

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الجبالي بونعامة خميس مليانة

Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana

Département des Sciences de la matière

Faculté de science et technologie



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme de **Master en Physique du Globe**

Thème :

Apport de la géophysique dans l'implantation et la caractérisation d'un forage hydraulique

Devant le jury composé de :

- Présidente : Dr. MAZOUZ Amel
- Encadreur : Mr. BENZIANE Mustapha
- Co-Encadreur : Dr. HAMAI Lamine
- Examineur : Mme. AITADJEDJOU Doria

Présenté par :

Boudiba Ahmed Amine
Kechiche Bilal

Année universitaire : 2018 / 2019

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout Puissant de nous avoir donné la force et le courage d'accomplir ce travail avec abnégation. Nos vifs et sincères remerciements s'adressent spécialement à, MR. Benziane Mustapha, dont nous avons eu la chance de l'avoir comme encadreur et qui a bien voulu nous confier ce travail riche d'expériences et de nous avoir guidé dans chaque étape de sa consécration. Vous nous avez toujours réservé un chaleureux accueil, malgré vos obligations et les contraintes professionnelles. Vos talents ainsi que vos compétences et votre sens du devoir nous ont marqué à jamais. Vos encouragements inlassables, votre amabilité, votre gentillesse et votre patience méritent toute notre attention. Nos remerciements, s'adressent aussi à M. Hamai Lamine qui a bien voulu porter un oeil critique sur notre travail et qui nous a aidés à corriger notre manuscrit.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de notre spécialité physique du globe à l'université de Khemis Milliana pour cette formation extraordinaire et un spécial remerciement à Mr Bentriddi qui nous a accompagnés tout au long de notre cursus.

Veillez trouver ici l'expression de notre estime et notre considération. Nous remercions également, les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger ce mémoire. Veuillez accepter l'expression de ma vive gratitude. En fin,

A toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, d'une manière directe ou indirecte à l'élaboration de ce travail de fin d'études.

Dédicace

Je dédie ce travail avec grand amour à :
Mes chers parents et surtout ma mère source de tendresse et de
noblesse.
Mon oncle qui est la source de mon inspiration
Mon frère et mes sœurs.
Tous mes amis et camarades en souvenir des plus beaux instants qu'on
a passé ensemble.
Et à tous les membres de ma famille.
Sans oublier tous mes professeurs et tous ceux qui m'ont aidé.

Boudiba Ahmed Amine

Dédicace

Mes chers parents, que mille dédicaces ne puissent exprimer mes
sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement
contenu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect
pour leurs grands sacrifices.
Mon grand-père paix a son âme
Mes frères et sœurs et leur petite famille
Mes chers amis et mes professeurs qui sans leur encouragement, ce
travail n'aura jamais vu ce jour.
Et toute ma famille

Kechiche Bilal

Résumé

L'important développement industriel dans la région de Berrahal (Nord-Est de l'Algérie) est suivi par un immense besoin de ressource d'eau supplémentaire. Aussi il faut prendre en considération les risques de pollution des nappes phréatiques à cause des déchets toxiques des usines et rechercher des solutions mais cela n'est pas notre sujet. Le but de cette étude est de localiser les nappes et voir si le débit d'exploitation est suffisant pour alimenter la zone industrielle à l'aide des méthodes géophysique et hydraulique. Pour cela, nous devons faire d'abord une étude géologique à l'aide des sondages carottés pour avoir une idée sur la lithologie et les formations géologique du site, ensuite nous commençons par la première méthode géophysique de surface qui est le sondage électrique verticale (SEV). Ces derniers permettent de voir la résistivité du sous-sol, et après interprétation, obtenir une coupe géo-électrique et proposer des coordonnées d'un forage pour l'extraction.

Ensuite viens la partie après forage ou on utilise la méthode géophysique de forage (diagraphie de résistivité et polarisation spontané et gamma ray) pour déterminer avec précision la lithologie et les réservoirs ou se situe l'aquifère.

Ces différentes méthodes, permettent de déterminer les paramètres hydraulique (débit, transmissivité, perméabilité, rayon d'action, coefficient d'emmagasinement) afin de voir les caractéristiques de notre aquifère, si elle satisfait le but de cette étude.

Abstract

The important industrial development in the region of Berrahal (North-East of Algeria) is followed with a huge need for additional water resources. We, therefore, have to consider the risks of groundwater pollution because of toxic waste released by factories, and search for solutions to overcome the issue. Yet, this is not the core of our research. The purpose of this study is to locate the water table and see if the flow of exploration is sufficient to supply the industrial area using geophysical and hydraulic methods. To achieve the aim, we have to do first the geological study more of the core drilling to get an idea on the lithology and the geological formations of the site. Then, we start with the first geophysical method of surface which the vertical electrical survey is trying to check the resistivity of the basements. When interpreting the results, we obtain a geo-electric cut and with the correlation between the latter and the probes, we are trying to propose the coordinates of a borehole for extraction.

Then comes the stage after drilling or use the geophysical drilling method (log resistivity and spontaneous polarization and gamma ray) to accurately determine the lithology and the reservoirs where the aquifer water is located.

Afterwards, a hydraulic study is needed to determine the hydraulic parameters (flow, transmissivity, permeability, radius of action, storage coefficient) in order to know the characteristics of our aquifer, and if this serves the purpose of this study

ملخص

التطور الصناعي الهام في منطقة بالرحال (شمال شرق الجزائر) يتبعه حاجة كبيرة لموارد مائية إضافية. مع وجوب الأخذ بعين الاعتبار مخاطر تلوث المياه الجوفية بسبب النفايات السامة للمصانع والبحث عن حلول ولكن هذا ليس موضوعنا. الغرض من هذه الدراسة هو تحديد طبقات المياه الجوفية ومعرفة ما إذا كان التدفق الموجود يكفي لتزويد المنطقة الصناعية باستخدام الطرق الجيوفيزيائية والهيدروليكية. لهذا، يتعين علينا أولاً إجراء مسح جيولوجي باستخدام الثقوب المحفورة للحصول على فكرة عن علم الآثار هذه تسمح برؤية والتشكيلات الجيولوجية للموقع، ثم نبدأ باستخدام الطريقة الجيوفيزيائية الأولى للسطح مقاومة التربة التحتية، وبعد التفسير، الحصول على قطع جيو-كهربائية واقتراح إحداثيات الحفر لاستخراجها. ثم يأتي الجزء بعد الحفر أو استخدام الطريقة الجيوفيزيائية للحفر (تسجيل المقاومة والاستقطاب العفوي وأشعة جاما) لتحديد بدقة علم الليثولوجيا والخزانات التي توجد بها طبقة المياه الجوفية. هذه الطرق المختلفة تجعل من الممكن تحديد المعلمات الهيدروليكية (التدفق، النفاذية، نصف قطر العمل، معامل التخزين) من أجل معرفة خصائص طبقة المياه الجوفية، إذا ما كانت تلبي الغرض من هذه الدراسة.

Table des matières

I. Chapitre 1 : Introduction du site d'étude	1
1 Introduction	1
2 Objectif.....	1
3 Secteur d'étude.....	1
3.1 Situation géographique	1
3.2 Climat	2
3.3 Géomorphologie	2
3.4 Hydrologie du secteur d'étude	3
3.5 Hydrogéologie	4
3.6 Cadre géologique	9
4 Travaux antérieurs.....	12
5 Conclusion.....	14
II. Chapitre 2 : méthode géophysique utilisé	15
1 Méthode électrique de surface	15
1.1 Introduction	15
1.2 Généralité	15
1.2.1 La Résistivité	15
1.2.2 Loi d'Archie	16
1.2.3 La porosité	17
1.2.4 La perméabilité	17
1.3 Principe de mesure	18
1.4 Dispositifs de mesure	18
1.5 Profondeur d'investigation	18
1.6 Sondage électrique vertical (SEV)	19
1.7 Avantage et inconvénient de la méthode.....	19
2 Méthode diagraphie de forage	20
2.1 Introduction	20
2.2 Les moyens techniques d'enregistrement	21
2.3 L'invasion	21
2.4 Diagraphie polarisation spontané (PS)	22
2.4.1 Introduction	22
2.4.2 L'objectif	23
2.4.3 La mise en œuvre	24

2.4.4	Facteurs parasites	24
2.4.5	Facteurs influençant la forme et l'amplitude des déflexions P.S	24
2.5	Diagraphie résistivité	25
2.5.1	Introduction	25
2.5.2	Les dispositifs normal et latérale	26
2.5.3	Réponse de la sonde normale et latérale	28
2.6	Diagraphie gamma ray	29
2.6.1	Introduction	29
2.6.2	Le paramètre enregistré	29
2.6.3	Caractérisations des outils	30
2.6.4	Objectif	30
III.	Chapitre 3 : Partie pratique.....	31
1	Méthode électrique (SEV)	31
1.1	Limitation de profil	31
1.2	Matériel et Dispositif utilisé	31
1.3	Déroulement de travail	34
1.4	L'acquisition des données	34
1.5	Traitement des données et Interprétation	35
1.6	Résultat et conclusion	39
2	Diagraphie.....	42
2.1	Situation géographique du forage	42
2.2	Matériel utilisé	43
2.3	L'acquisition des données	44
2.4	Interprétation et traitement des données	47
2.5	Résultat hydraulique et Conclusion du forage	48
IV.	CHAPITRE 4	50
1	CONCLUSION GENERALE	50
2	Perspectives	50
	Annexe	52
	Références bibliographiques.....	62

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : propriétés Hydrodynamiques des forages.....	7
Tableau I. 2 : Paramètres hydrodynamiques de quelques points à l'est du Lac Fetzara.	8
Tableau I. 3 : paramètres hydrodynamiques des aquifères de la plaine.	9
Tableau I. 4 : lithologie du sondage BH20	13
Tableau I. 5 : lithologie du sondage BH16	13
Tableau I. 6 : lithologie du sondage BH11	13
Tableau I. 7 : lithologie du sondage BH09	14
Tableau III. 1 : colonne de captage.....	48
Tableau 1 : SEV 1.....	54
Tableau 2 : SEV 3.....	55
Tableau 3 : SEV 3.....	56
Tableau 4 : SEV 4.....	56
Tableau 5 : SEV 5.....	57
Tableau 6 : SEV 6.....	58
Tableau 7 : Résistivité des roches et des eaux.....	58

Liste des figures

Figure I. 1 : positionnement du secteur d'étude.....	2
Figure I. 2 : géomorphologie du lac Fetzara et ses alentours.	3
Figure I. 3 : Réseau hydrographique du Bassin Versant Lac Fetzara.	4
Figure I. 4 : Extension des différents aquifères clans les plaines d'Annaba-Bouteldja.	5
Figure I. 5 : Les aquifères à l'Est du Lac Fetzara.	7
Figure I. 6 : Carte de la perméabilité verticale des sols du lac Fetzara.....	8
Figure I. 7 : Carte géologique du bassin versant du Lac Fetzara.	9
Figure I. 8 : géologie du secteur d'étude.....	11
Figure I. 9 : coupes géologiques entre Edough et Ain Berda passant par le Lac Fetzara.....	12
Figure II. 1 : principe de mesure électrique.....	18
Figure II. 2 : Profondeur d'investigation des dispositifs.....	19
Figure II. 3 : premier log enregistré	20
Figure II. 4 : schéma de l'acquisition.....	21
Figure II. 5 : Représentation schématique de l'invasion	22
Figure II. 6 : principe de création de la PS dans le sous-sol.	23
Figure II. 7 : Schéma du principe de la monoélectrode.	26
Figure II. 8 : Principe de la sonde normal.....	27
Figure II. 9 : Principe de la sonde latéral.....	27
Figure II. 10 : Influence de l'épaisseur du banc et des résistivités en présences sur la forme des courbes normales et latérales.	28
Figure II. 11 : Volume d'investigation du gamma ray.....	29
Figure III. 1 : Limitation des profils dans le secteur d'étude.....	31
Figure III. 2 : Un Résistivimètre scintrex saris avec une batterie intégrée.....	32
Figure III. 3 : Electrodes.....	32
Figure III. 4 : Bobines de Câble	32
Figure III. 5 : Un mètre ruban	33
Figure III. 6 : des pinces de câble.....	33
Figure III. 7 : GPS ETREX (GARMIN)	33

Figure III. 8 : Interprétation du SEV-1 par IPI2WIN	35
Figure III. 9 : Interprétation du SEV-2 par IPI2WIN	36
Figure III. 10 : Interprétation du SEV-3 par IPI2WIN	36
Figure III. 11 : Interprétation du SEV-4 par IPI2WIN	37
Figure III. 12 : Interprétation du SEV-5 par IPI2WIN	38
Figure III. 13 : Interprétation du SEV-6 par IPI2WIN	38
Figure III. 14 : Positionnement de la coupe géo électrique	39
Figure III. 15 : Coupe Géo électrique AB	40
Figure III. 16 : Impact du forage et Piézomètre	41
Figure III. 17 : Emplacement du forage	42
Figure III. 18 : treuil	43
Figure III. 19 : Console de commande	43
Figure III. 20 : Sonde de résistivité Normales "4 électrodes 8, 16, 32, 64", polarisation spontanée et gamma ray	44
Figure III. 21 : Log des diagraphies (PS, GR, Résistivité)	46
Figure III. 22 : La lithologie du Forage 1	49
Figure 1 : Carte de la situation géographique du secteur d'étude	52
Figure 2 : Températures moyennes mensuelles (°C) dans la zone étudiée	52
Figure 3 : Carte de situation géographique des nappes superficielles de la plaine d'Annaba	53
Figure 4 : Carte géologique schématique de la région de Berrahal	53
Figure 5 : Représentation schématique de l'invasion	54
Figure 6 : Débit critique et Débit d'exploitation du forage 1	60

Liste des Abréviations

ρ_a : Résistivité apparente
 SEV : sondage électrique vertical
 GR : gamma ray
 PS : polarisation spontanée
 RES : Résistivité électrique
 ΔV : Différence de potentiel
 V_{sh} : pourcentage de volume d'argile
 GPS: Global Positioning System

Mots clés

Lac Fatzara, Berrahal

Géologie

Diagraphie, sondage électrique verticale

Hydrogéologie

Introduction Générale

L'accroissement constant de la population mondiale s'accompagne invariablement d'une augmentation de la demande des produits manufacturés qui veut dire augmentation des quantités d'eau utilisée. L'eau est une ressource fondamentale pour l'industrie, un secteur qui est le second consommateur d'eau après l'agriculture, Dans notre secteur d'étude (Berrahal) ou il existe une zone industrielle en phase d'expansion, et donc un besoin crucial d'alimentation en eau, le rôle du géophysicien est primordial dans la recherche de cette ressource indispensable à l'aide de deux méthodes de prospection. La première qui est surfacique (SEV) et la deuxième méthode qui est de forage (diagraphie). Après viens le rôle de l'hydrogéologue pour déterminer les paramètres hydrauliques afin de voir si les nappes trouvées satisfassent le besoin de cette zone industrielle (débit).

Pour cela, nous avons structuré notre travail en 4 chapitres :

Chapitre 1 : le premier chapitre présente la description de notre secteur d'étude (géologie, hydrogéologie) et l'objectif qu'on veut atteindre en prenant en compte les études antérieure effectuées dans notre site.

Chapitre 2 : dans ce chapitre nous allons définir les deux méthodes géophysique utilisées

Chapitre 3 : est consacré au déroulement du travail dans le site et l'interprétation des données géophysique acquis on prenant en compte les résultats obtenus par l'hydrogéologue

Chapitre 4 : qui va discuter sur les résultats trouvés et est-ce que l'objectif de ce travail est atteint ou non

I. Chapitre 1 : Introduction du site d'étude

1 Introduction

La connaissance des paramètres hydrauliques et géologique est indispensable à toute étude portant sur les eaux souterraines et ayant pour objet de localiser, de caractériser et de protéger les ressources en eau.

Le but de cette étude géophysique est d'implanter le forage et localiser l'aquifère pour l'extraction et l'utilisation industrielle vu que ce domaine nécessite une grande quantité d'eau pour qu'il puisse se développer, donc on a besoin de voir si ça vaut la peine de faire un forage et d'exploiter ces nappes ou non, avec un débit moyen de 40 L/s soit 144 m³/Heure. La quantité totale sera délivrée à partir d'au moins deux points d'eau.

2 Objectif

Le but de ce travail consiste à appliquer la méthode géophysique de surface (Sondage électrique vertical) associée aux diagraphies (Polarisation spontanée, résistivité électrique normale et radioactivité Naturelle) et intégrer les méthodes hydrogéologiques afin de comprendre la dynamique des écoulements. L'objectif de ce travail est :

- Caractériser l'aquifère au niveau du site étudié en déterminant tout d'abord sa géométrie et ensuite sa structure. Les paramètres à déterminer sont la profondeur et le type de la nappe.
- Déterminer ses caractéristiques lithologiques et hydrauliques.
- Déterminer la qualité de fluide situé dans la nappe.

3 Secteur d'étude

3.1 Situation géographique :

La Wilaya d'Annaba se trouve à l'extrême Nord-est de l'Algérie.

Cette Wilaya est limitée au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est par la Wilaya de Taref, au Sud par la wilaya de Guelma et sur le côté Ouest par la Wilaya de Skikda.

La commune de Berrahal se trouve au WSW de chef lieu de la wilaya d'Annaba, limitée au sud par la commune d'El Eulma et celle de Chourfa, à l'ouest par la commune de Boumaiza (appartenant à la wilaya de Skikda), à l'est par Sidi Amer et au nord par les communes de Oued aneb et Treat, (figure1 annexe).

Notre secteur d'étude se trouve à environ 06 Km au Ouest-Sud Ouest de chef lieu de la commune de Berrahal et à environ 05 Km à l'Est de chef lieu de la commune de Boumaiza.[10]

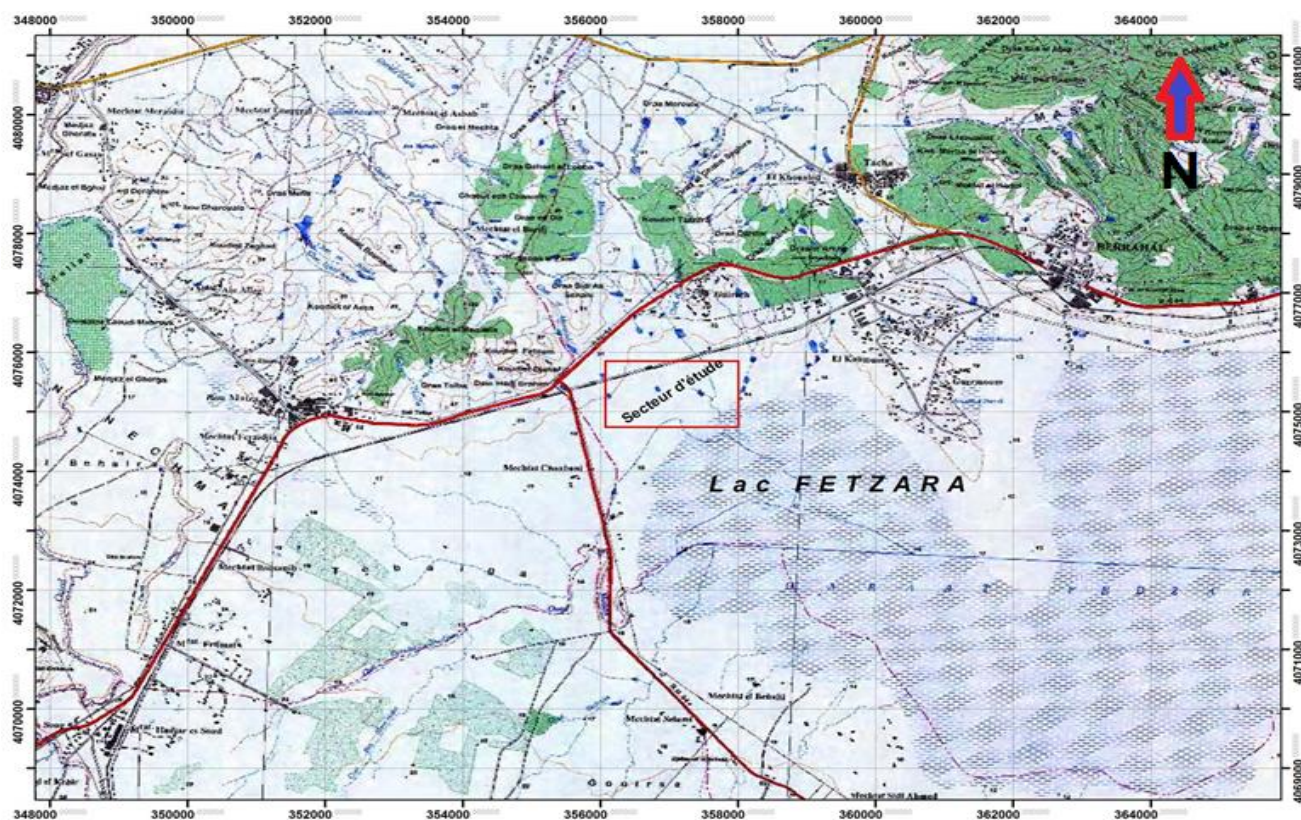


Figure I. 1 : positionnement du secteur d'étude.[1]

3.2 Climat :

Le climat de cette région est tempéré et caractérisé par un été chaud et sec ($T^{\circ}_{\text{moy}}=25,60^{\circ}\text{C}$) et un hiver doux et humide ($T^{\circ}_{\text{moy}}=12,60^{\circ}\text{C}$, voir annexe) avec une pluviométrie annuelle moyenne de 623 mm calculée sur une série de 19 années (1981-2000), (figure 2 annexe). Ces conditions climatiques favorisent le développement d'une végétation typique ou l'on rencontre une prédominance de cultures maraichères et quelques rares oliviers. On y trouve également des plantations d'eucalyptus près des agglomérations liées aux zones d'eau stagnante.[3]

3.3 Géomorphologie :

Le secteur d'étude présente l'extrémité nord ouest du lac Fetzara, il est sous la forme d'une plaine avec une altitude moyenne de 15 m.

En parcourant la région du lac Fetzara, nous distinguons deux formes geomorphologiques différentes, il s'agit des reliefs montagneux qui correspondent à la retombée de deux chaines montagneuses Djebel Edough et Belleleita au Nord et aux chaines telliennes (Nord Guelmien) au Sud, ces unités sont dues essentiellement à la tectonique ayant affectée la région pendant le

Cénozoïque et le Quaternaire, Ces unités appartiennent à deux sous bassins versants qui sont celui du lac Fetzara à l'Ouest et celui de l'Oued Meboudja à l'Est, comme le montre la figure I.2.[11]

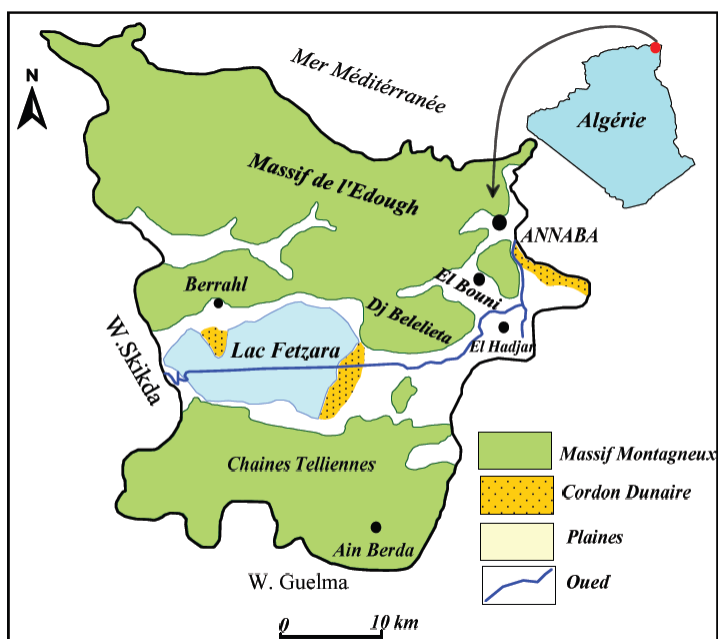


Figure I. 2 : géomorphologie du lac Fetzara et ses alentours. [4]

La cuvette de Lac Fetzara qui est la partie la plus basse d'un bassin versant endoréique présente deux extrémités Nord et Sud nettement dissymétriques, le Sud est caractérisé par la présence d'un véritable piémont avec quatre niveaux de glacis quaternaires étagés sur les grès ou les marnes.

En général, la morphologie du lac Fetzara est très simple :

- Une partie motagneuse, altitude >40m.
- Une terrasse fermée vers le centre du lac (10<altitude <20m)
- Une terrasse basse (altitude<10 m)
- La plaine qui occupe les deux tiers de la surface totale.

3.4 Hydrologie du secteur d'étude :

Les cours d'eau dans le secteur d'étude se résument sous forme de trois oueds (Figure I.3) :

- Oued el Hout au Sud
- Oued el Mellah à l'Ouest
- Oued Zied au Nord Est.

Ces cours d'eau sont caractérisés par un régime très irrégulier, torrentiel en hiver et sec en été.

La superficie subémérgée en Hiver est de l'ordre de 60 Km²[4]. Elle se réduit du mois de Juin jusqu'au septembre vu une pluviométrie faible à nulle durant cette période.

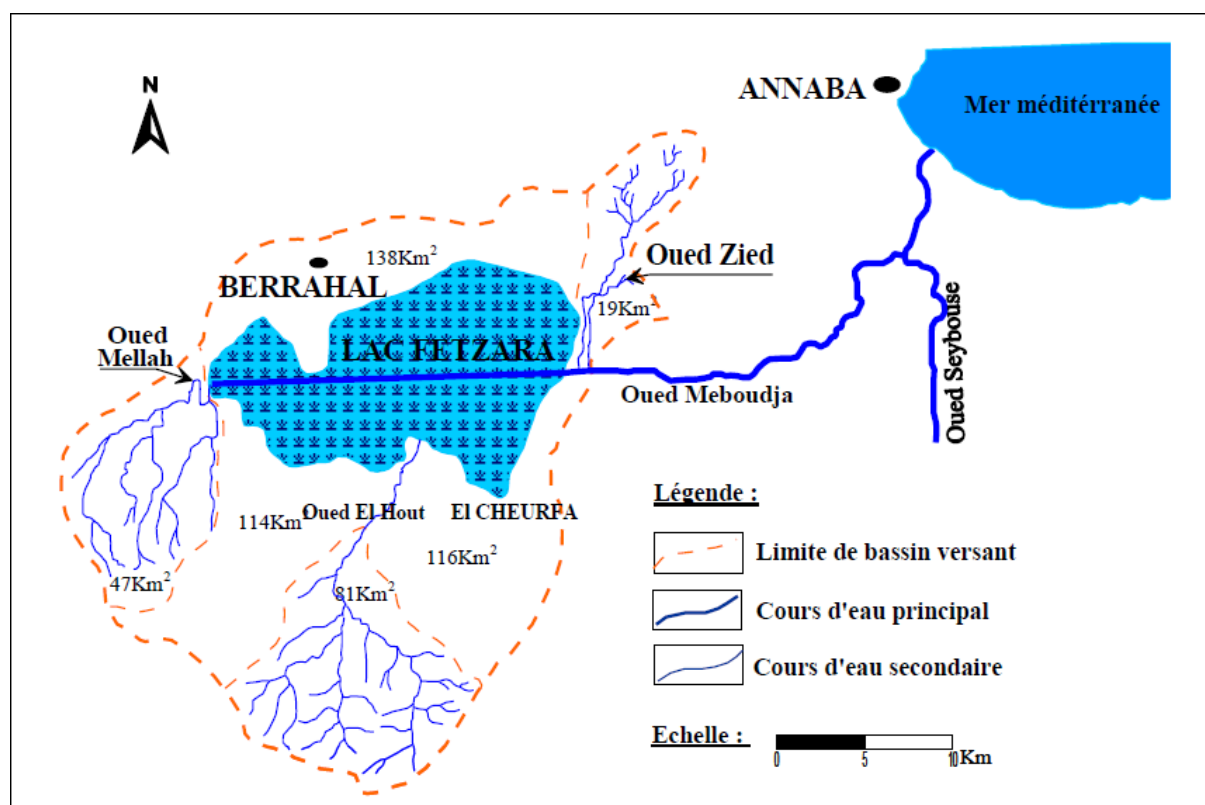


Figure I. 3 : Réseau hydrographique du Bassin Versant Lac Fetzara. [4]

3.5 Hydrogéologie :

● Générale :

Dans cette partie, la discussion à propos des unités hydrogéologiques et leur délimitation en fonction de leur emplacement par rapport au secteur d'étude (Est, Ouest, Etc...).

○ Nappes d'ANNABA :

Située à l'extrême Est et Nord Est de La zone d'étude et caractérisée par la présence de deux fossés (Ben Ahmed et Ben M'Hidi), Elle est composée de :

- Nappe Superficielle, contenue dans les formations sablo-argileuses, elle présente une continuité dans notre site d'étude sous forme de remplissage superficiel.
- Nappe des Graviers
- Nappe des massifs dunaires de Bouteldja
- Nappe des alluvions de la Haute terrasse, unité graveleuse et caillouteuse
- Nappe de Cipolins, présente dans notre secteur d'étude et visée par quelques forages.
- Nappe des Travertins, localisée dans le secteur compris entre Fardaous, la butte de Daroussa, Chbaïta et la ferme Hallalal Aïssa et non présente sur notre site.

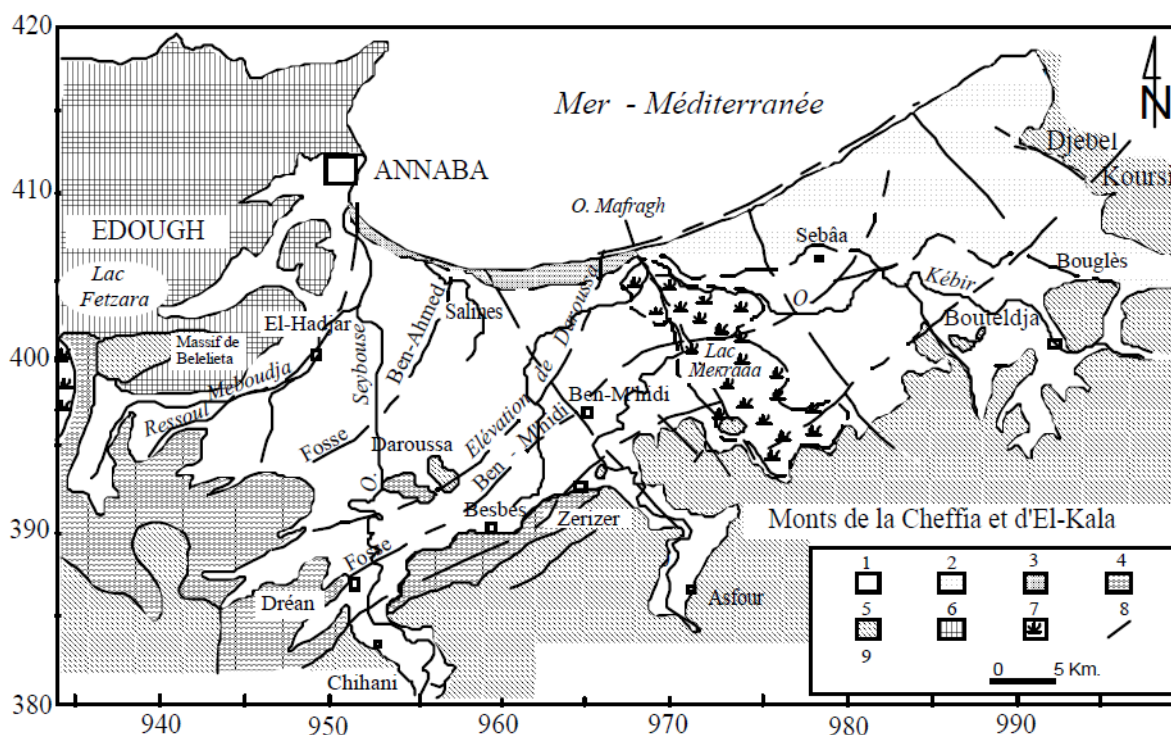


Figure I. 4 : Extension des différents aquifères dans les plaines d'Annaba-Bouteldja. [12]

1: Nappe des formations superficielles, 2: Nappe des sables du massif dunaire de Bouteldja, 3: Nappe des sables du cordon dunaire, 4: Nappe des alluvions de haut niveau, 5: Grès et argiles du Numidien, 6: Formations métamorphiques (nappe des cipolins), 7: Marécages, 8: Failles, 9: Fosses.

○ **Nappe de Guérbes :**

Située à l'extrême Nord-Ouest de notre secteur d'étude (plaine de Guerbés), il est composé de deux nappes superposées :

- Une nappe libre localisée au niveau des formations sableuses et dont l'épaisseur varie entre 15 et 37 m.
- Une nappe profonde surmontée par celle libre, contenue dans les alluvions et ayant une épaisseur variable entre 07 et 50 m.
- Il faut noter qu'il n'y a pas de relation entre la nappe de Guerbés et celle de Berrahal.

● **Locale Berrahal et Lac Fetzara :**

Pour identifier l'ensemble des formations aquifères et autres susceptibles d'être aquifères, on va s'intéresser des coupes techniques des trois forages BH-01, BH03 et Forage Guirche ainsi que les analyses géotechniques des sondages carottés du site (BH09, 11-16 et 20).

○ **Délimitation des aquifères à travers la région de Berrahal-Lac Fetzara :**

Vu l'absence de plusieurs données de forage dans la région, on a du interpréter les coupes techniques de trois forages de la commune de Berrahal dont un (Guirche) est très proche du site soit environ 200 à 300 m au nord du site.

On peut déterminer deux principales nappes de la commune (figure 3 annexe):

- La nappe libre constituée par des sables fins et des graviers, d'une épaisseur qui ne dépasse pas 10 m à l'Est de la zone d'étude. Elle atteint 20 m dans la zone de douar Guirche confirmé par le forage portant son nom. Son alimentation s'effectue à partir de la précipitation. Les collines situés au nord du site présente une ligne de partage des eaux dont une partie prend le chemin d'écoulement Nord-Sud vers la plaine et ensuite le Lac Fetzara. Cette nappe couvre toute la plaine de Berrahal

L'analyse des sondages carottés prouve que cette nappe continue jusqu'au moins 40 mètres de profondeur dans notre site avec un niveau statique très proche de la surface.

Le site d'étude présente une couverture à remplissage quaternaire d'au moins 40 m favorisant l'accumulation des eaux de ruissellement et leur infiltration en profondeur.

- La nappe des cipolins, c'est une nappe semi captive qui se localise au niveau des calcaires métamorphiques fissurés.

Dans la partie Est du site, elle est séparée de la nappe libre par une mince couche graveleuse (voir sondage carotté BH01-03). Elle a une faible épaisseur n'excédant pas les 05 mètres et se trouve à une faible profondeur de l'ordre de 13 m. les formations du Gneiss et Schistes constituent le substratum de cet aquifère.

Dans la partie Nord du secteur, elle devient captive avec une lithologie assez différente.

la coupe technique du forage GUIRCHE (Figure I.5), prouve qu'elle se trouve à une profondeur minimale de 75 mètres avec une épaisseur minimale de 05 mètres car le substratum Gneiss et schisteux n'était pas atteint dans ce forage. Dans cette zone, cette nappe est faiblement exploitée à cause de sa profondeur.

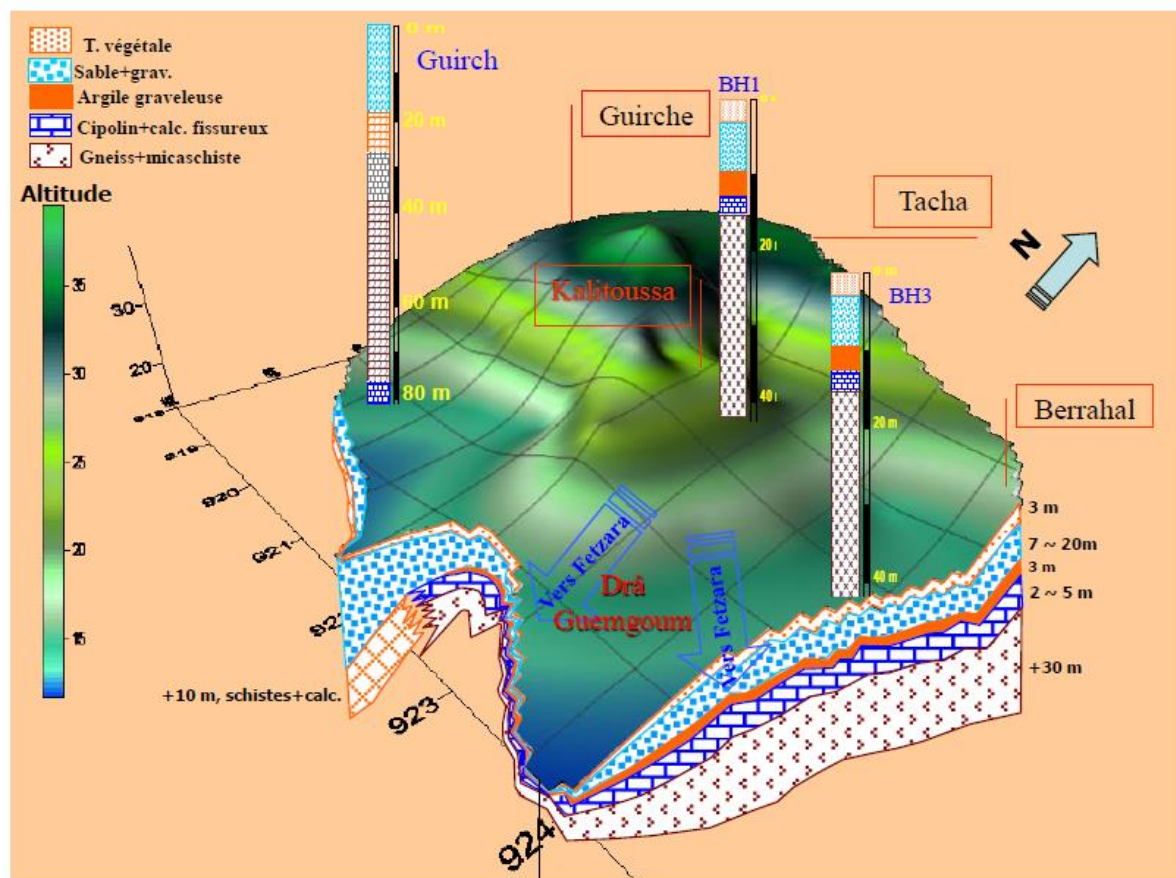


Figure I. 5 : Les aquifères à l'Est du Lac Fetzara. [10]

○ **Propriétés physiques et hydrodynamiques des aquifères de Berrahal-Lac Fetzara :**

Les trois forages implantés dans la région de Berrahal captant la nappe des cipolins (BH01-03 et Guirch) ont les caractéristiques suivantes :

Tableau I. 1 : propriétés Hydrodynamiques des forages. [10]

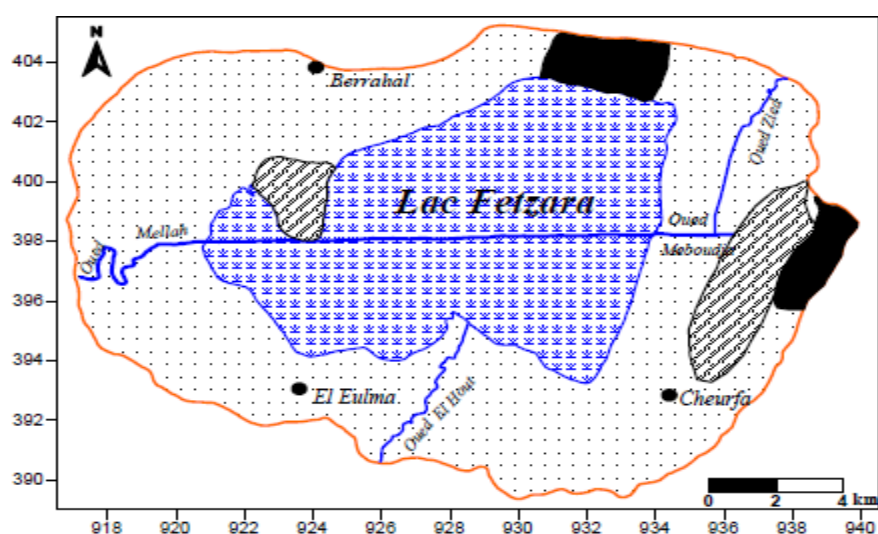
Forages	Coord.Lambert		Z(m)	Diamètre (mm)	Débit exploitable (l/s)
	X(m)	Y(m)			
BH1	922500	402600	20	305	10
BH3	924000	401500	20	305	10
Guirch	918850	401425	24	305	10

Vu que seul le forage GUIRCH est proche du secteur d'étude, on peut dire que le captage de la nappe à cipolins avec celle superficielle peut donner un débit de 10 L/s.

En regardant l'ensemble des rapport concernant les propriétés physiques du terrain carotté et qui correspond dans tous les cas à la nappe du remplissage quaternaire, on peut remarquer que :

- Des indices de saturations entre 45 et 55%
- Une porosité variable entre 18 et 46%.
- Une granulométrie fine des sables surtout celles à mélange sablo-argileux ce qui peut rendre la perméabilité de cet aquifère très faible selon la teneur en argile.[10]

Quelques données de perméabilité et de transmissivité prise des points d'eau captant le remplissage quaternaire à l'est du Lac Fetzara ainsi que sur la plaine d'Annaba sont mentionnées dans la figure I.6 et tableaux I.2 et I.3.



Légende:

- Sols peu perméables ($0.03 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ à $0.11 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$)
- Sols moyennement perméables ($0.11 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ à $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$)
- Sols perméables (supérieure à $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$)

Figure I. 6 : Carte de la perméabilité verticale des sols du lac Fetzara. [4]

Tableau I. 2 : Paramètres hydrodynamiques de quelques points à l'est du Lac Fetzara(nappe libre). [10]

	Coord.Lambert		Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)
	X(m)	Y(m)		
Nappe libre des sables et graviers	935600	395400	$14 \cdot 10^{-3}$	/
	930200	403650	$0.17 \cdot 10^{-3}$	/
	929600	392700	$1.3 \cdot 10^{-3}$	/
	946000	405800	/	$8.5 \cdot 10^{-4}$
	949000	401100	/	$14 \cdot 10^{-4}$
	950250	402900	/	$12.6 \cdot 10^{-4}$

Tableau I. 3 : paramètres hydrodynamiques des aquifères de la plaine. [10]

Aquifères	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)	Coefficient d'emmagasinement
Nappe des sables et graviers	10 ⁻³	10 ⁻³ a 10 ⁻⁵	10 ⁻²
Nappe des cipolins	5.10 ⁻³ a 5. 10 ⁻⁵	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁶	10 ⁻⁴

3.6 Cadre géologique :

- Aperçu Géologique Général :

Plusieurs études géologiques ont été effectuées sur la région d'Annaba dont l'ensemble montre à la fois l'affleurement des roches métamorphiques et éruptives au nord et nord ouest du Lac Fetzara (Edough, Belelieta et Bouhamra) et des terrains sédimentaires occupent le reste de la région au niveau des plaines

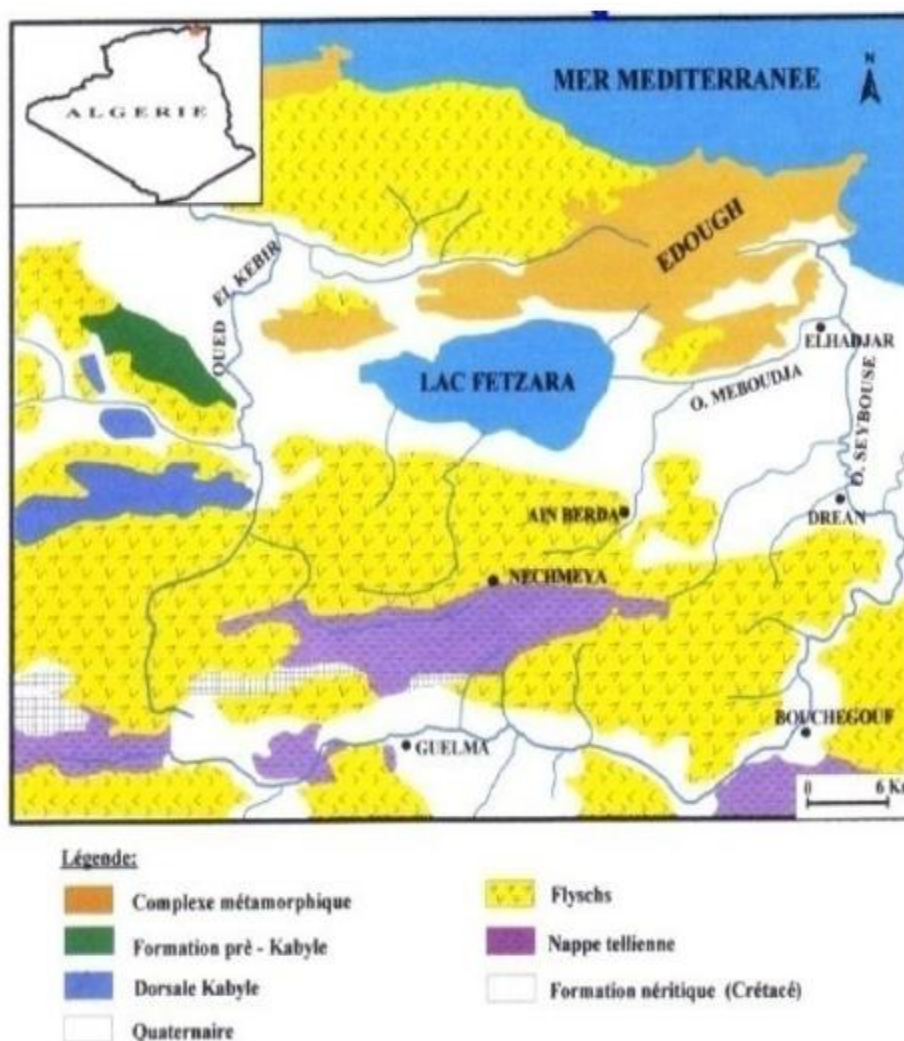


Figure I. 7 : Carte géologique du bassin versant du Lac Fetzara. [6]

Les affleurements géologiques sont datés du paléozoïque au quaternaire

Le paléozoïque affleure à l'ouest dans le massif d'Edough, Belleilita et Boukhadra. Il est constitué surtout de Gneiss.

Le mésozoïque affleure au sud de la zone d'étude vers la région de Guelma et Bouchegouf, il est constitué de :

- Le Trias, formé par une association de dolomies, calcaires dolomitiques et gypses.
- Le Jurassique, constitué de calcaires noirs et de shistes calcaireux.
- Le crétacé composé de calcaires dolomitiques à foraminifères.

Le cénozoïque représenté par l'éocène inférieur, l'oligocène et le mio-pliocène, ce dernier est formé par les faciès suivants :

- Le faciès fluvial, bien développé dans la plaine de Annaba dans les oueds.
- Le faciès marin (Plaisancien), Marnes bleues avec des intercalations calcaires.
- Le faciès continental, liée aux dépôts des fossés d'effondrement de Ben Ahmed et Ben M'Hidi orientée SW-NE.
- Le Quaternaire, les formations dunaires alluvionnaires constituant les roches réservoirs.[11]

- **Géologie Locale :**

Dans cette partie, on va s'intéresser à la géologie affleurante au niveau de Berrahal ainsi qu'aux sondages carottés réalisés.

- **Géologie de Berrahal :**

L'examen de la carte géologique simplifiée de Berrahal (figure I.7) et (figure 7 voir annexe) peut nous donner les informations suivantes :

- **Les roches métamorphiques divisées en trois unités**
 - **Unité basale :** formée de Gneiss.
 - **Unité Intermédiaire :** formée par des micashistes à grenats avec des intercalations de cipolins ayant une épaisseur métrique à décamétrique.
 - **Unité supérieure :** composée de séricitochistes avec quelques bancs de cipolins.
- **Les roches Magmatiques**
- **représentés par des pegmatites à tourmalines.**
- **Les Roches Sédimentaires,** le quaternaire est caractérisé par des formations alluvionnaires occupant :
 - Les plaines de Tacha, constituées par des sols limono argileux et vaseux (Nord-ouest)

- La basse Vallée d'Oued Aneb, constitué par des limons, sables, galets et argiles.
- Le Lac Fetzara, des dépôts lacustres de type limoneux et argiles rouges.
- Les argiles, proviennent de l'altération des gneiss, schistes, mécaschistes et des argiles sous numidiennes.[6]

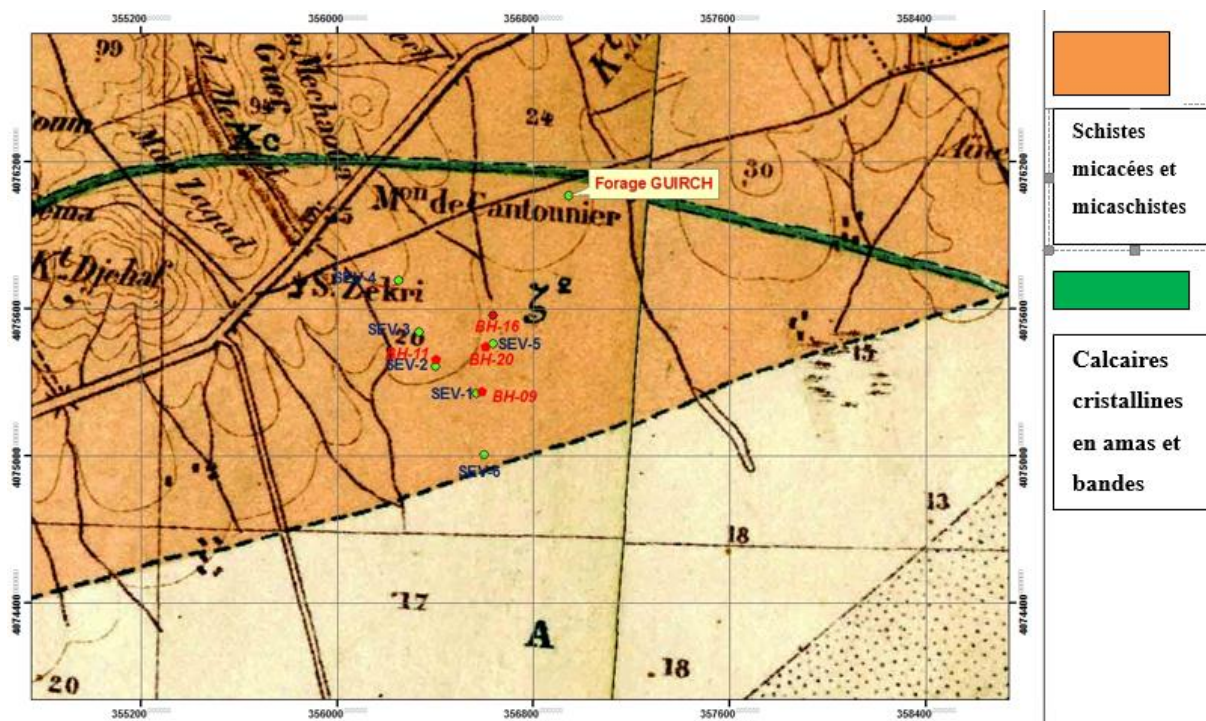
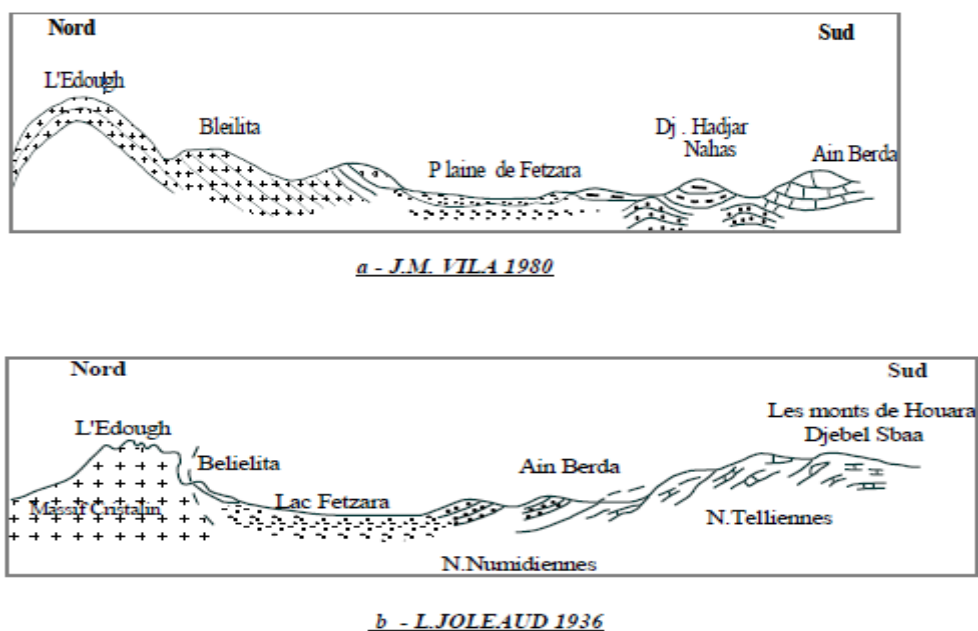


Figure I. 8 : géologie du secteur d'étude. [2]

Quelques coupes géologiques passant par le lac Fetzara entre le massif Edough et Ain Berda peuvent nous donner plus d'idées sur la répartition des différents couches de part et d'autre du lac (piémont Sud- piémont Nord), (Figure I.9)



Légende :

++++ ++++	Gneiss et Micaschistes
—●—●—●—●—	Grès Numidien
—■—■—■—■—	N. Telliennes (Marnes, Marno Calcaire)
—○—○—○—○—	Quaternaire
	Graviers-Galets
	Argiles - Sables
	Graviers - Sables

Figure I. 9 : coupes géologiques entre Edough et Ain Berda passant par le Lac Fetzara. [3]

La région de Berrahal forme une structure antiforme dont l'axe est sensiblement orienté NW-SE.

Les déformations cassantes sont deux types :

- Un réseau de failles conjuguées décrochantes verticales à subverticales et de direction générale NW-SE (N320°-330°) et NE-SW(N50°-60°).
- Des accidents chevauchants à pendage très faible.

4 Travaux antérieurs

- Sondages Carottés du Site :

Au niveau du site, des sondages carottés ont été exécutés au paravant dont l'implantation est représentée dans les tableaux suivants

Tableau I. 4 : lithologie du sondage BH20

SONDAGE BH 20	X=356 638 m
	Y=4 075 380 m
	Z= 17 m
Profondeur (m)	Lithologie
00-0,60	Terre végétale
0,60-8,60	argile sablo-graveleuse
8,60-25,40	Argile plus ou moins sableuse
25,40-26,65	Alluvions à grains moyens
26,65-40,00	Argile plus ou moins graveleuse

Tableau I. 5 : lithologie du sondage BH16

SONDAGE BH 16	X=356 638 m
	Y=4 075 380 m
	Z= 16,70 m
Profondeur (m)	Lithologie
00-0,6	Terre végétale
0,6- 1,20	Argile sableuse
1,20-5,00	Argile sableuse avec des concrétions carbonatés
5,00-6,00	Sable argileuse
6,00-22,30	Marne sableuse
22,30-40,00	Intercalation de Sable argileuse et marne sableuse

Tableau I. 6 : lithologie du sondage BH11

SONDAGE BH 11	X=356 463 m
	Y=4 075 337 m
	Z= 16,40 m
Profondeur (m)	Lithologie
00-0,8	Terre végétale
0,8- 3,40	Argile sableuse avec des concrétions carbonatés
3,40-7,60	Argile plus ou moins sableuse
7,60-22,70	Argile sableuse grisatre
22,70-28,80	Sable jaune fin
28,80-34,20	Argile grisatre plastique
34,20-40,20	Argile graveleuse

Tableau I. 7 : lithologie du sondage BH09

SONDAGE BH 09	X=356 463 m
	Y=4 075 337 m
	Z= 16,40 m
Profondeur (m)	Lithologie
00-1,95	Argile sableuse
1,95-5,20	Argile sablo-graveleuse avec des concrétions carbonatés
5,20-6,30	Sable argileux, ferme, jaunatre.
6,30-8,80	Marne grisatre
8,80-20,00	Sable marneux, lache
20,00-24,50	Sable fin jaunatre
24,50-32,00	Marne grisatre
32,00-34,50	Marne sableuse
34,50-39,00	Sable arglieux et graveleux
39,00-40,00	Sable moyen à grossier

5 Conclusion

Selon les travaux antérieures (sondages carottés, hydrogéologie, géologie) sur le secteur d'étude, deux nappes peuvent être distinguées et qui sont, la nappe du remplissage quaternaire située dans la plaine, ainsi que celle des cipolins captée par le forage GUIRCHA à environ 300 m au nord de notre secteur d'étude avec un débit de 10 L/s. le remplissage est plus épais par rapport au piémonts des collines (Nord et Est) confirmé par les sondages carottés avec la présence d'eau jusqu'au moins 40 mètres de profondeur avec un niveau statique très proche de la surface (-1.00 m /Niveau sol).

La nappe de remplissage sera forcément captée au niveau du site, il reste à confirmer la présence et la profondeur des cipolins (nappe semi-captive) qui sera prouvée à travers la campagne géophysique discutée dans les prochains chapitres

II. Chapitre 2 : méthode géophysique utilisé

1 Méthode électrique de surface

1.1 Introduction

- Définition :

La méthode électrique est une méthode de prospection géophysique appliqué à la surface, c'est la plus ancienne méthode de prospection utilisé, pour être précis il s'agit de la première méthode d'exploration du sous-sol, mise au point en 1911 par les frères Schlumberger qui ont créé leur entreprise dans le but de l'exploitation. Elle a d'abord été utilisée pour rechercher des minerais métalliques (conducteurs), des cavités (résistantes) et des fluides (eau, pétrole), cette méthode de prospection repose essentiellement sur l'interprétation de la résistivité électrique du terrain. Sachant que l'on ne peut pas procéder à cette mesure en laboratoire par un échantillon prélevé sur le terrain et qui est sorti de son environnement, il est nécessaire de la réaliser sur le terrain. C'est par la mesure d'une différence de potentiel d'une part et d'une intensité d'autre part que l'on accède à la valeur de la résistance, la profondeur d'investigation de cette méthode est cerné entre quelques centimètre a quelques centaines de mètres, il y'a 3 types de prospection électrique, trainé, sondage électrique vertical et tomographie.

- Objectifs de la méthode :

Le but de cette méthode est de découvrir les couches et la lithologie géologique, pour obtenir des informations concernant la résistivité du terrain. L'objectif principal de la présente étude est de vérifier l'applicabilité de la méthode des sondages électriques à la caractérisation des aquifères et des divers types de dépôts meubles à l'échelle locale, aussi la vérification de la capacité de la méthode à positionner l'aquifère dans la colonne géologique

1.2 Généralité

1.2.1 La Résistivité :

La résistivité ρ d'un milieu exprimée en (Ohm.m) est la propriété physique qui détermine la capacité de ce milieu à laisser passer le courant électrique, l'inverse de la résistivité est la conductivité exprimée par (Ohm.m)⁻¹

La relation entre le champ électrique dans un conducteur et le courant provoqué par ce champ ou encore entre le courant électrique, la tension et la résistance est exprimée par la loi d'Ohm. [5]

$$V = R.I \quad (2.1)$$

Avec V est le potentiel en volte entre les extrémités des conducteurs de résistance R en (Ohm) et I est l'intensité du courant en (ampères).

De plus dans un conducteur :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2.2)$$

Où L est la longueur du conducteur en mètres et S est la section en mètres carrés et ρ est la résistivité en (Ohm.m).

On divise l'Equation (2.2) sur L alors :

$$\frac{\Delta V}{L} = \frac{\rho I}{S} \quad (2.3)$$

Dans le cas d'un espace infini, homogène et isotrope :

$$V = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (2.4)$$

Dans le cas d'un demi-espace homogène :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.5)$$

Dans le cas d'un demi-espace hétérogène on obtient

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.6)$$

Avec : K : facteur de géométrie qui dépend du dispositif utilisé

ρ_a : Résistivité apparente

1.2.2 Loi d'Archie :

Dans le cas d'une roche saturée, ARCHIE a établi une relation expérimentale liant la résistivité de la roche à la porosité et à la résistivité de l'eau d'imbibition.

La résistivité électrique d'une formation poreuse en fonction de la porosité, du taux de saturation et des caractéristiques électriques du fluide d'imbibition. Une loi expérimentale décrit cette relation

$$\rho_r = \rho_w a \phi^{-m} \quad (2.7)$$

Avec : ρ_w = résistivité de l'eau d'imbibition, ϕ = porosité, a = facteur qui dépend de la lithologie et qui varie entre 0.6 et 2 ($a < 1$ pour les roches à porosité inter granulaires et $a > 1$ pour les roches à porosité de fracture), m = facteur de cimentation (Il dépend de la forme des pores, de la compaction et varie entre [1-3] pour les sables non consolidés et à 2,2 pour les calcaires cimentés). [5]

La loi d'Archie a été établie pour des roches saturées en eau, il faut maintenant tenir compte d'un nouveau paramètre qui est **la saturation**. La loi d'Archie devient alors

$$\rho_r = F \rho_w S_w^{-n} \quad (2.8)$$

Donc on peut écrire la saturation par la relation suivante

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{F \rho_w}{\rho_r}} \quad (2.9)$$

F= facteur de formation, ρ_w = résistivité de la roche saturée en eau, ρ_r = résistivité de la roche désaturée en eau, $n \approx 2$. L'exposant n varie très peu avec les formations, sa valeur est environ de 2 pour la plupart des formations de porosité normale dont la teneur en eau est comprise entre [20-100]%

1.2.3 La porosité :

C'est la fraction du volume d'une roche non occupée par des éléments solides

Ainsi, la porosité s'exprime par. [8]

$$\Phi = \left(\frac{\rho_r}{a \rho_w S_w^{-1}} \right)^{-\frac{1}{m}} \quad (2.10)$$

Si la formation est saturée en eau alors $S_w = 1$, la porosité est reliée à la résistivité par :

$$\Phi = \left(\frac{\rho_r}{a \rho_w} \right)^{-\frac{1}{m}} \quad (2.11)$$

Cette Equation (2.9) est vraie pour une formation aquifère saturée et propre, dénuée d'argiles

Pour une formation aquifère saturée et propre donc on trouve la relation suivante :

$$\Phi = \left(\frac{\rho_r}{0,62 \cdot \rho_w} \right)^{-\frac{1}{2.15}} \quad (2.12)$$

On a l'habitude de regrouper sous le terme de facteur de formation

$$F = a \Phi^{-m} \quad (2.13)$$

A la fin on obtient la loi d'Archie :

$$\rho_r = F \rho_w \quad (2.14)$$

1.2.4 La perméabilité :

La perméabilité est la faculté que possède un corps de se laisser traverser par un fluide. Cette propriété est généralement exprimée numériquement par le coefficient de perméabilité K de « DARCY ». Il n'y a aucun rapport direct entre la porosité et la perméabilité, mais pour être perméable la roche doit obligatoirement être poreuse.

$$Q = K.S \frac{H}{e} \quad (2.15)$$

Avec : Q = débit (m³/sec), S = section de la colonne de sable (m²), H = hauteur de la charge d'eau (m), e = hauteur de la colonne de sable (m), K = facteur de proportionnalité appelé coefficient de perméabilité de « DARCY » (m/sec ou cm/sec)

1.3 Principe de mesure :

Le principe de cette méthode est simple, elle consiste à injecter un courant continu à travers deux électrodes d'injection A et B, ensuite on mesure la différence de potentiel résultante avec deux électrodes de mesure M et N

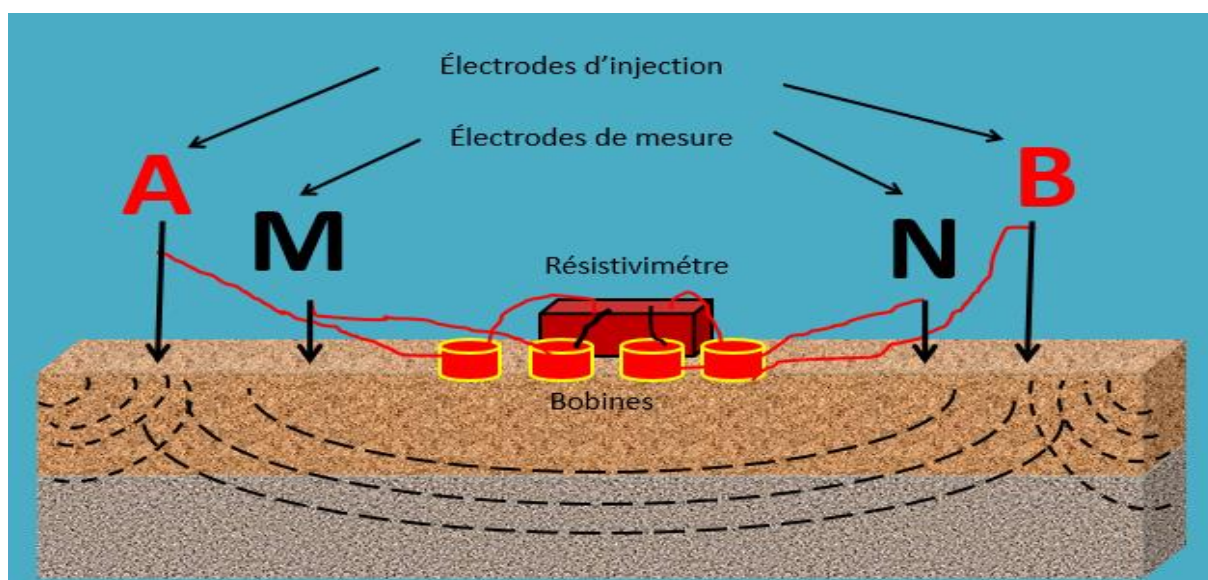


Figure II. 1 : principe de mesure électrique

1.4 Dispositifs de mesure

- Schlumberger : Dans le dispositif Schlumberger, les électrodes de mesure sont immobiles au centre du dispositif et on fait varier l'écart entre les électrodes d'injection. On obtient ainsi un sondage de la résistivité en profondeur sous le centre du dispositif.

1.5 Profondeur d'investigation

Quel que soit le dispositif employé, il est caractérisé par une certaine profondeur d'investigation et un certain pouvoir de résolution. La figure II.2 donne pour quelques dispositifs les profondeurs d'investigation et le pouvoir de résolution.

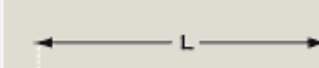


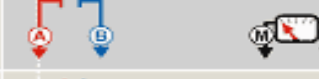
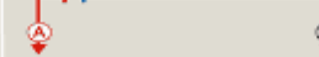
Dispositifs		Prof. d'investigation		Pouvoir de résolution
		Roy (1971)	Barker (1989)	
Wenner		0.11L	0.17L	1/2.25
Schlumberger		0.125L	0.19L	1/2.45
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L	1/3.45
Pôle-Pôle		0.35L		1/8.4

Figure II. 2 : Profondeur d'investigation des dispositifs. [13]

1.6 Sondage électrique vertical (SEV)

Le sondage électrique vertical permet de déterminer la disposition verticale de la résistivité des profils étudiés, pour obtenir cette résistivité on injecte un courant électrique d'intensité connue (I) lu sur un ampèremètre, en utilisant deux électrodes A et B (électrodes d'injection) qui doivent être en contact avec le milieu. Le passage du courant dans le milieu va créer un déplacement des charges électriques (ions et électrons), charges positives vers le pôle négatifs, et les charges négatives vers le pôle positif pour rétablir l'équilibre du milieu. Chaque matière a une capacité à mettre en mouvement ces charges libres lors de présence d'un courant, tout dépend de la conductivité de la matière. Le mouvement des charges électriques va créer une différence de potentiel (Δv) qu'on mesure par un voltmètre, entre deux points M et N qui sont les électrodes de mesure plantée. On augmente la distance entre les électrodes d'injection A et B en parallèle avec les électrodes de mesure M et N pour obtenir une différence de potentiel mesurable. La connaissance des paramètres intensité de courant injecté (I) et la différence de potentiel (Δv) et le facteur géométrique nous permet d'obtenir la résistivité apparente du sous-sol.

1.7 Avantage et inconvénient de la méthode

L'un des principaux avantages de la méthode électrique est la possibilité de modifier la géométrie des électrodes et donc la forme des lignes de champ créées dans le sol. Le plus souvent, on joue sur l'écartement des électrodes. Plus les électrodes de mesure sont écartées, plus le volume de sol pris en compte est important. La profondeur d'investigation est de ce fait directement proportionnelle à l'écartement des électrodes. Cette profondeur peut être estimée proche de la distance qui sépare les électrodes. Donc un écartement d'électrode de 1 m permettra une profondeur d'investigation proche du mètre. Si une structure archéologique se trouve à 1 m de profondeur, il faut donc opter pour un écartement des électrodes de mesure de 1 m. En faisant varier l'écartement des électrodes, il est donc possible d'obtenir des informations à des profondeurs différentes. Toutefois, plus les électrodes sont écartées, plus le volume de sol pris en compte est important donc la résolution des cartes de résistivité diminue.

La taille des structures détectées est donc également proportionnelle à l'écartement des électrodes.

L'inconvénient principal de la méthode électrique est la lourdeur et l'encombrement du matériel de prospection électrique. La nécessité d'injecter un courant dans le sol consomme beaucoup d'énergie et il est indispensable de transporter de lourdes batteries reliées aux électrodes par des mètres de fil électrique.

2 Méthode diagraphie de forage

2.1 Introduction :

La Diagraphie est une méthode géophysique de forage (destructive), elle consiste à enregistrer les variations des paramètres physiques de façon continue en fonction de la profondeur, la première diagraphie utilisée est la différée par les frères Schlumberger, Marcel et Conrad, et plus précisément ils ont fait la mesure de la résistivité en septembre 1927 à Pechelbronn (Figure II.3). Le résultat obtenu par la diagraphie se présente sous forme de courbe qui peut être graphique ou numérique.

● 1927: First electrical log in Pechelbronn, France

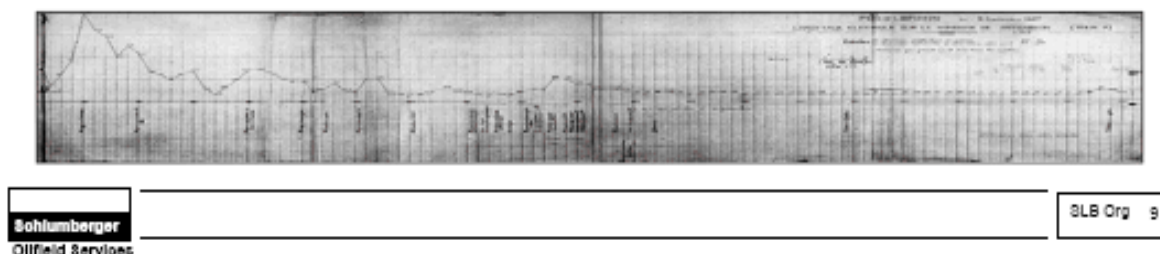


Figure II. 3 : premier log enregistré. [14]

Les diagraphies utilisées actuellement pour l'évaluation d'un puits sont, Diagraphies instantané, Diagraphies différées et Diagraphie de production.

- **Objectif :**

Les diagraphies offrent la possibilité de caractériser les différents constituants du sous-sol, et son principale objectif est de déterminer les caractéristiques des réservoirs et le type et la quantité d'un fluide qui se trouve à l'intérieure de ces réservoirs.

- **Principe :**

Après avoir effectué un forage, la diagraphie consiste à donner les caractéristiques des roches traversées à l'aide de différentes sondes. Certaines techniques de diagraphies utilisent différente

sources tout dépend l'objectif voulu. Il existe des diagraphies instantanées, les caractéristiques de la formation étant alors enregistrées pendant le forage (logging while drilling). Il existe également des diagraphies différées, les caractéristiques de la formation étant enregistrées cette fois après le forage. Les outils de mesures sont alors descendus dans le sondage.

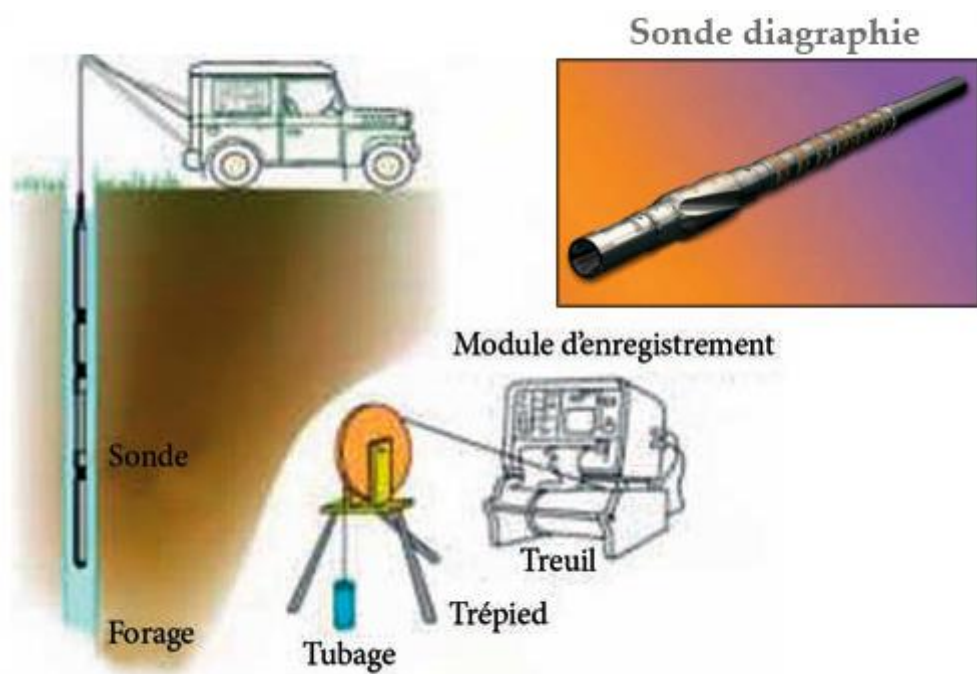


Figure II. 4 : schéma de l'acquisition. [8]

2.2 Les moyens techniques d'enregistrement :

- **Un treuil** volumineux et puissant sur le tambour duquel sont enroulés plusieurs centaines de mètres de câble. Le câble est un organe essentiel dont le rôle est à la fois mécanique et électrique. Fixé à une extrémité du tambour, il se termine à l'autre extrémité par un raccord rapide qui permet la connexion mécanique et électrique avec l'outil descendu dans le trou de forage. Le câble assure la transmission, vers l'outil et l'unité de commande
- **Les circuits de contrôle et de commande** une console d'acquisition, elle assure la mesure. Elle est connectée à un pc
- **Les outils**, ce sont les appareils que l'on descend dans le trou de forage, à l'extrémité du câble L'outil d'enregistrement utilisé en diagraphie est appelé sonde, elle est constituée de plusieurs modules électroniques englobé par un des matériaux peuvent résister à des températures extrême. [7]

2.3 L'invasion :

D'une manière générale, la présence du fluide de forage est génératrice de perturbations. Dans le cas le plus général, les formations forées contiennent des fluides (eau et pétrole) qu'il est important de maintenir en place afin d'éviter leur venue en surface. Pour cela, la boue de forage, en phase liquide, exerce une pression hydrostatique supérieure à la pression des formations et des fluides qu'elles contiennent dans ces conditions, il se produit une filtration de la phase liquide et des substances dissoutes dans la formation. C'est le filtrat de boue. Les particules dispersées s'accumulent sur les parois du trou, formant le dépôt de boue. C'est le mud cake. (Figure II.5 et figure 5 annexe) Ce dernier a une épaisseur qui varie entre 3mm et 2.54cm. [8]

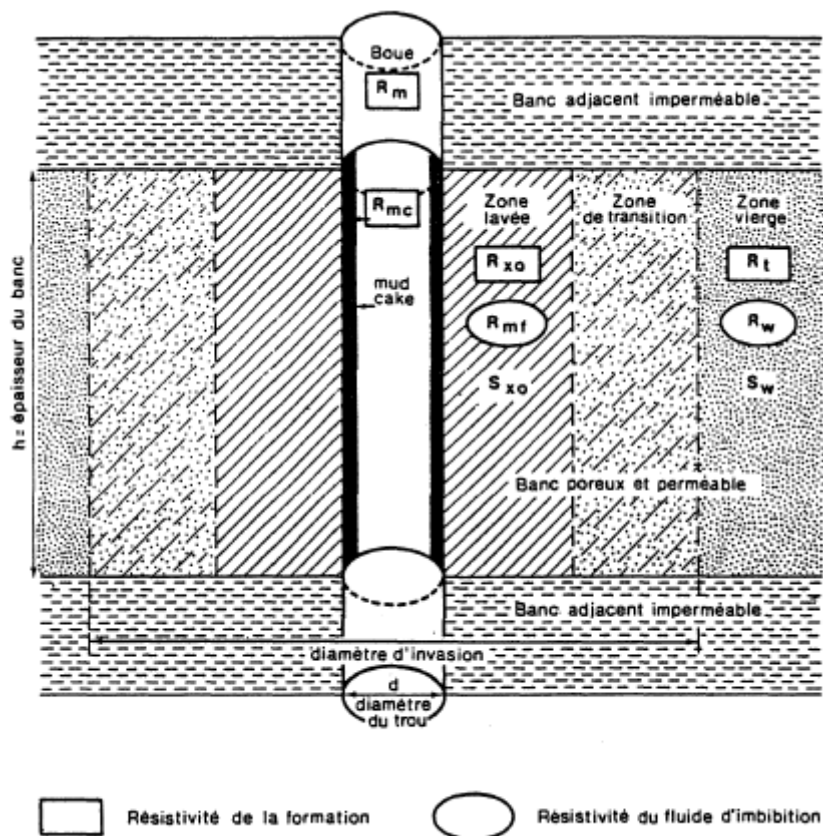


Figure II. 5 : Représentation schématique de l'invasion. [14]

2.4 Diagraphie polarisation spontanée (PS)

2.4.1 Introduction :

La polarisation spontanée est créée naturellement sans source de tension (Figure II.6). Le potentiel mesuré en millivolt est dû essentiellement aux échanges ioniques entre l'eau de formation et la boue de forage, (Salinité de l'eau de formation et de la boue de forage sont différents) donc $R_w \neq R_{mf}$

Avec

R_w : Résistivité de l'eau de formation

R_{mf} : Résistivité de la boue de forage

- Valeur de la déflexion :

$$PS [mV] = -K \cdot \log\left(\frac{R_{mfe}}{R_w}\right) \quad (2.16)$$

R_{mfe} : Résistivité équivalente du filtrat

R_{we} : Résistivité équivalente de l'eau de formation

K : constante qui tient compte de la température, $K = 0.133 \cdot T (^{\circ}F) + 61$

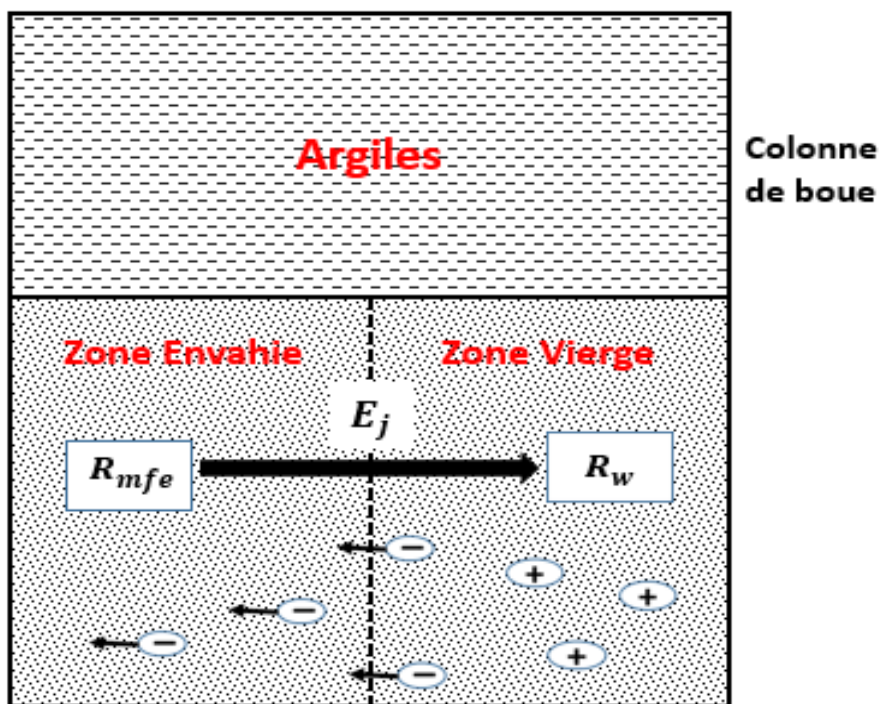


Figure II. 6 : principe de création de la PS dans le sous-sol.

2.4.2 L'objectif :

Le log PS nous permet de déterminer la lithologie du milieu, localiser le niveau du réservoir et calculer le pourcentage d'argile VSh dans ce réservoir, par les relations suivantes :

$$V_{sh}(\%) = \left(1 - \frac{PS}{PSS}\right) \cdot 100 \quad (2.17)$$

Ps : Valeur de la déflexion PS a la profondeur choisie

Pss : Valeur maximum de la déflexion PS dans l'intervalle considéré.

2.4.3 La mise en œuvre :

On mesure à l'aide d'un voltmètre la différence de potentiel entre deux électrodes, l'une mobile dans le trou et l'autre fixe en surface, le zéro est arbitraire, il s'agit de valeurs relatives.

L'échelle est donnée en millivolts par division, par convention, le positif est toujours à droite et le négatif à gauche.

Le log P.S. ne peut être enregistré que dans les forages contenant un liquide conducteur en contact avec les parois du trou.

2.4.4 Facteurs parasites :

Divers facteurs parasites peuvent affecter les mesures, ce sont :

- la nature des électrodes
- les courants parasites
- la dérive de la référence

2.4.5 Facteurs influençant la forme et l'amplitude des déflexions P.S. :

- **Influence de la salinité des fluides :**

La P.S. dépend essentiellement de la différence de salinité entre les fluides en présence, filtrat de boue et eau de formation.

Divers cas peuvent se présenter :

- Eau de formation plus salée que le filtrat de boue $R_{mf} > R_w$.

La P.S. est dite normale c'est le cas que nous avons envisagé jusqu'à présent.

Le positif est alors en face des argiles et le négatif en face des formations propres. La déflexion est d'autant plus marquée que le contraste des salinités est important.

- Eau de formation moins salée que le filtrat de boue $R_{mf} < R_w$.

Dans ce cas on obtient une P.S. dite inverse, le positif est en face des sables et le négatif en face des argiles. Ce phénomène se produit assez souvent en prospection hydrologique.

- Eau de formation de même salinité que le filtrat $R_{mf} = R_w$.

La P.S. est alors plate, l'enregistrement ne montre pas de différence entre les argiles et les bancs poreux et perméables.

- **Influence de l'épaisseur des bancs**

Les limites correspondent aux points d'inflexion de la courbe P.S.

Si le banc est épais la déflexion est maximum et montre une forme aplatie.

Si le banc est mince la courbe dessine un pic, le potentiel statique n'est pas atteint. Dans ce cas pour connaître la valeur maximale de la P.S. il faut utiliser des abaques qui permettent de corriger en fonction de l'épaisseur du banc. Epaisseur que l'on détermine sur des autres diagraphies.

Une augmentation du diamètre du forage diminue la déflexion P.S.

- **Influence de la résistivité**

Si les bancs perméables ont une résistivité élevée, les courants P.S. ont du mal à s'établir. Des abaques permettent de corriger cet effet.

- **Influence de la présence d'argile**

La présence d'argile dans un banc réservoir diminue l'amplitude de la déflexion P.S. L'atténuation est une fonction linéaire du pourcentage d'argile dispersée dans la roche. Cette propriété permet d'ailleurs de calculer le pourcentage d'argile présent dans un réservoir.

- **Effet de la perméabilité**

Les courants ne peuvent se développer qu'en présence de bancs poreux et perméables cependant l'amplitude de la déflexion P.S. n'est pas une fonction simple de la perméabilité ou de la porosité.

2.5 Diagraphie résistivité

2.5.1 Introduction :

Pour mesurer la résistivité électrique en forage le principe est le même que pour les méthodes électriques de surface et la résistivité apparente est obtenue par la formule suivante :

$$R_{app} = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (2.18)$$

Avec R_{app} est la résistivité apparente, et K le coefficient de sonde, le I est l'intensité du courant injecté, ΔV Différence de potentiel. Plus la distance entre les deux électrodes d'injection est grande plus la profondeur d'investigation de l'outil est grande

➤ **L'outil Monoélectrode :**

C'est un très bon outil qualitatif avec une très bonne définition verticale.

Il est utilisé dans la zone saturée en trou nu ou crépine en plastique, la sonde monoélectrode fournit un enregistrement de la variation de la résistance des formations en fonction de la profondeur. Sa profondeur d'investigation est faible.

- **Son Principe :**

Mesure de la résistance en ohms entre une électrode descendue dans le forage et une électrode de référence en surface.

Un courant électrique d'intensité constante est injecté entre une électrode de référence (B) située en surface et une électrode mobile dans le forage (A). La mesure du courant et de la variation de potentiel (ΔV) entre A et B fourni la résistance ohmique (R) entre ces électrodes, comme le montre la figure II.7.

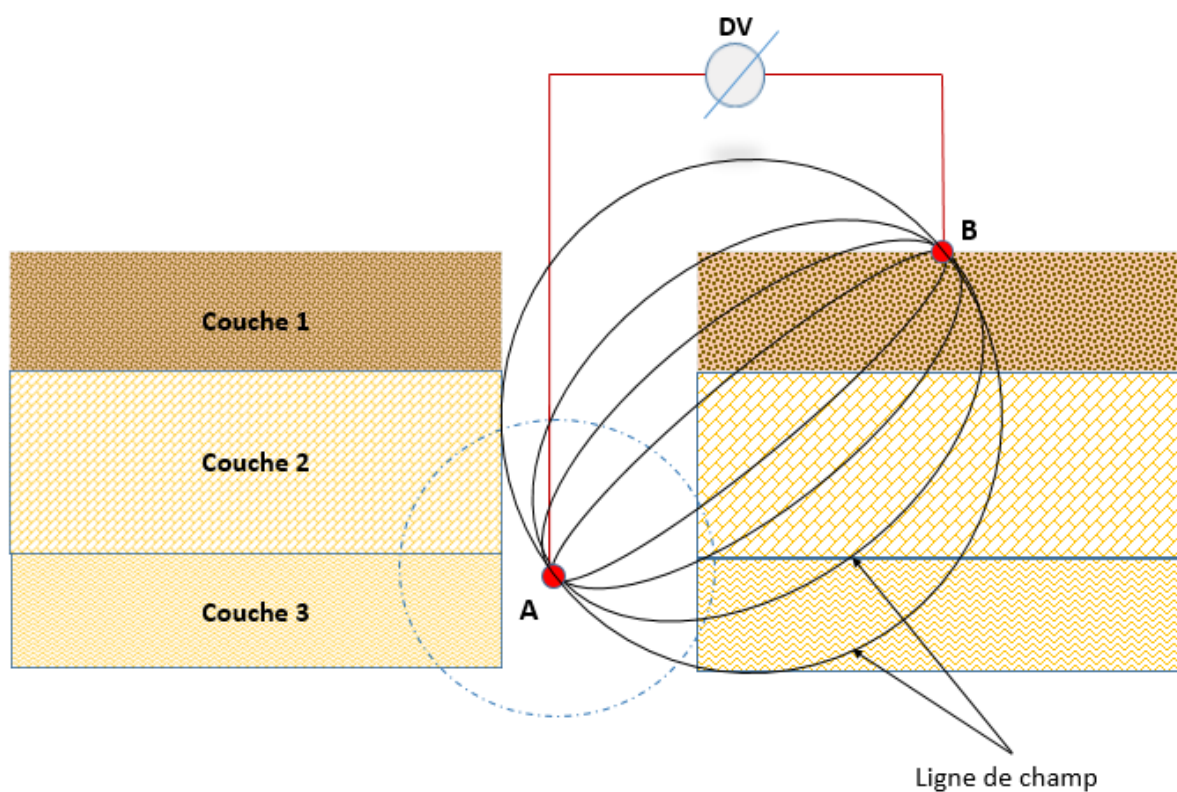


Figure II. 7 : Schéma du principe de la monoélectrode.

2.5.2 Les dispositifs normal et latérale :

- **Sonde normal :**

C'est une réalisation de la mesure selon une géométrie très simple. Le potentiel mesuré en M est issu de A, B et N étant considérés à l'infini. Le courant est maintenu constant, le potentiel mesuré varie avec R.

$$V = R.I \frac{1}{4\pi.AM} \quad (2.19)$$

Le point de mesure est O, Au milieu de AM. Le rayon d'investigation d'une telle sonde est égal à 2AM. Deux espacements sont utilisés dans la pratique, la petite normale (AM = 40 cm) et la grande normale (AM = 160 cm) figure II.8.

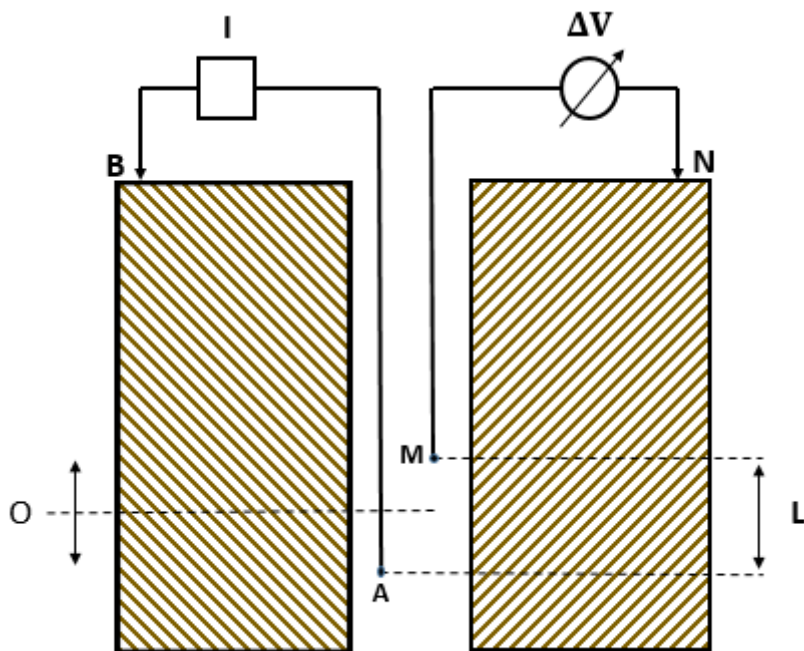


Figure II. 8 : Principe de la sonde normal.

- **Sonde Latérale :**

Dans ce dispositif, les deux électrodes de mesure M et N sont très proches l’une de l’autre dans le trou de forage. On mesure la différence de potentiel entre ces deux électrodes Le point de mesure est O, milieu de MN. ca profondeur d’investigation est égal à AO, figure II.9.

$$V = R.I \frac{MN}{4\pi.AM.AN} \quad (2.20)$$

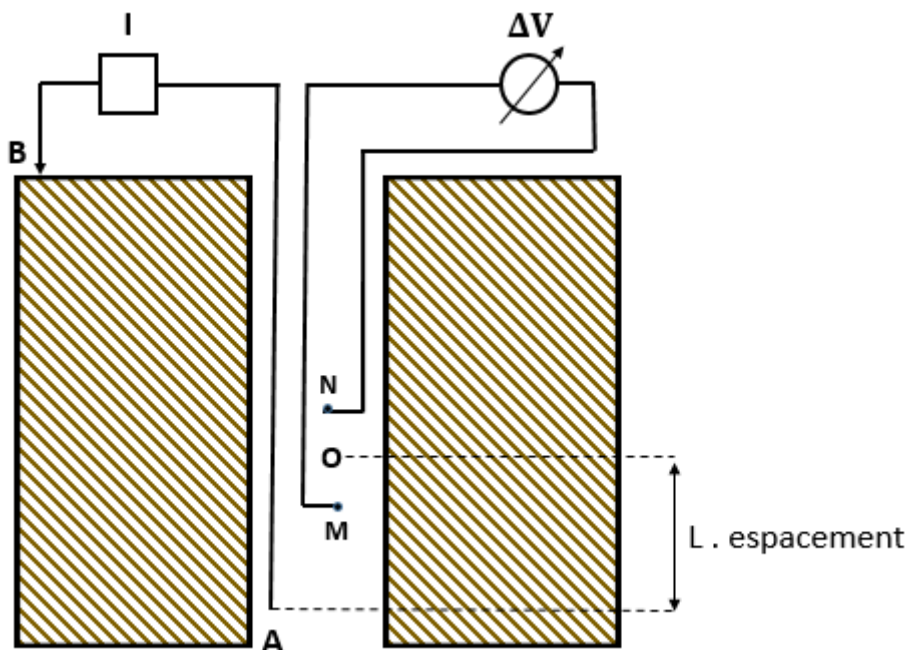


Figure II. 9 : Principe de la sonde latéral.

2.5.3 Réponse de la sonde normale et latérale :

- **La sonde normale :**

La résistivité lue est en général inférieure à la résistivité vraie. L'épaisseur des couches aux points d'inflexion est plus petite que l'épaisseur vraie d'une longueur AM dans le cas des bancs épais résistants, et plus grande que l'épaisseur vraie d'une longueur AM dans le cas des bancs conducteurs

Pour les couches minces résistantes il se produit un phénomène d'inversion la couche apparaît comme conductrice. Ce phénomène ne se produit pas pour les couches minces conductrices.

- **La sonde latérale :**

La sonde latérale fournit une courbe dissymétrique qu'il s'agisse de couches résistantes ou conductrices, la limite inférieure du banc est bien définie.

L'épaisseur dans le cas de bancs épais résistants est plus petite d'une longueur de dispositif AO (figure II.10). Dans le cas des bancs conducteurs épais cette épaisseur est exagérée de la longueur du dispositif AO. Si les couches ont une épaisseur suffisante on peut dire que la sonde latérale lit une résistivité proche de R_t . En effet si la couche est épaisse il existe un palier donnant la valeur de R_t . Pour les bancs minces il existe un certain nombre de règles empiriques qui permettent de trouver la résistivité.

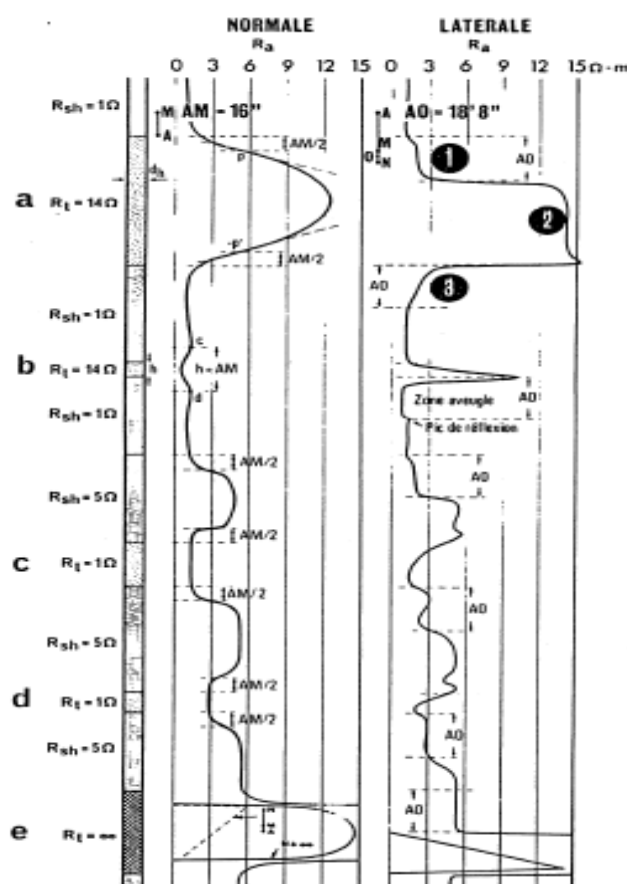


Figure II. 10 : Influence de l'épaisseur du banc et des résistivités en présence sur la forme des courbes normales et latérales. [7]

2.6 Diagraphie gamma ray :

2.6.1 Introduction :

Le log Gamma Ray est une mesure de la radioactivité naturelle qui correspond à la désintégration spontanée d'un noyau atomique conduisant à l'émission d'un rayonnement. Il existe trois sortes de rayonnements désignés par les lettres grecques α , β et γ . Les rayons γ , de nature ondulatoire et correspondant pour un noyau à la transition d'un état quantique à un autre avec émission d'un photon, sont beaucoup plus pénétrant que les rayons α et β et jouent un rôle essentiel dans la mesure de la radioactivité naturelle. Ils peuvent être enregistrés en trous ouverts ou tubés, vides ou remplis de n'importe quel type de fluide.

Dans les roches et les sols, trois éléments contribuent de façon prépondérante à la radioactivité γ , le potassium ^{40}K , le thorium ^{232}Th , l'uranium ^{238}U et dans une moindre mesure ^{235}U . [8]

2.6.2 Le paramètre enregistré :

La sonde utilisée lors de cette recherche détecte l'ensemble du rayonnement γ sans distinguer l'isotope qui lui a donné naissance.

Il existe plusieurs outils gamma ray, on peut en effet mesurer tout l'éventail des émissions gammas produites par la formation ou par un choix convenable de fenêtres d'énergie, faire une discrimination entre le rayonnement dû au potassium, celui dû au thorium et celui dû à l'uranium. On parle dans ce cas de spectrométrie gamma.

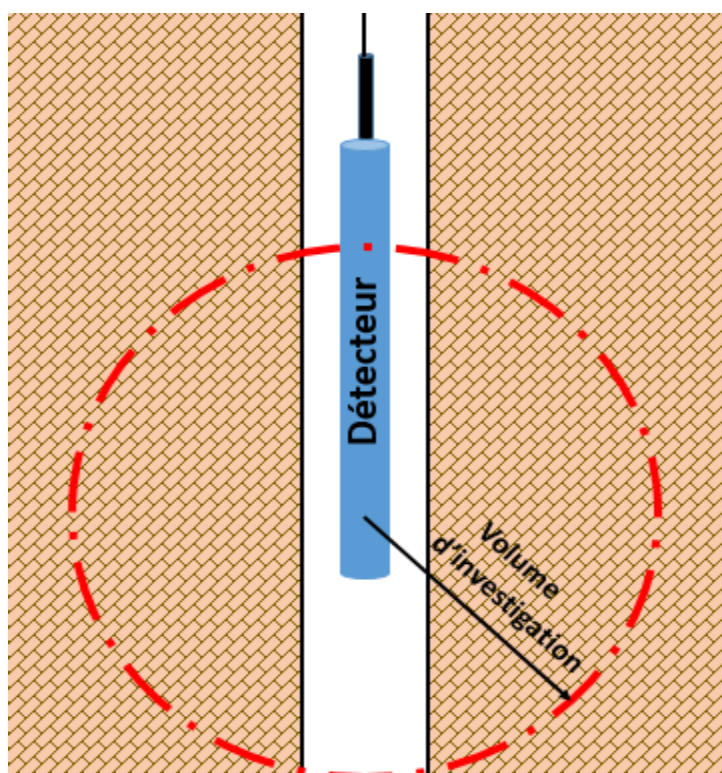


Figure II. 11 : Volume d'investigation du gamma ray.

2.6.3 Caractérisations des outils :

Les outils modernes utilisent un compteur à scintillation qui fonctionne de la façon suivante, un cristal scintillant (le plus souvent iodure de sodium activé au thallium) émet un photon lumineux lorsqu'il est atteint par un rayon gamma. Cette photo émission est transformée par un photomultiplicateur en une impulsion électrique amplifiée pour devenir mesurable. L'intensité de chaque émission lumineuse est proportionnelle à l'énergie des photons gammas qui l'ont produite. En définitive donc l'impulsion électrique mesurée est proportionnelle à l'énergie de la radiation gamma incidente, La sensibilité de ces compteurs est fonction de la taille et de la forme du cristal. Plus le cristal utilisé est grand, plus le nombre d'impulsions mesurées est important.

2.6.4 Objectif :

Le log gamma apporte des informations lithologiques et permet d'estimer le pourcentage d'argile dans les formations sableuses. Il met bien en évidence les niveaux imperméables qui sont souvent des bancs d'argiles. Contrairement au log PS qui a la même fonction, il peut être utilisé dans les forages tubés, en présence de boues résistantes et dans les forages remplis d'air, aussi il peut être utilisé pour la détection et l'évaluation de minerais radioactifs.

$$V_{sh} (\%) = \frac{GR_x - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} * 100 \quad (\text{Eq.2.21})$$

V_{sh} : pourcentage de volume d'argile

GR_x : La valeur de la radioactivité naturelle au point X

GR_{min} Et GR_{max} : valeur minimale et maximale de la radioactivité naturelle

III. Chapitre 3 : Partie pratique

1 Méthode électrique (SEV)

1.1 Limitation de profil :

Afin d'étudier la répartition horizontale des différents dépôts quaternaires, leur épaisseurs ainsi que l'estimation de la nature de leur substratum et voir si ce substratum présente une couche aquifère (calcaire cipolin), SIX sondages électriques verticaux ont été exécutés sur terrain dont la répartition est comme le montre la figure III.1, et dans la même direction ouest sud-ouest au nord-est vers le forage GUIRCH.

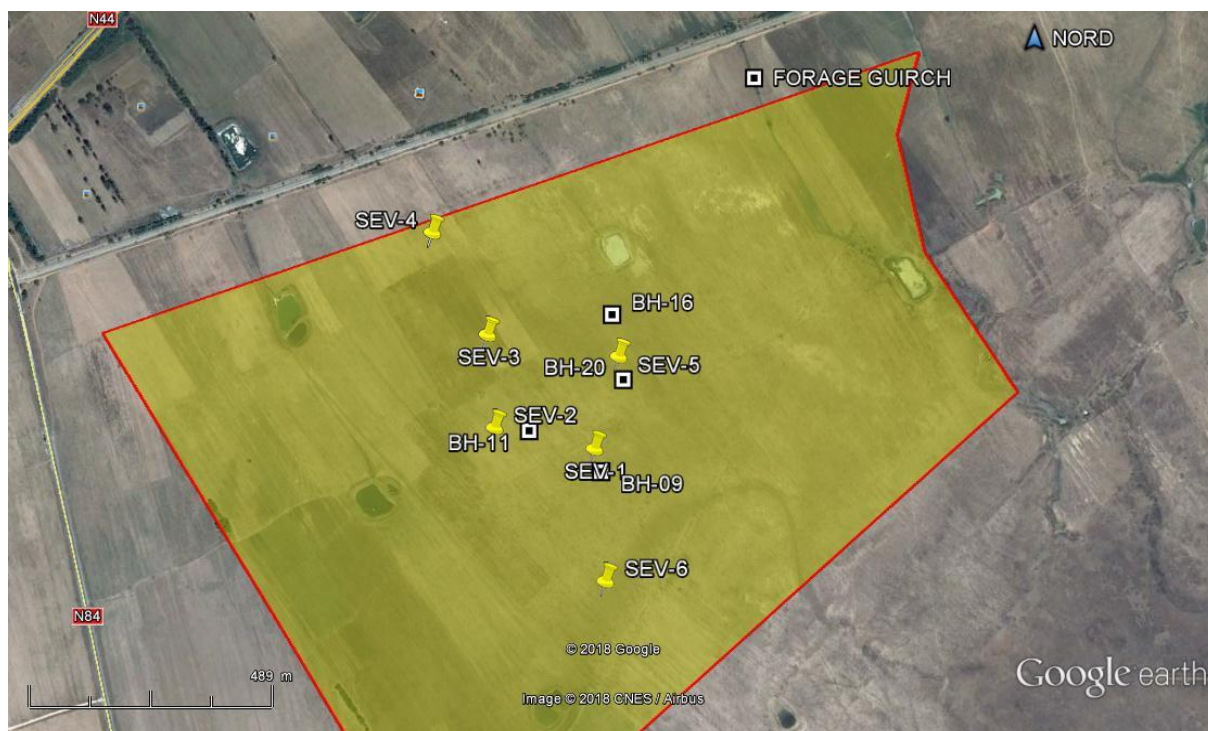


Figure III. 1 : Limitation des profils dans le secteur d'étude

1.2 Matériel et Dispositif utilisé :

Dans cette prospection électrique on a eu besoin de :



Figure III. 2 : Un Résistivimètre scintrex saris avec une batterie intégrée



Figure III. 3 : Electrodes

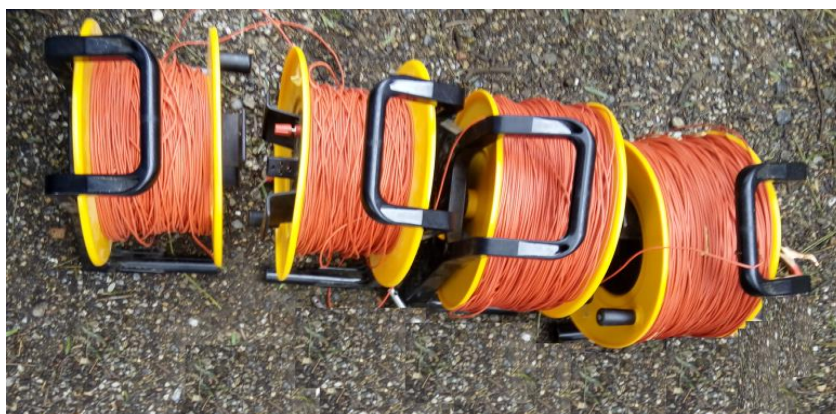


Figure III. 4 : Bobines de Câble



Figure III. 5 : Un mètre ruban



Figure III. 6 : des pinces de câble



Figure III. 7 : GPS ETREX (GARMIN)

1.3 Déroulement de travail :

Après avoir pris le temps pour l'observation du terrain et le déploiement du matériel, tout d'abord il faut faire un tableau qui contient plusieurs cases de mesure avec différentes distances pour les six sondages, ensuite on positionne le résistivimètre au milieu du terrain étudié. On mesure les écarts entre les électrodes ensuite on les implante. Après on branche les bobines des électrodes A, B, M et N, le résistivimètre injecte le courant dans les électrodes A et B, et mesure la différence de potentiel sur M et N. Ensuite on augmente l'espacement AB, et ainsi de suite pour aller jusqu'à 1000 mètre entre (AB) et 50 mètre entre (MN). Pour les très grandes longueurs de ligne, le ΔV mesuré serait trop faible. On effectue alors ce que l'on appelle un débrayage, appliqué avec le même AB pour deux MN successifs qui a une grande importance, car il permet de voir et parfois corriger les erreurs de la mesure de ΔV dus aux changements de MN. Le résistivimètre peut nous donner la différence de potentiel qui va être enregistrée dans la mémoire intégrée, aussi il peut nous donner la résistivité apparente directement comme dans notre cas, le dispositif utilisé est le Schlumberger.

1.4 L'acquisition des données :

On a fait 6 SEV différents, et chaque SEV est représenté par un tableau qui contient :

AB : La Distance entre les deux électrodes d'injection

MN : La Distance entre les deux électrodes de mesure

ΔV : Différence de potentiel entre les électrodes de mesure

I : L'intensité du courant électrique injecté

ρ_a : La résistivité apparente de la formation géologique

Les données des SEV sont représentées dans des tableaux (1 à 6 voir annexe)

● Remarque :

- Le SEV 4 à l'extrémité Nord du site, il va servir comme un sondage de calage sur le forage GUIRCH.
- Trois SEV chacun coïncide avec un sondage carotté afin d'estimer la résistivité des 40 mètres (obtenus des carottes) et voir si leur nature lithologique continue en profondeur et qui sont :

SEV-1 : corrélé avec BH09

SEV-2 : corrélé avec BH 11

SEV-5 : corrélé avec BH20

- Deux SEV de liaison :

SEV-3 : point de liaison entre les SEV 1-2 et 5 et le forage GUIRCH

SEV-6 : point de liaison des SEV 1-2-5-3 et la portion Sud du terrain.

1.5 Traitement des données et Interprétation :

Après avoir récolté les données sur le terrain on doit les traiter au bureau. Ensuite on intègre les données sur le logiciel IP2WIN, pour obtenir des graphes qui nous donne le nombre de couche et leur profondeur et leur propriété physique (résistivité apparente).

- **SEV 1** : Qui est calé sur le sondage carotté BH09, on obtient le résultat suivant :

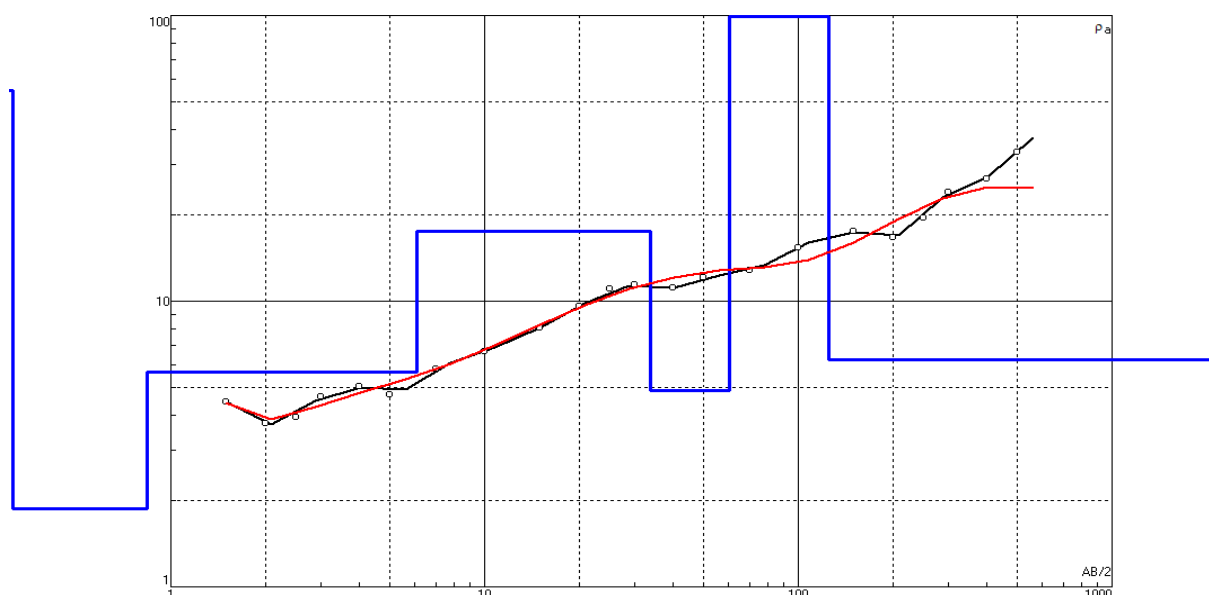


Figure III. 8 : Interprétation du SEV-1 par IPI2WIN

- De 00 à 01 m : terre végétale.
 - De 01 à 06 m : couche argileuse, localement marneuse.
 - De 06 à 33 m : couche sableuse à sablo-argileuse, prouvée par BH09. C'est la nappe superficielle. Résistivité = 17.6 ohm.m
 - De 33 à 60 m : couche argileuse de résistivité = 5 ohm.m. Selon les données du BH09, cette couche contient quelques éléments sableux.
 - De 60 à 125 m : couche très résistante, ce sont les calcaires schisteux y compris le banc à cipolins (R=230 Ohm.m)
 - A partir de 125 m : substratum conducteur.
- **SEV2** : Corrélé avec BH-11, l'interprétation des valeurs ρ_a nous donne :

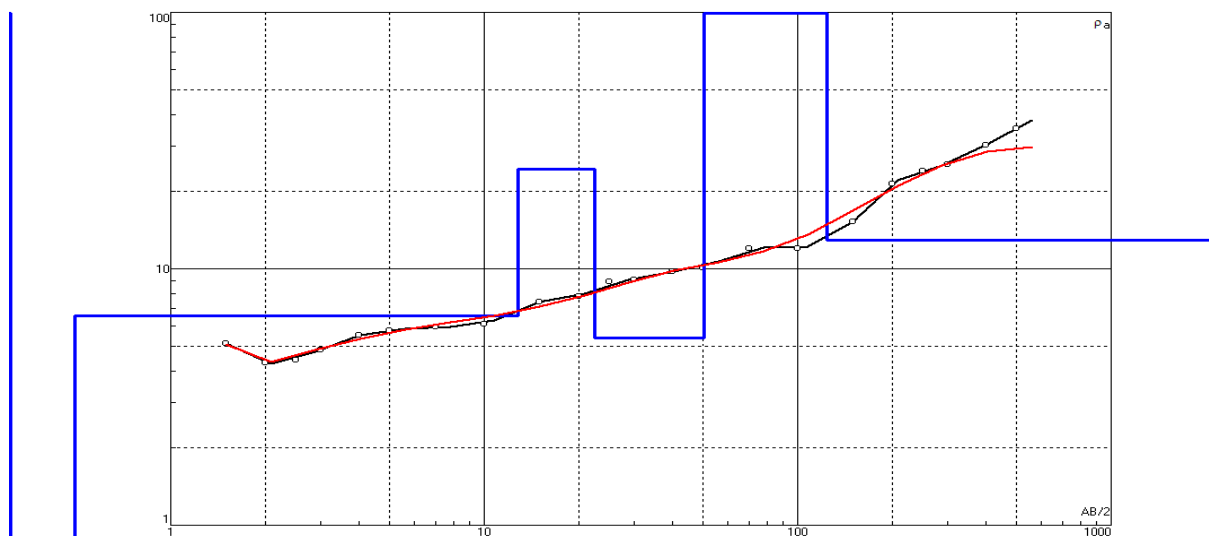


Figure III. 9 : Interprétation du SEV-2 par IPI2WIN

- Terre végétale sur 0.50 m
 - De 0.5 à 13 m : Une couche argileuse de résistivité 6.5 ohm.m
 - De 13 à 22.5 m : une couche sablo-argileuse de résistivité 24.50 Ohm.m, c'est l'aquifère superficiel prouvé sur le sondage BH-11. Sa résistivité est proportionnellement faible par rapport à SEV-1 à cause des éléments argileux plus abondants (voir coupe technique BH-11).
 - De 22.50 à 50 m : Une couche argileuse de résistivité 6 Ohm.m, le sondage BH-11 prouve l'existence de cette couche argileuse. Malgré la présence de quelques éléments graveleux au niveau de cette couche, la faible résistivité est liée à l'abondance des argiles (estimée plus de 90%).
 - De 50 à 124 m : une couche très résistante avec une RES = 170 ohm.m, ce sont les calcaires schisteux y compris le banc à cipolins.
 - A partir de 124 m : un substratum conducteur de Res = 12 ohm.m.
- **SEV 3** : L'interprétation du SEV-3 nous a montré la succession suivante :

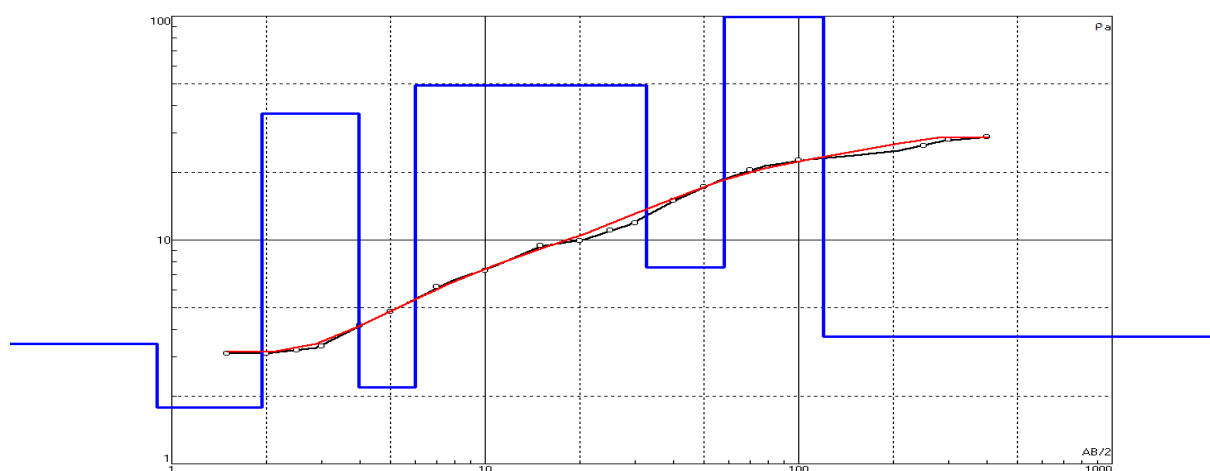


Figure III. 10 : Interprétation du SEV-3 par IPI2WIN

- De 00 à 04 m : Terre végétale de type argileux, le niveau résistant de 2 à 4m peut correspondre à une lentille graveleuse imbibée d'eau, 20 Ohm.m.
- De 04 à 06 m : couche superficielle argileuse de résistivité 10 Ohm.m.
- De 06 m à 32.7 m : couche sableuse faiblement argileuse, aquifère superficiel de résistivité 50 Ohm.m.
- De 32.7 à 58 m : couche argileuse ayant une RES= 7.5 Ohm.m.
- De 58 à 120 m : couche très résistante ayant une Résistivité de 158 Ohm.m, c'est la succession des calcaires schisteux qui peuvent avoir cette résistivité incluant le banc à cipolin.
- A partir de 120 m : un substratum très conducteur.
 - **SEV 4** : Le sondage électrique SEV-4 a été interprété en liaison avec le forage GUIRECH, le travail avec le logiciel nous a fourni les éléments suivants :

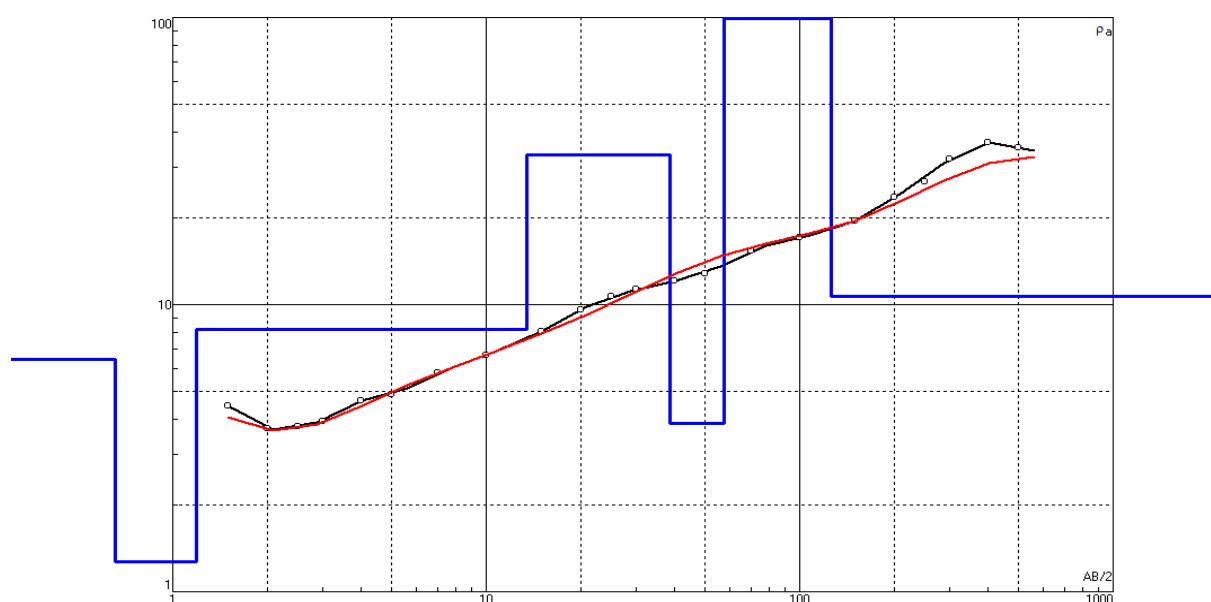


Figure III. 11 : Interprétation du SEV-4 par IPI2WIN

- De 00 à 1.20 m : Terre végétale.
 - De 1.20 à 13.50 m : couche argileuse.
 - De 13.50 m à 38.6 m : couche sablo argileuse de résistivité 33 Ohm.m, c'est l'aquifère superficiel.
 - De 38.6 à 57.4 m : couche argileuse de faible résistivité R= 3.86 Ohm.m.
 - De 57.4 à 126 m : couche très résistante avec RES= 231 Ohm.m.
 - A partir de 126 m : un substratum conducteur.
- **SEV 5** : Calé sur le sondage carotté BH-09, son interprétation nous a donné les éléments suivants :

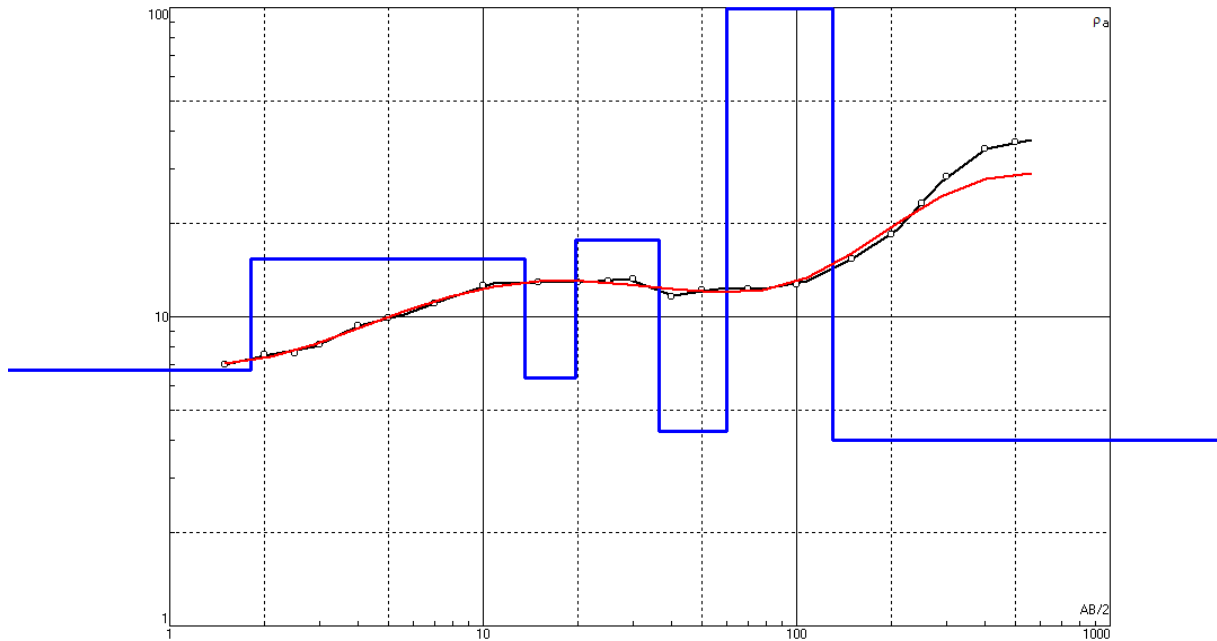


Figure III. 12 : Interprétation du SEV-5 par IPI2WIN

- De 00 à 02 m : terre végétale
- De 02 à 13.6 m : couche sablo argileuse de résistivité 15.40 Ohm.m
- De 13.60 à 20 m : couche argileuse de résistivité 06 Ohm.m
- De 20 à 36.30 m : couche sablo-argileuse de résistivité 18 Ohm.m, elle peut contenir des intercalations argileuses mais à très faible épaisseur.
- A partir de 36.30 à 60 m : couche argileuse à très faible résistivité ($R=4.26$ Ohm.m).
- De 60 à 130 m : couche très résistante ayant une Résistivité de 230 Ohm.m, c'est la succession des calcaires schisteux qui peuvent avoir cette résistivité incluant le banc à cipolin.
- A partir de 130 m : substratum conducteur ($R=3$ Ohm.m).

● **SEV 6** : L'interprétation nous donne la succession lithologique suivante :

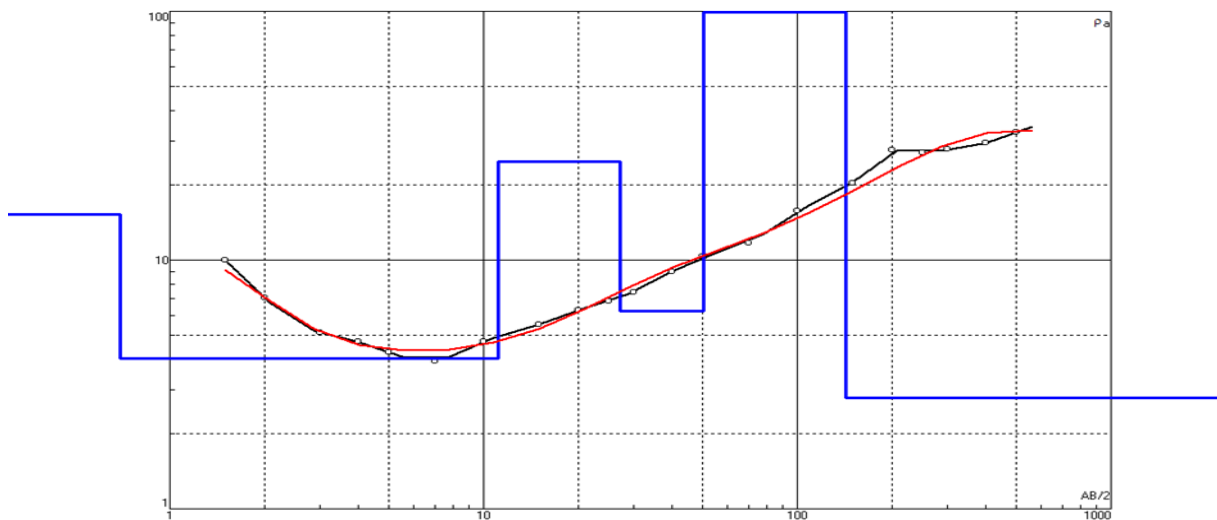


Figure III. 13 : Interprétation du SEV-6 par IPI2WIN

- De 00 à 01 m : terre végétale
- De 01 à 11 m : couche argileuse de résistivité 4 Ohm.m
- De 11 à 27 m : couche sableuse à sablo-argileuse de résistivité 25 Ohm.m. C'est l'aquifère superficiel.
- De 27 à 50 m : couche argileuse de résistivité 6 Ohm.m
- de 50 à 143 m : couche très résistante ayant une Résistivité de 200 Ohm.m, c'est la succession des calcaires schisteux qui peuvent avoir cette résistivité incluant le banc à cipolin.
- A partir de 143 m : substratum très conducteur.

1.6 Résultat et conclusion :

● Résultat :

En corrélant avec la coupe Technique du Forage Guirch, l'aquifère superficiel se trouve jusqu'à une profondeur de 43 m, la couche argileuse sous-jacente peut contenir probablement des lits sablo-argileuse mais à faible épaisseur de tel façon qu'ils ne peuvent pas individualisés lors de l'injection du courant. Les calcaires à cipolin sont captés sur une profondeur de 77 m dans le forage GUIRECH, la couche sus-jacente de calcaire schisteux est d'épaisseur 55 m avec des intercalations métriques de cipolins, En général les calcaires sont résistants (Res>100 Ohm.m).

Par rassemblement de ces données et leurs interprétation et vu l'absence d'autres forages voisins, on peut baser sur une hypothèse disant que cette couche résistante présente les calcaires schisteux incluant le niveau inférieur à cipolin et dans ce cas, les calcaires cipolins aquifères peuvent être touchés sur une profondeur de 110 à 125 m. Une coupe géo électrique figure III.15 de direction NW-SE est élaborée à partir des données interprétées précédemment montré par la figure III.14.



Figure III. 14 : Positionnement de la coupe géo électrique

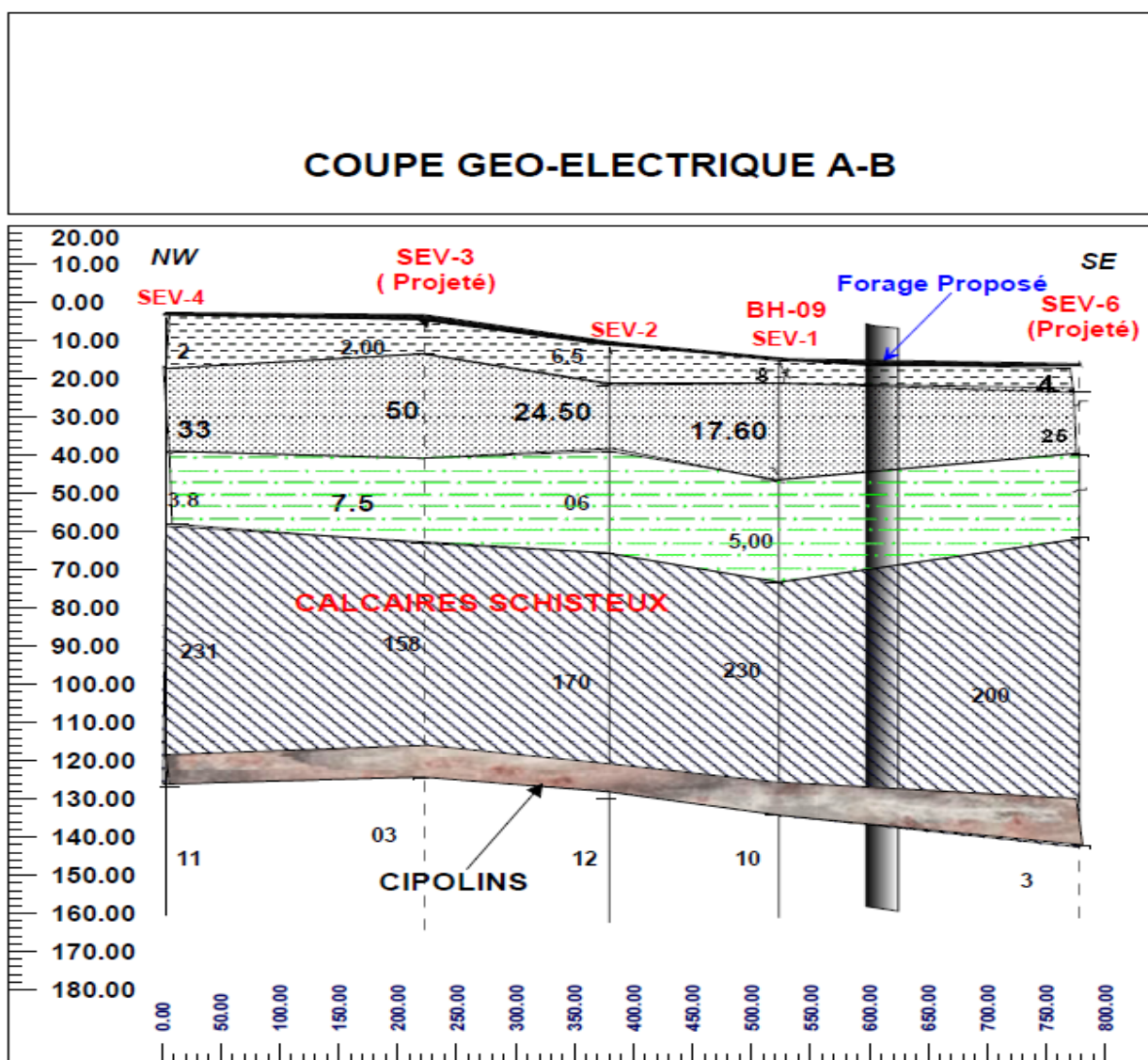


Figure III. 15 : Coupe Géo électrique AB

On remarque que :

- Les coupes nous montrent la répartition horizontale de l'aquifère superficiel ainsi que le toit du substratum, on remarque que l'aquifère superficiel est pratiquement en contact direct avec le substratum résistant si on se déplace en direction du SEV-3.
- Les résistivités de l'aquifère superficiel sont un peu faibles, cela est dû à son hétérogénéité ainsi que la présence des paquets argileux ce qui rend la pénétration du courant dans le substratum à grande profondeur impossible avec AB=1000m.

● CONCLUSION :

○ Implantation du Forage :

Par corrélation de l'ensemble des données acquises du Forage Guirch ainsi que les sondages carottés et les sondages électriques verticaux on peut tirer la conclusion suivante :

- Deux aquifères principaux se trouvent dans la région et qui sont la nappe superficielle soit phréatique du remplissage quaternaire et la nappe des calcaires cipolins qui se trouve à 80 m dans le forage GUIRCH.
- Le calcaire cipolin est une roche métamorphique d'origine sédimentaire et dont la profondeur de captage dans la plaine varie d'une région à une autre (20 m de profondeur à Berrahal, 80 m de profondeur à GUIRCH).
- La résistivité à degré décroissant à la fin de chaque SEV montre le changement du faciès vers une couche conductrice mais sans confirmer son épaisseur.
- Vu que ce métamorphisme provient du magmatisme de Djebel EDOUGH, son degré d'efficacité diminue tout en allant vers le sud de la plaine et donc peut être les calcaires cipolins vont garder plus de caractère sédimentaire tout en allant vers le sud (moins de dureté, plus de pores)

A cet effet, on propose un forage :

- Un forage de 130 ML de profondeur sur le point SEV1.
- Ce forage va recouper les formations de remplissage superficiel et toucher les calcaires schisteux sur une profondeur estimée de 55 à 65 m.
- Si ce toit résistant est les calcaires schisteux identifiés dans le forage GUIRECH, une profondeur supplémentaire de 55 m sera suffisante pour toucher le banc des cipolins (10 m estimée d'épaisseur).

Le forage proposé a pour coordonnées

- **X= 356 571 m E**
- **Y= 4 075 254 m N**
- **Z= 18 m**



Figure III. 16 : Impact du forage et Piézomètre

Le piézomètre (130 ML) a été implanté sur un point situé vers 30 m au nord du Forage d'exploitation.

Les coordonnées sont :

- **X= 356 575 m E**
- **Y 4 075 327 m N**
- **Z= 18 m**

Il faut signaler que le piézomètre ne peut pas être transformé en forage d'exploitation vu son petit diamètre qui limite le choix de la pompe immergée.

2 Diagraphie

2.1 Situation géographique du forage :

Le forage F01 (Figure III.17) est situé à 06 km au Sud-Ouest de la ville de Berrahal, wilaya d'Annaba et à la rive Gauche de la route Nationale N44 qui mène de la ville de Berrahal à Boumaiza

Coordonnées :

X= 356 571 m E. Y= 4 075 254 m N. Z= 18 m

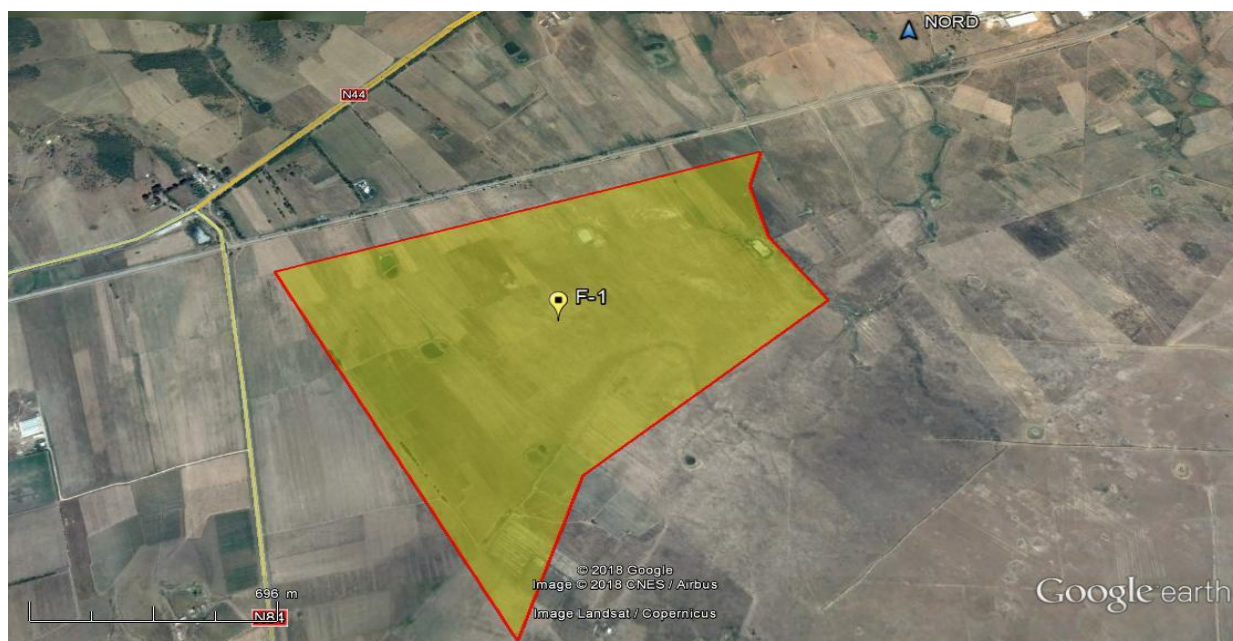


Figure III. 17 : Emplacement du forage

2.2 Matériel utilisé :

Les moyens techniques d'enregistrement et l'ensemble des équipements utilisés pour l'enregistrement des diagraphies comprennent :

- **Un treuil** : sur le tambour duquel sont enroulés plusieurs centaines de mètres de câble (1000 m). Le câble se termine à l'autre extrémité par un raccord rapide qui permet la connexion mécanique et électrique avec l'outil descendu dans le trou de forage.



Figure III. 18 : treuil

- **Les circuits de contrôle et de commande** : la console d'acquisition (unité de contrôle) est un boîtier électronique (Matrix) qui assure la connexion entre l'ensemble treuil-outil et ordinateur



Figure III. 19 : Console de commande

- **Les outils** : ce sont les appareils que l'on descend dans le trou de forage, à l'extrémité du câble. C'est une Sonde combinée (Normales, polarisation spontanée, gamma ray, résistivité du fluide).



Figure III. 20 : Sonde de résistivité Normales "4 électrodes 8, 16, 32, 64", polarisation spontanée et gamma ray

Les opérations de diagraphie effectuée à ce forage sont:

- La Polarisation Spontanée.
- La Radioactivité naturelle Gamma Ray.
- Résistivité normale log (08 " .16 " . 32 " . Et 64 ")

2.3 L'acquisition des données :

Après la finition du forage (Construction du forage annexe) et le déploiement des matériels de diagraphie autour du puit, on a enregistré les paramètres physiques suivant :

La radioactivité naturelle (Gamma ray).

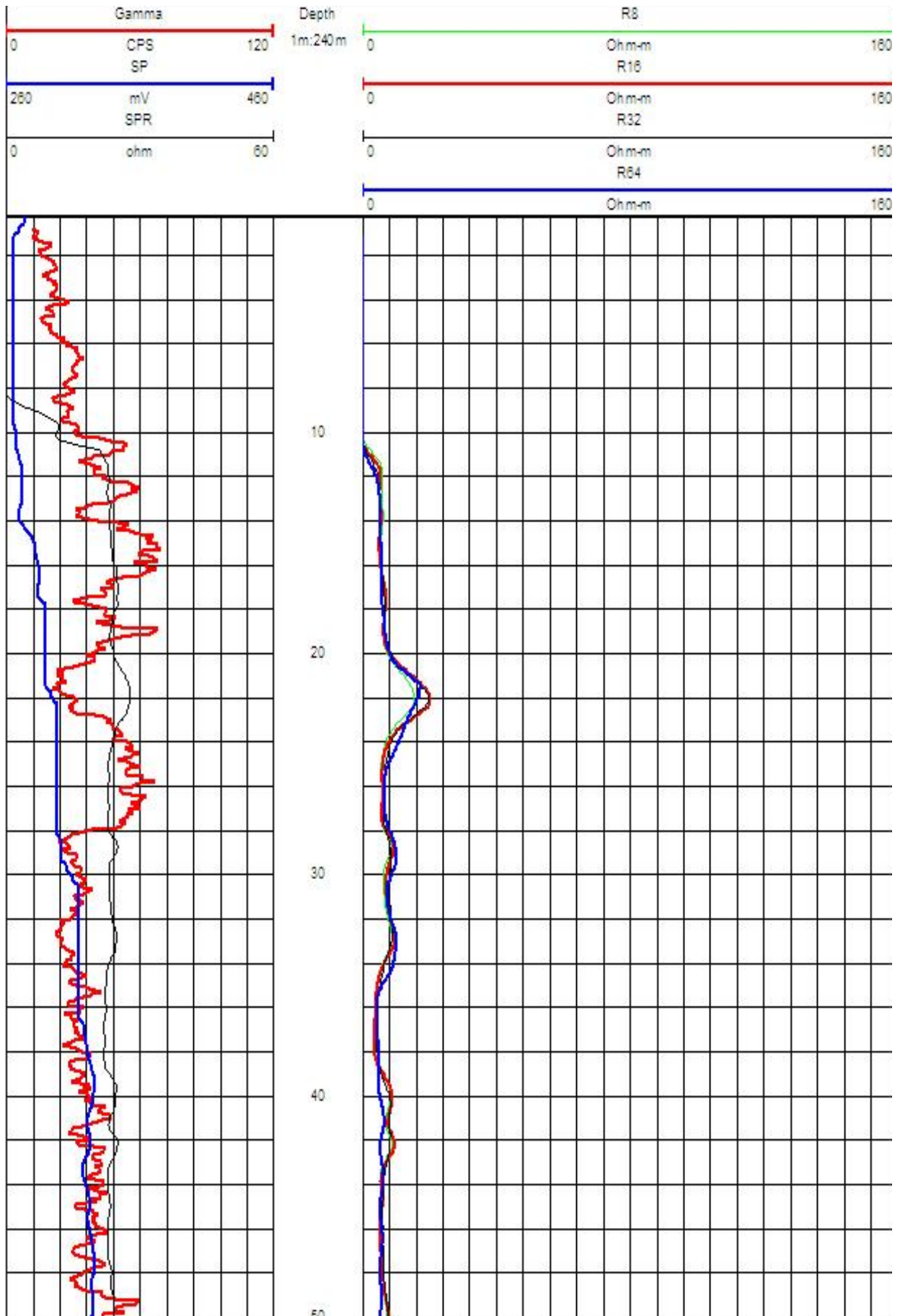
La polarisation spontanée (PS).

La résistivité électrique (RES).

SPR (Single Point Resistivity).

Dans l'enregistrement ci-dessous (figure III.21) représenté par des graphes qui sont composés par des paramètres physiques en fonction de la profondeur.

CHAPITRE III



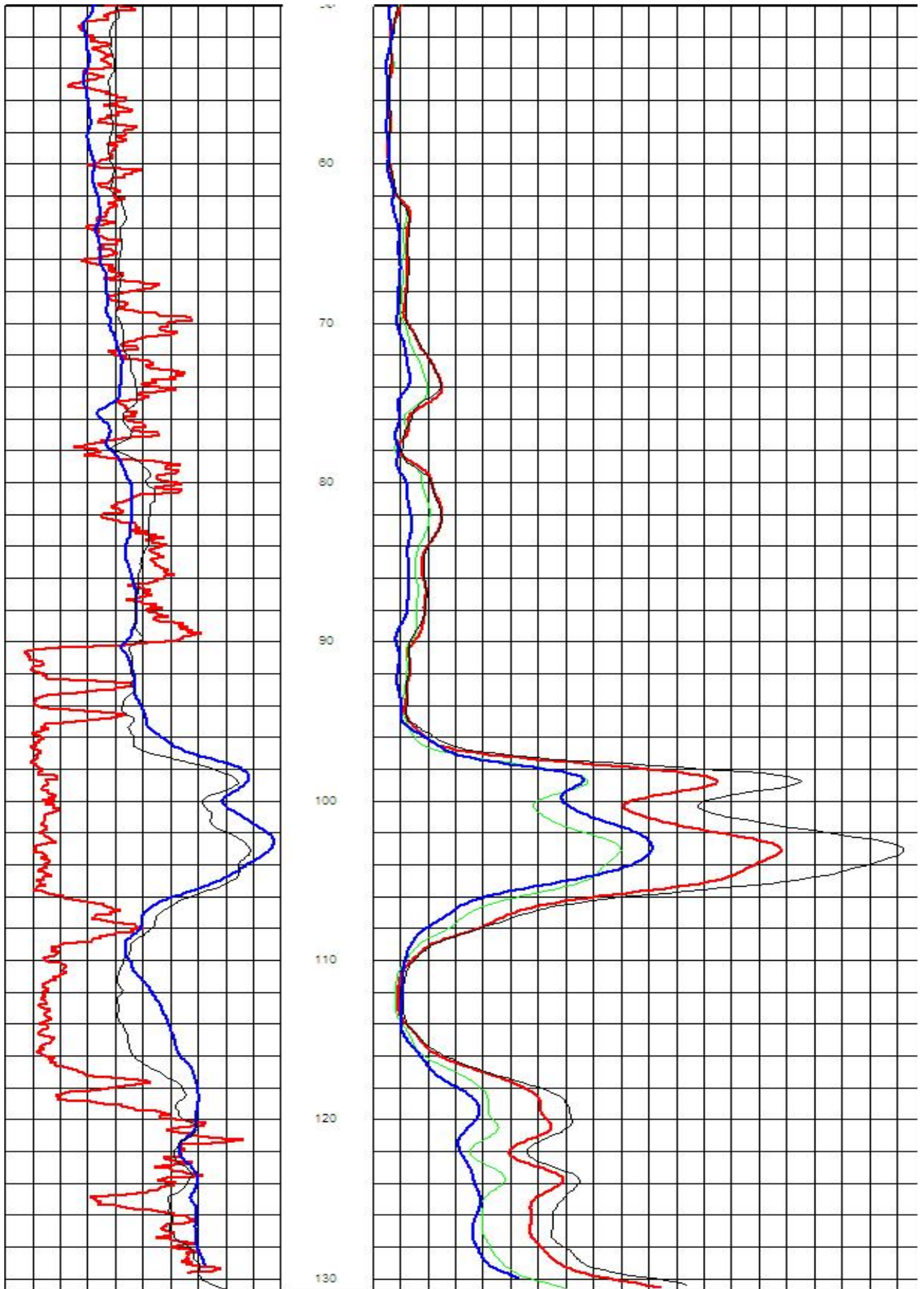


Figure III. 21 : Log des diagraphies (PS, GR, Résistivité)

2.4 Interprétation et traitement des données :

- **LOG GAMMA :**

Ce type de log présente la détection de la radioactivité naturelle des formations (pas provoquée), une courbe à haute valeur de gamma ray est celle des argiles alors qu'une courbe à faible gamma ray est celle des formations non argileuses.

La délimitation s'explique par la tendance générale de la courbe :

- un morceau de la courbe ou la tendance est à faible Gamma ray est considéré non argileux (perméable) et dans ce cas les pics de Gamma ray ne sont que des faibles intercalations purement argileux
- un morceau de la courbe ou la tendance générale est à haute Gamma ray est considéré argileux et dans ce cas les déflexions de Gamma ray ne sont que des intercalations de lithologie non argileuse tels que sable, gravier, calcaire etc...
- la vérification de la lithologie se fait tout en prenant compte des cuttings prises à la même profondeur lors du forage

Sur l'ensemble de ce forage, on remarque une alternance entre les couches argileuses et non argileuses.

Pour déterminer et délimiter l'aquifère, il faut se référer aussi au courbe de Résistivité et PS, l'aquifère doit avoir en même temps une faible Gamma ray (pas d'argiles), une bonne résistivité et des déflexions de log PS dont le style de la déflexion varie selon le pourcentage du sable et l'épaisseur de la couche (plus elle est épaisse, la déflexion devient large et plate)

Donc on remarque que dans l'intervalle [90-108] mètre le gamma ray est très faible par rapport aux autres enregistrements de différent profondeur, alors on peut dire que c'est une formation non argileuse (perméable) qui représente notre aquifère, reste à confirmer ce résultat par l'interprétation du log RES et PS.

- **LOG RES-PS**

Si la PS a une déflexion de la courbe on peut dire que c'est une formation non argileuse (réservoir), et si la PS a une faible courbe donc la formation est argileuse. On remarque dans notre log que le résultat précédent trouvé sur le log gamma ray confirme qu'il y'a un aquifère à une profondeur de 98 mètre avec une épaisseur d'environ 8 mètre.

Le Log Résistivité présente la détection du résistivité de la formation traversé, plus la valeur est grande plus la couche est résistante, si cette couche est purement sableuse, il faut avoir en même temps une déflexion négative du Log PS.

On remarque aussi que le log résistivité varie dans le même intervalle que les autres logs [98-106] mètre, qui confirment une présence d'Alluviales après une identification avec le tableau des résistivités voir annexe.

- **Colonne de Captage :**

Elle est formée de crépines en PVC de diamètre Ø 12'', et une ouverture de 1 mm avec un pourcentage de vide de 7%. La longueur d'un joint est de 5.90 m Hors filetage.

La colonne de captage et de production est composée comme suit:

Tableau III. 1 : colonne de captage

De	A	Ø ext '' (pouces)	Ø ext (mm)	Nature	Type	Ouverture (mm)	
+0.5	70.30	12''	315	PVC	12*TUBE-PLEIN		
70.30	82.10	12''	315	PVC	2*CREPINE	1	
82.10	93.90	12''	315	PVC	2*TUBE-PLEIN		
93.90	111.60	12''	315	PVC	3*CREPINES	1	
111.60	117.50	12''	315	PVC	1*TUBE-PLEIN		
117.50	123.40	12''	315	PVC	1*CREPINES	1	
123.40	129.30	12''	315	PVC	1*SABOT		
129.30	130.88	REMBLYAGE DE GRAVIER					

2.5 Résultat hydraulique et Conclusion du forage :

Les diagraphies avec l'ensemble des outils utilisés sur les forages du site de BERRAHAL ont atteint l'objectif fixé, à savoir déterminer les caractéristiques physiques, hydrauliques des formations quaternaires rencontrées sur ce site. Ceci grâce à une très bonne résolution verticale. Les résultats obtenus sont comparables à ceux obtenus par la méthode électrique, rendant ainsi compte de leur validité. Encore faudra-t-il signaler la complémentarité des diagraphies avec l'étude hydraulique.

Après l'interprétation et la corrélation entre les diagraphies on a obtenu une coupe technique du forage (Figure III.22) qui nous montre la lithologie et le niveau du réservoir et aussi l'épaisseur de l'aquifère.

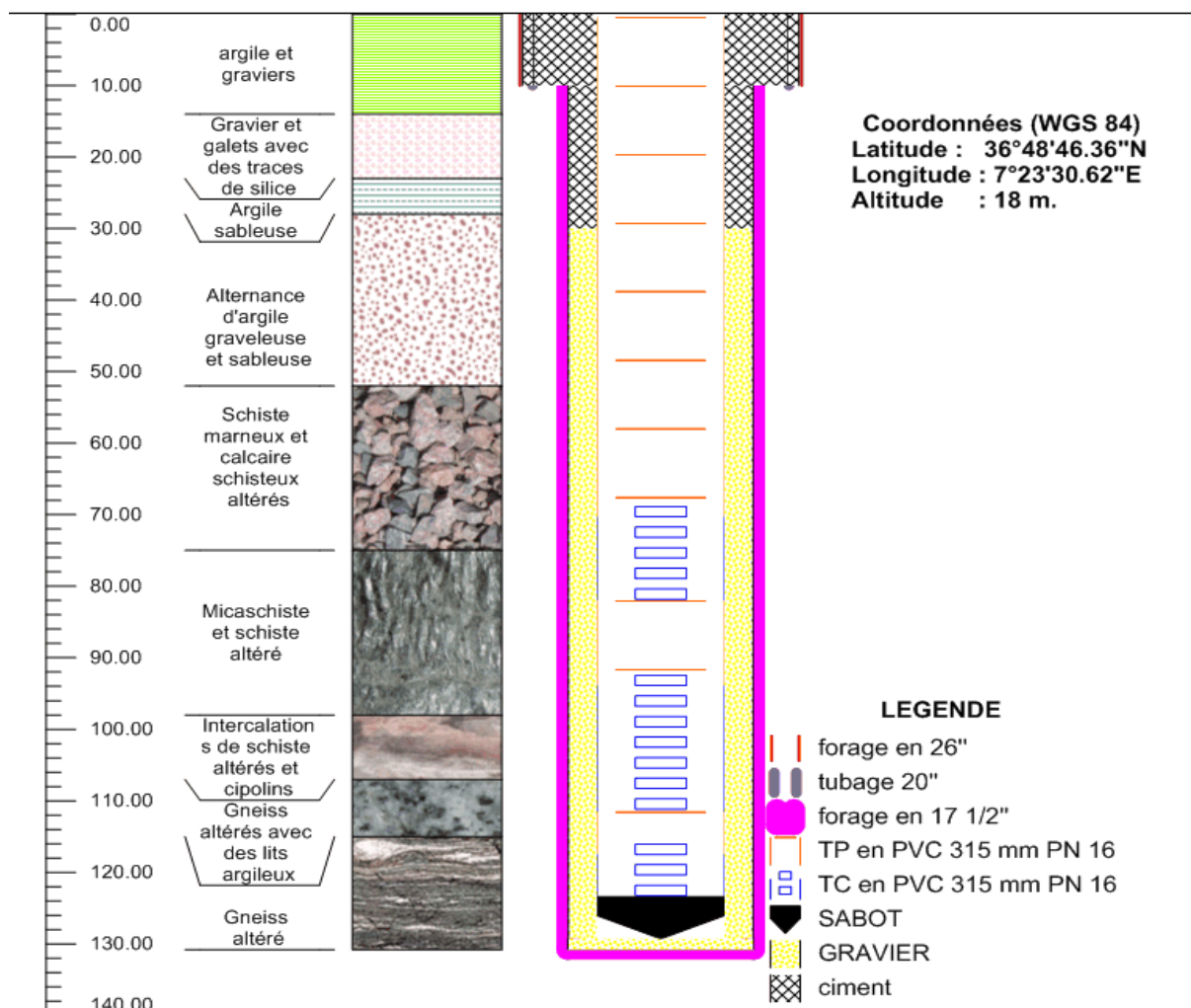


Figure III. 22 : La lithologie du Forage 1

Après vient le rôle de l'Hydrologue (Figure 6 annexe) pour calculer le débit et la transmissivité et perméabilité de la formation, et pour cela il faut tout d'abord faire des essais de débit qui se divisent en deux parties. Essais à blanc qui ont servi à bien maintenir le massif filtrant dans une bonne position afin d'entamer la cimentation de l'espace annulaire ainsi que l'obtention d'une eau claire sans éléments sableux. Et essais par palier qui ont été réalisés en trois paliers non enchainés de courte durée à des débits croissants. Les pompages d'essai à courte durée nous permettent d'évaluer l'évolution des rabattements par rapport aux différents débits et ainsi déterminer le débit critique de pompage.

A l'aide de l'interprétation des essais par l'hydrologue on a obtenu le débit critique qui est de 65.1 m³/h ou de 18 L/s. Aussi il faut déterminer la transmissivité de l'aquifère ainsi que sa perméabilité et son coefficient d'emmagasinement par un Essai de longue durée à débit constant, il faut avoir au moins un piézomètre de contrôle dont on suit le niveau dynamique en même temps que l'ouvrage principal, aussi il faut calculer le rayon d'action qui représente la distance au-delà du quelle le rabattement devient nul, c'est-à-dire le cône de dépression causée par le pompage disparaît mettant place au niveau piézométrique initial. On a trouvé :

La transmissivité : $T=9.89 \cdot 10^{-4}$ (m²/sec) et La perméabilité : $K= 2.7 \cdot 10^{-5}$ (m/sec)

IV. CHAPITRE 4

1 CONCLUSION GENERALE

Lors de cette étude, 6 sondage électrique ont été utilisées et développées sur le site de BERRAHAL afin de préciser la nature et la structure des aquifères étudiés. La caractérisation des paramètres hydrauliques de ces aquifères s'est faite à partir des données enregistrées à l'aide de la méthode géophysique de forage (diagraphies). Un important travail de développement et de calibrage, a été mené au préalable.

La méthode électrique de surface a permis l'identification et la caractérisation des formations. Une échelle des résistivités pour les différentes formations en présence a été établie. Ce qui a permis de déterminer le point de forage et la localisation de l'aquifère, Les résultats que nous avons obtenus à l'aide des méthodes électriques ont répondu en partie aux objectifs fixés.

Confrontés à ceux obtenus par les méthodes hydrauliques classiques (essais de pompage et de traçage), les résultats obtenus par la géophysique de forage sont remarquable, toutefois les diagraphies permettent de déterminer les paramètres hydrauliques à une échelle centimétrique, pour chaque point de mesure dans le forage alors que les méthodes hydrogéologiques donnent des valeurs moyennes de ces paramètres entre plusieurs forages.

Les caractéristiques hydrauliques de la formation des schistes altérés et cipolins ont été déterminées à partir des diagraphies électriques, Gamma ray dans le forage du site.

Ainsi pour des résistivités allant de 0 à 53 Ohm.m, les intensités Gamma Ray varient de 10 à 102 cps, et les extrémités de la polarisation instantanée varient de 265 à 475 mV. Les plus fortes valeurs n'indiquent qu'une présence d'éléments argileux mais pas de bancs d'argile.

2 Perspectives

L'objectif principal de ce travail était de caractériser, au moyen de diverses méthodes géophysiques, l'aquifère d'un point de vue hydro-géophysique, Les méthodes électriques de surface ont que partiellement répondu à l'objectif de déterminer la nature, le type, la géométrie et la structure des aquifères étudiés, donc il faut la complémenté avec la diagraphie et l'hydrologie.

L'utilisation et le développement de la géophysique de forage a permis la détermination des caractéristiques hydrauliques.

Les résultats obtenus satisfaits partiellement les exigences posé dans l'introduction qui est de délivré un débit moyen de 40 L/s, cependant dans notre forage le débit critique est de 18 L/s, et pour répondre complètement au besoin et le but de cette étude nous recommandons un deuxième forage qui est loin du premier et pour cela on doit calculer le rayon d'action du forage étudié, qu'on a trouvé :

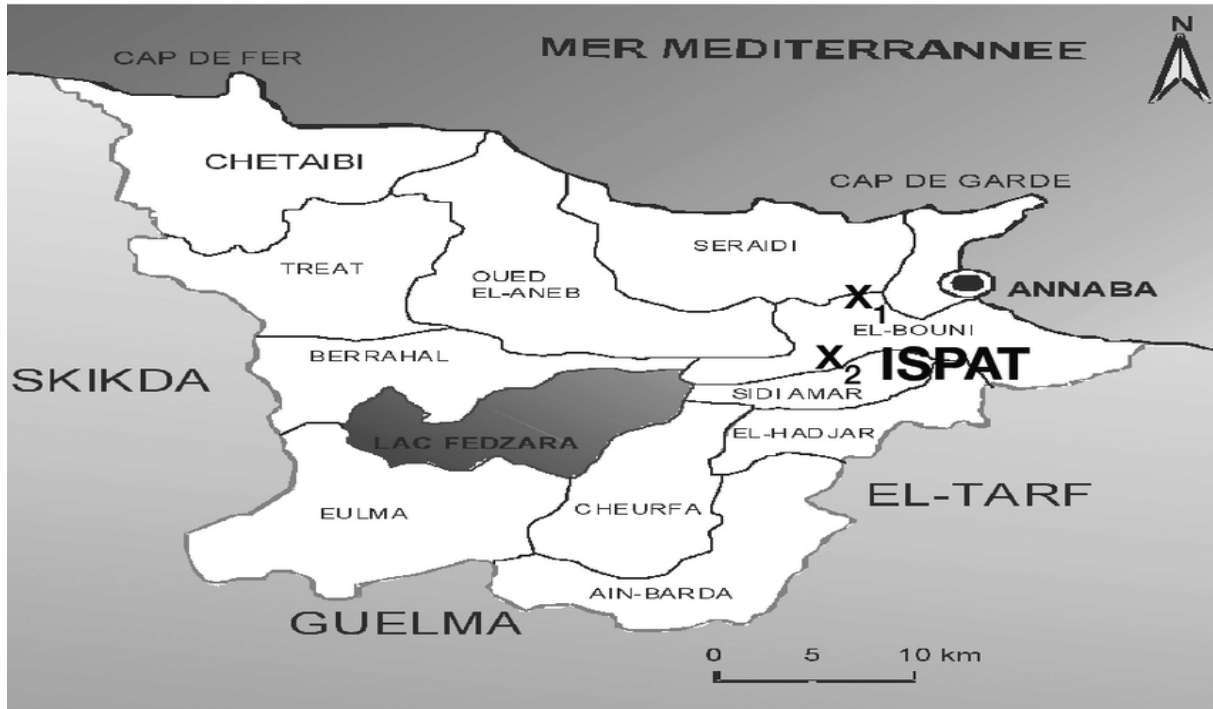
$R_{ac} = 310 \text{ m}$.

Donc il faut prendre le rayon d'action en considération pour le deuxième forage, reste a étudié la qualité des eaux qui n'a pas été abordée dans ce travail, et pour cela il faut faire la multiplication des analyses chimiques voire isotopiques pour l'étude du chimisme des aquifères (teneurs en sels, origine, âge ect...).

Annexe :

Chapitre I :

3.1- Situation géographique



3.2- Climat

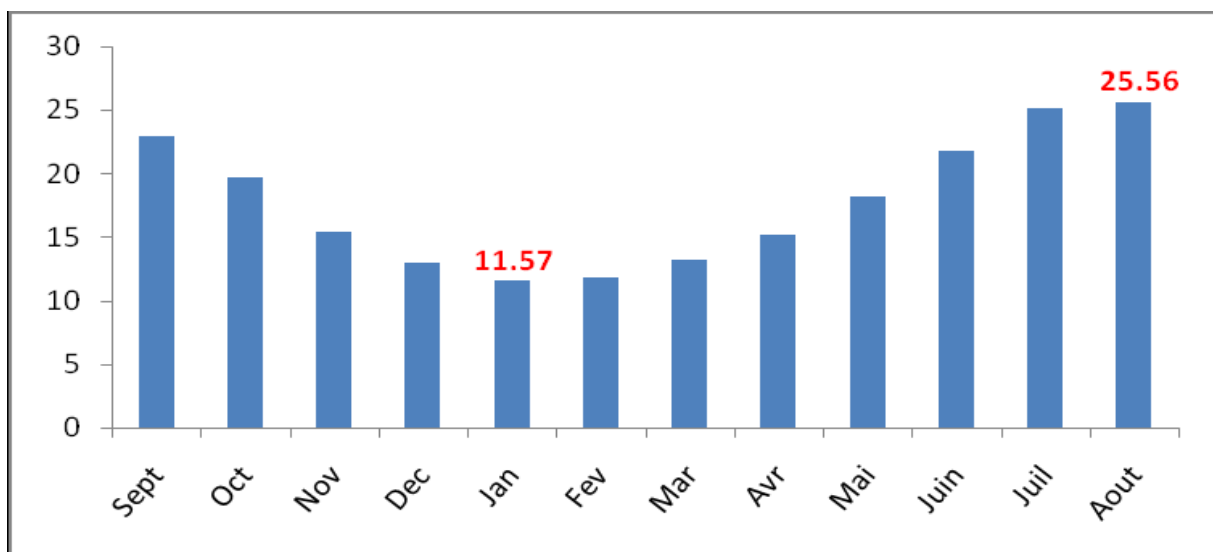


Figure 2 : Températures moyennes mensuelles (°C) dans la zone étudiée. (1981-2000). [4]

3.5- Hydrogéologie

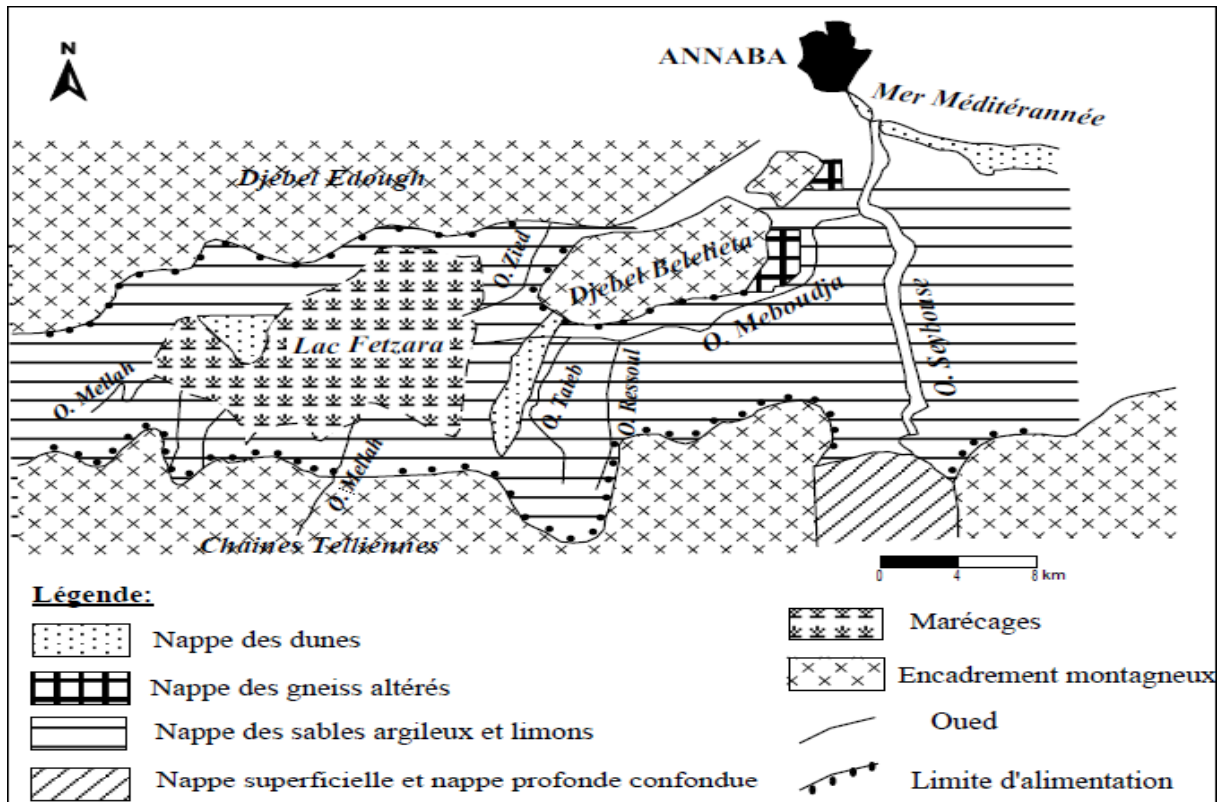


Figure 3 : Carte de situation géographique des nappes superficielles de la plaine d'Annaba (2006). [4]

3.6- Cadre géologique

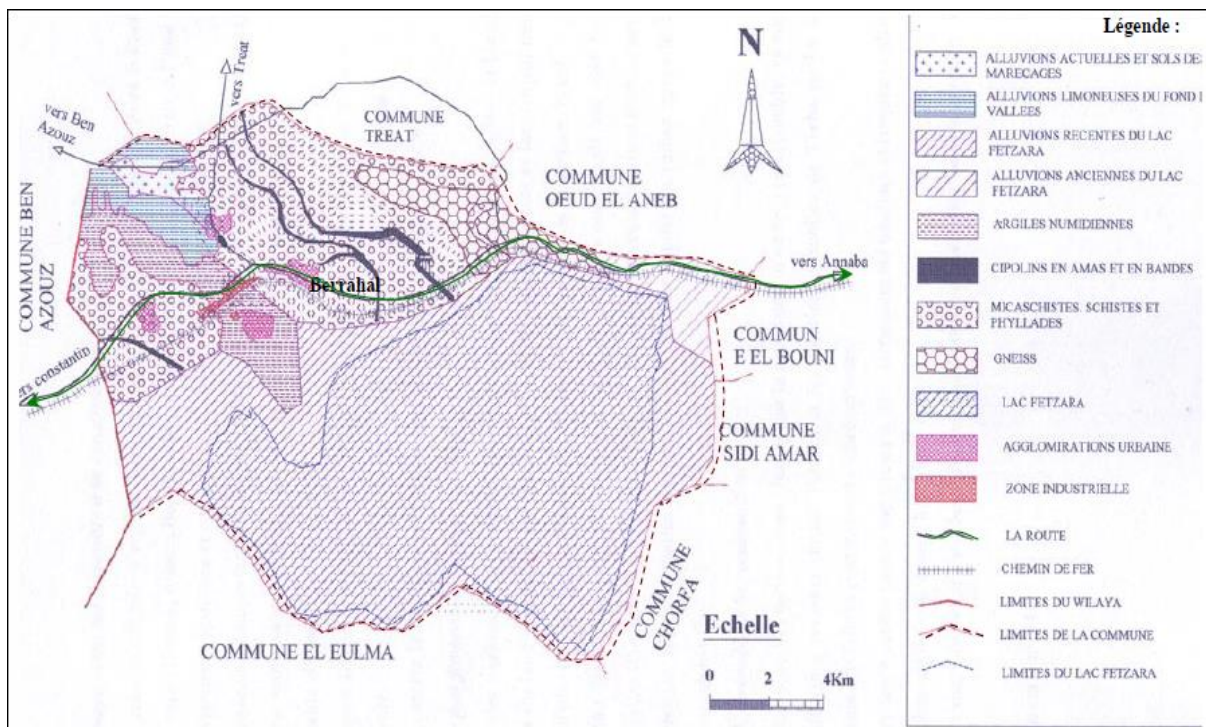


Figure 4 : Carte géologique schématique de la région de Berrahal. [10]

Chapitre II :

2- Diagraphie

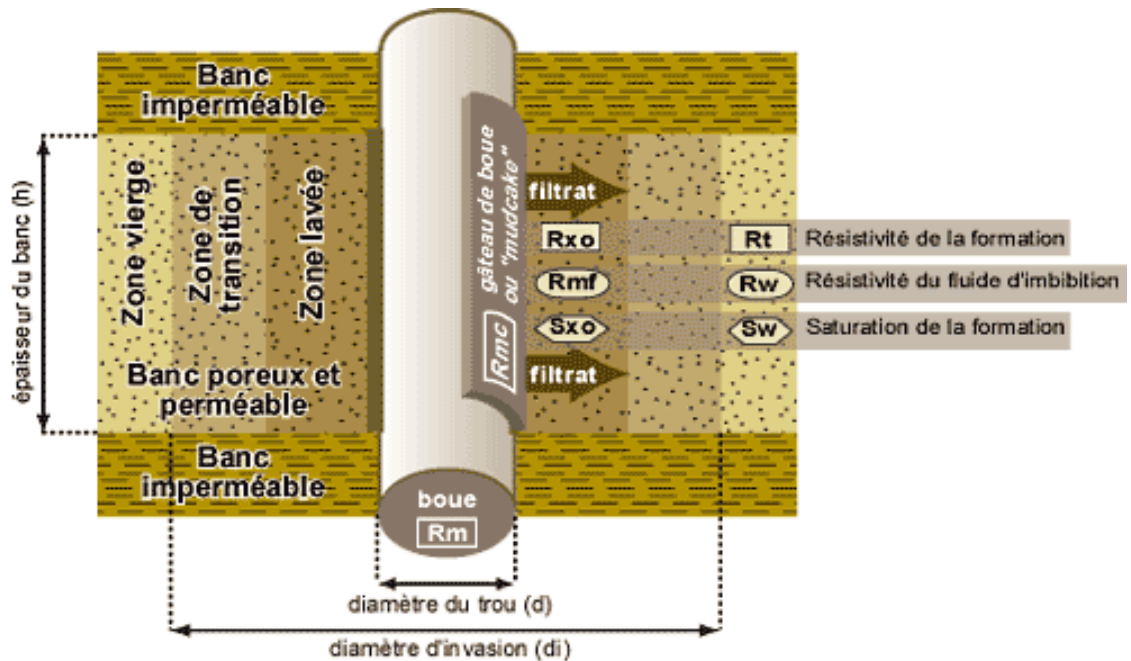


Figure 5 : Représentation schématique de l'invasion. [14]

Chapitre III :

1- Méthode électrique (SEV)

1.4 L'acquisitions des données :

Tableau 1 : SEV 1

AB/2 (m)	MN/2 (m)	ρ_a ($\Omega.m$)	DV (v)	I (A)
1	0.5	11.516	0.107	0.022
1.5	0.5	6.942	0.024	0.022
2	0.5	5.319	0.009	0.020
2	0.5	5.316	0.009	0.020
2.5	0.5	4.949	0.005	0.017
3	0.5	4.930	0.004	0.023
4	0.5	5.648	0.002	0.020
5	0.5	6.185	0.002	0.020
5	1.5	5.932	0.031	0.124
7	0.5	6.728	0.020	0.453
7	1.5	6.721	0.022	0.162
10	1.5	7.601	0.026	0.357
15	1.5	8.061	0.006	0.171
20	1.5	9.267	0.007	0.316
25	1.5	9.793	0.006	0.393

25	5	8.966	0.019	0.404
30	1.5	11.457	0.004	0.347
30	5	9.039	0.012	0.353
40	5	10.370	0.007	0.351
50	5	11.781	0.002	0.118
70	5	13.170	0.002	0.280
70	15	11.425	0.007	0.283
100	5	11.499	0.001	0.318
100	15	13.796	0.004	0.318
150	15	19.627	0.004	0.433
200	15	27.476	0.004	0.538
250	15	23.028	0.002	0.618
250	25	20.421	0.003	0.612
300	15	40.976	0.002	0.442
300	25	24.406	0.002	0.468
400	25	41.000	0.001	0.328
500	25	42.696	0.001	0.466

Tableau 2 : SEV 3

AB/2 (m)	MN/2 (m)	ρ_a ($\Omega.m$)	DV (v)	I (A)
1	0.5	10.664	0.111	0.025
1.5	0.5	5.108,	0.017	0.022
1.5	0.5	5.139	0.017	0.021
2	0.5	4.279	0.006	0.018
2.5	0.5	4.396,	0.005	0.021
3	0.5	4.841,	0.003	0.017
4	0.5	5.514,	0.002	0.017
5	0.5	5.744,	0.002	0.17
5	1.5	4.748,	0.027	0.365
7	0.5	6.463,	0.034	0.172
7	1.5	5.392,	0.015	0.365
10	1.5	6.058,	0.021	0.187
15	1.5	7.437	0.022	0.368
20	1.5	7.794	0.017	0.536
25	1.5	8.891	0.007	0.359
25	5	8.019	0.002	0.115
30	1.5	7.005	0.005	0.107
30	5	9.060	0.002	0.274
40	5	9.778	0.012	0.359
50	5	10.145	0.006	0.305
70	5	12.036	0.005	0.397
70	15	11.498	0.002	0.31
100	5	5.023	0.007	0.314
100	5	10.289	0	0.118
100	15	12.039	0	0.119
150	15	15.19	0.001	0.121
200	15	21.457	0.003	0.505
250	15	24	0.002	0.39
250	25	21.161	0.001	0.37
300	25	25.503	0.002	0.369
300	25	25.651	0.002	0.442
400	25	35.536	0.002	0.439
400	25	35.337	0.002	0.477

Tableau 3 : SEV 3

AB/2 (m)	MN/2 (m)	ρ_a ($\Omega.m$)	DV (v)	I (A)
1	0.5	3.149	0.066	0.05
1.5	0.5	3.104	0.024	0.049
2	0.5	3.118	0.006	0.024
2.5	0.5	3.209	0.003	0.017
3	0.5	3.338	0.003	0.026
4	0.5	4.165	0.002	0.026
5	0.5	4.768	0.025	0.414
5	1.5	4.994	0.005	0.022
7	0.5	6.199	0.023	0.57
7	1.5	5.131	0.026	0.252
10	1.5	7.31	0.03	0.425
15	1.5	9.408	0.021	0.52
20	1.5	9.941	0.004	0.177
25	1.5	9.17	0.006	0.452
25	5	8.286	0.02	0.454
30	5	8.079	0.003	0.118
40	5	9.441	0.002	0.116
50	5	9.475	0.004	0.342
70	15	8.74	0.007	0.368
100	15	20.19	0	0.012
200	15	14.47	0.001	0.354
250	15	22.102	0.001	0.356
250	25	21.017	0.002	0.355
300	25	22.44	0.002	0.599
400	25	24.732	0.002	0.663

Tableau 4 : SEV 4

AB/2 (m)	MN/2 (m)	ρ_a ($\Omega.m$)	DV (v)	I (A)
1	0.5	13.097	0.13	0.023
1.5	0.5	4.432	0.017	0.025
2	0.5	3.695	0.008	0.026
2.5	0.5	3.764	0.005	0.026
3	0.5	3.91	0.003	0.024
4	0.5	4.631	0.002	0.023
5	0.5	5.033	0.034	0.522
5	1.5	4.712	0.01	0.052
7	0.5	5.751	0.015	0.403
7	1.5	5.22	0.021	0.197
10	1.5	6.663	0.03	0.463
15	1.5	8.07	0.016	0.459
20	1.5	9.581	0.009	0.39
25	1.5	10.982	0.007	0.397
25	5	9.909	0.007	0.134
30	1.5	11.462	0.005	0.396
30	5	10.446	0.016	0.419
40	5	12.131	0.009	0.384
50	5	12.131	0.009	0.384
70	5	16.458	0.001	0.12

70	15	15.222	0.004	0.12
100	5	8.060	0	0.124
100	15	13.395	0.002	0.124
150	15	19.596	0.004	0.429
200	15	23.723	0.004	0.714
250	15	24.524	0.002	0.536
250	25	23.330	0.003	0.532
300	15	33.260	0.001	0.415
300	25	17.847	0	0.1
400	25	36.817	0	0.054
500	25	37.659	0.001	0.420

Tableau 5 : SEV 5

AB/2 (m)	MN/2 (m)	ρ_a ($\Omega.m$)	DV (v)	I (A)
1	0.5	15.049	0.206	0.032
1.5	0.5	4.563	0.020	0.027
2	0.5	9.927	0.037	0.044
2.5	0.5	10.008	0.016	0.031
3	0.5	10.668	0.011	0.029
4	0.5	12.296	0.008	0.032
5	0.5	12.996	0.003	0.019
5	1.5	10.486	0.008	0.019
7	0.5	14.494	0.016	0.169
7	1.5	11.047	0.038	0.168
10	1.5	12.617	0.002	0.018
15	1.5	12.865	0.016	0.289
20	1.5	12.888	0.004	0.120
25	1.5	13.028	0.002	0.1
25	5	9.525	0.005	0.1
30	1.5	13.253	0.005	0.334
30	5	13.220	0.005	0.337
30	5	10.418	0.013	0.339
40	5	11.577	0.007	0.319
50	5	12.193	0.006	0.355
70	5	14.631	0.004	0.470
70	15	14.922	0.015	0.504
100	5	12.902	0.003	0.689
100	15	12.947	0.009	0.689
150	15	15.674	0.003	0.447
200	15	18.721	0.003	0.558
250	15	24.751	0.002	0.481
250	25	23.704	0.003	0.474
300	25	37.693	0.001	0.128
300	25	42.827	0.001	0.086
300	25	41.900	0.001	0.087
400	25	36.964	0.002	0.487
500	25	45.523	0.001	0.462

Tableau 6 : SEV 6

AB/2 (m)	MN/2 (m)	ρ_a ($\Omega.m$)	DV (v)	I (A)
1	0.5	17.306	0.183	0.025
1.5	0.5	10.003	0.043	0.027
2	0.5	7.012	0.175	0.294
2	0.5	7.074	0.019	0.031
2.5	0.5	3.506	0.005	0.028
3	0.5	5.098	0.005	0.027
4	0.5	4.691	0.003	0.030
5	0.5	4.245	0.022	0.413
5	0.5	13.599	0.019	0.109
7	0.5	3.998	0.013	0.483
7	1.5	3.846	0.040	0.505
10	1.5	4.717	0.025	0.545
15	1.5	5.502	0.012	0.516
20	1.5	6.310	0.008	0.507
25	1.5	7.327	0.006	0.526
25	5	6.321	0.018	0.523
30	1.5	7.647	0.004	0.554
30	5	7.246	0.015	0.554
40	5	8.995	0.008	0.457
50	5	10.325	0.008	0.636
70	5	11.588	0.005	0.713
70	15	11.851	0.018	0.764
70	15	7.511	0.009	0.597
100	5	48.086	0.009	0.591
100	15	15.710	0.009	0.587
150	15	20.392	0.006	0.652
200	15	27.587	0.005	0.796
250	15	20.873	0.002	0.589
250	25	19.956	0.003	0.589
300	25	23.990	0.002	0.518
400	25	23.135	0.002	0.685
500	25	32.609	0.001	0.441

Tableau 7 : Résistivité des roches et des eaux. [15]

Eau ou Roches	Résistivité en (ohm.m)
Eau de mer	0.2
Eau de nappes	10-30
Alluviales	50-100
Eau de sources	1000-10000
Sables et graviers secs	50-500
Sables et graviers	
Imbibés d'eau douce	2-20
Sables et graviers	
Imbibés d'eau salée	300-10000
Argiles	50-300
Marnes	300-10000
Calcaires	20-100
Grès argileux	300-10000
Grès, quartzites	0.5-5
Cinérites, tufs volcaniques	10-300
Grès	30-800

2- Diagraphie

•Construction du forage :

Le forage a été effectué suivant les phases suivantes :

Phase I.

- Amenée du Matériel, construction a la plateforme.
- Installation d'un tube guide API Ø 20" à 10 m entièrement cimenté
- Attente prise de ciment

Phase II.

- Forage de reconnaissance en Ø 12 ¼" de 10 m à 130.88 m.
- Enregistrement des diagraphies Gamma Ray, résistivités 8'', 16'', 32'' et 64'' et PS de 10 à 130.88 m
- Elargissement en Ø 17" ½ de 10 m à 130.88 m.

Phase III.

- Pose de la colonne de captage composée de tubes pleins PVC et crépines PVC Ø 315 mm, PN16 sur toute la longueur du forage.
- Mise en place du gravier siliceux roulé et son injection par circulation inverse dans l'espace annulaire du fond jusqu'au 30 ML de profondeur (quantité totale 7 m³, diamètre 2-4 mm).

Phase IV.

- Nettoyage du puits par circulation de l'eau claire (06 M³ d'eau)
- Développement du forage à l'air-lift par compresseur 14 bars avec tube d'eau à 120 m et tube d'air à 115 m.
- Traitement du forage à l'Héxamétaphosphate (quantité totale injectée 100 Kg)
- Re-nettoyage du forage avec compresseur 14 bars sur même profondeur.
- Essai à blanc de débit constant de 25 L/ jusqu'à l'obtention d'une eau claire sur 12 heures.
- Essais de pompage par un GEPI en 03 paliers des débits non enchainés (12, 16 et 20.00 l/s) à raison de 01.00 h de pompage pour chaque palier.
- Pompage Additionnel soit un palier unique et à débit constant de 25 l/s à raison de 16 h de pompage continu, arrêt de pompage après 16 H pour des raisons de sécurité afin de cimenter la partie annulaire supérieure 17 ½" et 315 mm de la surface à 30 ML de profondeur.

Phase V.

- Injection d'un bouchon de béton de 30 ML de profondeur et attente prise de ciment 06 Heure.
- Injection d'un laitier de ciment de 29 ML jusqu'au surface de densité moyenne et attente prise de ciment 12 H.
- Essai de longue durée de 48 H avec débit constant de 20.80 L/s.
- Construction de la margelle.
- Fermeture du forage avec une plaque soudée d'épaisseur 06 mm.
- Remise des lieux en état initial.
- Repli du chantier.

2.6- Résultat hydraulique et Conclusion du forage :

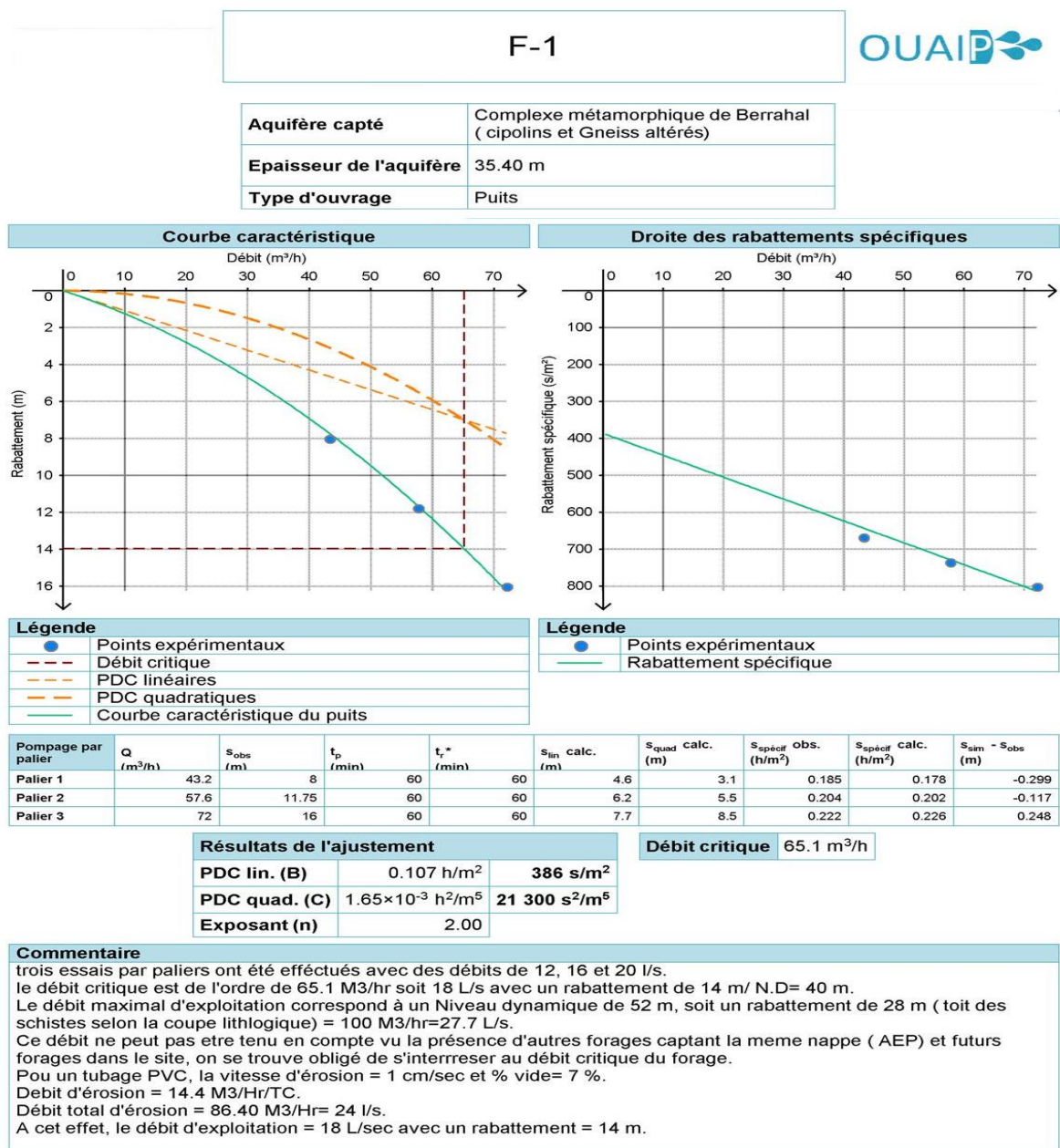


Figure 6 : Débit critique et Débit d'exploitation du forage 1. (Par L'Hydrologue à l'aide du logiciel OUAIP)

- **Calcul de coefficient d'emmagasinement**

Pour déterminer le coefficient d'emmagasinement, il faut avoir au moins un piézomètre de contrôle dont on suit le niveau dynamique en même temps que l'ouvrage principal.

Le coefficient d'emmagasinement est déterminé à partir de ce temps fictif à l'origine et s'écrit :

$$S = [2.25 * T * t_0] / [X^2]$$

T : transmissivité (m²/sec)

T₀ : temps fictif à l'origine (sec)

X² : distance entre le puits et le piézomètre. (m²)

S : coefficient d'emmagasinement. (Sans unité)

Références bibliographiques

- [1]. Institut National de Cartographie et de Télédétection, 1999. Carte Topographique de Berrahal, (E : 1/50.000), Edition N°1. Visa N°106 L1 2578.
- [2]. Carte Géologique Détaillée de BONE DUGAUD, 1903. Service Géologique de l'Armée (E : 1/50000). Feuilles N°16-17.
- [3]. S. Habes, (2013). Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant aux écosystèmes Humides du Nord de l'Algérie. Thèse de Doctorat, option Hydrogéologie. Université BADJI MOKHTAR, ANNABA. 36-200
- [4]. Boudjemaa Sonia, (2010). Cartographie des relations sol-eau-végétation dans un milieu salé (lac Fetzara). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba. 40-60
- [5]. D. Chapellier, (2001), PROSPECTION ELECTRIQUE DE SURFACE. cours online de géophysique, université de lausanne, institut du pétrole français. Récupérer le 09 mai 2019 sur <http://www.geologues-prospecteurs.fr/cours/geophysique/pes.pdf>.
- [6]. S. Habes et al, (2012). Quantification des apports et des exores d'un lac cas du lac Fetzara, Région d'Annaba (Nord-Est Algérien). Récupérer le 20 mai 2019 sur <https://docplayer.fr/5357696-Geophysique-appliquee-a-l-archeologie.html>
- [7]. D. Chapellier, (2001). DIAGRAPHIES ACQUIFERES, cours online de géophysique, université de lausanne, institut du pétrole français. Récupérer le 15 mai 2019 sur https://www-ig.unil.ch/pdf/doc_dia/diaacq_f.pdf.
- [8]. Youcef Hacini, (2006). Application des méthodes géophysiques à l'étude de deux sites (Kappelen et Grenchen) de l'aquifère poreux complexe du Seeland. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba. 16-19
- [9]. F. Zahi, (2014). Contribution à l'étude hydro chimique du sous bassin versant de Lac Fetzara (Nord-est Algérien), approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux. Thèse de doctorat en sciences, option Hydrogéologie, Université BADJI MOKHTAR, ANNABA.
- [10]. H. Khelfaoui (2007). Modélisation des écoulements et de transport de masse dans une zone industrielle exemple de la nappe de Berrahal (Nord-est Algérien). Thèse de Doctorat en sciences, Université BADJI MOKHTAR, ANNABA. 20-60
- [11]. T. Saboua (2010). Origines de la pollution hydrique et atmosphérique dans la plaine Ouest de la région d'ANNABA. Magister option Hydrogéologie, Université BADJI MOKHTAR, ANNABA.

[12].Z.Boulakoud, (2009). Variations quantitatives et qualitatives des ressources en eau des nappes superficielles de la région d'Annaba. Magister option Hydrogéologie, Université BADJI MOKHTAR, ANNABA.

[13]. Laurent Marescot, (2010). Géophysique appliquée à l'archéologie. Cours donné à l'Université de Fribourg. Récupérer le 10 mai 2019 sur <https://docplayer.fr/5357696-Geophysique-appliquee-a-l-archeologie.html>.

[14].Chapellier D, 1987. DIAGRAPHIES APPLIQUEES A L'HYDROLOGIE, TECHNIQUE ET DOCUMENTATION (LAVOISIER) PARIS, 100-130.

[15]. Astier, (1971). Résistivité des eaux et des roches. Récupérer le 12 mai 2019 sur https://www.researchgate.net/figure/Tableau-2-1-Resistivite-des-eaux-et-des-roches-Astier-1971_tbl1_299561779.

M Stadelhofen C, 1991. APPLICATION DE LA GEOPHYSIQUE AUX RECHERCHES D'EAU, TECHNIQUE ET DOCUMENTATION (LAVOISIER) FRANCE, 50-70

Oberto Serra, 1979. Diagraphie différés base de l'interprétation, Elf-Aquitaine, 102-110