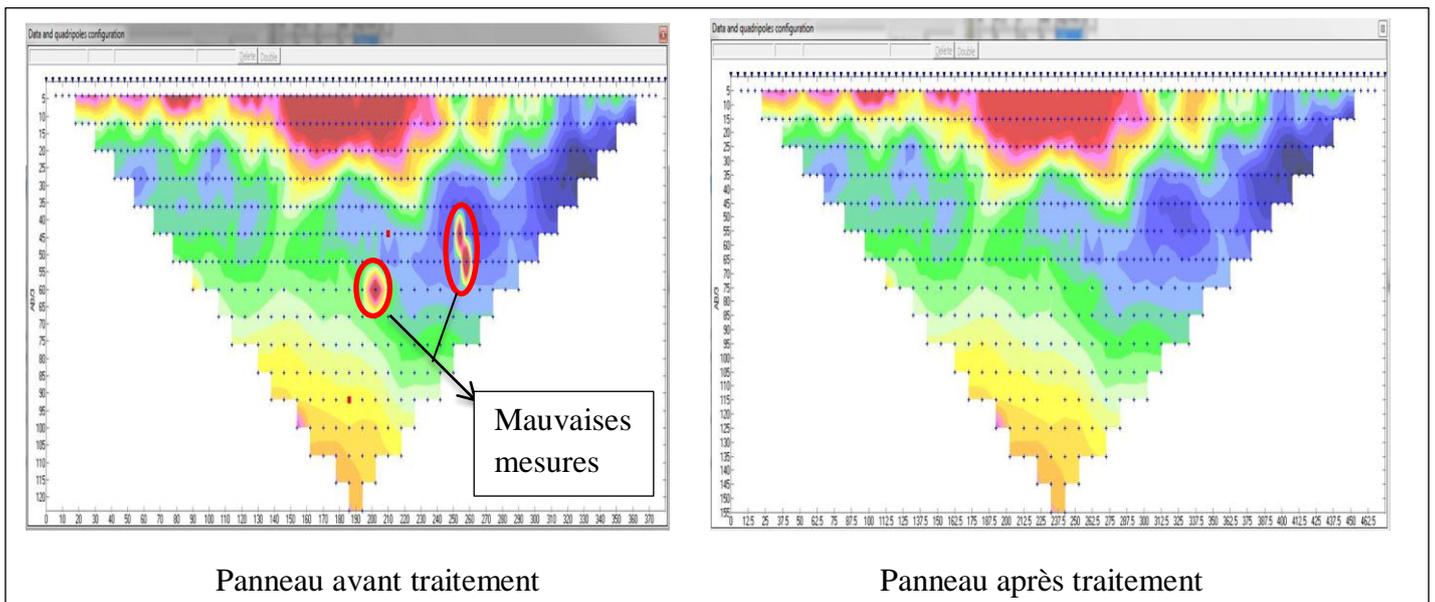


Figure 17: Traitement des données mesurées

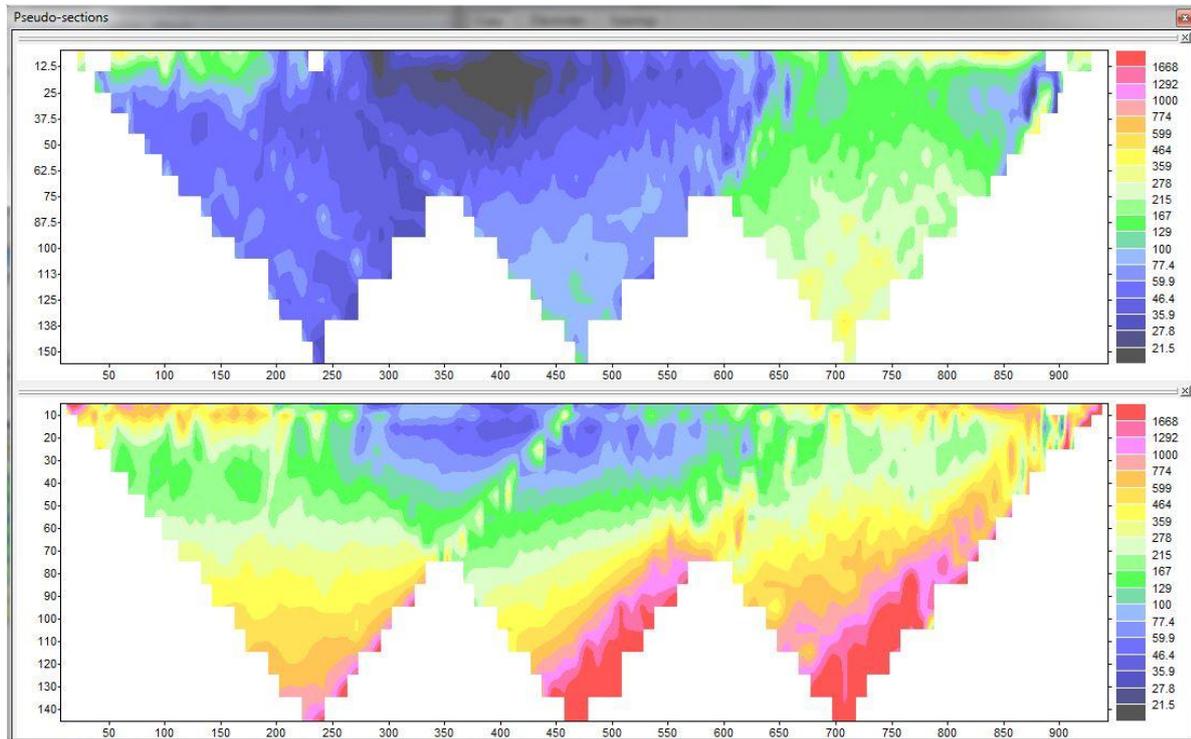


Figure 18: Panneaux assemblés de 1-4 du profil ERT_aval du bassin versant

II.2 Méthodologie de caractérisation hydrodynamique de l'aquifère

Caractériser l'hydrodynamisme d'un aquifère c'est déterminer ses propriétés hydrodynamiques (transmissivité T et le coefficient d'emmagasinement S), afin de comprendre les différents régimes d'écoulement. Il existe plusieurs techniques d'essai qui sont utilisées pour arriver à cette fin, à savoir la *distribution de la granulométrie*, le *Slug test* (essais par injection) et les *essais de pompage*. De toutes ces techniques, les essais par pompage est la plus utilisée. L'interprétation des données issues des essais de pompage est basée sur l'équation de diffusivité en régime d'écoulement transitoire:

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

h = charge piézométrique (m)

r = distance par rapport au puits de pompage (m)

t = temps (s)

S = coefficient d'emmagasinement

T = transmissivité (m^2/s)

Il existe deux types techniques d'interprétation de ces essais par pompage pour déterminer les propriétés hydrodynamiques :

- L'interprétation classique la plus utilisée, utilisant systématiquement la solution de Theis ou de Jacob issue de l'équation de diffusivité en régime d'écoulement transitoire.

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

La solution de Jacob est la forme simplifiée de la solution de Theis :

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \times \ln\left(\frac{2.25 \times T \times t}{S \times r^2}\right)$$

s = rabattement (m)

r = distance du piézomètre par rapport au puits de pompage (m)

t = temps (s)

S = coefficient d'emmagasinement

T = transmissivité (m²/s)

Cette technique de détermination présente quelques limites, elle n'est valable que pour les aquifères captifs, homogènes et isotrope.

- La technique d'interprétation par la dérivée logarithmique du rabattement : l'interprétation par la dérivée logarithmique du rabattement est une technique qui n'est pas connue par le grand monde d'hydrogéologue. Elle se base sur le calcul de la dérivée du rabattement par rapport au logarithmic du temps dans un repère log-log ou semi-log :

$$\frac{\partial s}{\partial \ln t} \text{ Avec } s \text{ le rabattement observé et } t \text{ le temps de pompage}$$

Les avantages de cette technique décrite par Renard et al (2008) sont :

- La dérivée du rabattement est extrêmement sensible à des subtiles variations des écoulements des eaux souterraines, ce qui permet de détecter des comportements de l'aquifère qui sont difficiles à identifier sur la courbe de rabattement seule ; ces variations sont provoquées par les hétérogénéités de l'aquifère.
- L'analyse de la courbe diagnostique facilite l'identification du modèle conceptuel de l'aquifère.

Par définition, la dérivée logarithmique du rabattement est égale à : $\frac{\partial s}{\partial \ln t} = t \frac{\partial s}{\partial t}$

Il existe plusieurs manières de calculer la dérivée, la plus simple proposée par Renard et al (2008) est la suivante :

$$\frac{\partial s}{\partial \ln t} |_{t_m} = \frac{s_i - s_{i-1}}{\ln(t_i) - \ln(t_{i-1})}$$

Cette approximation est associée au temps t_m correspondant au centre d'intervalle de temps (déterminé soit par la moyenne arithmétique $t_m = (t_i + t_{i-1})/2$ ou géométrique $t_m = \sqrt{(t_i t_{i-1})}$).

La technique d'interprétation par dérivée logarithmique du rabattement est choisie dans le cadre cette étude, car elle est non seulement adaptée au site mais permet également d'identifier les différents régimes d'écoulement de l'aquifère.

La figure 18 résume les démarches suivies pour interpréter les essais.

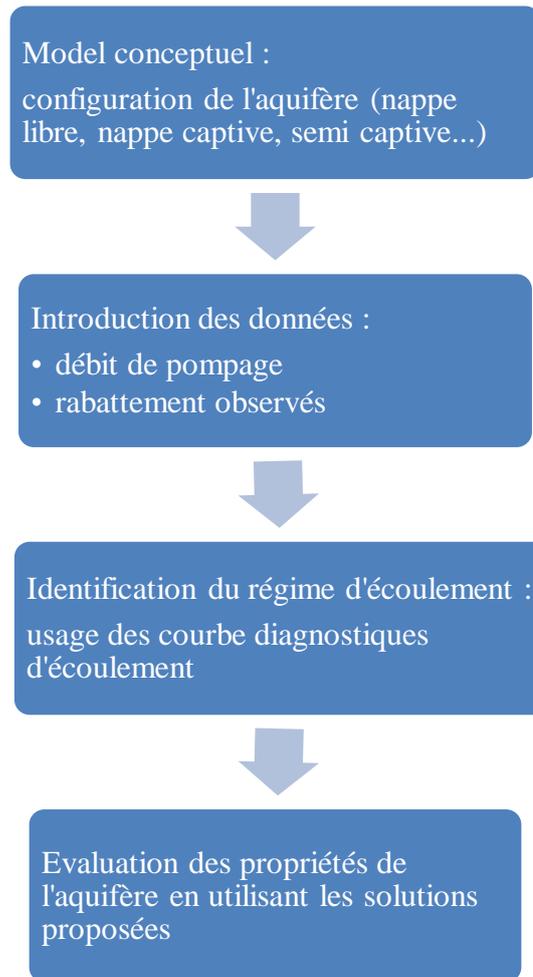


Figure 19: Organigramme d'interprétation des essais de pompage

Les essais de pompage dans la zone de dôme piézométrique sont réalisés des piézomètres dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2 et dans la zone hors dôme piézométrique tableau 3.

Tableau 2: Caractéristiques des ouvrages utilisés pour la réalisation des essais de pompage en zone de dôme piézométrique

Forage	Profondeur de foration	Formation recoupées	Nature	Distance au puits (m)
S1	76.5	Altérite et Socle	Piézomètre	6.6
S2	34	Altérite	Puits de pompage	0
S17	34	Altérite	Piézomètre	6
S18	34	Altérite	Piézomètre	9

Tableau 3: Caractéristiques des ouvrages utilisés pour la réalisation des essais de pompage en hors dôme piézométrique

Forage	Profondeur de foration (m)	Formation recoupées	Nature	Distance au puits (m)
S19	25	Altérite	Puits de pompage	0
S20	23	Altérite	Piézomètre	7.8
S9	25	Altérite	Piézomètre	19.9
S8	58.5	Altérite et Socle	Piézomètre	9.1

L'identification et l'interprétation des régimes d'écoulement sont faites soit au moyen des courbes diagnostiques correspondant aux courbes de rabattement et de dérivée de rabattement (annexe 4), soit à partir du digramme établi par Ehlig-Economides et al. (1994b) (figure 19).

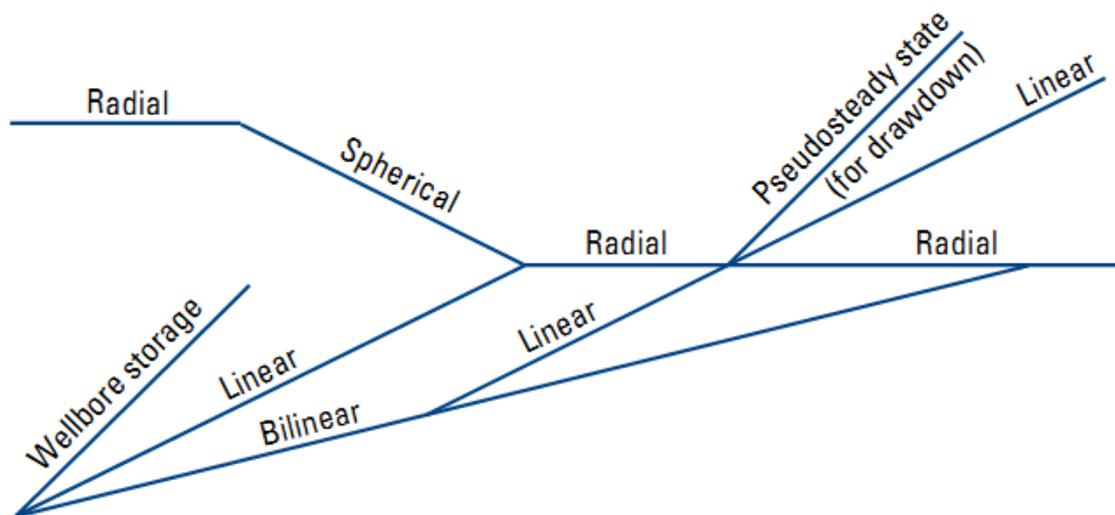


Figure 20: Diagramme d'identification des régimes d'écoulement (Ehlig-Economides et al., 1994b) in (Schlumberger, 2002)

TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION

I Résultats et interprétations

I.1 Caractérisation géologique de l'aquifère

La campagne géophysique effectuée sur le terrain a permis d'obtenir deux (02) profils ERT (figure 21) présentés comme suit :

Profil 1 long de 3 km (15 panneaux), coupe le bassin versant Sud-Nord (N15°) en passant par le piézomètre S1.

Profil 2 (7 panneaux), coupe le bassin versant Sud-Nord (N8°) dans sa partie amont avec une longueur de 1.95 km.

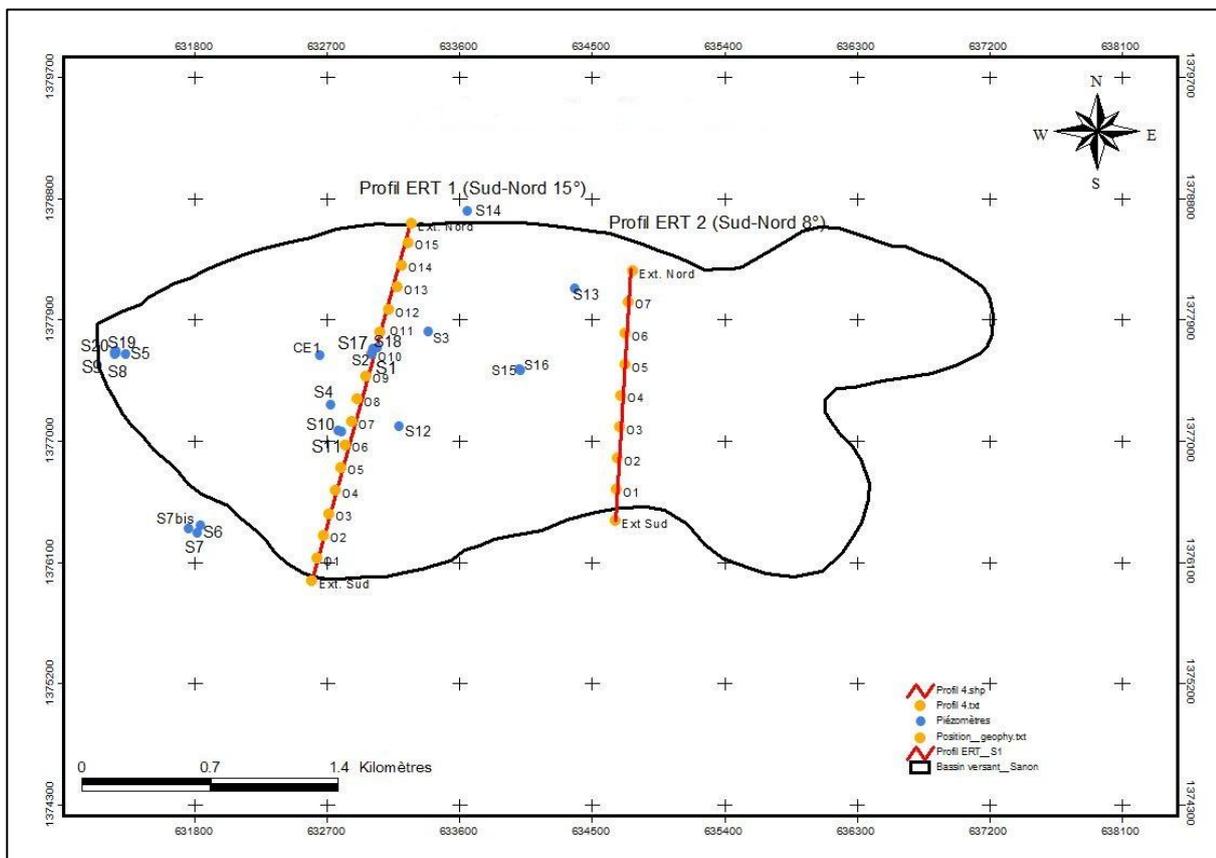


Figure 21: Carte de profils ERT

❖ *Inversion des modèles synthétiques*

Les résultats (figure 20) sont obtenus avec les paramètres d'inversion suivants :

Inversion Algorithm: **Gauss-Newton**; Lambda = **2**; Z-weight = **2**; model constraint: **Smoothness 1st order**; parameter reduction: **Combine cells et Blocky model**.

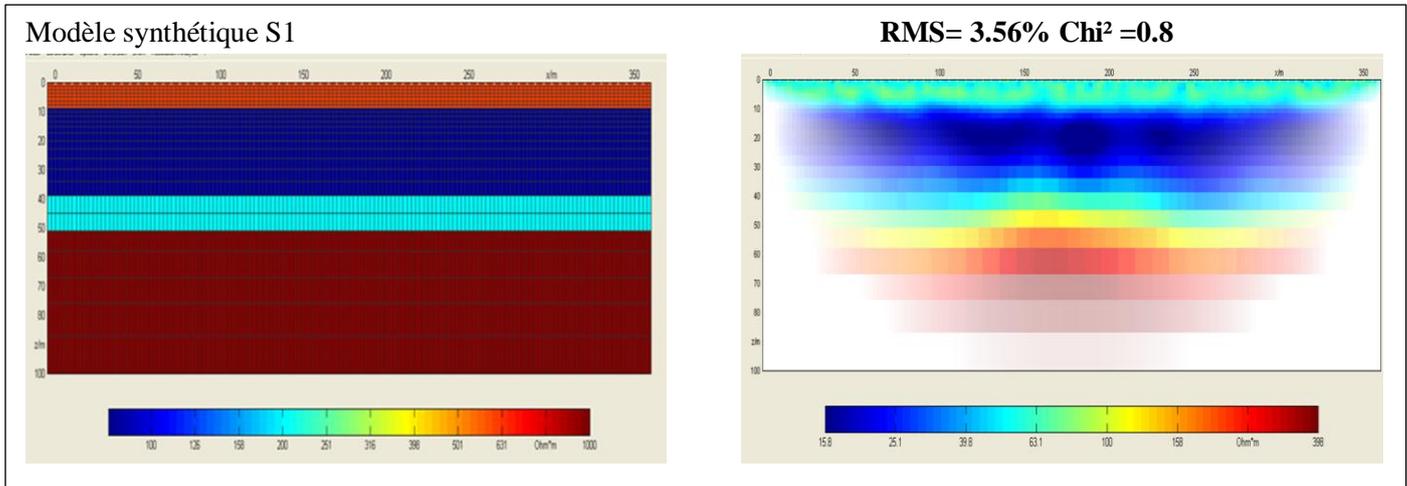


Figure 22: modèles synthétiques inversés

Les résultats d'inversion du modèle synthétique montrent bien les différentes couches avec des épaisseurs qui correspondent aux modèles conceptuels de départ (fait à partir des logs de forages). Les gammes de résistivité également correspondent aux gammes de résistivité des formations rencontrées.

Ces paramètres d'inversions sont utilisés pour inverser les panneaux passant par ces piézomètres.

❖ *Inversion des profils ERT réalisés*

Profil ERT 1

Long de 3 km, ce profil orienté N15° recoupe le bassin versant Sud-Nord en passant par le piézomètre S1.

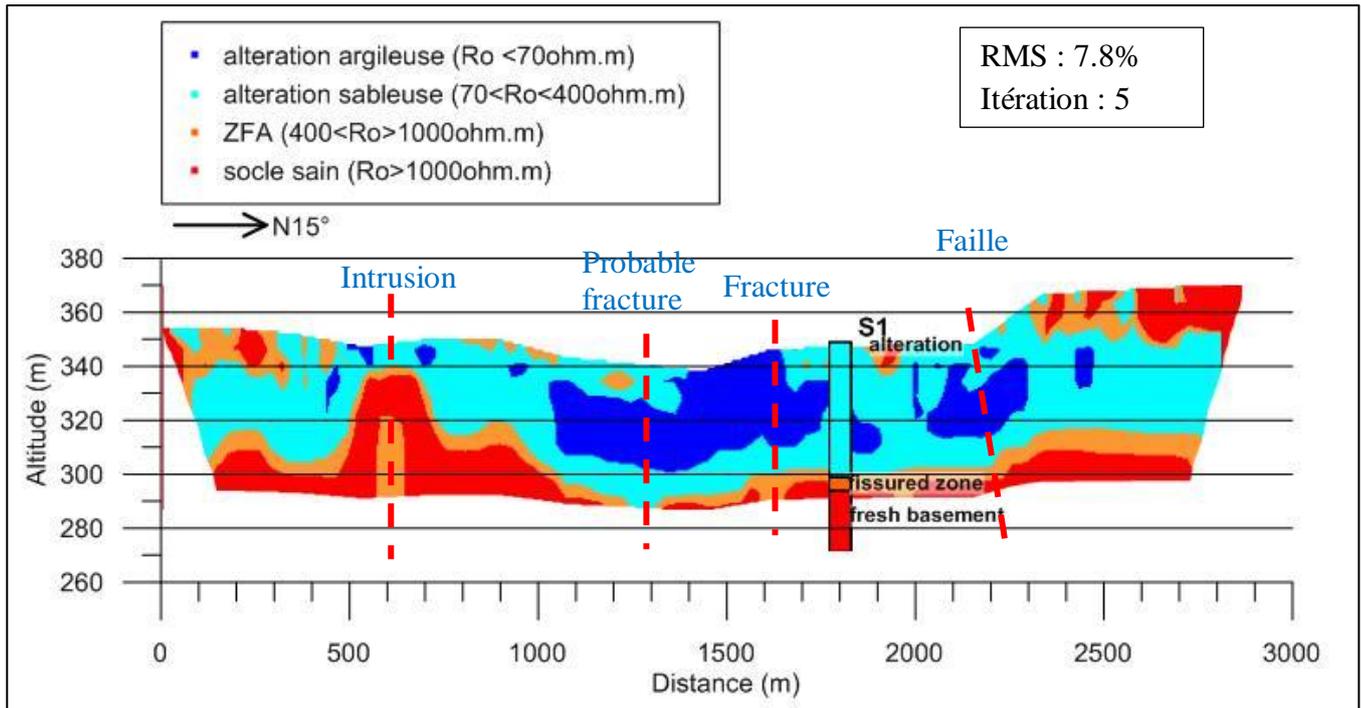


Figure 23: Profil ERT 1 Sud-Nord 15°

- Interprétation géophysique et géologique

Sur ce profil, on note la présence de trois couches décrites par le modèle conceptuel en zone de socle à savoir l'altération, la zone fissurée et la roche saine. On remarque la présence d'un recouvrement superficiel résistant de résistivités comprises entre 400 Ω .m et 1000 Ω .m sur les deux crêtes. En dessous de cette couche se trouve une couche d'altération sableuse (de résistivité comprise entre 70 Ω .m et 400 Ω .m) et argileuse par endroit (de résistivité inférieure à 70 Ω .m). Cette couche est plus épaisse (environ 45 m) dans la vallée centrale que sur les crêtes (environ 30 m). L'horizon fissuré moins épais (10-15 m) d'une résistivité moyenne de 300 Ω .m vient sous la couche d'altération. La roche saine quant à elle, avec une résistivité supérieure à 1000 Ω .m, se trouve à une profondeur d'environ 50 m dans la vallée. Cependant on observe une légère remontée de cette dernière au niveau des crêtes, notamment au niveau de la crête sud où on observe une remontée de la roche saine avec une intrusion. On note la présence d'une fracture au point d'abscisse X= 1600 m et une probable fracture au point X = 1250 m, mais cette fracture ne peut être confirmée à cause de la faible profondeur d'investigation du dispositif. On note également la présence d'une faille vers la crête nord.

- Interprétation hydrogéologique

La présence de la cuirasse latéritique sur les crêtes favorise le ruissellement des eaux vers la vallée centrale qui devient une zone préférentielle de recharge. D'où l'existence d'une zone de dôme piézométrique confirmée par la carte piézométrique.

Profil ERT 2

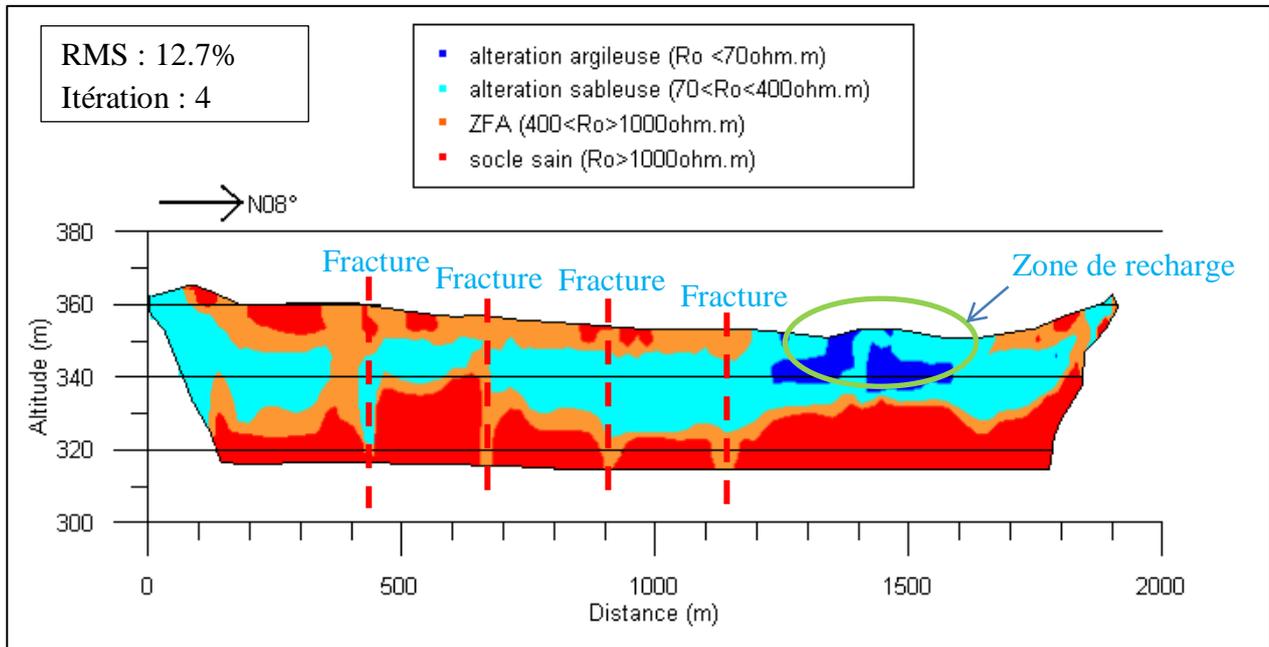


Figure 24: Profil ERT 2 Sud-Nord 8°

Ce profil (figure 22) réalisé dans la partie amont (Est) du bassin versant recoupe le bassin versant du sud au nord et orienté N8°.

- Interprétation géophysique et géologique

On note la présence d'une couche résistante épaisse (environ 30 m) de résistivité comprise entre 400 Ω.m et 1000 Ω.m, allant du centre jusqu'à la crête sud. En dessous de cette couche se trouve l'altération sableuse de résistivité comprise entre 70 Ω.m et 400 Ω.m et d'épaisseur moyenne de 30 m. L'horizon fissuré altérée avec une résistivité moyenne comprise entre 400 Ω.m et 1000 Ω.m est moins épaisse (< 5 m) au nord, et plus épaisse (5-10 m) au sud du profil. La roche saine plus résistante avec une résistivité supérieure à 1000 Ω.m, se trouve à une profondeur moyenne de 20 m. On remarque la présence de trois fractures, aux abscisses X = 680 m, X = 900 m, X = 1150 m. on note également la présence d'une fracture à l'abscisse X = 480 m mais cette dernière s'arrête seulement à une profondeur de 40 m.

- Interprétation hydrogéologique

Le ruissellement se fait du sud vers le nord à cause de la topographie du profil et de la présence de la couche résistante en surface. La partie nord devient la zone préférentielle d'infiltration et donc une zone de recharge. Compte tenu de la topographie et de l'épaisseur d'altération les cibles hydrogéologiques sont les points d'abscisse X = 900 m et X = 1150 m.

❖ Étude des discontinuités :

L'investigation géophysique a permis de valider quelques fractures identifiées par les études antérieures (figure 25, figure 26, et figure 27). Il est noté également la présence d'une faille vers la crête nord. Une carte synthèse des linéaments validés est proposée (figure 28) en fin.

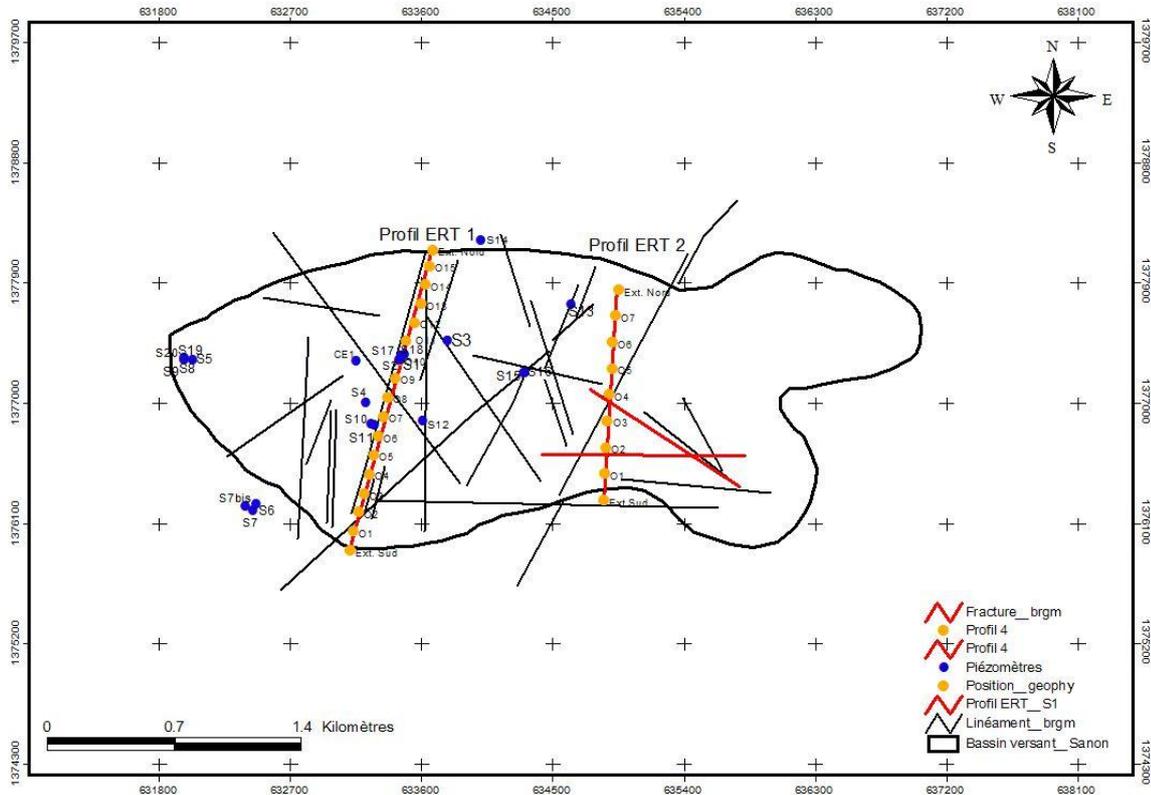


Figure 25: Carte de validation des linéaments proposés par BRGM

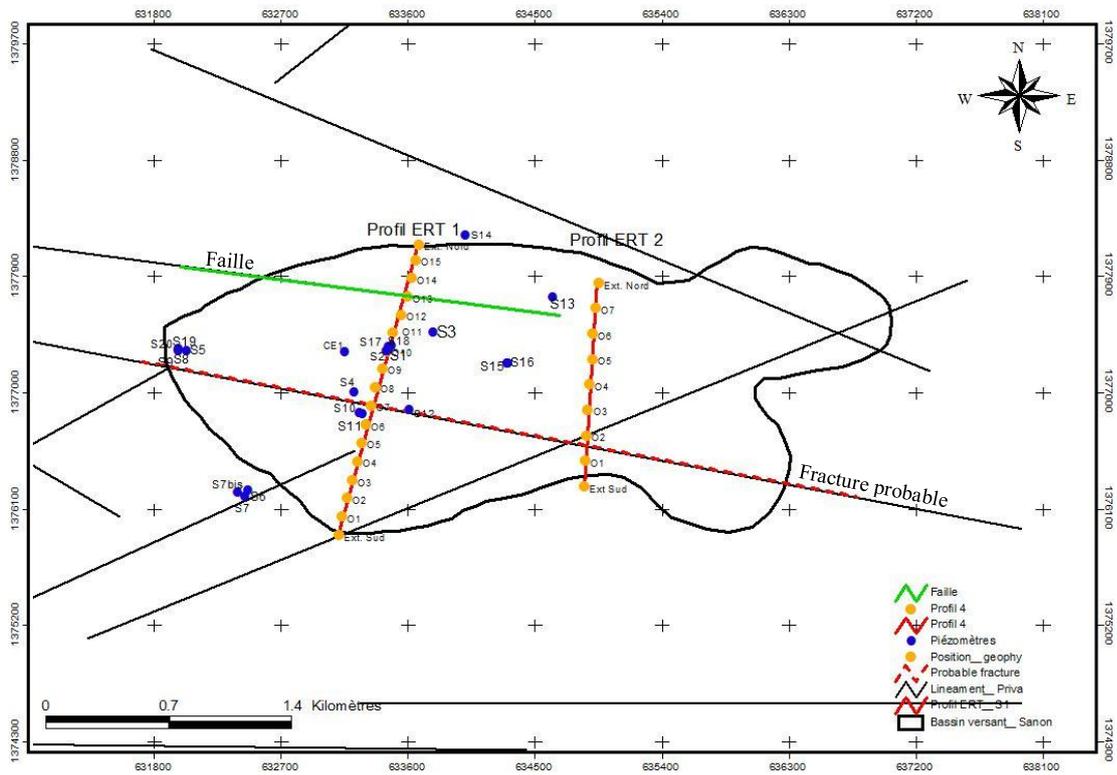


Figure 26: Carte de validation des linéaments proposés par Priva

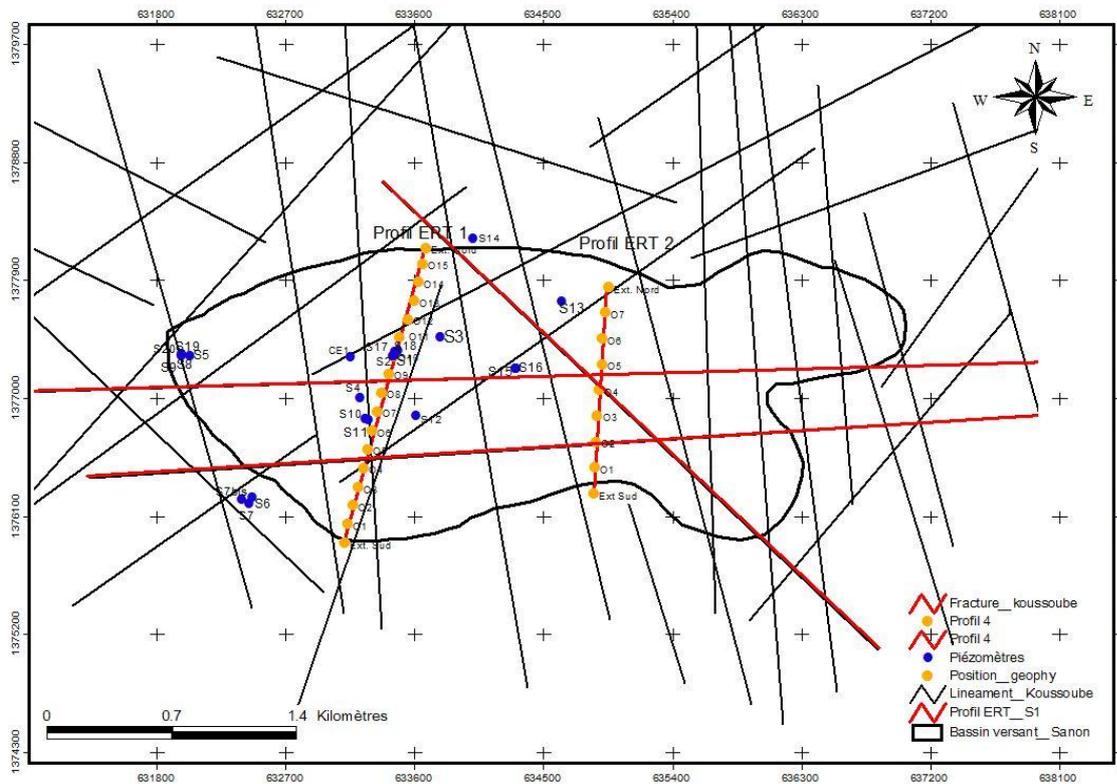


Figure 27: Carte de validation des linéaments proposés par Koussoubé

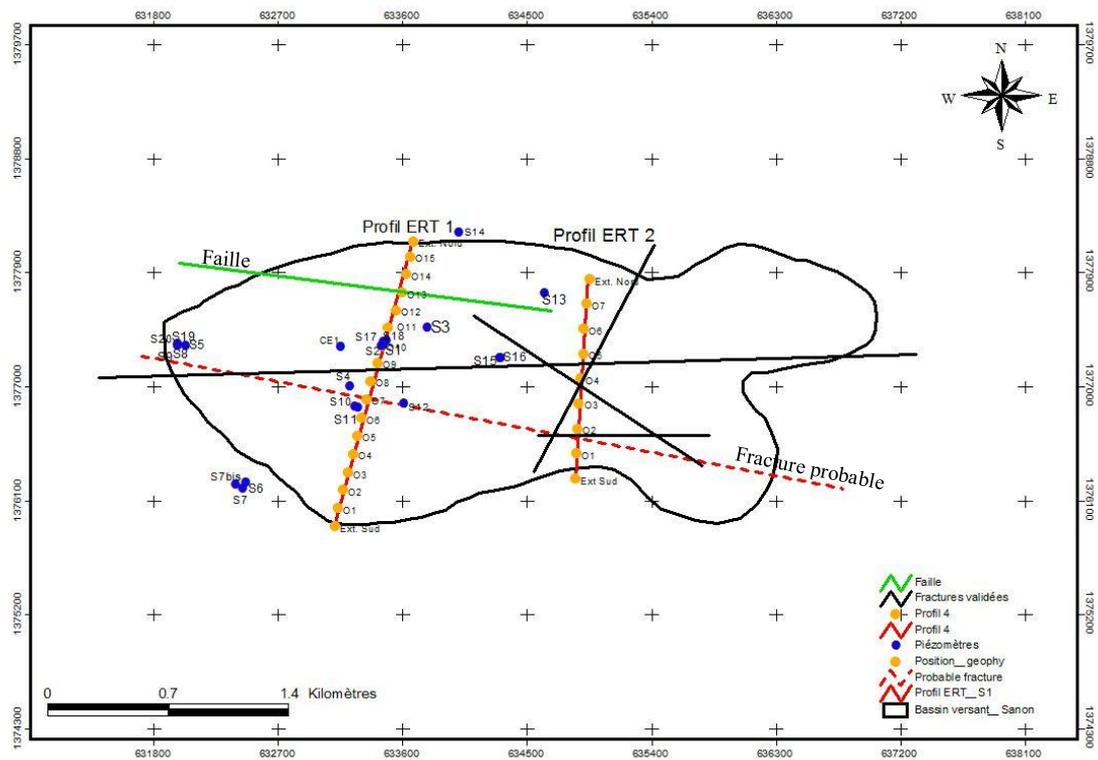


Figure 28: Carte des linéaments validés

I.2 Caractérisation hydrodynamique

L'identification des régimes d'écoulement est faite à partir des courbes diagnostiques (annexe 4) et du diagramme de régime d'écoulement présenté dans la méthodologie.

– Essais de pompage réalisés en zone de dôme piézométrique

En zone de dôme piézométrique, la caractérisation hydrodynamique se fera en période de basses eaux et hautes eaux pour analyser l'effet du niveau de la nappe sur l'hydrodynamisme.

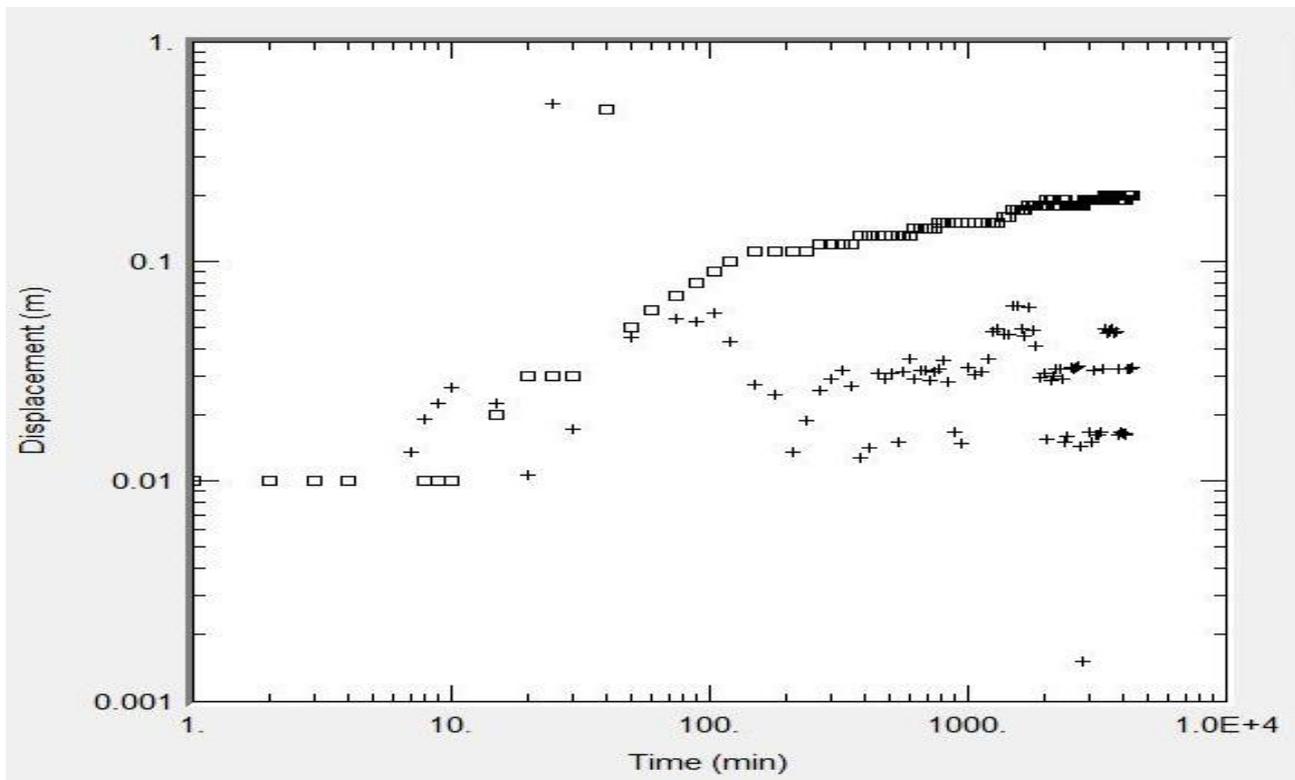
❖ Période basses eaux

Piézomètre S1 :

Les paramètres hydrodynamiques au niveau de ce piézomètre sont calculés à partir de la solution de Neuman. Il est ainsi obtenu $T = 3.11 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 3.71 \cdot 10^{-3}$.

Il faut noter que la courbe de la dérivée du rabattement en fonction du logarithme de temps (figure 24) ressemble à la courbe diagnostique *stockage puits de forage et effet de puits de forage* qui est caractérisée par une pente en début de pompage avec une stabilisation de la dérivée en fin de pompage correspondant à un écoulement radial. La période intermédiaire entre le début de pompage et la fin de pompage est traduite par une bosse. La taille de bosse et la durée de la montée de la pente sont fonctions de la capacité et les effets de stockage du puits. La petite durée

de la montée de la pente et la faible bosse petite expliquent que le milieu a réagi très rapidement à la sollicitation de la nappe.



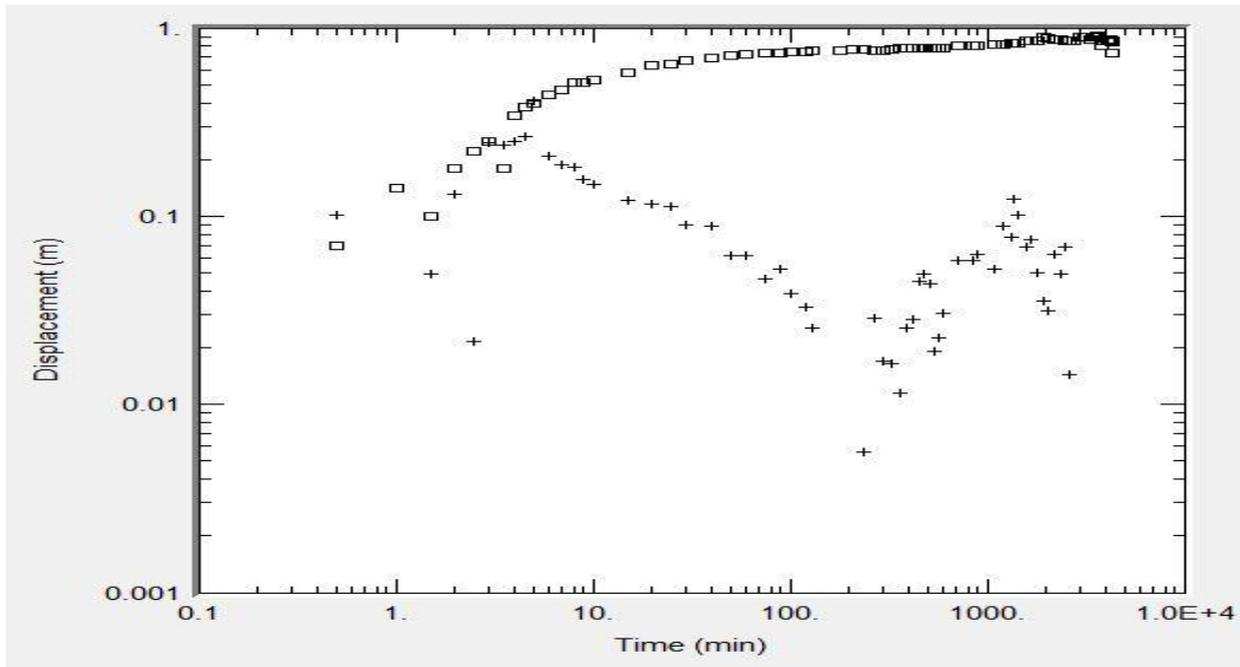
□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 29: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S2

Piézomètre S17

$T = 1.42 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 1.10 \cdot 10^{-5}$ déterminés par la solution de Theis.

La courbe de la dérivée du rabattement en fonction du logarithme de temps (figure 25) se rapproche de la courbe diagnostique *double porosité ou aquifère libre* qui se traduit par un trou (déflexion) prononcé. Ce phénomène s'explique par le fait que les premiers pompages vident le premier réservoir (altération), qui est par la suite compensé par le second réservoir (milieu fissuré transmissif).



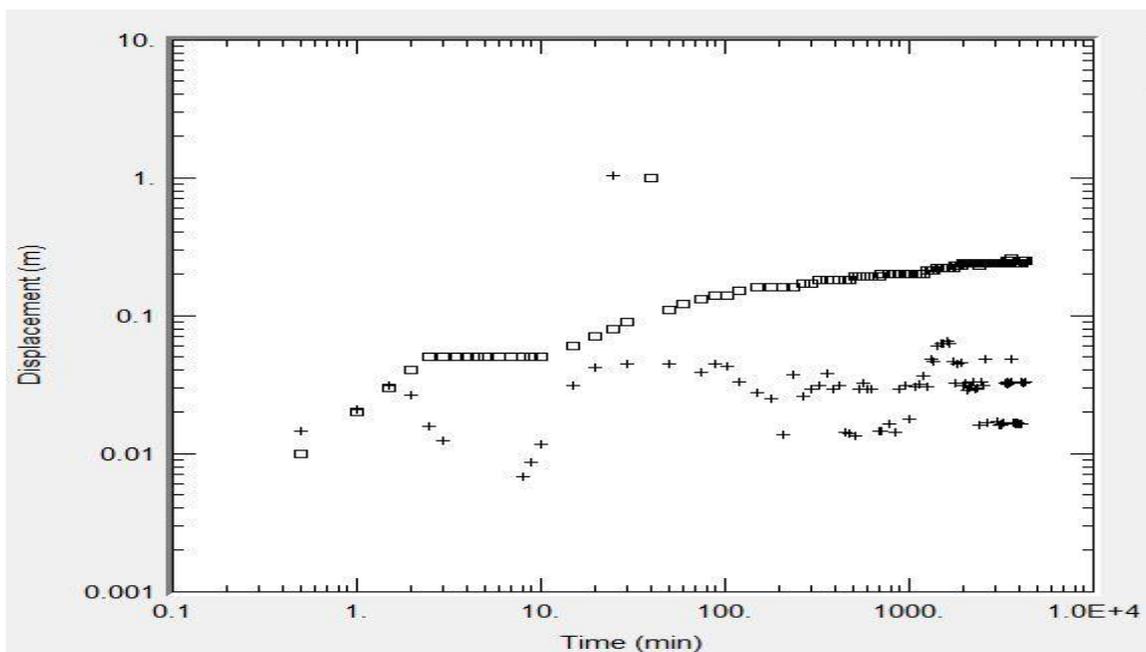
□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 30: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S17

Piezomètre S18

$T = 4.21 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 3.55 \cdot 10^{-4}$ déterminés par la solution de Theis.

Le régime d'écoulement du piézomètre S18 (figure 26) est identique à celui du piézomètre S17 c'est-à-dire régime d'écoulement d'un aquifère à *double porosité ou aquifère libre*



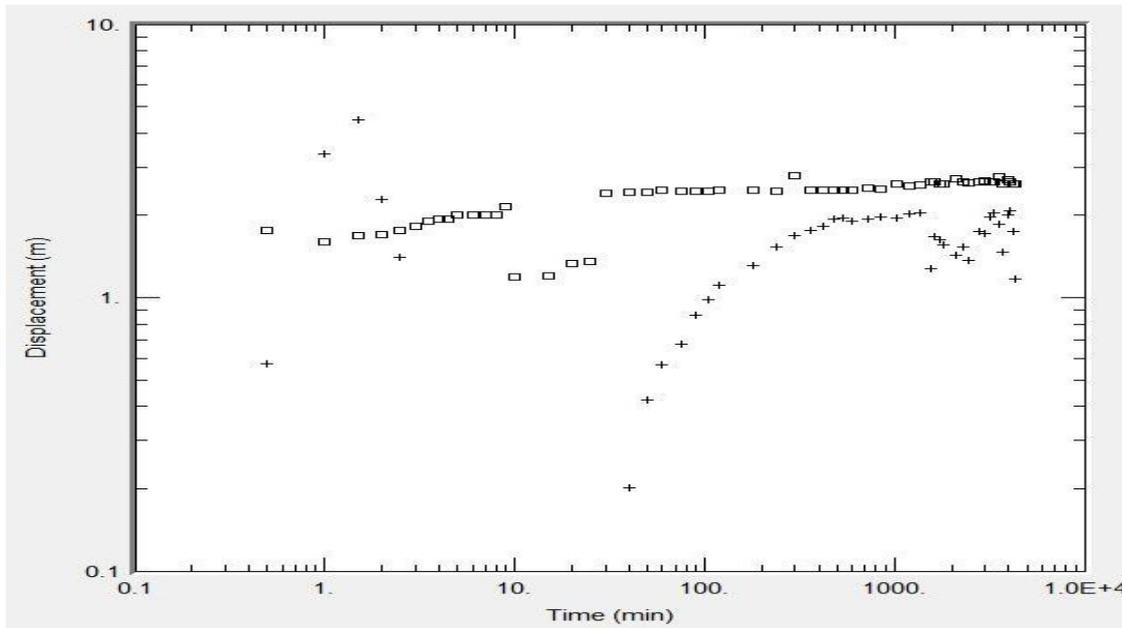
□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 31: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S18

Piézomètre S2 :

Le paramètre hydrodynamique au niveau du piézomètre S1 est calculé à partir de la solution de Neuman. Il est ainsi obtenu $T = 5.36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

La courbe de la dérivée du rabattement en fonction du logarithme de temps (figure 27) se rapproche de la courbe diagnostique *double porosité ou aquifère libre* décrite au début.



□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 32: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S1

Tableau 4: Récapitulatif des paramètres hydrodynamiques en basses eaux en zone de dôme

Ouvrage	Nature	Dist (m)	T (m ² /s)	S	Solution
S2	Puits	0	$5.36 \cdot 10^{-5}$		Neuman
S1	Piezo	6.6	$3.11 \cdot 10^{-4}$	$3.71 \cdot 10^{-3}$	Neuman
S17	Piezo	6	$1.42 \cdot 10^{-4}$	$1.10 \cdot 10^{-3}$	Theis
S18	Piezo	9	$4.21 \cdot 10^{-4}$	$3.55 \cdot 10^{-4}$	Theis

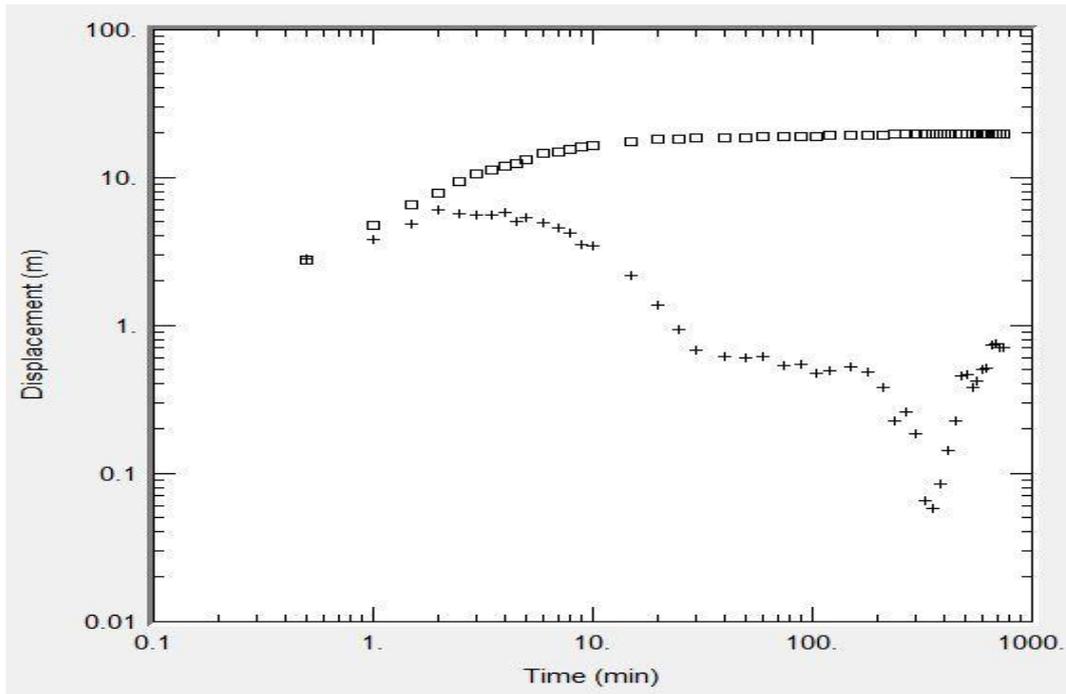
La transmissivité dans la zone de dôme et en période de basses eaux est comprise entre $5.36 \cdot 10^{-5} < T < 4.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, et l'emmagasinement $3.55 \cdot 10^{-4} < S < 3.71 \cdot 10^{-3}$

❖ Hautes eaux

Piézomètre S1

$T = 9.9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 9.09 \cdot 10^{-11}$ déterminés par la solution de Papadopoulos-Cooper.

La courbe d'évolution du rabattement et de la dérivée de rabattement (figure 28) correspond à la courbe diagnostique *stockage puits de forage et effet de puits de forage* dont le régime d'écoulement a été décrit précédemment.



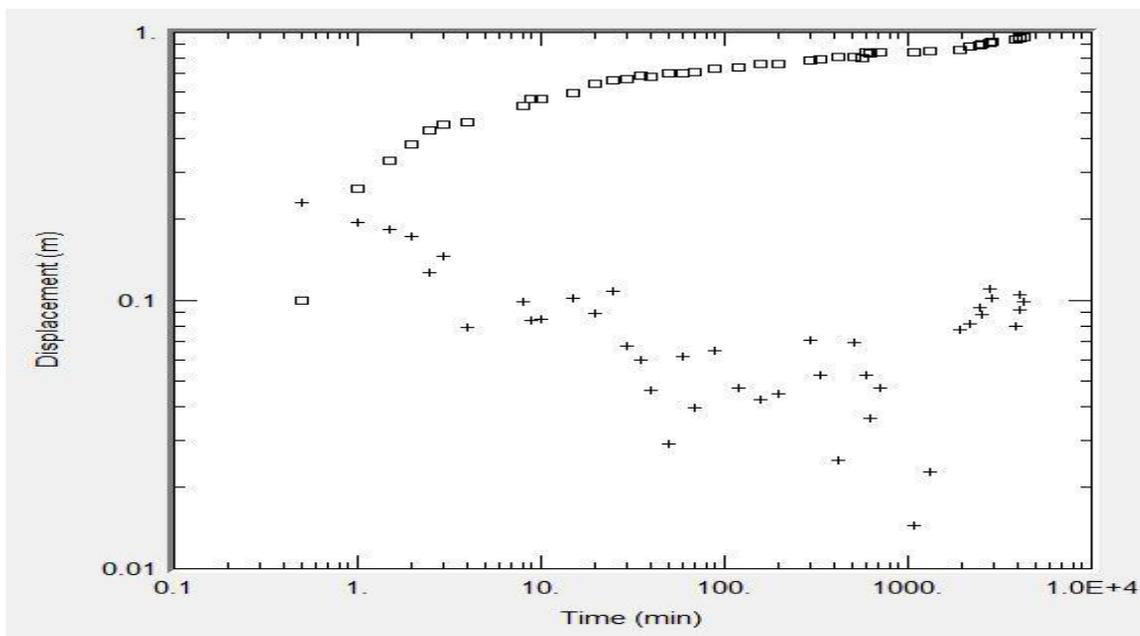
□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 33: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S1

Piezomètre S17

$T = 7.30 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 3.95 \cdot 10^{-5}$ déterminés par la solution de Neuman.

Le régime d'écoulement correspond à celui d'un aquifère à *double porosité ou aquifère libre*



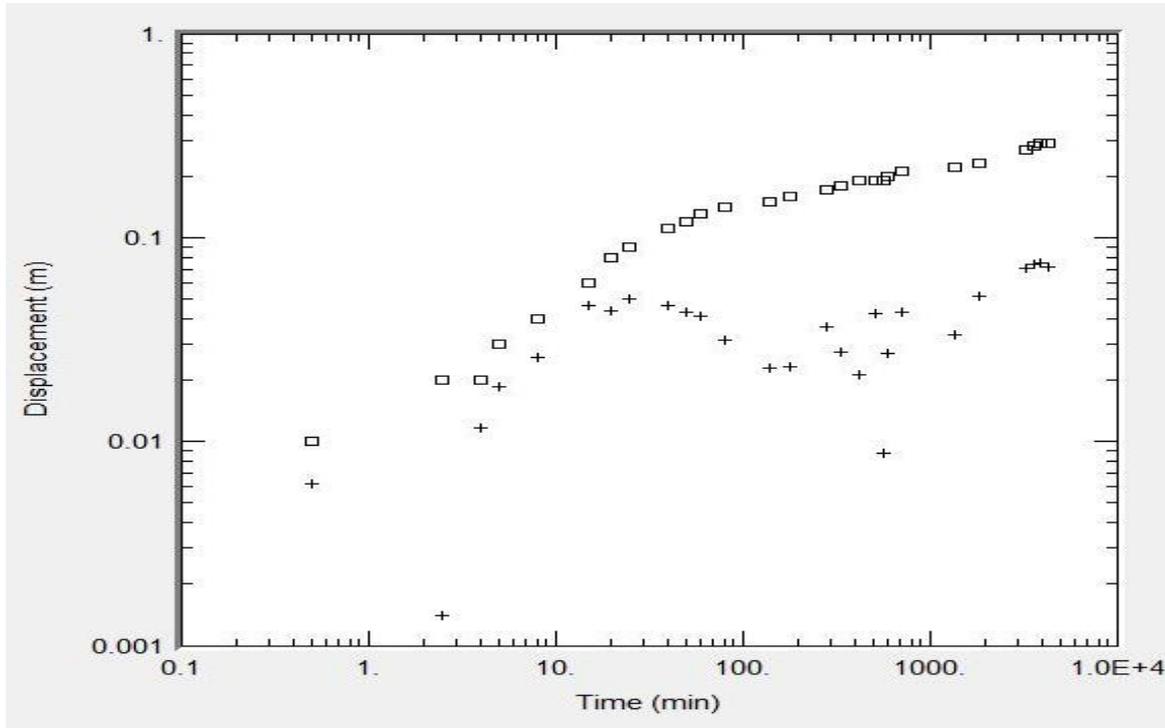
□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 34: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S17

Piézomètre S18

$T = 1.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 3.13 \cdot 10^{-3}$ déterminés par la solution de Neuman.

Le régime d'écoulement correspond à celui d'un aquifère à double porosité



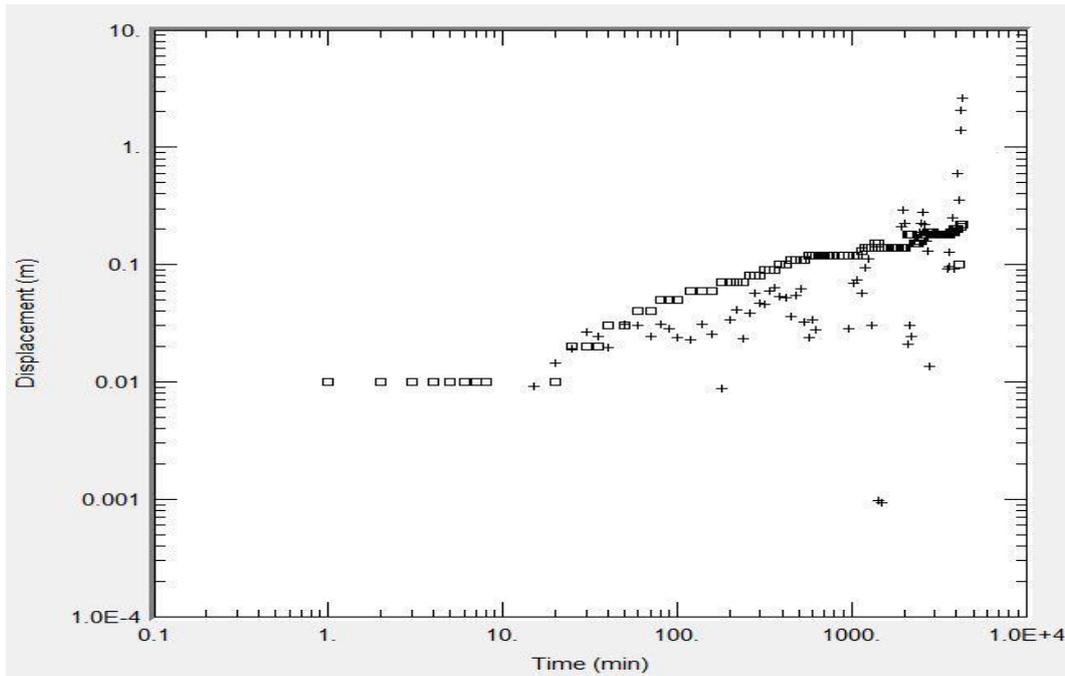
□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 35: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S18

Piézomètre S2

$T = 1.19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ déterminé par la solution de Neuman.

La courbe de la dérivée du rabattement en fonction du logarithme de temps (figure 31) se rapproche de la courbe diagnostique *double porosité ou aquifère libre* décrite au début du pompage.



□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 36: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S2

Tableau 5: Récapitulatif des paramètres hydrodynamiques en hautes eaux en zone de dôme

Ouvrage	Nature	Dist (m)	T (m ² /s)	S	Solution
S2	Puits	0	1.19E-04		Neuman
S1	Piezo	6.6	9.90E-06	9.09E-11	Papadopulos-Cooper
S17	Piezo	6	7.30E-05	3.95E-05	Neuman
S18	Piezo	9	1.70E-04	3.13E-03	Neuman

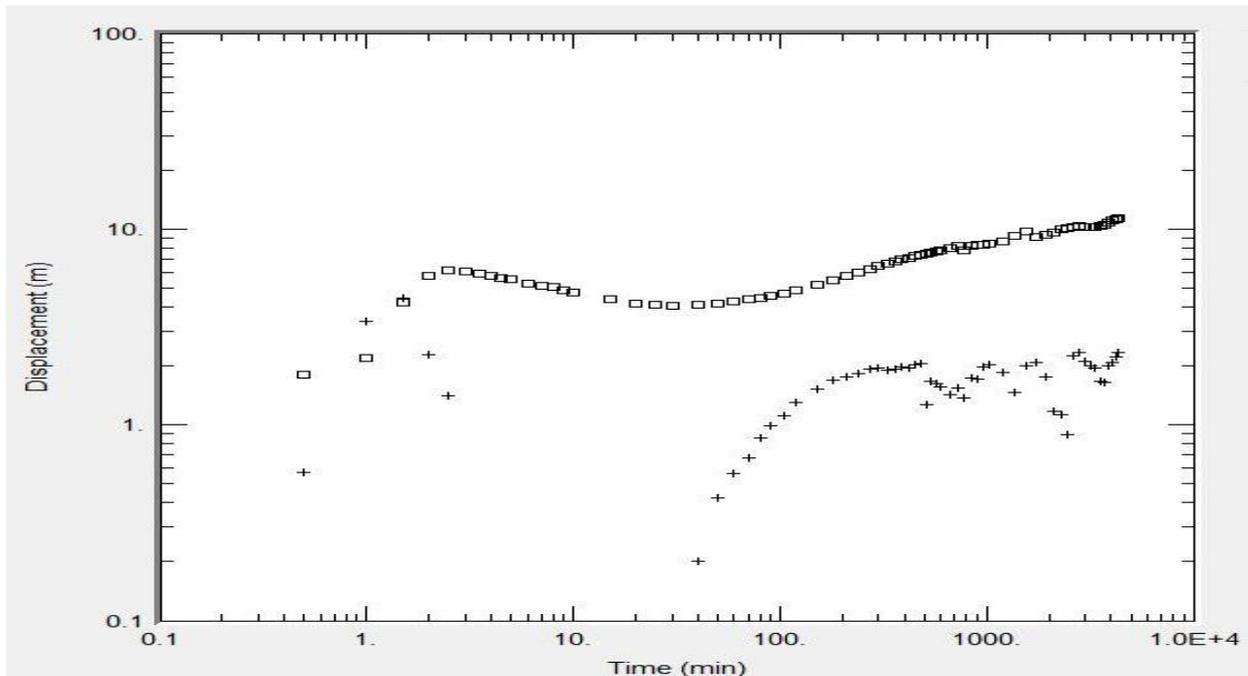
La transmissivité dans la zone de dôme et en période de hautes eaux est comprise entre $9.90 \cdot 10^{-6} < T < 1.19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et l'emmagasinement $9.09 \cdot 10^{-11} < S < 3.13 \cdot 10^{-3}$

– Essais de pompage réalisés hors dôme piézométrique

Piézomètre S19

$T = 4.78 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ déterminé par la solution de Neuman.

Le régime d'écoulement est de type double porosité ou aquifère libre comme a été déjà décrit précédemment (avec le piézomètre S17).



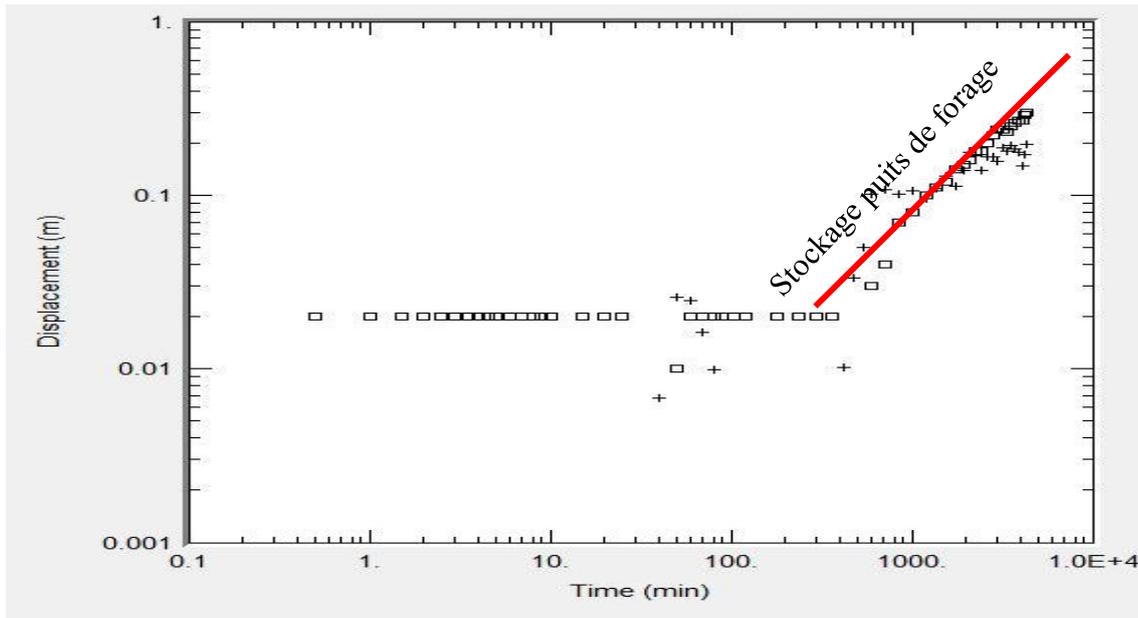
□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 37: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S18

Piézomètre S20

$T = 5.79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 4.93 \cdot 10^{-2}$ déterminés par la solution de Neuman.

L'effet de stockage de puits fait qu'il y a réaction du piézomètre S20 dès le début du pompage. Durant cette période le pompage, l'écoulement est dominé par l'effet de stockage de puits. Ce qui se traduit par une pente positive



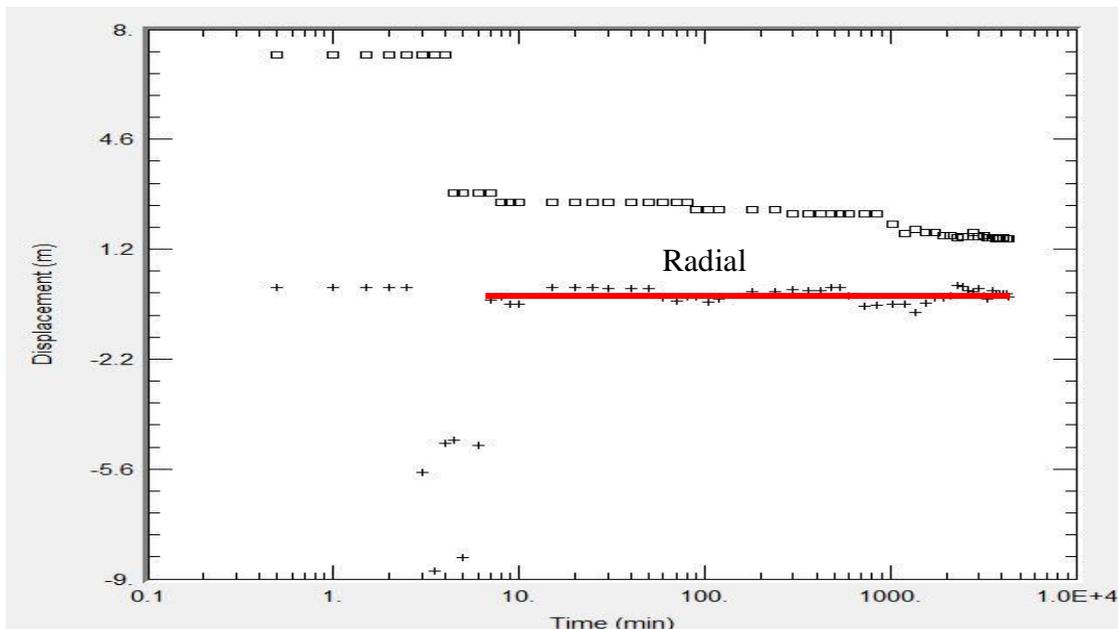
□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 38: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S20

Piézomètre S9

$T = 1.45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 3.39 \cdot 10^{-2}$ déterminés par la solution de Neuman.

Le régime d'écoulement au niveau du piézomètre S9 est de type radial. Le régime d'écoulement radial est un écoulement à tendance constante ou plate prolongée dont la dérivée et les lignes de courant convergent vers un cylindre circulaire.



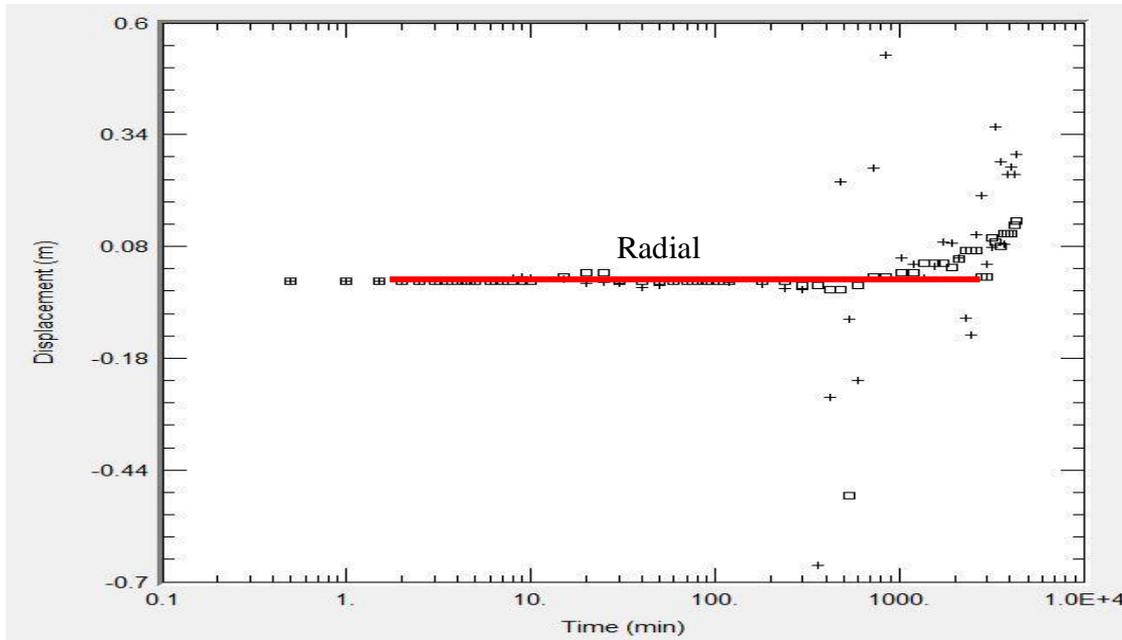
□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 39: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S9

Piézomètre S8

$T = 5.79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 4.93 \cdot 10^{-6}$ déterminés par la solution de Neuman.

Le régime d'écoulement du piézomètre S8 est identique à celui du S9.



□ Rabattement + dérivée du rabattement

Figure 40: Courbe du rabattement et dérivée logarithmique du rabattement de S8

Tableau 6: Récapitulatif des paramètres hydrodynamiques en zone hors dôme

Ouvrage	Nature	Dist (m)	T (m ² /s)	S	Solution
S19	Puits	0	4.78E-6		Moench
S20	Piezo	7.8	5.79E-06	4.93E-02	Neuman
S8	Piezo	9.1	5.79E-06	4.93E-02	Neuman
S9	Piezo	19.9	1.45E-05	1.39E-02	Moench

La transmissivité en zone hors dôme piézométrique est comprise entre $5.79 \cdot 10^{-6} < T < 1.45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et l'emmagasinement $1.39 \cdot 10^{-2} < S < 4.93 \cdot 10^{-2}$

Les coefficients d'emmagasinement sont très faibles dans les piézomètres S1 et S8 ceci s'explique du fait que plus le socle fissuré, plus ils captent l'altération. En zone de dôme piézométrique, les transmissivités sont légèrement plus élevées en période de basses eaux qu'en période de hautes eaux. Les transmissivités sont relativement homogènes en zone hors dôme piézométrique ($4.78 \cdot 10^{-6}$ à $5.79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) sauf en S9 ($1.44 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$). Elles sont plus grandes en zone de dôme piézométrique qu'en zone hors dôme piézométrique. Le régime d'écoulement est de type double porosité ou aquifère libre dans la zone de dôme piézométrique. Dans la zone hors

dôme piézométrique, les écoulements sont de type effet de stockage de puits en début de pompage et de type radial en fin de pompage.

II Discussions

Contrairement aux dispositifs utilisés antérieurement qui n'ont pas donné de résultats satisfaisants, les dispositifs Wenner α et Wenner β combinés ont bien permis de mettre en évidence les structures horizontales et verticales. Les résultats de cette combinaison (épaisseur des formations et valeur de résistivité) correspondent aux coupes géologiques des forages. Les résultats obtenus sont également cohérents avec la géologie du site décrite par les études antérieures. Cette combinaison de dispositif est bien adaptée au site.

L'interprétation des essais de pompage par la dérivée logarithmique du rabattement est bien adaptée au site pour la détermination des paramètres hydrodynamiques ainsi que l'identification des régimes d'écoulement. Elle a pu mettre en évidence les régimes d'écoulement et leurs variations contrairement à la solution analytique de Theis utilisée par les études antérieures. Néanmoins, les données utilisées pour l'interprétation ces essais sont un peu douteuses en ce qui concerne l'estimation du débit, en effet, les données montrent que la transmissivité en basses eaux est supérieure à la celle en hautes eaux alors qu'en réalité c'est l'effet inverse qui devrait normalement se produire (en nappe libre avec une montée de niveau piézométrique, la transmissivité augmente au lieu de diminuer). L'ordre de grandeur de la transmissivité ne varie pas trop de celle obtenue par les études antérieures.

CONCLUSION

L'investigation géophysique a permis de caractériser la géométrie et la structure de l'aquifère. La combinaison des dispositifs Wenner α et Wenner β utilisée lors de ces investigations est bien adaptée au milieu de socle.

Ainsi sur le site du bassin versant de Sanon, l'altération est plus épaisse (en moyenne 50 m) dans la vallée que sur les crêtes. Elle est de type sableuse et quelque fois argileuse. La roche saine est plus profonde dans la vallée (50-60 m) qu'au niveau des crêtes. Une faille a été identifiée sur la crête nord et une intrusion sur la crête sud, mais leurs extensions restent encore inconnues.

L'hydrodynamisme du site est subdivisé en deux zones : zone de dôme piézométrique et zone de hors dôme piézométrique. En zone de dôme piézométrique, la transmissivité varie entre $5.36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et $4.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et l'emmagasinement entre $3.55 \cdot 10^{-4}$ et $3.71 \cdot 10^{-3}$. En zone de hors dôme piézométrique, la transmissivité est comprise entre $4.78 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et $1.45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ avec un emmagasinement compris entre $1.39 \cdot 10^{-2}$ et $4.93 \cdot 10^{-2}$. Le régime d'écoulement est de type double porosité ou aquifère libre avec un écoulement au début de pompage de type effet de stockage et écoulement radial en fin de pompage.

PERSPECTIVES

Le dispositif utilisé pour la caractérisation de la géométrie et de la structure n'a pas identifié toutes les discontinuités, ceci à cause de la faible profondeur d'investigation qui constitue une de ses limites. Cependant, pour aller plus en profondeur, l'utilisation du dispositif Pôle-Dipôle est conseillée vu qu'il a une meilleure profondeur d'investigation (Candansayar, 2008 *in* Razafindratsima & Lataste, 2014). Pour apprécier l'extension de l'intrusion au sud et l'évolution de la faille au nord du bassin versant, des mesures supplémentaires sont nécessaires.

Réaliser des essais de pompage dans la partie Est du Bassin versant pour déterminer les paramètres hydrodynamiques de cette dernière. L'utilisation de la RMP pour évaluer la capacité de stockage de l'aquifère sera un atout considérable à ne pas négliger.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

➤ Articles et Ouvrages

BRGM-AQUATER (1991). Exploitation des eaux souterraines en socle cristallin et valorisation agricole : pilote expérimental en milieu rural pour des zones soudano-sahéliennes et sahéliennes. Rapport BRGM- AQUATER R 33576 Octobre 1991. BRGM, Orléans, 4 vol.

COMPAORE G. (1997). Évaluation de la fonction capacitive des altérites, site expérimental de Sanon : socle granito-gneissique sous climat de type soudano-sahélien. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse.

DEWANDEL B., CHANDRA S., DUTTA S., AHMED S. (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, p. 137– 148.

DEWANDEL B., LACHASSAGNE P., ZAIDI F. K., CHANDRA S. (2011). A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: Example of a quartz reef in granitic terrain in South India. *Journal of Hydrology* 405, p. 474-487.

DEWANDEL B., LACHASSAGNE P., WYNS R., MARECHAL J.-C., &

GOMEZ P. (2004). Equivalence et profondeur d'investigation en panneau électrique 2D : bibliographie et analyse des outils existants. DEA, Université Pierre et Marie Curie. p. 5-10

KABRE P. W. (2012). Caractérisation hydrogéologique en milieu de socle fracturé : Cas de la province de Kourwégo. Mémoire de fin d'études master, 2iE

KRISHNAMURTHY N. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology* (330), p. 260-284.

LACHASSAGNE P., & WYNS R. (2005). Aquifères de socle : nouveaux concepts, Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Géosciences* (2), 32-37.

LOKE M. H. & BARKER R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical prospecting*, p131-152.

MARECHAL J.-C., WYNS R., LACHASSAGNE P., SUBRAHMANYAM K.,

REMI C (2010). Etude du suivi des injections des lixiviats dans les massifs de déchets
Combinaison entre méthodes géophysiques et simulation hydrodynamique. Thèse de doctorat.
Université de Grenoble. p. 40-52.

RENARD P., GLENZ D. & MEJIAS M. (2008). Understanding diagnostic plots for well-test
interpretation, Hydrogeology Journal, p589–600.

SCHLUMBERGER (2002). Well Test Interpretation

TOE G. (2004). Apports de nouvelles techniques géophysiques à la connaissance des aquifères
de socle, Tomographie électrique, électromagnétisme fréquentiel, Résonance Magnétique
Protonique: application au Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université Paris 6.

TOUCHARD F. (2003). Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des
aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. C. R.
Géoscience 335, p. 451-460.

➤ **Sites internet**

<http://dc2dinvres.resistivity.net/menue.html>

<http://www.wateraid.org/where-we-work/page/burkina-faso>

http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp2012/fast_facts/fr/

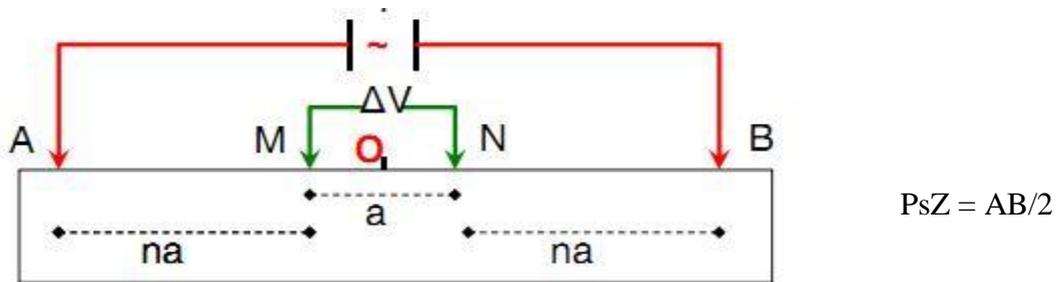
ANNEXES

Annexe 1 : Tableau de comparaison DC2DInvRes et Res2DInv (d'après René Clément, 2010)

		DC2DInvRes	Res2DInv
Général	Système d'exploitation	Windows 32-bit	Windows 32-bit 64-bit
	Processeur multi-cœur	Non adapté	Adapté (calculs très rapides)
	Vitesse de calcul	Fonction du nombre de quadripôles	Rapide
	Prix d'achat	Gratuit (pour la recherche académique)	3000 euros
Fonctionnalités	Interface graphique	***	** (bug récurrent sur l'affichage)
	Paramétrage graphique des modèles	***	***
	Création de modèles directs	****	**
	Exportations/formats	****	****
	Utilisation pour la formation des étudiants	****	**
Inversion	Algorithme d'inversion	✓ (Gauss-newton)	✓ (Gauss-newton)
	Contraintes <i>smooth</i>	✓	✓
	Contraintes en minimisant les variations de résistivités	✓	✓
	Paramètres de régularisation	✓ (λ)	✓ (<i>Damping factor</i>)
	Déformation anisotrope	✓ (<i>Z-weight</i>)	✓ (<i>Flatness ratio</i>)
	<i>Set as référence</i>	✓	✓
	<i>Set as reference</i> en minimisant les variations	✓ (minimum lenght)	✓ (minimise changes)
	<i>Set as reference</i> : inversion initiale avec une contrainte <i>smooth</i> et inversion finale en minimisant les variations	✓	
	Imposer des variations abruptes de la résistivité	<i>Blocky model</i>	Robuste
	Filtrage du bruit	Robuste	✓
	Combinaison des dispositifs	✓	✓
	Limitation min/max des résistivités	✓	NON seulement écart par rapport à la moyenne
Fixer des zones avec des valeurs de résistivités fixes dans l'inversion	✓	✓	
Limitation des effets de bord		✓	
Introduction de discontinuités	✓ (multiples)	✓	
Zone de même valeur de résistivité, mais dont la résistivité peut varier	✓ (<i>compound cell</i>)	NON	
Prise en compte de la topographie	✓	✓	
Possibilité de mettre les électrodes sous l'eau	✓	✓	
IP mode	✓	✓	
Résultats d'inversion	Min/max modèle		✓
	Sensibilité	✓	✓
	Erreur	✓	✓
	Différence entre les résistivités apparentes	✓	✓
	RMS	✓	✓
	Chi ²	✓	NON

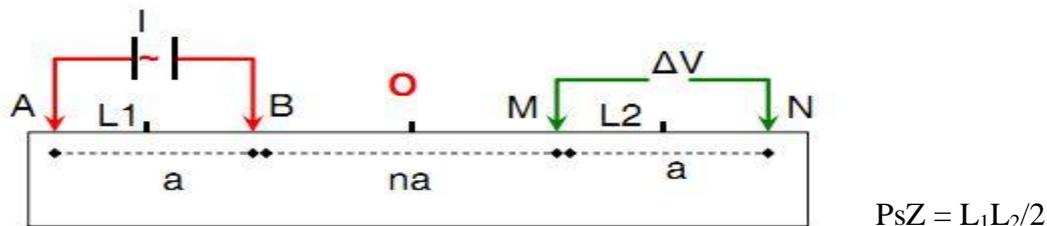
Annexe 2: Sensibilité des dispositifs

Dispositif Schlumberger : est proche du dispositif Wenner en termes de sensibilité



La limite commune à ces trois dispositifs est la faible profondeur d'investigation.

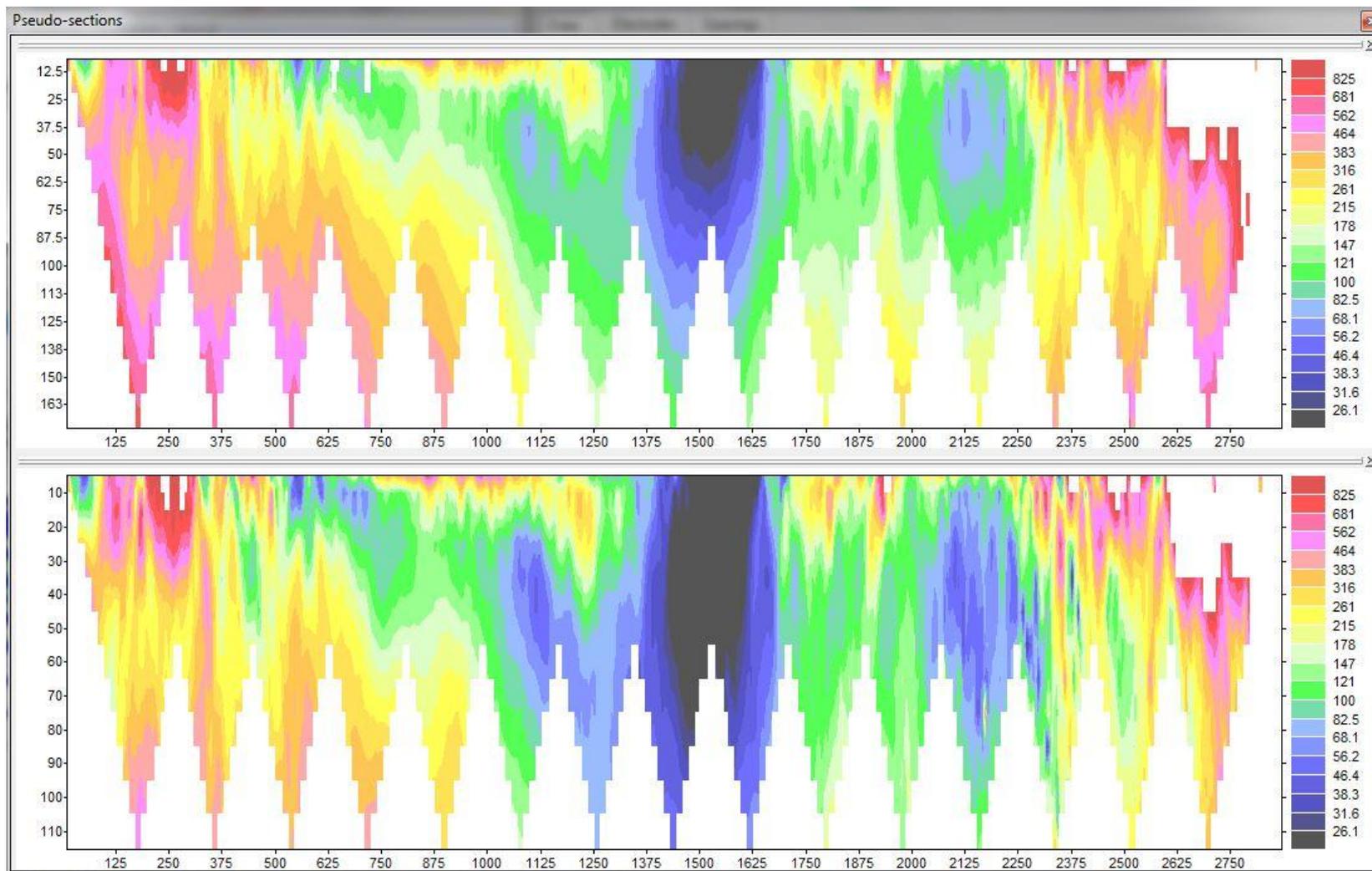
Dispositif Dipôle-Dipôle : est très sensible aux hétérogénéités superficielles et est sensible également aux variations latérales



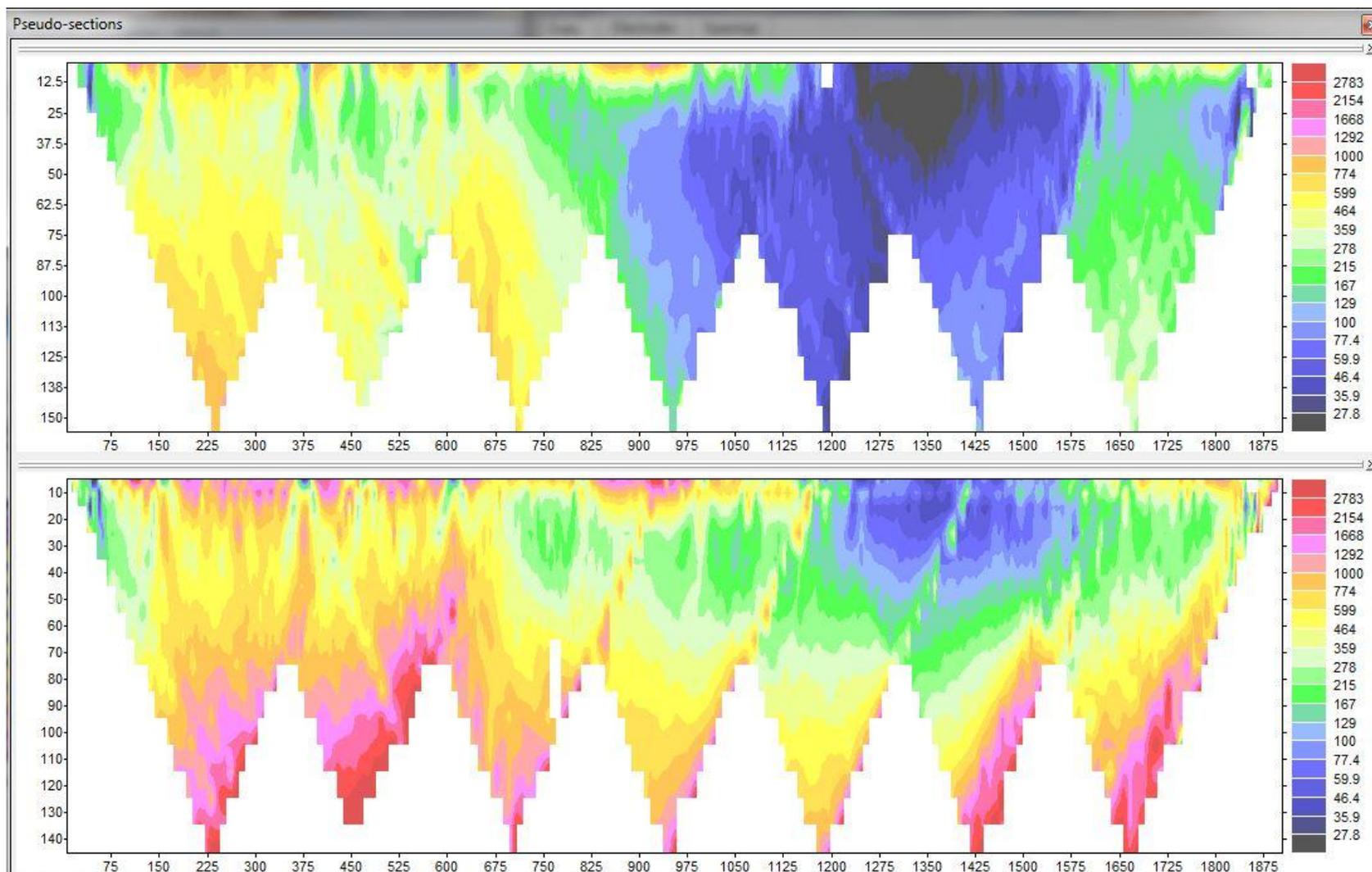
Dispositif Pôle-Pôle : donne une résolution verticale médiocre et une profondeur d'investigation maximale. Mais sa mise en œuvre est difficile à réaliser notamment la gestion de ses électrodes à l'infini.

Annexe 3: Assemblage des panneaux

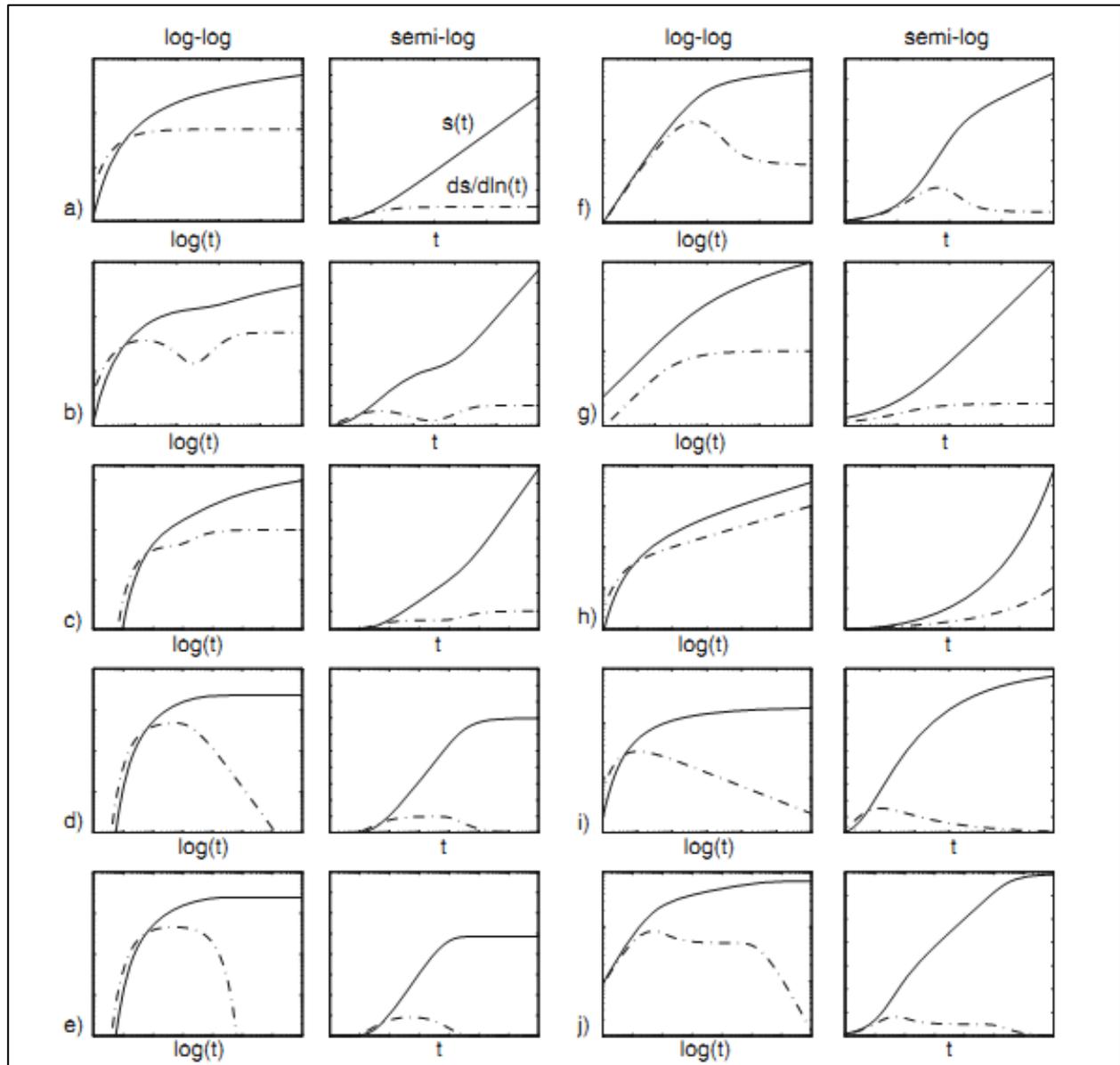
Panneaux 1-15 du profil ERT 1



Panneaux 1-7 du Profil ERT 4



Annexe 4 : Courbes diagnostiques pour interprétation des régimes d'écoulement des essais de pompage (Renard, 2008)



- a) This model: infinite two-dimensional confined aquifer; b) double porosity or unconfined aquifer; c) infinite linear no-flow boundary; d) infinite linear constant head boundary; e) leaky aquifer; f) well-bore storage and skin effect; g) infinite conductivity vertical fracture; h) general radial flow –non-integer flow dimension smaller than 2; i) general radial flow –non-integer flow dimension larger than 2; j) combine effect of well bore storage and infinite linear constant head boundary.

Annexe 5 : Log de forage S1

