



**CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE D'UN AQUIFERE EN ZONE DE SOCLE
ALTERE : CAS DU BASSIN VERSANT DE WEDBILA DANS LES REGIONS DU
CENTRE ET DU CENTRE SUD AU BURKINA FASO**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER
SPECIALITE GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE**

Présenté et soutenu publiquement le 28 janvier 2021 par

Bépouguin Augustin Clément OUEDRAOGO (2012 0495)

**Directeur de mémoire et encadrant 2ie : Dr. Mahamadou KOÏTA, Maître de
Conférences CAMES, Enseignant-Chercheur à 2iE**

**Encadrant externe : Dr Hamma Fabien YONLI, Maître Assistant CAMES, Enseignant
Chercheur à l'Université de Fada N'Gourma**

**Maître de stage : Mme Fatoumata OUATTARA/KABORE, Doctorante à ULg
Mme Fatimata KINI/ SAWADOGO, Ing en Génie Civil et
Hydraulique ; SP/GIRE**

Structure d'accueil du stage : Secrétariat Permanent pour la Gestion Intégrée des Ressources
en Eau.

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Pr Hamma YACOUBA

Membres et correcteurs : Dr Roland YONABA
Mme Radeconde RUSAGARA
Dr. Mahamadou KOÏTA
Dr Hamma Fabien YONLI
Mme Fatimata KINI/ SAWADOGO

Promotion 2020/2021

Avant-propos

Les travaux de ce mémoire de fin d'étude ont été réalisés dans le cadre du « Programme d'appui à la gestion durable des ressources en eau au Burkina Faso (2018 – 2022) ». Il met à contribution trois partenaires clés, qui sont l'Université de Liège (ULg) à Bruxelles, le Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydrauliques (MAAH) et le Ministère de l'Eau et de l'Assainissement (MEA) et est financé par la coopération Belge à travers Wallonie-Bruxelles International (WBI). Ce projet opère sur deux volets : le volet Irrigation et drainage porté par le MAAH par le biais de la Direction Générale de l'Aménagement Hydro-Agricoles et du Développement de l'Irrigation (DGAHDI) et le volet Gestion Intégrée des Ressource en Eau (Gire) porté par le MEA à travers le Secrétariat Permanent de la GIRE. Le Projet a pour objectif de renforcer les capacités techniques et organisationnelles des structures nationales et locales impliquées dans la mise en œuvre des politiques de GIRE et de développement durable de l'agriculture à travers :

- l'amélioration des connaissances sur les ressources en eau et leurs usages ;
- la gestion durable et effective de ces ressources.

La zone d'intervention du projet est le bassin versant du Nariaré dans le bassin du Nakanbé.

REMERCIEMENTS

Avant de présenter les résultats de l'étude, il me tient à cœur de remercier l'ensemble des personnes physiques et morales impliquées dans la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

Je tiens à remercier l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et l'ensemble de son personnel pour la formation de qualité reçue au cours de mon cursus étudiant.

Je tiens à remercier en particulier mon directeur de mémoire Dr Mahamadou KOÏTA pour sa disponibilité, ses conseils et le soutien dans l'élaboration de ce mémoire. Il a toujours su me trouver du temps et de l'énergie malgré ses nombreuses charges administratives. J'adresse mes sincères remerciements à mon co-encadreur Dr Hamma Fabien YONLI pour son soutien inconditionné tout au long des différents travaux. C'est avec beaucoup de gratitude que je me remémore les moments passés ensemble sur le terrain, le soutien et les conseils qu'il m'a prodigués face aux difficultés que nous avons eu à traverser.

Je remercie également le Président du jury Prof Hamma YACOUBA et les Rapporteurs, Dr Roland YONABA et madame Radegonde RUSAGARA pour avoir accepté siéger à ma soutenance et pour leurs contributions dans l'élaboration de la version finale du document.

Grandement merci au Secrétariat Permanent pour la Gestion Intégrée des Ressources en eau (SP/GIRE) du Burkina pour l'appui ; la confiance qui m'ont été accordées et l'environnement de travail convivial. Mes remerciements vont à l'endroit du Secrétaire Permanent, Monsieur Moustapha CONGO pour l'accueil au sein de la structure et le soutien matériel et financier tout au long des travaux. A Monsieur Antoine N'DO, chef du Département Développement de Partenariat et de Coopération chargé de la coordination du volet GIRE du projet, je lui témoigne mes sincères gratitudes pour l'accompagnement et le soutien. Je remercie particulièrement mes maîtres de stage Madame Fatoumata OUATTARA/KABORE, et Madame Fatimata KINI/SAWADOGO qui m'ont accompagné tous au long de mon stage. Elles ont été pour moi un fils conducteur dans l'atteinte des objectifs du mémoire.

Merci à l'ensemble de l'équipe de terrain dont Dr Hamma Fabien YONLI, Monsieur Salfo MAIGA, Monsieur Boukaré SAGNE, Monsieur Amza OUEDRAOGO, Mademoiselle Audrey KOUDOUGOU, Mademoiselle Maryse Ludivine KY, Monsieur Brahim OUEDRAOGO, Monsieur Jérémie ZONGO, et l'ensemble des manœuvres pour le travail abattu.

Je termine en remerciant le MEA pour la bourse qui m'a été octroyée dans le cadre du PAEA pour le financement de mes études de master.

RESUME

Les eaux de surface deviennent de plus en plus insuffisantes pour les pays arides et semi-arides pour des raisons de croissance démographique et économique ; de changement des modes de consommation et des effets de changement climatique. Pour pallier cela ; d'autres sources d'eau doivent être envisagées d'où la tendance accrue vers les ressources en eau souterraine. Cependant les connaissances sur cette ressource sont peu nombreuses et insuffisantes pour mieux la cerner d'où cette étude de caractérisation hydrogéologique de la frange altérée du bassin de Wedbila d'une superficie de 150 km². Il est à cheval entre les régions du Centre et du Centre Sud du Burkina. La méthodologie adoptée pour la caractérisation est une étude géologique et hydrodynamique. Dans le cadre de cette étude, il nous a été donné de réaliser des tomographies de résistivité électrique (TRE) dont onze (11) profils électriques, des Slug tests sur dix (10) micro-piézomètres et des essais de puits simplifiés CIEH sur cinq (05) puits à grand diamètre.

Les conclusions de cette étude montrent que la partie altérée a une épaisseur entre 15 à 35 mètres et est recouverte en partie de cuirasse. Cette épaisseur connaît une augmentation à l'amont du seuil d'épandage 1. L'altération enregistre des transmissivités faibles et moyennes (10^{-9} à 10^{-4} m²/s). Pour la productivité, les essais de puits nous ont montrés que trois (03) puits sont classés dans l'hydraulique villageoise, un (01) dans l'hydraulique agricole et un (01) dans l'hydraulique urbaine en se référant au classement CIEH avec des débits spécifiques de $6,27.10^{-3}$ à $1,21$ m³/h/m et des productivités allant de $2,92.10^{-3}$ à $1,46$ m³/h.

Mots Clés :

-
- 1 – Aquifère de socle altéré**
 - 2 – Wedbila**
 - 3 - Hydrogéologie**
 - 4 – Géophysique**
 - 5 – Paramètres hydrodynamiques**

ABSTRACT

Surface water is becoming increasingly scarce in arid and semi-arid countries due to population and economic growth, changing consumption patterns and the effects of climate change. To mitigate this; alternative sources of water must be considered, hence the increasing trend towards groundwater resources. However, the knowledge on this resource is few and insufficient to better understand it, hence this hydrogeological characterization study of the weathered portion of the Wedbila basin with an area of 150 km². It straddles the central and south-central regions of Burkina Faso. The methodology adopted for the characterization is a geological and hydrodynamic study. Within the framework of this study, we were given the opportunity to carry out Electrical Resistivity Tomography (ERT) including eleven (11) electrical profiles, Slug tests on ten (10) micro-piezometers and CIEH simplified well tests on five (05) large diameter wells.

The conclusions of this study show that the weathered part has a thickness between 15 and 35 meters and is partially covered in part by iron crust. This thickness increases upstream of the weir 1. The alteration records low and medium transmissivities (10^{-9} to 10^{-4} m²/s). For the productivity, the well tests showed us that three (03) wells are classified in village water supply, one (01) in agricultural hydraulics and one (01) in urban hydraulics by referring to the CIEH classification with specific flow rates of $6.27 \cdot 10^{-3}$ to 1.21 m³/h/m and productivities ranging from $2.92 \cdot 10^{-3}$ to 1.46 m³/h.

Key words:

-
- 1 - Weathered basement aquifer**
 - 2 - Wedbila**
 - 3 - Hydrogeology**
 - 4 - Geophysics**
 - 5 - Hydrodynamic parameters**

SIGLES ET ABREVIATIONS

1D	une dimension
2D	deux dimensions
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CIEH	Comite Interafricain d'Etudes Hydrauliques
ERT	Electrical Resistivity Tomography
GPS	Global Positioning System
MAAH	Ministère de l'Agriculture et de l'Aménagement Hydraulique
MEA	Ministère de l'Eau et de l'Assainissement
NS	Niveau Statique
PAEA	Programme d'Approvisionnement en Eau et Assainissement
PMH	Pompe à motricité Humaine
RMS	Root Mean Squared
RGPH	Recensement General de la Population et de l'Habitation
SE	Sondage Electrique
SIG	Système d'information Géographique
SP/GIRE	Secrétariat Permanent pour la Gestion des Ressources en Eau
Ulg	Université de Liège
UTM	Universal Transverse Mercator
WBI	Wallonie Bruxelles International

NOTATIONS

Terme	Unité	Description
b	m	Epaisseur mouillée
F		Facteur de formation
h_0	m	La charge dans le piézomètre à un temps initial
h_t	m	La charge dans le piézomètre à un temps t,
k	m/s	Perméabilité
rc	m	Le rayon intérieur modifié du piézomètre
rw	m	Le rayon de l'ensemble crépine + massif filtrant
Re	m	Le rayon d'influence du pompage
S		Coefficient d'emmagasinement
T	m^2/s	Transmissivité
ρ_a		Résistivité apparente
ρ_r		Résistivité du terrain
ρ_w		Résistivité de l'eau d'imbibition
ϕ		Porosité

SOMMAIRE

<i>Avant-propos</i>	<i>i</i>
<i>Remerciements</i>	<i>ii</i>
<i>Résumé</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Sigles et abréviations</i>	<i>v</i>
<i>Notations</i>	<i>vi</i>
<i>Sommaire</i>	<i>1</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>3</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>4</i>
<i>Introduction</i>	<i>6</i>
<i>I. Présentation de la zone d'étude</i>	<i>8</i>
<i>I.1. Situation géographique et relief</i>	<i>8</i>
<i>I.2. Climat et Hydrologie</i>	<i>9</i>
<i>I.3. Contexte géologique et hydrogéologique</i>	<i>10</i>
<i>I.4. Végétation et milieu humain</i>	<i>14</i>
<i>II. Revue littéraire des méthodes de caractérisation hydrogéologique de la nappe phréatique en zone de socle</i>	<i>15</i>
<i>II.1. Généralités</i>	<i>15</i>
II.1.1. Définition.....	<i>15</i>
II.1.2. Nappe et aquifère en milieu de socle.....	<i>16</i>
<i>II.2. Les méthodes de caractérisation de la structure et de la géométrie</i>	<i>22</i>
II.2.1. Principe de la méthode de résistivité électrique.....	<i>25</i>
II.2.2. Différentes techniques de mesure de la résistivité électrique.....	<i>27</i>
II.2.3. Les dispositifs de mesure de la résistivité électrique.....	<i>29</i>
II.2.4. Les facteurs influençant la résistivité des sols et facteurs influençant la mesure de résistivité.....	<i>30</i>
<i>II.3. Les méthodes de détermination des propriétés hydrodynamique des aquifères</i>	<i>31</i>
II.3.1. Slug test ou choc hydraulique.....	<i>33</i>

II.3.2. Les essais de puits	35
II.4. Les facteurs influençant les paramètres hydrodynamiques (les conditions aux limites)	35
III. Matériels et Méthodes	37
III.1. Matériels et données exploitées.....	37
III.2. Méthodes.....	40
III.2.1. Tomographie de résistivité électrique.....	40
III.2.2. Caractérisation hydrodynamique des aquifères :	49
IV. Résultats : interprétation et discussion.....	53
IV.1. Resultat et Interpretation.....	53
IV.1.1. Structuration et géométrie 2D.....	53
IV.1.2. Slug tests	59
IV.1.3. Essais de puits	61
IV.2. Discussion	63
Conclusion et perspectives	64
Bibliographie	65
Annexes.....	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques du bassin versant de Wedbila.....	9
Tableau II: Caractéristiques hydrodynamiques des altérites au Burkina	21
Tableau III: Classification des débits	21
Tableau IV: Classification des transmissivités.....	21
Tableau V: Classification des débits spécifiques	22
Tableau VI: Méthodes et techniques géophysiques usuelles de surface pour l'hydrogéologie	22
Tableau VII: Propriétés de quelques matériaux courants et gamme de résistivité correspondantes	25
Tableau VIII: Configuration des profils de géophysique.....	43
Tableau IX: Classes de résistivité électrique utilisée	49
Tableau X: Coordonnées des essais de puits.....	51
Tableau XI: Résultats des slug tests	60
Tableau XII : Débits spécifiques et productivités des puits	62
Tableau XIII : Valeurs des transmissivités déduites des essais de puits	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de localisation du bassin de Wedbila	8
Figure 2: Carte hydrographique du bassin versant de Wedbila	10
Figure 3: Profil type de l'altération des granites.....	11
Figure 4: Log de forage d'un PMH dans la commune de Douougou.....	12
Figure 5: Carte géologique du bassin versant de Wedbila	13
Figure 6: Carte piézométrique du bassin de Wedbila	14
Figure 7: Modèle conceptuel stratiforme de la structure hydrogéologique des aquifères de socle, discontinus et hétérogènes.....	17
Figure 8: Classe de perméabilité en fonction de la géologie.....	20
Figure 9: Schéma général d'une mesure de résistivité des sol utilisant un dispositif Wenner alpha à quatre électrodes.....	26
Figure 10 : Schéma de principe de l'acquisition des données suivant un panneau électrique et d'une pseudo section.....	29
Figure 11 : Dispositifs d'acquisition ERT utilisés et calculs associés, avec x le positionnement de la mesure le long du profil, Psz la pseudo profondeur d'investigation et K le facteur géométrique.....	30
Figure 12 : Schéma d'un puits recoupant partiellement une nappe libre	34
Figure 13: Limite à potentiel imposé (rivière-nappe)	36
Figure 14 : Limite à flux imposé (a: flux nul; b: flux non nul).....	36
Figure 15 : Bailer.....	38
Figure 16: Sonde piézométrique	38
Figure 17 : Syscal R1 plus 72 Switch	39
Figure 18 : Pompe immergée Grundfos	39
Figure 19: Dispositifs Wenner α et Wenner β	41
Figure 20: Carte de localisation des profils électriques	42
Figure 21: Phase de filtrage et de suppression des valeurs aberrantes.....	45
Figure 22: Inversion par méthode itérative en tomographie 2D	46
Figure 23: Carte de localisation des Puits d'essais	52
Figure 24: Panneau électrique du Profil 3	53
Figure 25 : Modèle géologique du Profil 3	54
Figure 26: Panneau électrique Profil 2	54

Figure 27 : Modèle géologique Profil 2	55
Figure 28: Panneau électrique Profil S1P4	55
Figure 29 : Modèle géologique Profil S1P4.....	55
Figure 30: Panneau électrique Profil S1P2	56
Figure 31 : Modèle géologique Profil S1P2.....	56
Figure 32: Panneau électrique Profil S1P3	57
Figure 33 : Modèle géologique Profil S1P3.....	57
Figure 34: Panneau électrique Profil S2P1	57
Figure 35 : Modèle géologique Profil S2P1.....	58
Figure 36: Panneau électrique Profil 6.....	58
Figure 37 : Modèle géologique Profil 6	58
Figure 38: Couche d'altération dans le lit mineur au niveau du seuil d'épandage 1.....	61

INTRODUCTION

Le « Rapport des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau » de 2018 stipule que la demande mondiale en eau augmente d'environ 1% par an en raison de la croissance démographique, du développement économique et de l'évolution des modes de consommation. La grande majorité de la demande croissante en eau se produira dans les pays en développement ou émergents. En outre, en raison du changement climatique, les régions les plus humides deviendront généralement plus humides et les régions sèches encore plus sèches (UN WATER, 2018). L'effet croisé de ces deux phénomènes entraînera une diminution quantitative et qualitative de la ressource en eau de surface. Face à cette situation, les ressources en eau souterraine se révèlent être une solution alternative.

Elles représentent une ressource majeure pour les populations rurales au Sud du Sahara étant donné que les eaux de surface ne sont pas pérennes à cause de la valeur élevée de l'évapotranspiration ou de leur qualité médiocre (au Burkina, seul les fleuves Mouhoun et Comoé sont pérennes) (Soro, 2017). L'importance des eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable à travers le monde s'est accrue, particulièrement pour les pays du tiers monde, rendant impératif une meilleure compréhension du fonctionnement de ces aquifères (Yonli, 2016).

Selon Compaoré (1997)., en milieu de socle, les roches dures fracturées sont souvent recouvertes d'une épaisse couche d'altérites et les eaux souterraines circulent alors dans un aquifère de type bicouche. La zone altérée joue le rôle de stockage tandis que la couche inférieure fissurée joue le rôle de transfert. La couche supérieure présente un grand intérêt scientifique du fait de sa capacité de stockage. La couche altérée était le domaine de prédominance pour les équipements hydrauliques pour l'Afrique de l'Ouest francophone au début des années 1950 (Koïta, 2010). Appelée aussi saprolite ou regolith, la couche altérée se situe juste sous la surface terrestre (Dewandel et al., 2006; Lachassagne et al., 2011; Taylor and Howard, 2000; Wyns et al., 2004 ; Leray, 2012).

En dépit de son potentiel de stockage élevé, cette solution de stockage est actuellement sous-utilisée dans plusieurs régions d'Afrique (UN WATER, 2018).

Cela s'explique en partie par le fait que les ressources en eaux souterraines du Burkina sont limitées et surtout peu connues. La connaissance et la maîtrise des eaux souterraines en zone de socle demeurent faibles en ce qui concerne la géométrie et les caractéristiques hydrodynamiques. De nombreuses études ont été réalisées et ont permis de relever les comportements des nappes (Compaoré, 1997 ; Yofe, 2016 ; Koanda, 2019). Ces études sont certes variées et sur une longue période mais eu égard à la très grande superficie des formations de socle qui s'étend sur près de 80% du territoire ainsi qu'à leur complexité, l'état des connaissances mérite d'être amélioré.

La présente étude se situe dans le cadre de l'amélioration des connaissances des ressources en eau souterraine particulièrement la partie altérée de l'aquifère en zone de socle. Elle concerne le bassin versant de Wedbila qui repose sur du socle cristallin et regroupe plusieurs unités géologiques. Aux vues des données disponibles et des moyens mis en œuvre, la méthodologie adoptée pour la caractérisation est une approche couplée alliant des outils géophysiques et méthodes de caractérisation hydrodynamiques. En effet, la connaissance de la géométrie, de la structuration des parties des systèmes aquifères et la connaissance des paramètres hydrodynamiques sont nécessaires pour caractériser le comportement hydrodynamique des aquifères en zone de socle (Maréchal et al., 2004 ; Leray et al., 2013 ; Izquierdo, 2014 ; Soro, 2017).

Objectif de l'étude

L'objectif général de cette étude est d'améliorer les connaissances hydrogéologiques du domaine altéré du bassin versant de Wedbila. Spécifiquement, il s'agira de

- caractériser la géométrie et la structure de l'aquifère superficiel ;
- déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère superficiel.

Structuration du document

Le document est structuré en quatre parties majeures, à savoir :

- une présentation de la zone d'étude ;
- une revue littéraire : il s'agira de présenter des généralités et des outils pour la caractérisation hydrogéologique d'un aquifère ;
- les matériels et méthodes : cette partie présentera la méthodologie adoptée et le matériel utilisé pour l'atteinte des objectifs spécifiques ;
- les résultats et discussion : nous présenterons les résultats et apporterons une analyse de ces résultats.

I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET RELIEF

Le bassin versant de Wedbila se trouve au centre du Burkina Faso. Il est situé à environ 30 km de Ouagadougou et est à cheval entre la Région du Centre et la Région du Centre Sud comme le montre la Figure 1. Il est situé entre les latitudes 12° et 12°10' N et les longitudes 1°22' et 1°30'W. Il couvre les communes de Koubri dans la région du Centre et celles de Saponé et Doulougou dans la Région du Centre Sud. Le Bassin de Wedbila a une superficie de 150 km² dont 5,27% se situent dans la Région du Centre contre 94,73% dans la Région du Centre Sud. Il dispose de cinq (05) barrages dont le barrage à son exutoire est Wedbila de coordonnées 12°9'1,19''N ; 1°25'8,62''W. Son relief est caractérisé par une pénéplaine peu élevée d'altitude variant de 290 à 400 m et des plateaux cuirassés (Ouattara, 2015).

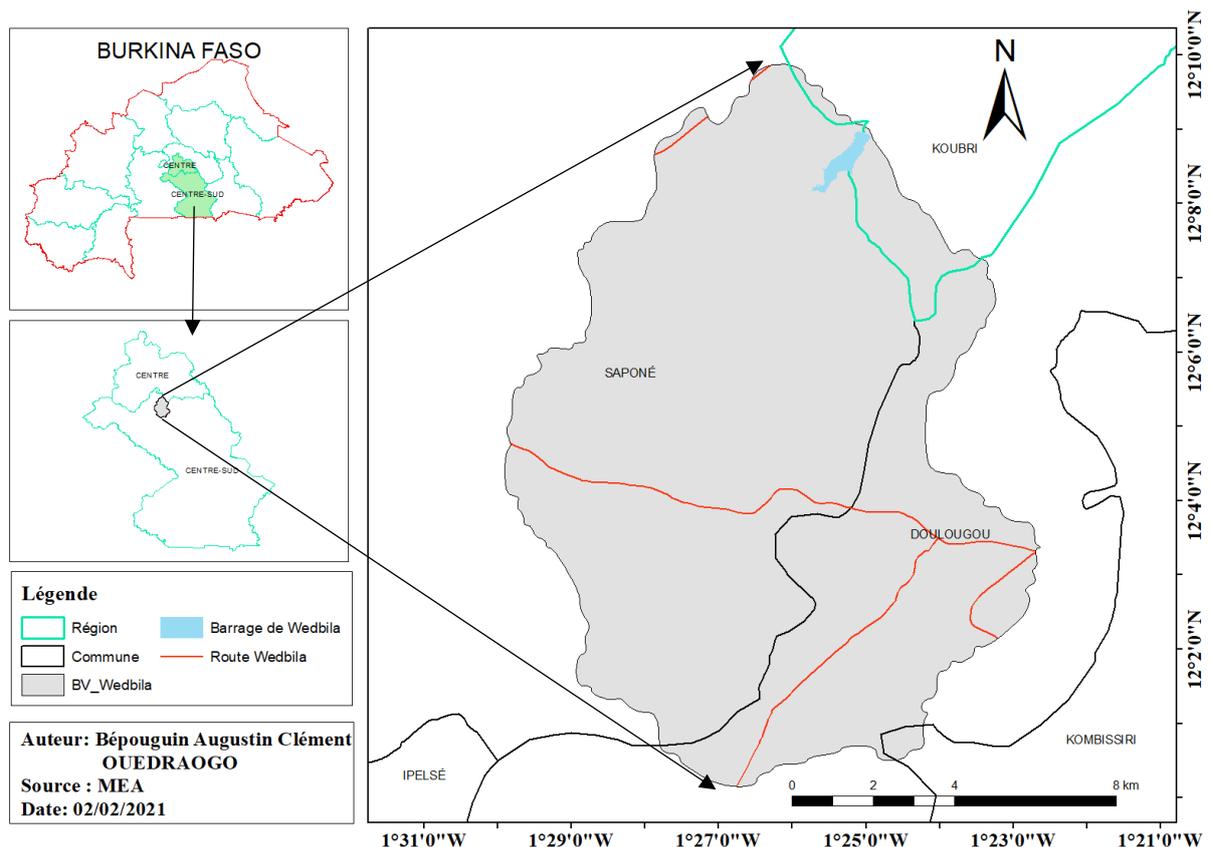


Figure 1 : Carte de localisation du bassin de Wedbila

I.2. CLIMAT ET HYDROLOGIE

Le bassin de Wedbila se situe dans la zone soudano-sahélienne avec deux saisons : une saison sèche (octobre - mai) et une saison pluvieuse (juin - septembre). Les périodes les plus chaudes de l'année se situent en mars, avril et mai. Les températures maximales moyennes atteignent 40 °C et subissent une baisse sensible en hivernage (32 °C). Les températures minimales moyennes quant à elles, sont beaucoup influencées par l'harmattan (novembre - février) et atteignent les 15 °C (Compaoré, 1997). Sur la base d'une pluviométrie moyenne de 698.9 mm (Ouattara, 2015) , les pluies apportent chaque année près de 103 millions de m³ d'eau sur le bassin.

Les ressources en eau superficielle du Burkina Faso proviennent uniquement des eaux météoriques. En effet, contrairement à d'autres pays à faible pluviométrie de la sous-région, le Burkina Faso ne bénéficie pas des apports des grands fleuves qui prennent leurs sources dans les zones bien arrosées. Il s'agit d'une contrainte naturelle importante pour la gestion des ressources en eau du pays (La Banque Mondiale, 2017). Ces ressources sont réparties en quatre bassins versants nationaux qui sont : le bassin de la Comoé (17 590 km²) ; le bassin du Nakanbé (81 932 km²) ; le bassin du Niger (83 442 km²) et le bassin du Mouhoun (91 036 km²) (Mei, 2003). Le bassin de Wedbila ne dispose pas de cours d'eau permanents (Ouattara, 2015). Il se situe dans le bassin du Nakanbé. Le barrage de Wedbila a deux principaux affluents que nous désignons par WED1 et WED2 respectivement pour l'affluent principal et l'affluent secondaire (Koné, 2015). Les barrages du bassin versant de Wedbila sont le barrage de Wedbila, Yansaré, Pissy, Gana et Seloguin. Sur la Figure 2 est représenté le réseau hydrographie du bassin versant de Wedbila dont les caractéristiques sont les suivantes (Tableau I) :

Tableau I : Caractéristiques du bassin versant de Wedbila

Surface S (km ²)	150,71
Périmètre P (km)	56,357
La pente longitudinale I (‰)	0,0021
L'Indice de compacité de Gravelius K_G	1,285
La longueur du rectangle équivalent Leq (km)	20,697

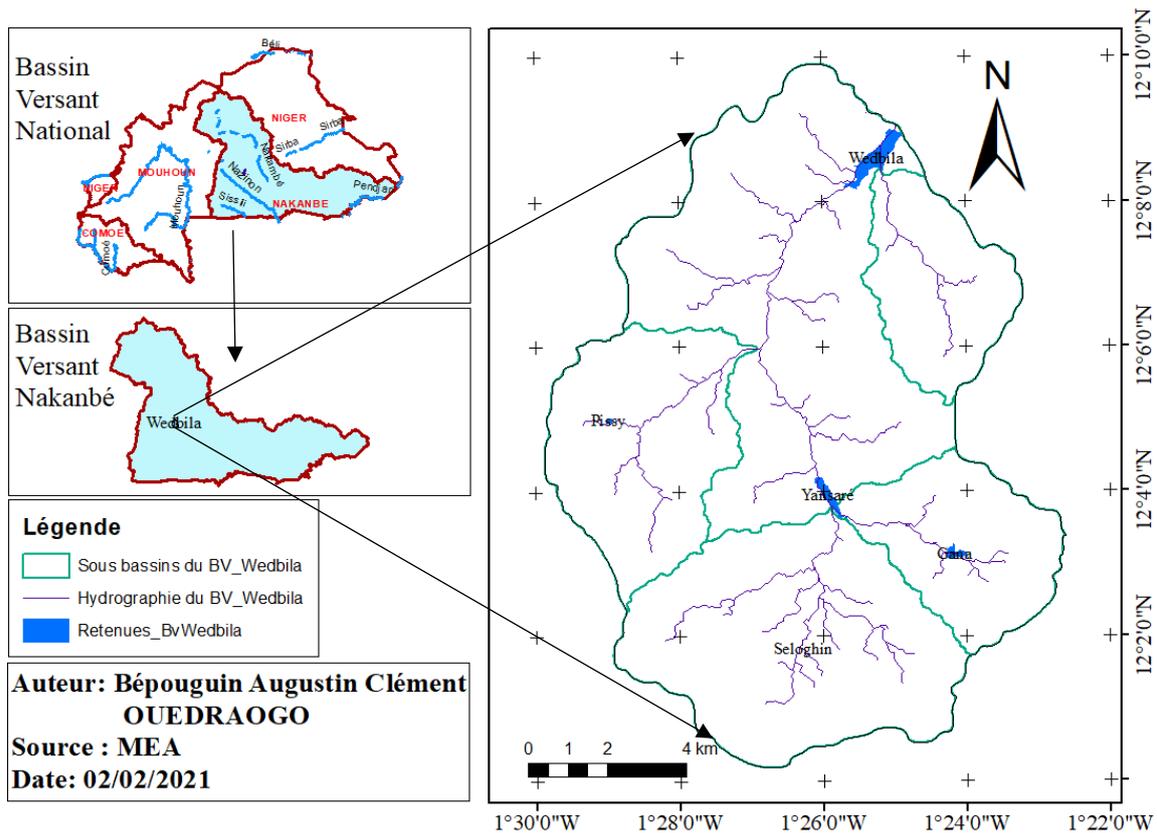


Figure 2: Carte hydrographique du bassin versant de Wedbila

I.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Le Burkina Faso est composé de 80% de socle cristallin et est constitué d'aquifère de type fissuré. Cette formation géologique se retrouve quasiment dans toutes les régions du pays mais représente l'unique formation qu'on retrouve dans le bassin du Nakanbé (La Banque Mondiale, 2017). Les roches cristallines et cristallophylliennes de l'Afrique de l'ouest sont surmontées par des formations d'altérites qui résultent de l'altération physico-chimique des roches sous l'action de l'eau. Cette transformation des roches cristallines résulte des réactions chimiques accompagnant l'infiltration de l'eau de pluie (Mouhouyoudine, 2015). La recharge pénètre les horizons superficiels altérés, généralement argileux et impropres à l'exploitation, et ces altérations agissent comme un réservoir « capacitif » où l'eau s'accumule, puis petit à petit s'égoutte plus bas vers la zone fracturée du rocher où il est alors possible de l'exploiter par forage (La Banque Mondiale, 2017). Les Figure 3 et Figure 4 donnent respectivement les profils type de l'altération du granite (représente environ 63% de la superficie de la zone d'étude) et un log de forage d'un PMH de la zone d'étude.

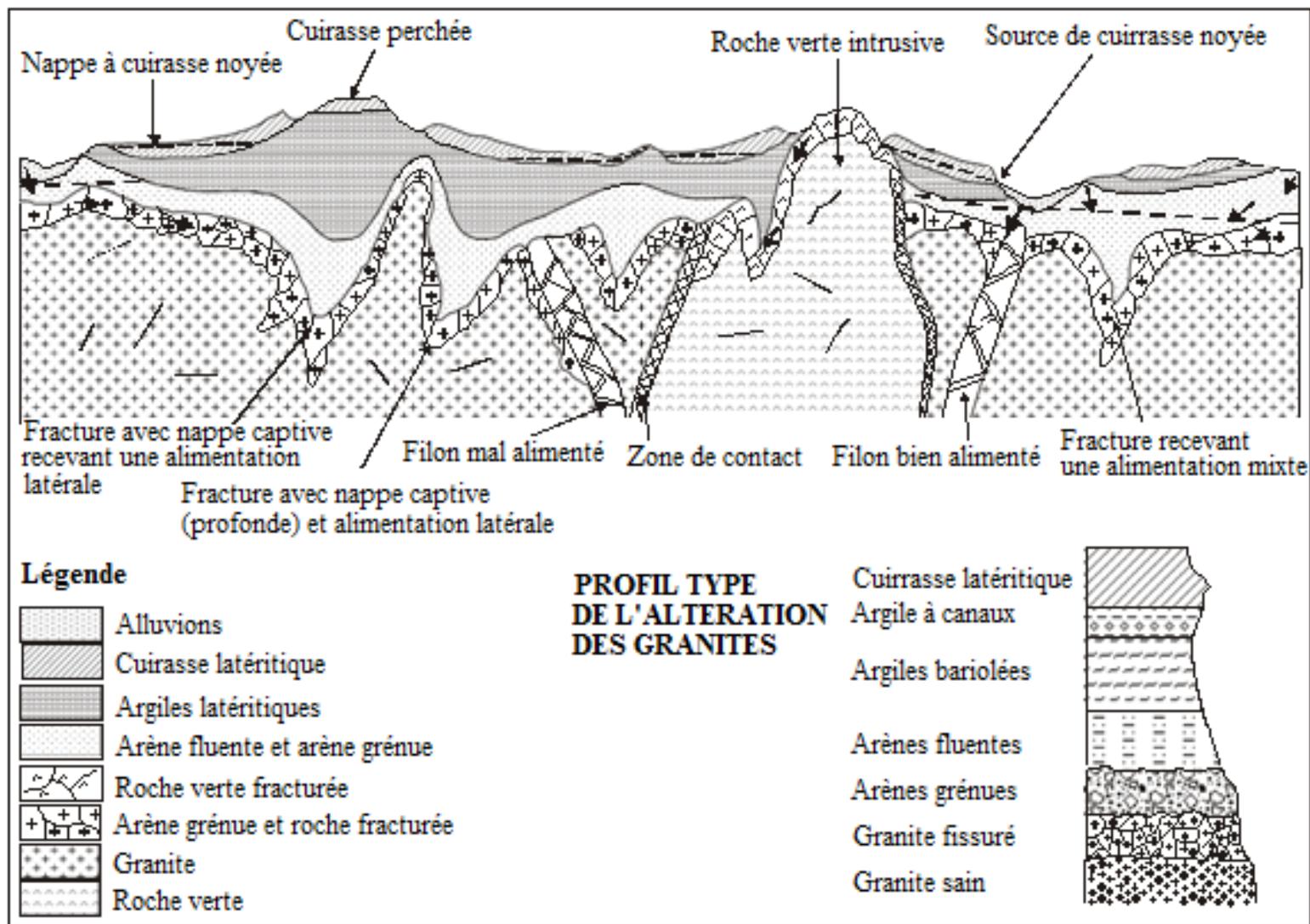


Figure 3: Profil type de l'altération des granites (source : Sawadogo ; 1975 ; Ouédraogo, 2016)

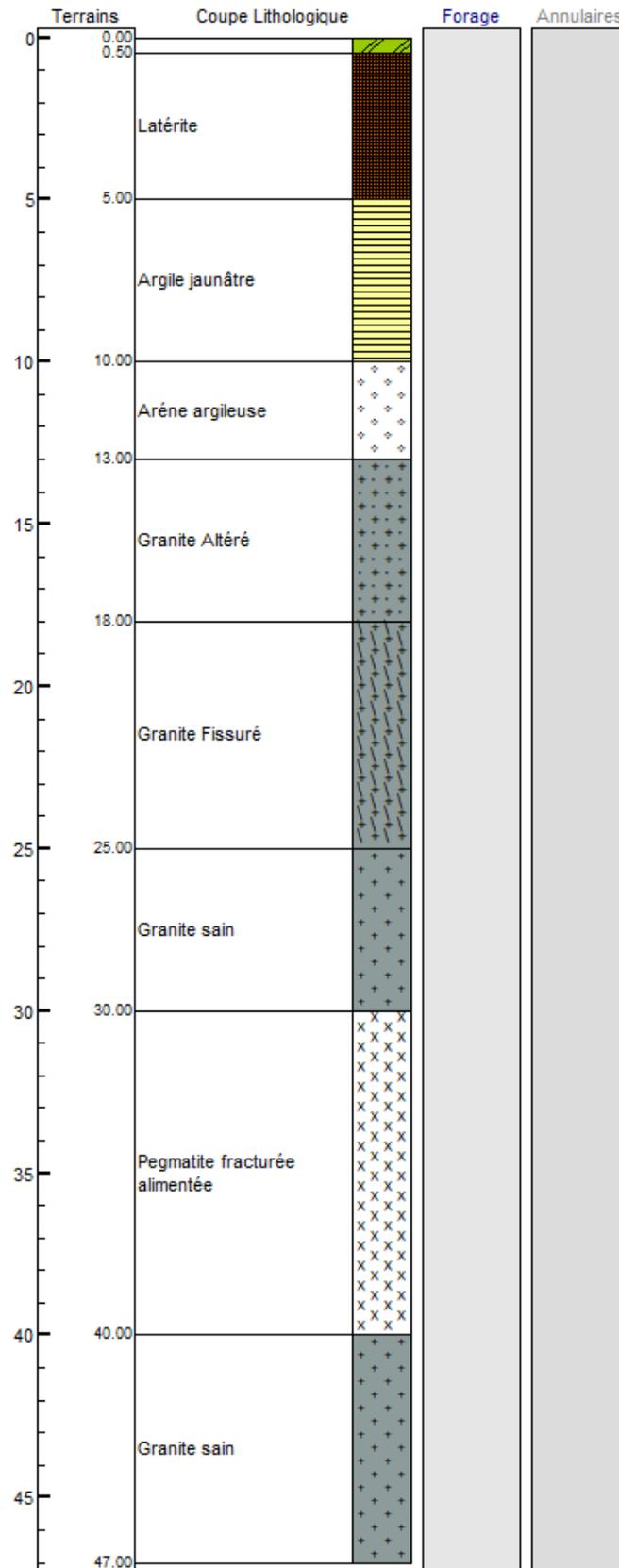


Figure 4: Log de forage d'un PMH dans la commune de Douougou (source : MEA)

Concernant les eaux souterraines, les aquifères sont de types fissurés, discontinus et généralement faiblement productifs, sur plus de 80% de la superficie du pays. Le reste correspond à la partie sédimentaire, généralement plus productive et très exploitée (La Banque Mondiale, 2017).

Le bassin de Wedbila étant situé au centre du pays est en zone de socle. A l'instar de l'ensemble du territoire national ; les ressources en eau souterraine sont assez mal connues. Ci-dessous, la Figure 5, nous avons la carte géologique du bassin versant de Wedbila issue de la feuille de Ouagadougou qui est à l'échelle 1/200 000. Elle montre les différentes structures géologiques qui composent le bassin versant.

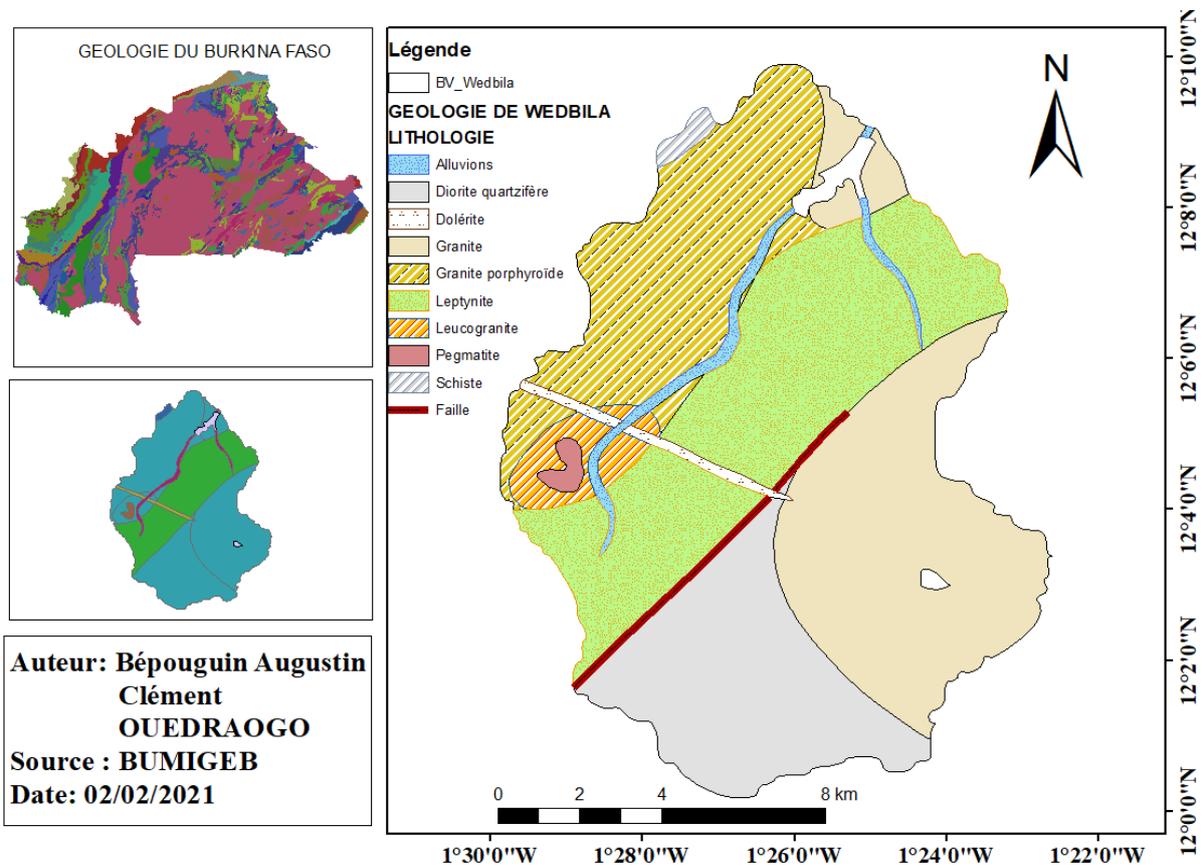


Figure 5: Carte géologique du bassin versant de Wedbila

Les formations géologiques mineures rencontrées sur le site sont les volcano sédimentaires, la dolérite, les roches métamorphiques et superficielles. Les coupes lithologiques établies lors de la réalisation des micro-piézomètres montrent que le sol est dominé par de l'argile et de l'argile-limoneuse compacte (Ouattara, 2015). Dans le bassin de Wedbila, nous distinguons une fracture dont la direction majeure est de 45°N.

Sur le bassin, il est identifié une dépression piézométrique à l'aval du bassin à la sortie de la

saison des pluies (mois d'octobre). Les écoulements se font majoritairement vers la zone des micro piézomètres. Une carte piézométrique de l'aquifère de la zone est proposée ci-dessous.

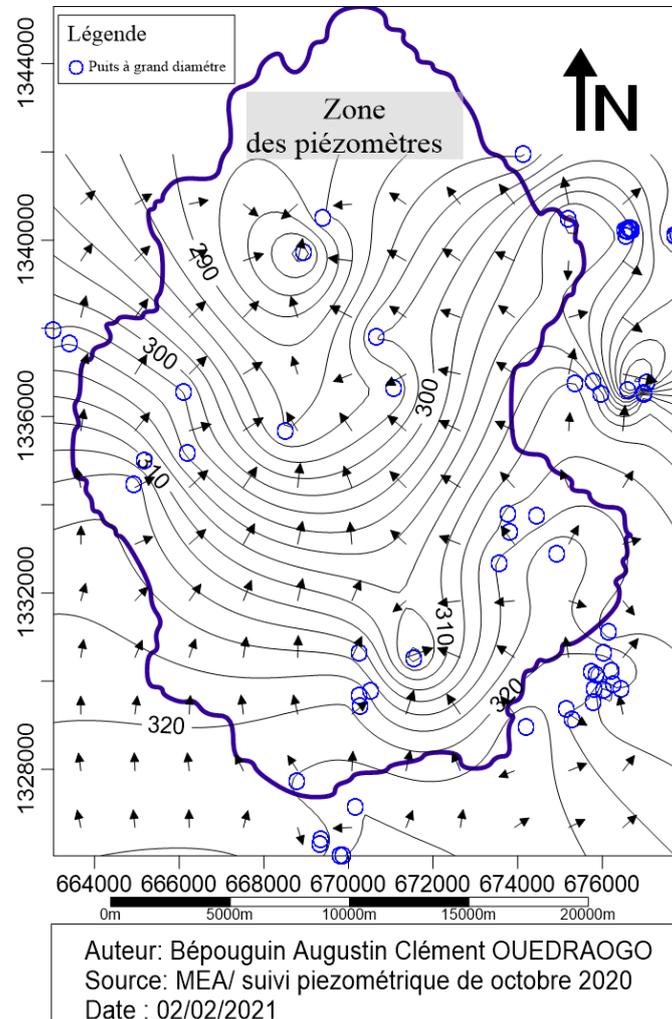


Figure 6: Carte piézométrique du bassin de Wedbila

I.4. VEGETATION ET MILIEU HUMAIN

La végétation est la savane arbustive claire parsemée de quelques grands arbres et une strate herbacée. Ce couvert végétal se compose essentiellement :

- d'arbres comme *Adansonia digitata* (baobab);
- d'arbustes, notamment des épineux dominés par *Ziziphus mauritiana* ;
- de hautes herbes.

Les populations des communes de Koumbri et Saponé étaient respectivement de 43 928 et 38 637 selon le RGPH (2006). L'activité économique de ces localités est basée à 80% sur l'élevage et l'agriculture.

II. REVUE LITTERAIRE DES METHODES DE CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE EN ZONE DE SOCLE

II.1. GENERALITES

II.1.1. Définition

Cette partie est consacrée à la définition de l'aquifère, de la nappe et de la typologie des nappes que l'on peut rencontrer en milieu de socle.

L'aquifère

Un aquifère est un corps (couche, massif) de roches ou de sols reposant sur une couche imperméable, appelée substratum ou mur, comportant une zone saturée suffisamment perméable pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine. Un aquifère peut comporter une zone non saturée dans le cas d'une nappe libre, zone à travers laquelle l'infiltration des eaux de pluie contribue à la recharge de la nappe (Fouché, 2013).

La notion d'aquifère fait référence à des propriétés très importantes en hydrogéologie qui sont le stockage, la conduite et l'échange de minéraux (Soro, 2017).

Les aquifères sont caractérisés principalement par la lithologie, la structure des couches, la perméabilité et l'emmagasinement.

La nappe

Sur la base des définitions données par Fouché (2013), une nappe d'eau souterraine est l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère dont toutes les parties sont en continuité hydraulique. Une nappe est une masse d'eau qui partage un volume avec la masse minérale solide.

La différence entre aquifère et nappe est que la nappe est la masse d'eau contenue dans la porosité du terrain (sol ou roche) alors que l'aquifère est le terrain lui-même (formation géologique).

Lorsque la surface supérieure de l'eau fluctue sans contrainte, la nappe d'eau est dite libre. Si l'eau est confinée par des couches géologiques imperméables, elle est dite captive (Soro, 2017).

II.1.2. Nappe et aquifère en milieu de socle

II.1.2.1) Géologie et structure

Les formations de socle regroupent l'ensemble des roches cristallines et cristallophylliennes, ainsi que les roches sédimentaires anciennes dont le comportement hydrogéologique est comparable à celui des roches cristallines (Ouédraogo, 2016). Ces roches sont caractérisées par leur nature compacte et leur faible capacité à retenir l'eau, et par la présence d'horizons perméables qui se développent parfois à la faveur de processus d'altération et de phénomènes tectoniques. Les ensembles géologiques généralement différenciés sont les granites, gneiss et migmatites, les schistes, et les grès quartzites (Boukari *et al.*, 1990 ; Ouédraogo, 2016). Les roches cristallophylliennes de l'Afrique de l'Ouest sont surmontées depuis le Précambrien par un manteau d'altérites qui résulte de l'altération physico-chimique des roches sous l'action de la température (Compaoré, 1997).

Les aquifères de socle sont représentés du haut vers le bas, par trois types de réservoirs : le réservoir d'altération, le réservoir de fissures situé au-dessus de la roche saine qui traduit une zone partiellement altérée comportant de nombreuses fissures et diaclases généralement remplies de produits d'altération, et le réseau de fractures majeures qui affectent la roche mère (Ouédraogo, 2016). Plusieurs auteurs (Nakolendoussé, 1991 ; BRGM, 1992 ; Savané, 1997 ; Wyns *et al.*, 2004 ; Koussoubé, 2010) soutiennent que ces trois entités forment un seul milieu composite et un aquifère unique dont l'altérite assure la fonction de stockage et la fonction de transfert est assurée par les fissures et les fractures. Ces trois réservoirs reposent sur la roche mère intacte et imperméable. Les altérites constituent le réservoir dit capacitif, à cause de leur porosité et de leur faible perméabilité tandis que la zone fissurée constitue le réservoir dit conducteur assurant la circulation de l'eau. Le substratum sain constitue la base imperméable de l'aquifère (Toé, 2004 ; Savadogo, 1984 ; Yaméogo, 2008 ; Mouhouyouddine, 2015). Ces

études infirment le modèle conceptuel traditionnel du CIEH (1979) qui définissait l'aquifère en milieu comme étant un système bicouche superposé. Le modèle conceptuel de Wyns et al, (2004) est représenté ci-dessous :

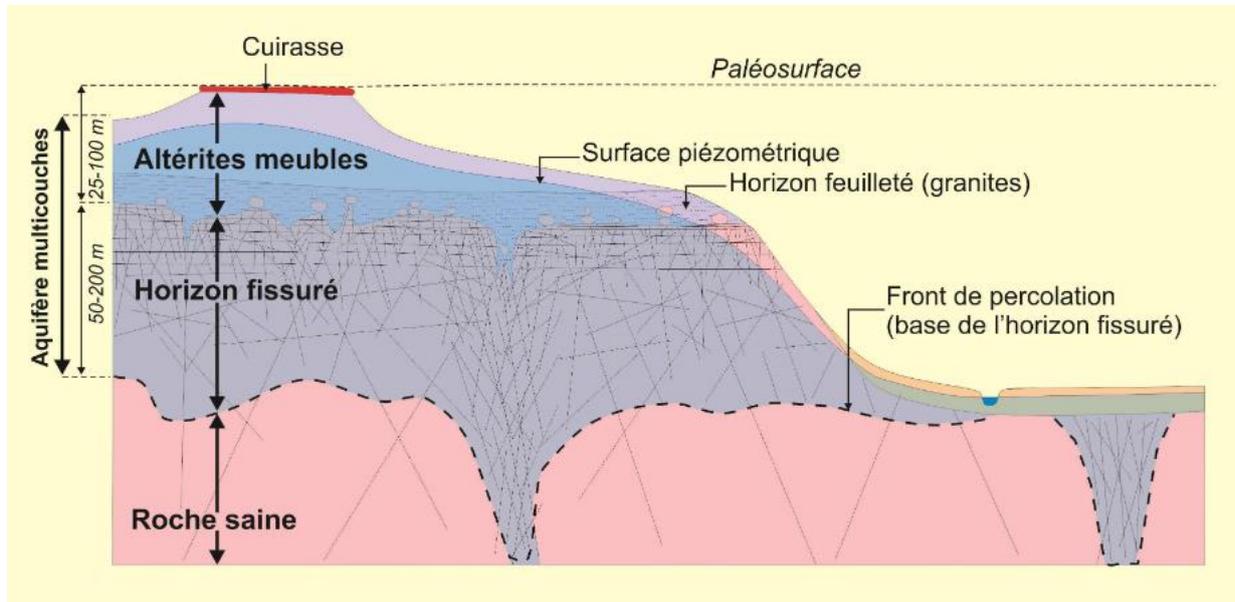


Figure 7: Modèle conceptuel stratiforme de la structure hydrogéologique des aquifères de socle, discontinus et hétérogènes (Wyns et al, 2004; Lachassagne et al., 2015)

Le profil d'altération typique, résultant de l'altération de la roche en place, est défini comme l'ensemble des séquences lithologiques au-dessus de la roche saine non fracturée (Wright, 1992 ;Koïta, 2010). L'eau pénètre dans la roche par les fissures et provoque sa décomposition chimique par hydrolyse et dissolution. La variation de température entraîne une désagrégation physique de la roche (Compaoré, 1997). L'altération peut être de différentes natures selon les conditions climatiques, la minéralisation de la roche et la fracturation déjà présente. En climat tropical, l'altération est intense et aboutit à la formation d'argile, c'est le cas de l'altération des feldspaths, présents dans le granite notamment. La couche correspondante, nommée allotérite n'a plus les caractéristiques du matériau originel (Leray, 2012). En climat continental, l'altération est plus ménagée et mène à une augmentation de la porosité. La couche correspondante, isaltérite, conserve les caractéristiques de la roche d'origine (Cleaves, 1993) ; les micaschistes par exemple seront plus enclins à former ce type d'altérites. Souvent, la couche d'allotérite se superpose à la couche d'isaltérite

(Leray, 2012). A ce propos, les deux altérites sont clairement distinctes, le premier (allotérite) défavorisant fortement l'écoulement contrairement au second et présente des variabilités spatiales à cause de la lithologie rencontrée et des fractures (Leray, 2012).

Aussi, les deux processus, altération et fracturation, peuvent être liés : l'altération provoquant de la fracturation – gonflement des argiles par exemple – et la fracturation étant une zone préférentielle d'altération (Acworth, 1987; Cho et al., 2003). Les processus de génération/transformation des propriétés hydrodynamiques, porosité et perméabilité, sont donc extrêmement complexes (Leray, 2012). Leurs caractérisations et celle de la ressource associée passent par la régionalisation de ses propriétés – perméabilité et porosité (traitement statistique des données avec ou sans inversion, lien entre les mesures géophysiques et les paramètres hydrodynamiques.). Comme dit précédemment, les zones fracturées peuvent constituer des zones d'altération préférentielles en ce qu'elles peuvent faciliter l'infiltration de l'eau en profondeur, même si la zone altérée reste assez peu profonde. Tout ceci résulte tant en des caractéristiques hydrodynamiques et structurales très variables dans l'espace qu'en une ressource incertaine (Leray, 2012)

La nature, la géométrie et la structure des aquifères en zone de socle découlent de la roche mère, de la tectonique et du processus d'altération. Compaoré (1997) dégage deux principaux types de profil d'altération au Burkina et décompose leurs structures comme suit :

(1) Le profil type de l'altération des granito-gneiss :

Il est ainsi présenté du bas vers le haut :

- le socle sain
- l'arène sableuse : le contact socle sain/altérites est toujours brutal. Il n'existe pas de zone de transition. La roche perd de sa cohésion du fait de l'hydrolyse de certains minéraux (feldspaths et micas) ;
- la litho-marge à texture conservée : elle concerne la zone des altérations où les minéraux primaires sont détruits mais où l'architecture initiale est maintenue ;
- l'argile latéritique ;
- la carapace à faciès massif ;
- la cuirasse à faciès massif ;
- la cuirasse à faciès pseudo nodulaire ;
- la cuirasse à faciès nodulaire.

(2) Le profil type de l'altération des schistes

L'altération des schistes donne des couches très épaisses à dominante argileuse. Le profil simplifié de l'altération des formations schisteuses se distingue du bas vers le haut :

- le schiste sain ;
- le schiste fissuré, avec diaclases à filons de quartz et de calcite ;
- le schiste altéré à structures conservées : il est la zone de transition entre les argiles d'altération et roche fissurée. Son épaisseur varie entre 5 - 10m ;
- les argiles d'altération de schiste se développent sur de grandes épaisseurs (pouvant atteindre 100m) et sont généralement compactes ;
- les argiles latéritiques ;
- la cuirasse latéritique elle est constituée de nodules ferrugineux à matrice d'argile rouge ou jaune. Son épaisseur est d'environ 2m ;
- le sol résiduel.

II.1.2.2) Propriétés hydrodynamiques de l'altération

Les principales propriétés hydrogéologiques d'un aquifère sont le stockage et la conduite (De Marsily, 1981 ; Soro, 2017). Ces propriétés hydrogéologiques sont les paramètres hydrodynamiques. Un paramètre hydrodynamique est un paramètre physique

définissant quantitativement le comportement d'un milieu ou d'un corps conducteur vis-à-vis d'un fluide, c'est-à-dire son aptitude à le contenir, à permettre son écoulement et à régir les propagations d'influence. Les principaux paramètres régissant l'écoulement des eaux souterraines sont la transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emménagement et la porosité efficace. Ils peuvent être déterminés in situ lors d'un essai de pompage ou au laboratoire. La capacité de stockage se traduit par la porosité et le coefficient d'emménagement et la propriété de conduite par la perméabilité -conductivité et la notion transmissive (Soro, 2017). A cela s'ajoute la notion de productivité qui est la capacité d'un aquifère à fournir, par le biais d'un captage, un débit convenable susceptible d'être exploité (Gombert, 1997). Quelques paramètres sont définis ci-dessous :

- Le coefficient d'emménagement : est défini comme le volume d'eau libéré (ou emmagasiné) par un prisme vertical du réservoir de section unitaire, à la suite d'une variation unitaire de charge (De Marsily, 1981 ; Soro 2017). Le coefficient d'emménagement représente la porosité efficace des nappes libres. Au sein des altérites, il varie d'un point à l'autre en lien avec la teneur en argile (Mouhouyouddine, 2015).
- La perméabilité : l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide. Elle est fonction de la porosité efficace du milieu et de viscosité du fluide. Pour l'eau, Darcy définit le coefficient de perméabilité comme étant la perméabilité d'un corps (roche, matériau) assimilé à un milieu continue et isotrope vis-à-vis d'un fluide homogène déterminé, de densité et viscosité cinématique constantes, notamment l'eau (Castany et Margat ; 1977). La figure suivante donne les classes de perméabilité des produits de l'altération fournies par l'université de Lausanne et l'institut français du pétrole :

PERMÉABILITÉ (K)	en m/s ▶	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰
	en darcy cm/s ▶	10 ³	10 ²	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
GRANULOMÉTRIE	homogène ▶	graviers		sable pur	sable très fin		silt		argiles				
	diamètre des grains en mm ▶	2		0.25	0.06		0.002						
	variée ▶	graviers gros et moyens		graviers et sables	mélange sable, argile, limons				argiles				
	TYPES DE FORMATIONS	roches perméables				semi-perméables				impermeables			

Figure 8: Classe de perméabilité en fonction de la géologie (source : <https://www-ig.unil.ch/res16f.htm>)

- La Transmissivité : la quantité d'eau qu'un aquifère peut libérer par unité de largeur de sa zone saturer.

Sur la base des travaux de plusieurs auteurs, le tableau suivant donne un recueil des valeurs de la transmissivité, du coefficient d'emménagement et de la perméabilité au niveau du Burkina.

Tableau II: Caractéristiques hydrodynamiques des altérites au Burkina (Source :Compaoré, 1997)

Localité	Reference	Nom de la station	Lithologie	Durée de pompage (h)	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)	Coefficient d'emménagement
Burkina Faso (Centre Est)	Caboté, 1975		Arènes	12	10 ⁻⁴	0,65.10 ⁻⁵ à 1,05.10 ⁻⁵	
Burkina Faso	Englalenc, 1979	Zigla	Altération de granito-gneiss	37.5	1,65.10 ⁻⁴ - 2,35.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁵	1,8.10 ⁻⁵
Burkina Faso (Yatenga)	IWACO, 1990	Bougounam	Granite altérée	96	9,49.10 ⁻⁵	3,4.10 ⁻⁶	7,3.10 ⁻⁴
Burkina Faso (Yatenga)	IWACO, 1990	Toutou	Schistes altérés	96	3.10 ⁻⁵	1,2. 10 ⁻⁶	

La distribution des débits et des transmissivité (Tableau III et Tableau IV) a été faite suivant la classification proposée par le CIEH et utilisée par divers auteurs (Yao et al., 2010 ; Mboudou, 2017 ; Kutangila,2019).

Tableau III: Classification des débits (source : CIEH, 1992)

Intervalles (m ³ /h)	Classe
0-1	Débits très faibles
1-2.5	Débits faibles
2.5-5	Débits moyens
5-10	Débits Forts
> 10	Débits très forts

Tableau IV: Classification des transmissivités (source : CIEH, 1992)

Intervalles (m ² /s)	Classe
<10 ⁻⁵	Classe faible
10 ⁻⁵ -10 ⁻⁴	Classe moyenne
>10 ⁻⁴	Classe forte

Tableau V: Classification des débits spécifiques (source : CIEH, 1992)

Intervalles (m ³ /h/m)	Classe
<0.1	Domaine de l'hydraulique villageoise
0.1-0.36	Domaine de la petite hydraulique agricole (jardin)
0.36-1	Domaine de l'hydraulique agricole
>1	Domaine de l'hydraulique urbaine

II.2. LES METHODES DE CARACTERISATION DE LA STRUCTURE ET DE LA GEOMETRIE

Les méthodes de caractérisation de la structure et de la géométrie sont classées en deux catégories :

- Les méthodes directes invasives : permet de déterminer la géologie du sol en effectuant des excavations ou des forages au niveau de la zone d'étude. Cette méthode engendre un remaniement du sol ;
- Les méthodes indirectes non invasives s'appuient sur des outils géophysiques (Yonli, 2016). Ces méthodes fournissent une alternative ou un complément aux observations directes (François et al., 2015 ; Yonli, 2016).

Les méthodes géophysiques mesurent les variations spatiales et temporelles des propriétés physiques du sous-sol. En fait, le géophysicien mesure certains paramètres physiques du sous-sol afin d'en obtenir une image qu'il essaie ensuite de convertir en structure géologique (Chalikakis, 2006 ; Soro, 2017). Les méthodes sont nombreuses et mesurent différents paramètres physiques. Le tableau donne ces méthodes et les paramètres mesurés :

Tableau VI: Méthodes et techniques géophysiques usuelles de surface pour l'hydrogéologie (d'après Kearey

et Brooks, 1984 ; Vouillamoz, 2003 ; Chalikakis, 2006 ; Carrière, 2014)

Méthode géophysique	Technique de mesures	Paramètre géophysique mesuré	Propriété physique opérationnelle	Influence de l'eau souterraine
Electrique	Traîné	Différence de potentiel due aux courants de conduction	Résistivité électrique	Oui
	Sondage			
	Panneau			
	Polarisation Spontanée	Potentiel électrique naturel	Conductivité électrique, différence de pression	Oui
Electromagnétisme	VLF (mode inclinaison et résistivité)	Signal électromagnétique dû à l'induction	Conductivité électrique (susceptibilité magnétique et permittivité)	Oui
	Slingram			
	TDEM			
	Radar	Temps de Propagation des ondes électromagnétiques	Permittivité diélectrique (susceptibilité magnétique et résistivité électrique)	Secondaire
Sismique	Profil sismique	Temps de propagation des ondes acoustiques	Densité et module d'élasticité	Secondaire
Micro-gravimétrie	Profil ou carte du champ de la pesanteur	Champ de pesanteur	Densité	Secondaire
	"Surface to depth"	Variation temporelle du champ de pesanteur		oui
Magnétisme	Profil ou carte du champ magnétique terrestre ou d'un gradient de ce champ	Champ géomagnétique	Susceptibilité magnétique	Non
Résonance Magnétique des Protons	Sondage	Signal RMP	Signal émis par les noyaux atomiques de la molécule d'eau	Oui
Radon	Carte des concentrations	Concentration en radon	Radioactivité naturelle	Secondaire

Parmi les méthodes géophysiques, les méthodes électriques et électromagnétiques sont les plus employées pour l'hydrogéologie car le principal paramètre opérationnel (la résistivité ou son inverse, la conductance) est influencé par la nature des roches mais également par la quantité et la qualité de l'eau d'imbibition (McNeill, 1980 ; Ouédraogo, 2016). La préférence pour des méthodes de résistivité tient à des raisons non seulement de facilité de mise en œuvre des mesures sur site (simplicité du matériel et de la mesure) mais surtout, de la possibilité d'effectuer des mesures discriminantes (adaptées à l'étude du proche

sous-sol) à petite ou grande échelle, aussi bien au plan horizontal (cartographie de résistivité) que vertical (Wubda, 2017).

La méthode électrique a été développée dans les années 1920 simultanément en France et aux Etats-Unis sous les impulsions respectives de Conrad Schlumberger et Frank Wenner. Depuis lors, cette méthode a connu de grandes progressions dans sa compréhension, sa mise en œuvre et ses applications. Elle a été utilisée dans le cadre des études de thèse de Soro (2017) et de Sauret (2013) et les travaux de mémoire de Kabré (2012) et Outoumbé (2014) au Burkina Faso. La méthode électrique est une méthode fiable, robuste, non destructive et peu influencée, par les éléments extérieurs lors de la prospection (contrairement à la méthode électromagnétique) (Buvat, 2012 ; Soro, 2017). Les méthodes électriques représentent l'ensemble des méthodes basées sur l'étude des propriétés électriques des formations géologiques (Kabré, 2012). Dans le cadre de nos travaux, l'accent sera mis sur les méthodes de résistivité électrique.

La grandeur physique d'intérêt obtenue par application de la méthode électrique de résistivité est la résistivité électrique ρ (exprimée en $\Omega.m$). Elle est l'inverse de la conductivité σ (exprimée en $S.m^{-1}$). La résistivité électrique représente l'aptitude d'une roche ou d'un sol à s'opposer plus ou moins au passage d'un courant électrique. Elle est définie comme la résistance R du milieu par unité de longueur (Soro, 2017). Le tableau suivant donne les classes de résistivité et les propriétés de quelques matériaux.

Tableau VII: Propriétés de quelques matériaux courants et gamme de résistivité correspondantes (Chapellier, 2000)

Roches	Porosité totale (%)	Perméabilité (cm/s)	Résistivité (ohms*m)
Argilite	35	10^{-8} - 10^{-9}	70 à 200
Craie	35	10^{-5}	30 à 300
Tuf volcanique	32	10^{-5}	20 à 300
Marnes	27	10^{-7} - 10^{-9}	20 à 100
Grès	3 à 35	10^{-3} - 10^{-6}	30 à 800
Dolomite	1 à 12	10^{-5} - 10^{-7}	200 à 10'000
Calcaires	3	10^{-10} - 10^{-12}	200 à 10'000
Métaschistes	2.5	10^{-4} - 10^{-9}	300 à 800
Gneiss	1.5	10^{-8}	1'000 à 20'000
Quartzite	<1	10^{-10}	1'000 à 10'000
Granite	1	10^{-9} - 10^{-10}	1'000 à 15'000
Gabbro	1 à 3	10^{-4} - 10^{-9}	6'000 à 10'000
Basalte	1.5	10^{-6} - 10^{-8}	800 à 15'000

A l'exception des minéraux métalliques, des argiles hydratées ou du graphite, les minéraux constitutifs des formations géologiques présentent majoritairement des résistivités élevées (Kirsch, 2006 ; Ouédraogo, 2016).

II.2.1. Principe de la méthode de résistivité électrique

A partir d'un appareil appelé résistivimètre, nous procédons à une injection de courant électrique par le biais des électrodes d'injection (A, B) implantées dans le sol. Deux électrodes de réception (M, N) mesurent la différence de potentiel (Figure 9). Sur cette base, la résistivité

est calculée avec la formule suivante :

Équation 1

$$\rho = K \times \frac{\Delta V_{MN}}{I}$$

Avec

ρ : la résistivité électrique qui s'exprime en $\Omega \cdot m$

ΔV_{MN} : la différence de potentiel qui s'exprime en millivolt (mV)

I : l'intensité de courant qui s'exprime en milliampère (mA)

K : le coefficient de forme. Il est donné par la formule suivante :

Équation 2

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)}$$

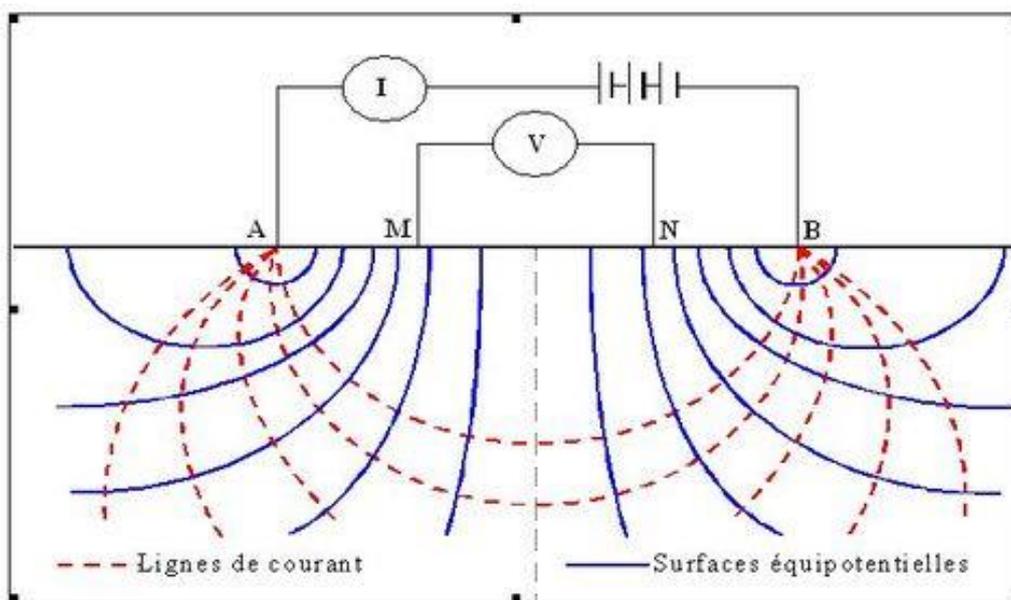


Figure 9: Schéma général d'une mesure de résistivité des sol utilisant un dispositif Wenner alpha à quatre électrodes (source : http://www.wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/fichier:Principe_de_la_prospection_electrique_par_courant_continu_jpg)

Lorsque les lignes de courant traversent des milieux différents (hétérogène ou/et anisotrope), la résistivité mesurée est un équivalent des différentes couches et est appelé résistivité apparente (ρ_a). C'est après un processus de traitement que la résistivité vraie de chaque couche pourra être déterminée.

II.2.2. Différentes techniques de mesure de la résistivité électrique

Mesures 1D

Méthode d'investigation latérale : le trainé électrique :

Classé parmi les investigations 1D ; les trainés électriques permettent une investigation suivant un axe horizontal. Ils consistent à effectuer des mesures de résistivité à une profondeur fixe en maintenant les espacements AB et MN constants et en déplaçant l'ensemble du dispositif le long d'un axe. Cette méthode s'intéresse à la détection de variations latérales qualitatives de résistivités électriques apparentes (Soro, 2017).

Méthode d'investigation verticale : le sondage électrique

A l'instar du trainé, le sondage est aussi classé dans les investigations 1D. Cependant, il permet une investigation verticale. Le sondage électrique (SE) consiste à agrandir successivement l'espacement inter-électrode du quadripôle autour d'un point central permettant d'augmenter la profondeur d'investigation. Il permet de réaliser un profil vertical de résistivités à l'aplomb du point central. Cette technique est adaptée à la détection de variations quantitatives de résistivité perpendiculairement à la surface. De ce fait, le milieu investigué doit être tabulaire (Soro, 2017).

Depuis les années 1990, les méthodes classiques du trainé et du sondage électrique ont été remplacées par la tomographie électrique pour une résolution optimisée des variations latérales de résistivités qui rendent mieux compte des géométries discontinues des aquifères de socle (Baltassat et al., 2015 ; Yonli, 2016).

Méthode 2D : La tomographie de résistivité électrique:

Le mot tomographie est dérivé du grec *tomos* qui signifie tranche ou coupe. Ce terme veut donc dire « imager les tranches d'un objet ». La tomographie de résistivité électrique (Electrical Resistivity Tomography ERT) encore appelée « imagerie de résistivité électrique (IRE) » est une technique de mesure visant à obtenir une image 2D de la distribution des résistivités du sous-sol (Wubda, 2017). Elle permet de faire des mesures de résistivité du sol selon un plan vertical (2D) (Soro, 2017). Ces techniques de panneau sont classiquement utilisées pour définir les structures et la géométrie du milieu souterrain (Ouédraogo, 2016).

Le panneau électrique correspond à une succession de sondages électriques réalisés les uns à côté des autres. Pour cela, un réseau d'électrodes est installé le long d'un profil rectiligne avec un espacement constant, choisi de façon à optimiser la longueur du profil, la profondeur d'investigation et la résolution désirée (Chapellier, 2000 ; Ouédraogo, 2016).

Principe d'acquisition en tomographie de résistivité électrique

La tomographie est basée sur l'utilisation d'un protocole de mesures qui est un petit programme d'exécution automatique dans lequel sont compilés les paramètres de la mesure : nombre, type et taille des quadripôles, enchaînement des mesures, temps d'injection du courant. Une fois installé dans la mémoire d'un résistivimètre, le protocole permet à celui-ci de réaliser de façon autonome la série des mesures unitaires programmées à partir d'un dispositif physique d'électrodes installées en ligne et à intervalle régulier sur le terrain (Wubda, 2017). Les mesures sont enregistrées dans la mémoire du résistivimètre et pourront être exportées. Les électrodes jouent successivement le rôle d'électrodes d'injection de courant et de mesure de différence de potentiel sur toute la longueur du dispositif. L'écartement croissant

entre électrodes permet d'augmenter la profondeur d'investigation. Cependant, elle entraîne une baisse de la résolution. Les mesures sont automatisées à l'aide de séquence de mesures (succession de mesures commandée par un microprocesseur). Les valeurs de résistivités apparentes ρ_a obtenues pour chacun des quadripôles de mesure sont reportées dans un plan vertical appelé pseudo-section ou pseudo-coupe de résistivité apparente (Soro, 2017).

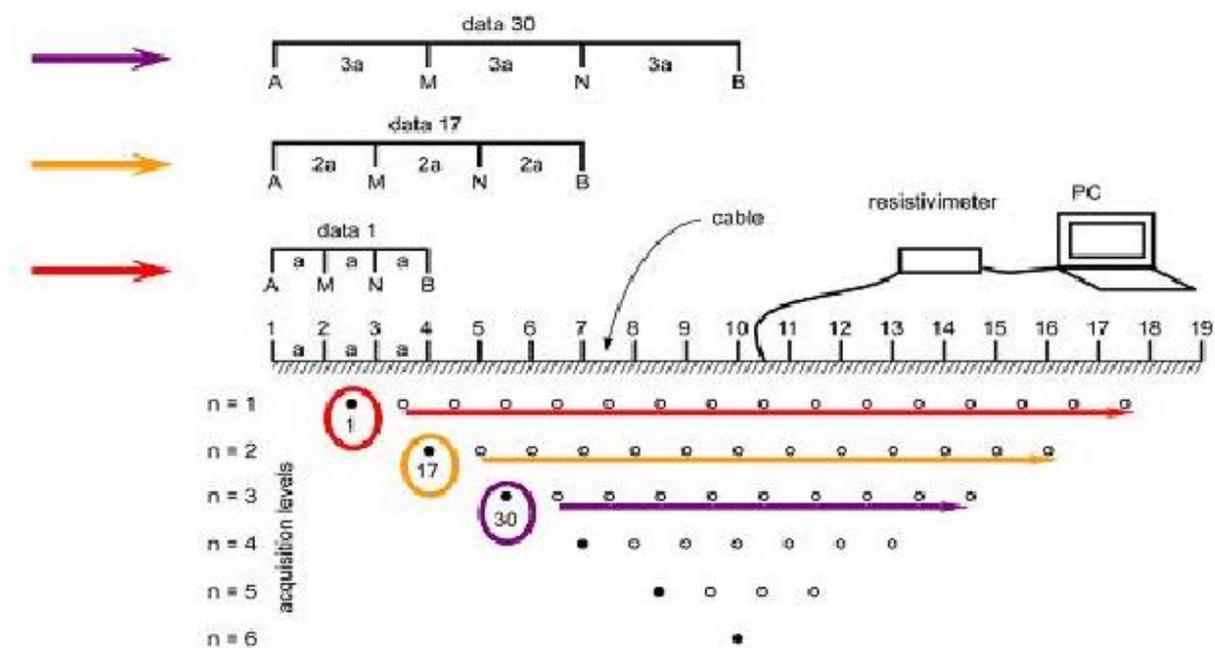


Figure 10 : Schéma de principe de l'acquisition des données suivant un panneau électrique et d'une pseudo section (source : [https:// www.researchgate.net/figure/Tomographie-electrique-2D-schema-de-principe-de-lacquisition-des-donnees-suivant-une-fig2_270340119](https://www.researchgate.net/figure/Tomographie-electrique-2D-schema-de-principe-de-lacquisition-des-donnees-suivant-une-fig2_270340119))

II.2.3. Les dispositifs de mesure de la résistivité électrique

Le positionnement des électrodes (A, B, M, N) les unes par rapport aux autres suivent un certain agencement que l'on appelle dispositif. Le choix d'un de ces dispositifs est guidé par la géologie du terrain ; la structure du terrain et les propriétés du dispositif. Wubda (2017) donne les propriétés des dispositifs les plus utilisés.

- **Le Schlumberger ou le Wenner-Schlumberger :** C'est le dispositif le plus couramment utilisé en sondage électrique. Pour cause, les iso-valeurs de sensibilités montrent une plus grande sensibilité au centre du dispositif (propice à la détection d'une anomalie au centre du dispositif). De plus, elles ne sont ni verticales, ni horizontales, ce qui suppose un compromis entre la résolution verticale et horizontale avec une meilleure pénétration au centre par rapport au Wenner classique (profondeur d'investigation plus grande) ;
- **Le Wenner :** Contours de sensibilité plutôt horizontaux à l'aplomb du centre du dispositif. Le Wenner sera donc plus sensible aux changements verticaux qu'horizontaux de résistivité. Il sera ainsi recommandé pour la détection de structures tabulaires. Par contre, on remarque que les valeurs de grande sensibilité restent assez superficielles ce qui signifie une profondeur d'investigation faible pour ce dispositif ;
- **Le Dipôle Dipôle :** C'est un dispositif couramment utilisé en ERT. L'une de ses variantes est également assez connue : il s'agit du Wenner dit Bêta qui est un dipôle avec électrodes équidistantes. Ce dispositif est sensible à l'aplomb des deux dipôles et les contours de la fonction sont essentiellement verticaux. Il est de ce fait sensible aux changements horizontaux de résistivité et donc recommandé pour la détection des anomalies verticales.

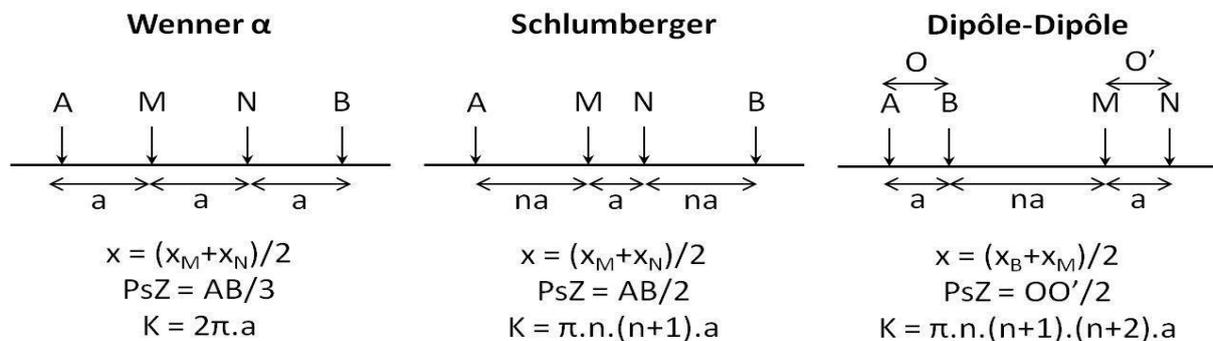


Figure 11 : Dispositifs d'acquisition ERT utilisés et calculs associés, avec x le positionnement de la mesure le long du profil, Psz la pseudo profondeur d'investigation et K le facteur géométrique (Carrière, 2014)

II.2.4. Les facteurs influençant la résistivité des sols et facteurs influençant la mesure de résistivité

La nappe influence la résistivité du sol en plus de la température. La loi d'Archie donne le lien entre la résistivité du terrain, la porosité et la résistivité de l'eau d'imbibition.

L'équation d'Archie est la suivante :

Équation 3

$$\rho_r = \rho_w a \phi^{-m} S^{-n} \text{ ou } \rho_r = F \rho_w S^{-n} \text{ avec } F = a \phi^{-m}$$

Avec

ρ_r : résistivité du terrain

ρ_w : résistivité de l'eau d'imbibition

ϕ : porosité totale qui représente le rapport entre le volume des pores et le volume total (sans dimension) ;

a : facteur dépendant de la lithologie (compris entre 0.6 et 2) ;

m : facteur de cimentation (varie entre 1.3 pour des sables non consolidés et 2.2 pour des calcaires cimentés) ;

S : saturation en eau (sans dimension) ;

n : facteur empirique de saturation (≈ 2)

F : facteur de formation

Les bruits sont un facteur néfaste lors des mesures. Ils sont source de donnée de mauvaises qualité. Pour la résistivité, les principales sources de bruit sont les clôtures métalliques, les pilonnes de haute tension électriques et les éclairs.

II.3. LES METHODES DE DETERMINATION DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFERES

La détermination des propriétés hydrodynamiques se fait par des tests hydrauliques. Les tests hydrauliques ont pour but de caractériser l'ouvrage ou le complexe ouvrage/sol. D'après Fouché (2013), il existe deux familles de tests hydrauliques in situ :

 **Les essais de pompage ou d'injection :**

- Les tests d'injection à débit constant ou à pression constante : ces tests permettent de déterminer une perméabilité ponctuelle au visionnage d'un ouvrage de captage ;

- Les pompages par paliers enchaînés ou par paliers avec remontée intermédiaire (essai de puits) : caractéristiques du complexe aquifère/puits afin de procéder à l'équipement de l'ouvrage. On procède à un pompage par paliers qui permet de tracer la courbe caractéristique $s = f(Q)$ du puits. On en déduit les conditions d'exploitation de l'ouvrage, en particulier le débit d'exploitation et le rabattement maximum admissible. Cependant les essais de palier ont été utilisés au Burkina lors des travaux de Dakouré (2003), Sauret (2013) et Yofe (2016) pour la détermination des paramètres hydrodynamiques. Notons que ce type d'essai ne permet pas d'obtenir une valeur représentative de la transmissivité de l'aquifère capté. En effet, les durées de pompage trop courtes ne permettent pas de mobiliser un volume d'aquifère suffisant. La transmissivité calculée à partir de ce type d'essai correspond donc à une « transmissivité ponctuelle » (Dakouré, 2003) ;
- Les essais de nappe (essai de pompages de longue durée) ont quatre buts :
 - Mesurer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, la transmissivité et l'emmagasinement;
 - Étudier les caractéristiques de l'aquifère : ses conditions aux limites, sa structure, son hétérogénéité, etc.;
 - Observer en vraie grandeur l'influence de la mise en exploitation (rabattement permanent et rayon d'influence du cône de dépression) et les effets de l'exploitation sur l'aquifère ;
 - Prévoir l'évolution du rabattement en fonction des débits pompés pour une exploitation de longue durée et évaluer l'influence sur la ressource et sur d'autres pompages à proximité.



Les tests par choc hydraulique, connus surtout sous leur nom en anglais :

- Le slug-test : il est opéré une variation brusque du niveau d'eau dans un micro-piézomètre puis une observation vers le retour à la stabilisation ;
- Le pulse test : injection d'eau sous pression dans un forage sous l'action d'un commutateur qui varie le débit ;
- Le Drill Stem Test (DST): le test se fait directement dans la tige de foration. La pression dans le puits est mesurée pendant et après le pompage.

La seconde famille est mieux adaptée à la mesure de faibles perméabilités et aux tests au cours des opérations de forage car une variation rapide du niveau d'eau dans le tubage à un temps réduit pourrait être réalisée.

II.3.1. Slug test ou choc hydraulique

Les slug tests consistent à mesurer les variations d'eau dans le micro-piézomètre après l'injection ou le retrait instantané d'un certain volume d'eau dans le but de déterminer la perméabilité ou la transmissivité (Butler, 1998 ; Faignant, 2000 ; Sauret, 2013). Ils ont été utilisés dans les travaux de Sauret (2013) pour dégager les paramètres hydrodynamiques.

La première méthode d'interprétation a été développée par Hvorslev (1951) et s'applique pour différents types de puits et de piézomètres. Elle permet d'obtenir la perméabilité de l'aquifère. Cooper et al (1967, 1973) ont développé des abaques de référence pour des slug tests dans des piézomètres complets. Bouwer et Rice (1976) ont complété et généralisé la méthode de Hvorslev. Ils ont proposé une méthode d'interprétation basée sur l'équation de Thiem (1976) (Sauret, 2013). L'accent sera mis sur la méthode Bouwer et Rice (1976) car elle sera utilisée dans le cadre de cette étude. Suite à un retrait instantané d'eau dans l'ouvrage, le débit d'écoulement Q vers l'ouvrage peut s'écrire comme suit :

Équation 4

$$Q = 2\pi kd \frac{h}{\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)} \text{ et } Q = -\pi r_c^2 \frac{dh}{dt}$$

La résolution du système d'équation nous donne k qui est :

Équation 5

$$k = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2d} \frac{1}{t} \ln \frac{h_0}{h_t}$$

Avec

k : la perméabilité (m/s),

d : la longueur de la crépine (m),

h_t : la charge dans le piézomètre (m) à un temps t ,

h_0 : est le niveau d'eau initial (m),

r_c : le rayon intérieur modifié du piézomètre (du tubage),

r_w : le rayon de l'ensemble crépine + massif filtrant (m),

R_e : le rayon d'influence du pompage,

Le paramètre $\ln(R_e/r_w)$ est l'inconnue et est déterminé par les équations suivantes en fonction de la nature de l'ouvrage :

- Si le piézomètre pénètre partiellement l'aquifère, il est incomplet:

Équation 6

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[\frac{1.1}{\ln\frac{b}{r_w}} + \frac{A + B \ln\left(\frac{D-b}{r_w}\right)}{\frac{d}{r_w}} \right]^{-1}$$

- Si le piézomètre pénètre entièrement l'aquifère, il est complet,

Équation 7

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[\frac{1.1}{\ln\frac{b}{r_w}} + \frac{c}{\frac{d}{r_w}} \right]^{-1}$$

Les coefficients A ; B ; C sont des coefficients empiriques adimensionnels. Van Rooy (1988) a proposé des valeurs à ces coefficients qui sont fonction du ratio de forme géométrique b / r_w . Dans la pratique, l'interprétation consiste à tracer sur un diagramme logarithmique la variation de hauteur d'eau enregistrée durant l'essai en fonction du temps. En déterminant alors la pente de cette courbe et en estimant les coefficients A et B d'après le facteur de forme géométrique b/ r_w (Sauret, 2013).

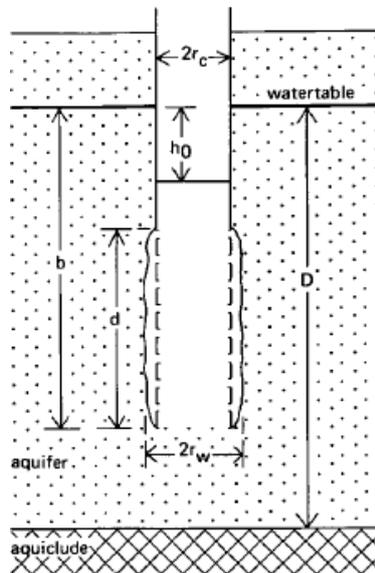


Figure 12 : Schéma d'un puits recoupant partiellement une nappe libre (Kruseman et De Ridder, 1994 ; in Sauret, 2013)

II.3.2. Les essais de puits

A l'achèvement d'un puits, qui représente un investissement important, il est indispensable d'apprécier un ordre de grandeur de sa capacité de production, notamment en fin de saison sèche, pour préciser le nombre d'usagers qu'il est capable de desservir. Cette productivité est fonction de la transmissivité et de la porosité du milieu. La capacité de production, en m³/jour, calculée à partir des essais de pompage, doit être une valeur objective. Autrement dit les essais doivent être comparables entre eux, ce qui impose une normalisation des modalités d'exécution, et des méthodes d'interprétation (CIEH, 1982). C'est dans cet état d'esprit que l'essai de débits simplifiés sur puits a été proposé. La méthode d'essai normalisé est applicable à tous les puits, qu'ils soient au repos, en puisage, ou en cours de fonçage et permet pour des puits de faible débit (en terrain cristallin notamment) d'évaluer la capacité journalière de production du puits à la fin de la saison sèche (CIEH, 1982). L'essai normalisé comprend les trois phases successives suivantes :

- Mesures de la récupération du niveau d'eau,
- Pompage à débit contrôlé,
- Mesures de la remontée après pompage.

II.4. LES FACTEURS INFLUENÇANT LES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES (LES CONDITIONS AUX LIMITES)

Dans l'analyse des écoulements permettant de déterminer les paramètres hydrodynamiques des aquifères, il faudra tenir compte des conditions aux limites. En effet, il faut préciser quelles sont les conditions hydrodynamiques qui règnent aux frontières de ces domaines de l'espace. Fouché (2013) a dénombré 05 types de conditions aux limites qui sont :

- **Limite à potentiel imposé :** C'est le cas en général d'un contact entre la nappe et un plan d'eau libre ou un cours d'eau. Sur la figure ci-dessous, Le long de la surface de contact A, le potentiel (la charge hydraulique) est constant et imposé par la cote de l'eau dans la rivière. Le cours d'eau peut alimenter ou drainer la nappe ; le schéma illustre le second cas.

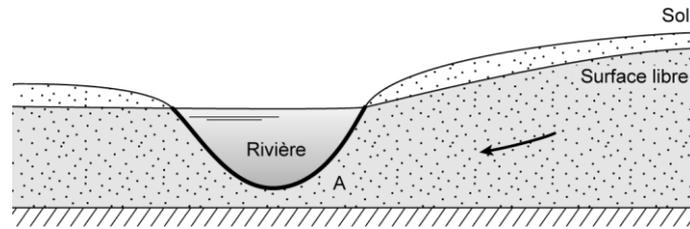


Figure 13: Limite à potentiel imposé (rivière-nappe) (Fouché, 2013).

Un exutoire de nappe (ligne de sources) peut également être considéré comme une limite à potentiel imposé, matérialisée par la cote d'eau dans la source ou l'ouvrage de captage, tant que la nappe s'écoule vers l'extérieur.

- **Limite à flux imposé :**

- **Les limites à flux nul :** ce phénomène s'observe au niveau des limites imperméables ;

- **Les limites à flux non nul :** un prélèvement à débit imposé

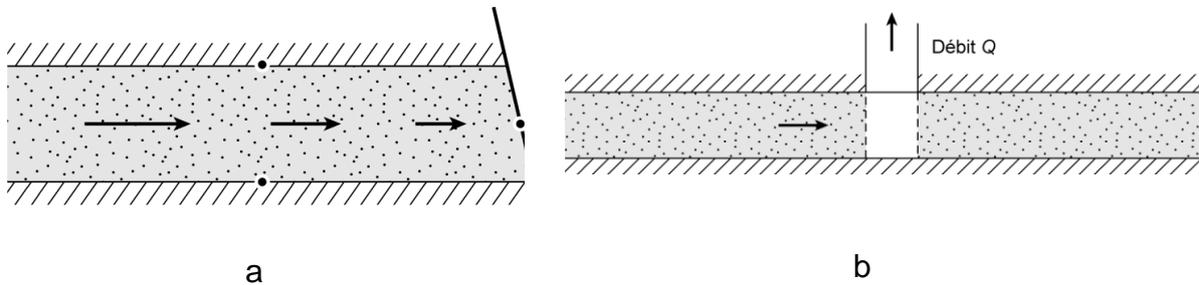


Figure 14 : Limite à flux imposé (a: flux nul; b: flux non nul) (Fouché, 2013)

- **Condition de Fourier :** Considérons une rivière alimentant (ou drainant) une nappe libre, mais dont le fond devient colmaté par une couche de vase peu perméable. Ici, la continuité hydraulique n'est plus assurée : la nappe et le plan d'eau sont deux surfaces libres qui ne se rejoignent plus. La différence de charge provoque l'écoulement d'un flux q à travers l'interface ;

- **Condition de surface libre :** cela combine la limite à surface imposée et la limite à flux imposé nul ;

- **Condition de surface suintement :** Quand l'eau d'une nappe sourd vers l'extérieur, le long d'une ligne continue d'émergence, la surface commune à la topographie et à la nappe est appelée surface de suintement. La surface de suintement combine la limite à surface imposée et la limite à flux imposé non nul.

III. MATERIELS ET METHODES

Pour l'atteinte des objectifs spécifiques de l'étude, la méthodologie suivante a été adoptée :

- Caractérisation de la géométrie et la structure de l'aquifère superficiel :

Pour la caractérisation de la géométrie et la structure de l'aquifères superficiel, il a été effectué des investigations géophysiques notamment la tomographie. En appui, aux investigations géophysiques, les logs de forage, puits et piézomètres nous permettront d'apprécier au mieux la géologie de la zone d'étude ;

- Détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère superficiel :

Des slug-tests et des essais de puits ont été réalisés respectivement sur des piézomètres et des puits existants sur le bassin versant. Par l'interprétation des données recueillies lors de la phase de terrain ; les paramètres hydrodynamiques (perméabilité et transmissivité), du débit spécifique et de la productivité au niveau de l'altération ont été déterminés.

III.1. MATERIELS ET DONNEES EXPLOITEES

- Pour les travaux de bureau, des logiciels ont été utilisés pour la préparation des mesures géophysiques, des essais de puits, dans les transferts de données, le prétraitement, le traitement et l'interprétation des résultats. Les logiciels utilisés sont :

- Les logiciel SIG (Google Earth Pro 7.3.3, Global Mapper 19.0, ArGis 10.5) : pour le traitement des données géographiques, la détermination de l'emplacement des profils de résistivité et l'édition des cartes ;
- Prosys II 4.02 : création et importation des séquences de mesures dans le résistivimètre, exportation et filtrage des données géophysiques mesurées (format .bin) du résistivimètre et exportation des données filtrés au format de Res2dinv (format .dat). ;
- X2ipi 5.20 : utilisé pour la suppression des valeurs aberrantes ;
- DC2DInvRes 2.12 : pour l'inversion de données ;
- Surfur 9.2 : génération des fichiers grid (format. grd), édition des fichiers blank (format .blc) pour l'établissement des coupes de résistivité et l'édition de la carte piézométrique
- Grapher17.1.408 : établissement des coupes de résistivités électriques selon une classification ;

- Gesfor ; Forage : établissement des logs de forage ;
- AQTESOLV Pro ; interprétation des données de pompage.

- **Matériel de terrain**

Le matériel de terrain utilisé pour l'acquisition des données est détaillé ci-dessous :

- Un bailer : sert à faire le pompage pour le slug test ;



Figure 15 : Bailer

- Une sonde piézométrique : mesure les niveaux d'eau ;



Figure 16: Sonde piézométrique

- Un chronomètre : permet de suivre les intervalles de mesure ;
- Le Syscal R1 plus 72 Switch + équipement annexe : permet de réaliser les investigations géophysiques ;



Figure 17 : Syscal R1 plus 72 Switch

- Une boussole : guide à prendre la direction des profils sur le terrain ;
- Un GPS Garmin e Trex 10 : utilisé pour prendre les coordonnées géographiques et côtes des électrodes ;
- Une pompe immergée Grundfos SQ5-70 + équipement annexe : sert à faire le pompage pour les essais de puits ;



Figure 18 : Pompe immergée Grundfos

- Un groupe électrogène : alimente la pompe en énergie électrique ;
- Une vanne de régulation de débit : régule le débit de refoulement de la pompe

- **Données utilisées**

Les données exploitées sont diversifiées et de sources différentes. Elles peuvent être classées en trois catégories qui sont :

- Les données récupérées auprès de particuliers ; il s'agit de la coupe technique d'un forage privé. Elle a été fournie par l'entreprise de foration SAÏRA International ;
- Les données récupérées au près du MEA : les données SIG (bassin versant, géologie), les données piézomètres (log ; suivi) et PMH,
- Les données acquises sur le terrain : sont les données issues des mesures géophysiques, des essais de puits et des slug tests.

III.2. METHODES

III.2.1. Tomographie de résistivité électrique

Pour la caractérisation géométrique et structurale ; la tomographie électrique de résistivité a été optée car elle permet d'obtenir une imagerie en 2D du sous-sol. L'usage de la tomographie couplé à l'exploitation des logs de forage lorsque disponibles, serviront à la calibration des modèles lors de l'inversion de données.

III.2.1.1) Mise en œuvre des investigations géophysiques

Les investigations ont été effectuées avec le résistivimètre de type Syscal R1 72 Swith de Iris Instruments. En mode multi-électrodes, l'appareil utilise 72 électrodes au maximum avec un espacement maximal de 5m. Les électrodes en acier inoxydable implantées dans le sol sont reliées à l'appareil par le biais de quatre (04) flûtes.

- **Choix de la position et de l'orientation des profils**

Onze (11) profils ont été réalisés et repartis sur l'ensemble du bassin versant et couvrant l'ensemble des structures géologiques qui le composent. Ces structures sont l'alluvion, la diorite quartzifère, la dolérite, le granite, le granite porphyroïde, la leptynite, le leucogranite, la pegmatite et le schiste. Le choix des profils (hors mis ceux au niveau du seuil) s'est basé principalement sur la géologie du terrain de manière à couvrir l'ensemble des unités géologiques. Cela a pour objectif de dégager pour chaque unité géologique, la géométrie (leurs épaisseurs) et la structure (les couches du profil d'altération).

Autant que possible, les profils passent par des ouvrages de captage d'eau souterraine dont nous

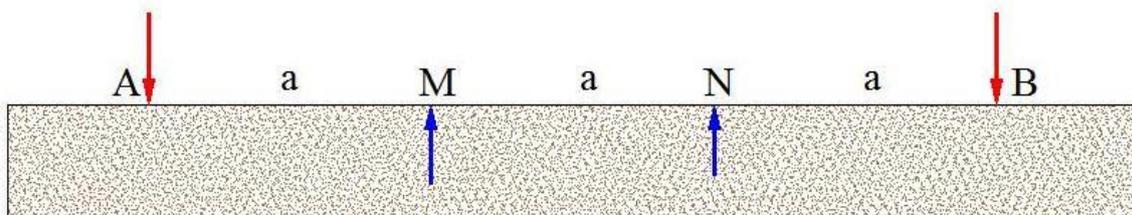
connaissions la lithologie. L'accessibilité du terrain est un autre facteur de décision. L'orientation des profils a été guidée par les critères suivant :

- la direction de la faille (45°N) : le choix a été fait de telle sorte que la direction des profils soit perpendiculaire à celle de la faille (Figure 5) ;
- l'occupation des terres (habitat, périmètre irrigué) : nous avons travaillé à éviter que les profils traversent les habitations où les périmètres irrigués.

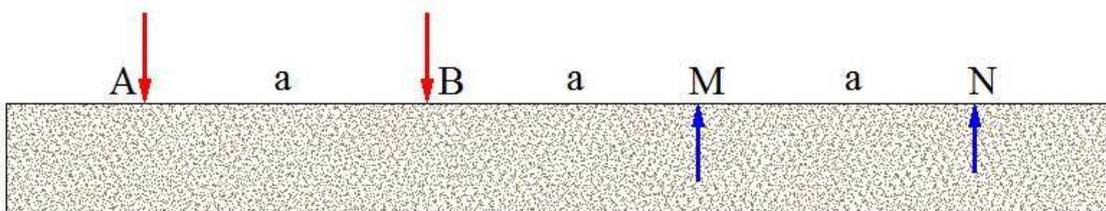
Au niveau du profil situé à cheval sur les unités granitoïdes et métamorphiques, un roll-along $\frac{1}{2}$ a été effectué. Par ailleurs, au niveau du seuil d'épandage 1, nous avons réalisé un maillage de quatre (04) panneaux décrivant un rectangle autour du seuil, pour définir en cet endroit ; l'influence de la présence de cet ouvrage hydraulique sur les propriétés des formations sous-jacentes. Le choix et l'orientation des profils ont donc été établis en considérant l'orientation des seuils et la présence des piézomètres.

• **Choix des dispositifs d'investigation**

Les dispositifs d'investigation utilisés ont été le Wenner Alpha et Wenner Beta car ils ont fait leurs preuves dans des travaux antérieurs portant sur les aquifères de socle et menés par Outoumbé (2014) et Soro (2017). Ils permettent d'appréhender respectivement la structuration horizontale et verticale. La figure suivante nous présente les dispositifs Alpha et Beta.



Wenner Alpha



Wenner Béta

Figure 19: Dispositifs Wenner α et Wenner β (source Outoumbé, 2014)

Une carte représentant l'emplacement des différents profils électriques, la faille et les groupes géologiques du bassin versant de Wedbila et un tableau décrivant les profils se trouvent ci-dessous :

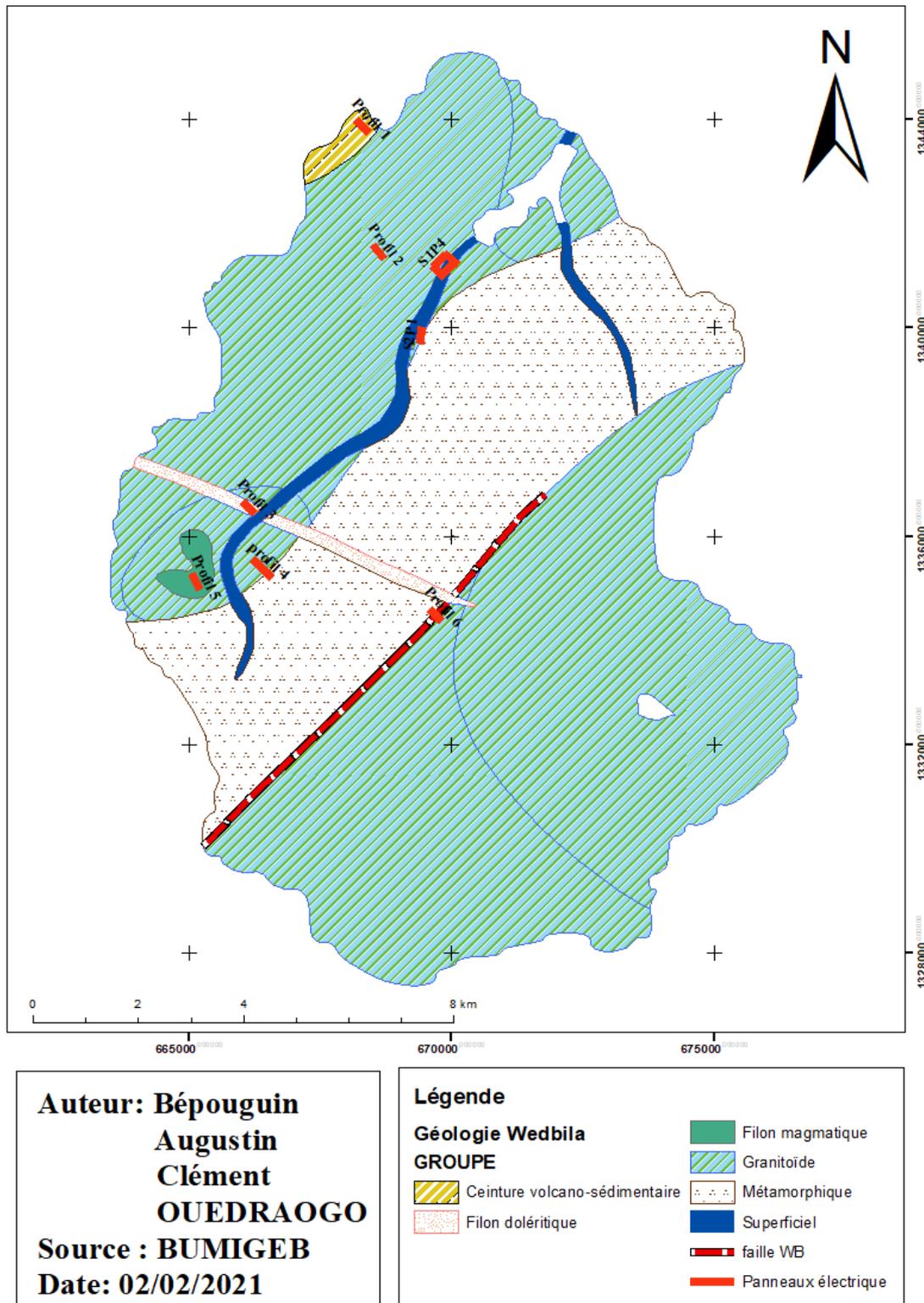


Figure 20: Carte de localisation des profils électriques

Tableau VIII: Configuration des profils de géophysique

Profils	Roll along	Nombre de Panneaux	Longueur totale (m)	Coordonnées de l'électrode de début	Coordonnées de l'électrode de fin	Sens	Ouvrage et Structure géologique traversée		Observation
							Structure géologique	Ouvrage hydraulique	
Profil 1	Non	1	355	668406 ; 343744	668171 ; 1344008	135° N	Ceinture volano-sédimentaire (Schiste) : 355m		Absence d'ouvrage de captage
profil 2	Non	1	355	668705 ; 341323	668492 ; 1341606	140° N	Granitoïde (Granite porphyroïde) : 355m	forage privé (F1)	
Profil 3	Non	1	355	666238 ; 1336416	666005 ; 1336683	135° N	Filon doléritique (dolerite) : 355m	PZ 41	Pas de log de forage disponible
Profil 4	Oui	2	535	666572,1335194	666182 ; 1335558	310° N	Métamorphique (Leptynite): 150m Granitoïde (Leucogranite): 385 m	BA 27	Présence de logement
profil 5	Non	1	355	665185 ; 1334974	665038 ; 1335298	155° N	Filon Magmatique (Pegmatite) : 355m	PZ 44	Pas de log de forage disponible; présence de logement
profil 6	Non	1	355	669809 ; 1334351	669693 ; 1334483	315° N	Granitoïde (Diorite quartzifère) : 172m Métomorphique (Leptynite) : 183m		coupe la fracture
S2P1	Non	1	355	669420,1340044	669383,1339691	183° N	Superficiel (alluvions) : 116m Granitoïde (granite porphyroïde) : 148m Metamorphique (Leptynite) : 91m	Pz6	
Profils seuil 1		4	1420						
Seuil 1 Profil 1	Non	1	355	669872,1340970	669611,1341209	134° N	Superficiel (alluvions) : 179m Granitoïde (granite porphyroïde) : 176m		
Seuil 1 Profil 2	Non	1	355	670047,1341272	669792,1341033	226° N	Superficiel (alluvions) : 355 m		
Seuil 1 Profil 3	Non	1	355	670108,1341210	669848,1341450	132° N	Granitoïde (granite porphyroïde) : 90m Superficide (alluvions) : 140 m Granitoïde (granite porphyroïde): 125m		
Seuil 1 Profil 4	Non	1	355	669892,1341423	669888,1341420	226° N	Granitoïde (granite porphyroïde) : 355 m		

III.2.1.2) Méthode d'interprétation

Les valeurs obtenues sur le terrain sont des résistivités apparentes. En effet la mesure représente une valeur qui intègre les résistivités d'un certain volume du sous-sol. A partir de ces valeurs des résistivités apparentes, les épaisseurs et résistivités vraies des différents structures en présence ont été déterminées. L'inversion des données de résistivité apparente a permis la reconstruction de la distribution interprétée aussi proche que possible de la distribution « réelle » de la résistivité dans le sous-sol. Avant la phase de traitement (inversion des données), les valeurs obtenues ont nécessité un prétraitement.

(1) Le prétraitement des données

La phase de prétraitement a consisté à éliminer les erreurs et à préparer les données pour l'inversion. Elle se fait en trois étapes qui sont :

- **Filtrage de données** : après importation des données du Syscal, elles subissent un filtrage sur Prosys II. Le filtrage a consisté à fixer des valeurs min et max de résistivité et l'écart type maximum à retenir (5%) pour les valeurs à retenir. Les données retenues seront exportées sous format Res2dinv (*.dat).
- **Suppression des valeurs aberrantes** : sur la base des données filtrées sur Prosys II ; les valeurs aberrantes sont supprimées à l'aide du logiciel X2ipi. Ces valeurs aberrantes correspondent à des hétérogénéités isolées et des résistivités apparentes très faibles en profondeur. Le logiciel X2ipi se chargera de faire des interpolations au voisinage pour remplacer les valeurs manquantes. Dans l'exemple ci-dessous (Figure 21), qui représente le profil 3, le constat est que l'électrode 55 était défectueuse.

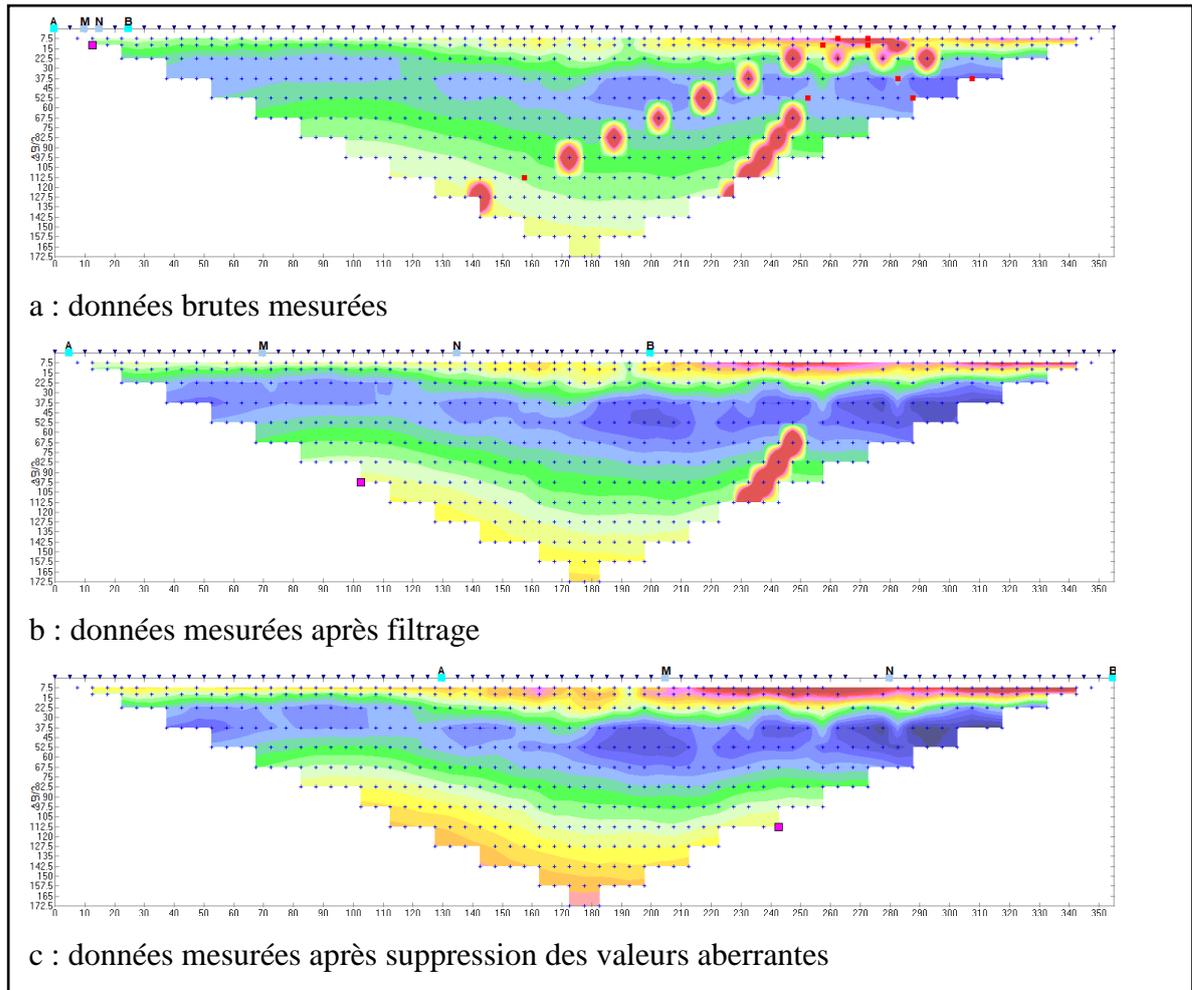


Figure 21: Phase de filtrage et de suppression des valeurs aberrantes (établis sur la base des données du Profil 3)

- **Insertion de la topographie et concaténation des tomographies** : nous avons ajouté des altitudes au niveau de chaque électrode. Les panneaux avec roll along sont fusionnés.

(2) Le traitement des données

Procédure d'Inversion

Les pseudo-sections de résistivités apparentes ne peuvent être interprétées qu'après inversion de celles-ci. Le principe de l'inversion a consisté à trouver des modèles de sol (résistivités interprétées) permettant d'expliquer les résistivités

apparentes mesurées (pseudo-section). L'inversion de données est une tâche complexe, de ce fait ce sont des méthodes de résolution numérique itérative qui sont couramment utilisées (Soro, 2017).

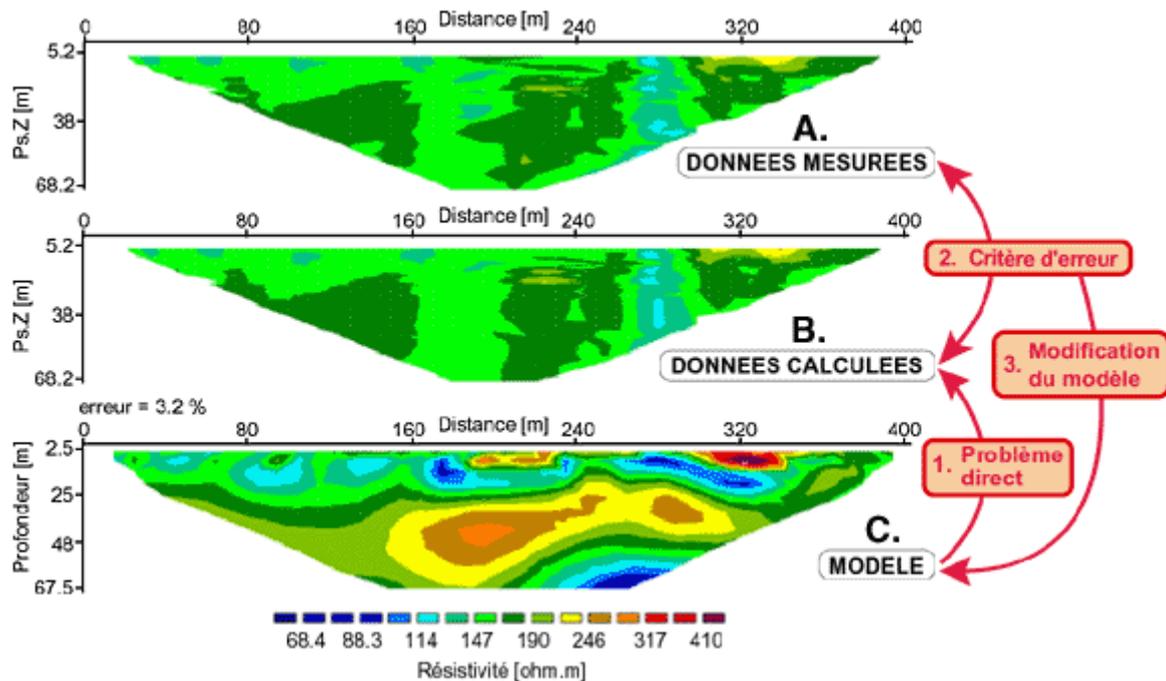


Figure 22: Inversion par méthode itérative en tomographie 2D (Hacini, 2006; Soro, 2017)

Les étapes de l'inversion se définissent comme suit :

- **Etape 0** : un modèle initial (C) est d'abord proposé sur la base des valeurs des résistivités apparentes mesurées (A) ;
- **Etape 1 : le problème direct** : le logiciel procède au calcul des résistivités apparentes à partir du modèle (C) à l'aide de la méthode des éléments finis ou de la méthode des différences finies. On obtient alors le profil calcul (B) ;
- **Etape 2** : l'algorithme juge de la conformité entre les données mesurées (A) et les données calculées (B) afin d'en **déterminer le critère d'erreur** ;
- **Etape 3** : le modèle (C) est ensuite **modifié** dans l'objet de réduire la différence entre (A) et (B).

Les étapes 1 ; 2 et 3 sont répétées de manière itérative jusqu'à ce que les conditions d'arrêt soient satisfaites (nombre d'itération, critère d'erreur). Toutefois, il est important de signaler que plusieurs solutions existent pour une série de données mesurées. Cette indétermination peut

être due à des problèmes d'équivalence et de suppression (Soro, 2017). Une connaissance de la géométrie du site à travers les logs de forage nous a aidés à faire un bon choix de solution. Cela nous a permis de contraindre l'inversion à travers les paramètres l'inversion. Des logiciels dans lesquels sont implémentés mathématiquement ce processus d'inversion sont utilisés pour faire ces calculs de façon automatique. Les logiciels les plus utilisés sont Res2DInv et DC2DInvRes (Rémi, 2010 ; Outoumbé, 2014). Chaque logiciel présente des avantages et des inconvénients qui ont été répertoriés par Clément (2010) puis remis à jour par Clément et Audebert (2013) (Annexe I). Le logiciel commercial Res2DInv est probablement le plus utilisé en bureau d'études et il est cité dans de nombreux articles scientifiques. Il permet de réaliser facilement et rapidement des modèles de résistivités interprétées. Le logiciel DC2DInvRes (ou DC2DInv) offre une grande souplesse pour une utilisation experte et l'interface graphique convivial permet une prise en main rapide de l'outil (Carrière, 2014). Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé DC2DInvRES car il donne une grande maniabilité des paramètres d'inversion et de son accessibilité.

Les paramètres d'inversion

- Z-weight : Permet d'ajouter une contrainte de déformation dans l'inversion. Il varie de 0 à 2 et par défaut, le coefficient est égal à 1 ce qui signifie qu'il y a autant de contraintes verticales qu'horizontales. S'il est connu dans le modèle que les anomalies de résistivités sont allongées verticalement, il est possible de forcer le programme à produire un modèle où il y a une élongation verticale. Les valeurs inférieures à 1 introduisent des contraintes de distorsions horizontales et celles supérieures, des distorsions verticales (Soro, 2017; Wubda, 2017). Nous avons utilisé des valeurs de z-weight allant de 1 à 1,5 en fonction du panneau inversé.
- Lambda (λ) : Le paramètre lambda est le facteur d'amortissement dans l'inversion. Il varie de 0 à 100 et a une valeur de 30 par défaut. Ce paramètre permet de définir l'intensité de la contrainte smooth dans l'inversion :
 - λ important (60-100) : l'inversion va proposer un modèle où les variations de résistivités interprétées seront lissées et amorties ;
 - λ faible (0-10) : les variations de la résistivité interprétées seront plus prononcées et peu amorties (Soro, 2017)

- Blocky model : Cette option permet de produire 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. Cette méthode est efficace dans des situations géologiques où la variation de résistivité est marquée, par exemple à l'interface entre le sol et le socle (Soro, 2017).

Les conditions d'arrêt

Les conditions d'arrêt des itérations dans le logiciel DC2DInvRes sont régis par le RMS (Root Mean Squared) et le χ^2 . Le RMS mesure la différence entre les résistivités électriques apparentes calculées ($x_{\text{modèle}}$) et les résistivités électriques mesurées ($x_{\text{donnée}}$). Le χ^2 correspond à la différence entre les résistivités calculées et mesurées normalisée 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) (Soro, 2017). Un χ^2 et/ou un RMS de faible valeur traduisent que le modèle calculé traduira au mieux la donnée mesurée mais peut ne pas traduire la réalité du terrain. Ils sont obtenus par les formules suivantes :

Équation 8

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{\text{donnée},i} - X_{\text{modèle},i}}{X_{\text{donnée},i}} \right)^2}{N}}$$

Équation 9

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{X_{\text{donnée},i} - X_{\text{modèle},i}}{\epsilon}}{N}$$

N : le nombre total de mesures

Classification

Pour mieux analyser et interpréter les résultats de l'inversion, les résistivités vraies sont regroupées en classe de résistivité correspondant à des plages de résistivité des différentes couches géologies retrouvées dans la littérature. Cette équivalence, nous permettra de passer des mesures physiques (résistivité) à la description de la géologie. Le tableau suivant nous donne les classes de résistivité en fonction de la géologie.

Tableau IX: Classes de résistivité électrique utilisée (Soro, 2017)

Géologie		Classe de résistivité ($\Omega.m$)
Saprolite	Allotérite	0-30
	Isaltérite	30-228
Couche fissurée ou la cuirasse		228-871
Roche saine ou la cuirasse		>871

III.2.2. Caractérisation hydrodynamique des aquifères :

Dans cette étude, plusieurs méthodes ont été utilisées en fonction de la nature, la localisation, et la profondeur des ouvrages de captage. Nous avons alors

- réalisé des slug tests au niveau de 10 micro piézomètres dans le but de déterminer les propriétés hydrodynamiques de l'altération et confirmer le modèle de terrain des profils géophysiques qui y passent ;
- réalisé 5 essais de puits simplifiés CIEH dans le but de déterminer les paramètres hydrodynamiques, le débit spécifique et la productivité de l'altération.

III.2.2.1) Slug tests

Les slug tests ont consisté à retirer un certain volume d'eau dans les piézomètres pour rabattre la nappe. Cela a été fait avec un bailer puis le suivi de la remontée en fonction du temps (chaque minute) a été opéré avec une sonde piézométrique manuelle.

La méthode de Bouwer et Rice (1976) basée sur l'équation de Thiem (1976) (Sauret, 2013) et de ses dérivés pour des ouvrages captant des aquifères superficiel ou libre ont été employées pour l'interprétation des essais. Dans le cadre de cette étude, les interprétations ont été faites par le logiciel AQTESOLV Pro. Les résultats de 10 slug tests ont été traités.

III.2.2.2) Essais de puits

Des essais de puits normalisés ont été réalisés sur 5 puits répartis sur le bassin versant représenté

sur la Figure 23 et dont les coordonnées figurent dans le Tableau X. Le protocole suivi a été celui de l'essai de débit simplifié sur puits proposé par le CIEH (1982). La réalisation de l'essai (Annexe III) a suivi les phases suivantes :

- **Avant l'essai** : remplissage de la fiche 1 (Annexe III) avec toutes les indications nécessaires pour identifier le puits et l'essai ;
- **Phase 1 : Récupération** : si la récupération en une heure est inférieure à 1 cm, nous notons l'heure (temps 0) et le niveau statique, puis commençons le pompage. Dans le cas contraire, la récupération prend deux heures ;
- **Phase 2 : Pompage** : le débit du pompage est déterminé à l'aide de l'abaque n°1 en fonction de la hauteur d'eau et le diamètre du puits (débits « normalisé »). En lien avec le débit déterminé, deux cas se sont présentés :
 - Lorsque le débit est inférieur à 5 m³/h : nous ajustons le débit à une valeur fixe que nous avons déjà déterminée à l'aide de l'abaque n°1 et faisons le pompage pendant 2 heures.
 - Lorsque le débit est supérieur à 5m³/h : nous pompons au débit maximal (vanne complément ouverte). Nous arrêtons le pompage quand l'eau arrivera à 1 mètre du fond, quelle que soit la durée du pompage (max. 3 heures).
- **Phase 3 : Remontée** : après l'arrêt du pompage, nous suivons la remontée pendant deux heures.

 **Interprétation 1** : elle se fera suivant la méthode CIEH. L'interprétation de l'essai s'est faite conformément à la fiche 2 (Annexe IV) et est composée des phases suivantes :

- **Calcul du niveau statique** : sur la base de la vitesse de récupération (R1) et de remontée (R2) et de leurs niveaux moyens, nous traçons le graphique 2.1 avec les niveaux de l'eau en fonction des vitesses. Le niveau statique probable est point où la droite coupe l'axe des ordonnées.
- **Le coefficient L** est obtenu de la manière suivante avec pour hypothèse, une variation saisonnière linéaire.

Équation 10

$$L = \frac{dH}{H_0} \text{ avec } \begin{cases} H_m = P - Ns \\ H_0 = H_m + dH \frac{D_e}{D_s} \end{cases}$$

Avec

Ds : durée de la saison sèche

De : délai écoulé entre la fin des pluies et l'essai

dH : la fluctuation piézométrique totale pendant la saison sèche

H₀ : la hauteur d'eau probable maximum en début de saison sèche

Hm : la hauteur d'eau lors de l'essai

- **Calcul du débit spécifique Ce** : par la formule

Équation 11

$$Ce = \frac{Q_i}{S_i} \text{ avec } Q_i = Vs * R2$$

Avec

Q_i : Débit instantané en fin d'essai

S_i : Rabattement en fin d'essai

Vs : volume spécifique en fin d'essai

- **Détermination du débit exploitable** : la détermination du débit exploitable se fait à l'aide de l'abaque 3 qui se trouve dans le protocole d'essai.

Interprétation 2 : les données de pompage seront interprétées avec le logiciel AQTESOLV en considérant les solutions qui prennent en compte l'effet de capacité. Pour les nappes libres avec un effet de capacité au niveau de l'ouvrage de captage, le logiciel propose unique la solution de Moench (1997). Cette solution peut être utilisée pour des puits qui pénètrent partialement et complètent l'aquifère. Dans l'hypothèse d'une nappe captive, le logiciel propose les solutions de Papadopulos-Cooper (1967), Dougherty-Babu (1984), et Barker 1988. La solution qui épouse au mieux nos données d'essai puits sera choisie.

Le Tableau X et la Figure 23 donnent l'emplacement des puits, où les essais ont été réalisés.

Tableau X: Coordonnées des essais de puits (UTM)

Ouvrage	X(m)	Y(m)	Structure géologique	Profondeur des puits (m)
KFPZ29(PT 44)/ Pz44	665173	1334992	Filon magmatique	8,5

KFPZ20 (Pt58)/Pz 58	673552	1332675	Granitoïde	15,34
KFPZ17 (Pt64)/PZ51	671527	1330513	Granitoïde	20,5
KFPZ26/Pz62	670661	1337806	Métamorphique	18,2
KFPZ62 (Pt23)/Pz23	669380	1340498	Granitoïde	9,6

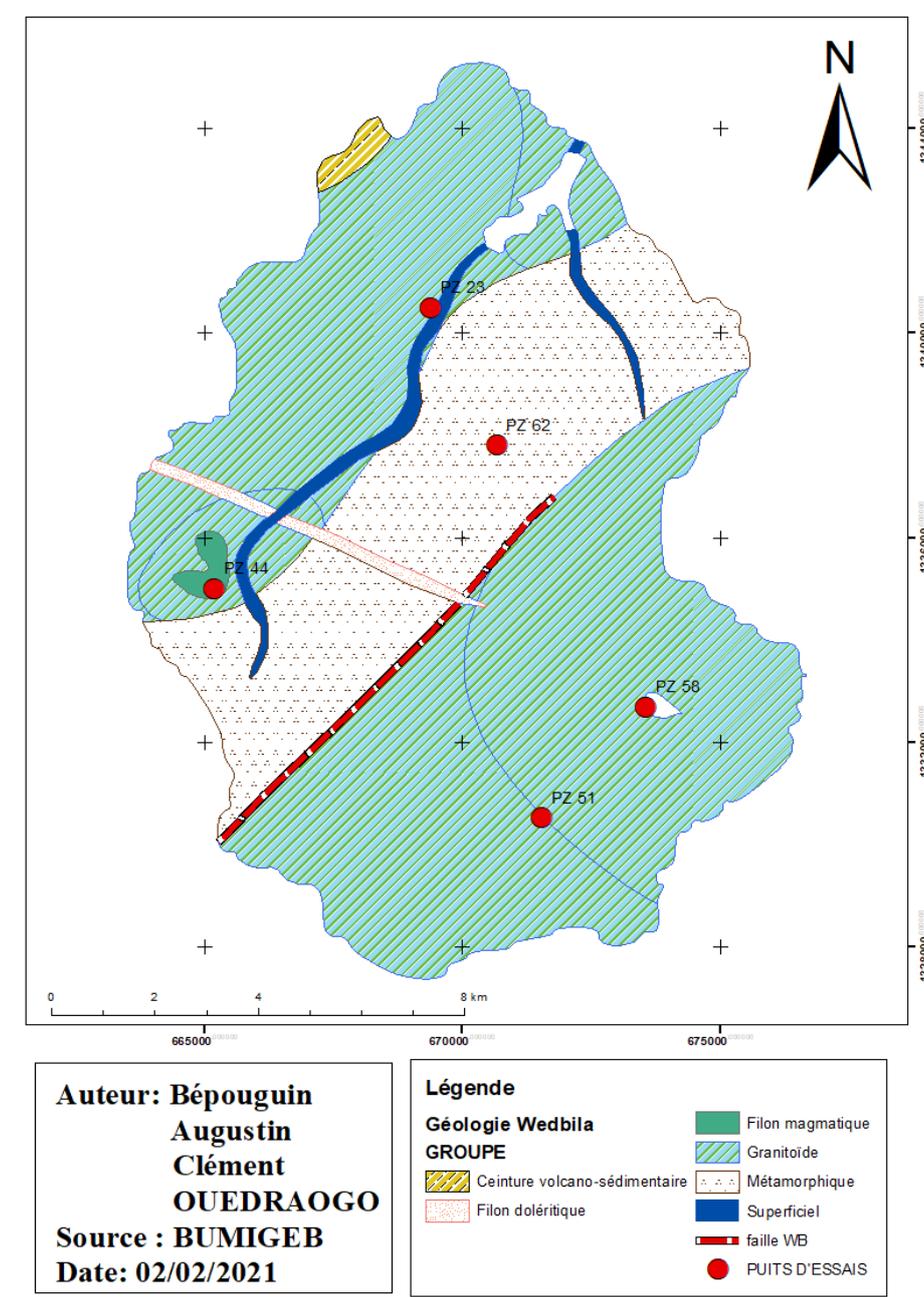


Figure 23: Carte de localisation des Puits d'essais

IV. RESULTATS : INTERPRETATION ET DISCUSSION

Cette partie présentera les résultats obtenus après interprétation des différentes données qui feront l'objet de discussions.

IV.1. RESULTAT ET INTERPRETATION

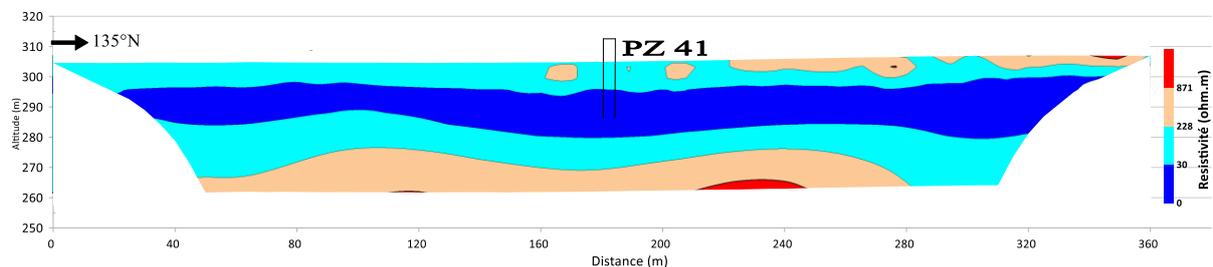
Dans cette partie nous présenteront les résultats issus de la caractérisation géométrique, structurale et hydrodynamique du bassin de Wedbila.

IV.1.1. Structuration et géométrie 2D

IV.1.1.1) Les groupes géologiques

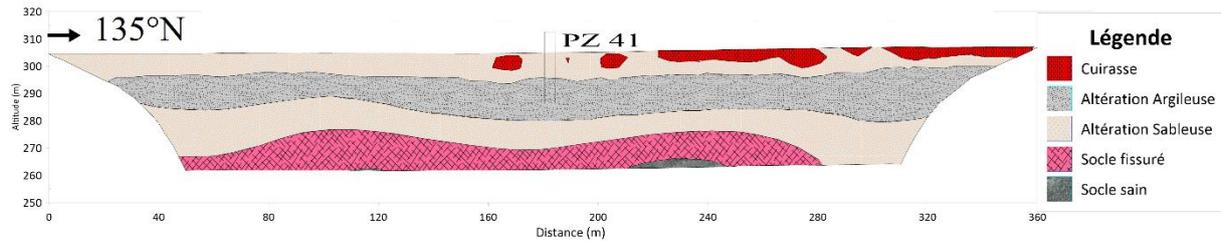
Les résultats des investigations géophysiques sont présentés par famille de roche.

- **Filon doléritique :** au niveau du filon doléritique, la coupe électrique du profil 3 (Figure 24) présente du haut vers le bas, des milieux résistifs (228-871 $\Omega.m$) suivis des milieux conducteurs (0-228 $\Omega.m$) puis des milieux résistifs et très résistifs ($> 871 \Omega.m$). Sur le modèle géologique (Figure 25), il est identifié du haut vers le bas une cuirasse de 0-5m, une épaisseur totale de l'altération d'environ 35m. L'altération est composée de l'altération sableuse (5-10m), de l'altération argileuse (10-15m) et l'altération sableuse (10-15m). Ce modèle traduit la réalité du terrain. Lors de la phase de collette, cette partie était endurcie. Le panneau du Profil 3 concernant le filon doléritique est présenté ci-dessous.



Lambda=30 ; Z-Weight=1 ; $\chi^2 = 3,26$; RMS = 9,44%

Figure 24: Panneau électrique du Profil 3

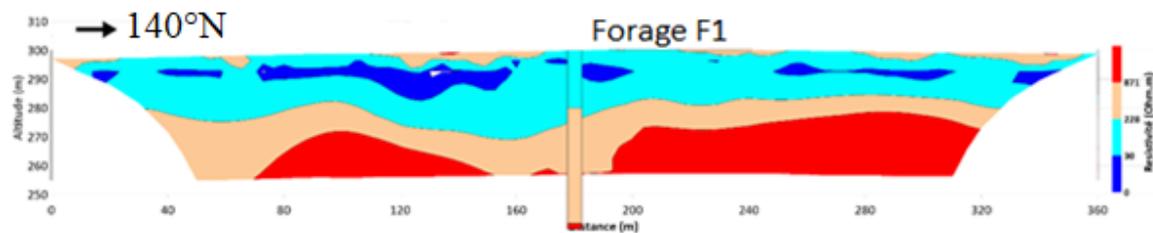


Lambda=30 ; Z-Weight=1 ; $\chi^2 = 3,26$; RMS = 9,44%

Figure 25 : Modèle géologique du Profil 3

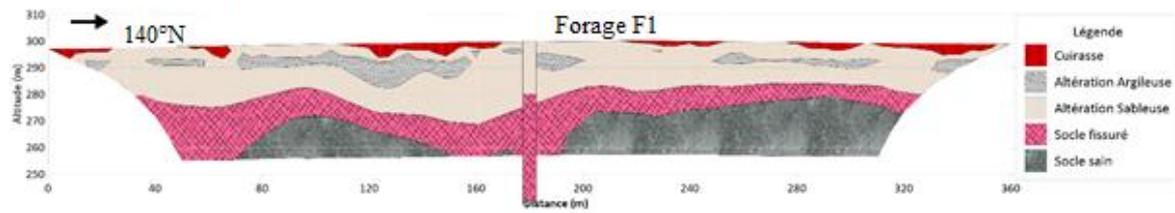
- Granitoïde :** au niveau du granitoïde, la détermination de la structure et de la géométrie s'est faite à l'aide du profil 2 (Figure 26) et du profil S1P4 (Figure 28). L'analyse du panneau électrique détermine une structure résistante discontinue superficielle suivie de milieux conducteurs et enfin de milieux résistants et très résistants. Au passage de la géologie, la structure se compose comme une succession du haut vers le bas, de la cuirasse, d'une épaisseur de 0-10m, de l'altération de 15-30m, du socle fissuré et du socle sain. L'épaisseur de l'altération argileuse est de 0-10m et l'altération sableuse de 20-30m. Le log du forage F1 nous donne l'altération à son niveau à 17 m, ce qui confirme les résultats obtenus. Les panneaux ERT (profil 2 et profil S1P4) qui ont été faits sur le granitoïde sont représentés ci-dessous.

Le profil 2 présente une zone de fracture au centre de dispositif qui explique la présence d'un forage (F1) positif dans la zone. Cela se traduit par un milieu de résistivité plus faible dans un environnement résistant.



Lambda=20 ; Z-Weight=1,5 ; $\chi^2 = 14 ;63$; RMS = 15,78%

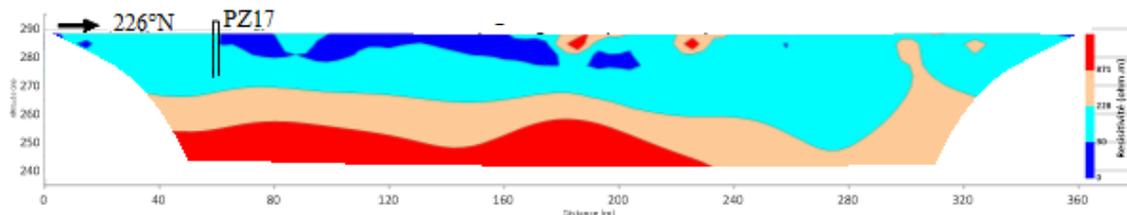
Figure 26: Panneau électrique Profil 2



Lambda=20 ; Z-Weight=1,5 ; $\chi^2 = 14 ; 63$; RMS = 15,78%

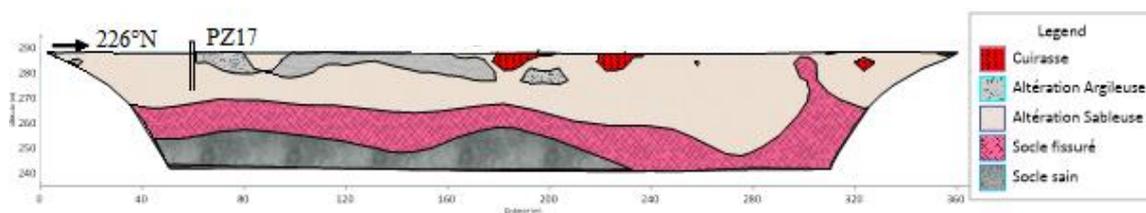
Figure 27 : Modèle géologique Profil 2

Sur le profil S1P4, placé sur la rive gauche au niveau du seuil d'épandage 1 et perpendiculaire au seuil d'épandage 1, nous remarquons des milieux très conducteurs en surface à partir du piézomètre Pz17 qui décèle la présence de l'altération argileuse. En effet, à ce niveau, nous avons la présence de parcelles maraichères comme le montre l'Annexe II a. L'implantation de ces parcelles a probablement été guidée par la nature du sol.



Lambda=40 ; Z-Weight=1,5 ; $\chi^2 = 46,35$; RMS = 22,4%

Figure 28: Panneau électrique Profil S1P4



Lambda=40 ; Z-Weight=1,5 ; $\chi^2 = 46,35$; RMS = 22,4%

Figure 29 : Modèle géologique Profil S1P4

- Superficiel :** au niveau des unités géologiques superficielles, l'inversion a été faite avec le panneau Wenner Alpha du profil S1P2 (Figure 30) du fait de la qualité douteuse des données du Wenner Béta. En surface, il est identifié à la fois des couches résistives et conductrices. Ces couches sont suivies de deux couches de résistivité croissante. La couche très résistive semble présenter une remontée dans la partie centrale du panneau et est surmontée de la couche moins résistive. En termes de géologie, la partie résistive correspond au socle fissuré qui s'étend verticalement en profondeur de part et d'autre du socle augurant une importance des arrivées d'eau. La partie altérée a une épaisseur de 20-30 m avec une épaisseur de l'altération argileuse de 0-4 m et celui de l'altération sableuse de 11-30m. Nous distinguons la cuirasse en surface d'épaisseur de 0-2m. La zone de faible résistivité comme le montre Annexe II b, est une zone de maraichage. Le choix de cette zone pour y mener de telles activités est sûrement dû à la nature du sol.

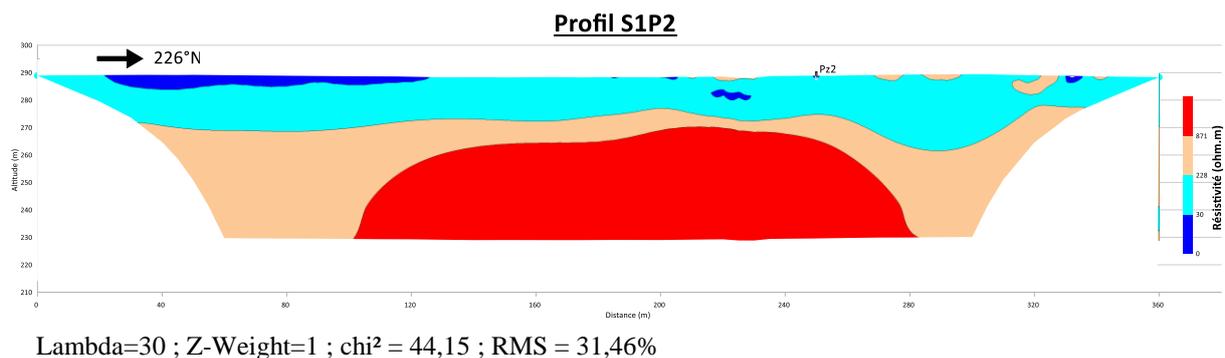


Figure 30: Panneau électrique Profil S1P2

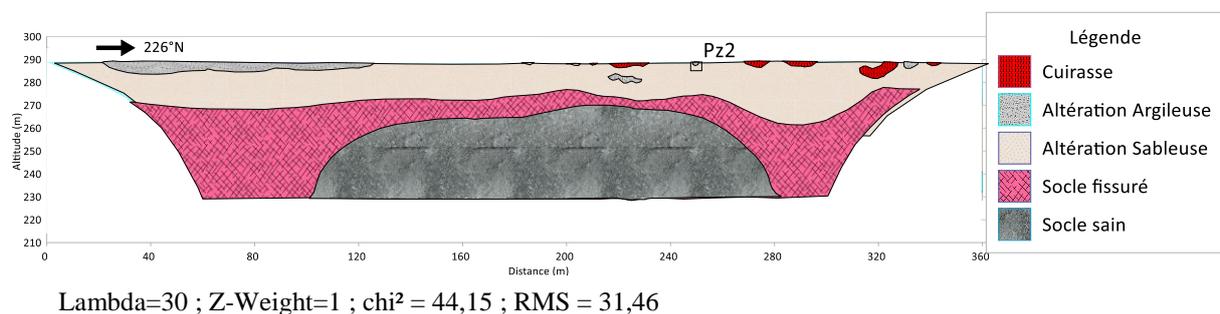
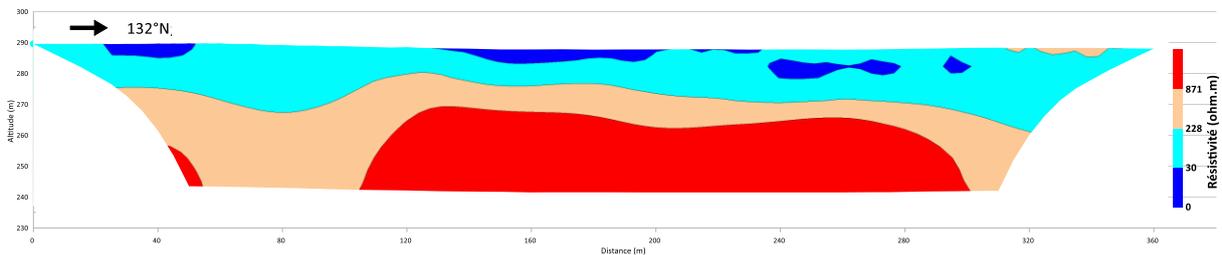


Figure 31 : Modèle géologique Profil S1P2

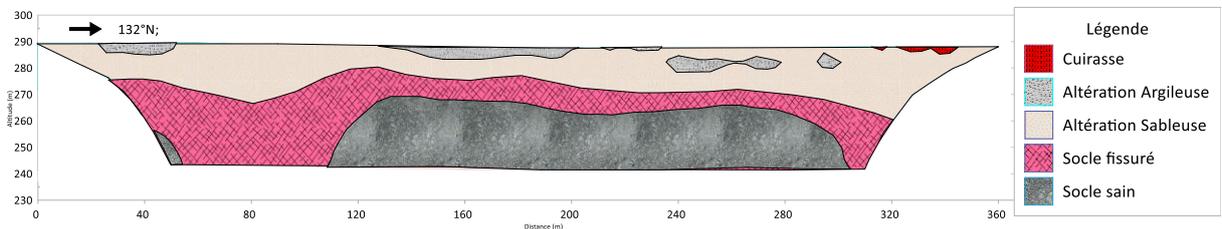
- Granitoïde-Superficiel :** à la frontière des deux familles de roches (granitoïde et superficiel) et à l'aval des seuils, les profils S1P3 (Figure 32) et S2P1 (Figure 34) présentent

une partie majoritairement conductrice en surface qui surmonte des milieux résistifs. Les profils géologiques (Figure 33 et Figure 35) renseignent du haut vers le bas que la cuirasse a une épaisseur de 0-2 m, suivie de l'altération avec une épaisseur entre 15-35m. L'altération est constituée de l'altération argileuse, d'épaisseur variant entre 0-5m et de l'altération sableuse de 10-35m. Sur le profil S1P3, il est détecté une probable fracture à gauche car il y'a un milieu conducteur entre deux blocs résistants. Il a été constaté que le piézomètre Pz6 sur le profil S2P1 capte la zone conductrice. Cela est confirmé par le log du piézomètre qui montre que le piézomètre Pz6 (9m de profondeur) capte uniquement l'altération.



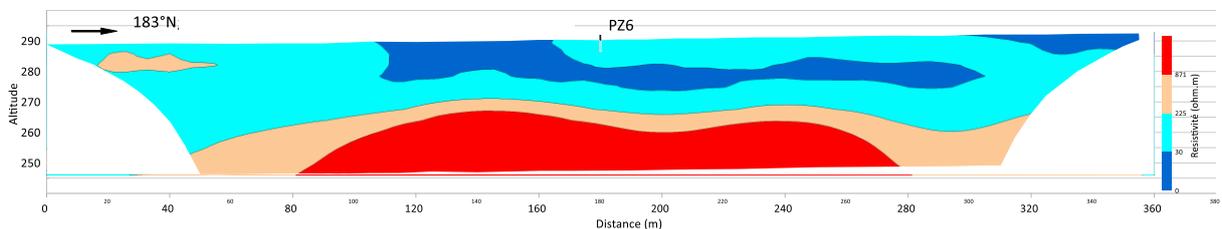
$\Lambda=30$; Z-Weight=1 ; $\chi^2 = 13,66$; RMS = 12,38%

Figure 32: Panneau électrique Profil S1P3



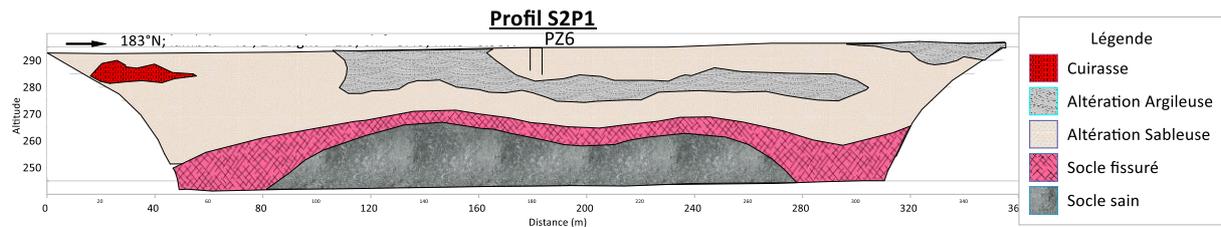
$\Lambda=30$; Z-Weight=1 ; $\chi^2 = 13,66$; RMS = 12,38%

Figure 33 : Modèle géologique Profil S1P3



$\Lambda=40$; Z-Weight=1,5 ; $\chi^2 = 3,49$; RMS = 0,95%

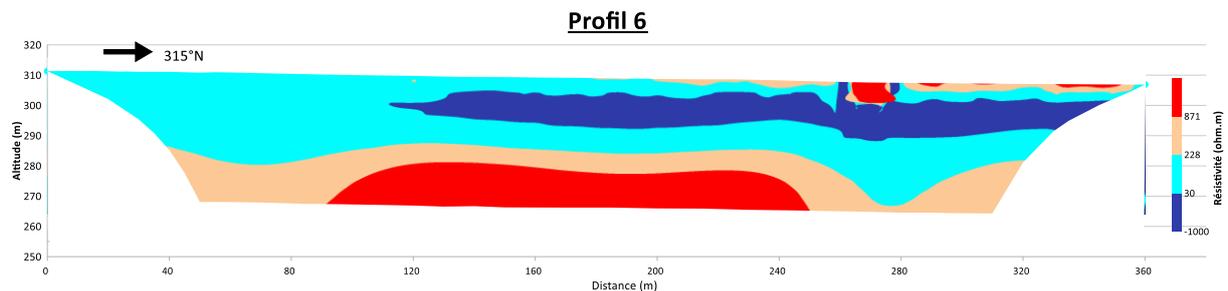
Figure 34: Panneau électrique Profil S2P1



Lambda=40 ; Z-Weight=1,5 ; $\chi^2 = 3,49$; RMS = 0,95%

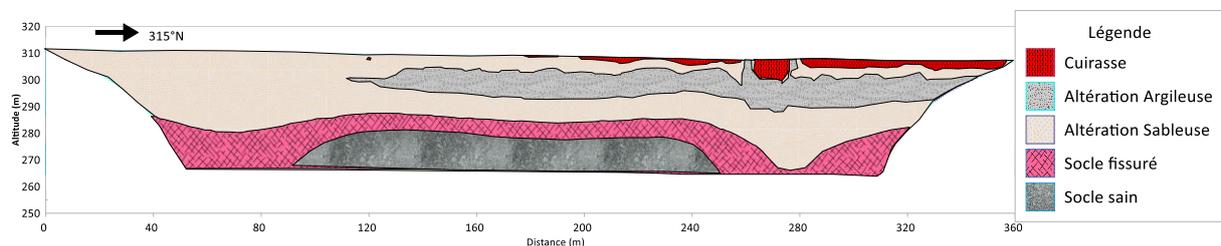
Figure 35 : Modèle géologique Profil S2P1

- Granitoïde-Métamorphique :** le profil 6 qui recoupe la faille du bassin de Wedbila, le granitoïde et le métamorphique (Figure 20) présente un milieu résistif discontinu surmontant un milieu conducteur. Tout cela se repose sur un bloc résistif et très résistif. Le passage à la géologie (Figure 36) présente une zone cuirassée (0-10 m) en surface qui surmonte une couche d'altération de 25 m à 35 m d'épaisseur comme le montre la Figure 37. La couche d'altération se compose de l'altération argileuse (0-5 m) et l'altération sableuse (20-30 m). Sur la partie droite, nous soupçonnons le début de la faille un roll along et/ou une investigation plus profonde permettrait d'apporter une confirmation à la présence de la faille.



Lambda=30 ; Z-Weight=1 ; $\chi^2 = 54,54$; RMS = 22,5%

Figure 36: Panneau électrique Profil 6



Lambda=30 ; Z-Weight=1 ; $\chi^2 = 54,54$; RMS = 22,5%

Figure 37 : Modèle géologique Profil 6

IV.1.1.2) Les seuils d'épandage

Les panneaux géoélectrique S1P2 (Figure 31) et S1P4 (Figure 29) qui sont perpendiculaires au seuil d'épandage 1 et sont placés respectivement sur les rives droite et gauche (Annexe II c) nous présentent dans leurs partie gauche (à partir de 250m) des zones fortement altérées. Ces parties représentent la zone amont du seuil 1. A l'amont du seuil 1, l'épaisseur d'altération est de 35 à 40 m tandis qu'à l'aval, elle est de l'ordre de 20 m. Mais cela ne pourrait être associé à la présence du seuil d'épandage 1 mais au fait que le seuil est une zone exutoire.

Le profil S1P3 (Figure 33) placé à l'amont et parallèlement au seuil d'épandage 1 présente des milieux très conducteurs en surface que l'on pourrait assimiler à de l'altération argileuse. Ces zones correspondent au cours d'eau et ses effluents comme le montre l'Annexe II d.

IV.1.2. Slug tests

C'est la solution de Bouwer et Rice (1976) et une extension de cette solution, celle de Springer and Gelhar (1991) qui ont été utilisées au niveau du logiciel AQTESOLV pour calculer la perméabilité k . En effets selon les logs des micro-piézomètres, ils captent l'altération partiellement d'où le choix de ces solutions. Sur la base des profils géophysiques, il a été posé comme hypothèse que l'épaisseur moyenne de l'altération est de 25m. En partant de la perméabilité, les transmissivités ont été calculés au voisinage des micro piézomètres T. Elles sont données dans le tableau suivant :

Tableau XI: Résultats des slug tests

Ouvrages	Solution utilisée	k(m/s)	Epaisseur mouillée b (m)	T(m ² /s)	Formation géologique probable
Pz1	Bouwer et Rice	6,40E-10	17,53	1,12E-08	Argile
PZ2	Bouwer et Rice	1,97E-09	21,88	4,31E-08	Argile ; mélange de sable, argile et limon
pz5	Bouwer et Rice	5,58E-08	16,1	8,98E-07	Argile ; mélange de sable, argile et limon
pz6	Bouwer et Rice	2,23E-07	14,98	3,34E-06	Argile ; mélange de sable, argile et limon
pz7	Bouwer et Rice	1,66E-07	19,02	3,15E-06	Argile ; mélange de sable, argile et limon
pz8	Bouwer et Rice	1,72E-08	16,18	2,78E-07	Argile ; mélange de sable, argile et limon
Pz13	Bouwer et Rice	5,12E-08	18,89	9,68E-07	Argile ; mélange de sable, argile et limon
Pz15	Bouwer et Rice	2,43E-07	18,74	4,55E-06	Argile ; mélange de sable, argile et limon
Pz17	Bouwer et Rice	1,10E-08	23,06	2,54E-07	Argile ; mélange de sable, argile et limon
Pz19	Springer and Gelhar	1,05E-06	21,33	2,24E-05	Argile ; mélange de sable, argile et limon

Sur la base de ces résultats et du Tableau III, le domaine capté par les piézomètres est classé dans la classe des structures à perméabilité faibles. Cela s'explique par le fait que les piézomètres ne captent que l'altération à une faible profondeur et qui est composée principalement d'argile. Les piézomètres Pz6 et Pz17 se trouvant respectivement sur les panneaux électriques S2P1 et S1P4, voient leurs résultats confortés par la géophysique. En effet, les panneaux électriques et les logs des piézomètres montrent que les piézomètres Pz6 et Pz17 captent l'altération sableuse, ce que confirme les valeurs de perméabilité obtenue.

Au niveau des piézomètres Pz1 et Pz2 qui se trouvent sur les rives gauche et droite au niveau du seuil d'épandage 1, nous avons des perméabilités très faibles, à la limite de l'imperméabilité. En se référant au log du piézomètre Pz2 et du panneau électrique S1P2, le piézomètre Pz2 capte de l'argile dont la perméabilité est dans le même ordre de grandeur que celle calculée pour le piézomètre.

Une prise de vue (ci-dessous) dans le cours d'eau montre une couche d'argile.



Figure 38: Couche d'altération dans le lit mineur au niveau du seuil d'épandage 1

IV.1.3. Essais de puits

- **Interprétation 1**

Les essais de puits ont montré que sur les cinq (5) puits où nous avons eu à faire des essais, et selon la classification CIEH, que les puits PZ44, PZ51 et PZ23 sont classés dans le domaine de l'hydraulique villageoise ; et PZ62 est classée dans l'hydraulique agricole et PZ58 dans l'hydraulique urbain. Les puits les moins productifs sont les puits PZ23, PZ44 et PZ51. Les plus productifs sont PZ62 et PZ58. Cependant PZ58 (situé à une centaine de mètres à l'aval du barrage de Gana) est influencé par une limite à potentiel imposé (le barrage de Gana). De plus l'essai normalisé CIEH ne prenant pas en compte les conditions aux limites, le débit spécifique et la productivité de PZ58 auraient été probablement influencés. Les résultats des essais de puits sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau XII : Débits spécifiques et productivités des puits

Puits	Structure géologique	Profondeur des puits (m)	Débits Spécifique ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)	La productivité (m^3/h)
PZ44	Filon magmatique	8,5	$2,67.10^{-02}$	$4,17.10^{-3}$
PZ58	Granitoïde	15,34	1,2173	1,46
PZ51	Granitoïde	20,5	$3,79.10^{-2}$	$1,67.10^{-02}$
PZ62	Métamorphique	18,2	$7,296.10^{-1}$	$7,50.10^{-02}$
PZ23	Granitoïde	9,6	$6,27.10^{-3}$	$2,92.10^{-03}$

- Interprétation 2 :** sur la base de la classification CIEH des transmissivités (Tableau IV) ; les puits PZ44 et PZ62 sont classés dans la classe des faibles transmissivités. Les puits PZ58, PZ51 et PZ23 sont dans la classe des transmissivités moyens. Les données de pompage du puits PZ62 épousent mieux la solution de Papadopulos-Cooper pour les nappes captives. Cela pourra être expliqué que le puits PZ62, d'une profondeur de 18,2 m pourrait en effet capter la nappe captive. Notons que ces résultats peuvent ne pas traduire réellement la transmissivité car l'aquifère est peu sollicitée compte tenu de la durée du pompage.

Tableau XIII : Valeurs des transmissivités déduites des essais de puits

Puits	Structure géologique	Type de nappe	Solution utilisée	Transmissivité (m^2/s)
PZ44	Filon magmatique	Libre	Moench	$3,43. 10^{-9}$
PZ58	Granitoïde	Libre	Moench	$4,02.10^{-4}$
PZ51	Granitoïde	Libre	Moench	$6,34.10^{-4}$
PZ62	Métamorphique	captive	Papadopulos-Cooper	$1,44.10^{-6}$
PZ23	Granitoïde	Libre	Moench	$5,86.10^{-5}$

IV.2. DISCUSSION

Les investigations géophysiques sur le Bassin versant de Wedbila ont permis de caractériser la géométrie et la structure des groupes de roche de filon doléritique, granitoïde, métamorphique et superficiel. Sur l'ensemble de la géologie étudiée, les modèles épousent le modèle conceptuel de Wyns (2004). Nous retrouvons de l'altération en surface, puis la roche fissurée et la roche saine. Dû à la nature douteuse des données des profils 1, et 5 à cause d'une défaillance technique des équipements investigations géophysique, une caractérisation géologique des filons magmatique et de la ceinture volano-sédimentaire n'a pas pu être faite.

Le choix des slug tests pour la caractérisation hydrodynamique de l'altération a été guidé par les faibles perméabilités que ces couches peuvent avoir et celui des essais de puits simplifiés CIEH par l'effet de capacité observé dans les puits. Les résultats de ces travaux ont montré des paramètres hydrodynamiques de l'altération très faibles ce qui est en concordance avec la nature des terrains captés. Cependant, il serait judicieux de vérifier les résultats des piézomètres Pz1 et Pz2 par une étude minéralogique de l'argile aux rives gauche et droite au niveau du seuil d'épandage 1. Les résultats des essais de puits du puits PZ58 pourraient être influencés par le barrage de Gana qui constitue une limite à potentiel imposé. Les essais de puits simplifiés CIEH ont montré leurs limites en ne prenant pas en compte les conditions aux limites dans son protocole d'interprétation.

Le rendu des modèles géophysiques est en adéquation avec les logs de forage et les paramètres hydrodynamiques.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La caractérisation hydrogéologique du bassin versant de Wedbila s'est faite par une étude géologique et hydrodynamique. L'étude géologique a été réalisée à l'aide d'une méthode géophysique, la tomographie de résistivité électrique. De cette étude, il en est ressorti que la zone altérée du socle du bassin de Wedbila a une épaisseur entre 15-35 m et épouse le modèle conceptuel de Wyns (2004) en milieu de socle. Elle est composée de l'altération sableuse surmontée de l'altération argileuse. Nous distinguons une présence de cuirasse sur la majorité de la zone. Nous avons constaté une augmentation de l'épaisseur de l'altération à l'amont du seuil d'épandage 1. Cela peut se traduire par l'accélération du processus d'altération par la rétention d'eau à ce niveau. Mais cela ne pourrait être justifié par la présence du seuil d'épandage 1.

En terme d'hydrodynamisme, le choix a été porté sur les slug tests et les essais de puits simplifiés CIEH. La zone altérée est peu productrice et enregistre des transmissivités très faibles de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-6} m²/s aux niveaux des piézomètres et de 10^{-9} à 10^{-4} m²/s au niveau des puits. Concernant les perméabilités, elles sont de l'ordre de 10^{-10} à 10^{-7} m/s. Au niveau des puits, nous avons des débits spécifiques de $2,67 \cdot 10^{-2}$ à $1,22$ m³/h/m. En terme de productivité, les puits ont une productivité de l'ordre de $2,92 \cdot 10^{-3}$ à $1,46$ m³/h. L'ensemble des résultats confirme comme attendu que l'altération n'a pas de pouvoir conducteur mais de stockage.

La combinaison de la géophysique, des slug tests et des essais de puits nous ont permis de donner la structure, la géométrie, la transmissivité, la perméabilité, le débit spécifique et la productivité de l'altération de la zone d'étude. Cependant, cette étude n'a pas permis de caractériser la géologie aux niveaux des structures filons magmatique et de la ceinture volcano-sédimentaire. Pour ce faire, une reprise des profils 1 et 5 est recommandée. L'utilisation d'un dispositif ayant une profondeur d'investigation plus grande (dipôle-dipôle) et/ou effectuer des roll-along au niveau de la faille permettra d'apprécier au mieux son impact sur la géologie. Enfin une étude minéralogique à l'amont immédiat du seuil d'épandage 1 confirmera ou infirmera les résultats trouvés au niveau des piézomètres Pz1 et Pz2.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

- Carrière, S. D. (2014)**, Etude hydrogéophysique de la structure et du fonctionnement de la zone non saturée du karst, Thèse de doctorat, Académie d'Aix Marseille, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
- Chapellier, D. (2000)**, Prospection électrique de surface, Cours de géophysique – Résistivités électriques, 2000 – 2001. Université de Lausanne – Institut Français du Pétrole, 99 p.
https://www-ig.unil.ch/pdf/doc_pro/pro_f.pdf
- Comite Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH). (1982)**, Essais de débit simplifiés sur puits, Normalisation des modalités d'exécution et des méthodes d'interprétation, BURGEAP, 8p.
- Compaoré, G. (1997)**, Evaluation de la fonction capacitive des alterites : Site expérimental de Sanon (Burkina Faso) : Socle granito gneissique sous climat de type soudano-sahélien, Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des pays Vaucluse.
- Dakouré, D. (2003)**, Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso-Mali) : Essai de modélisation, Thèse de Doctorat, Paris 6.
- Faignant, M. (2000)**, Suivi et caractérisation physique de l'aquifère du périmètre irrigué du secteur Ngallenka Amont (région de Podor), Mémoire de stage IUP, Institut EGID Bordeaux 3
- Fouché, O (2013)**, Aquifère, nappes et essais d'eau, Théorie et pratique de la géotechnique, P731-855, LE MONITEUR.
- Gombert, P. (1997)**, Variabilité spatiale de la productivité aquifère du socle sahélien en hydraulique rurale, IAHS Publ. no. 241, 10p.

- Kabré, W. P. (2012)**, Caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé
Cas De la province du Kourwéogo, Mémoire de Master, Institut 2iE.
- Koïta, M. (2010)**, Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un
aquifère fracturé en zone de socle. Région, Thèse de doctorat, Université Grenoble.
- Koné, M. (2015)**, Modélisation Hydraulique de l'affluent principal de la retenue de Wedbila,
Mémoire de Master, Institut 2iE.
- Kutangila, M. S. (2019)**, Caractérisation hydrogéologique des aquifères du bassin sédimentaire
de taoudeni bordure sud-est, Burkina Faso), Mémoire de Master, Institut 2iE.
- La Banque Mondiale. (2017)**, Amélioration de la connaissance et de la gestion des eaux au
Burkina Faso (N° P162723; p. 95).
- Lachassagne, P., Dewandel, B., & Wyns, R. (2015)**, Le modèle conceptuel hydrogéologique
des aquifères de socle altéré et ses applications pratiques The conceptual model of hard
rock aquifers and its practical applications, Acte de la Vingtièmes journées techniques
du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des
Hydrogéologues, La Roche-sur-Yon , 12
- Leray, S. (2012)**, Caractérisation des aquifères de socle cristallin et de leur ressource en eau-
Apport des données d'" âge" de l'eau, Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1.
- Mei, L. (2003)**, La ressource en eau au Burkina Faso gestion et enjeux. Travaux du Laboratoire
de géographie physique appliquée, 22(1), 37-55.
- Mouhouyoudine, A. H. (2015)**, Analyse piézométrique et modélisation des signaux
hydrologiques et gravimétriques dans les aquifères du socle en région soudano-
sahélienne : Cas de Ouagadougou, Thèse de doctorat, Université de Montpellier.
- Ouattara, B. (2015)**, Etude de mise en place de seuils d'épandage à l'aval de l'affluent
principal de la retenue d'eau de Wedbila, Mémoire de Master, Institut 2iE.

- Ouédraogo, M. (2016)**, Caractérisation des aquifères de socle pour l'amélioration de la productivité des forages d'hydraulique villageoise dans le bassin versant du Bandama blanc amont (Nord de la Côte d'Ivoire), Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay- Université Paris-Sud.
- Outoumbe, E. (2014)**, Caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé: cas du site de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso), Mémoire de Master, Institut 2iE.
- Sauret, E. (2013)**, Etude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso), Thèse de doctorat, Université de Liège.
- Soro, D. D. (2017)**, Caractérisation et modélisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : Cas du site expérimental de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso), Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie–Paris 6 - Institut 2iE.
- UN WATER. (2018)**, Les Solutions fondées sur la Nature pour la gestion de l'eau, Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2018, Paris, UNESCO.
- Wubda, M. (2017)**, Contribution de la méthode de suivi temporel de résistivité a l'étude des processus d'infiltration en zone de socle sahelienne et soudanienne d'Afrique de l'Ouest, Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi.
- Yofé, T. J. (2016)**, Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie–Paris 6 (UPMC) - Institut (2iE).
- Yonli, H. F. (2016)**. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'un aquifère de socle

fracture : couplage essais de pompage –Résonance Magnétique des Protons (RMP),

Mémoire de Master, Institut 2iE.

Sites internet

- [https:// www.researchgate.net/figure/Tomographie-electrique-2D-schema-de-principe-de-lacquisition-des-donnees-suivant-une-fig2_270340119](https://www.researchgate.net/figure/Tomographie-electrique-2D-schema-de-principe-de-lacquisition-des-donnees-suivant-une-fig2_270340119). Consulté le 26 décembre 2020 ;
- http://www.wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/fichier:Principe_de_la_prospection_electrique_par_courant_continu.jpg). Consulté le 03 janvier 2021 ;
- [: ttps:// www-ig.unil.ch/res16f.htm](https://www-ig.unil.ch/res16f.htm) ; Consulté le 09 janvier 2021

ANNEXES

Annexe I: Tableaux comparatif de DC2DInvRes et Res2DInv	70
Annexe II: Vue satellitaire	71
Annexe III: réalisation des essais de puits	73
Annexe IV: fiche 2 de l'essai de puits simplifié	75
Annexe V: Résultats détaillés issus de AQTESOLV	76

Annexe I: Tableaux comparatif de DC2DInvRes et Res2DInv (Clément et Audebert , 2013)

		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 length)	✓ (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 II: Vue satellitaire

Annexe II a : vue satellitaire du profil S1P4 (source: google earth, 2018)



Annexe II b : Vue de l'environnement de Profil S1P2 (source: google earth, 2018)



Annexe II c : Vue satellitaire du seuil d'épandage 1 et des Profils S1P2 et S1P4 (source: google earth, 2018)

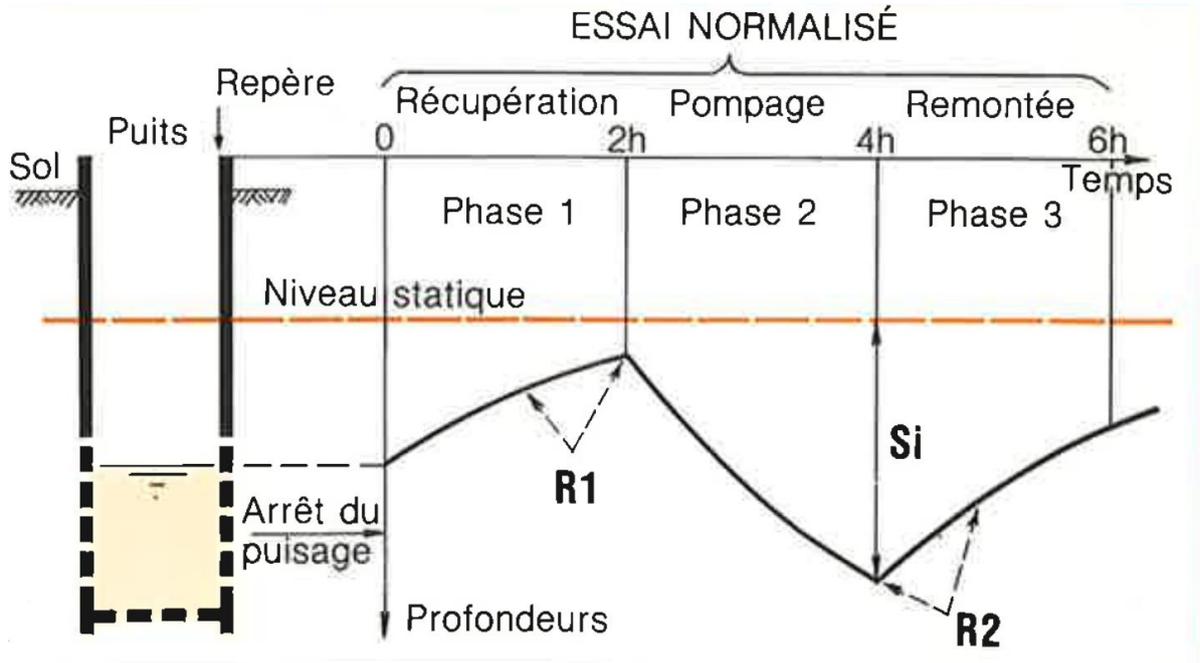


Annexe II d : Vue satellitaire du seuil d'épandage 1 et le profil S1P3 (source: google earth, 2018)

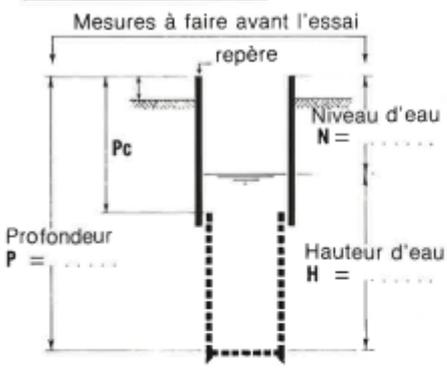


Annexe III: réalisation des essais de puits

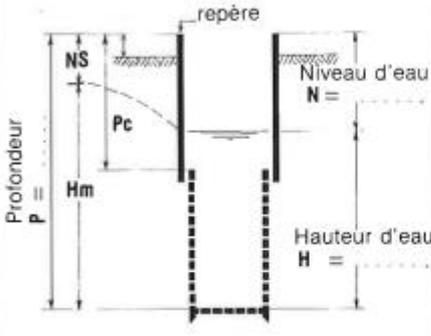
Annexe III a : phase de l'essai de normalisé (CIEH, 1982)



Annexe III b : fiche 1 de l'essai de puits simplifié (CIEH, 1982)

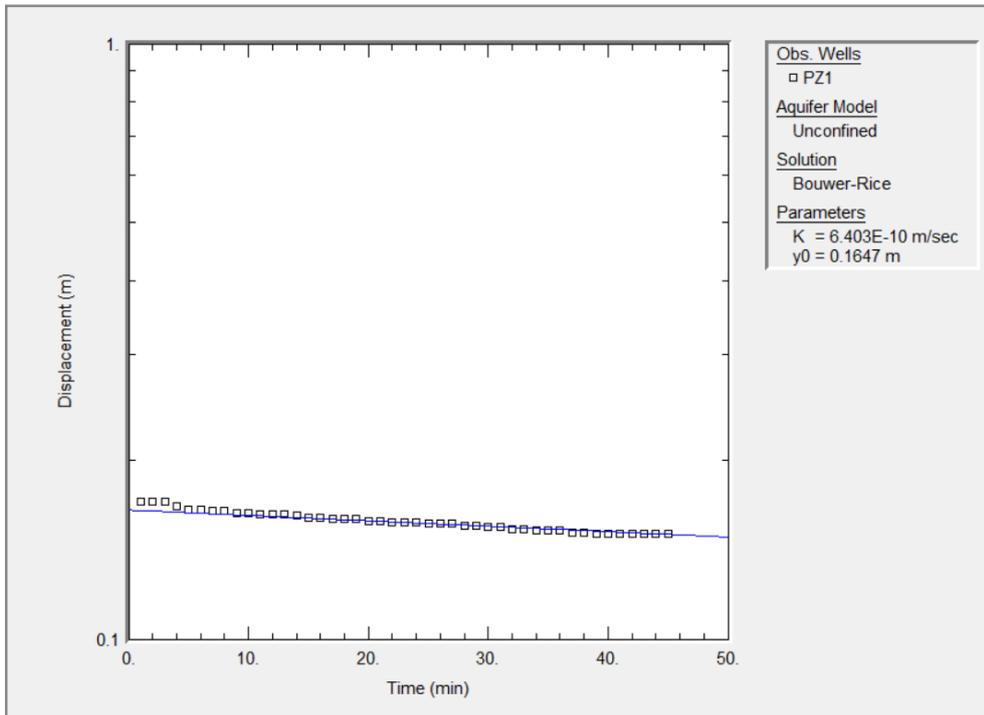
ESSAI SUR PUIITS Tableau de mesures	Village :	FICHE 1																																																			
CARACTERISTIQUES DU PUIITS :	Hauteur repère/sol : m	Prof. totale P = m du puits																																																			
Prof. sommet captage : Pc =	Diamètre cuvelage : m	Diamètre captage : m																																																			
DONNEES DE L'ESSAI																																																					
<p>Mesures à faire avant l'essai</p> 		Date de l'essai : Essai réalisé par : Conditions d'exploitation : Niveau statique : NS (si le puits est au repos avant l'essai)																																																			
		1.1 - RECUPERATION (R1)																																																			
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>TEMPS</th> <th>NIVEAU D'EAU</th> </tr> <tr> <th>heure</th> <th>mesure au bout de</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>0 mn</td></tr> <tr><td></td><td>30'</td></tr> <tr><td></td><td>60'</td></tr> <tr><td></td><td>90'</td></tr> <tr><td></td><td>120'</td></tr> </tbody> </table>	TEMPS	NIVEAU D'EAU	heure	mesure au bout de		0 mn		30'		60'		90'		120'																																					
TEMPS	NIVEAU D'EAU																																																				
heure	mesure au bout de																																																				
	0 mn																																																				
	30'																																																				
	60'																																																				
	90'																																																				
	120'																																																				
		1.2 - POMPAGE																																																			
		1.3 - REMONTEE (R2)																																																			
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>TEMPS</th> <th>NIVEAU D'EAU</th> <th>DEBIT</th> </tr> <tr> <th>heure</th> <th>mesure au bout de</th> <th>en m³/h</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>0 mn</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>10'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>20'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>30'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>40'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>50'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>60'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>70'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>80'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>90'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>100'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>110'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>120'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>150'</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>180'</td><td></td></tr> </tbody> </table>	TEMPS	NIVEAU D'EAU	DEBIT	heure	mesure au bout de	en m³/h		0 mn			10'			20'			30'			40'			50'			60'			70'			80'			90'			100'			110'			120'			150'			180'	
TEMPS	NIVEAU D'EAU	DEBIT																																																			
heure	mesure au bout de	en m³/h																																																			
	0 mn																																																				
	10'																																																				
	20'																																																				
	30'																																																				
	40'																																																				
	50'																																																				
	60'																																																				
	70'																																																				
	80'																																																				
	90'																																																				
	100'																																																				
	110'																																																				
	120'																																																				
	150'																																																				
	180'																																																				
		Volume du fût utilisé l (volume en litres)																																																			
		Profondeur du puits m en fin d'essai																																																			
OBSERVATIONS																																																					
INTERPRETATION																																																					
- Vitesse de récupération sur 1 heure : R1 = m/h (différence de niveau entre 1 et 2 heures)* - Vitesse de remontée sur 1 heure : R2 = m/h (différence de niveau entre 10 et 70 mn)** - Volume spécifique du puits : Vs = m³/m (d'après tableau N° 2)																																																					
Débit instantané = Qi = R2 x Vs		Qi = m³/h																																																			
* Si le puits présente un changement de diamètre dans ces intervalles, faire le calcul de R1 (ou R2) sur une hauteur mouillée de diamètre constant (NOTA 2 page 6).																																																					

Annexe IV: fiche 2 de l'essai de puits simplifié (CIEH, 1982)

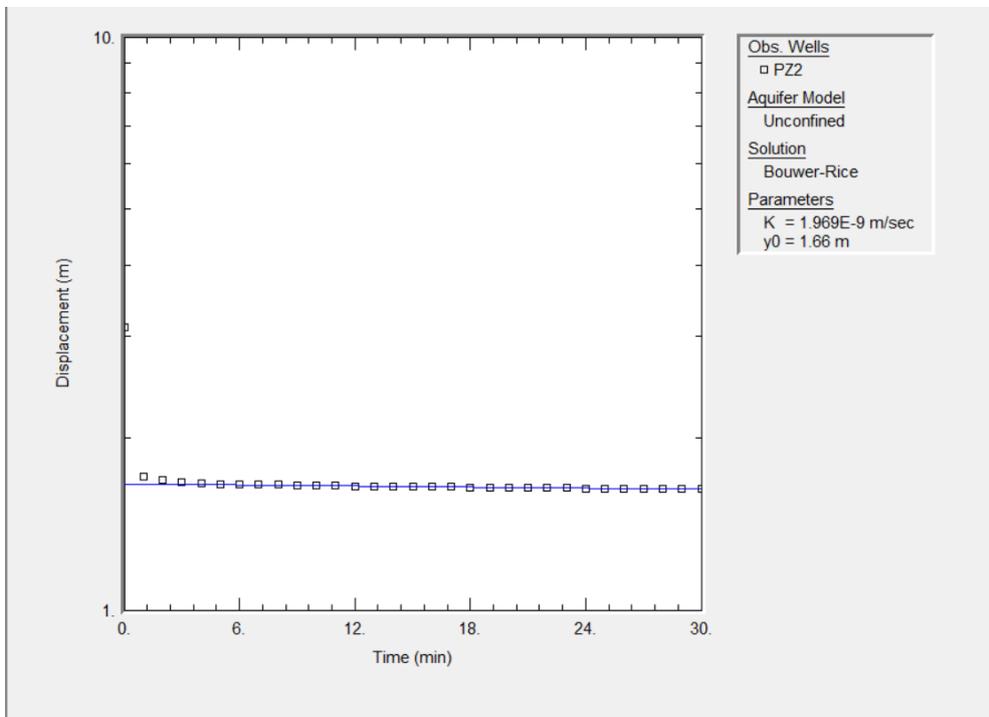
ESSAI SUR PUIITS Fiche d'interprétation	Village : <div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 2px;">FICHE 2</div>																			
CARACTERISTIQUES DU PUIITS : Prof. sommet captage : $P_c =$ 	Hauteur repère/sol : m Diamètre cuvelage : m Prof. totale $P =$ m du puits Diamètre captage : m																			
DONNEES DE L'ESSAI  <p style="font-size: small;">Date et heure de l'essai : Débit pompage : m³/h Durée : h Observations : Fiche établie par :</p>	2-1 CALCUL DU NIVEAU STATIQUE <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">Fin de récupération</td> <td style="text-align: center;">Début de remontée</td> </tr> <tr> <td>Vitesse de remontée (m/h)</td> <td style="text-align: center;">$R1 =$</td> <td style="text-align: center;">$R2 =$</td> </tr> <tr> <td>Prof. du niveau moyen (m)</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Niveau statique calculé</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">$NS =$ m</td> </tr> <tr> <td>Hauteur mouillée</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">$P-NS = Hm =$ m</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">Vitesse de remontée (m/h)</td> </tr> </table> <div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%; margin-top: 10px;"></div> <p style="font-size: small;">Profondeur du niveau d'eau (m)</p>		Fin de récupération	Début de remontée	Vitesse de remontée (m/h)	$R1 =$	$R2 =$	Prof. du niveau moyen (m)			Niveau statique calculé	$NS =$ m		Hauteur mouillée	$P-NS = Hm =$ m			Vitesse de remontée (m/h)		
	Fin de récupération	Début de remontée																		
Vitesse de remontée (m/h)	$R1 =$	$R2 =$																		
Prof. du niveau moyen (m)																				
Niveau statique calculé	$NS =$ m																			
Hauteur mouillée	$P-NS = Hm =$ m																			
	Vitesse de remontée (m/h)																			
2-2 VARIATION PIEZOMETRIQUE																				
Durée totale habituelle de la saison sèche : D_s mois Temps écoulé entre le début de la saison sèche et la date de l'essai : D_e mois Variation piézométrique probable durant toute la saison sèche : dH m Hauteur d'eau probable en début de saison sèche : $H_o = Hm + (dH \times D_e/D_s)$ m Coefficient $L = dH/H_o =$																				
<div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div> <p style="font-size: small;">Profondeur du niveau d'eau (m)</p>	2-3 CALCUL DU DEBIT SPECIFIQUE <ul style="list-style-type: none"> • Volume spécifique en fin d'essai... $\varnothing =$ $V_s =$ m³/m • Vitesse de remontée... $R2 =$ m/h • Débit instantané de fin d'essai... $V_s \times R2 = Q_i =$ m³/h • Rabattement en fin d'essai = Niveau final - NS = $S_i =$ m • Débit spécifique de l'essai..... $C_e = \frac{Q_i}{S_i} =$ m³/h/m 																			
2-4 VOLUME JOURNALIER EXPLOITABLE EN FIN DE SAISON SECHE																				
(cf. Abaque N° 3) $V_e =$ m ³ /jour																				
Interprétation réalisée par :																				

Annexe V: Résultats détaillés issus de AQTESOLV

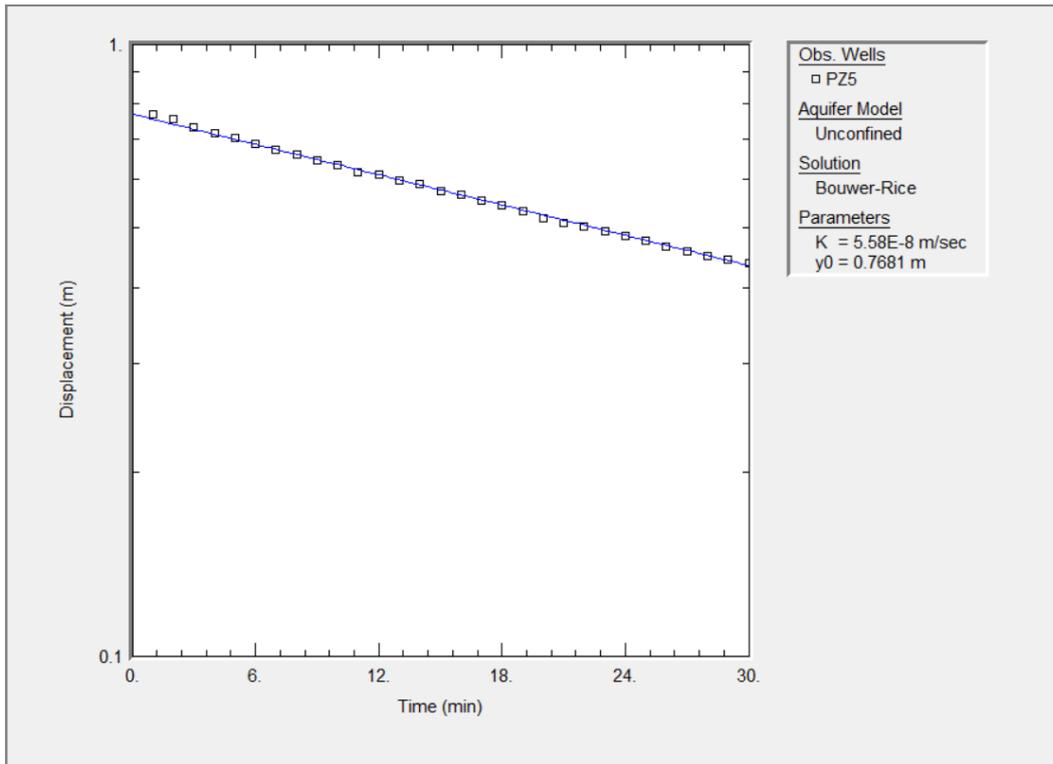
Annexe V- a : Résultat Pz1



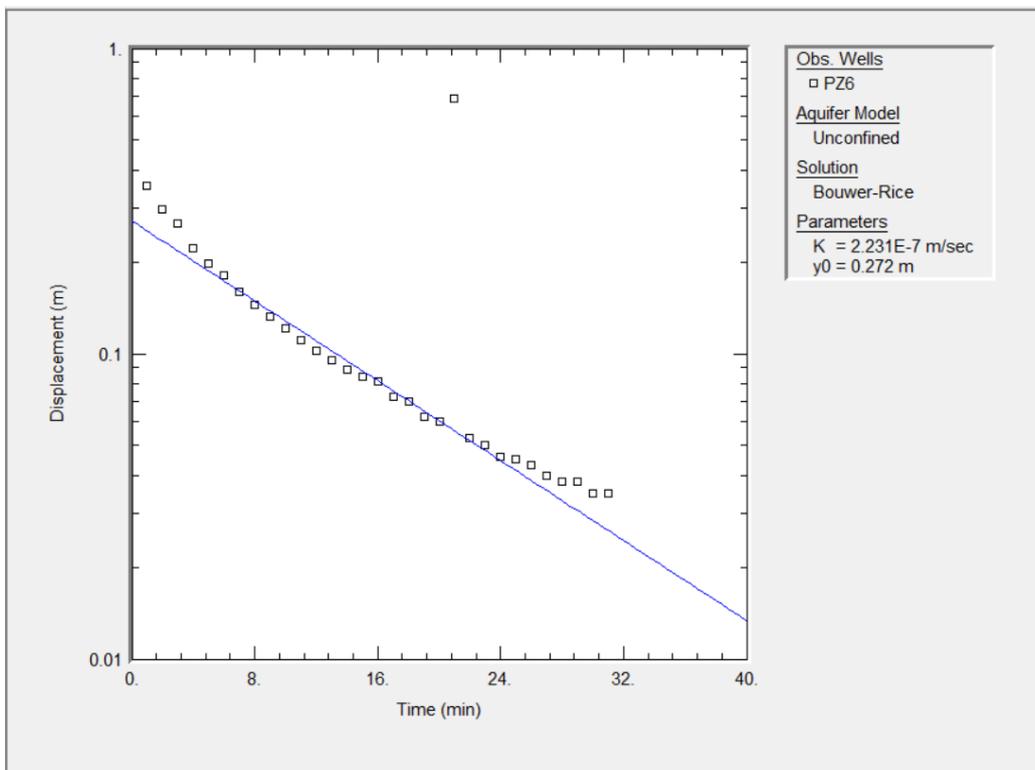
Annexe V- b : Résultat Pz2



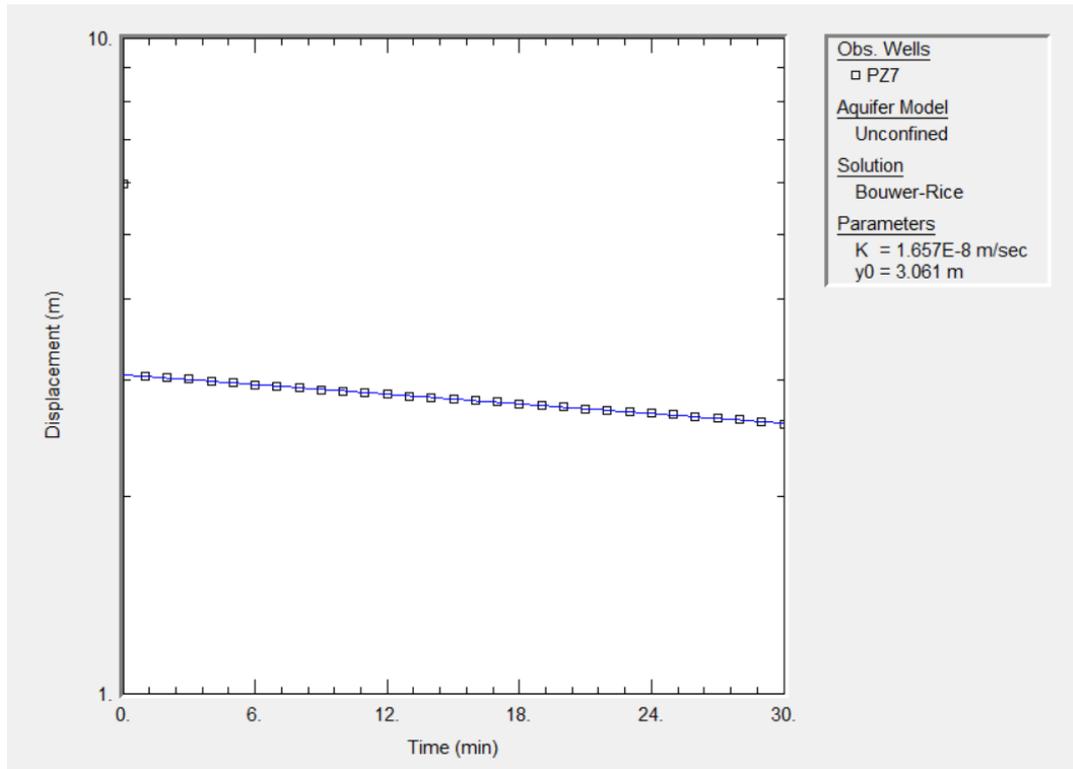
Annexe V- c : Résultat Pz5



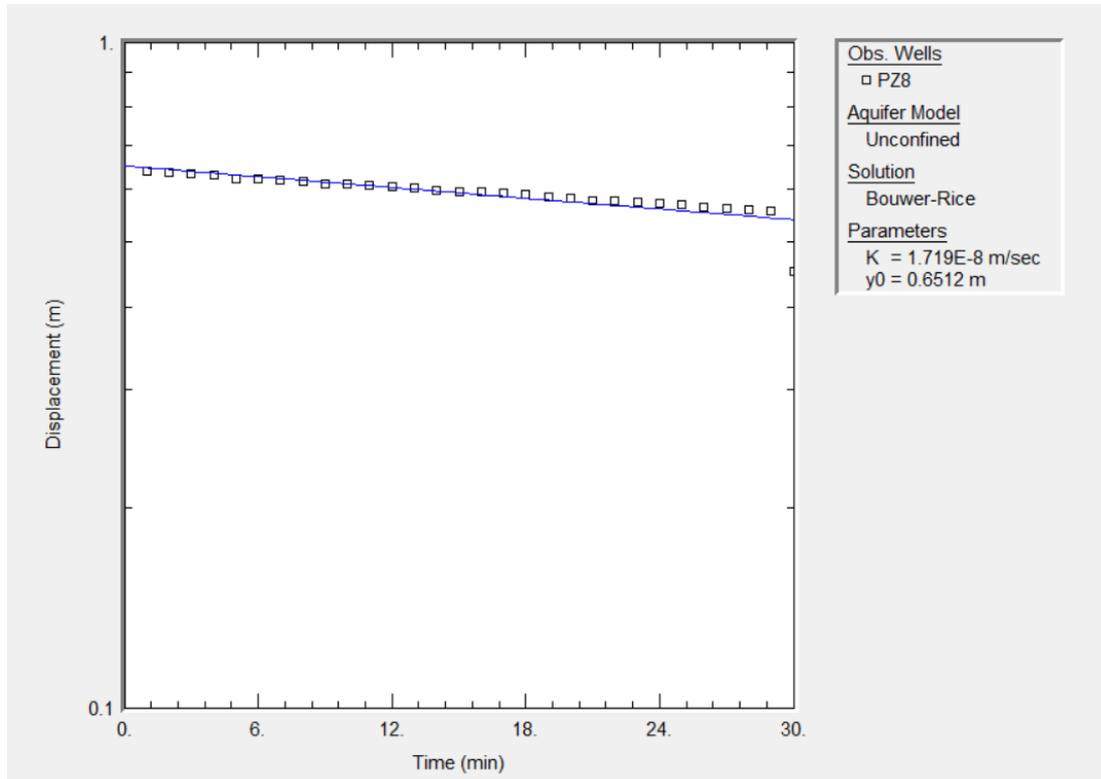
Annexe V- d : Résultat Pz6



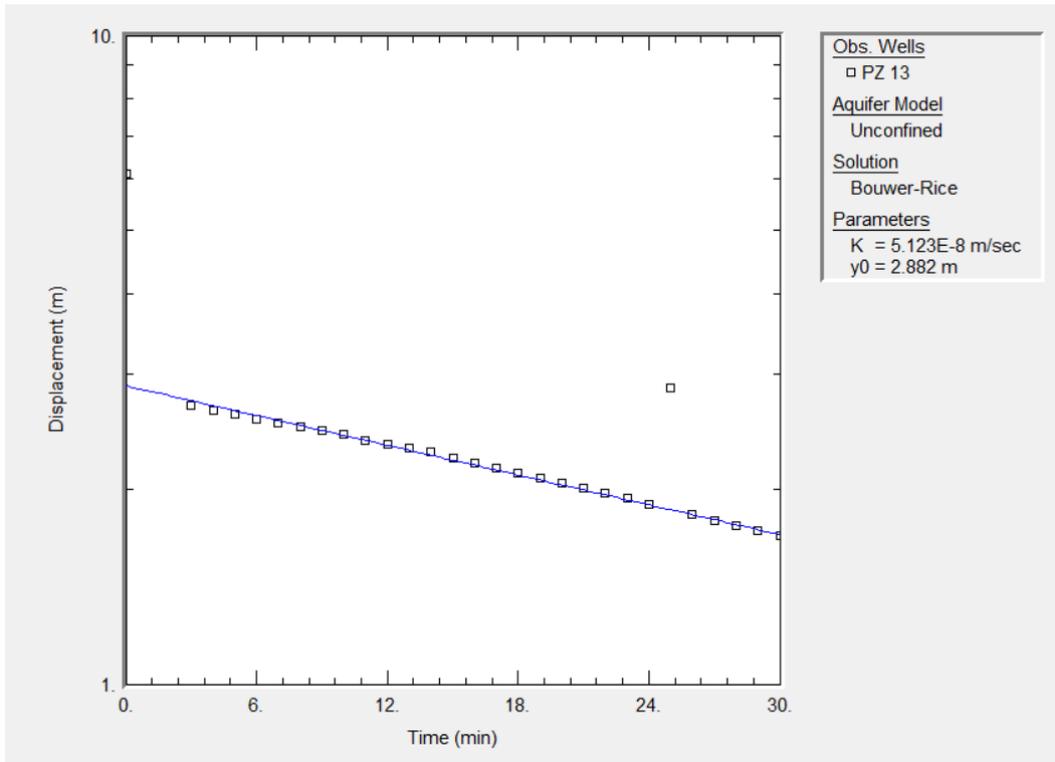
Annexe V- e : Résultat de Pz7



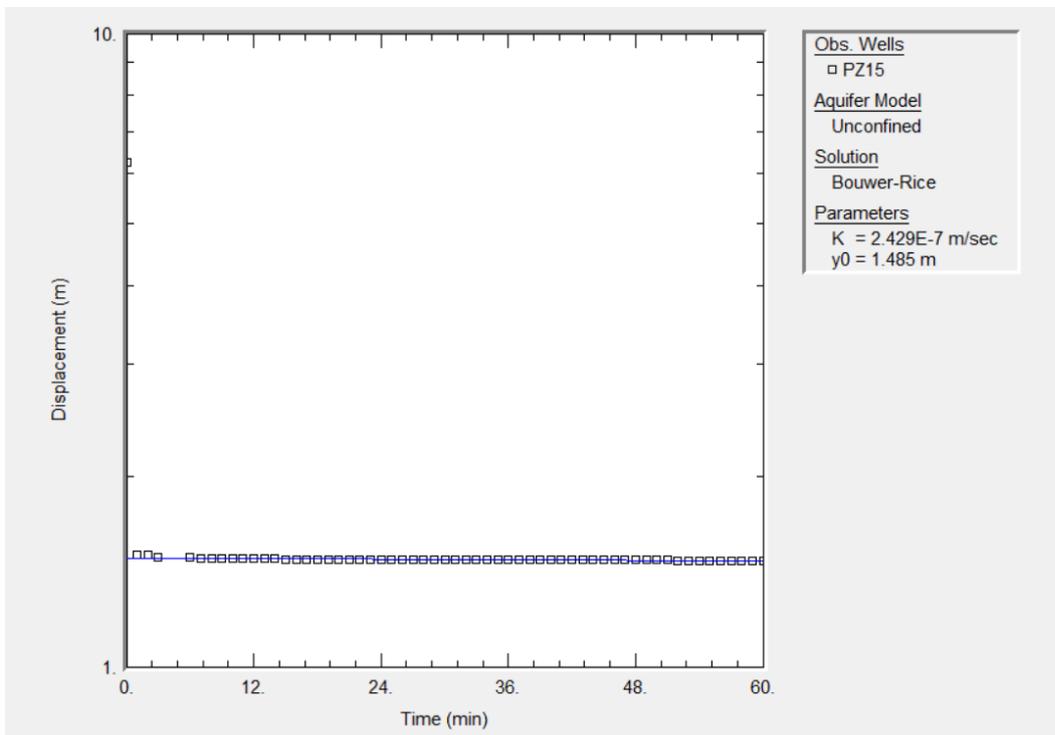
Annexe V- f : Résultat de Pz8



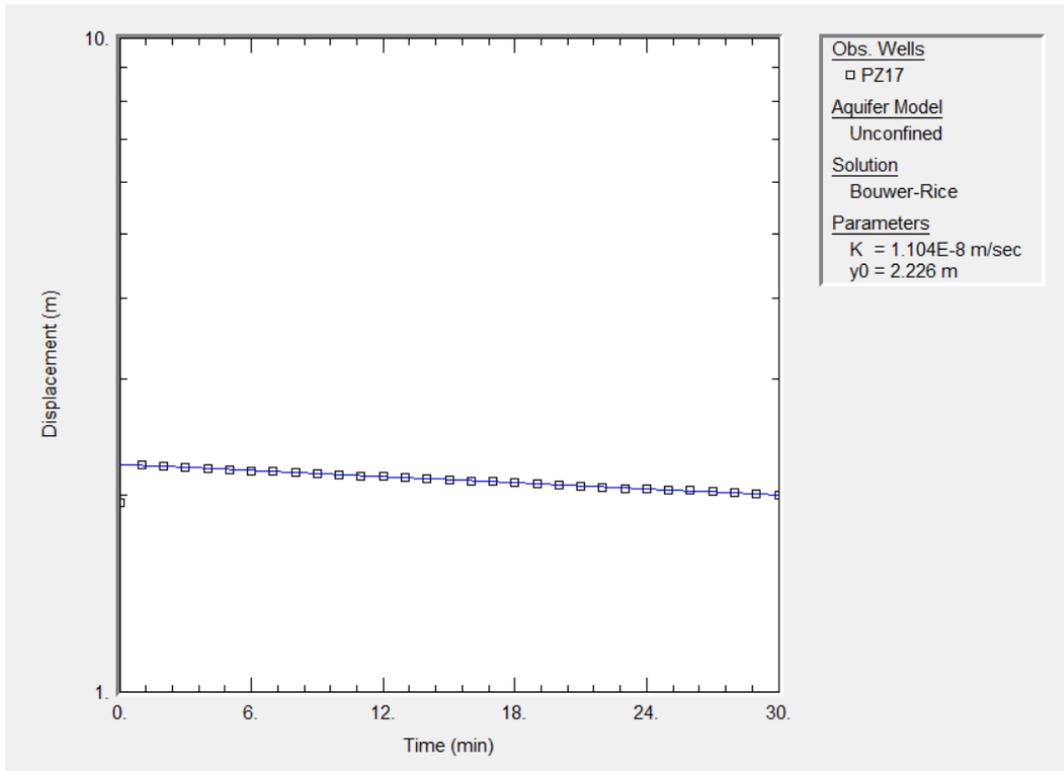
Annexe V- g : Résultat Pz13



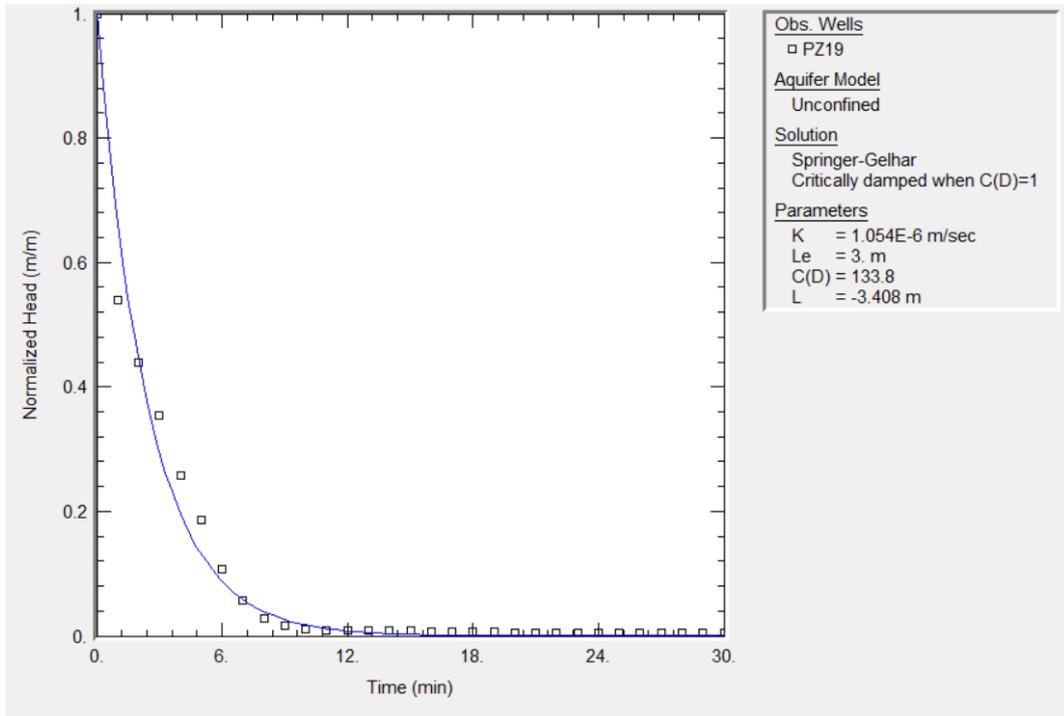
Annexe V- h : Résultat Pz15



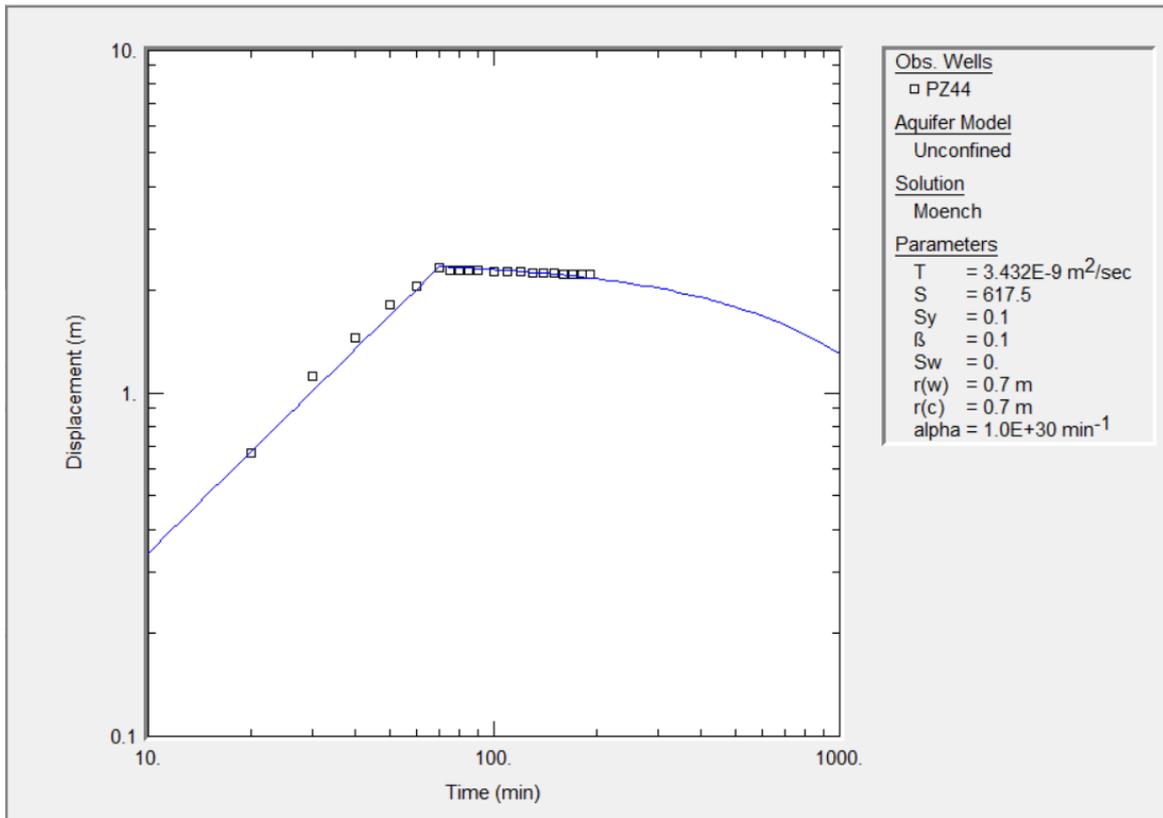
Annexe V- i : Résultat Pz17



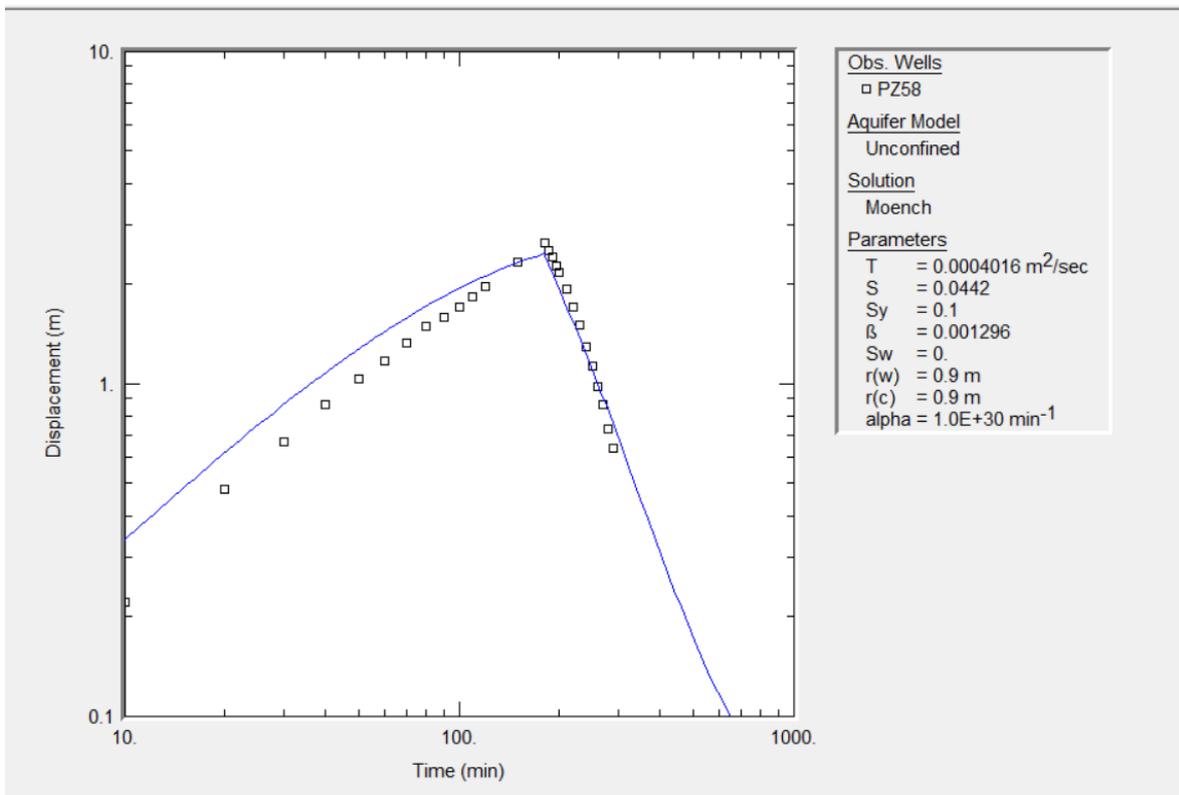
Annexe V- j : Résultat Pz19



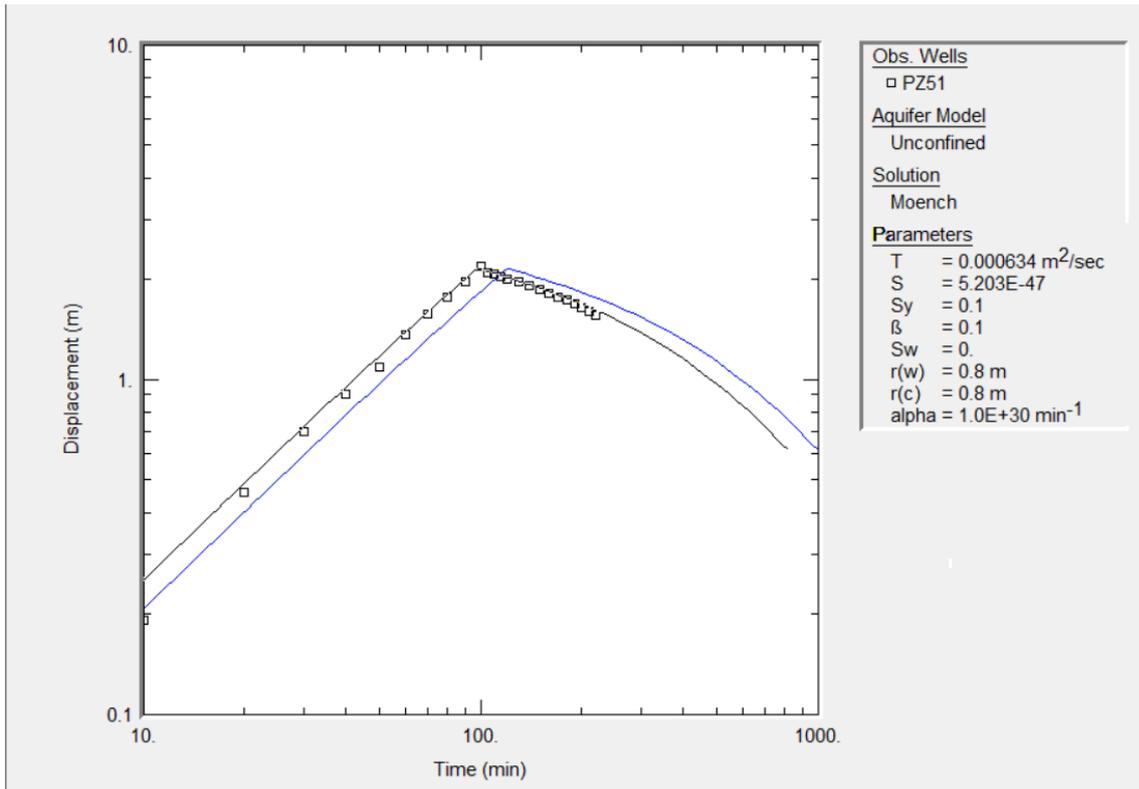
Annexe V- k : Résultat de PZ44



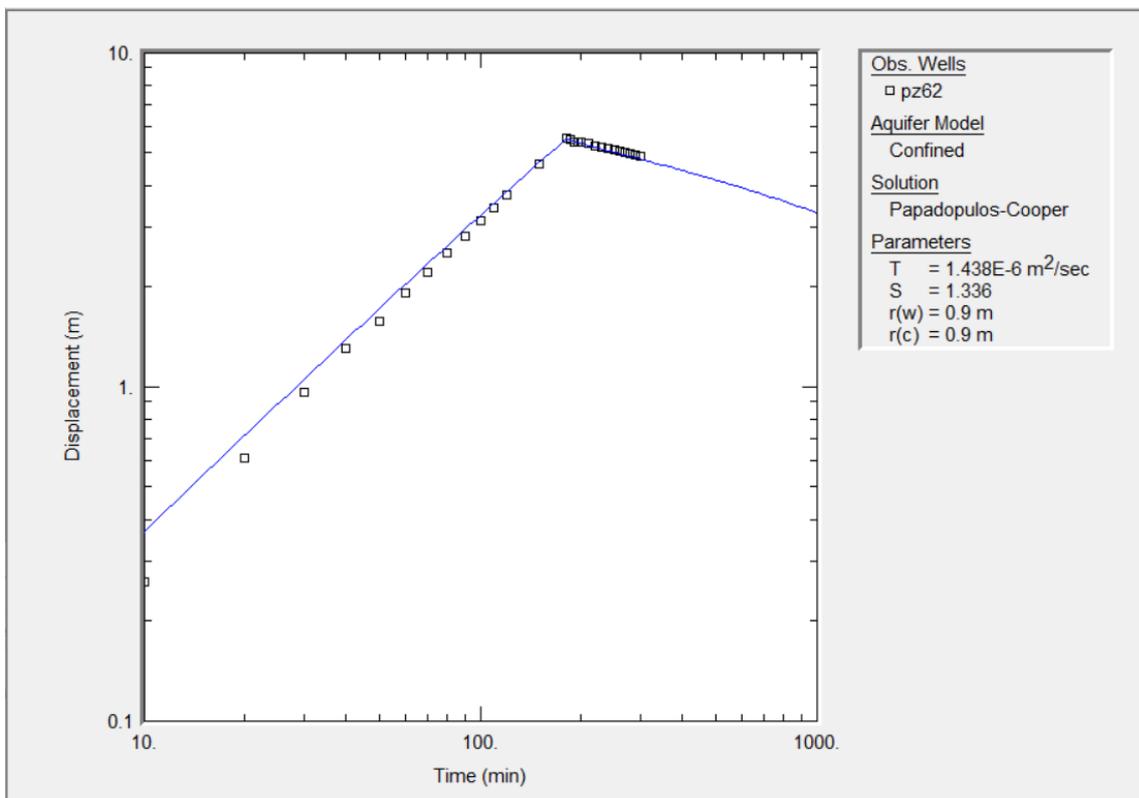
Annexe V- l : Résultat de PZ58



Annexe V- m : Résultat de PZ51



Annexe V- n : Résultat de PZ62



Annexe V- o : Résultat de PZ23

