



Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques - Marrakech
Département des Sciences de la Terre



Université Cadi Ayyad
Centre National d'Etudes et de Recherches
sur l'Eau et l'Environnement

Licence Sciences et Techniques Eau et Environnement

Initiation à la Méthode Résonance Magnétique des Protons : exemples d'applications

Réalisé par:

CHARBAOUI Anas & SANOU Simone

Sous la direction de :

Mr. Azzouz KCHIKACH Professeur à la FST - Marrakech

Mr. Abdessamad HEJJAJ Responsable du Laboratoire S2E du CNEREE

Mr. Mohammed JAFFAL Professeur à la FST - Marrakech

Soutenu le 16 Juin 2015 devant le jury composé de :

Mr. Azzouz KCHIKACH

Mr. Abdessamad HEJJAJ

Mr. Mohammed JAFFAL

Année universitaire : 2014 /2015

Table des matières

LISTE DES FIGURES	19
Liste des tableaux	19
Liste des photos	19
Introduction	21
Chapitre I : Prospection géophysique appliquée à l'hydrogéologie	22
I- Les méthodes électriques :.....	22
1- La polarisation spontanée (PS) :.....	22
2- Mise-à-la-masse :	22
3- Panneau électrique.....	23
II- Méthodes électromagnétiques(EM) :	23
1- Méthodes électromagnétiques temporelles.....	24
2- Méthodes électromagnétiques fréquentielles.....	24
III- Méthodes sismiques :	25
IV- Méthode de prospection gravimétrique	25
V- Méthode de prospection magnétique.....	26
Chapitre II. Généralités sur la Résonance Magnétique des Protons	28
I- Définition et principe :	28
1- Définition :	28
2- Principe de la méthode:	29
II- Les paramètres de la RMP :.....	30
1- Les paramètres mesurés par la RMP :	30
2- Les paramètres interprétés par la RMP	32
III- Les limites de la méthode RMP.....	33
Chapitre III. Etudes de cas des sondages RMP :	34
I- 1 ^{ère} étude de cas (Etude Bruitée) : sondage RMP de Ouzguita.....	34
1- Généralités sur le site	34
2- Etude des conditions de faisabilité du sondage RMP à Ouzguita :	21
3- Réalisation du levé de résonance magnétique protonique :.....	24
4- Inversion et interprétation :	26
II- 2 ^{ème} étude de cas (Etude réussie) : sondage RMP Bouchane.....	29
1- Généralités sur le site :	29
2- Inversion et interprétation des données :	33
Conclusion	38
Référence bibliographique.....	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Principe de la méthode mise-à-la-masse	23
Figure 2 : Principe du panneau électrique pour la configuration Wenner- α . A, B sont les électrodes d'injection et M,N les électrodes de potentiel. A chaque couleur du dispositif de mesure (AMNB) correspond une mesure	23
Figure 3 : Principe de la méthode sismique	25
Figure 4 : Représentation schématique du vecteur champ magnétique.....	27
Figure 5 : Principe et diagramme temporel de mesures en RMP	29
Figure 6 : Tableau représentant les paramètres hydrogéologiques interprétés à partir des mesures de la RMP	33
Figure 7: Situation géographique du secteur Ouzguita (Image satellitaire 2015, CNES/Astrium).....	34
Figure 8: Carte géologique détaillée de la zone d'étude (D'après carte géologique d'Amez Miz	20
Figure 9 : Schéma représentatif des points de mesure du champ magnétique local au niveau de la boucle	21
Figure 10:Types de boucle à installer selon l'intensité du bruit ambiant	24
Figure 11 : Schéma du montage d'un dispositif de mesure en sondage RMP	25
Figure 13 : Résultats de l'inversion du sondage RMP réalisé dans la région d'Ouzguita.	27
Figure 14: Situation géographique du secteur Bouchane (Image satellitaire landsat 2015)	29
Figure 18: Log synthétique du site de Bouchane	33
Figure 19: Résultats de l'inversion du sondage RMP réalisé dans le gisement de Bouchane.....	34
Figure 20: Log stratigraphique ou sondage de reconnaissance hydrogéologique 3390/53 réalisé dans la zone de Tameslouht (Document de l'Agence de bassin du Tensift)	42
Figure 21: Interface du logiciel d'acquisition Prodiviner	43

Liste des tableaux

Tableau 1:Tableau représentant les coordonnées géographiques des coins de la boucle.....	21
Tableau 2:Tableau représentatif de la valeur moyenne du champ magnétique Terrestre mesuré au niveau des coins et des deux diagonales de la boucle	22
Tableau 3:Tableau représentant la valeur de la susceptibilité magnétique des roches au niveau des coins de la boucle	22
Tableau 4:Tableau représentant la valeur du bruit mesuré au niveau des coins de la boucle.....	23

Liste des photos

Photo 1: Magnétomètre à protons	30
Photo 2: Susceptibilimètre	31

Remerciements

« Louange à Dieu, Seigneur des mondes sans qui rien ne saurait exister »

A l'issue de ce travail, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance au Centre National d'Etudes et de Recherches sur l'Eau et l'Energie (CNEREE) pour nous avoir accordé ce stage de fin d'études.

A Monsieur A. HEJJAJ, Docteur et Responsable du Laboratoire S2E du CNEREE qui nous a accueillis comme stagiaires et nous a guidé comme maître de Stage. Merci pour vos conseils, vos orientations et votre disponibilité.

A Monsieur A. KCHIKACH, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, notre Encadrant, qui nous a orienté tout au long du stage.

A Monsieur M. JAFFAL, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, pour son assistance.

A Mlle M. SNINEH, Doctorante au CNEREE pour son soutien et son accompagnement tout au long du stage.

A nos Enseignants du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences et Techniques Marrakech pour nous avoir initié à l'étude de l'Eau et de l'Environnement.

A nos familles, nos amis qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail, nous leur adressons notre profonde gratitude.

Introduction

Les ressources en eau du Maroc sont principalement des ressources conventionnelles (eaux de surface et eaux souterraines). On y trouve également des ressources en eau non conventionnelles telles que la réutilisation des eaux usées traitées et le dessalement de l'eau de mer, qui se développent de plus en plus. Les ressources en eau du Maroc souffrent d'une forte irrégularité dans l'espace et dans le temps ; elles sont également de plus en plus rares par rapport à la croissance démographique. Actuellement, 91 à 94 % des ressources sont mobilisés pour l'agriculture et seulement 6 à 9 % pour l'alimentation en eau potable et l'industrie. Le volume actuel disponible est déjà de 30% inférieur à la norme internationale (1000 m³ d'eau/habitant/an) en dessous de laquelle un pays est considéré en situation de "stress hydrique". Les longs épisodes de sécheresse conjugués à l'accroissement des besoins en eau engendrent des déséquilibres, en quantité et en qualité, dans la plupart des nappes aquifères.

Nous avons étudié deux sites différents en termes de géologie mais qui ne sont pas en marge de ce manque croissant en eau. Le premier site est Bouchane situé à 26 kilomètres de la ville de Youssoufia, le deuxième est Ouzguita d'une trentaine de kilomètres de la ville de Marrakech. Ces deux sites sont caractérisés par un climat semi-aride à aride, ils ont connu une succession de périodes de sécheresse et ne regorgent donc pas en quantité d'eaux de surface. Ainsi, l'espoir se repose sur les ressources en eau souterraines afin d'assurer l'alimentation en eau potable des populations environnantes, l'irrigation agricole et la bonne marche des industries de production qui s'y trouvent. Il en découle une forte pression sur les nappes phréatiques à cause de ces demandes énormes en eau et les méthodes utilisées pour leur exploration sont inappropriées.

Notre étude sur le site d'Ouzguita a porté essentiellement sur la prospection géophysique des nappes d'eau souterraines en place au moyen d'une nouvelle méthode géophysique qui est la Résonance Magnétique Protonique (RMP). Sur ce site, nous avons effectué une mission d'étude de faisabilité RMP et une autre mission consacrée à la réalisation du levé RMP. Concernant la zone de Bouchane, l'étude menée fut essentiellement l'inversion et la réinterprétation des données préalablement acquises au moyen de la méthode de résonance magnétique protonique. A la différence des méthodes traditionnelles et classiques d'exploration des ressources en eau souterraines, la méthode de Résonance Magnétique des Protons (RMP) est un outil qui permet de rationaliser les travaux de prospection et de caractérisation des nappes d'eau souterraines et d'estimer leur potentiel hydrique.

Chapitre I : Prospection géophysique appliquée à l'hydrogéologie

L'hydrogéologie ou hydrologie souterraine est la science qui étudie l'eau souterraine. Son domaine d'étude repose essentiellement sur deux branches des sciences de la terre, à savoir la géologie et l'hydrologie. Elle s'occupe de la distribution et de la circulation de l'eau souterraine dans le sol et les roches, en tenant compte de leurs interactions avec les conditions géologiques et l'eau de surface à travers les aquifères et autres milieux poreux peu profonds. L'hydrogéologie utilise des moyens de prospection géophysique, de techniques de forages, d'imagerie satellitaire (télédétection), de chimie isotopique et d'hydrodynamisme souterrain (circulation des eaux profondes). Le traitement et la modélisation des données mettent l'informatique en jeu : la géostatistique, le Système d'Information Géographique (SIG). Pour l'hydrogéologue, les méthodes géophysiques sont des outils susceptibles de répondre à des questions relatives aux eaux souterraines (Guérin, 2005). Ces méthodes permettent d'interpréter des paramètres hydrogéologiques (perméabilité, porosité, résistivité...) des couches profondes :

- La prospection électrique ;
- La prospection électromagnétique ;
- La prospection gravimétrique ;
- La prospection sismique ;
- La prospection magnétique.

I- Les méthodes électriques :

La résistivité électrique d'un milieu est par définition la propriété physique qui détermine l'aptitude de ce milieu à s'opposer au passage du courant électrique. Elle est exprimée en ohm-mètre (Ωm ou ohm.m) et la conductivité en siemens/mètre (S/m). En hydrogéologie, on utilise habituellement la conductivité en mS/m ou le $\mu\text{S/cm}$ pour avoir des valeurs entières. La résistivité d'un sol dépend essentiellement de la teneur en eau, de la minéralisation de l'eau, de la teneur en argile ainsi que de la granulométrie (Astier, 1971).

1- La polarisation spontanée (PS) :

La PS est une technique de mesure, sans source externe de la variation des potentiels électriques existants dans le sous-sol (Hovhannissian, 2000). Cette méthode peut être utilisée pour étudier des ondes où l'on peut atteindre des variations, d'origine électrochimique, du champ électrique dues à la circulation de l'eau dans le sol.

2- Mise-à-la-masse :

La technique de la mise à la masse décrit la façon d'injecter le courant électrique directement dans la masse à étudier, elle est utilisée lorsqu'une zone conductrice est déjà repérée par affleurement ou par forage (Parasnis, 1967, Oppliger, 1984, Bhattacharya et al. 2001). Une électrode d'injection de courant est placée directement dans la zone conductrice et l'autre est placée à l'infini. On mesure alors le potentiel entre un point fixe et des points de la zone d'étude.

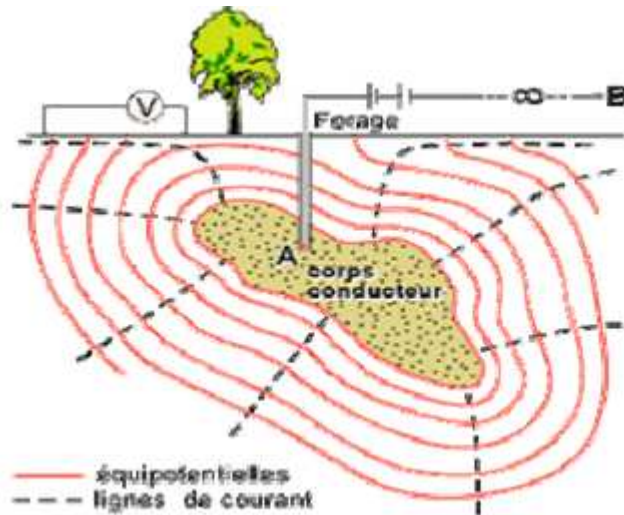


Figure 1 : Principe de la méthode mise-à-la-masse

3- Panneau électrique

Le panneau électrique correspond à la conjonction de ces deux dernières techniques. En effet, les méthodes d'imagerie électrique 2D et 3D ont été mises au point dans le but d'obtenir un modèle du sous-sol où la répartition de la résistivité varie verticalement et horizontalement le long d'un (2D) ou plusieurs (3D) profils (Parasnis, 1986, Loke et Barker, 1996, Dahlin, 2001).

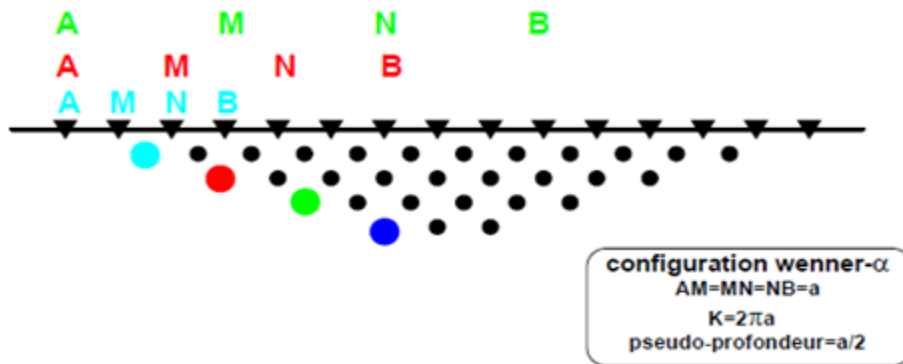


Figure 2 : Principe du panneau électrique pour la configuration Wenner- α . A, B sont les électrodes d'injection et M, N les électrodes de potentiel. A chaque couleur du dispositif de mesure (AMNB) correspond une mesure

II- Méthodes électromagnétiques(EM) :

Comme nous l'avons étudié auparavant, la prospection électrique nécessite des électrodes pour injecter le courant électrique dans le sol, alors qu'en prospection électromagnétique(EM) les courants sont produits par induction. Les méthodes EM sont généralement utilisées avec des fréquences suffisamment basses pour que les phénomènes liés aux courants de déplacement puissent être négligés (Parasnis, 1986). La plupart des

techniques EM sont fondées sur la propriété qu'ont les champs magnétiques variant dans le temps d'induire, des courants dans le sous-sol conducteur. Les courants induits engendrent eux-mêmes des champs magnétiques secondaires qu'on mesure en surface, en présence ou l'absence du champ inducteur. Ces mesures s'effectuent à différentes fréquences. La distribution des courants induits dans le sol dépend du produit de la conductivité du sol par sa perméabilité magnétique et la fréquence (Spies et Frischknecht, 1991).

1- Méthodes électromagnétiques temporelles

Il s'agit d'une catégorie de méthodes EM basse fréquence qui sont basées sur la mesure de la réponse temporelle du champ magnétique. Le principe général de ces méthodes consiste à engendrer des courants électriques dans le sous-sol, généralement par induction à partir d'une bobine émettant un champ magnétique variable, et à enregistrer le champ magnétique secondaire créé par ces courants soit par une autre bobine positionnée à l'intérieur (dispositif central) ou à l'extérieur de la première (dispositif offset), soit par la même bobine (dispositif à boucles coïncidentes).

Le courant qui circule dans l'émetteur est brusquement interrompu. Cette brusque variation du champ magnétique primaire crée une force électromotrice qui fait circuler les courants dans les formations géologiques : ce sont les courants de Foucault, ou courants induits ou courants secondaires (Spies et Frischknecht, 1991).

L'application de ces méthodes en hydrogéologie est relativement récente. Fitterman et Stewart (1986) ont été les premiers à évaluer les possibilités de ces méthodes dans ce domaine. Ils ont montré par des calculs directs des réponses de structures simples, des possibilités de détection dans les cas suivants : zone de gravier du bedrock, lentilles de sables et biseau salé.

2- Méthodes électromagnétiques fréquentielles

Les méthodes fréquentielles utilisent habituellement un émetteur qui transmet un signal harmonique et un récepteur qui mesure la partie réelle et la partie en quadrature du champ total. La partie réelle est le signal qui est en phase avec le champ primaire (inphase) et la partie en quadrature est le signal déphasé de 90^0 par rapport au champ primaire, on constate que le champ résultant, lui, ne conserve pas au cours du temps la même direction : au lieu d'osciller linéairement, il effectue durant chaque période une rotation complète dans un plan, appelé plan de polarisation. Cette relation amène l'extrémité du vecteur représentant le champ résultant à parcourir une ellipse, dite ellipse de polarisation. L'interprétation quantitative des mesures EM obtenues sur le terrain nécessite souvent la détermination des paramètres de cette ellipse.

III- Méthodes sismiques :

La sismique étudie les variations de la vitesse sismique du sous-sol (la propagation des ondes élastique), variations qui sont en relation avec la dureté, le degré de consolidation et la saturation. Avec cette méthode, on peut distinguer la roche compacte du terrain meuble, la roche altérée, les zones fracturées dans une roche saine, le niveau de la nappe phréatique (Telford et al., 1990).

En effet, le paramètre qui nous intéresse est la vitesse de propagation de ces ondes dans le sous-sol. Ces ondes ont été générées par une source sur ou dans le sol. Chaque roche peut être caractérisée par la mesure de la vitesse sismique qui lui est propre. Cette propagation des ondes élastiques dépend des propriétés élastiques des roches composant le sous-sol. En hydrogéologie, il s'agit essentiellement de sismique de réfraction.

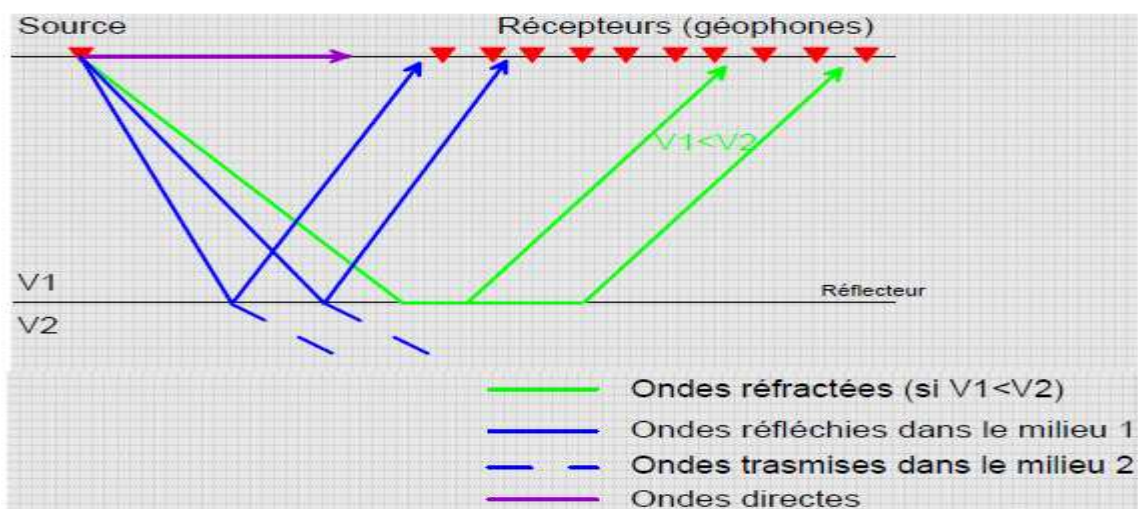


Figure 3 : Principe de la méthode sismique

IV- Méthode de prospection gravimétrique

La gravimétrie mesure les variations de l'accélération de la pesanteur à la surface de la zone à étudier (Parasnis, 1986). La prospection gravimétrique consiste à mesurer ces variations, puis à appliquer aux valeurs brutes un certain nombre de corrections pour éliminer l'influence des autres corps, de la rotation et de la forme de la terre et des effets topographiques locaux afin de ne faire ressortir que les anomalies dues seulement aux variations de densité du sous-sol. De faibles valeurs de la pesanteur correspondent à des densités apparentes faibles. Réciproquement, de fortes valeurs correspondent à des densités élevées.

V- Méthode de prospection magnétique

La prospection magnétique est basée sur la mesure du champ magnétique terrestre et de ses variations spatiales et temporelles. Elle étudie la susceptibilité magnétique (k) des matériaux géologiques. Celle-ci est définie comme étant le rapport de l'Intensité de magnétisation (I) par celle du champ magnétique inducteur(H).

$$K = I / H$$

Avec : K une grandeur sans dimension.

Ce champ magnétique terrestre est représenté par un vecteur, défini en tout point de l'espace par ses composantes horizontale H et verticale Z, tel que :

$$F^2 = H^2 + Z^2$$

Ce vecteur est également caractérisé par son intensité exprimée en nanoTesla (nT), sa déclinaison D (angle entre sa composante horizontale et le nord géographique) et son inclinaison I (angle entre le vecteur F lui-même et l'horizontale).

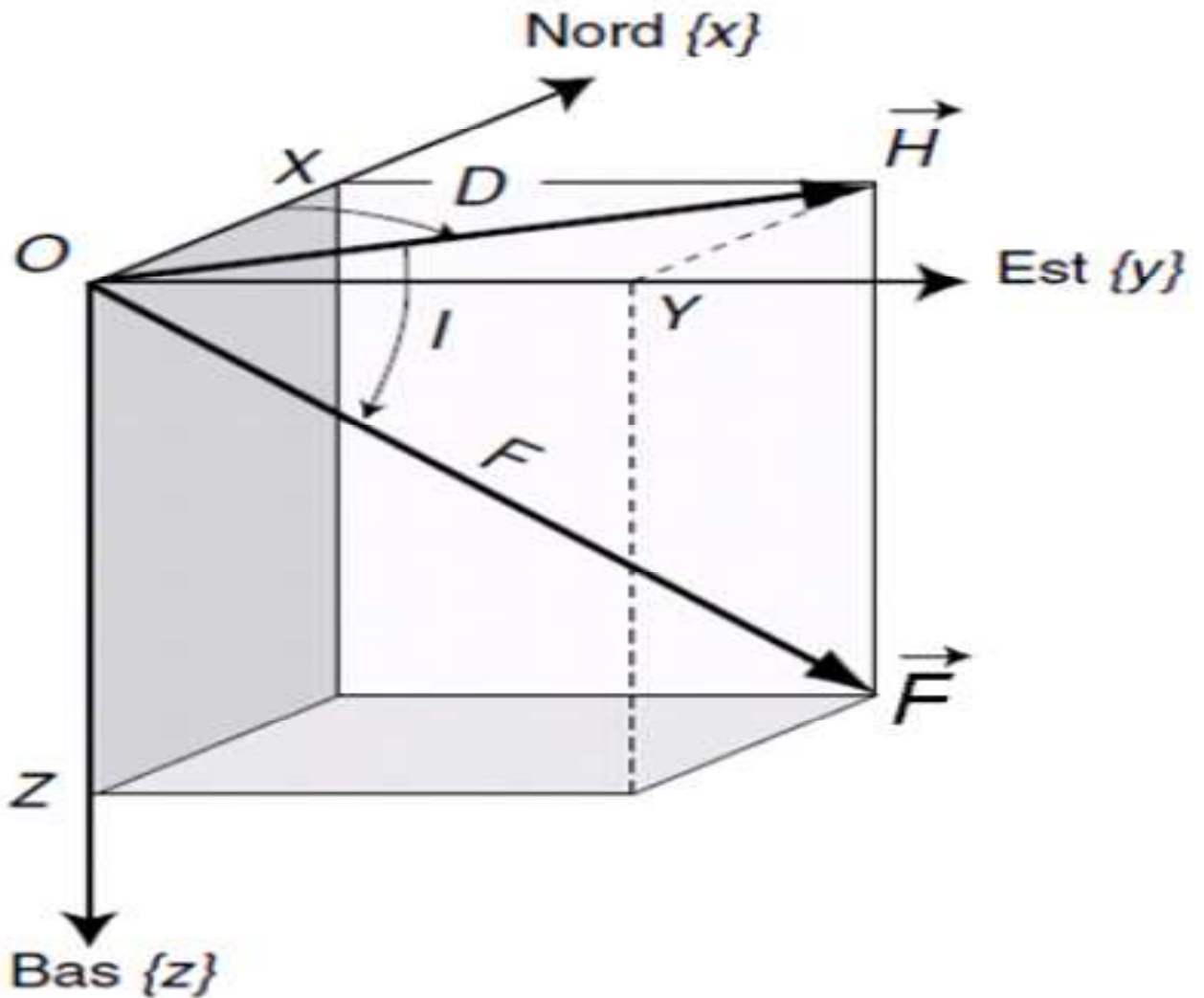


Figure 4 : Représentation schématique du vecteur champ magnétique

La connaissance de la géométrie et des propriétés dynamiques des milieux géologiques constitue un élément clé pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des systèmes aquifères et, en particulier pour la détermination de leur modalité d'exploitation, de gestion et de protection durable. En hydrogéologie, cette connaissance est principalement recherchée en subsurface, au sein des aquifères les plus exploités et ayant le plus d'interactions avec les autres compartiments hydrologiques (sol, eaux de surface, zones humides, etc.). L'échelle d'étude est décamétrique à hectométrique (celle de futurs forages d'exploitation, de la maille du modèle hydrogéologique, etc.). Le moyen utilisé communément est l'essai de pompage réalisé au sein de forages complétés dans le cas favorable de piézomètres d'observation. Les coûts de réalisation de ces forages (et des piézomètres) et à fortiori de pompages d'essai sont élevés. Ils ne permettent pas en général de multiplier les observations et de prendre ainsi en considération les hétérogénéités du milieu et les variations spatiales de ces propriétés hydrodynamiques. Dans ce cadre, la mise en œuvre des méthodes géophysiques constitue un atout important tant pour diminuer le coût des études hydrogéologiques que pour améliorer leur efficacité et la précision des résultats qui en sont tirés.

Chapitre II. Généralités sur la Résonance Magnétique des Protons

Les méthodes géophysiques non-destructives mises en œuvre à partir de la surface, dont entre autres les panneaux électriques en courant continu ou les sondages TDEM (Time Domain Electro Magnetic), sont maintenant couramment utilisées pour caractériser la géométrie des différents compartiments du proche sous-sol.

Ces méthodes permettent une estimation de la porosité en utilisant la loi empirique d'Archie (Archie, 1942). Cependant, le paramètre physique obtenu après inversion, la résistivité électrique, n'est pas lié de façon univoque à la présence d'eau souterraine, la profondeur du niveau piézométrique dû aux propriétés hydrodynamiques des aquifères. Au contraire, le phénomène de Résonance Magnétique des protons (RMP) est directement lié à la présence d'eau au sein du milieu : il s'agit de mesurer le signal réémis par l'eau souterraine après excitation par un champ électromagnétique à la fréquence spécifique de résonance des protons (dite fréquence de Larmor). C'est pourquoi les sondages RMP constituent une méthode sélective pour détecter directement la présence d'eau dans le sous-sol.

I- Définition et principe :

1- Définition :

La RMP est une méthode récente, comparée aux autres méthodes géophysiques. C'est en 1946 que le phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN) a été découvert par les équipes universitaires de Stanford et Havard. Les pétroliers se sont alors rapidement approprié le concept pour mettre au point les premières sondes de diagraphie afin d'estimer les ressources pétrolières (Varian, 1962). Les premières applications de la RMN à la prospection des ressources en eaux ont vu le jour à l'Institut de Cinétique chimie et Combustible de l'Académie des Sciences de la Terre de l'URSS (Union des Républiques Socialistes Soviétiques) de Novossibirsk. C'est alors que le premier appareil de mesure RMN a été mis au point, l'HYDROSCOPE (Semenov et al., 1988). Les études réalisées depuis 1990 ont été recensées par Legchenko et Valla (2002). Malgré sa relative nouveauté, la RMP est déjà très appréciée dans le monde de l'hydrogéologie (Legchenko et al., 2002) car elle permet de mesurer un signal géophysique qui est directement lié à la teneur en eau (amplitude maximale du signal) et à la taille des pores (temps de relaxation).

2- Principe de la méthode:

Le principe de base de la méthode repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau placées dans un champ magnétique (tel que celui de la Terre ou artificiel), possèdent des moments magnétiques non nuls qui, à l'équilibre sont alignées dans la direction de ce champ principal. L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre et provoque une précession des moments magnétiques autour de la direction du champ magnétique initial. Après coupure du champ excitateur, au cours du retour à l'état d'équilibre, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons qui précessent à la fréquence de Larmor, constituant ainsi la réponse RMP (Boucher, 2007).

La fréquence de Larmor est une fréquence spécifique apparaissant suite à l'excitation des protons H^+ par l'émission d'un champ magnétique perturbateur. (Kchikach et al., 2013).

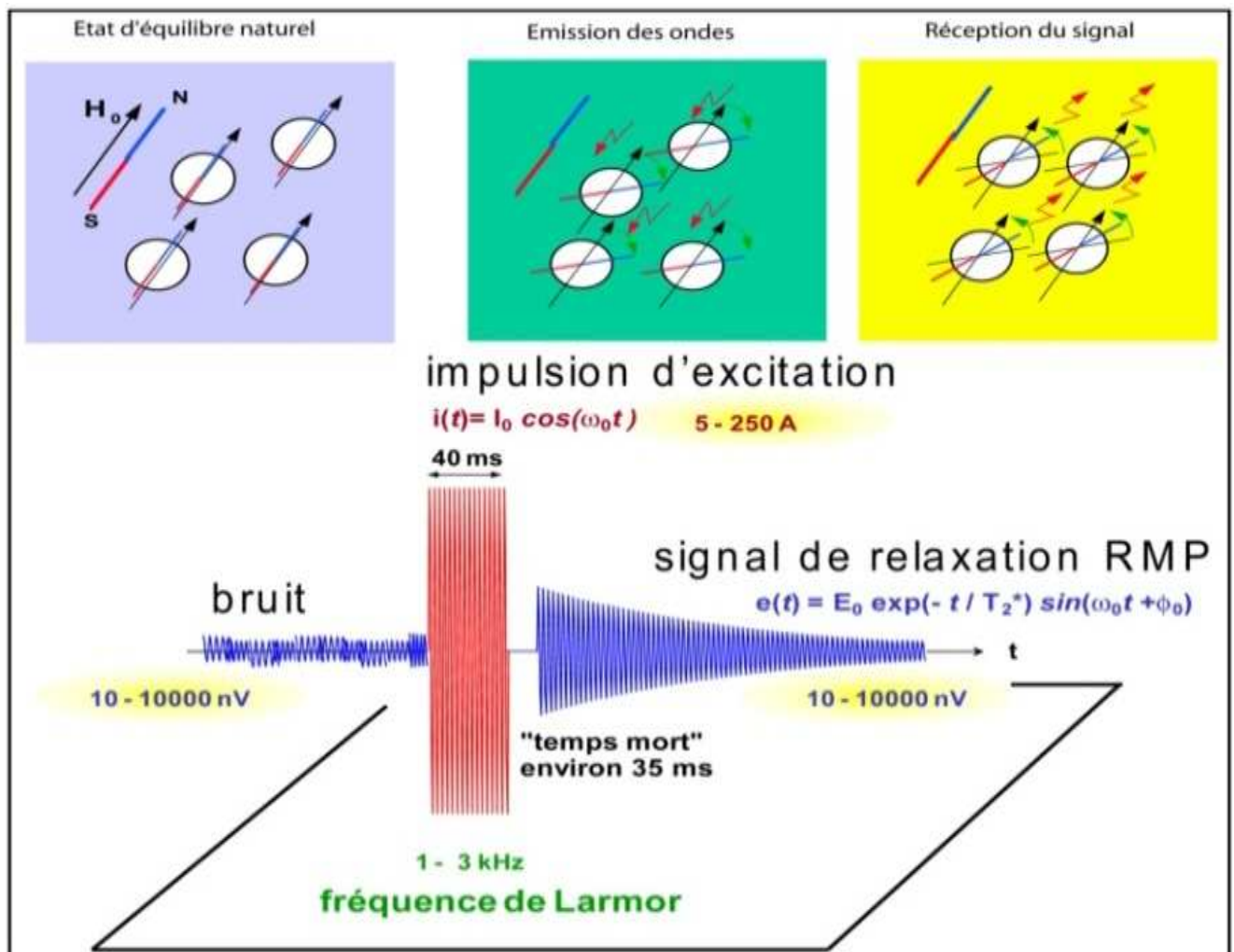


Figure 5 : Principe et diagramme temporel de mesures en RMP

II- Les paramètres de la RMP :

1- Les paramètres mesurés par la RMP :

a- Le champ magnétique terrestre :

En physique, le **champ magnétique** est une grandeur ayant le caractère d'un champ vectoriel, c'est-à-dire caractérisée par la donnée d'une norme, d'une direction et d'un sens, définie en tout point de l'espace, permettant de modéliser et quantifier les effets magnétiques du courant électrique ou des matériaux magnétiques comme les aimants permanents. Le champ magnétique a une origine électrique. En effet, il est produit par la circulation du courant électrique. Ce paramètre est mesuré à l'aide du magnétomètre à protons et il permet d'interpréter la fréquence de Larmor (F_L) d'après la relation suivante :

$$F_L(\text{Hz}) = 0,04258 H_0(\text{nT})$$

Avec H_0 : le champ magnétique terrestre de la zone étudiée.



Photo 1: Magnétomètre à protons

b- La susceptibilité magnétique :

En prospection magnétique, la réponse magnétique des roches est fonction du contenu en matériel magnétique. En effet, ce matériel aura une susceptibilité plus grande que la roche elle-même. C'est pour cela que le degré de magnétisation d'un corps sera déterminé par sa susceptibilité magnétique. On mesure la susceptibilité magnétique à l'aide du susceptibilimètre.



Photo 2: Susceptibilimètre

c- Le bruit ambiant :

C'est un élément limite à la méthode des sondages par Résonance Magnétique des Protons car les mesures RMP sont sensibles au bruit électromagnétique (lignes de haute tension, antennes radios, pompes hydrauliques etc.) et sont gênées par la présence de roches magnétiques, d'ailleurs il faut tenir compte de ce bruit lors de la configuration des paramètres de mesure.

Sa mesure consiste à prendre les mesures des quatre coins et du centre en déplaçant la boucle du testeur d'analyse de 6.25 mètres de côté. Ainsi, la valeur de bruit obtenu va renseigner sur le type de boucle à installer pour la réalisation du levé RMP.

d. L'amplitude et les constantes du temps de relaxation :

L'amplitude du signal après la coupure du courant renseigne directement sur la quantité d'eau présente dans le volume étudié (Schirov et al., 1991).

Les constantes du temps de relaxation sont les temps de décroissance du signal mesuré ; elles sont extraites à partir des graphes de sondage RMP et nous renseignent sur la taille des pores de l'aquifère. D'où une identification possible de l'eau libre (réservoir poreux) et de l'eau liée (couche argileuse). On distingue trois constantes du temps de relaxation :

- **Constante de temps de relaxation longitudinale (T_1)** : elle caractérise la relation entre les protons et leur environnement (spin-lattice relaxation time). Sa valeur reflète comment l'énergie magnétique est changée avec leur environnement. Des

valeurs élevées de T_1 correspondent à un faible couplage et un retour lent à l'équilibre. Cette constante se manifeste le long du champ magnétique statique.

- **Constante de temps de relaxation transversale (T_2)** : elle caractérise les échanges d'énergie entre les protons (spin-spin relaxation time) qui se manifeste dans un plan orthogonale à la direction du champ magnétique statique.
- Dans un champ magnétique non parfaitement homogène (par exemple un champ perturbé par des particules magnétiques), la fréquence de Larmor n'est pas exactement la même dans tout l'espace et les protons subissent un déphasage. **Le temps de relaxation transversale mesuré (T_2^*)** est plus court que (T_2). (T_2^*) est lié aux propriétés magnétiques du réservoir (Boucher, 2007).
-

2- Les paramètres interprétés par la RMP

A cause d'un temps mort instrumental, une partie du signal n'est pas mesurée. Le signal est donc extrapolé pour connaître l'amplitude à l'origine et remonter ainsi à la teneur en eau. Mais si le temps de relaxation T_2^* est court, l'information obtenue en enregistrant le signal qu'à partir de 40 ms (temps mort de l'appareil standard NUMIS) n'est pas suffisante pour extrapoler correctement le signal. Dans ce cas, l'amplitude initiale et par conséquent la teneur en eau sont mal-estimées (Legchenko et al., 2002).

Le temps de relaxation T_2^* dépend de la distance entre la molécule d'eau et la paroi solide. Les temps de relaxation les plus courts correspondent à l'eau située proche des grains solide, typiquement l'eau liée ; l'eau contenue dans les argiles n'est pas mesurée. Les profils de teneur en eau obtenus par inversion des données permettent donc de caractériser la géométrie des aquifères. En particulier il est possible de déterminer la profondeur du niveau piézométrique dans le cas d'un aquifère libre (s'il existe un contraste avec la zone non saturée) et la profondeur du toit d'un aquifère confiné (Marie Boucher, 2007).

Comme la quantité d'eau invisible par la méthode RMP correspond approximativement à l'eau liée, la teneur en eau estimée par RMP (après extrapolation du signal pendant le temps mort) est dans de nombreux contextes géologiques une bonne approximation de la porosité cinématique (Lachassagne et al., 2005). Cependant le temps de relaxation T_2^* qui détermine la quantité d'eau non détectée ne dépend pas seulement de la distance entre la molécule d'eau et la paroi solide, mais aussi des hétérogénéités du champ magnétique statique (Marie Boucher, 2007).

Tout comme il est possible d'estimer la perméabilité à partir de mesures RMN en laboratoire, il est possible d'estimer la Transmissivité des aquifères à partir des sondages RMP (Legchenko et al., 2002).

Mesure RMP		Paramètre hydrogéologique
Amplitude du signal	E_0	Teneur en eau (porosité)
Constante de temps	T_2-T_1	Taille des pores - perméabilité
Phase du signal	Φ_0	Conductivité électrique
Energie de l'impulsion	q	Profondeur d'investigation

Figure 6 : Tableau représentant les paramètres hydrogéologiques interprétés à partir des mesures de la RMP

III- Les limites de la méthode RMP

Les limites liées à la méthode de sondage par Résonance Magnétique des Protons sont diverses et peuvent dans certains cas rendre inexploitable les données acquises sur l'aire d'étude ; nous pouvons citer en l'occurrence :

- les bruits électromagnétiques dont les sources sont les câbles électriques de haute tension, les antennes radio et les pompes hydrauliques en marche;
- la susceptibilité magnétique, qui sera une limite en atteignant la valeur $1 \cdot 10^{-3} \text{ SI}$;
- l'instabilité du champ magnétique terrestre lorsqu'on observe une variation supérieure à 20 nano tesla entre le champ magnétique terrestre et le champ magnétique mesuré.

Généralement, en présence de câbles de haute tension, il est conseillé d'adopter comme configuration de la boucle de mesure RMP une boucle en huit. En ce qui concerne les roches à susceptibilité magnétique élevée, il est aussi conseillé d'opter pour une boucle en huit pour la mesure RMP ou d'augmenter les moments des pulses (stacks).

Chapitre III. Etudes de cas des sondages RMP :

I- 1^{ère} étude de cas (Etude Bruitée) : sondage RMP de Ouzguita

Le but de notre mission était de déterminer la profondeur de la nappe phréatique de la région d'Ouzguita ainsi que ses propriétés hydrologiques. Cette mission a comporté deux phases : la première phase s'est déroulée sur le terrain pour l'acquisition des données et la deuxième phase a été consacrée à l'interprétation des données à l'aide de logiciels (NMR et SAMOVAR).

1- Généralités sur le site

a- Situation géographique :

Nous avons expérimenté la méthode de résonance magnétique protonique à Ouzguita, localité située à 30 kilomètres de la ville de Marrakech, de 868 mètres d'altitude, dont les coordonnées géographiques sont Nord $31^{\circ} 17' 11,4''$ et Ouest $08^{\circ} 05' 33,5''$. Cette localité est plus précisément sur la plaine du Haouz. Notre mission s'y est déroulée sur deux dates, à savoir les 21 et 28 Mai 2015.

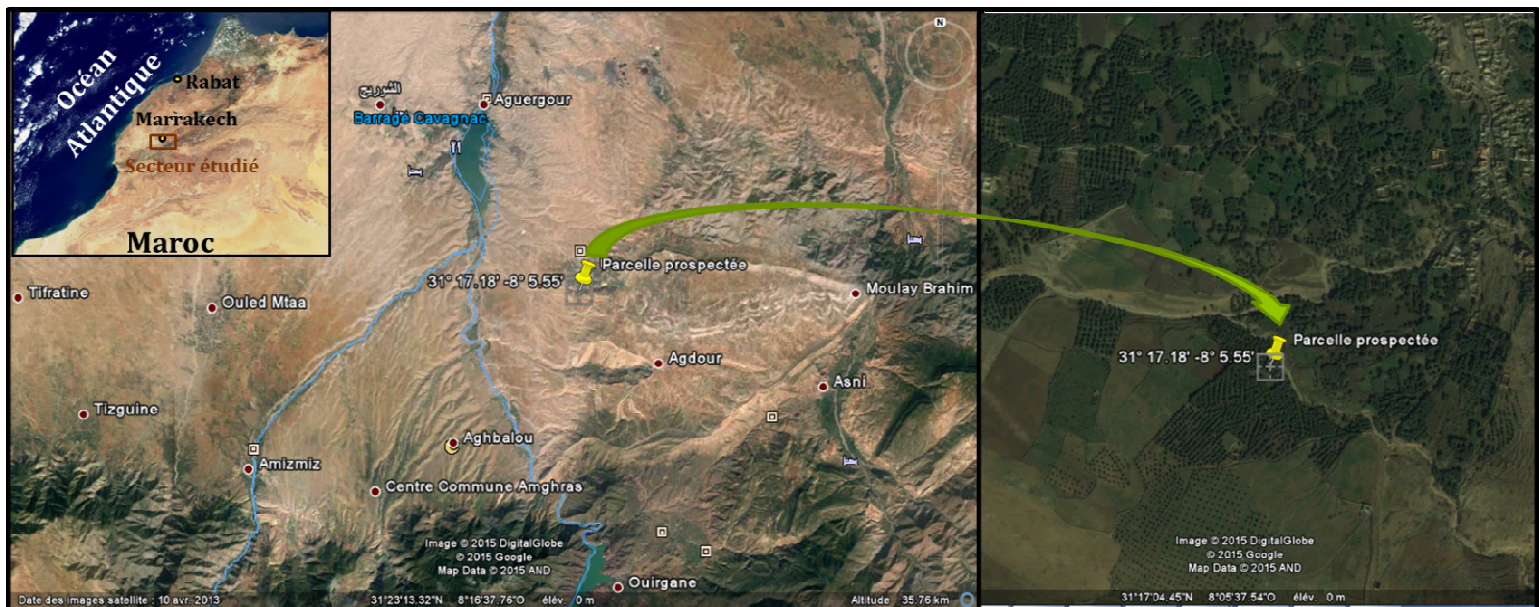


Figure 7: Situation géographique du secteur Ouzguita (Image satellitaire 2015, CNES/Astrium)

b- Cadre géologique :

Le secteur étudié se situe à l'extrême sud de la meseta occidentale marocaine. Il appartient à un bassin d'âge viséen (Carbonifère) de la chaîne Hercynienne. Ce bassin viséen a connu dans son évolution géologique, une phase d'ouverture et une phase de comblement. On y trouve des affleurements Hercyniennes et des boutonnières d'âge paléozoïque qui affleurent à l'intérieur de la couverture mio-pliocène et quaternaire de la plaine du Haouz. Les affleurements sont formés de dépôts volcano-sédimentaires, globalement monotones, contenant des bancs silto-gréseux, des carbonates, des schistes, et des quartzites avec quelques intrusions volcaniques. Toutes ses formations sont entourées par une couverture composée de carbonates et de grès qui constituent les dépôts de la plaine du Haouz.

Ainsi, on peut regrouper les différentes formations en place comme suit (fig. 8):

- Formations d'âge Viséen :Elles se caractérisent par la dominance des formations silto-chloritiques volcano-sédimentaires et des formations schisteuses et gréseuses à interaction avec des calcaires et des grès carbonatés.
- Formations d'âge Mio-pliocène : elles sont constituées de poudingues à ciment argileux-sableux, roses ou jaunâtres, des cailloutis et des conglomérats fortement encroûtés.
- Formations d'âge Quaternaire : elles sont constituées par des terrasses limoneuses, ou caillouteuses avec des encroûtements calcaires.

Dans l'ensemble, la zone d'Ouzguita est affectée par un réseau de failles de direction globale NW-SE. Ces failles contrôlent la déformation syn-schisteuse. Mais il existe d'autres familles de failles postérieures à celles-ci, de direction subméridienne à NE.

c- Cadre hydrologique :

Située au piémont de la chaîne du Haut Atlas, notre zone d'étude connaît un climat aride avec la rareté des ressources en eau. Elle se situe entre deux affluents de l'Oued Tensift (N'Fis et Rheraya)

L'Oued N'fis est l'Oued le plus long et le plus important des affluents de Tensift, sa longueur est de 152 Km. Le bassin versant de cet affluent a un périmètre de l'ordre de 315 Km, est le plus grand en surface (1709,82 Km²). C'est un Oued qui draine les plus forts apports en débit d'eau : 5,25 m³/s comme débit moyen mensuel enregistré à la station du Barrage Lalla Takerkoust. Malgré l'importance que constitue ce lac artificiel, les ressources en eau dans la région aval du barrage restent limitées à cause de l'irrégularité des volumes d'eau lâchés, qui dépendent des apports de l'oued et de l'importance des précipitations au niveau du bassin versant.

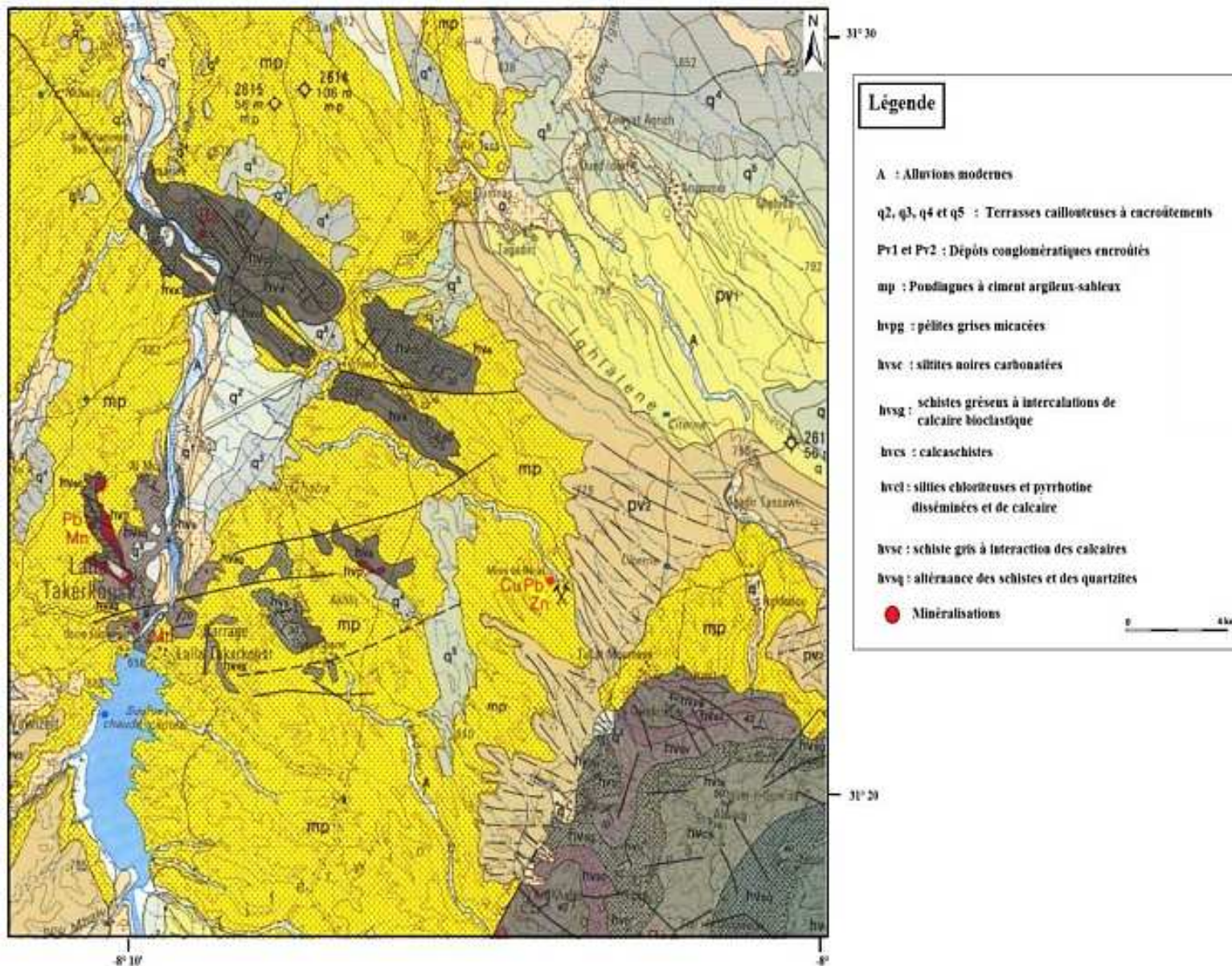


Figure 8: Carte géologique détaillée de la zone d'étude (D'après carte géologique d'Amezmi)

2- Etude des conditions de faisabilité du sondage RMP à Ouzguita :

L'étude de faisabilité consiste à savoir s'il est possible ou non d'effectuer un levé RMP dans une zone donnée. Pour étudier les conditions de faisabilité du sondage RMP à Ouzguita, nous avons commencé par le traçage d'une zone d'action de forme carrée de 100m de côté où nous allons installer la boucle de mesure lors de la réalisation du levé RMP. Chaque câble de 100m sera lié à un autre par des connecteurs. Les étapes de la mesure étaient :

a- Mesure du champ magnétique de l'aire d'étude :

La démarche de mesure consiste à mesurer le champ magnétique terrestre au niveau des quatre coins et sur les deux diagonales (chaque 10m) de la boucle de mesure de la RMP.

Tableau 1: Tableau représentant les coordonnées géographiques des coins de la boucle

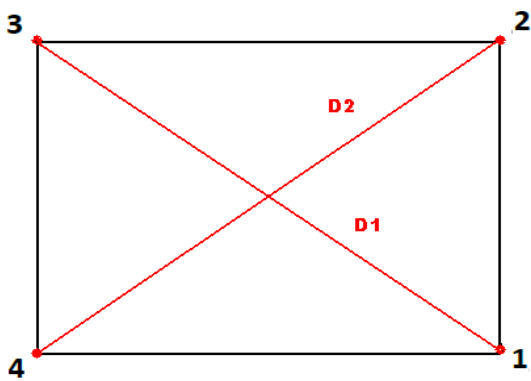


Figure 9 : Schéma représentatif des points de mesure du champ magnétique local au niveau de la boucle

Coins	Longitude X	Latitude Y	Elévation Z (m)
1	W 8° 05' 33,4 ''	N 31° 17' 11,0 ''	870
2	W 8° 05' 38,5''	N 31° 17' 10,6''	854
3	W 8° 05' 37,4 ''	N 31° 17' 13,2''	856
4	W 8° 05' 35,5''	N 31° 17' 08,7''	861

L'ordre de grandeur du champ magnétique local était de 40 333,7 nT. Cette valeur varie très peu à l'échelle de la zone de déploiement de la boucle. C'est-à-dire que nous avons bien enregistré le champ magnétique local sans s'approcher de la condition limite (variation +/- 20 nT).

Tableau 2:Tableau représentatif de la valeur moyenne du champ magnétique Terrestre mesuré au niveau des coins et des deux diagonales de la boucle

Emplacement	Valeur Moyenne du champ magnétique Terrestre (nT)
C ₁	40 323
C ₂	40 336,7
C ₃	40 336,2
C ₄	40 338,1
Diagonale 1 (D1)	40 331,5
Diagonale 2 (D2)	40 335,8

b- Mesure de la susceptibilité magnétique des roches :

Après avoir vérifié la stabilité du champ magnétique terrestre, nous avons procédé à la mesure de la susceptibilité magnétique des roches existantes dans l'aire d'étude. Nous avons également mesuré la susceptibilité magnétique au niveau des quatre coins (C₁, C₂, C₃, C₄) de la boucle de mesure RMP dont les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 3:Tableau représentant la valeur de la susceptibilité magnétique des roches au niveau des coins de la boucle

EMPLACEMENT	Susceptibilité Magnétique (10⁻³ S.I)
C ₁	0,225
C ₂	0,210
C ₃	0,016
C ₄	0,070

D'après ce tableau, nous constatons que la susceptibilité magnétique des roches varie légèrement et que la susceptibilité magnétique moyenne est de l'ordre de $0,13 \cdot 10^{-3}$ S.I. Cette valeur indique la possibilité d'appliquer la RMP dans la zone d'étude.

c- Mesure du bruit existant :

Le bruit est un élément limite de la méthode des sondages de la résonance magnétique des protons. Pour le déterminer, nous avons effectué les mesures au niveau des quatre coins et du centre de la zone délimitée, en déplaçant la boucle du testeur d'analyse de 6.25 mètres de côté.

Pour déterminer la fréquence à utiliser au cours du levé RMP, nous avons calculé la fréquence de Larmor à partir de la valeur du champ magnétique terrestre moyen de l'aire d'étude.

On a $H_0 = 40\,333,7\text{nT}$, donc la fréquence de Larmor à utiliser sera :

$$F_L = 0,04258 * H_0$$

$$F_L = 1717,41 \text{ Hz}$$

D'après la valeur de la fréquence de Larmor, nous avons le choix entre deux fréquences à utiliser pour la détection du bruit, soit 1500 Hz soit 2000 Hz.

Tableau 4:Tableau représentant la valeur du bruit mesuré au niveau des coins de la boucle

Coins	La valeur du bruit ambiant (μV)	Voltage (μV)	Fréquence (Hz)
C ₁	0,242	2	2000
C ₂	0,230	2	2000
C ₃	0,232	2	2000
C ₄	0,226	2	2000

L'ordre de grandeur du bruit ambiant qui est de $0,232 \mu V$ nous renseigne sur le type de boucle à installer pour le sondage RMP. Ainsi, à l'issue de l'étude des conditions de faisabilité sur le site d'Ouzguita, il est ressorti que nous pourrions utiliser la méthode RMP pour réaliser le levé et que la configuration de boucle admise sera une boucle en huit carrée.

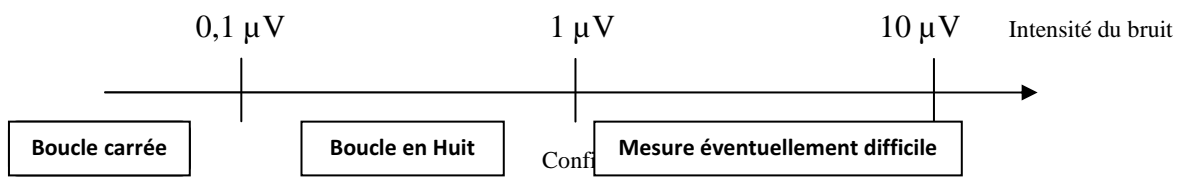


Figure 10: Types de boucle à installer selon l'intensité du bruit ambiant

3- Réalisation du levé de résonance magnétique protonique :

Les conditions de faisabilité RMP étant remplies, nous avons réalisé le levé RMP à Ouzguita à la date du 28 Mai 2015. A l'issue de l'étude des conditions de faisabilité, nous avons opté pour une boucle en huit carrée ; mais d'après les forages de reconnaissance effectués au préalable aux alentours de notre zone de mesure, la profondeur moyenne de la nappe d'eau serait d'environ 80 mètres, donc en utilisant la boucle en huit carrée, la profondeur d'investigation du sous-sol sera diminuée car elle n'atteindra que 50 mètres. Ainsi, nous avons décidé d'opter pour la boucle carrée en augmentant le nombre de pulses et les stacks.

a- Matériel requis pour la réalisation du levé RMP

Pour la réalisation du levé RMP, nous avons eu recours à un ensemble de matériel à savoir la boucle émettrice-réceptrice de signal, à l'équipement Numis Plus et au logiciel d'acquisition des données.

- L'équipement Numis Plus est constitué des appareils suivants :
 - Magnétomètre à protons pour mesurer le champ magnétique de la zone étudiée ;
 - Une unité centrale (UC) qui permet à la fois de générer les impulsions et de mesurer des signaux issus des protons ;
 - Un ou deux convertisseurs selon les dimensions de la boucle ;
 - Un système d'acquisition relié au convertisseur, à l'ordinateur au condensateur et gère la tension à envoyer ;
 - Des blocs de capacité pour l'optimisation de l'énergie des impulsions d'excitation ;
 - Un câble de boucle utilisé en tant qu'antenne à la fois pour l'émission et la réception ;
 - Un ordinateur portable pour le contrôle du système lors de l'acquisition, le traitement et l'interprétation des données.

➤ Montage des équipements :

Le montage du dispositif permettant le sondage de la méthode de résonance des protons suit un ordre bien précis, comme indiqué ci-dessous :

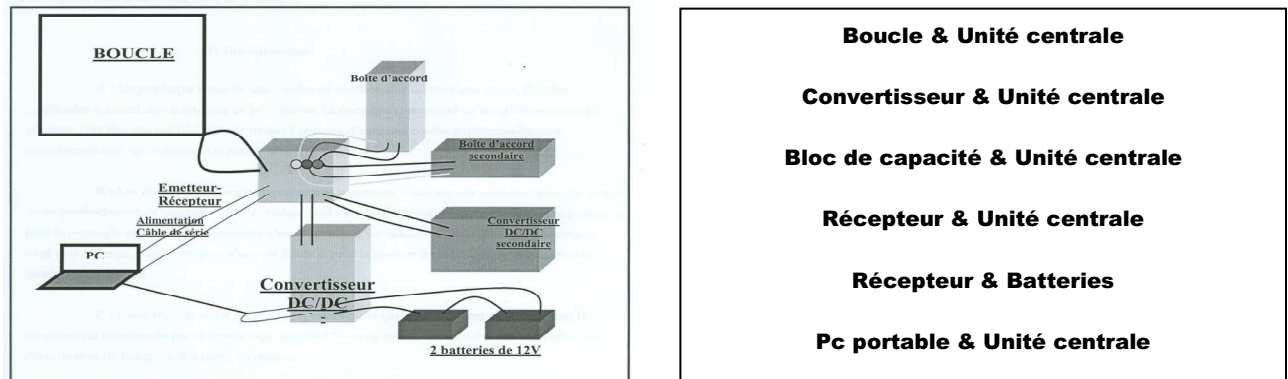


Figure 11 : Schéma du montage d'un dispositif de mesure en sondage RMP

➤ Logiciels utilisés :

Prodiviner : c'est un logiciel d'acquisition ; on l'utilise également pour diminuer l'influence relative du bruit électromagnétique naturel ou anthropique.

NuclearMagneticResonance (NMR) : c'est un logiciel utilisé pour élaborer la matrice d'inversion des données.

Samovar : c'est un logiciel qui permet l'inversion effective des données et renseigne sur les paramètres hydrogéologiques correspondant au signal mesuré (teneur en eau de l'aquifère, épaisseur de la tranche d'eau, perméabilité du sol ...) (Kchikach et al ., 2013).

b- Réalisation du levé RMP

Au cours des mesures, la boucle joue deux rôles : l'envoi d'un courant électrique continu créant un champ magnétique oscillant à la fréquence de Larmor, et la réception de la réponse RMP. Lorsque la communication PC – Système Numis est au point, l'opérateur doit introduire les paramètres suivants au niveau du logiciel d'acquisition Prodiviner :

- Le type de boucle (dans notre cas, nous avons choisi une boucle carrée de 400 mètres de long faisant un tour de boucle),

- La taille et le diamètre de la boucle. En effet le diamètre de la boucle donne une estimation de la profondeur du sous-sol investigué (la profondeur étant fonction de la résistivité des terrains investigués et du moment d'excitation) ;
- Le nombre de tours de la boucle ;
- La durée d'enregistrement, par défaut 240ms ; normalement, cette valeur est comprise entre 240 et 1040ms ;
- Le nombre de moments d'impulsion : nous avons choisi 6 moments pour un sondage RMP test et 24 moments pour le sondage normal. Augmenter le nombre de moments permet de détailler les mesures du sondage RMP ;
- La valeur du champ magnétique terrestre mesuré et la fréquence de Larmor qui nous indique la configuration du bloc de capacité;
- La durée de l'impulsion (en ms), une pulse de 40ms est considérée pour être une valeur optimale par défaut. Cependant, il se peut que les signaux longs (constante de temps > 150ms) soient mesurés avec une pulse de 60ms et même peut être recommandé pour des investigations profondes lorsque la boucle utilisée est de grande dimension ;
- Filtre Passe bande par défaut égale à 10 Hz ;
- L'optimisation du stacking : le nombre de stacks dépend de l'amplitude du signal et du bruit ambiant ; pour nos mesures nous avons choisi 240 stacks afin d'optimiser le rapport signal-bruit ;
- Le nombre de pulses : les mesures standard utilisent une excitation simple à une seule impulsion ; dans notre cas nous avons choisi 24 pulses.
- La sauvegarde des données pour chaque pulse est automatique.

Après l'introduction de ces différents paramètres de configuration sur l'interface du logiciel d'acquisition Prodiviner, le sondage RMP est lancé. L'acquisition des données est matérialisée par une courbe sinusoïdale qui est le signal des protons H^+ . L'opérateur peut ainsi suivre l'évolution de la courbe du signal reçu, de même que la courbe du bruit accumulé.

4- Inversion et interprétation :

Après la réalisation des mesures de la RMP sur le terrain, l'étape suivante est l'inversion 1D de la matrice calculée à partir du logiciel NMR. Cette inversion se fait par un logiciel qui s'appelle SAMOVAR donnant la réponse théorique des couches à différentes

profondeurs. Cette matrice tient compte de la configuration d'acquisition des données : la taille de la boucle, l'inclinaison du champ magnétique terrestre, la fréquence du Larmor et la résistivité électrique du sous-sol.

Nous avons attribué des résistivités aux couches géologiques présentes, tout en se basant sur les sondages de reconnaissance effectués aux alentours de la zone d'étude (cf. annexe SR 3390/53).

L'inversion 1D des données fournit une estimation sur la distribution de la teneur en eau, de la taille moyenne des pores (qui donne une estimation sur la perméabilité des aquifères) et de la profondeur de chaque aquifère existant au niveau du sous-sol de la zone d'étude.

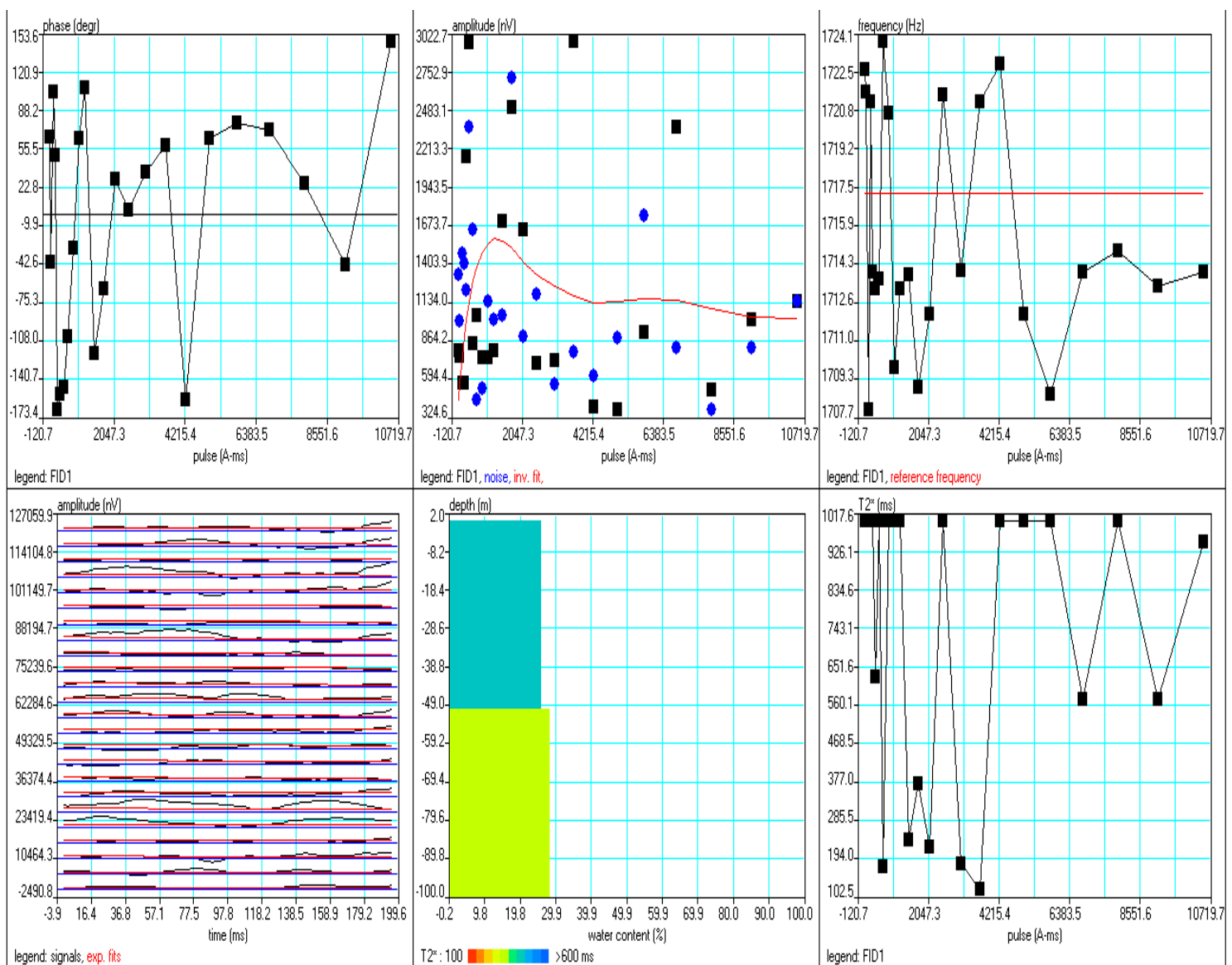


Figure 12 : Résultats de l'inversion du sondage RMP réalisé dans la région d'Ouzguita.

La figure 13 représente les résultats d'inversion 1D des résultats acquis par sondage RMP au niveau de la zone d'Ouzguita. Ces résultats indiquent des fortes variations de la fréquence (+ 1Hz) avec une fréquence moyenne de 1717,5. Ainsi, le signal émis par les protons d'hydrogène des molécules d'eau de la zone d'étude est très bruité (l'amplitude du bruit est plus fort que celui du signal). La réponse est représentée par une courbe exponentielle décroissante, qui indique la présence d'eau au niveau du sous-sol investigué.

Le graphe quantité d'eau en fonction de la profondeur représente une variation de la teneur en eau et de la porosité (constante de temps transversale de décroissance $T2^*$). On peut distinguer deux aquifères: le premier aquifère est situé à une profondeur comprise entre 0 et 49 mètres (m), sa teneur en eau vaut 27% avec une forte porosité ($T2^*$ élevée).

Le deuxième aquifère est situé à une profondeur comprise entre 49 et 100 m, sa teneur en eau vaut de 29 % avec une porosité moyenne.

Par conséquent, la quantité d'eau du premier aquifère est plus importante que celle du deuxième aquifère. Ce qui nous permet de dire que la partie qui peut être exploitable au niveau de la zone étudiée est celle correspondant au premier aquifère constitué essentiellement d'eau libre qui peut être contenue dans une faille selon la nature du terrain (calcaire encrouté et grés).

II- 2^{ème} étude de cas (Etude réussie) : sondage RMP Bouchane

Cette étude de cas comporte uniquement l'inversion et l'interprétation des données acquises sur le terrain.

1- Généralités sur le site :

a- Situation géographique :

Le Gisement de Bouchane est situé dans le Gisement de Gantour, à environ 26 kilomètres de la ville de Youssoufia. Ce site est inscrit dans un rectangle de 14Km de longueur et de 5Km de largeur. La route principale n° 9 subdivise la zone en deux parties Ouest et Est. La route secondaire n° 125 et la ligne de chemin de fer qui relie Ben Guérir à Youssoufia, séparent le Gisement de Bouchane du Gisement de Gantour Sghir au Nord qui est enclavé dans le massif Paléozoïque des Rehamna.

La zone ainsi délimitée couvre une superficie de 6662,95 Hectares (ha). Cette surface se répartie en :

- Le gisement de Bouchane Est : 3371,35 ha
- Le gisement de Bouchane Ouest : 3291,60 ha

Le gisement de Bouchane est limité :

- Au Nord par les affleurements de la base de la série phosphatée.
- Au Sud par les sondages délimités par les méridiens 8°19' et 8°10' et les parallèles 32°94' et 32°95'.



Figure 13: Situation géographique du secteur Bouchane (Image satellitaire landsat 2015)

b- Cadre géologique :

En ce qui concerne la géologie du site de Bouchane, elle est caractérisée par des gisements phosphatés allant du Maastrichtien à l'Yprésien selon la chronologie suivante : le Maastrichtien, le Danien, Le Thanétien et l'Yprésien. De structure tabulaire, cette zone ne subit aucun mouvement tectonique :

Le maastrichtien pré phosphaté : c'est une formation sédimentaire essentiellement constituée par une alternance de sable fin plus ou moins consolidé et de grès ; l'ensemble présente une puissance supérieure à 20m. Au sommet on trouve localement des bancs de marnes siliceuses.

Le maastrichtien phosphaté : il débute par une discontinuité chimique indiquant le début de la phosphatogenèse. Il peut être subdivisé en 3 termes :

- **Terme inférieur :** dépôts silico carbonatés constitués essentiellement de marnes siliceuses, de banc, de grès, de silex et de marnes.
- **Terme moyen :** cet ensemble débute par un phosphate grossier à débris organiques, il est formé essentiellement de sable fin légèrement phosphaté avec des intercalaires de bancs de grès, de calcaire et rarement des marnes et marnes siliceuses. Il se termine par un puissant dépôt argileux de couleur jaune au Nord et verdâtre sombre au sud.

Ces deux termes forment la méga séquence inférieure maastrichtienne.

- **Terme supérieur :** cet ensemble est formé de dépôts détritiques sableux à la base et phosphatés au sommet. Il se termine par la répartition des marnes et siléxite qui forment le sillon X.

Le Danien : A l'Ouest il est essentiellement formé de phosphate meuble avec des bancs décimétriques de calcaire, il se termine par un niveau de marnes siliceuses à silex. A l'Est, la partie sommitale formée de siléxites se développe considérablement. Ces dernières se subdivisent en 2 ou 3 bancs séparés par du phosphate sableux.

Le Thanétien : phosphate grossier à la base et se termine par un puissant dépôt de marnes. Un niveau d'argile omniprésent dans la partie occidentale se localise au sein du faisceau phosphaté.

Lutéien : calcaires dolomitiques et siliceux riches en gastéropodes ; au sud de la zone étudiée, des niveaux de sable, de phosphate et de marnes peuvent s'intercaler au sein de la dalle calcaire (la puissance peut dépasser 40m).

c- Cadre Hydrologique et hydrogéologique de la région de Bouchane :

La ville de Bouchane fait partie du grand Bassin de la Bahira qui est subdivisé en :

-**La Bahira occidentale**, à laquelle appartient notre zone d'étude, renferme le secteur de Ras-el-Ain, Chemaia où les eaux souterraines convergent vers le « lac » Zima qui constitue un exutoire par évaporation. Elle se présente sous forme d'une dépression encadrée au Nord par le massif primaire des Rehamna, au sud par le massif primaire des Jbilet et à l'Ouest par le plateau jurassique des Mouissate. La route Marrakech- El-Jadida constitue une limite géographique Est de la nappe. Cette étendue couvre une superficie d'environ 1500 Km².

-**La Bahira centrale** : située entre la route RP 9 et le méridien d'El- Kelaa des Srarhna où les eaux souterraines convergent vers le « lac » de Sed-El-Mejnoun qui constitue à nouveau un exutoire par évaporation.

- **La Bahira orientale** à l'Est du méridien d'El-Kelaa des Srarhna et jusqu'à l'oued El Abid où les eaux souterraines s'écoulent du Sud vers le Nord jusqu'à l'Oum-er-Rbia qui est le collecteur aval.

L'analyse du réseau hydrographique de la zone du gisement Bouchane (établi à partir du fond topographique au 1/10 000) montre un écoulement Sud-Nord des eaux superficielles sauf au Sud Est et à la limite Est où les eaux coulent vers la zone de Louta.

Les principaux Oueds rencontrés sont l'Oued MoulDerha et l'Oued Smiria. L'ensemble des cours d'eau se présente sous forme de talwegs et ne coule que dans le cas de pluies violentes. Ces cours d'eau constituent les affluents de l'Oued Bouchane.

La majeure partie de la Bahira, depuis son extrémité occidentale jusqu'au méridien d'El-Kelaa, n'est drainée par aucun oued. Les petits oueds qui descendent des Jbilet ou des Rehamna disparaissent en arrivant dans la plaine. Les eaux de ruissellement s'accumulent dans les dépressions fermées du Sedd-el- Mejnoun et du lac Zima, s'infiltrant ou s'évaporent.

L'oued Gaïno qui pénètre dans la Bahira à El- Kelaa est issu du versant Sud-Est des Jbilet mais draine une partie des eaux de la nappe phréatique du Haouz oriental.

Les précipitations se font généralement sous forme d'averses de forte intensité, de courte durée et présentent une forte variabilité mensuelle et annuelle. La précipitation moyenne annuelle calculée sur la période 1993-2011 est de 199,6mm. Le climat de la zone est de type semi continental aride. Ce climat est caractérisé par une variabilité interannuelle et saisonnière de température et de précipitation. La température moyenne mensuelle pour la même période est de 19,9°C (Ait Khouya, 2005).

Les travaux de reconnaissance et les investigations hydrogéologiques réalisés au niveau de la zone ont permis de subdiviser le complexe aquifère en deux nappes, une nappe inférieure et une nappe supérieure avec des nappes perchées situées dans les calcaires de Lutétien :

- La nappe inférieure est emmagasinée dans les formations comprises entre les argiles maastrichtiennes et les argiles Yprésiennes. Cette nappe ne présente pas une grande importance vue sa lithologie et ses caractéristiques hydrodynamiques médiocres.
- La nappe supérieure correspond à l'ensemble des formations aquifères sus-jacentes aux argiles bitumineuses Yprésiennes (substratum). Elle est formée par la couche sablo-silteuse de 11m et la série marno-Schisteuse de l'Yprésien.

Les eaux souterraines dans la plaine de la Bahira se répartissent dans un système aquifère constitué de :

- La nappe phréatique du remplissage plio quaternaire ;
- La nappe des calcaires lutétiens ; c'est le principal réservoir de toute la région, il est lié aux calcaires du Lutétien moyen qui se caractérisent par une faune abondante et une fracturation développée. Dans le secteur occidental, ce réservoir affleure sur de larges superficies. Ces aires d'affleurement diminuent de façon considérable en allant vers l'Est.
- La nappe de la formation marno-schisteuse de l'Yprésien et du lutétien inférieur (nappe supérieure de la série phosphatée) : ce réservoir est constitué par des sables silteux de la base Yprésienne, les marnes siliceuses à passages de niveaux phosphatés de l'Yprésien et enfin des marnes siliceuses du Lutétien qui marquent la fin de ce membre.

Ayant comme substratum les argiles Yprésiennes, il n'est limité du réservoir sus-jacent par aucune formation imperméable.

- La nappe des niveaux phosphatés, crétacés et paléocènes : isolée de la précédente par une formation imperméable, les argiles Yprésiennes : le réservoir phosphaté inférieur est assez hétérogène. Il est formé essentiellement par les phosphates sableux du Maastrichtien supérieur et des marnes sableuses phosphatées semi-perméables du Thanétien et du calcaire.

Ayant pour substratum et toit respectivement les argiles Maastrichtiennes et Yprésiens.

- La nappe des calcaires du turonien
- Le réservoir des schistes primaires

Inversion et interprétation des données :

Avant de réaliser l'inversion 1D des données, nous avons d'abord élaboré la matrice d'inversion au moyen du logiciel d'inversion NMR. Cette matrice tient compte de la configuration d'acquisition des données à savoir la taille de la boucle, l'inclinaison du champ magnétique terrestre et la résistivité électrique du sous-sol.

Nous avons également établi le log synthétique du site de Bouchane au moyen du logiciel Adobe Illustrator afin d'attribuer des résistivités aux couches géologiques présentes, tout en nous basant sur la littérature vue que nous ne disposions pas de données sur les sondages électriques effectués dans la zone d'étude.

Age	Lithologie	Profondeur	Nappe	Description
Ypresien		0	nappe supérieure	un banc massif du calcaire formé par le dépôt de sable phosphaté dans la partie supérieure. un niveau imperméable formé par l'argile prend place à la base de la formation.
		21		
Thanetien		49	nappe intermédiaire	Phosphate sableux à débris organiques à la base et devient légèrement mameux au toit.
Danien				
Mastrichtien		95	nappe inférieure	Mames, de mames siliceux à silex avec quelques bancs de grès et de silex présence de niveaux lenticulaires de phosphate et de sable phosphaté.

Figure 14: Log synthétique du site de Bouchane

Par la suite, nous avons effectué l'inversion 1D des données à l'aide du logiciel SAMOVAR, qui fournit une estimation sur la distribution de la teneur en eau, de la taille moyenne des pores (qui renseigne sur la perméabilité) et de la profondeur de chaque couche aquifère, après traitement de données pour l'ensemble des moments d'excitation. Ces informations acquises sont uniquement liées au volume d'investigation de roches situées sous la boucle de mesure RMP.

La courbe de sondage est un graphique qui représente l'amplitude initiale du champ de relaxation des protons en fonction de l'intensité d'excitation.

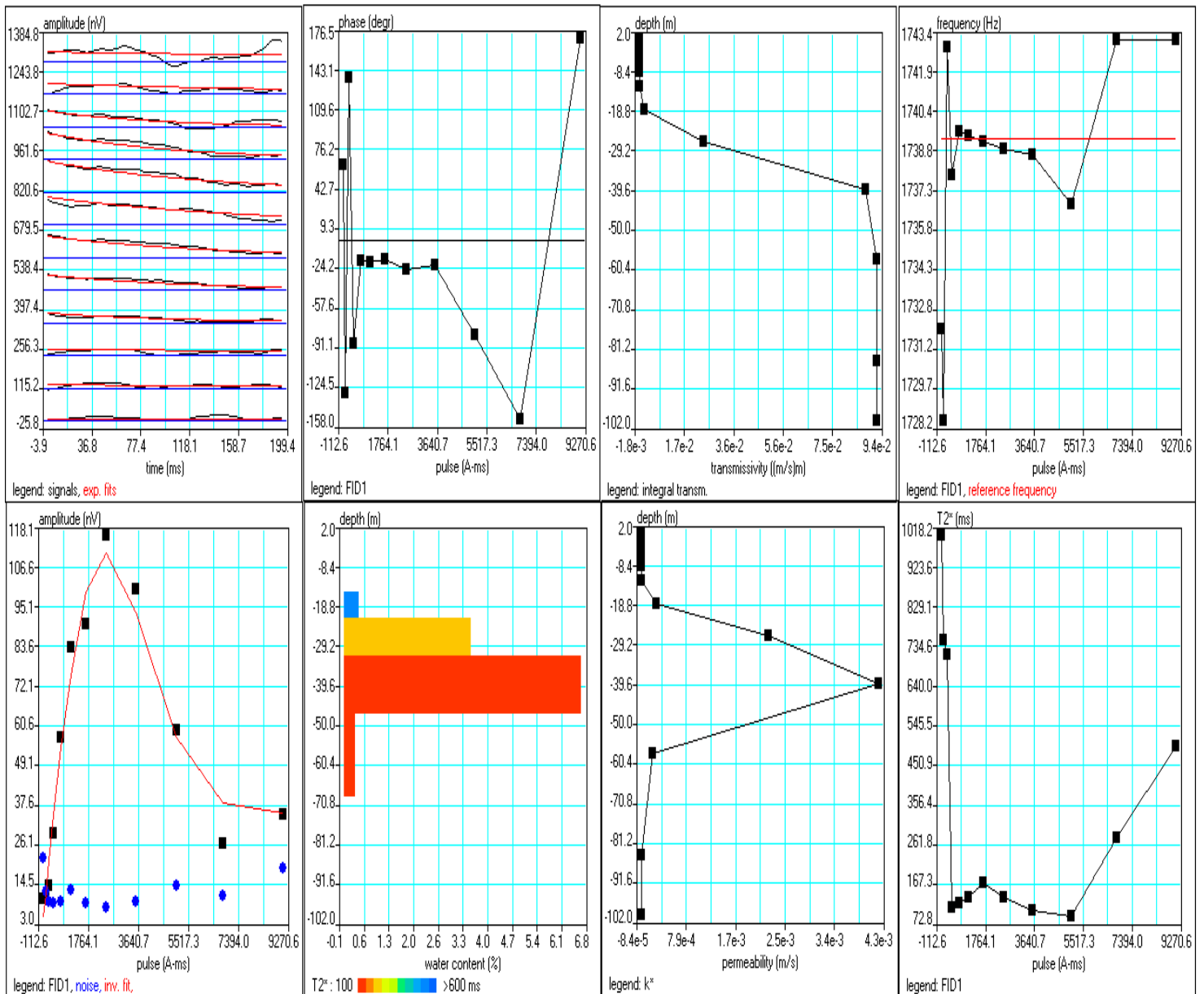


Figure 15: Résultats de l'inversion du sondage RMP réalisé dans le gisement de Bouchane.

Dans l'ensemble, les résultats de l'inversion des données de Bouchane représentés par la figure 19 indiquent que le bruit ambiant a une faible amplitude que celle du signal des protons dans la zone d'étude. L'inverse de l'allure de ces courbes aurait donné des résultats perturbés. Ces résultats font part de la présence d'eau à deux niveaux différents du sous-sol, correspondant à des horizons aquifères avec des teneurs en eau qui varient d'un niveau à un autre car l'amplitude du signal varie en fonction de l'impulsion d'excitation et donc de la profondeur. Ainsi, le premier aquifère est situé à une profondeur comprise entre 15 et 22 mètres et le deuxième aquifère à une profondeur comprise entre 22 et 70 mètres ; Le temps de décroissance du signal RMP étant relativement faible, les teneurs en eau enregistrées pour chaque couche sont respectivement 0,4% et 6,6%. Le temps de relaxation transversale du premier aquifère est de 600 millisecondes, ce qui traduit une porosité assez importante (petit rectangle de couleur bleu) ; c'est donc la zone où il y'a plus d'eau. Quant au deuxième aquifère, le temps de relaxation est faible (100 millisecondes), ce qui traduit une faible porosité ; par conséquent il ne regorge pas en quantité d'eau.

Conclusion

Au terme de notre étude hydrogéophysique sur les deux zones (Bouchane et Ouzguita) par la méthode de résonance magnétique des protons d'hydrogène, nous pouvons dire que cette méthode permet directement de détecter la présence d'eau dans le sous-sol tout en informant sur les paramètres hydrogéologiques (Teneur en eau, profondeur, etc.). Concernant le site d'Ouzguita, nous envisageons une autre mission qui sera consacrée à la réalisation d'un levé RMP avec une boucle en huit carrée afin d'avoir des résultats plus approfondis et d'augmenter le rapport signal-bruit. En perspectives plusieurs points restent à développer (porosité et perméabilité) car l'estimation avec laquelle nous avons travaillé est approximative en absence d'informations d'un essai de pompage dans un forage de reconnaissance proche. Donc ce travail n'est qu'une approche des ressources en eau au niveau des deux zones étudiées. Bien que cette nouvelle méthode de prospection géophysique apporte un plus dans le monde de la géophysique, il serait judicieux de la combiner aux autres méthodes de prospection géophysique et d'effectuer en outre des campagnes piézométriques sur la zone étudiée, afin de parvenir à des résultats efficaces.

Référence bibliographique

- AIT KHOYA. J.**, 2008. *Synthèse hydrogéologique de la zone noyée de Youssoufia. Rapport géol.inédit N°455, Service géologique de Youssoufia.*
- ARCHIE G.E.**, 1942. *The Electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers.*
- ASTIER J.L.**, 1971. *Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Masson.*
- BHATTACHARYA B. B., GUPTA D., BANERJEE B., and SHALIVAHAN X.**, 2001. *Mise-à-la-masse Survey for an auriferous sulfite deposit, geophysics.*
- BOUCHER M.**, 2007. *Estimation des propriétés hydrodynamique des aquifères par résonance magnétique des protons dans différents contextes géologiques, de l'échantillon à l'échelle hydrogéologique.*
- BOUJOU, A.**, 1976. *Contribution à l'étude géologique du gisement de phosphate crétacé-éocène des Ganntour, Maroc occidental. PhD Thesis, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de géologie.*
- DHALIN T.**, 2001. *The development of DC resistivity imaging techniques. Computers & Geosciences 27, 1019-1029.*
- FITTERMAN D.V. and STEWARD M.T.**, 1986. *Transient electromagnetic sounding for groundwater. geophysics 51, 995-1005.*
- GUERIN R.**, 2005. *Borehole and surface-based hydrogeophysics. Hydrogeology 13, 251-254.*
- HOVHANNISSIAN G.**, 2000. *Signaux électriques, magnétiques et mécaniques associés à la percolation de l'eau en milieux saturés et non saturés. Thèse de Doctorat, Univ. Paris VI.*
- KCHIKACH A., JAFFAL M., El Assel N., CHALIKAKIS K., GUERIN R., DAAFI Y., JOURANI E.**, 2013. *Les sondages de résonance magnétique des protons appliqués à la caractérisation des aquifères : présentation d'une étude expérimentale à Bouchane (Youssoufia, Maroc).*
- LACHASSAGNE P., BALTASSAT J.M., LEGCHENKO A., MACHARD DE GRAMMONT H.**, 2005. *The links between MRS and the hydrogeological parameters. Near Surface Geophysics.*
- LEGCHENKO A., SHUSHAKOV O.A.**, 1998. *Inversion of surface NMR data. Geophysics.*
- LEGCHENKO A., VALLA P.**, 2002. *A review of the basic principles for proton magnetic resonance soundings measurements. J.App.geophysic.*

- LEGCHENKO A., BALTASSAT J.M., BEAUCE A., BERNARD J.,** 2002. *Nuclear resonance as a Geophysical tool for hydrogeologists. Journal of Applied Geophysics.*
- LOKE M.H., and BARKER R.D.,** 1996. *Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudo-section by a quasi-Newton method. Geophysical prospecting.*
- OPPLIGER G.L.,** 1984. *Three dimensional terrain corrections for mise-à-la-masse and magnetic resistivity Surveys. Geophysics.*
- PARASNIS D.S.,** 1967. *Three dimensional electric mise-à-la-masse survey of an irregular lead-zinc copper deposit in central Sweden. Geophysical prospecting.*
- PARASNIS D.S.,** 1986. *Principles of applied geophysics, fourth edition. Chapman and Hall Editions, London, New-York.*
- SCHIROV M., LEGCHENKO A., and CREER G.,** 1991. *New direct non-invasive ground water detection technology for Australia. Exploration geophysics.*
- SEMENOV A.G., SCHIROV M., LEGCHENKO A., BURSTHEIN A., et PUSEP Y.A.,** 1988 – *Dispositif de mesure des paramètres des gisements souterrains. FR 2 602 877- B1, France.*
- SPIES R.B., and FRISCHKNECHT F.C.,** 1991. *Electromagnetic sounding. Electromagnetic methods in applied geophysics 2.*
- TELFORD W.M., GELDART L.P., and SHERIFF R.E.,** 1990. *Applied geophysics. Cambridge University Press, 2nd edition.*
- VARIAN R.H.,** 1962. *Ground liquid prospecting method and apparatus. US patent, 3019383.*

Annexes

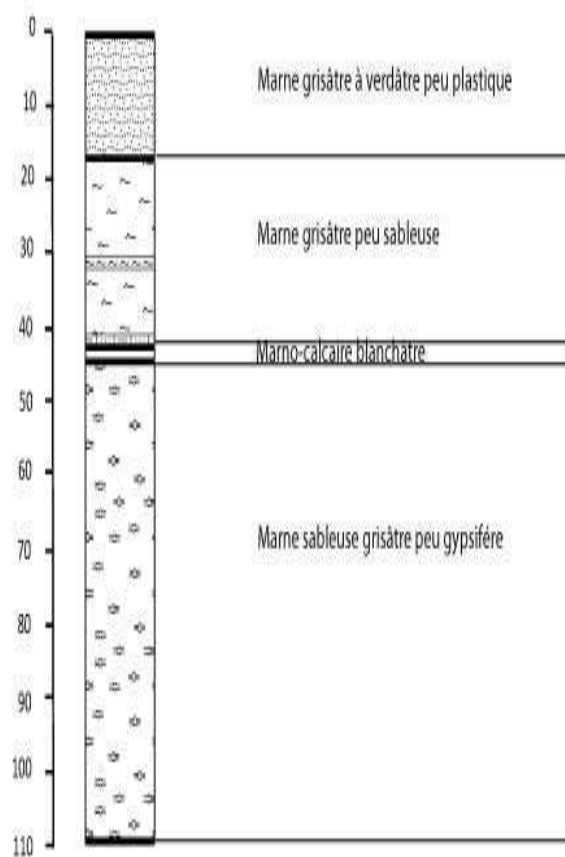


Figure 16: Log stratigraphique ou sondage de reconnaissance hydrogéologique 3390/53 réalisé dans la zone de Tameslouht (Document de l'Agence de bassin du Tensift)

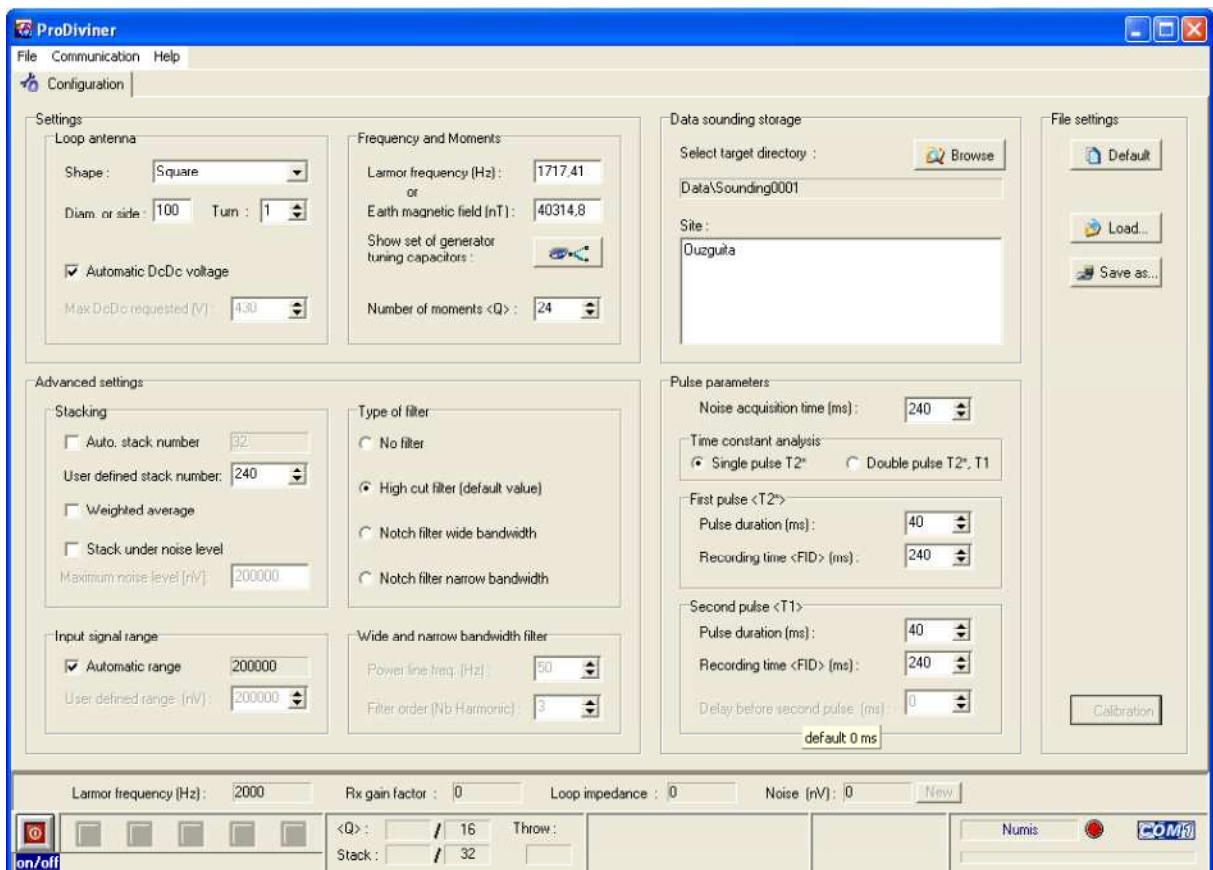


Figure 17: Interface du logiciel d'acquisition Prodiviner

