



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



Master Eau et Environnement

L'intitulé du projet de fin d'étude :

Apport des méthodes géophysiques et des analyses hydrochimique à la reconnaissance de l'hydrogéologie de la région de Kettara (Jebilets centrales, Maroc)

Réalisé par :

Meriem SNINEH

Soutenu le 28 Juin 2013 devant le jury composé de MM. :

Mohammed JAFFAL
Abdessamad HEJJAJ
Azzouz KCHIKACH
Lahoucine HANICH

Professeur à la FST de Marrakech
Chercheur au CNEREE
Professeur à la FST de Marrakech
Professeur à la FST de Marrakech

Encadrant
Co-encadrant
Examineur
Examineur

Année universitaire 2012 - 2013

Fiche technique

Auteur

Meriem SNINEH

Titre

Apport de la tomographie électrique et de la résonance magnétique des protons à la reconnaissance hydrogéologique de la région de Kettara (Jebilets centrales)

Période

06 Février à la fin du mois Mai

Encadrant

Pr. Mohammed JAFFAL

Organisme d'accueil

Centre National d'études et de Recherches sur l'Eau et l'Environnement (CNEREE)

Intérêt de l'étude

La région de Kettara reconnaît un état déficitaire en termes de ressources en eau souterraines, face à cette problématique il est nécessaire d'évaluer les potentialités en ressources hydrique souterraine afin de définir des cibles de forages hydrauliques. Pour cette fin on va subdiviser l'étude en deux volets : caractérisation structurale du sous-sol et détection des eaux souterraines.

Communication et activités professionnelle au cours du stage

- ✓ Communication écrites par deux posters des deux méthodes géophysique : la Tomographie et la Résonance Magnétique des Protons.
- ✓ Membre du comité d'organisation des journées portes ouvertes du CNEREE.
- ✓ Membre du Comité Scientifique du Congrès Mondial de l'Education Environnementale (WEEC 2013).
- ✓ Participante aux missions de sondage RMP dans les régions de Sid El Mokhtar et Lalla Takerkoust.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mon Père, ma Mère, ma Sœur et mon Frère qui sont pour moi
une source d'encouragement et de soutien, qu'ils voient dans ce travail la
récompense de leur endurance et de leurs nombreux sacrifices.*

REMERCIEMENTS

Au moment où j'achève ce mémoire qui a été réalisé au sein du Centre National d'Etude et de Recherche sur l'Eau et l'Energie, il me tient à cœur de dire merci à Dieu sans qui je n'aurai rien pu faire et d'exprimer ma gratitude à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à sa réalisation.

J'exprime mon profond respect et toute ma reconnaissance à :

- Mr **M. JAFFAL** professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech (Encadrant).
- Mr **A. HEJJAJ** Chercheur au CNEREE, Responsable du Laboratoire S2E (Co-encadrant).
- Mme. **L. MANDI** directrice du Centre National des Etudes et des Recherches sur l'Eau et l'Environnement.

Pour la confiance qu'ils m'ont témoignée en acceptant la direction et le suivi de ce travail.

Je n'oublierai pas ceux qui m'ont initié à la géologie et spécialement l'hydrologie : nos enseignants du Département des Sciences de la Terre à la Faculté des sciences et techniques de Marrakech.

Aux membres du jury qui ont daigné laisser leurs multiples occupations pour se donner la peine d'examiner ce travail, nous leur somme infiniment reconnaissant. Leurs critiques et suggestions contribueront certainement à rehausser la valeur scientifique de ce travail.

Je ne pourrai pas terminer sans remercier les doctorants du CNEREE : M. **AZIZ Faissal**, M. **El MOUSSAOUI Tawfik**, M. **LATRACH Lahbib**, M. **Ait ERROUHI Ahmed**, Mlle. **BOUTAKRABT Meriem**, Mlle. **MIDHAT Laila**, ainsi que ceux qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce travail et dont les noms ne figurent pas ici. A tous ces anonymes, je dis un grand merci.

PREAMBULE

La présente étude porte sur le secteur de Kettara qui se situe à une trentaine de kilomètres au Nord-Nord-Ouest de Marrakech. Les ressources en eau de cette zone revêtent deux enjeux majeurs. Le premier est d'ordre environnemental étant donné que les rejets sulfurés de la mine abandonnée de Kettara sont transportés par les eaux de ruissellements et demeurent en surface ou s'infiltrent dans la formation schisto-gréseuse qui constitue l'essentiel du socle hercynien dans cette région, ce qui engendre une contamination des ressources en eau souterraines. Le second enjeu est de nature économique puisque le développement de la région est essentiellement basé sur l'agriculture, ce qui nécessite une mobilisation de plus en plus importante des ressources en eau, avec un recours croissant à l'irrigation à partir des puits. Ces ressources ont connu une surexploitation liée à la persistance des années de sécheresse, entraînant une baisse importante du niveau de la nappe phréatique.

On propose dans le cadre de cette étude d'aborder la problématique des ressources en eau souterraines dans cette zone. Pour se faire, on se basera principalement sur l'apport des méthodes géophysiques (gravimétrie, tomographie électrique et résonance magnétique des protons) à la caractérisation de la structure du sous-sol d'une part et à l'évaluation des potentialités en ressources hydriques d'autre part. L'objectif final étant de définir des zones potentiellement productives qui pourraient constituer des cibles de sondages hydrauliques.

TABLE DES MATIERES

PREAMBULE	6
INTRODUCTION.....	9
I.Contexte de l'étude.....	14
I.1- Situation géographique	14
I.2- Cadre géologique	16
I.2.1- Position du massif des Jebilets dans le bâti hercynien du Maroc.....	16
I.2.2- Le massif des Jebilets.....	19
I.2.3- Les Jebilets Centrales	20
I.2.3.1- Lithostratigraphie	20
I.2.3.2- Structuration	21
I.2.3.3- Magmatisme	22
I.3- Cadre climatique.....	23
I.3.1- Précipitation.....	23
I.3.2- Hygrométrie	24
I.3.3- Température	25
I.3.4- Evaporation	26
I.3.5- Vents.....	27
I.4- Cadre Hydrologique.....	28
II. Etude Hydrogéologique	30
II.1- Synthèse des études hydrogéologiques antérieures.....	30
II.1.1- Caractérisation structurale de l'aquifère étudié	34
II.1.2- Données géophysiques	36
II.2- Synthèse géologique de la sortie d'exploration de l'aire d'étude.....	38
II.3- Données hydrogéologique actualisées de la région de Kettara	40
II.3.1- Piézométrie de l'aire d'étude	40
II.3.2- Hydrochimie des eaux souterraines analysées.....	42
II.3.2.1-Paramètres étudiés :	43
II.3.2.2-Résultats des analyses:.....	45
II.3.2.3-conclusion	53
III. ETUDE GEOPHYSIQUE	55
III.1- Méthode de prospections utilisées.....	55
III.1.1- Méthode gravimétrique.....	55
III.1.1.1- Principe général	55
III.1.1.2- Traitement des données gravimétrique (Analyse des contacts) .	57
III.1.2- Méthode de prospection magnétique.....	58
III.1.3.1- Principe général	58
III.1.3.2- Mise en œuvre sur le terrain	60
III.1.3.3- Correction et traitement des données.....	61
III.1.3- Méthode de tomographie électrique	63
III.1.3.1- Principe général	63
III.1.3.2- Mise en œuvre d'un levé de tomographie électrique	65
III.1.4- Méthode de résonance magnétique des protons	66

III.2- Prospection géophysique de la région de Kettara	69
III.2.1- Prospection gravimétrique	69
III.1.3.3- Analyse et interprétation des données	69
III.2.2- Prospection magnétique	76
III.2.2.1- Analyse et interprétation	77
III.2.3- Prospection par sondage électrique	80
III.2.4.1- Données disponibles	80
III.2.4.2- Interprétation des données	80
III.2.4- Tomographie électrique	93
III.2.5.1- Acquisition des données	93
III.2.5.2- Traitement et interprétation	96
III.2.5- Résonance magnétique des protons	100
III.2.5.1- Mise en œuvre sur le terrain	100
Conclusions	112
Annexe 1 : Protocole des analyses physico-chimiques	115
Annexe 2 : Manuel d'utilisation du Magnétomètre à proton	122
Annexe 3: Manuel d'utilisation du Susceptibilimètre	124
Annexe 4 : Liste des figures, des photos et des tableaux	126
Référence bibliographique	131

INTRODUCTION

"Si la terre avait la grosseur d'une orange, d'une grosse orange, toute l'eau du monde ne serait représentée, sur cette orange, que par une minuscule goutte d'eau" (Paul - Émile Victor). Cette goutte qui est à l'origine de toute la vie sur notre planète se fait de plus en plus rare, de plus en plus chère et représente un souci majeur pour la plupart des pays du monde principalement dans les régions où cette ressource est limitée.

Notre aire d'étude qui correspond à la région de Kettara, ne fait pas exception, compte tenu de climat et de ses ressources en eau tant souterraine que superficielle qui font face à une forte demande résultant d'une part de la croissance de la population et d'autre part des implications du développement économique. De plus, les sécheresses consécutives qu'a subies la zone depuis le début des années 80 ont entraîné une mobilisation de plus en plus importante des eaux souterraines, sachant que l'activité principale de 60 % de la population est l'agriculture.

Face à cette problématique, une gestion durable des ressources en eaux devrait être menée et exige la mise au point d'un plan d'exploitation adéquat au niveau de cette région. Une connaissance de l'hydrogéologie de cette zone et de son potentiel en ressources hydriques souterraine s'impose également. La géophysique appliquée peut contribuer efficacement à l'amélioration de cette connaissance, au moyen de la mise en œuvre de méthodes qui permettent de préciser la structure aquifère. Il existe actuellement une nouvelle technique beaucoup plus intéressante qui permet d'aller plus loin que la caractérisation de l'aquifère : Il s'agit de la résonance magnétique des protons (RMP) qui permet de quantifier directement les ressources hydriques souterraines.

La présente étude a notamment pour objet l'application de ces méthodes géophysiques dans la perspective d'apporter des éléments de réponses aux questions relatives à la problématique des ressources en eau dans la région de Kettara. Elle vise principalement la mise en évidence des zones favorables à l'implantation de forages hydrauliques. Les travaux réalisés que nous avons entrepris comportent deux volets :

- **Un volet hydrogéologique** qui concerne principalement la caractérisation structurale du socle hercynien de la région de Kettara afin d'identifier (1) les principales failles susceptibles de constituer des zones de drainage des eaux souterraines (aquifère de fissures) et (2) les zones de forte épaisseur de la couche altérée. Ce volet comprend également une reconnaissance géologique incluant l'analyse de la fracturation et des faciès à l'échelle du secteur étudié. Il sera achevé par une actualisation de la base de données piézométrique disponible afin de permettre la mise à jour la carte existante.

- **Un volet géophysique** axé d'abord sur l'analyse et l'interprétation de données gravimétriques disponibles afin de compléter la caractérisation structurale de la zone d'étude entamée dans le volet hydrogéologique. Cette première phase sera suivie par la réalisation d'une campagne de mesures géophysiques par tomographie électrique et résonance magnétique des protons dans l'objectif d'identifier des zones productives où l'on pourrait réaliser avec succès des sondages d'exploitation des eaux souterraines.

Ce travail a été réalisé en collaboration entre l'équipe de recherche « Génie Civil et Ingénierie Géologique » de la Faculté des Sciences et Techniques et « le Laboratoire des Sciences de l'Eau et de l'Environnement » du Centre National d'Etudes et de Recherches sur l'Eau et l'Energie (CNEREE).

Présentation du Centre National d'Études et de Recherches sur l'Eau et l'Environnement

L'organisme d'accueil était créé dans le cadre du plan quinquennal de développement économique et social 2000-2004 par le Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement supérieur, de la Formation des cadres et de la Recherche scientifique, le Centre National d'Étude et de Recherche sur l'Eau et l'Énergie (CNEREE) s'inscrit dans le cadre de la politique générale que se trace l'université Cadi Ayyad pour s'intégrer dans l'espace socio-économique du pays et de traduire une volonté d'accompagner les efforts de développement accomplis et de faire de l'université un instrument d'épanouissement technologique et socioéconomique.

✚ Missions et Objectifs

- ❖ Promouvoir la recherche dans le domaine de l'eau et des énergies renouvelables.
- ❖ Développer une expertise dans le domaine de l'eau et des énergies renouvelables.
- ❖ Développer un partenariat national et international.
- ❖ Constituer une interface entre des établissements universitaires et de recherche publics et privés.
- ❖ Fournir de l'aide aux décideurs, aux universitaires aux autres établissements publics, semi-publics et privées.
- ❖ Entretenir une collaboration avec les organismes intervenants dans le domaine de l'eau et de l'énergie pour assurer un transfert efficace de technologie.
- ❖ Agir comme facilitateur entre l'université, les opérateurs scientifiques et le secteur socio-économique de l'Eau et de l'Énergie.

✚ Activités développées

- ❖ la recherche fondamentale et appliquée
- ❖ les études et les analyses
- ❖ les tests et l'expertise
- ❖ la formation et la vulgarisation
- ❖ la valorisation des résultats de la recherche
- ❖ l'organisation de manifestations (conférences, séminaires, ateliers, etc.)
- ❖ l'encadrement d'étudiants (Master, Doctorat et projets d'études).

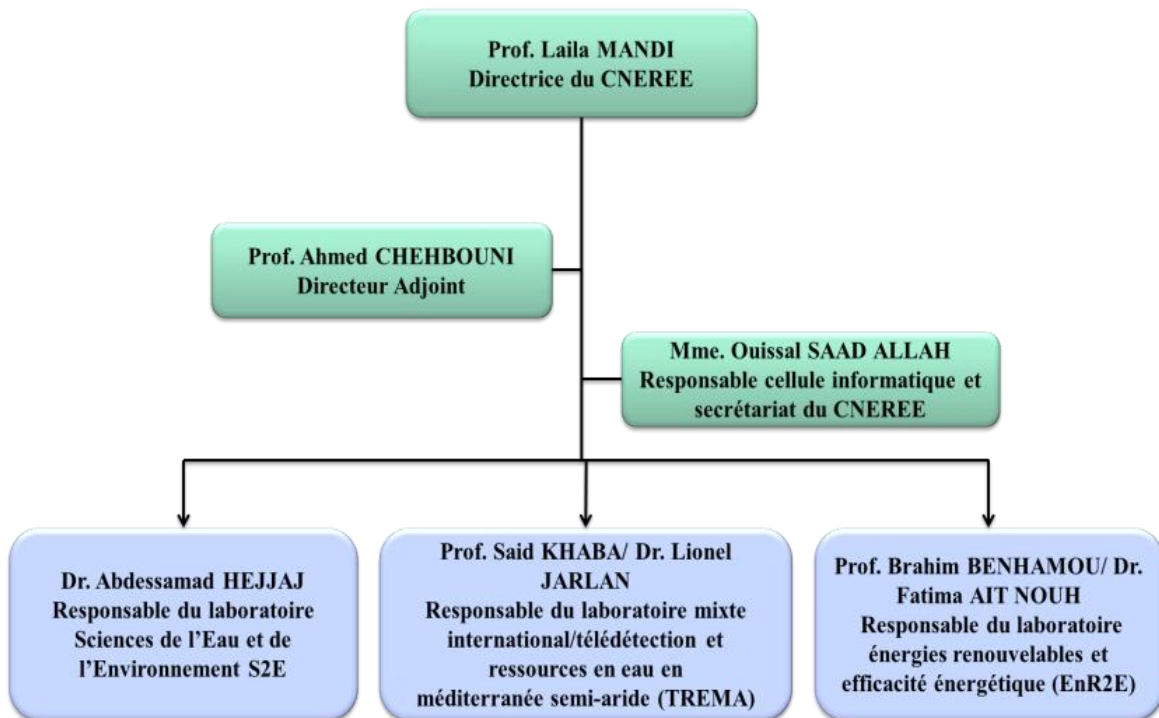
Eau

- Fonctionnement des écosystèmes aquatiques, télédétection et modélisation environnementale
- Impact de la pollution et des changements climatiques sur les ressources en eau, la biodiversité et la santé,
- Optimisation de l'utilisation des systèmes d'eau et l'économie de l'eau,
- Technologies de traitement, de recyclage et de valorisation des eaux et des déchets,
- Dessalement des eaux de mer et des eaux salines
- Réglementation, Management, outils de gestion, gouvernance et développement.

Energie

- Energie solaire thermique : séchage solaire, froid solaire, mise en œuvre de capteurs solaires thermiques et de chauffe-eau solaires...
- Energie solaire photovoltaïque : Etudes de nouveaux matériaux à haut rendement photoélectrique, de stockage électrique,...
- Dessalement par l'utilisation par l'utilisation des énergies renouvelables
- Efficacité énergétique dans les procédés industriels ; développement d'outils de diagnostic thermique, Biomasse, valorisation des déchets.

✚ Organigramme :



1 ÈRE PARTIE : CONTEXTE DE L'ÉTUDE

I. Contexte de l'étude

I.1- Situation géographique

Le secteur de Kettara fait partie du massif hercynien des Jebilets qui constitue une portion de la Meseta marocaine méridionale (Michard, 1976; Piqué et Michard, 1981). Ce massif est formé d'un ensemble de collines et de plaines rocheuses qui s'étendent, au Nord de Marrakech, suivant une direction E-W sur environ 3800 km² entre les longitudes 7°W et 8°50'W et les latitudes 31°45'N et 32°05'N (Fig. I.1). Le massif des Jebilets est limité au nord par la plaine de Bahira au sud par la plaine du Haouz, à l'Est par les montagnes de Béni-Mellal et à l'Ouest par les terrains Jurassico-crétacé des Mouissate. Le secteur étudié se situe dans la partie centrale de ce massif. Il est accessible en empruntant, sur 30 kilomètres, la route principale n° 9 reliant Marrakech à El Jadida (Fig. I.2).

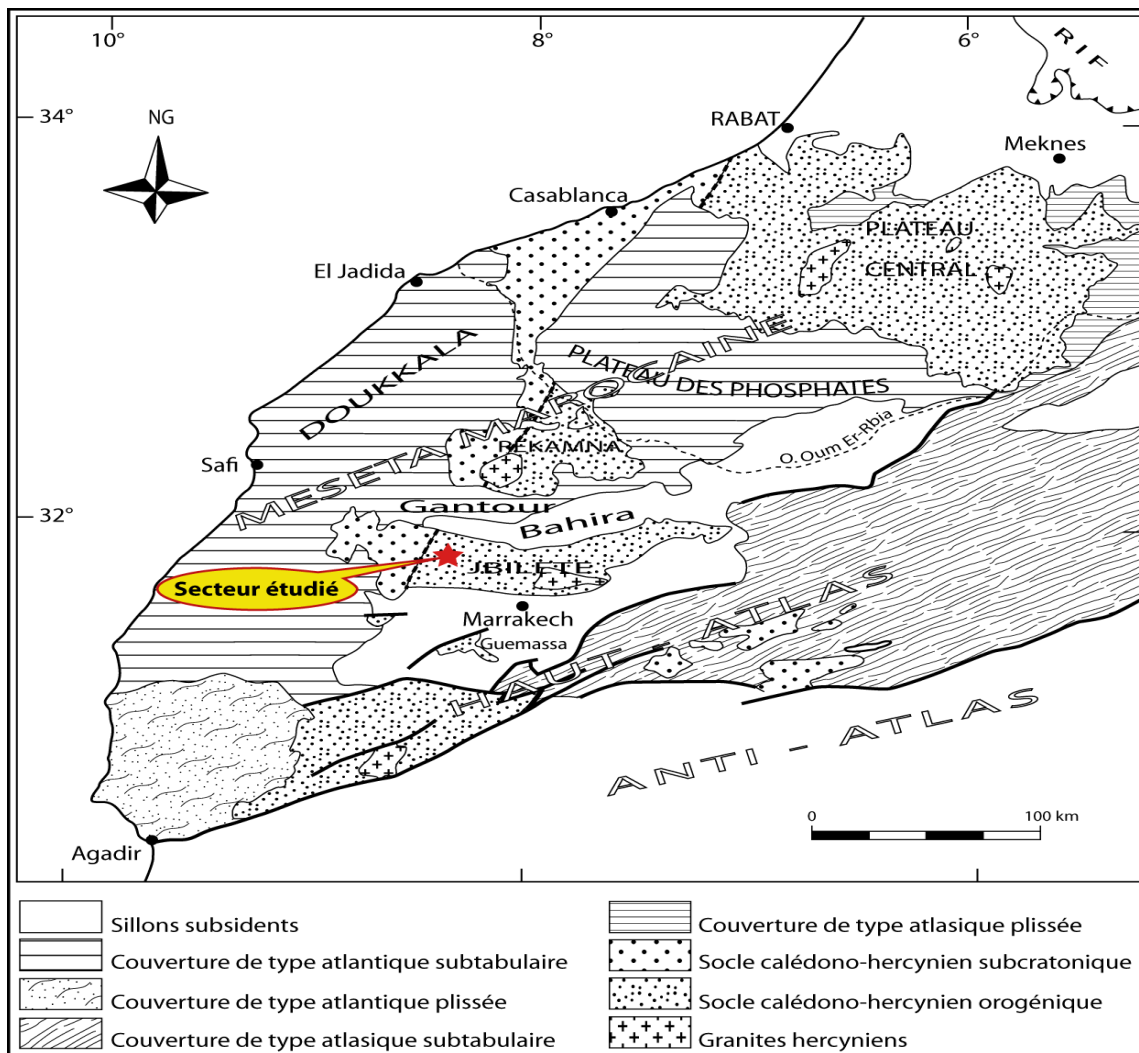


Figure I.1 : Situation générale du massif des Jebilets sur la carte du domaine structural méséto-atlasique du Maroc (Huvelin, 1977).

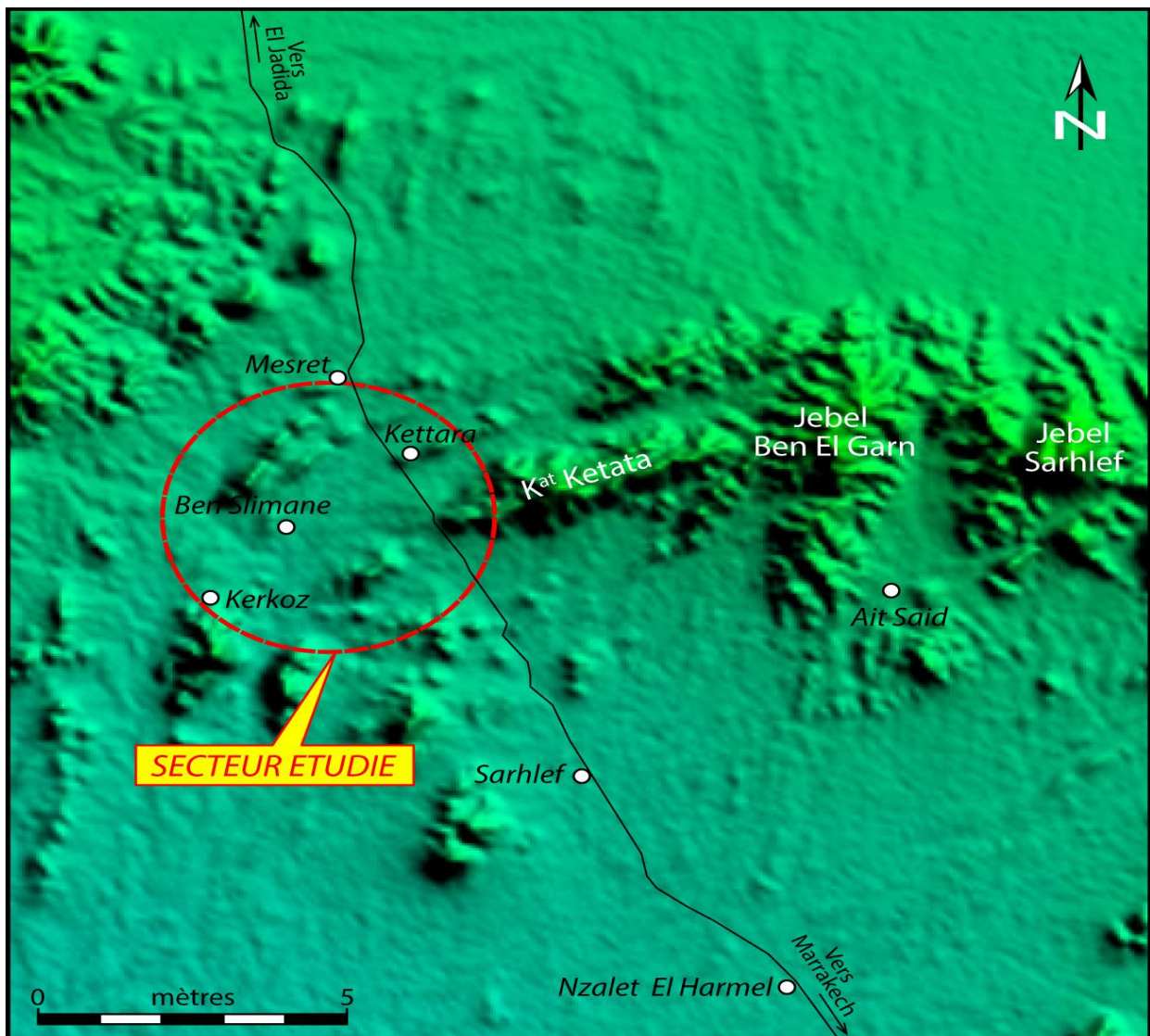
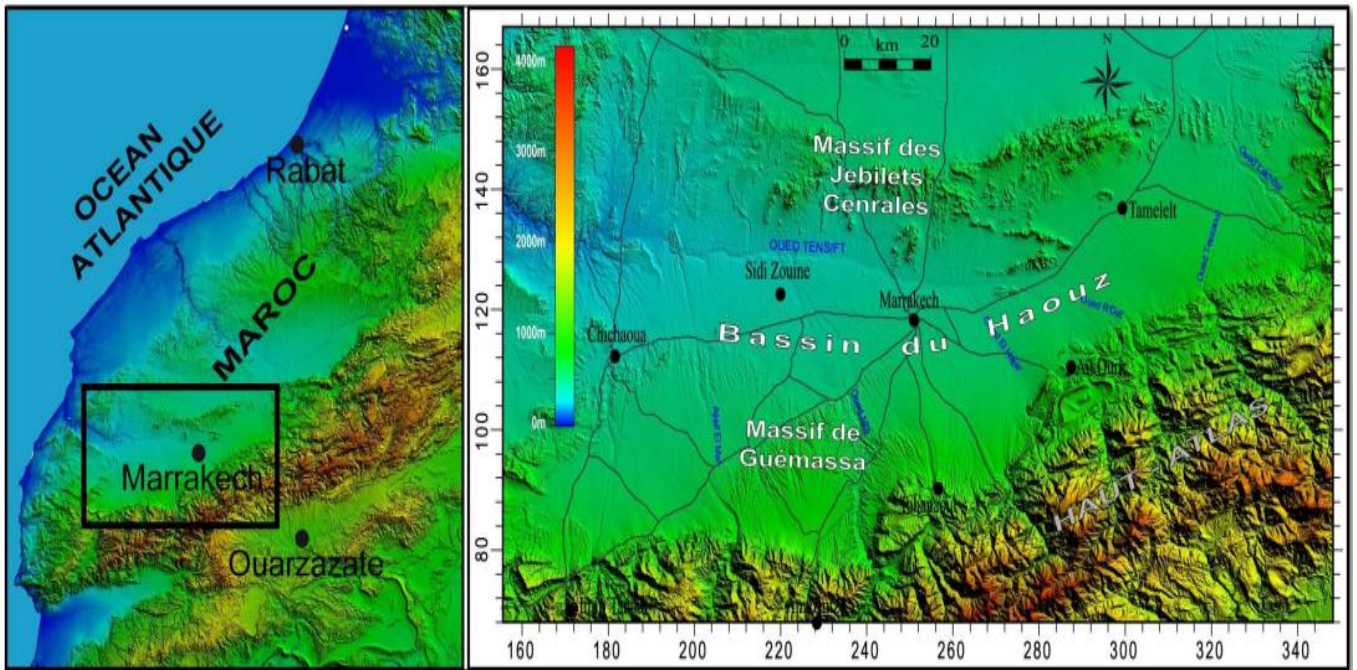


Figure I.2 : situation géographique du secteur étudié (image satellite traitée sous Global mapper)

I.2- Cadre géologique

I.2.1- Position du massif des Jebilets dans le bâti hercynien du Maroc

L'histoire géologique du Maroc est marquée par les cycles orogéniques précambrien, hercynien et atlasique dont la succession est responsable du façonnement actuel du sous-sol marocain et de sa configuration structurale. En se basant sur des critères stratigraphiques et structuraux, le Maroc a été subdivisé en cinq domaines d'importances inégales (Fig. I.3) (Piqué et *al.* 1994).

- **Le domaine Saharien** essentiellement constitué de terrains du protérozoïque inférieur, structurés par l'orogénèse Eburnéenne (2000 Ma) (Fabre; 1971).
- **Le domaine Anti-Atlasique** est formé d'un socle précambrien façonné par l'orogénèse panafricaine (680 à 570 Ma) (Leblanc et Lancelot, 1980).
- **Le domaine Mesétien** qui représente la chaîne hercynienne plissée est formé par des massifs paléozoïques discontinus affleurant au sein d'une couverture mésozoïque et cénozoïque.
- **Le domaine Atlasique** correspond à la chaîne intracontinentale du Moyen-Atlas et du Haut-Atlas formée par des terrains mésozoïques et cénozoïques structurés par l'orogénèse Atlasique.
- **Le domaine Rifain** qui constitue une partie de la chaîne alpine est caractérisé par un empilement de nappes de charriages à vergence principale sud.

Le domaine Mesétien regroupe deux grandes provinces qu'on désigne par Meseta orientale (ou Meseta oranais) et Meseta occidentale (ou Meseta Marocaine). Il est subdivisé en six zones structurales (Michard et *al.*, 1983 ; Hoepfner, 1987 ; Piqué et Michard, 1989 ; Bouabdelli, 1989) :

- **La zone orientale** qui correspond à l'ensemble de la Meseta oranais est constituée d'affleurements de schistes du paléozoïque inférieur et de flyschs dévoniens ayant subi des événements tectoniques durant le dévonien supérieur avec développement d'un volcanisme calco-alcalin du viséen supérieur au westphalien.
- **La zone de transition** appelée aussi « zone de nappes » est représentée par la partie orientale du Maroc central formée par des bassins viséens où se mettent en place des nappes synsédimentaires issues de la zone orientale. Cette zone est caractérisés par une phase tectono-métamorphique d'âge viséen supérieur (Bouabdelli, 1989).
- **La zone centrale** est représentée par les massifs des Rehamna oriental, Jebilets centrales, Guemassa, la majeure partie du massif central et les

boutonniers paléozoïques du Haut Atlas occidental. Elle est caractérisée par une sédimentation quasi continue du cambrien au westphalien accompagnés d'un magmatisme bimodal à dominance basique. Cette zone affectée par une phase tectono-métamorphique intra-westphalienne s'intensifiant le long des zones de cisaillement et un métamorphisme en contexte épizonal, localement mésozonal en bordure des intrusions granitiques (Huvelin, 1977).

- **La zone occidentale** correspond aux parties ouest de la Meseta côtière nord-occidentale, des Rehamna et des Jebilets. Elle est formée par des terrains peu déformés dont l'âge s'étend du Cambrien supérieur au Dévonien moyen avec une absence du Carbonifère expliquée par une position structurale haute de cette zone (Piqué, 1979). Le môle côtier est séparé du reste de la Meseta par une importante zone de cisaillement de direction NNE-SSW (Bordonaro et *al.*, 1979).
- **La zone Sud** ou avant pays saharien se situe au Sud de l'accident sud-atlasique et s'étend jusqu'à la plateforme saharienne en bordure du craton ouest africain. Dans cette zone, affleurent des terrains datés du Protérozoïque supérieur au Carbonifère. Les formations sont tabulaires ou faiblement plissés, ce qui traduit la faible intensité de la déformation hercynienne et post hercynienne dans cette zone (Piqué, 1979; Lagarde et Michard, 1986).
- **La zone Nord ou bloc de Sehou** est formée des terrains paléozoïques situés au Nord de la Meseta Centrale et limités au Sud par l'accident Rabat-Tifelt. Dans cette zone, on observe une tectonique paléozoïque ante-dévonienne en climat métamorphique épizonal (Piqué, 1979). Les plis synschisteux ont une direction Est-Ouest et sont fortement déversés vers le Sud. Le bloc de Sehou est considéré comme allochtone car il n'a pu être corrélé avec aucun événement de même âge dans la Meseta marocaine.

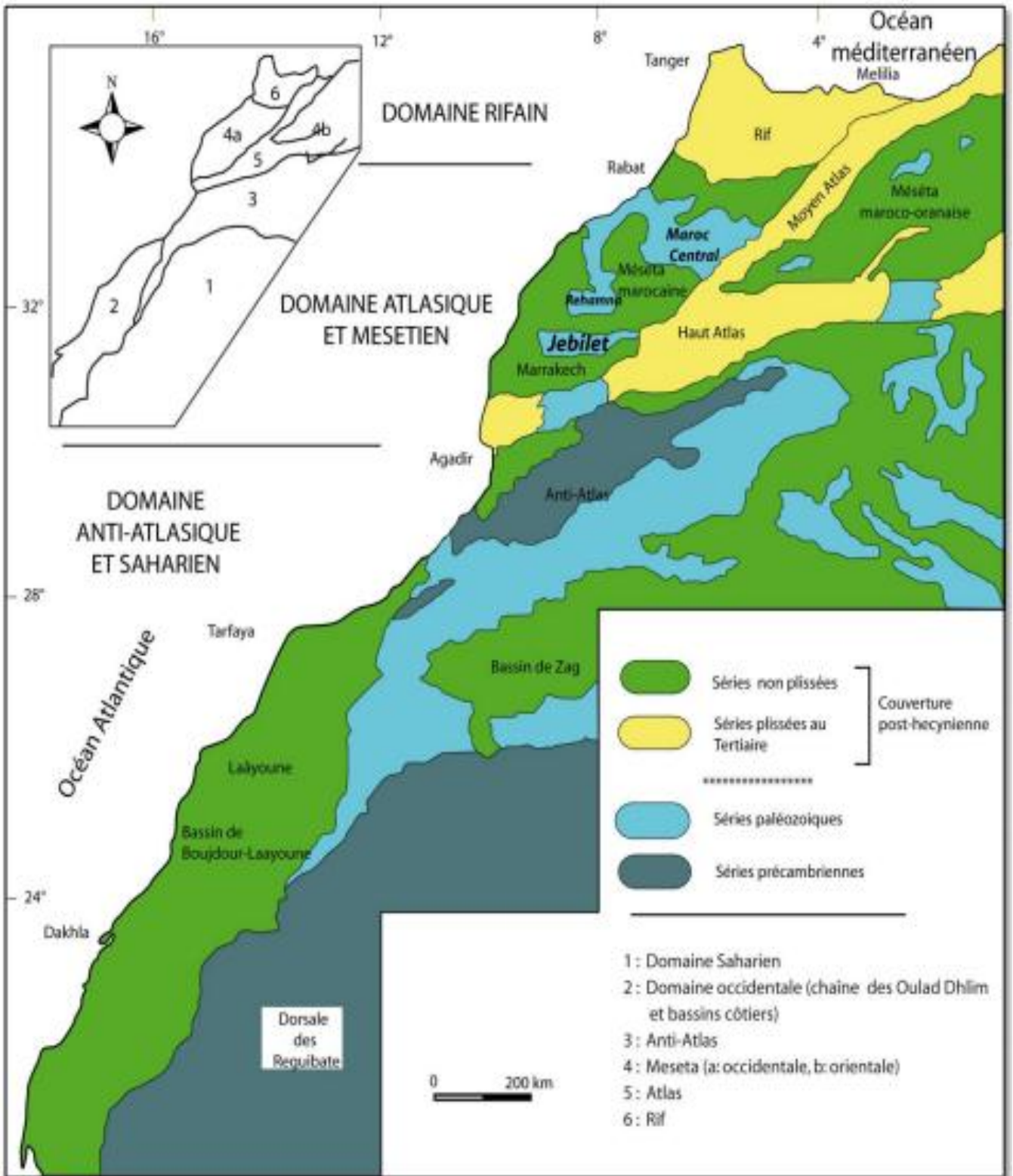


Figure I.3 : Carte des domaines structuraux du Maroc (Michard, 1976)

1.2.2- Le massif des Jebilets

Le massif des Jebilets appartient à la dorsale marocaine ou promontoire africain, haut fond de terrains anciens. Il constitue l'une des aires où affleure largement au Maroc le socle paléozoïque. Ce massif a été fortement affecté par l'orogénèse hercynienne. Il s'est formé au croisement de la dorsale marocaine qui se soulevait en direction subméridienne pendant le Mésozoïque et d'une zone anticlinale E-W de la phase de plissement éocène.

Selon des critères géologiques, structurales et géomorphologiques le massif des Jebilets est subdivisé en trois unités distinctes (Maier et *al.* 1988) (Fig. I.4) ;

- **Unité orientale**, constituée de méta-sédiments d'âges Viséen supérieur (Les flysch de Kharouba).
- **Unité centrale**, composée des schistes de Sarhlef attribués au Viséen supérieur- Namurien.
- **Unité occidentale**, formée essentiellement de séries cambro-ordoviciennes.

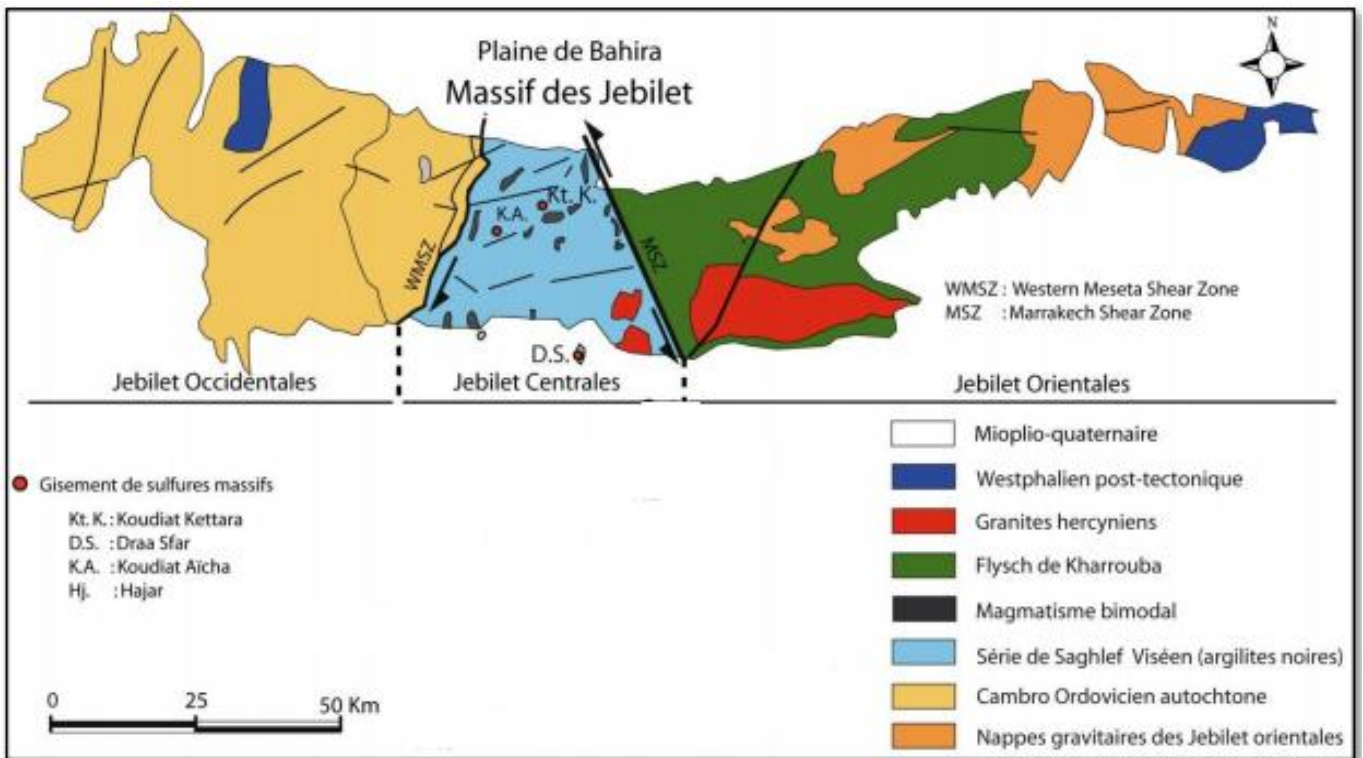


Figure I.4 : Situation du massif Hercynien des Jebilets (d'après Maier et *al.*, 1988, modifiée)

I.2.3- Les Jebilets Centrales

I.2.3.1-Lithostratigraphie

L'unité centrale des Jebilets est principalement formée d'une entité volcano-sédimentaire baptisée série de Sarhlef (Fig. I.5), datée du Viséen supérieur Namurien, elle est constituée de Shales fins à passés lenticulaires, de calcaire bioclastiques et de grès. Leur dépôt a été accompagné d'une activité volcanique (Huvelin, 1977 ; Bordonaro, 1983 ; Aarab, 1995 ; Essaifi, 1995) pré-orogénique très intense, qui se manifeste par des épanchements de laves acides et basiques, ainsi que par des cinérites, des jaspes et des tufs acides auxquels sont associées des minéralisations sulfurées connues dans les Jebilets centrales.

Stratigraphiquement, deux séries principales sont reconnues dans les Jebilets centrales (Bordonaro, 1984) :

- **Une série basale** dite série de Sarhlef constituée principalement de pélites et caractérisée par une activité volcanique qui commence par des manifestations laviques (brèches, tufs, etc.) et se poursuit par un volcanisme extrusif à caractères basiques (Viséen Supérieur Namurien). Les minéralisations stratiformes sulfurées sont liées aux épisodes tardi-volcaniques acides de la phase paroxysmale de la série de Sarhlef. En effet, aucune minéralisation liée aux termes acides de cette série n'est connue dans les Jebilets.
- **Série sommitale** essentiellement carbonatée, appelée série de Teqzim et formée de calcaires micro-conglomératiques et bioclastiques à la base et de pélites et grès au sommet (Viséen supérieur-Namurien).

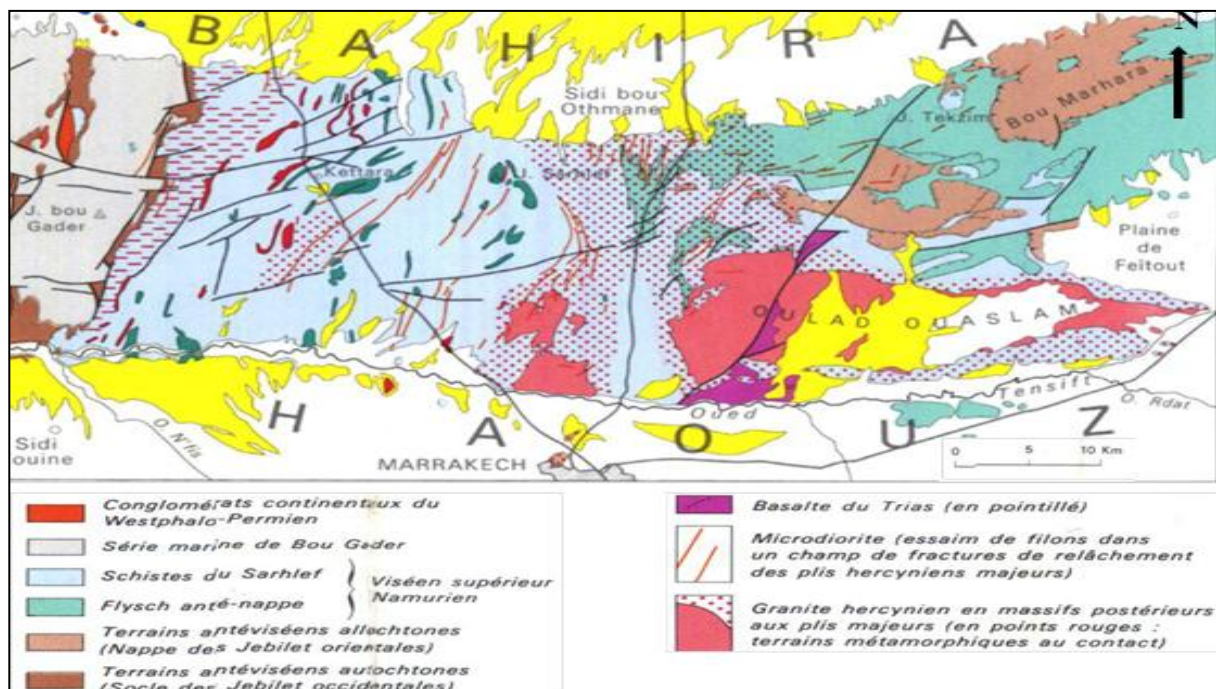


Figure I.5 : Carte géologique des Jebilet centrales (Huvelin, 1977).

I.2.3.2-Structuration

Les terrains carbonifères (schistes de Sarhlef) sont affectés par une intense déformation hercynienne caractérisée par une histoire tectono-métamorphique complexe. Ils ont d'abord subi une phase de plissement synschisteuse de direction subméridienne, associée à un métamorphisme épizonal d'âge post-viséen supérieur (Gaillet et Bordonaro, 1981). Ensuite, ils ont été affectés par des cisaillements subparallèles à la schistosité de flux, eux-mêmes repris par un plissement associé à une schistosité de crénulation (S2). A ce métamorphisme général, est associé un métamorphisme périplutonique qui se développe autour des intrusions granitiques et gabbroïques avec des auréoles, des décrochements senestres N160° et de grandes failles subméridiennes associées aux fossés Stephano-permiens (Bouloton et le Corre, 1985).

Toutefois, les caractéristiques structurales des Jebilets centrales sont le résultat de la succession de plusieurs événements tectoniques, enregistrés par la série de Sarhlef (Huvelin, 1977) :

- ✓ Mise en place de nappes de glissement d'âge Viséen supérieur après le dépôt des flysch de Kharouba.
- ✓ Plissement majeur post-Viséen caractérisé par des plis isoclinaux associés à une schistosité de flux ou une schistosité de fracture voire même de crénulations.
- ✓ Compression post-granite soulignée par des cisaillements et des remontées de magma acide.
- ✓ Distension postérieure à la granitisation responsable de la mise en place des filons microdioritiques et quartzo-carbonatés de direction E-W.
- ✓ Compression tardi-hercynienne.

I.2.3.3-Magmatisme

L'activité magmatique durant le paléozoïque (Wesphalo-Namurien) dans les Jebilets centrales (série de Sarhlef) compte trois épisodes (Huvelin, 1977 ; Bordonaro, 1983 ; Aarab, 1984 ; Saquaque, 1985 ; Mrini, 1985) :

- ✓ Magmatisme prétectonique : volcanique et plutonique, sous forme de coulées de laves acides et basique interstratifiées dans la série viséenne ou sous forme de plutons gabbroïques et kératophyriques. L'ensemble forme une série tholeïtique où les termes acides sont issus de la cristallisation fractionnée des termes basiques (Aarab, 1995) ;
- ✓ Magmatisme syn. à post tectonique : il est représenté par les granitoïdes hercyniens qui sont étroitement liés aux couloirs de cisaillements, ils ont des âges et des sources magmatiques variées ;
- ✓ Magmatisme post-orogénique: correspond à la mise en place d'un faisceau de filons de micro-diorite, riches en enclaves d'origine crustale (Huvelin, 1977). Ces filons recourent les granites orogéniques, ils sont issus d'un liquide initial basique d'affinité lamprophyrique.

I.3- Cadre climatique

I.3.1- Précipitation

D'après la carte des zones bioclimatiques du Maroc établi par Emberger (1955), notre zone d'étude appartient à l'étage semi-aride (fig. I.6) caractérisé par des précipitations peu abondantes dont la moyenne annuelle de l'an 2011 était de l'ordre de 235 mm (ABHT, 2012). Ces précipitations sont irrégulières dans le temps et l'espace. Elles ne sont pas concentrées comme d'habitude pendant la saison humide où on remarque la dominance des mois secs avec trois maxima en novembre, avril et en mai (fig. I.7).

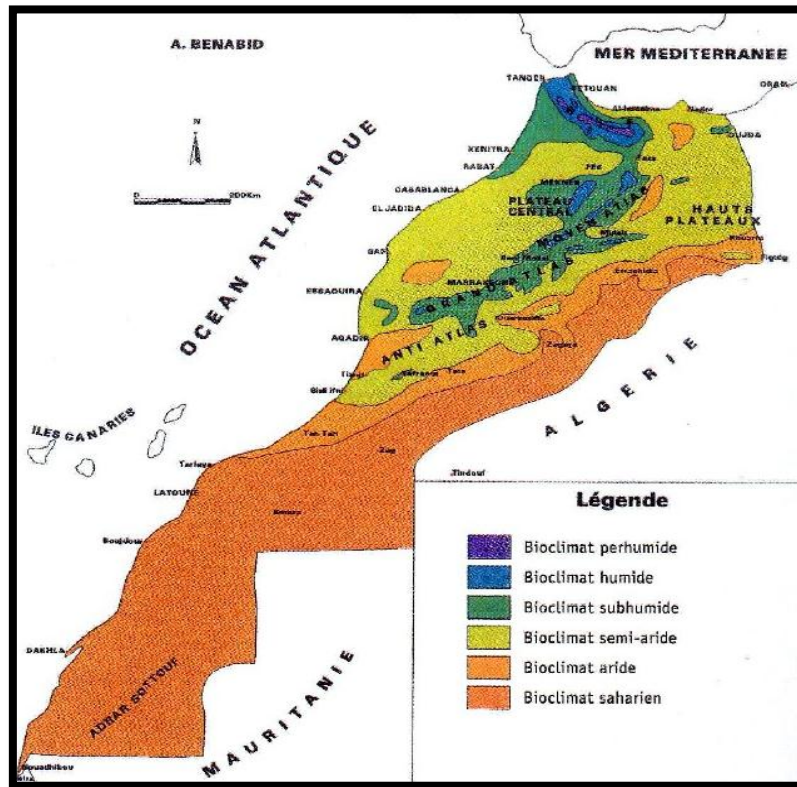


Figure I.6 : Répartition des zones bioclimatiques au Maroc (EMBERGER, 1955 ; in BENABID, 1988)

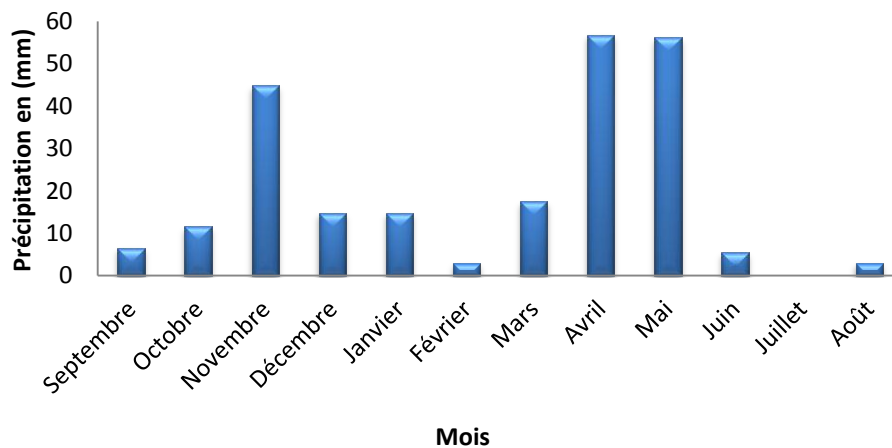


Figure I.7 : Précipitation mensuelle en (mm) de l'an 2011 (donnée ABHT, 2013)

I.3.2- Hygrométrie

La région de Marrakech est caractérisée par un climat continental chaud avec de forts contrastes de la température aussi bien saisonnier que journalier. La sécheresse n'est tempérée ni par l'humidité atmosphérique ni par la nébulosité. Les seules données quantitatives dont on dispose sur l'humidité de cette région proviennent de la station Lalla Takerkoust. Elles correspondent à des mesures de l'humidité depuis 1984 (Annexe 1). La représentation de ces données sous forme d'histogramme permet de se rendre compte que l'humidité relative passe en moyenne de 75% en novembre, à 50% en Août. Durant ce dernier mois, elle peut subir une forte diminution voire s'annuler lorsque soufflent des vents desséchants : chergui et sirocco.

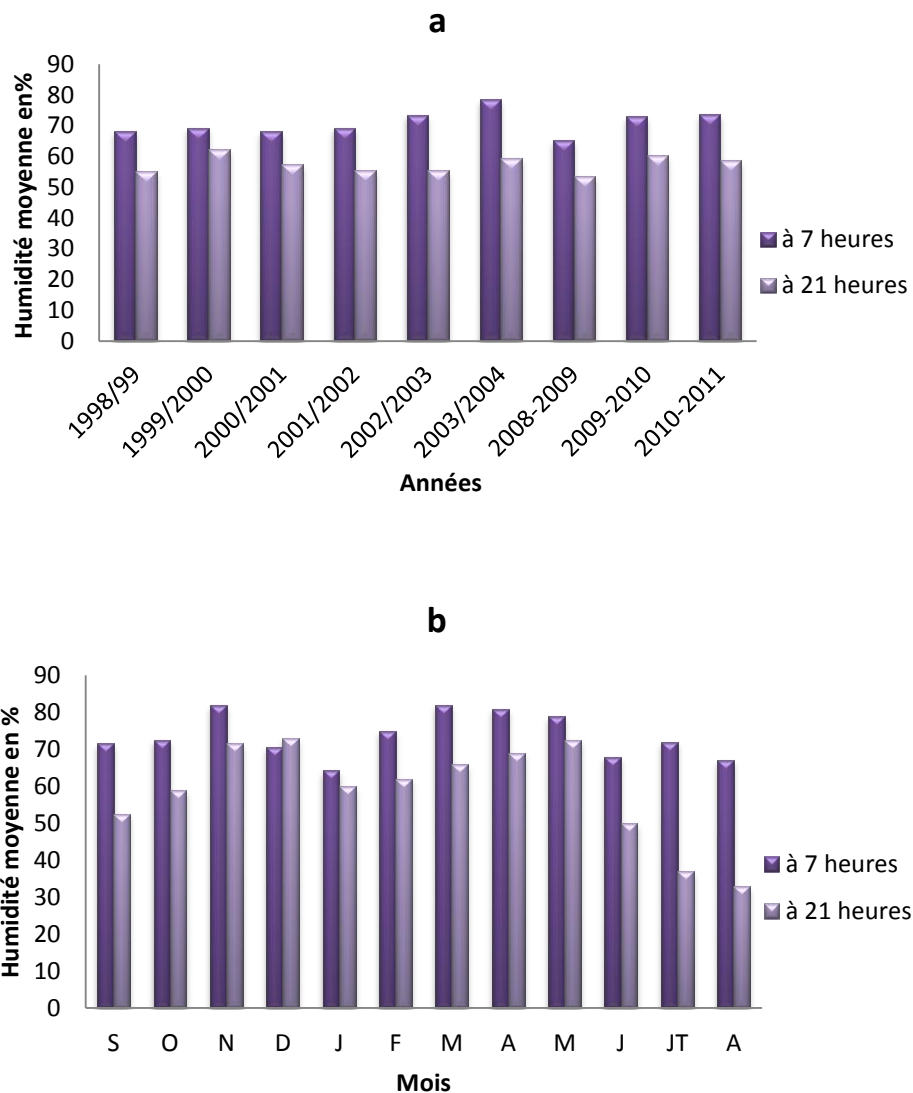


Figure I.8 : a) Humidité moyenne annuelle de 1998 jusqu'à 2011, b) Humidité moyenne mensuelle de l'an 2011 ; déclarée par la station Abadla (Données ABHT, 2013)

I.3.3- Température

Les contrastes de températures sont remarquables en raison des variations diurnes, saisonnières ou annuelles. Les moyennes mensuelles oscillent entre 14°C en janvier et 29°C en août (figure 6). Le nombre de jours d'insolation se chiffre à 240, dont 119 d'insolation continue. Les variations des moyennes annuelles montrent une légère variation autour de 20°C.

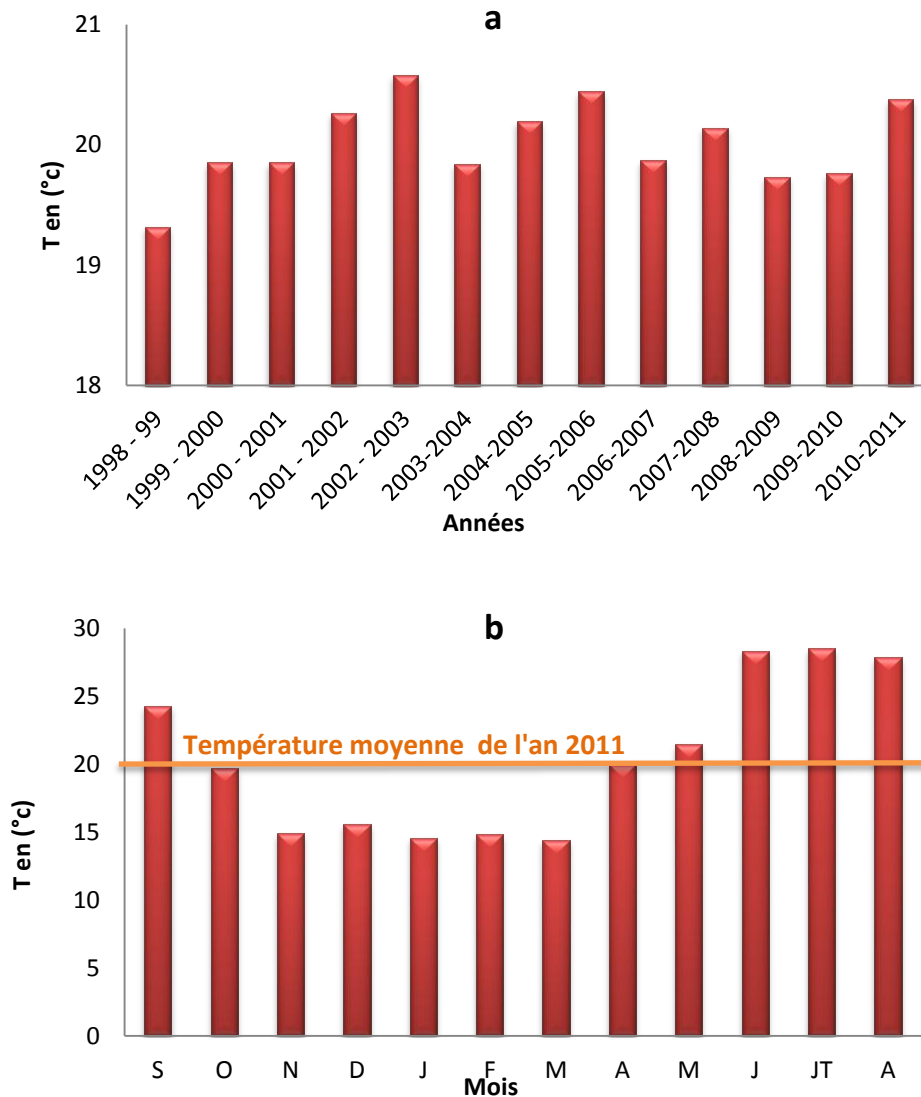


Figure I.9 : a) Température moyenne annuelle depuis 1998 jusqu'au 2011, b) Température moyenne mensuelle de 2011 de la station Abadla (Données ABHT, 2013)

I.3.4- Evaporation

L'évaporation est un phénomène indispensable dans le cycle de l'eau ; elle est favorisée dans notre aire d'étude par les vastes étendues non couvert de végétation ainsi que l'apport important de la chaleur. Au fil des années, les variations de l'évaporation peuvent être importantes comme négligeables dépendamment des températures et des apports en eau.

En ce qui concerne l'année 2011, on constate que les fortes évaporations ont principalement concerné les mois chauds Juin-Juillet-Aout.

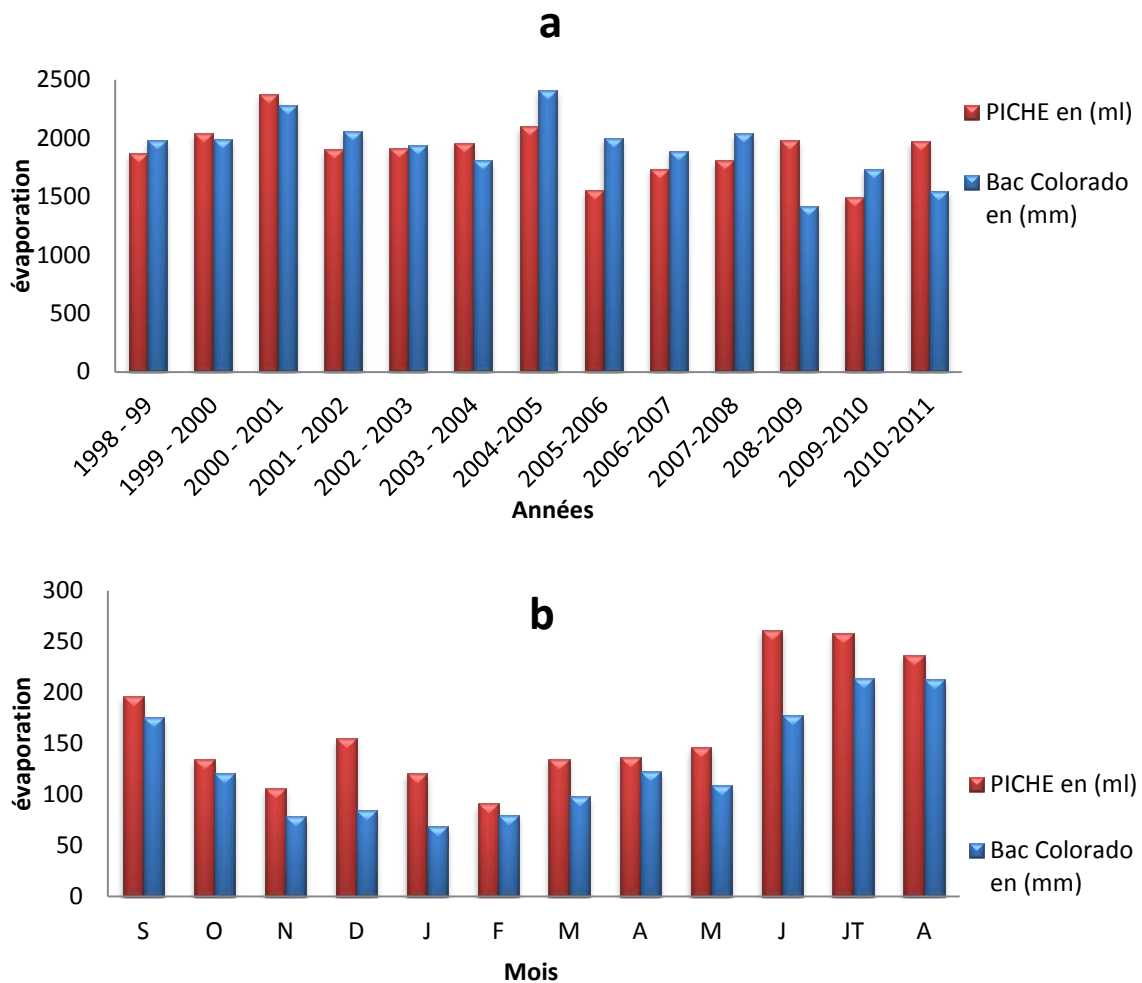


Figure I.10 : a) Evaporation totale annuelle mesurée de 1998 jusqu'à 2011 par Bac Colorado en (mm) et PICHE en (ml), b) Evaporation totale mensuelle de 2011 mesurée par Bac Colorado en (mm) et PICHE en (ml) ; Station Abadla (Données ABHT, 2013)

I.3.5- Vents

Les vents dominants sont généralement calmes et originaires de l'Ouest et du Nord-Ouest. Au contraire les vents desséchants de chergui et de sirocco (enregistrés au mois de juillet) soufflent respectivement de l'Est et du Sud pour une durée dans l'année cumulée de 39 jours.

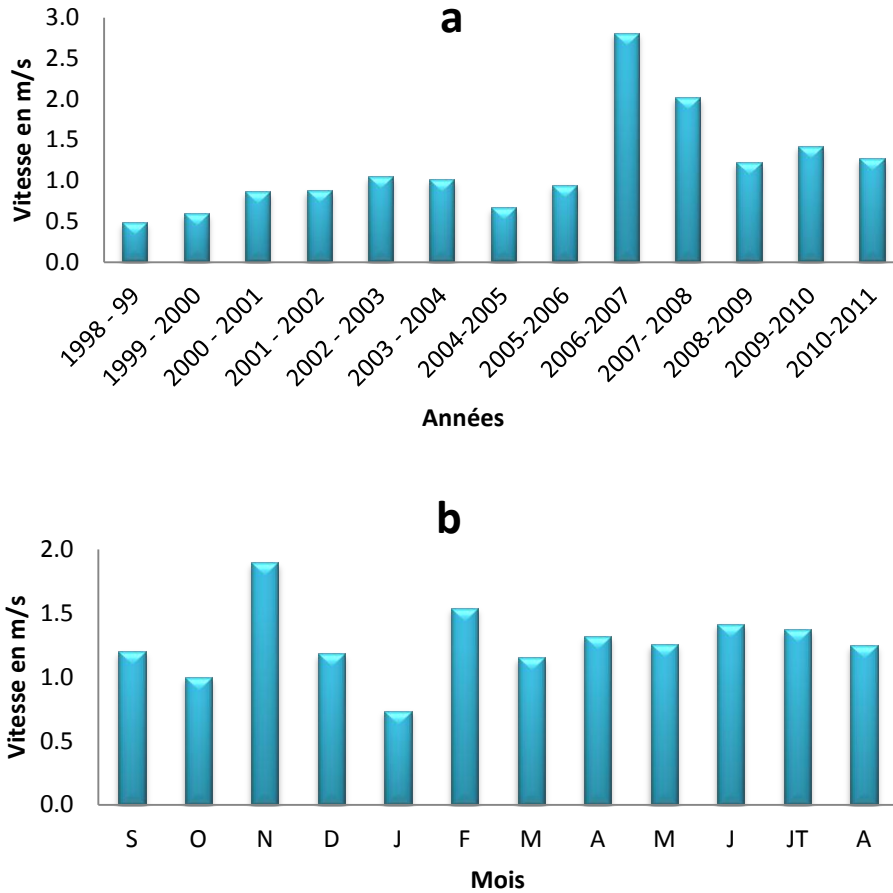


Figure I.11 : a) Vitesse moyenne annuelle du vent en m/s de 1998 jusqu'à 2011, b) Vitesse moyenne mensuelle du vent de l'an 2011 ; déclarée par la station Abadla (Données ABHT, 2013)

I.4- Cadre Hydrologique

La nature peu accidentée de la topographie de la zone d'étude a permis la mise en place d'un réseau hydrographique peu développé. Ce réseau est représenté par quelques talwegs comme oued Mesret et oued Menili qui drainent les eaux de pluie dans cette zone du Nord-Est vers le Sud-Ouest en direction d'Oued Tensift situé plus loin vers le Sud.

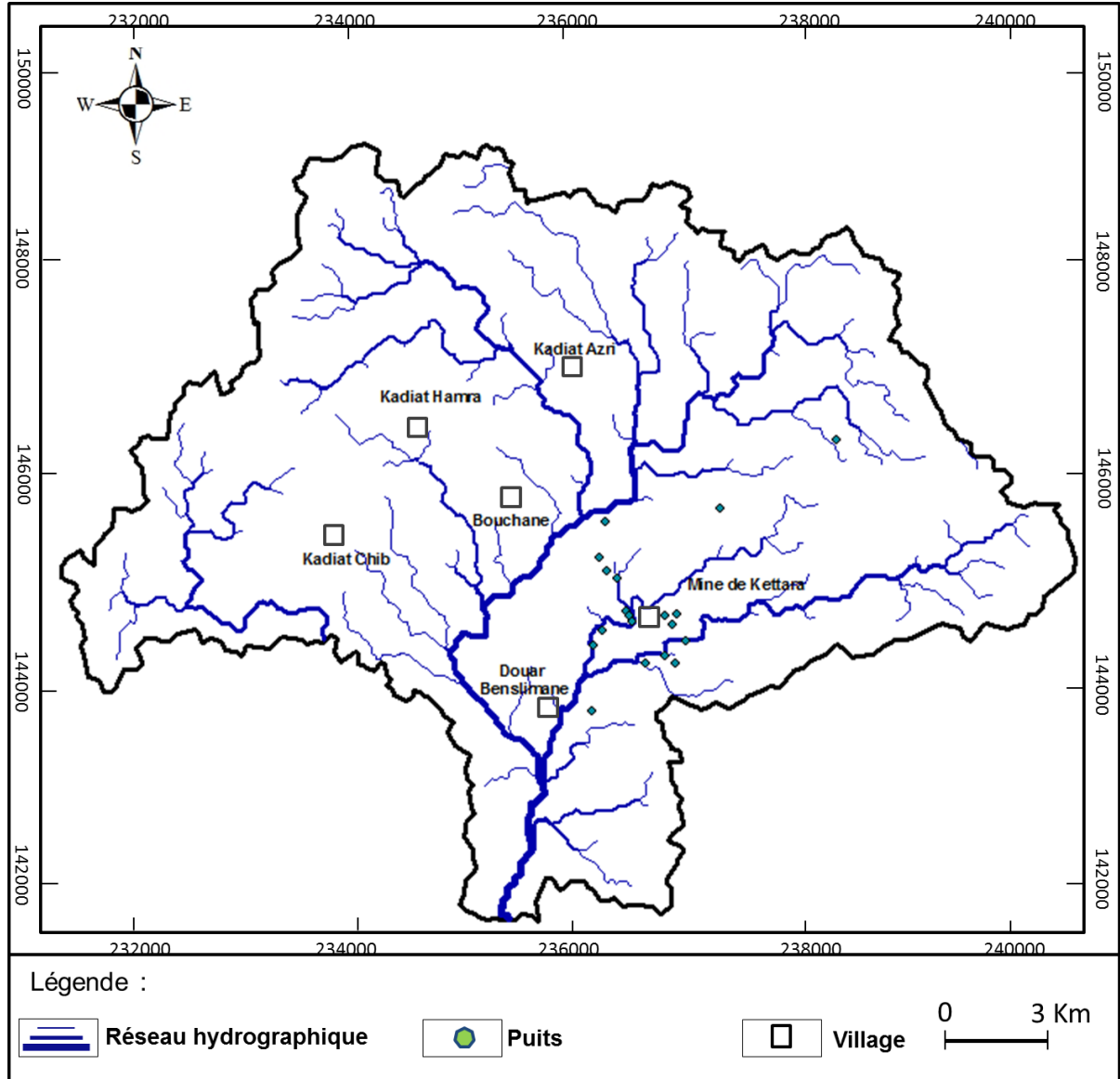


Figure I.12 : Réseau hydrographique de la région de Kettara avec l'attribution de la classification de Strahler

2EME PARTIE : ETUDE HYDROGÉOLOGIQUE

II. Etude Hydrogéologique

II.1- Synthèse des études hydrogéologiques antérieures

Le massif des Jebilet centrales a fait l'objet de plusieurs études géologiques académiques dont on peut citer, essentiellement, celles d'El Mandour (1990) et de Guessous (1996). La synthèse de ces travaux permet de conclure que, de point de vue hydrogéologique, ce massif est constitué de deux réservoirs :

- ❖ Le premier est formé par une couche d'altérites semi-perméable d'épaisseur variable selon la dureté de la roche mère et le degré d'altération. La capacité d'emmagasinement ou de libération des eaux dépend de la nature du substratum et de la géomorphologie.
- ❖ Le second est représenté par les zones fissurées et faillées du substratum hercynien sous-jacent. Sa perméabilité est plus importante que celle du premier réservoir et sa productivité est plus élevée en surface et diminue avec la profondeur pour devenir le plus souvent négligeable. En effet, les fissures se renferment progressivement en profondeur et le milieu devient imperméable, seuls les forages implantés sur des accidents majeurs présentent une productivité significative.

Ces deux aquifères sont souvent en continuité hydraulique mais leurs caractéristiques hydrodynamiques sont différentes. En effet, l'aquifère d'altérites possède une forte capacité mais une faible perméabilité. Cependant, l'aquifère de fissures est le plus perméable et le plus productif. L'appréciation des caractéristiques hydrodynamiques de ces deux réservoirs lors des études antérieures (EL Mandour, 1990 et Guessous, 1996) a permis d'aboutir aux résultats suivants :

Tableau II.1 : Valeurs moyennes des caractéristiques hydrodynamiques des deux réservoirs de la région de Kettara

	Transmissivité T (m ² /s)	Coefficient d'emmagasinement (S)
Réservoir d'altérites	9. 10 ⁻⁴	0.2
Réservoir de fissures	3. 10 ⁻³	0.05

La synthèse des données de forages et l'analyse statistique des paramètres hydrogéologiques (EL Mandour, 1990) d'une part et les résultats de l'étude géo-électrique menée par Guessous (1996) mettent clairement en évidence l'importance de l'épaisseur saturée des altérites sur la productivité de l'aquifère des fissures. De même, le schéma hydrogéologique qui pourrait être adopté consisterait en une seule nappe siégeant dans deux réservoirs différents : le premier est représenté par la partie altérée du substratum hercynien et le second correspond aux zones fracturées de ce substratum. Ces deux niveaux présentent des comportements hydrodynamiques différents, en raison du mode d'écoulement caractérisant chacun d'eux.

Les paramètres hydrodynamiques (Transmissivité et coefficient d'emmagasinement) dont on dispose pour ces deux réservoirs ont été obtenus par des essais de pompage (El Mandour, 1990). Ces essais ont été réalisés selon deux procédures différentes :

- Essais classiques avec des durées de pompages relativement faibles (quelques heures) ;
- Essais à l'air lift qui consiste à envoyer de l'air comprimé dans l'eau du forage par un tube d'air. Le mélange qui en résulte ; air-eau, de densité inférieure à celle de l'eau est refoulé à la surface par le tube d'eau.

Pour ces deux types d'essais, des méthodes d'interprétations spécifiques ont été adoptées :

- ✓ La méthode de la nappe continue (Theis et Jacob) pour le réservoir d'altérites puisque sa perméabilité est d'interstice ;
- ✓ La méthode de la fracture unique pour l'analyse des paramètres hydrodynamique de la partie fissurée, dont les hypothèses d'application sont celles de Theis puisque la fracture unique considère que l'aquifère affecté d'une fracture verticale ou horizontale est homogène et isotrope (Gringarten, et *al.*, 1974).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.2, ils permettent de retenir les points suivants :

- L'aquifère d'altérites capté par des ouvrages peu profonds, présente des transmissivités faibles allant de $10E-5$ à $10E-4$ m² /s ;
- L'aquifère profond de fissures, généralement semi-captif, présente des transmissivités moyennes de l'ordre de $10E-3$ m²/s.
- Les fourchettes des valeurs de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement, bien différenciées, confirment le caractère bicouche du système aquifère des Jebilet centrales.

Tableau II.2 : Paramètres hydrauliques calculés à partir de quelques ouvrages du socle des Jebilet

Nature de l'ouvrage et n° IRE	Prof (m)	Q (l/s)	Durée du pompage (h)	Rabatement (m)	Débit spécifique (m ² /s)	Lithologie	Méthode de Jacob			Méthode de la fracture	Type d'aquifère
							T de descente (m ² /s)	T de remontée (m ² /s)	S	T (m ² /s)	
Forage 3036/44	80	15	11	5.14	2,92	Schiste	T1= 1.4E-3 T2= 9.6E-4	1.8 E-3	-	8 E-4	Altérite + Fissure
Piézomètre 3035/44	80	15	11	4.75	3,16	Schiste	T1= 3 E-3 T2= 9 E-4	1.4 E-3	S1=5E-2 S2=2E-1	6 E-4	Altérite + Fissure
Forage 3031/44	43	12.5	16	11.3	1,1	Schiste	1.1 E-3	1.4 E-3	-	1 E-3	Altérite + Fissure
Forage 1930/44	60	13	2	0.35	37	Schiste	8 E-3	9 E-3	-	7 E-3	Altérite + Fissure
Puits 2504/44	18	3	12	5.37	0,56	Granite	2 E-4	-	-	-	Altérite
Puits 1692/44	25	1	6	3.07	0,33	Granite	4 E-4	2 E-4	-	-	Altérite
Puits 1649/44	11.1	0.3	12	2.26	0,13	Schiste	2.8 E-5	3.8 E-5	-	-	Altérite
Puits 1648/44	7.3	4.5	20	2.43	1,85	Schiste et Quartzite	9 E-4	7 E-4	-	-	Altérite

Du point de vue productivité et en vue d'une interprétation efficace, on va utiliser les résultats des transmissivités de la phase remontée puisqu'ils sont plus plausibles car non influencés par l'action de pompage ce qui appréhende au mieux les paramètres réels de l'aquifère.

Donc la transmissivité issue de l'interprétation de la remontée pourrait caractériser la productivité de l'aquifère et permettrait d'estimer le débit d'exploitation théorique Q_{th} qui peut être fourni par l'aquifère à travers un ouvrage parfait sans perte de charge ; il représente donc un potentiel de production.

$$Q_{th} = \frac{2 * \pi * T * s}{\ln R/r}$$

Avec T : transmissivité
 s : Rabattement
 R : Rayon du cône d'action
 r : Rayon du forage

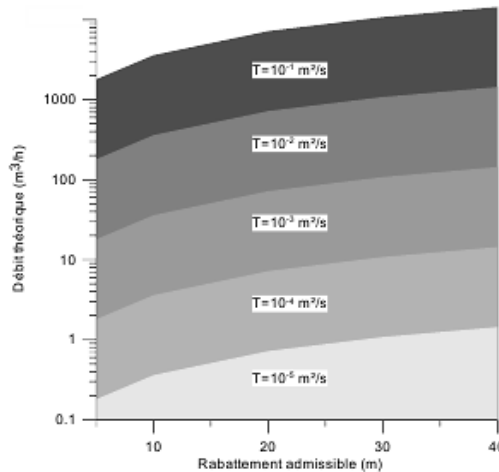


Figure II.13 : Relation entre la transmissivité et le débit d'exploitation théorique (Vouillamoz, 2003)

En se basant sur ce diagramme et sur les résultats obtenus, on peut déterminer les zones productives. A ce niveau, on constate que tous les forages se limitent dans l'intervalle E-3 et E-5 m²/s donc ils sont moyennement à peu productifs.

D'après la transmissivité de la remontée T_r , les ouvrages moyennement productifs sont :

- Forage 3036/44 ;
- Forage 3031/44 ;
- Forage 1930/44
- Piézomètre 3035/44.

Par ailleurs, si on considère les valeurs des débits spécifiques, qui tiennent compte des valeurs des débits de pompage et des rabattements occasionnés, on constate que les forages mentionnés ci-dessus se distinguent nettement et témoignent que leurs productivités sont plus importantes que celles des autres puits. Ceci confirme donc la conclusion de l'analyse de la variabilité des transmissivités. Cependant, on peut signaler les remarques suivantes :

- Le puits 1648/44 montre également un débit spécifique élevé. Il montre un débit moyen avec un rabattement final faible au bout de 20h de pompage. De ce fait, il pourrait également faire partie de cette classe d'ouvrages à productivité moyenne.
- Le forage 1930/44 montre une très forte valeur du débit spécifique à laquelle il ne faudrait pas accorder trop d'importance car le temps de pompage est très faible ne dépassant les 2 heures.

II.1.1- Caractérisation structurale de l'aquifère étudié

Les études antérieures mettent en évidence l'importance du réservoir de fissures dans l'hydrogéologie de la zone d'étude, d'où l'intérêt d'aborder ce volet structural et en particulier l'étude de la fracturation. Pour se faire, on utilisera la carte géologique de la région de Kettara établie par Maier et El Hakkour (1984 ; in Hathouti, 1990). On se servira de cette carte détaillée comme document de base pour la géologie locale. Son analyse montre clairement que la zone d'étude est fortement affectée par un réseau de failles organisé en deux familles : la première NE-SW et la seconde ENE-WSW. Les trois coupes géologiques réalisées à travers cette zone font part d'une structuration globale en synclinorium (Fig. II.14).

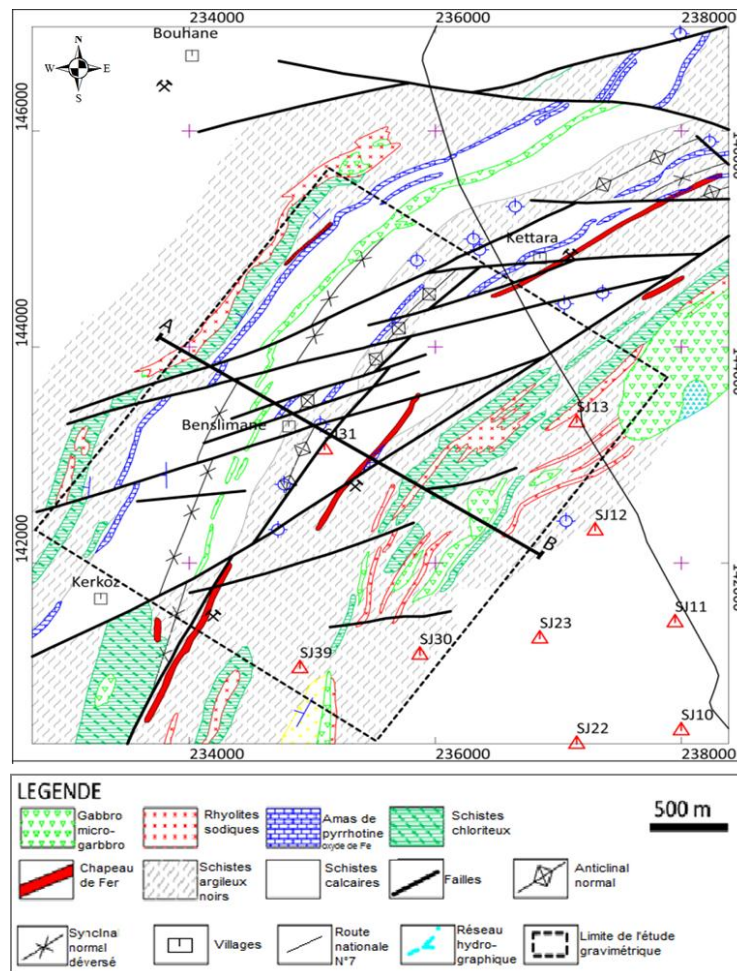


Figure II.14 : Carte géologique simplifiée du synclinorium Kettara mettant en évidence les trois coupes géologiques réalisées par HATHOUTI (MAIER et EL HAKKOUR, 1984 ; in HATHOUTI, 1990)

La coupe AB passant à proximité du village de Benslimane montre que la structure générale de notre zone d'étude s'apparente à un synclinorium fortement affecté par le réseau de faille précité. Ces failles provoquent des décalages horizontaux clairement mis en évidence en plan sur la carte géologique (Fig. II.15). Des rejets verticaux ont également été attribués à ces failles comme le montre la coupe AB.

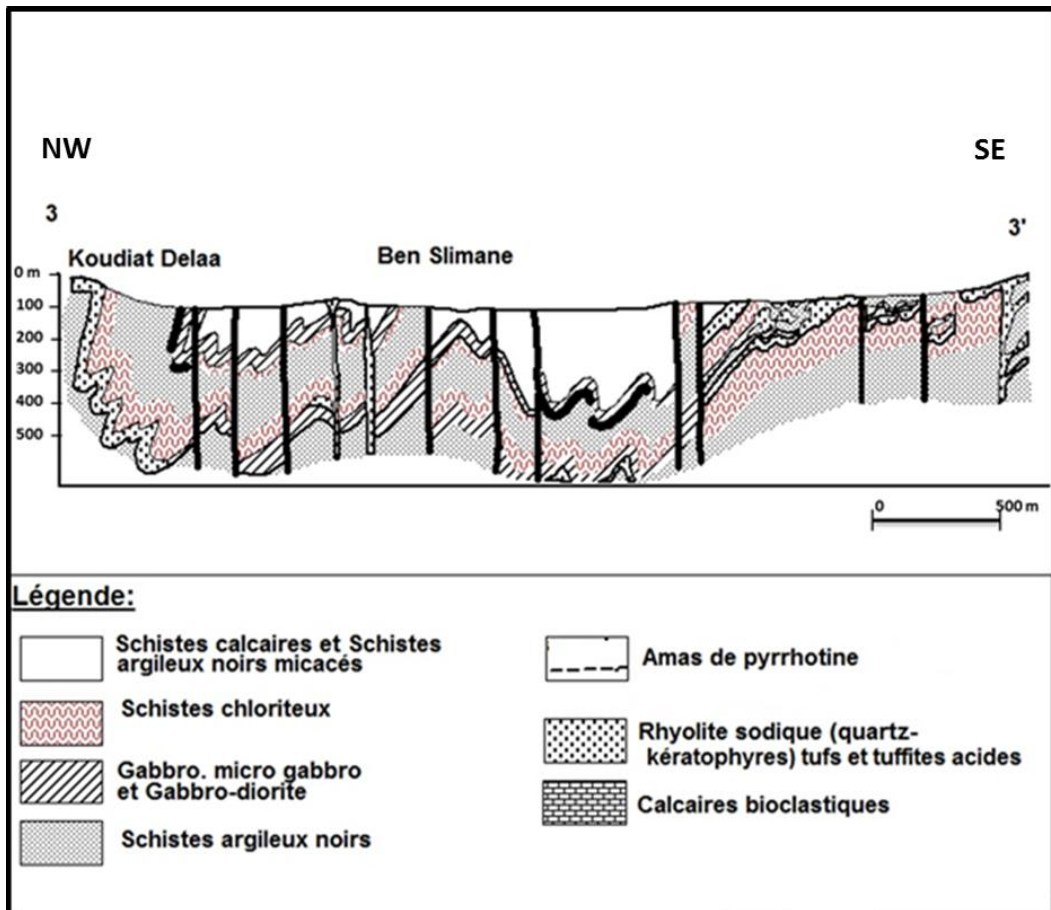


Figure II.15 : Coupe AB montrant la structure de l'aquifère du secteur d'étude (MAIER et EL HAKKOUR, 1984 ; in HATHOUTI, 1990)

II.1.2- Données géophysiques

La synthèse bibliographique des travaux de recherche académiques portant sur le massif des Jebilets centrales montre la thèse de Guessous (1996) comme l'unique document attestant de la mise en œuvre d'une prospection géophysique appliquée à l'hydrogéologie aux alentours de notre zone d'étude. Les travaux menés dans le cadre de cette thèse concernent la réalisation d'une campagne de prospection par sondages électriques couvrant une superficie de l'ordre de 55 Km² à l'aide de la mise en œuvre de 54 sondages électriques dont 7 paramétriques (sondages étalons), répartis sur six profils orientés NNW-SSE et espacés de 1000 m (Fig. II.16).

L'utilité des sondages étalons implantés à proximité des forages mécaniques est d'avoir un ordre de grandeur de la résistivité réelle permettant de caler les sondages d'étalonnage.

Les sondages électriques ont été classés en plusieurs catégories selon leur allure : cloche, fond de bateau et remontée en fond de bateau. Leur interprétation a permis de mettre en évidence plusieurs modèles électriques présents sous forme de :

- Profils de résistivité 1D ;
- Coupe géo-électrique 2D ;
- et cartes 3D.

Ces modèles reflètent les variations verticales et horizontales de la résistivité électrique à travers la zone d'étude. Ils ont été principalement interprétés en termes d'état de fracturation et d'altération du socle hercynien des Jebilets centrales. Les coupes géoélectriques et les cartes élaborées au terme de cette étude permettent la caractérisation des variations d'épaisseur de la couche altérée. Les zones potentiellement productives ont été définies au niveau des dépressions de cette couche réservoir.

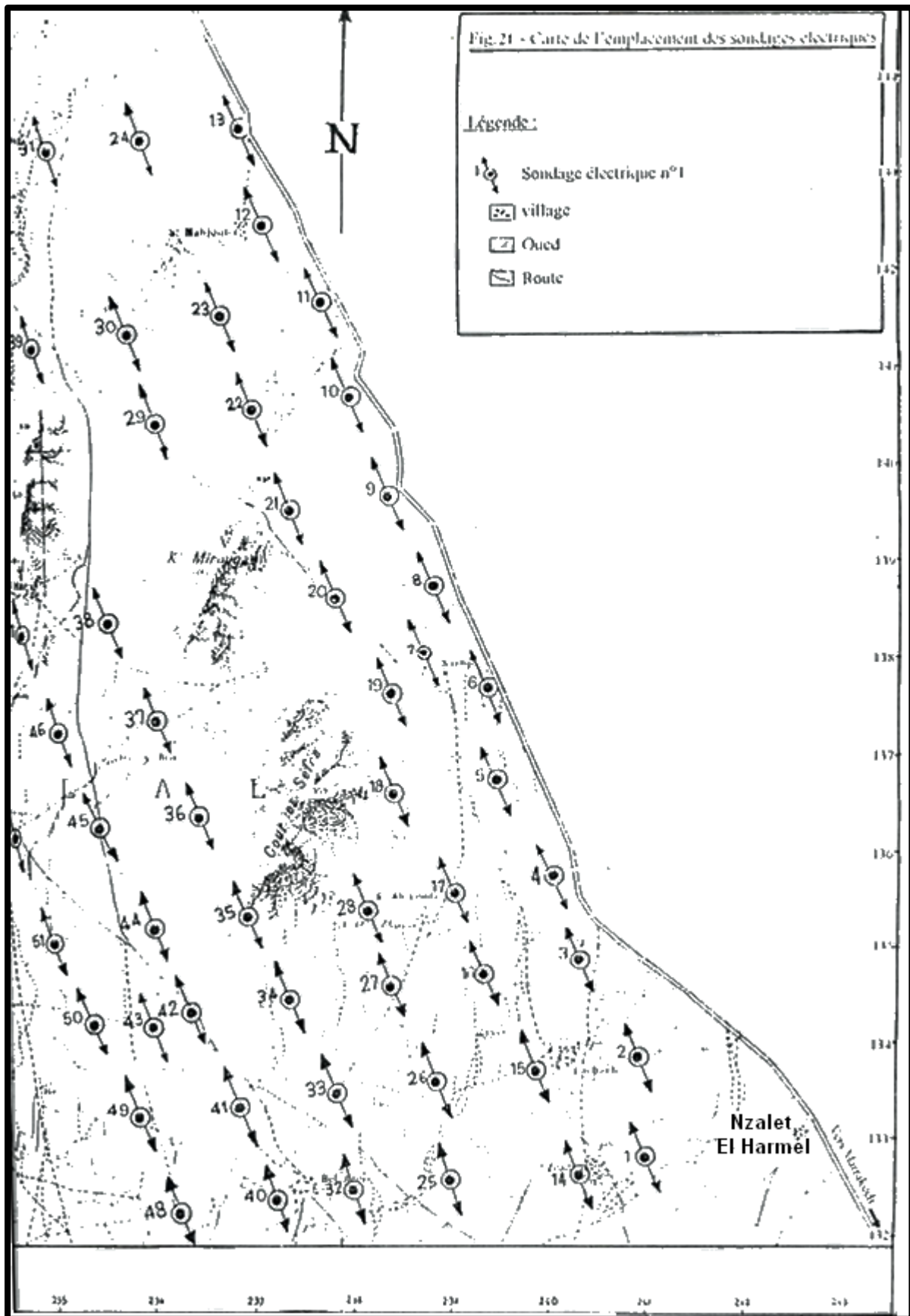


Figure II.16 : Emplacement des sondages électriques réalisés par Guessous en 1996

II.2- Synthèse géologique de la sortie d'exploration de l'aire d'étude

Afin d'explorer l'affleurement géologique du secteur d'étude Douar Benslimane, qui se situe dans le massif hercynien de Jebilet centrales. On a effectué une sortie le 24 mars 2013 où on a constaté qu'à l'échelle d'affleurement les formations existant correspondent à la série schisteuse dite de Sarhlef d'âge Viséen supérieur (Huvelin, 1970).



Photo II.1 : Schistes de Sarhlef aux alentours du Douar Benslimane

Dans le voisinage immédiat du Douar Benslimane on a trouvé des schistes ardoisiers qui renferment beaucoup de quartz, constituant des filons laiteux formés par du quartz massif minces parfois peu érodable vue la résistance du quartz aux facteurs de l'altération superficielle, sa stabilité chimique et ses propriétés mécaniques. Parfois ces filons apparaissent en murailles, de couleur blanche laiteuse. Ils ont une direction générale N0 à N25, avec d'autres directions pour des petites filonets étant dispatchés dans tout le domaine, et un pendage entre 75 et 80 vers WNW, et parfois subvertical.

Probablement la genèse de ces filons est liée à l'abondance de la silice dans le magma après la perte totale des autres constituants (Na, Cu, K etc.) et la cristallisation des autres silicates et on sait que le quartz est le dernier qui cristallise vers 600 – 700 °C donc il résulte de la cristallisation tardive d'un magma riche en SiO₂ (dernier épisode).

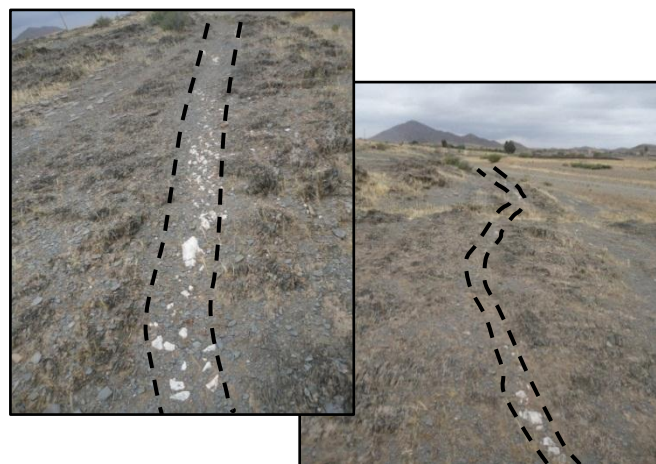


Photo II.2 : Filons de quartz laiteux près du Douar Benslimane

On ce qui concerne les fractures, on constate après une étude quantitative sur le terrain que le socle des Jebilet Centrales est affecté par une fracturation très dense. Cette fracturation résulte de la superposition de plusieurs phases tectoniques. En ce qui concerne l'orientation on remarque la dominance des directions suivant : N60 à N80 et N130 à N150 (Photo II.3).



Photo II.3 : Fracturation de direction N150 sur le socle hercynien près du Douar Benslimane

II.3- Données hydrogéologique actualisées de la région de Kettara

II.3.1- Piézométrie de l'aire d'étude

Comme nous l'avons signalé auparavant, la synthèse des travaux antérieurs sur l'hydrogéologie du massif des Jebilet centrales montre que le socle hercynien qui le constitue abrite un système aquifère bicouche constitué d'un aquifère supérieur semi-perméable situé dans la frange altérée des formations schisteuses et d'un aquifère profond caractérisé par une perméabilité de fissures et de fractures (El Mandour 1990).

Les données piézométriques dont on dispose concernent le premier aquifère. Il s'agit de mesures du niveau piézométriques relevées au niveau des rares points d'eau existants au niveau de notre zone d'étude et complétées par des données fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique Tensift (Tableau II.3).

Tableau II.3 : Mesures piézométriques de quelque puits sur une partie du bassin versant étudié (Données module Hydrochimie, 2012)

Puits	X	Y	NP
Pt1	237003	144936	446
Pt2	240039	148047	502
Pt3	235930	146605	474
Pt4	235829	145974	459
Pt5	235954	145721	453
Pt6	236135	145595	453
Pt7	237982	146844	484
Pt8	237196	144946	466
Pt9	237118	144781	460
Pt10	236992	144206	465
Pt11	237364	144479	458
Pt12	237188	144084	461
Pt13	236656	144070	481
Pt14	236314	145020	446
Pt15	235888	144659	440
Pt16	235710	144408	435
Pt17	235689	143229	436
Pt18	236406	144825	474
Pt19	236346	144924	449
Pt20	234757	142860	442
Pt21	235065	143274	441

La carte piézométrique (Fig. II.17) établie à partir de ces données montre une forte variation du niveau piézométrique au niveau de la partie méridionale, ce qui témoigne d'une interconnexion très faible voire nulle entre les discontinuités des réservoirs. Cette variation est due essentiellement à sa surexploitation de la nappe attestée par l'important nombre de puits implantés dans cette région. L'analyse du sens d'écoulement de la nappe nous permet de constater que le système d'alimentation de

cette dernière est généralement indépendant du réseau hydrographique, à l'exception de quelques zones très limitées où l'on remarque la convergence des eaux vers les lits d'oueds. Ce système d'alimentation explique le déficit hydraulique rencontré au niveau des ressources en eau superficielles et souterraines.

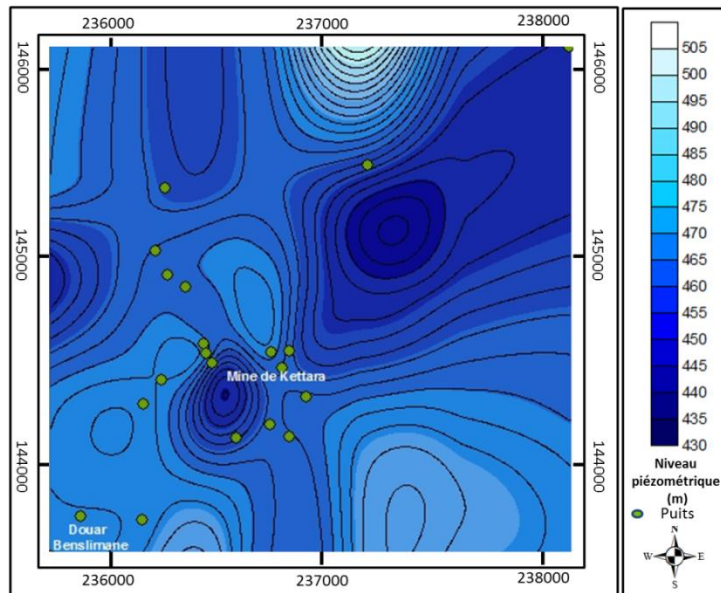


Figure II.17 : Carte piézométrique du secteur d'étude montrant la répartition spatiale des puits

II.3.2- Hydrochimie des eaux souterraines analysées

Désigner un emplacement pour des forages productifs n'aura pas de sens si la qualité de ces eaux est médiocre, pour cette raison nous avons évalué les paramètres physico-chimique des eaux de l'aquifère de Kettara. Dont on a prélevé un ensemble des échantillons au niveau des puits de grand diamètre traditionnels très réponsus qui ne dépassent pas 20 mètres de profondeur et situant entre la mine abandonnées de Kettara et Douar Benslimane (Fig. II.18).

Tableau II.4 : Caractéristiques des puits échantillonnés

Puits	Coordonnées géographique (m)			Température de l'eau (t°)	pH	Conductivité (µS/cm)	Information supplémentaire
	X	Y	Z				
P1	238 037.25	145 437.17	473	-	-	-	En amont*, l'état: à sec
P2	238 360.96	145 567.41	473	18.6	7.8	584	En amont*, margelle = 10 cm
P3	236 458.10	144 725.81	452	19.7	7.2	1354	En aval*, margelle = 5 cm
P4	236 503.08	144 637.70	449	19	6.4	1420	En aval*, margelle = 8 cm
P5	235 989.46	144 637.70	447	20	7.2	1449	En aval*, margelle = 5 cm
P6	235 140.28	143 237.88	441	19	7.6	1096	En aval*, margelle = 10 cm
P7	235 200.65	142 958.98	430	18	7.4	1056	En aval*, margelle = 10 cm

* : Par rapport à la mine abandonnée de Kettara

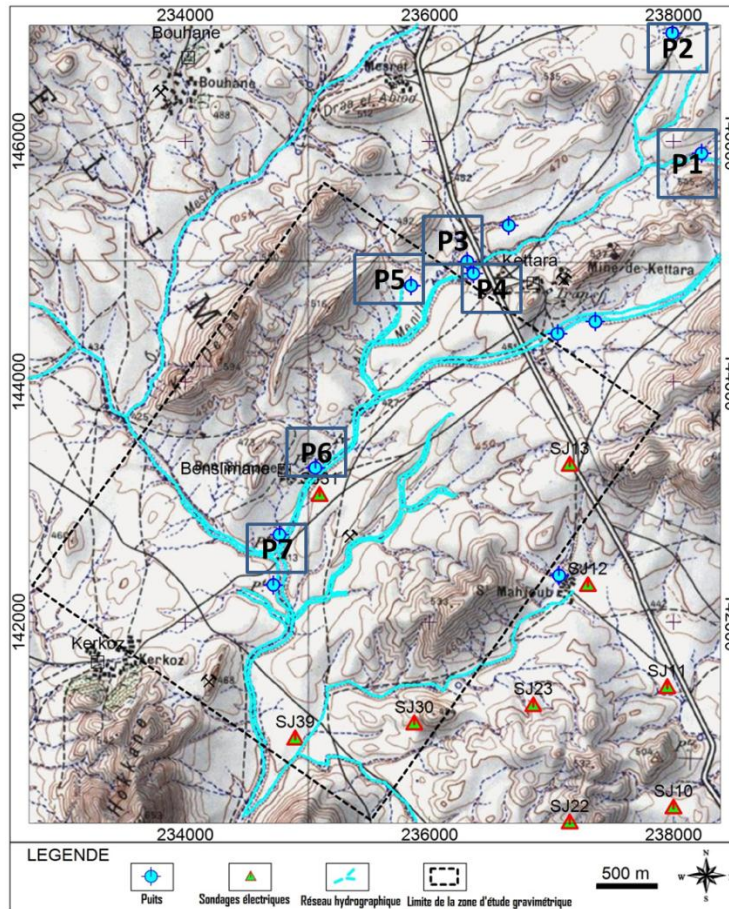


Figure II.18 : Localisation des puits échantillonnés

II.3.2.1- Paramètres étudiés :

Nous avons étudiés les paramètres physico-chimique des échantillons sur deux tranches :

❖ Sur le terrain :

Un certain nombre de données concernant la nature physique et chimique de l'eau doivent être acquises *In-situ* car elles peuvent évoluer très rapidement ce qui entraîne une sous-estimation des résultats. Les principales mesures de terrain sont ci-après, dans l'ordre de leur acquisition :

- ✓ Température de l'air ;
- ✓ Température de l'eau ce paramètre permet la validité de certaines mesures à l'exemple de la quantité de l'oxygène dissous et la dissociation gazeuse de l'azote ammoniacale NH_4^+ ;
- ✓ pH est en relation étroite avec la concentration des ions hydrogène H^+ présents dans l'eau Parmi tous les paramètres physico-chimiques analysés sur le terrain, c'est un des plus délicats à mesurer correctement. Il conditionne de nombreux équilibres et renseigne sur l'activité biologique et plus particulièrement photosynthétique du milieu.

D'après la figure II.19 on constate que le puits 2 a un pH basique et c'est dû à la lithologie car il est creusé au niveau de la formation schisteuse d'origine basique. Alors que les autres puits ont un pH proche de la neutralité cela est expliqué par l'effort de la nature à s'auto-neutraliser ainsi que la dilution de ces eaux par ceux provenant des puits situés en amont ayant des pH légèrement alcalin.

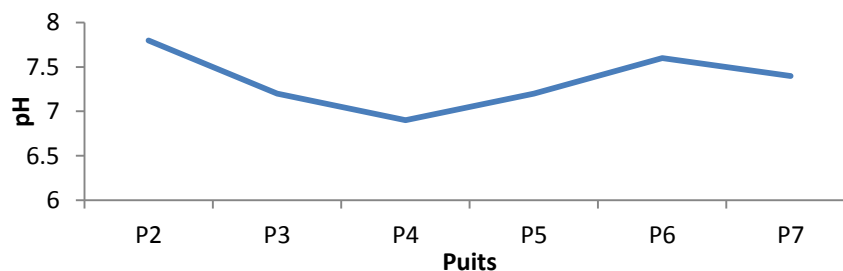


Figure II.19 : Variations du pH de l'amont vers l'aval du bassin

- ✓ La conductivité permet d'avoir une image de la charge de l'eau en sels ionisés. Au niveau du graphe (Fig. II.20) on remarque que la conductivité augmente de l'amont vers l'aval avec une faible diminution au niveau des puits P6 et P7 c'est dû probablement à l'effet de la dilution par d'autres apports d'eau.

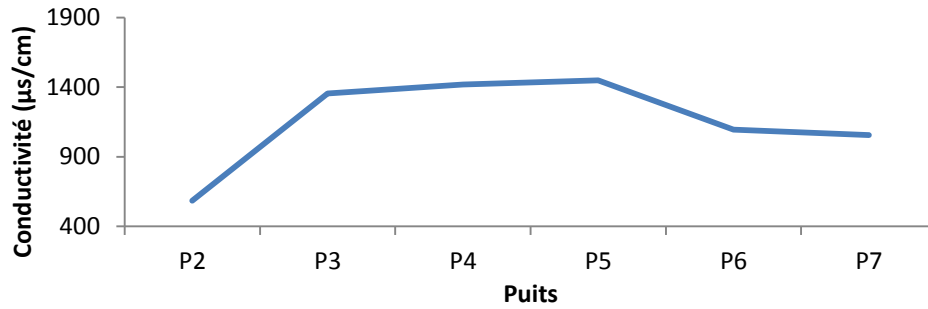


Figure II.20 : Variations de la conductivité de l'amont vers l'aval



Photo II.4 : Mallette des analyses physico-chimique *in-situ*

❖ Au laboratoire :

Les analyses ont été réalisées au Laboratoire des Sciences de l'Eau et l'Environnement (S2E) du Centre nationale d'Etude et de Recherche sur l'Eau et l'Energie (CNEREE), elles ont portés sur les éléments suivants :

- Les sulfates SO_4^{2-} ont été analysés nos échantillons en raison de la présence de la mine abandonnée de Kettara en amont du bassin et afin de quantifier le degré de contamination des eaux souterraines.
- Les chlorures Cl^- : le choix a été basé sur la nature du faciès parce qu'au niveau de quelques endroits on rencontre des évaporites (Huvelin, 1970 ; Hathouti, 1990). Cette analyse nous permettra de déterminer les échanges entre les faciès et l'eau souterraine.
- Les formes de l'azote (NH_4^+ et NO_2^-) : on a choisi ces formes du fait que le secteur étudié reconnaît une activité agricole.
- Les ions HCO_3^- et CO_3^{2-} pour déterminer la quantité des sels des acides faibles.
- La dureté totale pour avoir une idée sur les teneurs en calcium et en magnésium.

II.3.2.2- Résultats des analyses:

a. Dosage des sulfates (Rodier, 1984) :

La mesure des sulfates a été effectuée par la spectrophotométrie, qui est une méthode analytique quantitative consistant à mesurer l'absorbance ou la densité optique d'une substance chimique donnée, généralement en solution. Plus l'échantillon est concentré, plus il absorbe la lumière dans les limites de proportionnalité énoncées par la loi de Beer-Lambert (cf. Annexe 1).

La densité optique des échantillons est déterminée par un spectrophotomètre préalablement étalonné sur la longueur d'onde d'absorption de la substance à étudier.



Photo II.5: Spectrophotomètre

Le passage de l'absorbance vers la concentration (mg/l), est exécuté à l'aide de la courbe d'étalonnage (cf. Annexe 1) et la formule suivante :

$$SO_4^- \text{ (mg/l)} = DO * 156 * FD$$

Avec DO : la densité optique

FD : le facteur de dilution, puisque l'aire étudiée est reconnu par le drainage minier acide qui engendre l'augmentation des sulfates on doit posséder à une dilution de 1/15.

Les concentrations déduites des absorbances ont permis d'établir la figure II.21 montrant l'évolution des teneurs sulfates des eaux souterraines en allant de l'amont vers l'aval du bassin.

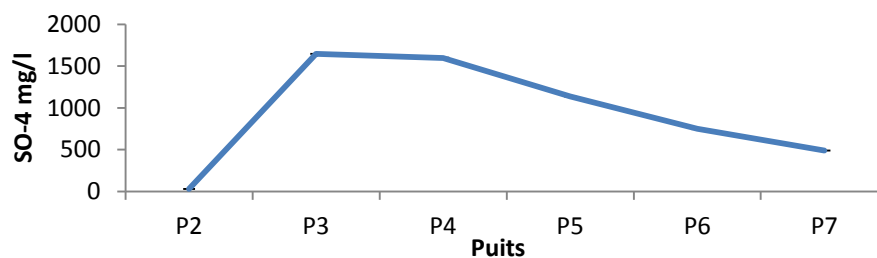


Figure II.21 : Variation des teneurs en SO₄⁻ de l'amont vers l'aval du Bassin

Ces concentrations sont également reportées spatialement sur la figure II.22. Cette dernière révèle que le puits P2 ne contient pas des sulfates puisqu'il est situé en amont de la mine de Kettara. Au contraire, les deux puits P3 et P4 situés juste en aval de la mine montrent des teneurs très élevées en sulfates et qui commencent à diminuer pour les autres puits P5, P6 et P7 en s'éloignant du site minier.

L'extrapolation des teneurs en sulfates au niveau des zones non échantillonnées a permis de confirmer que les concentrations diminuent de la mine vers Douar Benslimane.

D'après la norme marocaine homologuée d'eau de consommation on constate que seule le puits P2 qui contient des teneurs admissibles des sulfates, tandis que tous les autres puits sont hors la valeur maximale admissible (400 mg/l), de même pour la norme d'eau d'irrigation (250 mg/l).

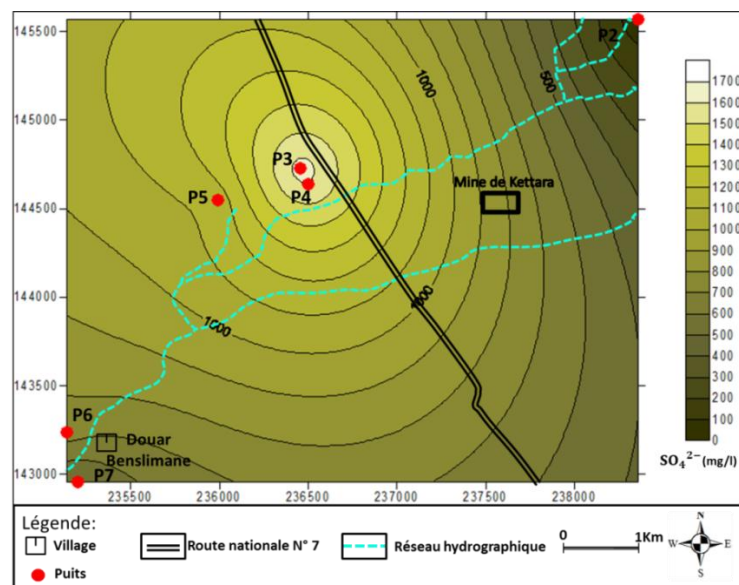


Figure II.22 : Carte de distribution des sulfates au niveau de l'aire d'étude

b. Dosage des chlorures (AFNOR T90-014) Méthode de Mohr

La neutralisation des échantillons a pour objectif de doser les chlorures par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium (cf. Annexe 1).

Les concentrations en chlorures ont été déterminées par les formules suivantes :

$$\text{Cl}^- \text{ (mg/l)} = 142 * V$$

$$\text{NaCl (mg/l)} = 234 * V$$

D'après la représentation graphique des concentrations on constate que les chlorures augmentent de l'amont vers l'aval ce qui reflète la nature des formations géologiques dont l'eau circule (Fig. II.23).

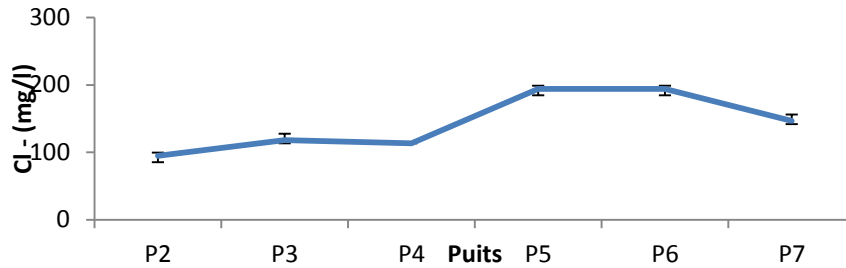


Figure II.23 : Variation des teneurs Cl⁻ de l'amont vers l'aval du bassin

De même pour les concentrations, on remarque qu'il y a une augmentation de salinité de l'amont vers l'aval.

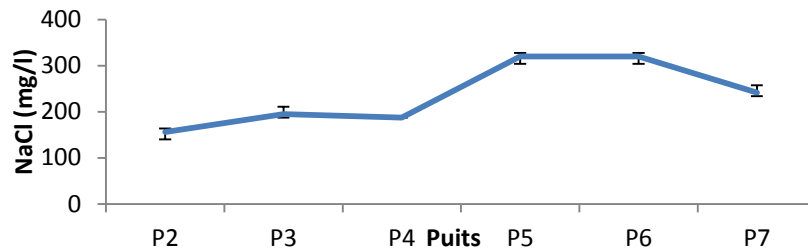


Figure II.24 : Variation des teneurs de NaCl de l'amont vers l'aval du bassin

La représentation spatiale a confirmé cette augmentation en Cl⁻ allant jusqu'à 200 mg/l au niveau de la zone NW, on remarque aussi l'existence d'une zone d'anomalie entre les puits P3-P4 et P5 où on voit une augmentation rapide sans dépassé la norme d'eau d'irrigation (350 mg/l).et de consommation (750 mg/l).

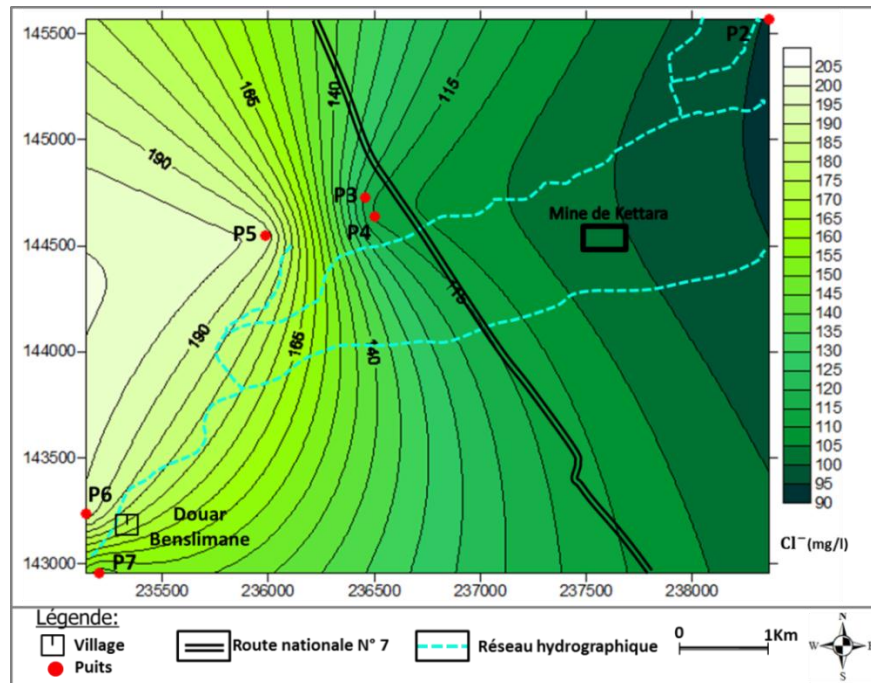


Figure II.25 : Carte de distribution des chlorures au niveau de l'aire d'étude

c. Dosage de N-NH₄ par bleu d'indophénol (AFNOR T90-015)

La mesure de la concentration en NH₄⁺ nous renseigne sur l'influence de l'activité agricole et les fortes concentrations en matière organique ce qui favorise les réactions d'ammonification (cf. Annexe 1).

D'après la figure II.26 des teneurs en ammonium, on constate que nous avons une diminution de l'amont vers l'aval. C'est dû à l'effet de la dilution, alors qu'au niveau du puits P5 on voit une légère augmentation, c'est à cause de son emplacement dans une parcelle agricole.

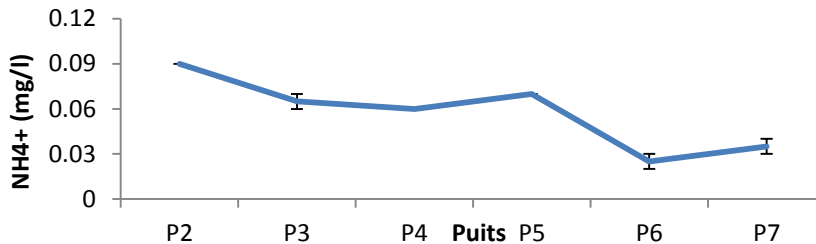


Figure II.26 : Variation de l'ammonium de l'amont vers l'aval du bassin

En comparant ces teneurs avec les valeurs des pH on remarque que les teneurs d'eau en ammonium suivent l'alcalinité de l'échantillon analysé.

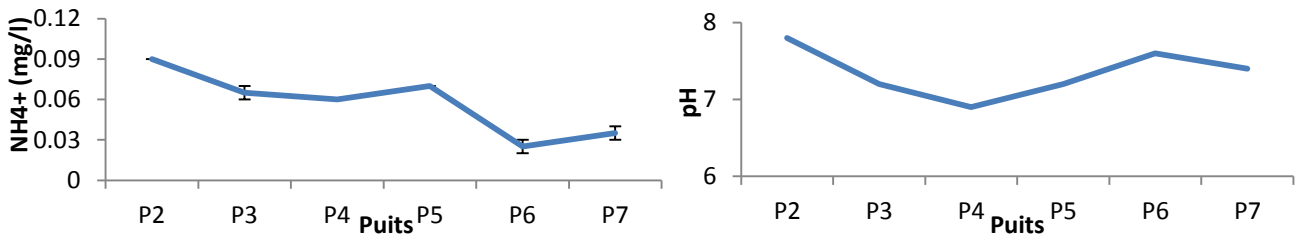


Figure II.27 : Comparaison entre les teneurs en ammonium et le pH

La représentation spatiale des concentrations montre l'attribution de l'activité agricole et l'apport en matière organique à la variation des teneurs en ammonium en restant toujours loin de la valeur maximale admissible pour les normes d'eau potable (0.5 mg/l).

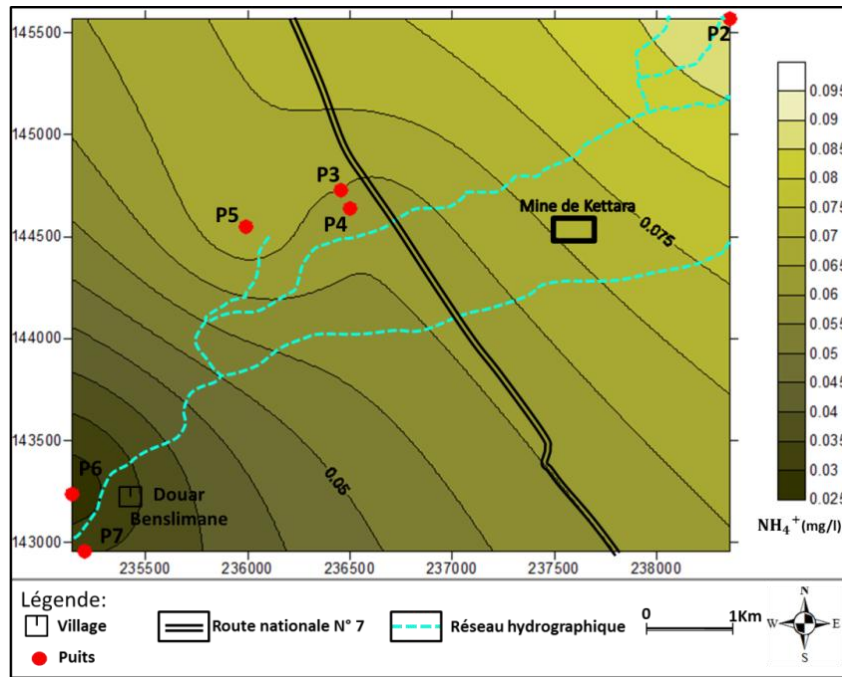


Figure II.28 : Carte de distribution des ammoniums au niveau de l'aire d'étude

d. Dosage de N-NO₂- diazotation (AFNOR T90-023) :

Dans les milieux d'agriculture intensive on rencontre des quantités importantes en nitrite en raison de l'usage des engrais et les pesticides (cf. Annexe 1).

On constate d'après la courbe (Fig. II.29) que l'ensemble des puits ne contiennent pas des fortes teneurs en nitrite et varient légèrement autour du même ordre de grandeur, à part le puits P6 où on rencontre une légère augmentation de 0.1 mg/l.

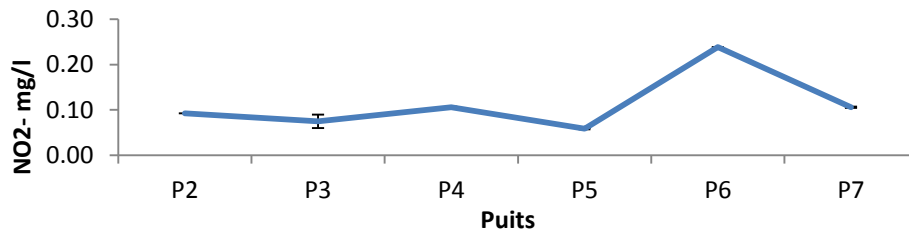


Figure II.29 : Variation du nitrite de l'amont vers l'aval

La répartition spatiale des nitrites est proportionnelle à celle de l'ammonium et du pH, parce que le nitrite est une forme instable qui cherche l'équilibre en cédant H⁺ ce qui rend le milieu alcalin et transforme NO₂⁻ en NH₄⁺.

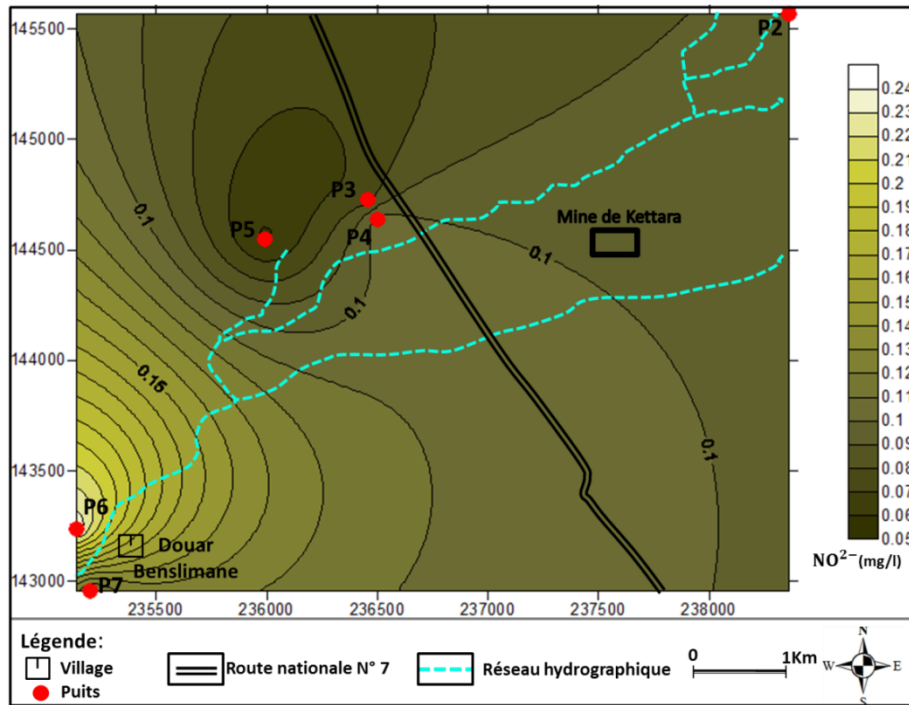


Figure II.30 : Carte de la distribution des nitrites au niveau de l'aire d'étude

e. Dosage de l'Alcalinité :

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Dans les eaux naturelles, résulte généralement à la présence des ions hydroxyde HO⁻, des ions carbonate CO₃²⁻ et des ions bicarbonate HCO₃⁻. Dont on distingue deux titres qui sont le titre alcalimétrique ou titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC).

Au cours de la manipulation d'alcalinité, on a remarqué que tous les échantillons n'ont pas eu une coloration rose après l'ajout du colorant phénolphaléine, ce qui confirme l'acidité de ses eaux par HCO₃⁻ (cf. Annexe 1).

D'après le graphe (Fig. II.31) on constate que l'ordre de variation est d'une vingtaine de mg/l dont l'origine et la dilution par les apports d'eau des effluents circulant dans les formations schisteuses de nature basique.

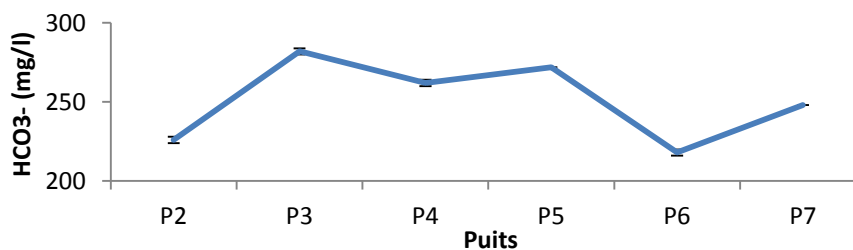


Figure II.31 : Variation des bicarbonates de l'amont vers l'aval

D'après la répartition spatiale (Fig. II.32) on remarque une augmentation au niveau de la partie méridionale du secteur d'étude, cette anomalie peut être expliquée par

l'action des effluents venant de la mine abandonnée ce qui acidifier d'avantage les eaux souterraines.

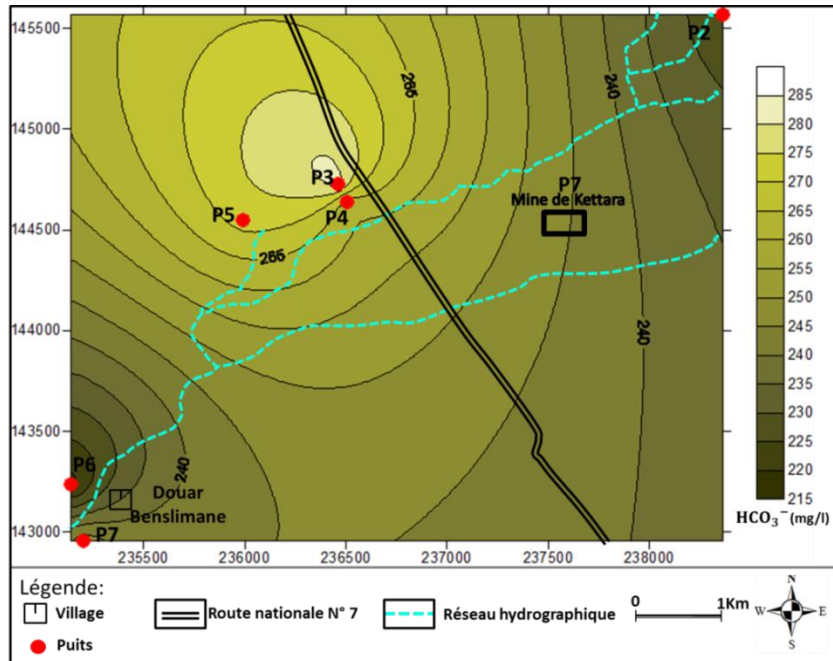


Figure II.32 : Carte de la distribution des bicarbonates au niveau de l'aire d'étude

f. Dosage de la dureté totale par complexométrie :

C'est un indicateur de la minéralisation de l'eau, correspond à la somme de la dureté permanente et temporaire. Elle est appelée dureté calcique et magnésienne exprimant la concentration en CaCO_3 en mg/l.

Nous avons une forte variation de la dureté d'après la courbe ci-dessous (Fig. II.33), où on constate que les puits P3 et P4 contiennent des fortes concentrations en CaCO_3 (Fig. II.34) c'est expliqué par l'existence des schistes calcaires, ce qui favorise l'enrichissement des eaux infiltrées suite à l'échange avec les faciès calcaires. Ces eaux sont considérer comme des eaux dures puisque leurs dureté dépasse 75 mg/L de CaCO_3 (c'est-à-dire 7,5 ° de TH calcique).

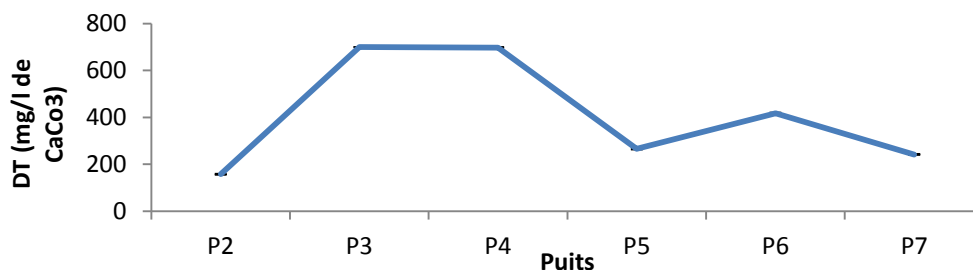


Figure II.33 : Variation de la dureté totale de l'amont en aval

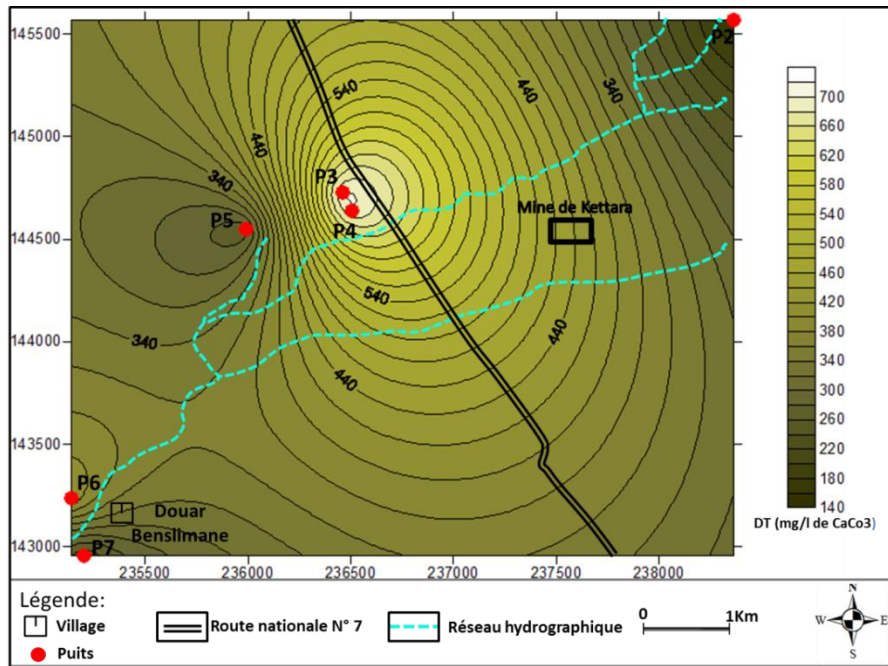


Figure II.34 : Carte de la distribution de la dureté totale au niveau de l'aire d'étude

g. Caractérisation de la nature des faciès par l'hydrochimie des eaux :

On a essayé de déterminer la nature des faciès dont les eaux d'infiltration circulent, pour cette fin on a reporté les résultats des analyses sur le diagramme de Piper à l'aide du logiciel **Diagrammes**, l'information a été retiré au moyen de l'option du diagramme de Piper.

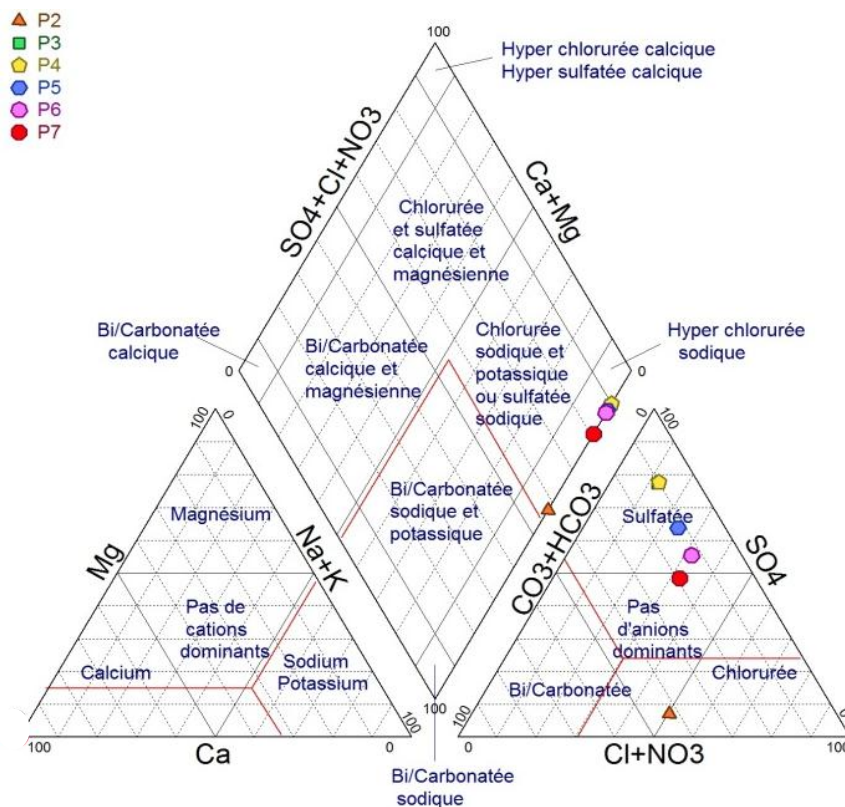


Figure II.35 : Répartition des puits sur le diagramme de piper suivant la nature des faciès

D'après le diagramme de Piper (Fig. II.35), on constate que nous avons deux types de faciès qui sont :

- Faciès Chloruré sodique et potassique des eaux circulant au niveau des altérites;
- Faciès Sulfaté sodique des eaux de ruissellement infiltrées.

Les deux propositions des faciès données par le logiciel Diagramme, sont acceptées puisque la nature des formations géologiques existantes au niveau des Jebilets Centrales est enrichit par les teneurs en sulfates et en chlorure. Donc les eaux souterraines ont un temps de circulation faible ce qui leur permet l'échange avec les faciès rencontrés.

II.3.2.3- conclusion

D'après les analyses et les résultats qualitatifs obtenus, on remarque que les eaux souterraines dans les puits du Douar Benslimane qui sont aux voisinages de la mine abandonnée Kettara ont des teneurs en sulfates et en chlorures dépassant la norme marocaine des eaux potable (respectivement 400 mg/l et 750 mg/l) et des eaux d'irrigation (respectivement 250 mg/l et 350 mg/l), et dont la source de pollution est le drainage minier acide et la minéralisation acquises de l'amont vers l'aval suite au contact des schistes.

Cette pollution aura plusieurs impacts négatifs néfastes sur la santé humaine, l'agriculture, etc. La fragilité de cet état, longtemps considérée comme problème secondaire devant d'autres secteurs, doit occuper une place primordiale parmi les activités de protection de l'environnement et la réservation des ressources en eau, et exiger une intervention des autorités concernées.

Dans ce sens, il convient de réduire l'extension et la gravité des impacts sur les eaux de surface et souterraines, par des méthodes de restauration efficaces et économiques.

Une autre solution peut être appliquée, c'est la stabilisation des rejets miniers de Kettara par les stériles riches en calcaire issus de l'extraction des phosphates.

3EME PARTIE : ETUDE GÉOPHYSIQUE

III. ETUDE GEOPHYSIQUE

III.1- Méthode de prospections utilisées

III.1.1- Méthode gravimétrique

III.1.1.1- Principe général

La loi de gravitation universelle de Newton stipule que toute masse se trouvant autour de la Terre est soumise à une accélération g , dite accélération gravitationnelle qui définit le champ gravitationnel terrestre. Si la Terre était homogène, parfaitement ronde, isolée dans l'espace et immobile, la pesanteur g aurait partout la même valeur. Or, les mesures du champ de pesanteur à la surface de la Terre montrent que la pesanteur varie d'un point à l'autre. Les causes de ces variations sont de deux types. Certaines sont d'origine *non géologiques* tandis que d'autres sont liées à la *géologie*. C'est ce deuxième type de variations qu'on cherche à mettre en évidence en prospection gravimétrique afin d'en déduire une cartographie des contrastes de densité des roches constituant le sous-sol (Fig. III.36).

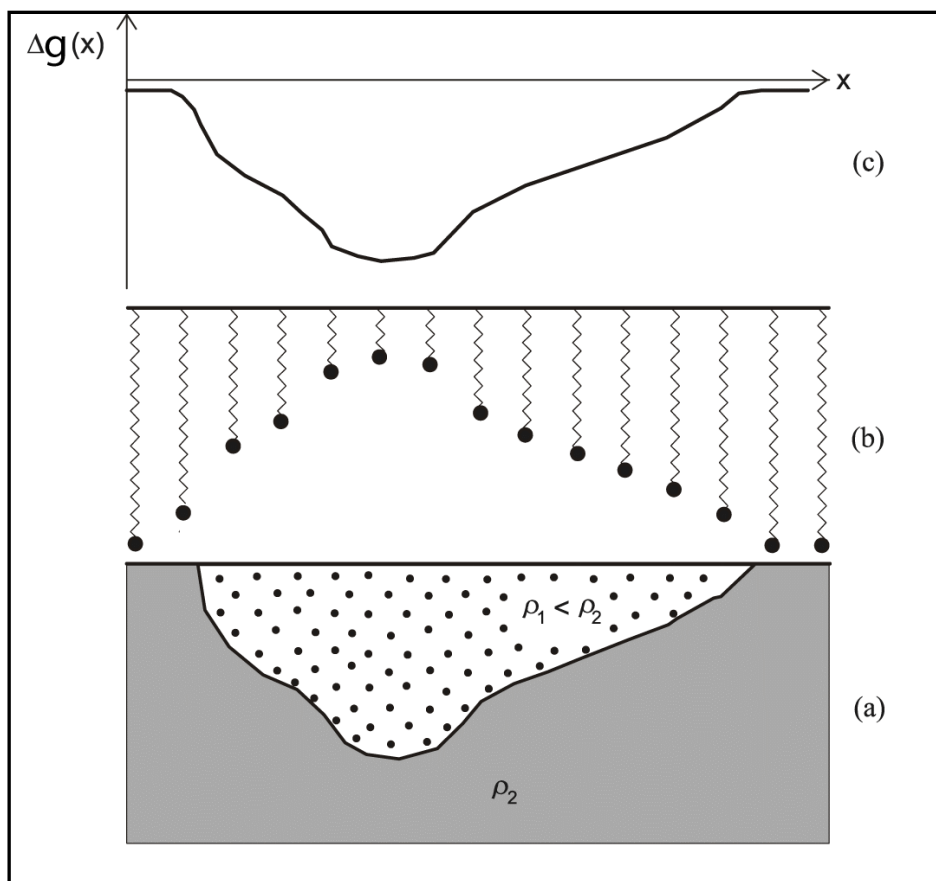


Figure III.36 : Principe des mesures gravimétriques. a) Modèle géologique montrant une structure de densité ρ_1 encaissée dans un matériel de densité plus élevée ρ_2 . b) L'hétérogénéité de densité engendre des variations latérales de l'attraction de pesanteur qui se traduit par une anomalie gravimétrique (c). (Klaus Knödel et al. 2007).

Les variations non géologiques de la gravité sont liées à plusieurs causes. On les élimine grâce à une série de corrections qu'on applique aux mesures brutes.

- a. Correction de la dérive instrumentale: Compense les variations temporelles des lectures, elle permet d'éliminer l'effet de la dérive résultant de la fatigue de l'ensemble des composantes du gravimètre.
- b. Correction de marée: L'objectif de cette correction est d'éliminer les variations temporelles dues au déplacement de la terre par rapport au soleil et à la lune qui engendrent une variation de g de forme globale périodique.
- c. Correction d'air libre ou de Faye (δg_F): Elle consiste à corriger les mesures gravimétriques de l'effet de la différence d'élévation (Δz) en mètre entre la station et la surface de référence. Son objectif est donc de ramener toutes les mesures à une même altitude. Elle est obtenue à l'aide de l'expression suivante :

$$\delta g_F = 0.3086 * \Delta z$$

- d. Correction de Bouguer (δg_B) : Si ρ est la densité moyenne de la couche comprise entre la station de mesure et la surface de référence, la valeur de g devra être corrigée pour éliminer l'effet de cette couche qu'on considère comme infinie. C'est ce qu'on appelle correction de tranche plate ou simplement de plateau. La correction à apporter est :

$$\delta g_B = -0.042\rho * \Delta z$$

- e. Correction de latitude : La valeur de g varie en fonction de la latitude pour deux raisons :
 - le rayon de la Terre diminue de l'équateur vers les pôles (la Terre est aplatie aux pôles).
 - la force centrifuge due à la rotation de la Terre diminue quand on s'approche de son axe de rotation en allant de l'équateur vers les pôles. La correction de latitude tente d'éliminer cette variation non géologique.
- f. Correction topographique (δg_T) : Elle tient compte du déficit ou du surplus de masse autour de la station de mesure qui a un effet sur la mesure au niveau de la station. Pour faciliter l'élimination de cet effet indésirable on subdivise la masse en prismes dont on calcule le volume et l'effet gravimétrique. Pour se faire, on se sert d'abaques et de tableaux empiriques tels que celui de Hammer.

Après la correction des données brutes, les valeurs deviennent comparables entre elles et on peut alors calculer ce qu'on appelle l'Anomalie de Bouguer ($g_{Bouguer}$) qui représente la différence entre la gravité observée g_{obs} et la gravité théorique g_{th} incluant la somme des corrections.

$$g_{Bouguer} = g_{obs} - g_{th} + \delta g_F - \delta g_B + \delta g_T$$

III.1.1.2- Traitement des données gravimétrique (Analyse des contacts)

Afin de mieux exploiter ces données et de faire ressortir davantage d'informations que ce qu'on peut tirer de l'examen de la carte résiduelle, on peut faire appel à la technique d'analyse des contacts. Celle-ci consiste à appliquer aux données gravimétriques une procédure de traitements mathématiques combinant les calculs du gradient horizontal et du prolongement vers le haut. L'intérêt de ce type de transformation des cartes gravimétriques a été évoqué depuis longtemps (Gérard et Griveau 1972). Le succès de l'application de ces traitements a été démontré par de nombreuses études (Everaerts & Mansy, 2001 ; Gérard et Griveau 1972, Kattach et al. 2004).

Le principe de cette technique d'analyse consiste à calculer le gradient horizontal de la carte de l'anomalie résiduelle. Ce traitement est très utile pour la localisation des contacts géologiques, du fait que la limite entre deux blocs de densités différentes correspond au maxima de ce gradient (Blakely et Simpson 1986 ; Chennouf et al. 2004 ; Cordell et Grauch 1982). En effet, au-dessus d'un contact vertical entre des roches de densités différentes, le champ gravimétrique se manifeste par un changement de niveau marqué par le passage des valeurs faibles au-dessus des roches de faible densité, vers des valeurs plus élevées à l'aplomb des roches de forte densité. Le point d'inflexion marquant le passage entre les deux zones se situe à la verticale du contact entre les deux types de roches. Cette caractéristique des anomalies gravimétriques peut être utilisée pour localiser les changements abrupts de densité. Les maxima locaux des gradients horizontaux constituent des rides étroites au-dessus des contacts géologiques marqués par des contrastes de densité (Fig. III.37).

Par ailleurs, afin d'analyser les pendages des contacts et des structures mis en évidence, on procède au calcul du prolongement vers le haut de la carte de l'anomalie résiduelle à plusieurs altitudes. Ensuite, on calcule le gradient horizontal de chaque niveau de prolongement et on détermine ses maxima locaux. La migration de ces maxima, lorsque l'altitude du prolongement augmente, indique le sens du pendage. Pour une structure verticale, l'ensemble des maxima se superposent (Archibald et al. 1999).

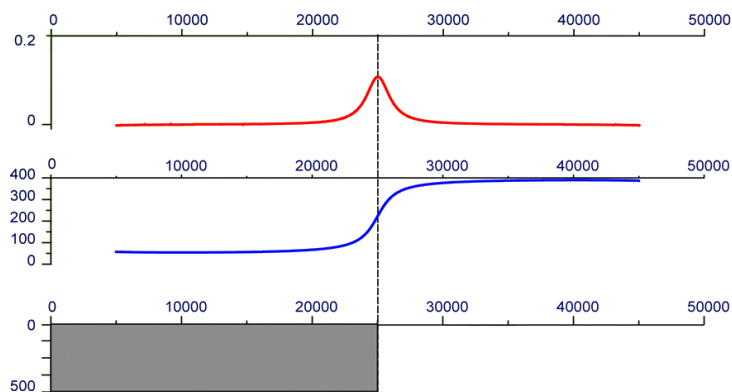


Figure III.37 : Représentation d'une anomalie gravimétrique provoquée par un contact vertical et de son gradient horizontal

III.1.2- Méthode de prospection magnétique

III.1.3.1- Principe général

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

$$k = \frac{\vec{I}}{\vec{H}} \quad \text{Avec } k \text{ une grandeur sans dimension}$$

Ce champ magnétique terrestre est représenté par un vecteur \vec{F} , 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 \vec{F} lui-même et l'horizontale) (Fig. III.38).

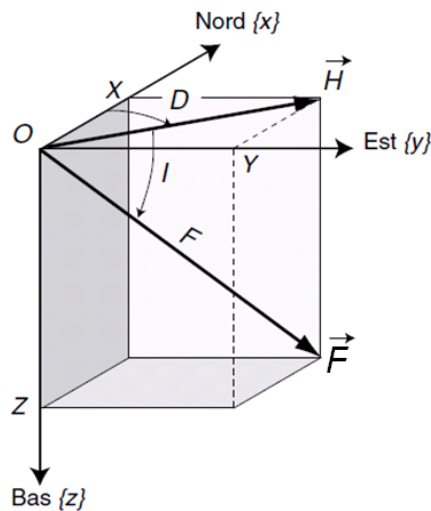


Figure III.38 : Représentation schématique du vecteur champ magnétique

Le champ magnétique de la terre est principalement de type dipolaire (Fig. III.39). De ce fait, son inclinaison varie constamment depuis l'équateur où elle est nulle jusqu'aux pôles où elle vaut 90° en valeur absolue. Ceci a de grandes conséquences sur l'allure des anomalies magnétiques engendrées par une aimantation induite pure (Fig. III.40). Le champ magnétique terrestre F a une intensité maximale d'environ 60000 nT aux pôles magnétiques et minimale de l'ordre de 30000 nT à l'équateur magnétique. Au Maroc, la valeur de F avoisine les 40 000 nT.

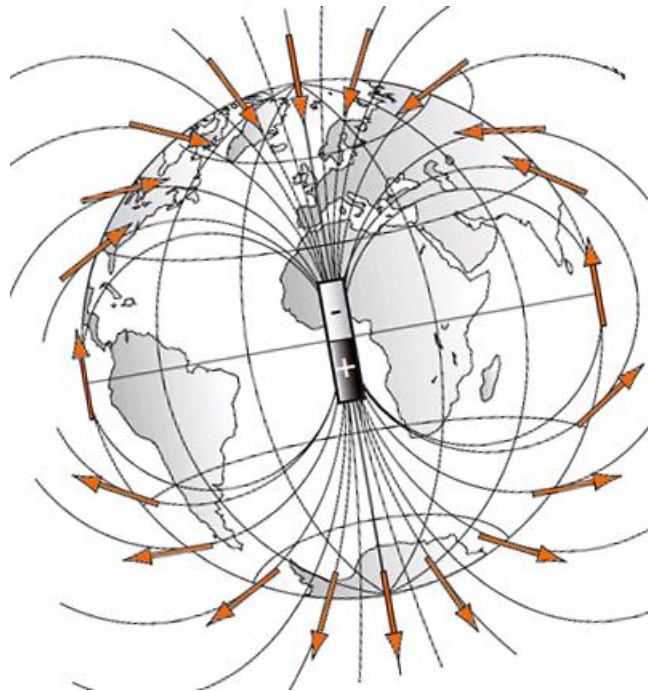


Figure III.39 : Nature dipolaire du champ magnétique terrestre

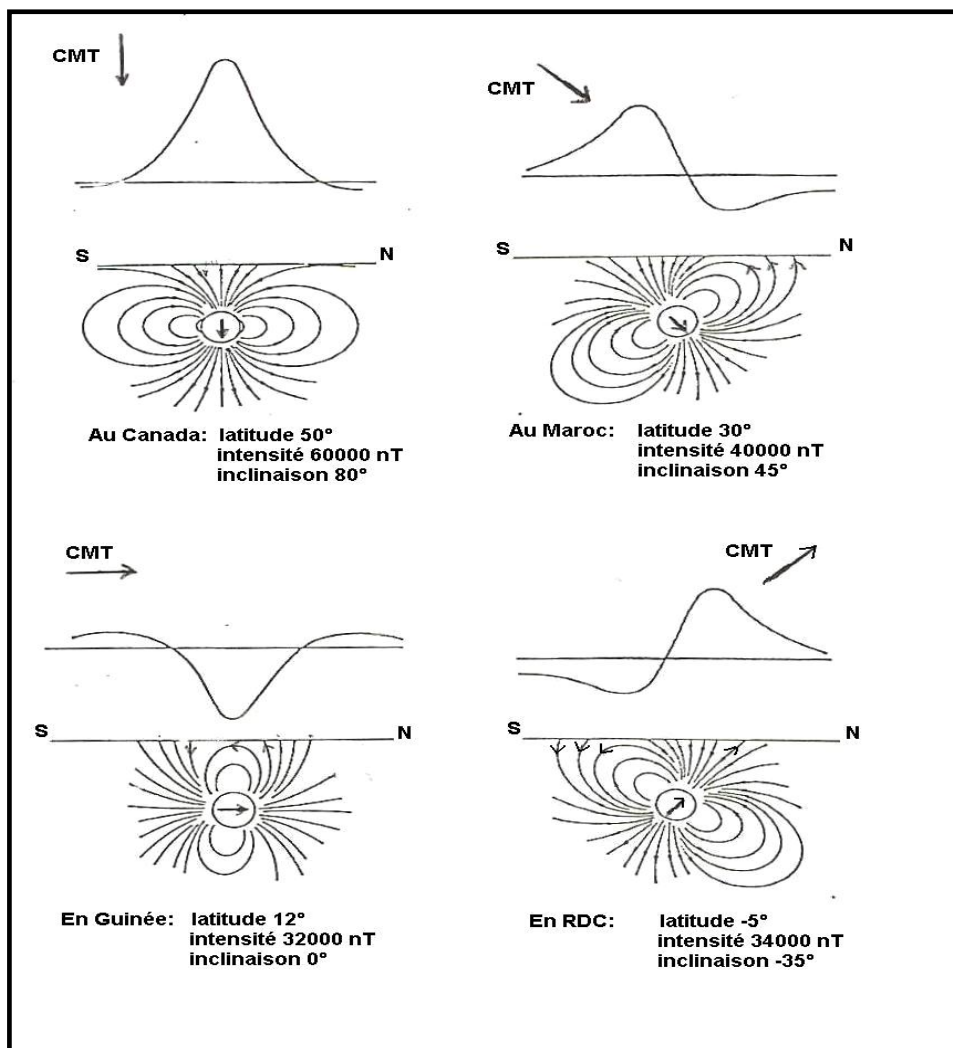


Figure III.40 : Variation de la forme des anomalies magnétiques en fonction de l'inclinaison du vecteur champ magnétique terrestre

Parfois, le champ magnétique de la Terre se trouve amplifié par la présence de concentrations variables des minéraux magnétiques. La prospection magnétique a pour but de détecter ces concentrations à partir de la mesure des anomalies magnétiques qui leur sont associées. La première étape consiste à effectuer des mesures qui permettent l'acquisition de données qui seront ensuite corrigées, traitées et mises en plan. Les cartes obtenues mettent en relief les anomalies magnétiques dont l'interprétation peut être poussée jusqu'à la détermination des dimensions et de la profondeur des corps magnétiques responsables des anomalies.

III.1.3.2- Mise en œuvre sur le terrain

La mise en œuvre d'un levé magnétométrique s'effectue à l'aide de deux magnétomètres. Le premier qui sert de station de base, est maintenu fixe en un même point durant toute la période du levé. Il permet de mesurer les variations temporelles du champ magnétique terrestre à intervalles de temps réguliers. Le second magnétomètre est utilisé pour mesurer les variations du champ magnétique terrestre le long des lignes du levé. Les deux magnétomètres doivent être synchronisés et l'opérateur doit être dépourvu de tout objet métallique susceptible d'ajouter du bruit aux mesures (Fig. III.41).

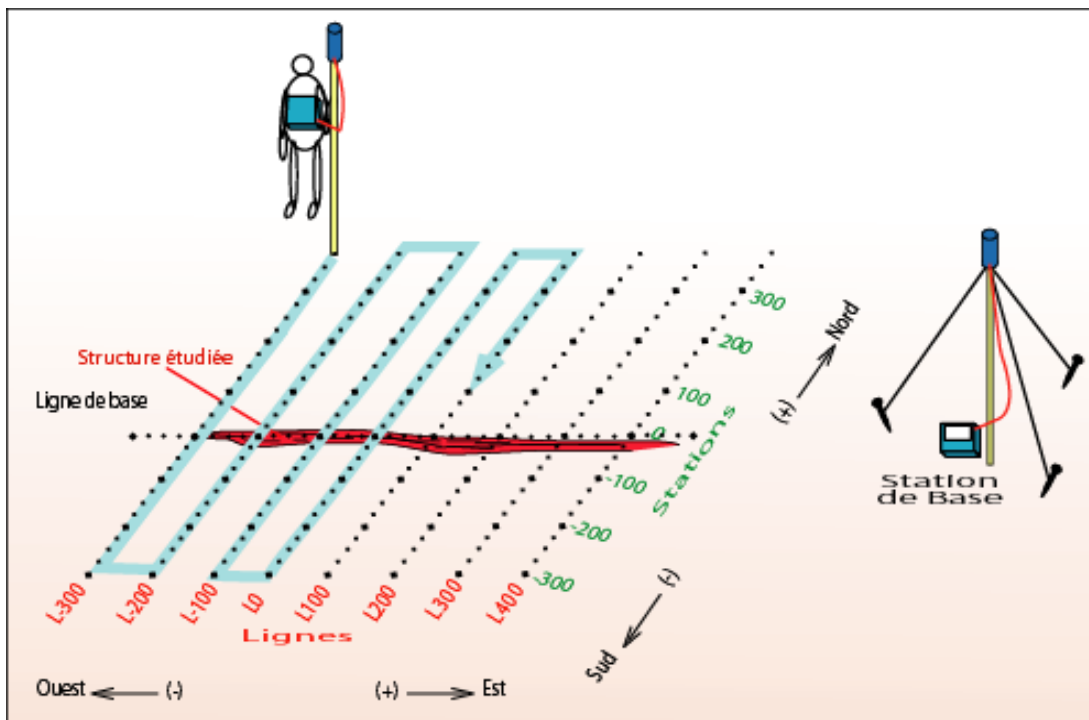


Figure III.41: Mise en œuvre d'un levé magnétique

III.1.3.3- Correction et traitement des données

➤ Correction diurne.

Au cours des levés magnétiques, l'intensité du champ magnétique subit des variations journalières. Il est donc nécessaire de soustraire ces variations indésirables dans le temps de mesures effectuées pour ne laisser que les variations spatiales qui ne reflètent que les variations de la teneur du sous-sol en substance magnétique. Cette correction se fait à l'aide de la formule suivante :

$$C_{T\text{corrigé}} = C_{T\text{mobile}} - C_{T\text{base}} + \text{Référence}$$

$C_{T\text{corrigé}}$: champ total corrigé des variations diurnes ;

$C_{T\text{mobile}}$: champ mesuré par le magnétomètre mobile à l'instant t ;

$C_{T\text{base}}$: champ mesuré par le magnétomètre de base au même instant ;

Référence : Valeur moyenne du champ magnétique terrestre dans le secteur étudié.

➤ Réduction au pôle

La réduction au pôle consiste à appliquer aux données magnétiques corrigées des variations diurnes, un opérateur mathématique permettant d'éliminer les distorsions induites par l'inclinaison du vecteur champ magnétique terrestre. Les données sont transformées comme si elles étaient acquises au niveau des pôles magnétiques où le vecteur du champ géomagnétique est vertical. Ainsi, une anomalie bipolaire constituée d'un positif et d'un négatif provoquée par un corps vertical à la latitude similaire à celle du lieu d'étude, se transformera après réduction au pôle en une anomalie unipolaire formée uniquement d'un positif centré sur ce corps (Fig. III.42), ce qui facilite de beaucoup l'interprétation.

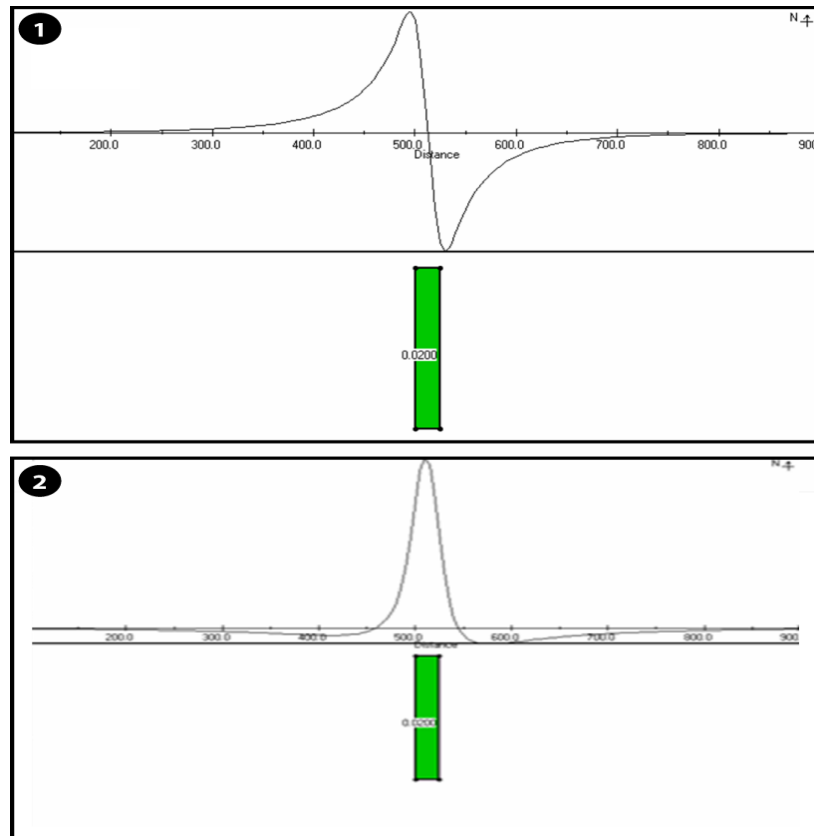


Figure III.42: Illustration schématique de la réduction au pôle. 1) Anomalie magnétique provoquée par un dyke vertical à une latitude moyenne ($I=45^\circ$). 2) Résultat de la réduction au pôle de la même anomalie.

III.1.3- Méthode de tomographie électrique

La technique d'imagerie (ou tomographie) électrique est une méthode d'investigation non destructive permettant d'obtenir une image du sous-sol dans le but d'identifier sa structure interne comme des hétérogénéités géologiques, des failles, la profondeur et l'épaisseur d'une couche économiquement exploitable, etc. Cette technique est apparue à la fin des années 1980, elle dérive des méthodes classiques du sondage et du traîné électrique sauf qu'elle utilise un dispositif multi-électrodes qui offre la possibilité d'acquérir un grand nombre de mesures correspondant aux différentes combinaisons de quatre électrodes (Edwards, 1977). On peut ainsi réaliser une imagerie continue 2D ou 3D des variations de résistivité du sous-sol (Dahlin, 2001). Cela permet d'obtenir une image de la résistivité du sous-sol en particulier dans les régions à géologie complexe caractérisée par des variations latérales qui rendent l'utilisation des sondages électriques inadéquate.

Grâce au développement récent d'outils performants d'acquisition automatisée (Dahlin, 1993) et d'inversion mathématique (Loke et Barker, 1996), cette technique est devenue relativement facile à mettre en œuvre et largement utilisée.

III.1.3.1- Principe général

La prospection électrique consiste à injecter dans le sol un courant électrique d'intensité (I) entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel (ΔV) induite entre une autre paire d'électrodes M et N (Fig. III.43). A partir des valeurs de (I) et de (ΔV), on peut calculer les résistivités apparentes du sous-sol. On peut également en déterminer les résistivités intrinsèques à l'aide de l'application de méthode d'inversions appropriées.

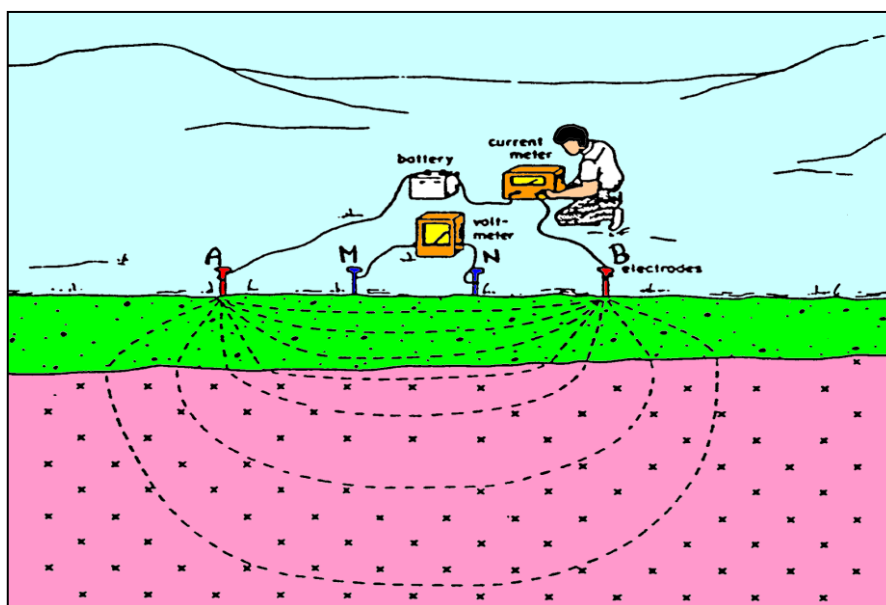


Figure III.43: Illustration du principe général de la prospection électrique

Considérons un dispositif quadripôle quelconque constitués de deux pôles de courant (A, B) et de deux pôles de potentiels (M, N) (Fig. III.44). Le calcul de la résistivité apparente du sous-sol déterminée à partir de ce dispositif se base sur la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K * \frac{\Delta V}{I}$$

Avec

I : Courant injecté aux bornes A et B.

ΔV : Différence de potentiel mesurée entre les bornes M et N.

K : Facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure tel que

$$K = 2\pi * \left[\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}} \right]$$

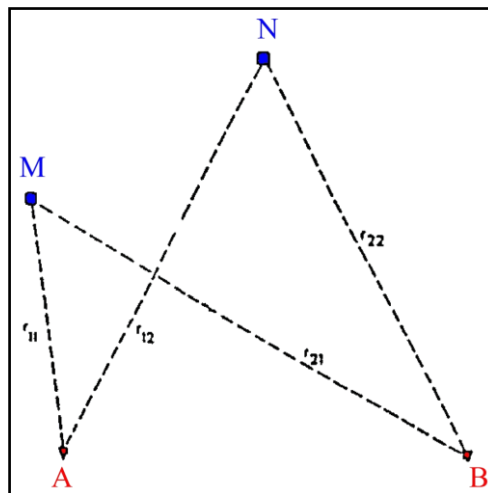


Figure III.44 : Disposition générale des électrodes de courant A et B et de potentiel M et N.

Les failles et les fractures correspondent à des zones de faiblesse qui sont généralement remplies d'eaux interstitielles souvent chargées d'ions en solutions qui facilitent la circulation des courants électriques. Ainsi, dans un environnement relativement résistif, les failles se présentent sous forme de zones conductrices qu'on peut facilement mettre en évidence par des levés de résistivité électrique.

Utilisée en mode « Sondage électrique » cette technique consiste à aligner quatre électrodes (A M N et B) selon le dispositif Schlumberger où les électrodes de courant (A et B) et de potentiel (M et N) sont placées de façon symétrique par rapport au point central qui correspond à la position du sondage électrique vertical. La distance MN est inférieure à AB (généralement $MN < AB/5$). L'augmentation progressive de la taille de ce dispositif permet d'investiguer des profondeurs de plus en plus grandes et d'obtenir

après interprétation une courbe de variation verticale de la résistivité à l'aplomb du point central.

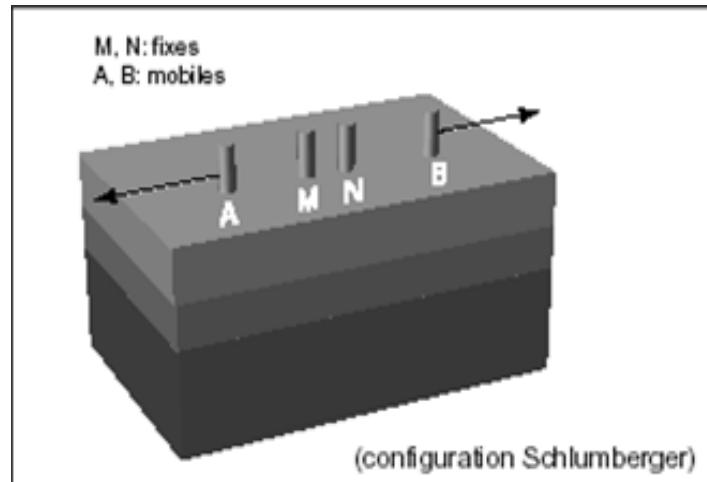


Figure III.45 : Dispositif Schlumberger

III.1.3.2- Mise en œuvre d'un levé de tomographie électrique

En imagerie électrique, on utilise un dispositif multi-électrodes qui correspond à l'association d'une multitude de quadripôles. Ce dispositif offre la possibilité d'acquérir un grand nombre de mesures, par la combinaison de différents dipôles de courant et de potentiel. Ceci permet d'avoir une image de la résistivité (ou de la chargeabilité) apparente du sous-sol en particulier dans les régions à géologie complexe caractérisée par des variations latérales qui rendent l'utilisation des sondages électriques inadéquate. La tomographie électrique consiste à réaliser simultanément des profils multiples de résistivité correspondant à des espacements d'électrodes de plus en plus grands. Plusieurs configurations d'électrodes se prêtent à ce type de mesures. Dans le cas d'une configuration classique de type Wenner, on procède à une augmentation progressive du nombre (n) de séparation unitaire (a) entre les électrodes (Fig. III.45 et III.46).

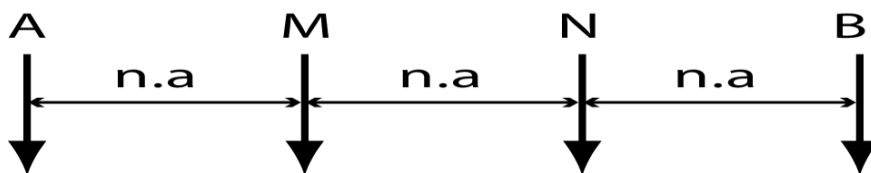


Figure III.46 : Schéma d'un dispositif Wenner

Les valeurs de la résistivité (ou de la chargeabilité) sont reportées au milieu du dispositif à une pseudo-profondeur proportionnelle à n . Ceci conduit à l'établissement d'une pseudosection.

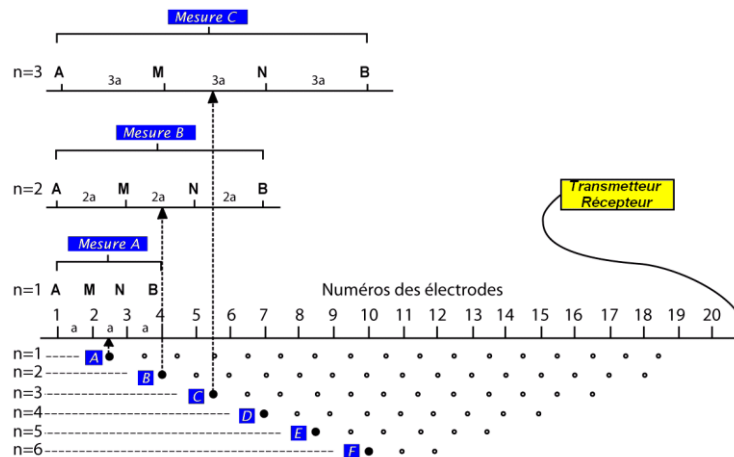


Figure III.47 : Etablissement d'une pseudosection dans le cas d'un dispositif multi-électrodes mis en œuvre en configuration Wenner.

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de la résistivité (ou la chargeabilité) réelle du sous-sol en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudosection. Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudosection mesurée et une pseudosection recalculée à partir d'un modèle. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Dans le cas de la présente étude, l'inversion a été effectuée à l'aide du logiciel RES2DINV (Loke et Barker, 1996).

III.1.4- Méthode de résonance magnétique des protons

La Résonance Magnétique des Protons est une nouvelle méthode géophysique qui permet de détecter directement l'eau souterraine et de fournir des informations de certains paramètres hydrogéologiques. L'application de cette méthode est fondée sur une théorie bien établie dont les premières idées en la matière datent d'une trentaine d'années (Varian, 1962 ; Barringer et White, 1968). Cependant, ce n'est que dans la dernière décennie qu'a été défini un concept amélioré débouchant sur une méthode opérationnelle (Semenov et al., 1988). Actuellement, cette technique fait l'objet d'une utilisation régulière à travers le monde.

Le principe de base de la méthode de résonance magnétique des protons repose sur de la mesure d'un champ magnétique créé par les protons des molécules d'eau après leur excitation au préalable par un courant alternatif circulant dans une boucle à une fréquence adéquate (Fig. III.48). La mise en œuvre de cette méthode se fait sous forme de sondages qui consistent à effectuer un ensemble de mesures obtenues en augmentant progressivement l'intensité du courant, ce qui permet d'augmenter la profondeur d'investigation depuis la surface jusqu'à 100 m environ pour une boucle de 100m de côté. En réalité, le paramètre modulable est le moment d'excitation (produit de l'intensité du courant par la durée d'impulsion). La grandeur mesurée est le champ magnétique de relaxation créé par les protons excités. Le paramètre physique que l'on cherche à déterminer est la teneur en eau des différentes couches du sous-sol. Les atomes d'hydrogène des molécules d'eau sont excités par des impulsions de courant alternatif à une fréquence appropriée appelé : la fréquence de Larmor, injectés à la surface du sol par le biais d'une boucle fermée. Ils produisent en retour un champ magnétique de relaxation

qui est mesuré et analysé pour divers moments d'impulsion. Les mesures RMP sont très sensibles au bruit électromagnétique (lignes de haute tension, antennes radios, pompes hydrauliques etc.) et sont perturbées par la présence de roches magnétiques. Lors de la mise en œuvre sur le terrain, on doit tenir compte de tous ces facteurs lors de la configuration des paramètres de mesure et de l'installation de la boucle de surface.

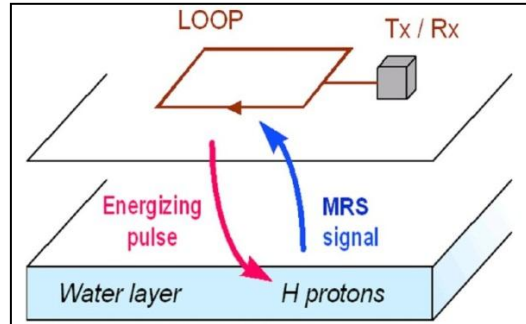


Figure III.48 : Illustration du principe d'un sondage RMN

Après chaque impulsion d'excitation, le système d'acquisition RMP enregistre plusieurs grandeurs dont chacune est liée à un paramètre hydrogéologique, il s'agit de :

- L'amplitude initiale du champ de relaxation produit par les protons qui est proportionnelle à la teneur en eau ;
- La constante du temps du retour à l'équilibre des protons (temps de décroissance) qui fournit une indication sur la taille des pores, d'où une identification possible de l'eau libre (réservoir poreux) et de l'eau liée (couche argileuse) ;
- La valeur du déphasage du champ de relaxation par rapport au courant est fonction de la résistivité.

Tableau III.5 : Grandeurs mesurées par la RMP et paramètres hydrogéologiques associés

Grandeur RMP	Symbole	Paramètre hydrogéologiques
Amplitude du signal	E_0	Teneur en eau (porosité)
Constante de temps	T_2-T1	Taille des pores - perméabilité
Phase du signal	Φ_0	Conductivité électrique
Energie de l'impulsion	q	Profondeur d'investigation

Pour mettre en œuvre un sondage RMP, on utilise un équipement comportant plusieurs éléments (Fig. III.49) :

- Une unité centrale qui permet à la fois de générer les impulsions et de mesurer des signaux issus de protons ;
- Un à deux convertisseurs selon les dimensions de la boucle ;
- 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.

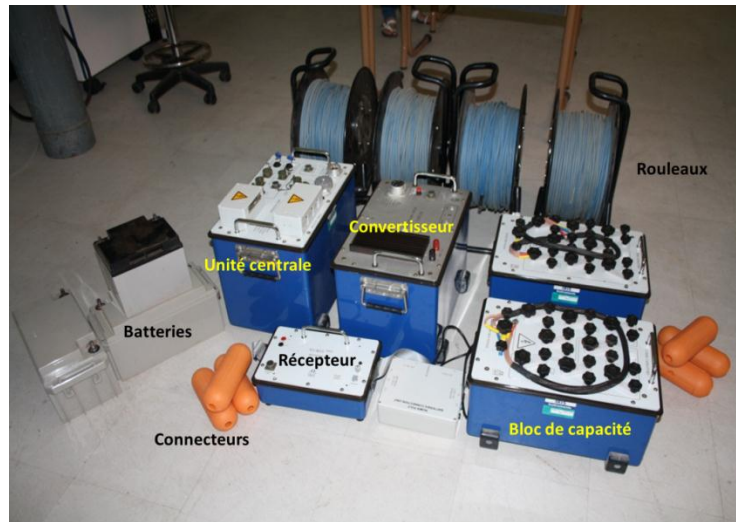


Figure III.49: Appareillage de la résonance magnétique des protons

En pratique, pour réaliser des mesures de la RMN sur le terrain, on procède d'abord à la mesure du champ magnétique terrestre à l'aide d'un magnétomètre à protons sur l'aire de la boucle qui a été choisie pour connaître la fréquence de précession des protons H (molécules d'eau) qui est généralement comprise entre 1500 et 2500 Hz en fonction de l'amplitude du champ magnétique terrestre, et le bruit ambiant qui peut atteindre 1000 nV.

Le courant d'excitation injecté dans la boucle doit atteindre 430 Ampères pendant quelques dizaines de millisecondes. Le champ magnétique de relaxation créé par les protons est mesuré dans la boucle d'émission elle-même, après coupure de courant et commutation sur un circuit de réception. Le signal est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de nV. Compte tenu de la faiblesse de son amplitude, le signal doit être accumulé pour diminuer l'influence relative du bruit électromagnétique naturel ou anthropique. (Fig. III.50)

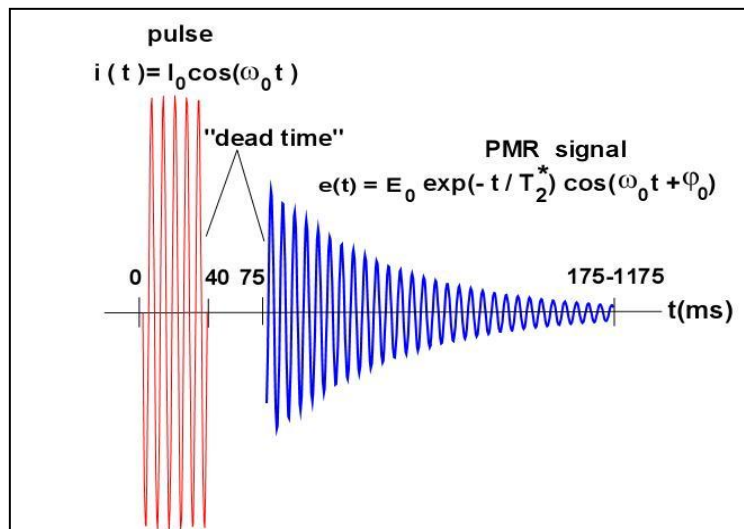


Figure III.50 : Illustration schématique du principe de la méthode RMN : l'émission d'une impulsion d'excitation (en rouge) est suivie de la réception d'un signal de relaxation (en bleu) après une courte période de temps mort.

III.2- Prospection géophysique de la région de Kettara

III.2.1- Prospection gravimétrique

Le volet gravimétrique de notre étude concerne la réinterprétation des données disponibles sur le secteur de Benslimane (Hathouti, 1990). Il s'agit d'une carte de l'anomalie de Bouguer qui a été établie suite à un levé gravimétrique totalisant 1800 points et mis en œuvre à des fins d'exploration minière. On propose de reprendre ces anciennes données en vue de les retraiter et les réinterpréter en appliquant notamment la technique d'analyse des contacts.

III.1.3.3- Analyse et interprétation des données

Nous avons commencé par représenter les données gravimétriques du secteur de Benslimane sous forme d'une carte de contours de l'anomalie de Bouguer (Fig. III.51-1). Cette carte montre que les variations locales du champ de pesanteur sont clairement affectées par un gradient régional croissant du sud-est vers le nord-ouest. Après plusieurs tentatives de détermination de ce gradient, le meilleur résultat a été obtenu en utilisant la technique d'interpolation par régression linéaire (Fig. III.51-2). Le gradient calculé est estimé à 1.06 mGal/km, sa soustraction des données gravimétriques initiales (anomalie de Bouguer) a permis d'obtenir une carte d'anomalies résiduelles (Fig. III.52).

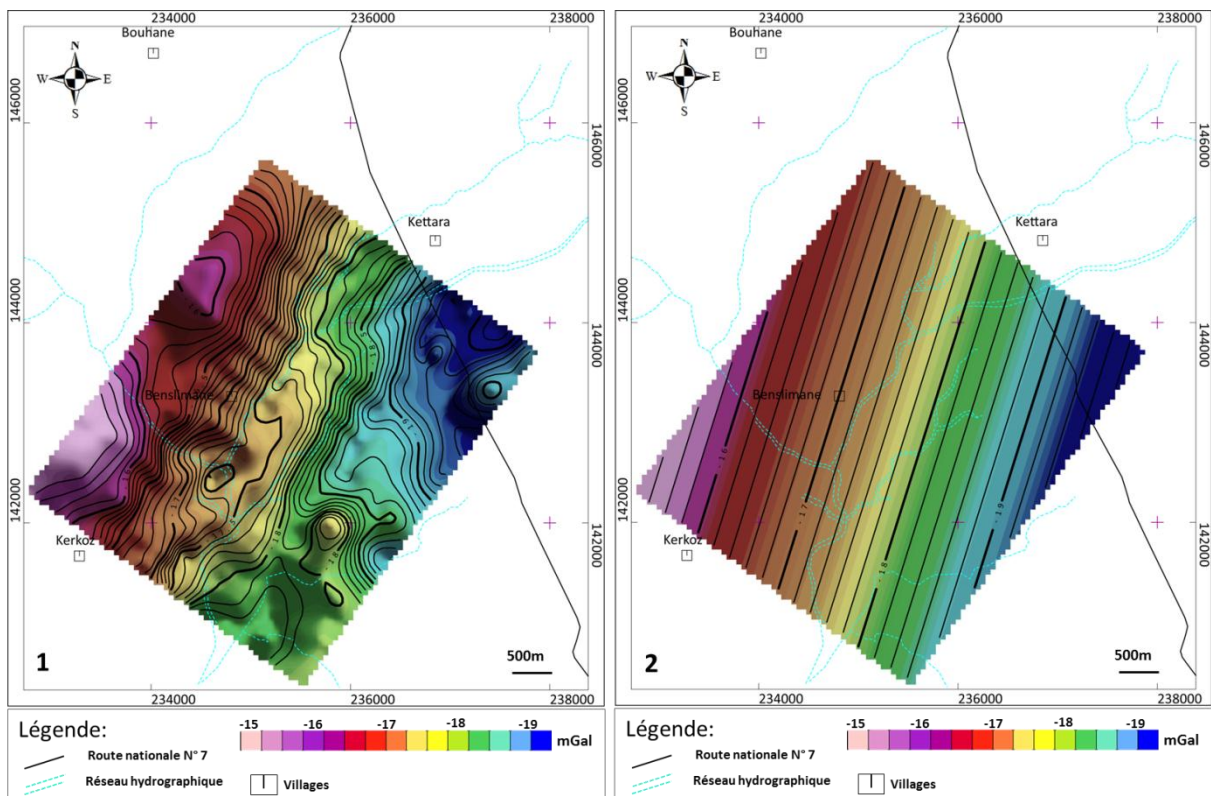


Figure III.51 : Carte de l'anomalie de Bouguer (1), Carte gravimétrique (anomalies régionales) (2) de la région de Benslimane

L'examen de la carte gravimétrique résiduelle ainsi calculée révèle l'existence de plusieurs anomalies positives et négatives qui reflètent les variations de la densité des roches en subsurface à l'échelle de la zone prospectée. Les anomalies positives dont l'axe est représenté par un trait continu rouge correspondent aux zones de plus forte densité. Elles devraient coïncider avec les affleurements de roches plus denses et/ou moins altérées. Les anomalies négatives représentées par des traits discontinus jaunes indiquent soulignent les zones de faible densité telles que celles de plus forte épaisseur de la couche altérée. L'un des faits marquant qui ressort de l'analyse de cette carte c'est l'allongement préférentiel des anomalies gravimétriques selon une direction N30° environ.

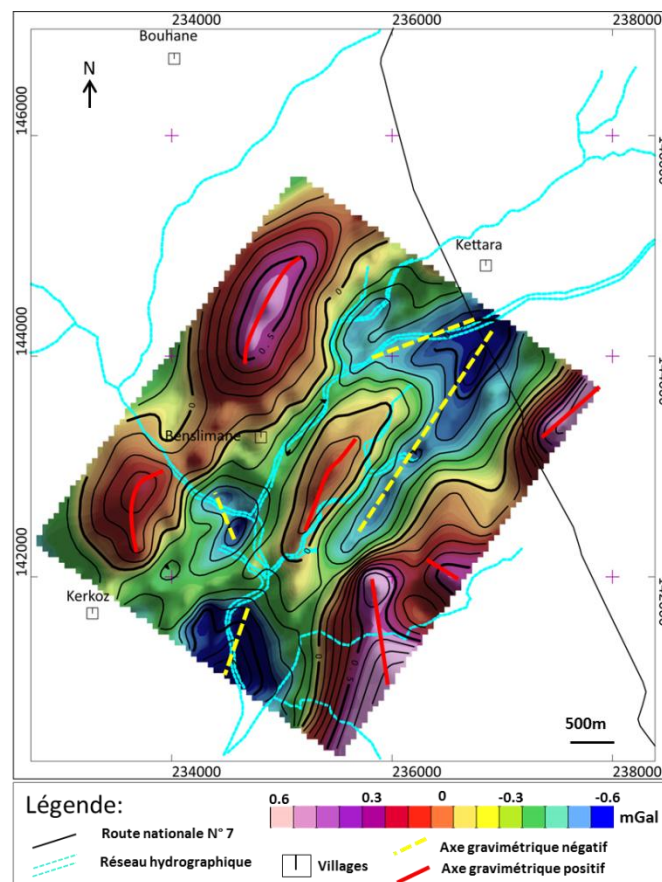


Figure III.52 : Carte gravimétrique (anomalies résiduelles) de la région de Benslimane

Pour essayer de comprendre l'origine des anomalies observées, les données gravimétriques ont été superposées à la carte géologique de la zone de Benslimane (Fig. III.53). La carte obtenue permet de constater que la direction d'allongement des anomalies est parallèle aux axes de plis qui résultent de la structuration de cette zone en synclinorium comme le montre la coupe géologique de la figure II.14. Certaines anomalies positives sont associées à des roches magmatiques basiques (gabbros) telles celles situées au Sud-Est de la carte. L'anomalie positive localisée au centre de cette carte coïncide parfaitement avec le chapeau de fer, elle pourrait être liée à l'existence d'un amas sulfuré sous ce chapeau de fer. Les autres anomalies positives situées au niveau de la limite nord-ouest de la carte peuvent être partiellement expliquées par

l'affleurement d'un dyke de gabbro associé à une faible altération des roches encaissantes de ce dyke. L'analyse conjointe des données gravimétriques et géologiques met en évidence également l'importance du réseau de faille affectant la zone d'étude et en particulier la direction N70 qui décale certaines anomalies.

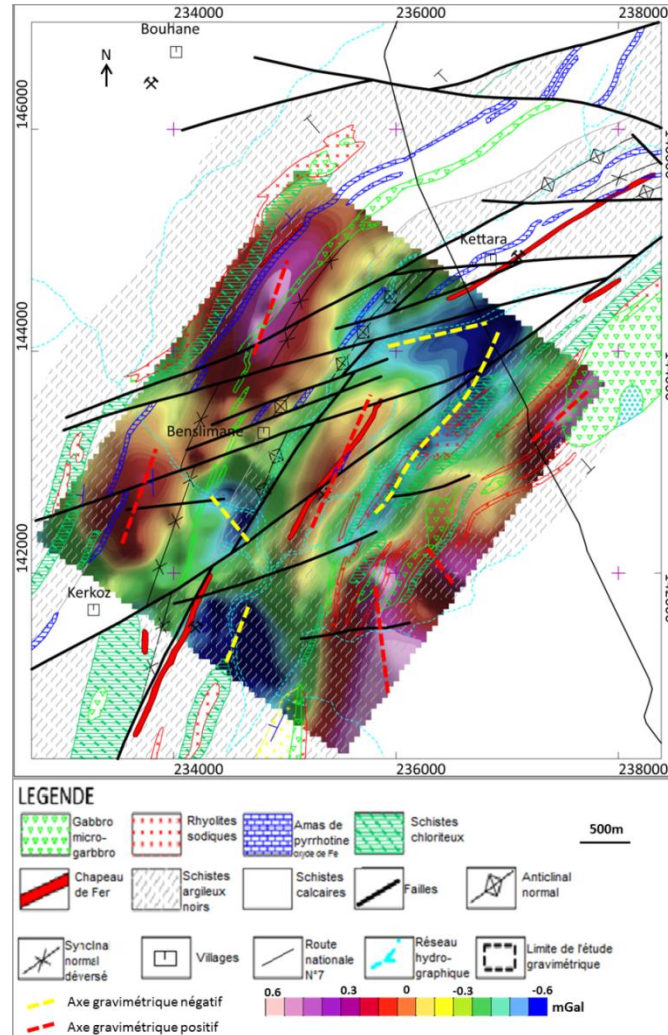


Figure III.53 : Superposition des données géologiques et des axes gravimétriques à la carte du gradient vertical des anomalies résiduelles

Les anomalies négatives, correspondant à la couleur bleue sur la carte gravimétrique résiduelle (Fig. II.52), occupent la partie centrale de la grille de levé. Cette zone est caractérisée par une topographie très peu accidentée avec de faibles variations du relief qui définissent un réseau hydrographique parfois à peine identifiable. Cette zone coïncide avec des recouvrements quaternaires qui représentent souvent les seules terres cultivées de la région. Pour expliquer les anomalies gravimétriques négatives précitées, on peut envisager un épaissement de la couche altérée du socle hercynien qui constitue le réservoir aquifère superficiel de la zone d'étude. Si ce raisonnement est vrai, les anomalies négatives définirait les premières zones potentiellement productives. Les résultats de la réinterprétation des sondages électriques verticaux mise en œuvre par Guessous (1996) permettent de constater que les trois sondages SJ13,

SJ31 et SJ39 qui se superposent aux données gravimétriques de Benslimane mettent tous en évidence une épaisseur assez importante de la zone d'altération ou de fracturation du socle hercynien (Fig. III.54).

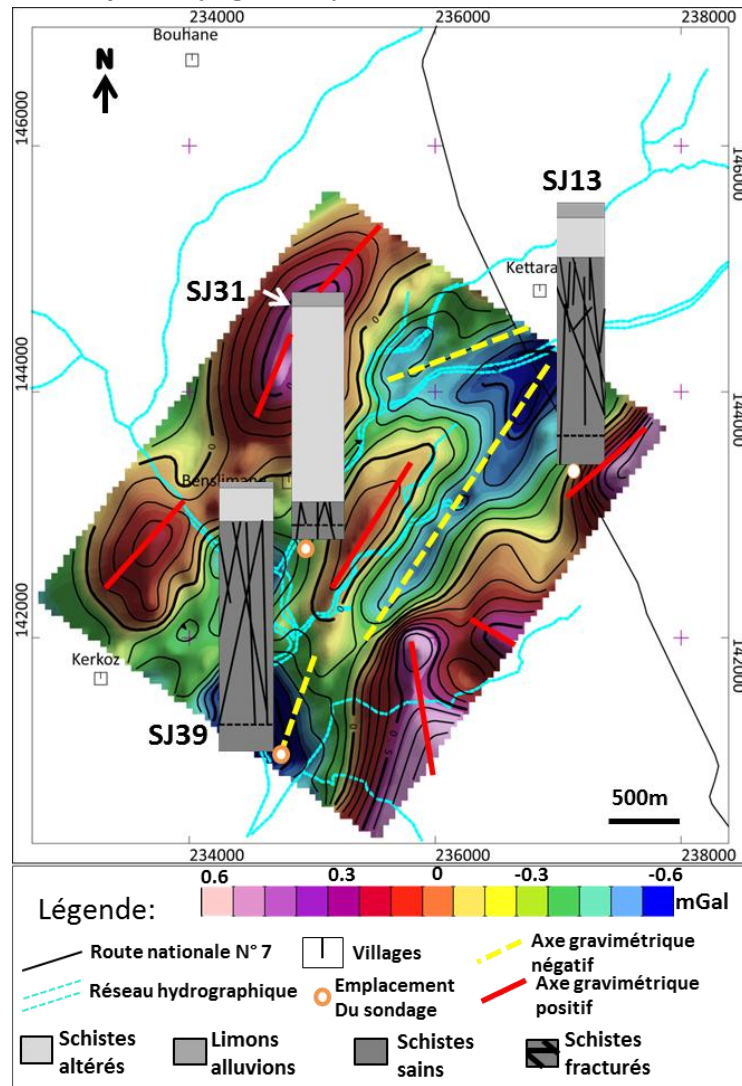


Figure III.54 : Superposition des logs géoélectriques des sondages réalisés dans le secteur Benslimane (données Guessous, 1996) à la carte des anomalies résiduelles (données Hathouti, 1990)

Par ailleurs, la carte d'anomalies résiduelles montre plusieurs zones de gradients gravimétriques qui peuvent correspondre à des contacts ou des discontinuités (failles, flexures, etc.). Pour étudier ces zones particulièrement intéressantes pour la détermination du degré de fracturation du socle hercynien de secteur de Benslimane, nous avons appliqué la méthode d'analyse des contacts décrite précédemment. Rappelons que cette méthode est basée sur l'utilisation conjointe des techniques du gradient horizontal et du prolongement vers le haut. Les maxima locaux du gradient horizontal déterminés à partir de la carte résiduelle et de ses prolongements vers le haut à différentes altitudes (100, 250 et 500) permettent de déterminer les différents contacts. En outre, l'analyse de la migration des maxima locaux du gradient vertical déterminés sur les cartes prolongées vers le haut, permet de préciser le sens des pendages des contacts mis en évidence (Fig. III.56).

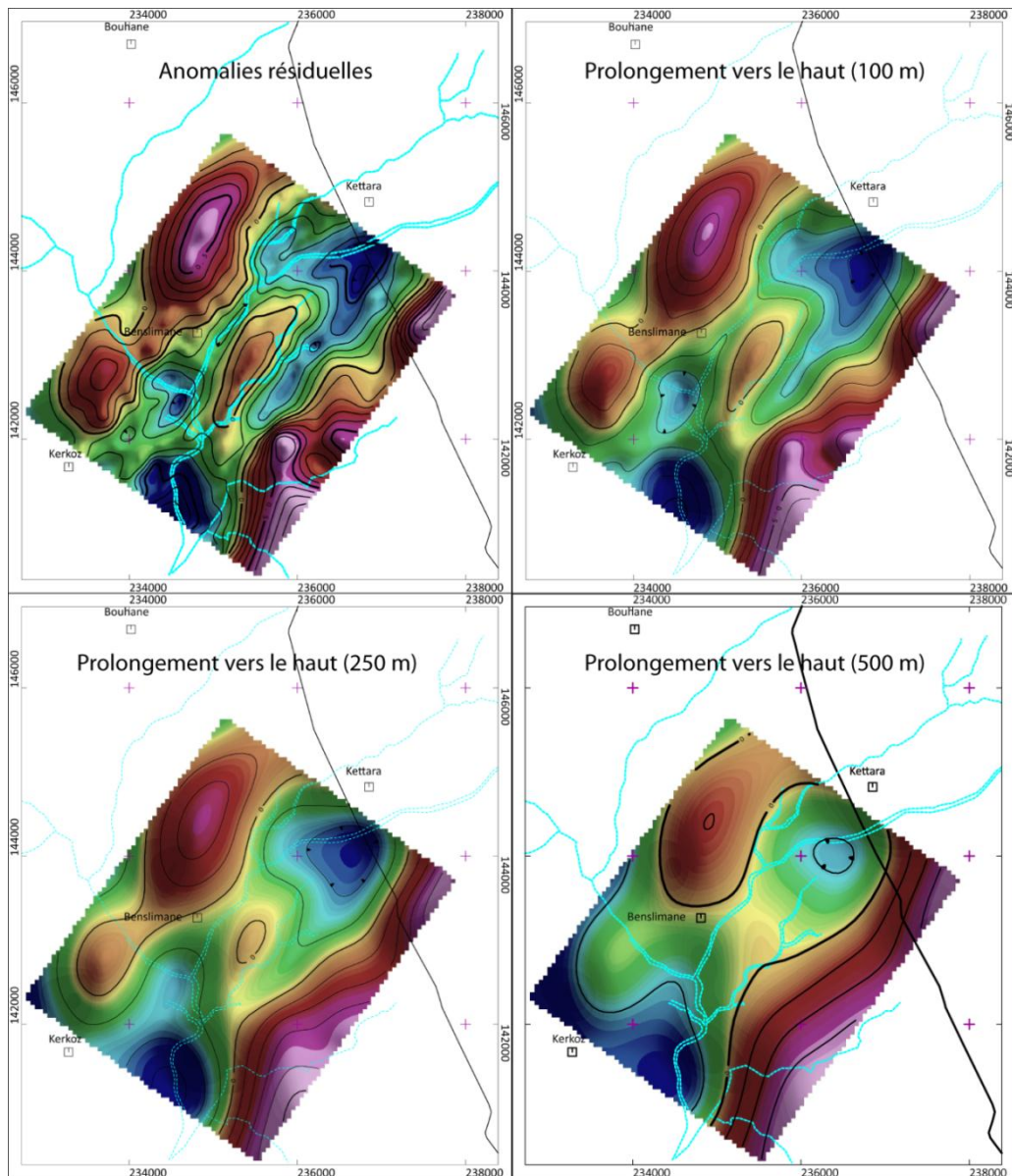


Figure III.55 : Cartes gravimétrique résiduelle du secteur de Benslimane et ses prolongements vers le haut aux altitudes de 100, 250 et 500 m.

Les résultats de cette analyse sont présentés sur la figure III.57 qui met en évidence un réseau de contacts gravimétriques matérialisé par des alignements des maxima locaux du gradient horizontal. Ces contacts représentent des zones de gradients gravimétriques caractérisées par des contrastes de densité. Ils peuvent correspondre à des accidents tectoniques ou à des contacts lithologiques. On peut noter d'ores et déjà que la direction globale des contacts mis en évidence est parfaitement conforme à celle des structures connues de la zone d'étude. Certaines failles existantes sont bien soulignées par la méthode d'analyse des contacts. D'autres au contraire passent inaperçu très probablement parce qu'elles n'engendrent pas de contrastes de densité. L'analyse de la migration des maxima locaux du gradient horizontal en fonction de la hauteur du prolongement permet de déterminer le pendage des contacts identifiés. Ces pendages n'ont pas été représentés pour les contacts verticaux qu'on reconnaît par la superposition de tous les maxima locaux.

A l'issue de cette étude gravimétrique, une carte d'interprétation synthétisant l'ensemble des résultats obtenus a été élaborée (Fig. III.57). Les nouveaux éléments mis en exergue par la gravimétrie ont été intégrés à la carte structurale existante issue des observations géologiques de surface. La carte de synthèse ainsi produite constitue un schéma structural plus complet du secteur de Benslimane.

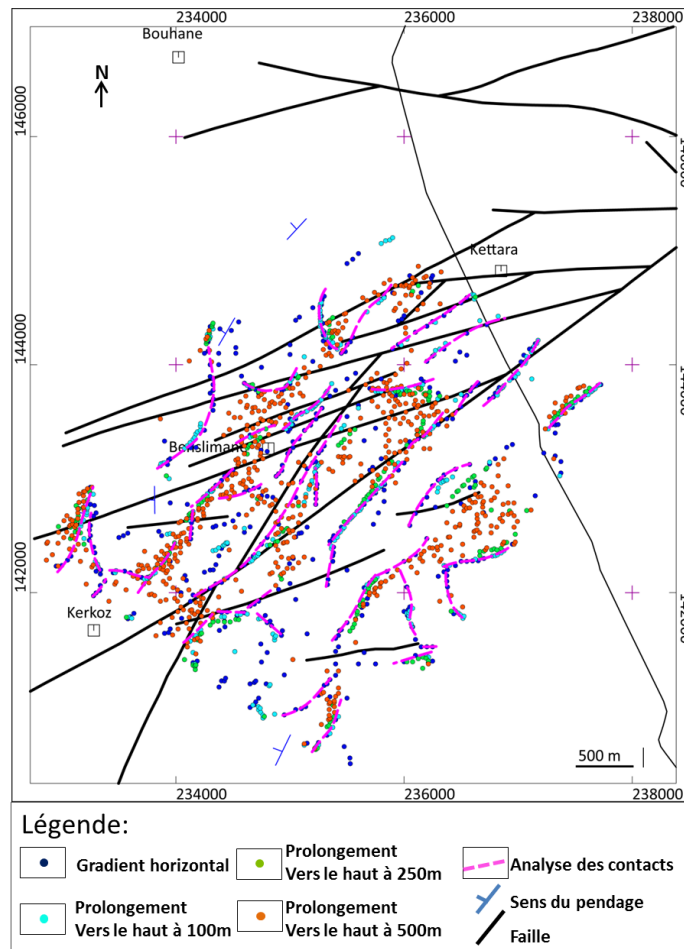


Figure III.56 : Contacts gravimétriques obtenus à partir des maxima du gradient horizontal calculé pour la carte d'anomalies résiduelle et pour ses prolongements vers le haut 100 m, 250 m et 500 m.

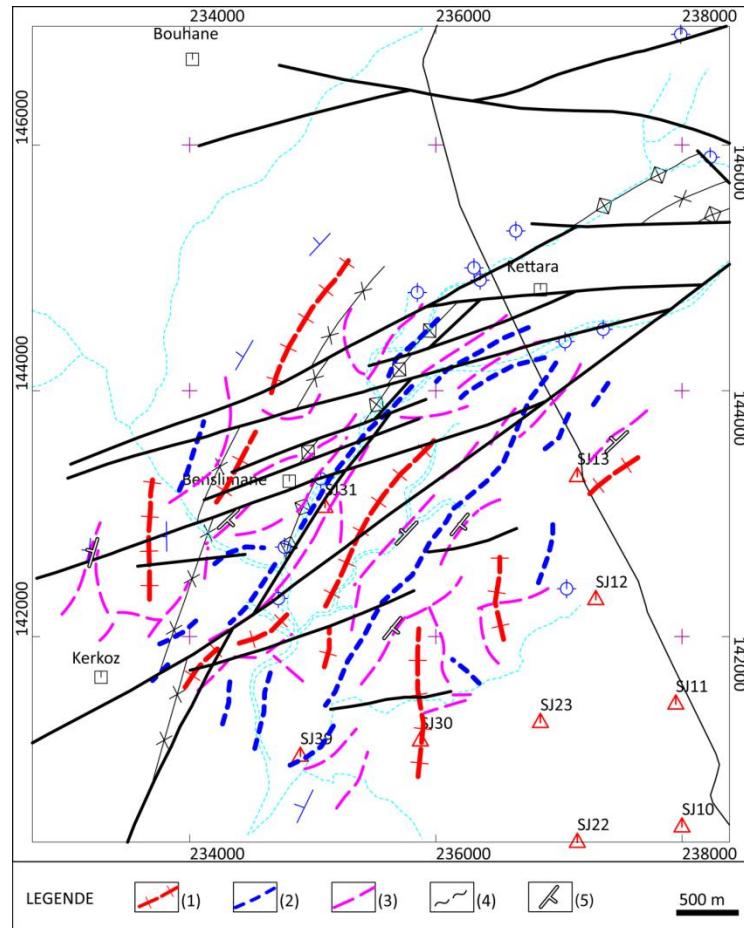


Figure III.57 : Schéma structural de la zone d'étude complété par les linéaments gravimétriques, 1. Axes des hauts de gravimétrie, 2. Axes des bas de gravimétrie, 3. Linéaments des analyses de contact, 4. Failles interprétées, 5. Direction de pendage

III.2.2- Prospection magnétique

En raison de son intérêt minier le secteur de Benslimane a fait l'objet de nombreux travaux de reconnaissance géologiques et géophysiques. Parmi ces travaux, on peut citer le levé de prospection magnétique réalisé en 2004 dans le cadre d'un projet de fin d'étude en collaboration entre les FST de Marrakech et de Beni-Mellal et Managem (Jabraoui & Rahim, 2004). Ce levé qui ciblait principalement le chapeau de fer de Benslimane, couvre une superficie très restreinte à l'Est de ce village (Fig. III.58). Il a été mis en œuvre selon un réseau de profils NW-SE de 700 m de longueur placées tous les 50 m perpendiculairement à une ligne de base s'étendant sur 1050 mètres. Les mesures ont été effectuées tous les 12.5 m à l'aide de magnétomètres de type ENVIMAG de Sintrex. On propose de retraiter et réinterpréter les données brutes de ce levé afin de les exploiter dans le cadre de notre étude du secteur de Benslimane.

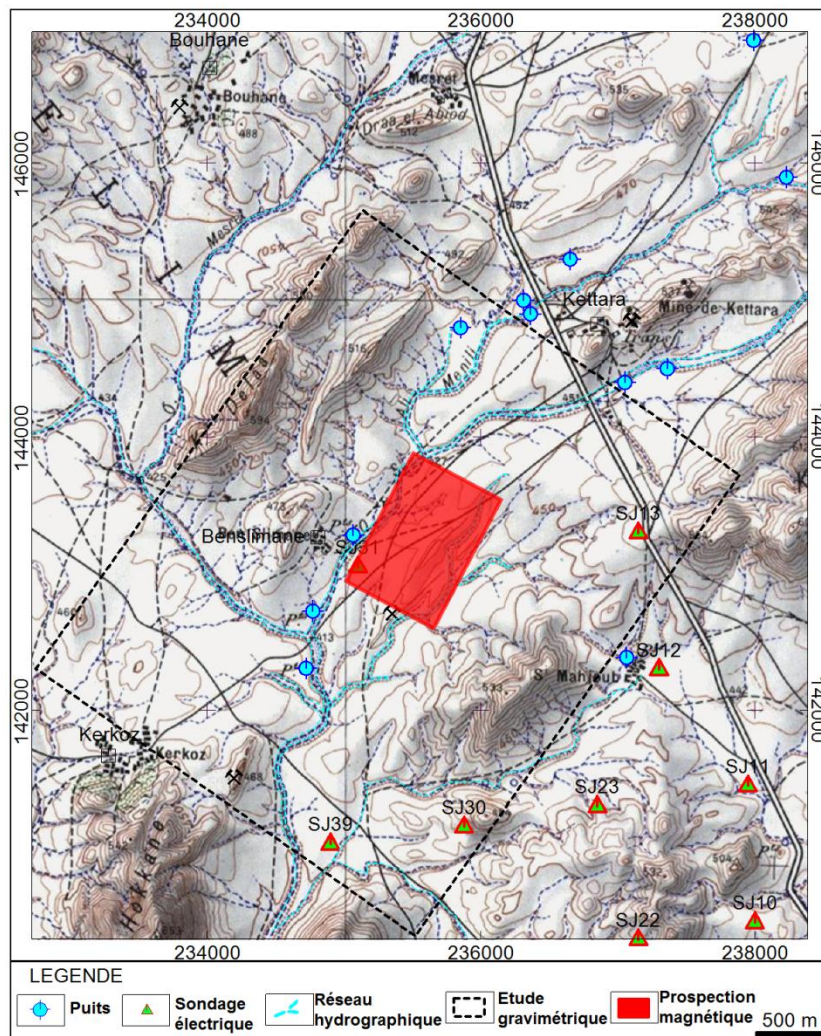


Figure III.58 : Localisation de la prospection magnétique au niveau du secteur de Benslimane

III.2.2.1- Analyse et interprétation

Les données magnétiques sont présentées sous forme d'une carte du champ total qui fait état de l'existence de quelques anomalies à l'échelle de la zone prospectée (Fig. III.59). L'écart maximal des variations observées s'élève à une vingtaine de nanoteslas. Il s'agit de variations de courte longueur qui témoignent des hétérogénéités superficielles de l'aimantation des roches. La réduction au pôle des données magnétiques permet de centrer les anomalies sur les sources anomaliques et de faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats (Fig. III.59). L'analyse de la carte du champ total réduit au pôle, permet d'identifier les zones magnétiques qui correspondent désormais aux anomalies positives. On reconnaît notamment au centre de la grille l'anomalie allongée en direction NNE-SSW qui correspond à la signature du chapeau de fer de Benslimane.

La dérivée première verticale, communément appelée gradient vertical est un traitement mathématique qui permet de rehausser les structures magnétiques et de faciliter la lecture de la carte grâce à l'amélioration de la résolution spatiale. Cette technique tend à amplifier les anomalies liées aux sources superficielles (haute fréquence) et à éliminer les anomalies de grandes longueurs d'ondes. Le résultat de l'application de ce traitement aux présentes données magnétiques est présenté sur la figure III.60. Sa comparaison avec la carte de la réduction au pôle permet de s'apercevoir que le gradient vertical met en relief plus de variations du champ magnétique qui correspondent à des anomalies de haute fréquence. La cartographie géomagnétique de la zone prospectée a été établie en se basant sur les résultats du gradient vertical qui permet d'identifier les variations subtiles de la teneur en minéraux magnétiques de cette zone. La carte d'interprétation produite témoigne de l'existence d'un réseau de linéaments magnétiques recoupés par des failles NE-SW à ENE-WSW notées F1 à F4 (Fig. III.61). Sa superposition au schéma structural de la zone d'étude complété auparavant par les résultats de l'étude gravimétrique permet de s'apercevoir que les failles F1 et F3 coïncident parfaitement avec des accidents déjà observés sur le terrain, ce qui confirme leur existence et leur importance dans la structuration du socle hercynien de la région de Kettara. D'où l'intérêt de ces structures sur le plan hydrogéologique, en tant que zone de faiblesse du socle, susceptibles d'abriter et de drainer des eaux souterraines (aquifère de fissures).

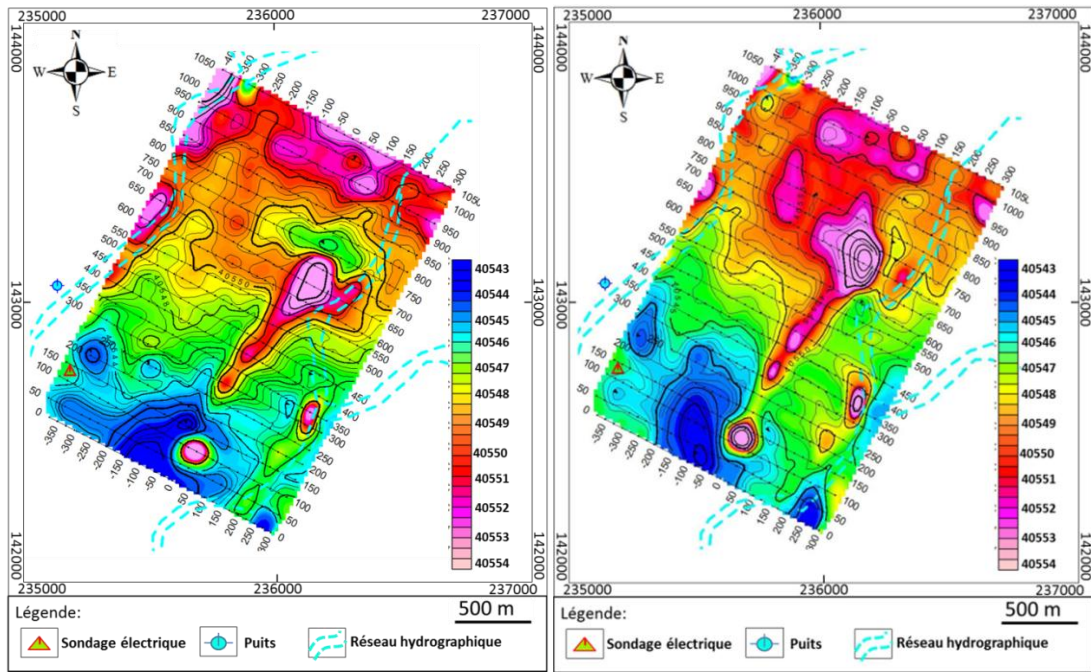


Figure III.59 : Cartes magnétique du secteur de Benslimane. Champ total (à gauche) et réduction au pôle (à droite).

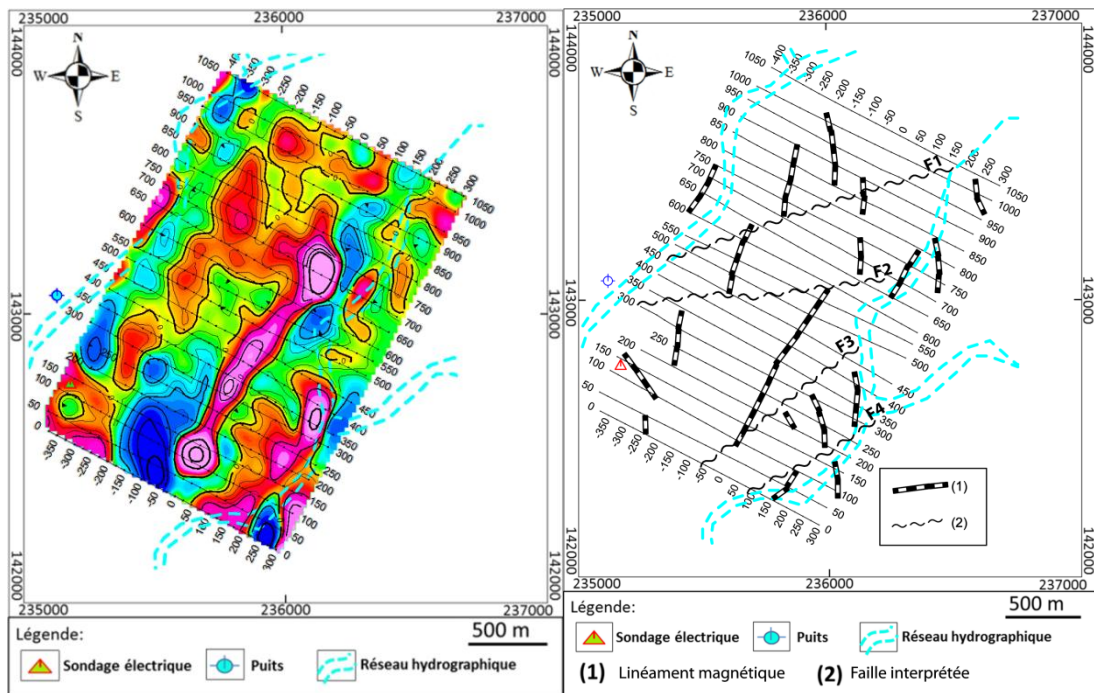


Figure III.60 : Cartes magnétique du secteur de Benslimane. Gradient vertical (à gauche) et interprétation (à droite).

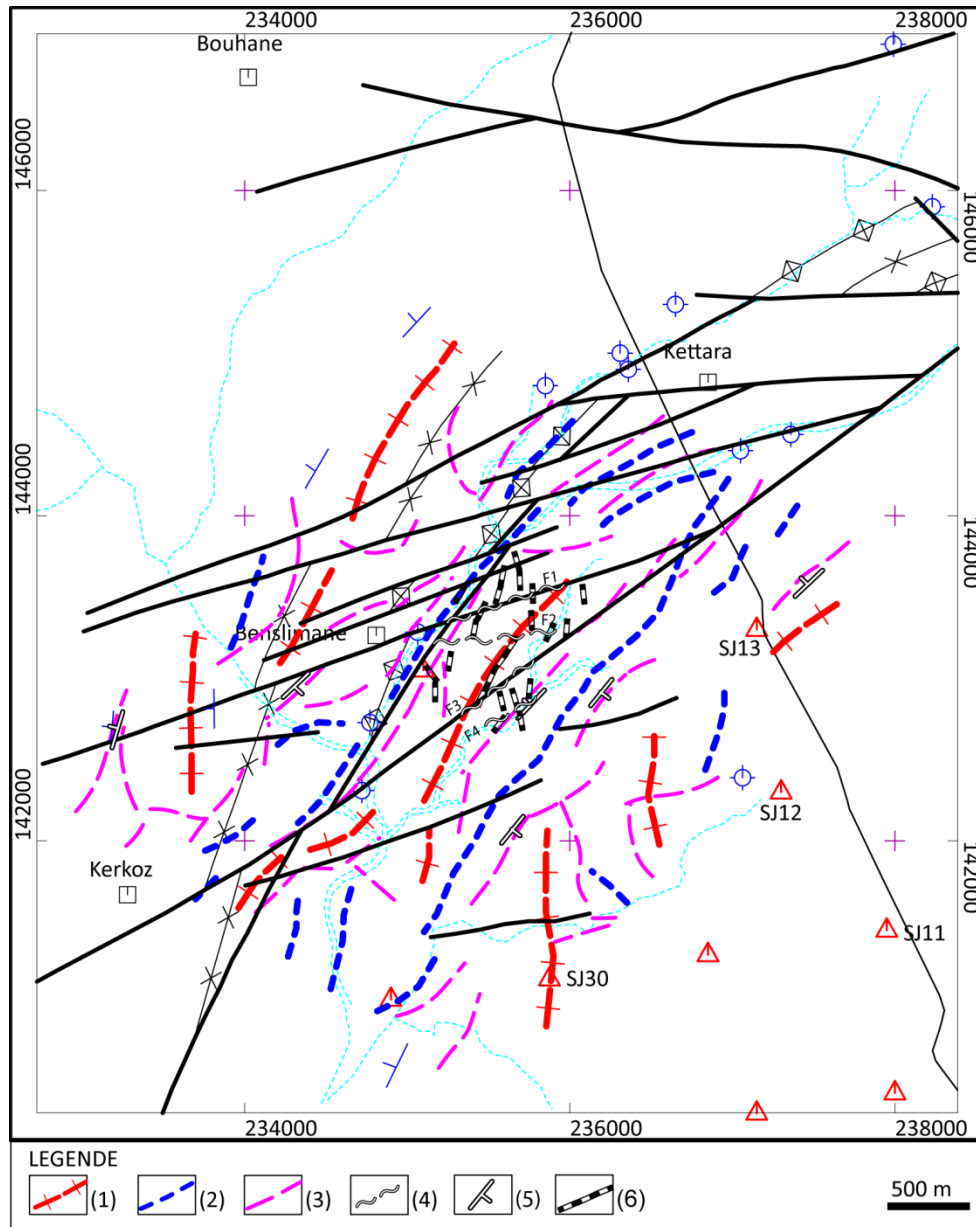


Figure III.61 : Schéma structural de la zone d'étude complété par les linéaments magnétiques, , 1. Axes des hauts de gravimétrie, 2. Axes des bas de gravimétrie, 3. Linéaments des analyses de contact, 4. Failles interprétées, 5. Direction de pendage, 6. Linéaments magnétique.

III.2.3- Prospection par sondage électrique

III.2.4.1- Données disponibles

La campagne de sondages électrique réalisée par Guessous (1996) couvre une large bande qui s'étend à l'Ouest de la route Marrakech – El Jadida depuis Nzalet El Harmel au Sud jusqu'aux environs de Kettara. On s'intéresse à quelques sondages électriques de cette campagne et en particuliers les derniers vers la Nord qui se situe à l'intérieur de notre zone d'étude (Fig. II.63). On propose de les réinterpréter en partant des mesures brutes dont on dispose. Certes tous ces sondages ont déjà été interprétés par Guessous dans le cadre de ses travaux de thèse de doctorat. Cependant, nous avons constaté que le logiciel utilisé à l'époque ne prend en considération les embrayages ou « à-coup de prise » c'est-à-dire les mesures effectuées quand on change la taille du dipôle de mesure MN sans bouger les électrodes de courant A et B, ce qui permet d'avoir des courbes de sondages avec deux lectures de la résistivité apparente pour une même valeur de $AB/2$ (Fig. III.62). Les logiciels d'inversion disponibles actuellement permettent de traiter ce type de données et c'est donc à ce niveau que l'on espère apporter une amélioration par rapport au travail de Guessous.

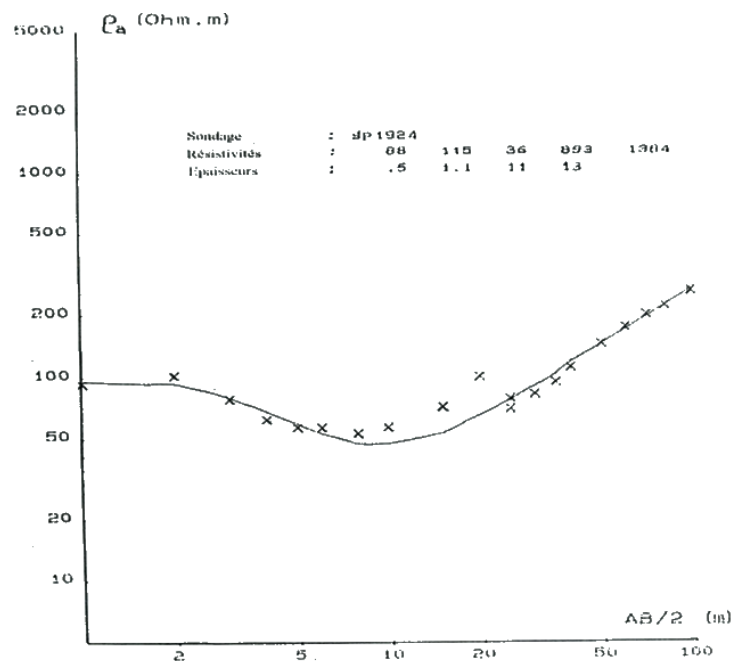


Figure III.62 : Sondage paramétrique SJ 12 interprété à l'aide du logiciel ELEC (Guessous, 1996)

III.2.4.2- Interprétation des données

Cette partie de notre étude porte sur l'interprétation des huit sondages électriques localisés à l'intérieur de notre zone d'étude. Il s'agit des sondages SJ10, SJ11, SJ12, SJ13, SJ22, SJ23, SJ31 et SJ39 qui couvre essentiellement la partie méridionale de cette zone (figure III.19 et Tableau III.5). Le SJ 12 est un sondage électrique étalon, il a été implanté près du forage mécanique SP1924/44 dont les coordonnées Lambert et les caractéristiques sont indiquées dans le tableau III.6 ci-dessous :

Tableau III.6 : Coordonnées Lambert de quelques sondages électriques (Guessous, 1996)

Sondages électriques	Coordonnées Lambert	
	X	Y
10	238.000	140.450
11	237.950	141.450
12 (=SP 1924)	237.300	142.300
13	237.150	143.300
22	237.150	140.325
23	236.850	141.300
31	235.100	143.050
39	234.900	141.025

Tableau III.7: Coordonnées Lambert et caractéristique du forage mécanique SP 1924 (DRH-Marrakech ; in Guessous, 1996)

N° IRE	Coordonnées			Date	Profondeur en (m)	Niveau piézométrique		Débit (l/s)	Nature de l'ouvrage
	X	Y	Z			Profondeur (m)	Altitude du plan d'eau (m)		
1924/44	237.300	142.300	441	10/3/82	51	24.50	416.50	0.2	Sondage de reconnaissance

La compilation des données de résistivité issues des sondages paramétriques fait part de l'existence au niveau de la zone prospectée de trois entités géoélectriques (Tableau III.7). La réinterprétation proposée des sondages électriques prend en considération ces données. Bien entendu, nous avons pris en considération ces données lors de l'interprétation des sondages électriques. L'inversion des données a été effectuée à l'aide du logiciel RESIXP. Rappelons que ce logiciel possède l'avantage de calculer des modèles en tenant compte des embrayages qui surviennent souvent lors de la mise en œuvre des sondages électriques.

Tableau III.8 : Résistivités réelles des différentes formations issues des résultats des sondages paramétriques et les forages mécaniques (Guessous, 1996)

Lithologie	Résistivité vraies (ohms.m)
Terrains superficiels (limons, conglomérats, schistes ou calcaires encroûtés)	8 - 262
Schistes altérés argileux et/ou marneux	7 - 95
Substratum avec des passées de quartzite et/ou de calcite	90 - 3506

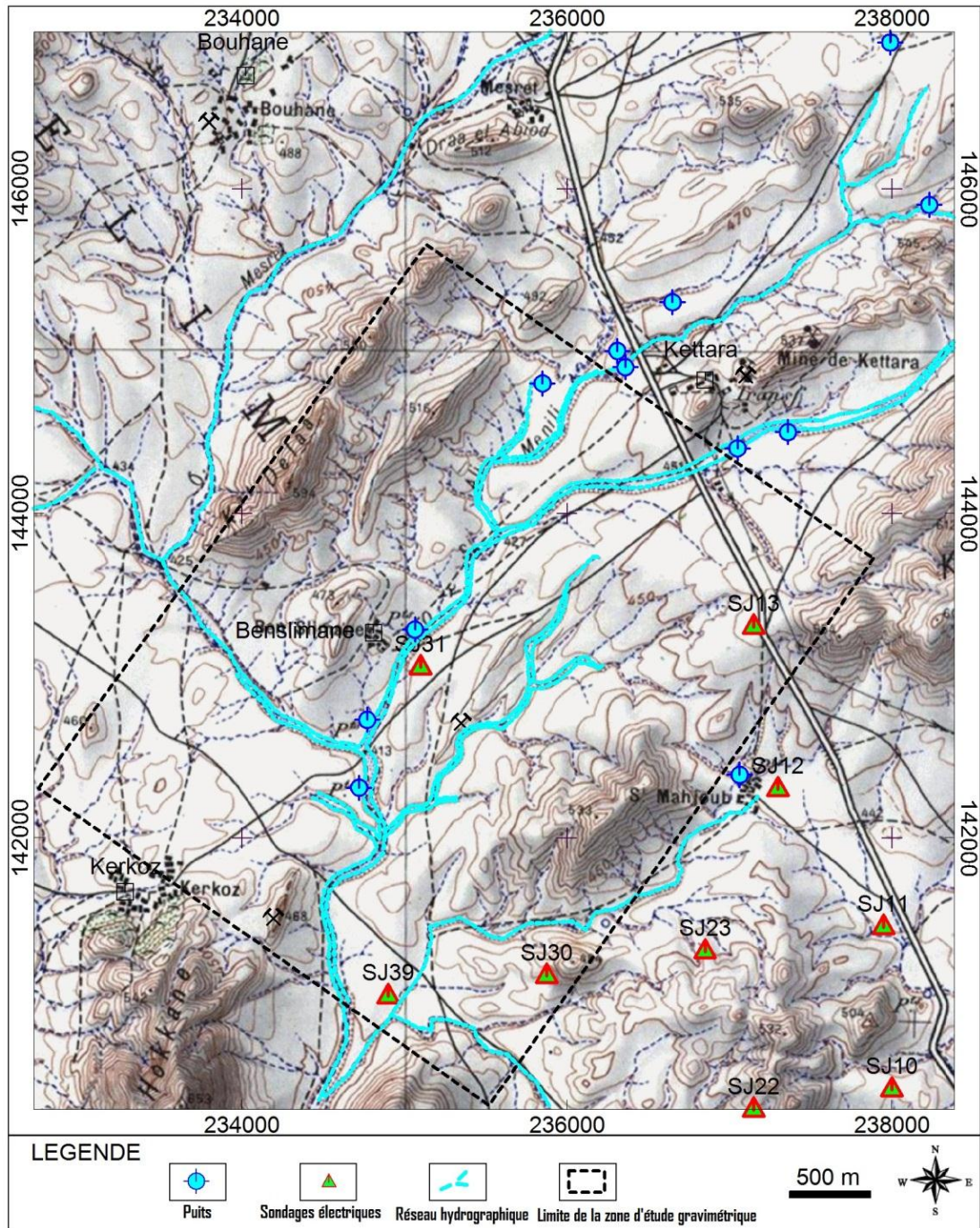


Figure III.63 : Localisation des sondages électriques situés au niveau de la région de Kettara (extrait de la carte de Jbel Sarhlef 1/50000)

❖ Sondage étalon SJ 12 (SP 1924)

La courbe du sondage électrique SJ12 associe les deux formes typiques « cloche » et « fond de bateau » utilisées habituellement pour qualifier ce type de représentation. De telles variations pour une longueur du dispositif de l'ordre de 200 m, témoigne de l'hétérogénéité de la géologie en subsurface avec une évolution en profondeur vers des valeurs plus élevées.

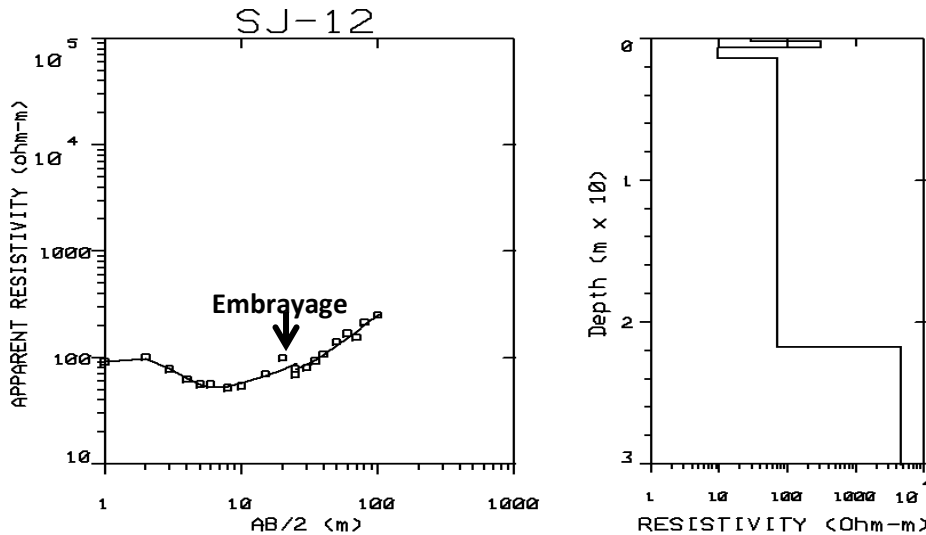


Figure III.64 : Allure du sondage électrique SJ12

Tableau III.9 : Résultats d'interprétation du sondage électrique SJ12 par RESIX Plus

Sondage électrique	Résistivités (ohm.m) et Epaisseurs (m)					Erreur (%)
	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	Couche 5	
SJ12	$\rho_1 = 28.6$ $Ep_1 = 0.2$	$\rho_2 = 310$ $Ep_2 = 0.4$	$\rho_3 = 9.7$ $Ep_3 = 1$	$\rho_4 = 69.9$ $Ep_4 = 20.2$	$\rho_5 = 4582$	6.2

Le modèle d'inversion calculé (Fig. II.64) montre la superposition de cinq terrains qu'on peut interpréter comme suit, compte tenu du forage mécanique voisin puisqu'il s'agit d'un sondage électrique d'étalonnage :

- Le premier terrain correspondrait à des alluvions transportées par l'Oued, puisque ce sondage se situe au niveau d'un talweg.
- Le deuxième terrain correspond à des schistes encroûtés et des limons.
- Le troisième et le quatrième terrain correspondent aux schistes altérés, dont la résistivité est inversement proportionnelle au degré d'altération.
- Le dernier terrain attribué au substratum constitué du schiste gris avec des passages de quartzite, cet ensemble a une résistivité allant de 4582 ohms.m.

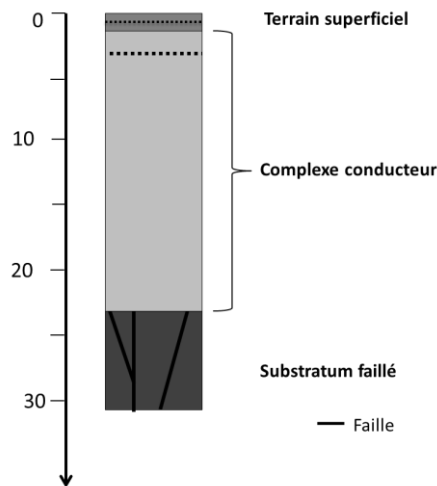


Figure III.65 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ12

❖ Sondage électrique SJ 10

Ce sondage électrique est caractérisé par une courbe ascendante ce qui correspond typiquement à la superposition de terrains dont la résistivité augmente en fonction de la profondeur. Le modèle d'inversion est effectivement constitué de trois terrains dont le schéma interprétatif est illustré sur la figure III.66 :

- Le premier terrain est attribué à des schistes encroûtés et des limons ; ($\rho_1= 28 ; Ep_1= 0.2$)
- Le deuxième terrain ($\rho_2= 76 ; Ep_2= 12.33$) correspond probablement à des schistes tendres altérés et argileux ;
- Le troisième terrain est résistant attribué au substratum fracturé (Fig. II.67).

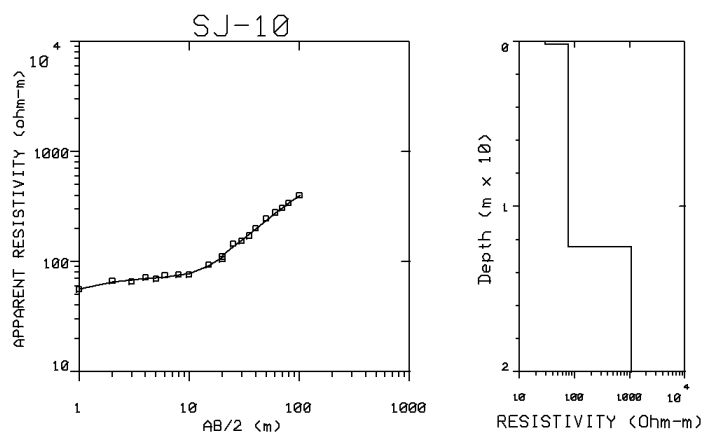


Figure III.66 : Allure du sondage électrique SJ10

Tableau III.10 : Résultats d'interprétation du sondage électrique SJ10 par RESIX Plus

Sondage électrique	Résistivités (ohm.m) et Epaisseurs (m)			Erreur (%)
	Couche 1	Couche 2	Couche 3	
SJ10	$\rho_1 = 28.6$ $Ep_1 = 0.17$	$\rho_2 = 76$ $Ep_2 = 12.33$	$\rho_3 = 1062.7$	3.02

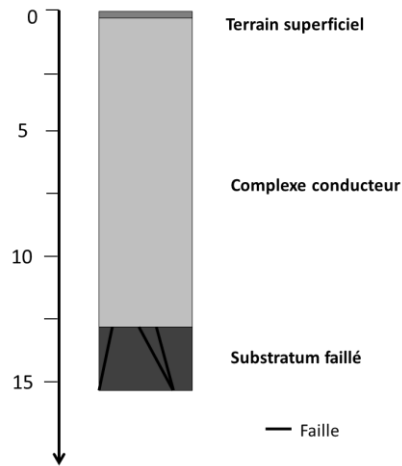


Figure III.67 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ10

❖ Sondage électrique SJ 11

Ce sondage électrique présente une allure en « *fond de bateau* ». Son traitement par le programme RESIXP permet d'obtenir un modèle à quatre couches qui sont interprétées de point de vue lithologique selon le schéma de la figure III.69, c'est-à-dire : un terrain superficiel de faible épaisseur recouvrant un complexe conducteur qui correspondrait à des schistes altérés lesquels surmontent un substratum fracturé au sommet et contenant des passages de quartzite ou de calcite en profondeur.

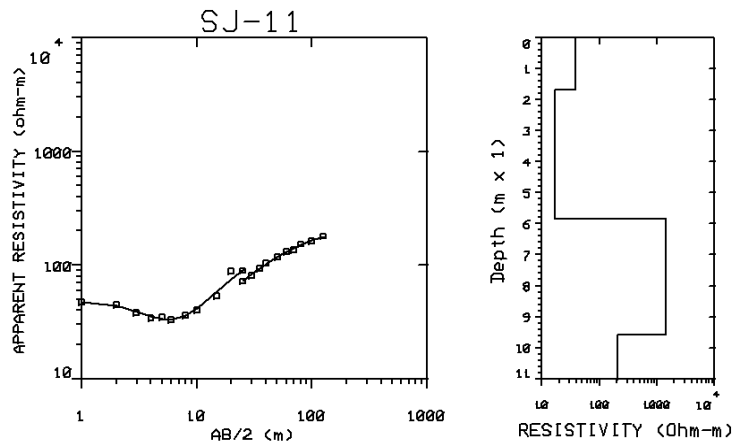


Figure III.68: Allure du sondage électrique SJ11

L'à coup de prise observé a AB = 50m est dû à la présence d'une hétérogénéité locale correspondant à une fracture qui peut être soit colmaté soit libre contenant de l'eau (Guessous, 1996).

Tableau III.11 : Résultats d'interprétation du sondage électrique SJ11 par RESIX Plus

Sondage électrique	Résistivités (ohm.m) et Epaisseurs (m)				Erreur (%)
	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	
SJ11	$\rho_1 = 38.9$ $Ep_1 = 1.7$	$\rho_2 = 16.6$ $Ep_2 = 5.8$	$\rho_3 = 1405.6$ $Ep_3 = 9.6$	$\rho_4 = 207.3$	4.8

D'après ces données on peut retirer cette interprétation géo-électrique (fig. III.71), où on remarque que le niveau inférieur du substratum est très faillés par rapport au niveau supérieur.

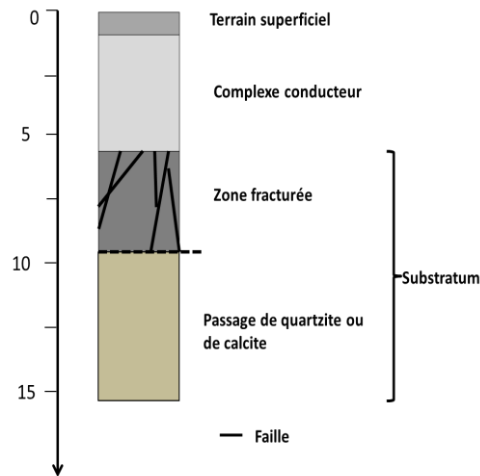


Figure III.69 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ11

❖ Sondage électrique SJ 13

La courbe de ce sondage électrique a une allure en « fond de bateau ». Le modèle calculé correspondant est constitué de quatre terrains interprétés comme suit (Fig. III.70) :

- Le premier terrain est relativement résistant attribué à des encroutements superficiels.
- Le deuxième terrain correspond aux schistes tendres altérés.
- Les deux derniers terrains correspondent au substratum avec une partie supérieure probablement fracturée et une partie inférieure plus saine.

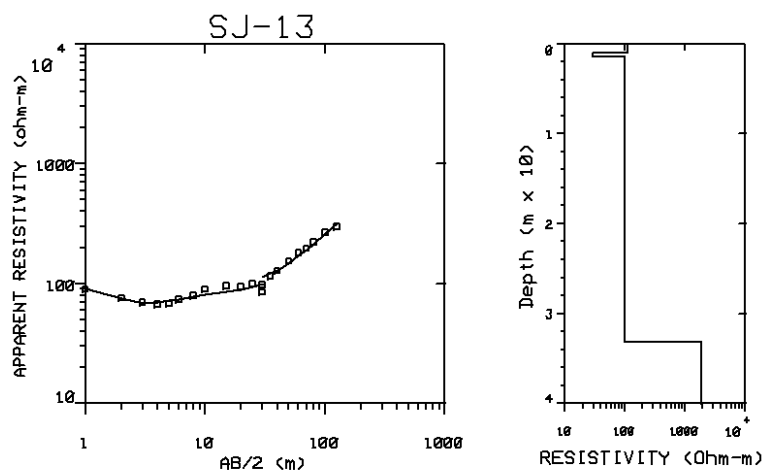


Figure III.70 : Allure du sondage électrique SJ13

Tableau III.12 : Résultats de l'interprétation du sondage électrique SJ13 par RESIX Plus

Sondage électrique	Résistivités (ohm.m) et Epaisseurs (m)				Erreur (%)
SJ13	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	5.9
	$\rho_1 = 112.7$ $Ep_1 = 0.98$	$\rho_2 = 29$ $Ep_2 = 1.4$	$\rho_3 = 101.5$ $Ep_3 = 33.2$	$\rho_4 = 1892$	

Le log géo-électrique ci-dessous nous permet de visualiser la variation de fracturation qui a un intérêt hydrogéologique (fig. III.71).

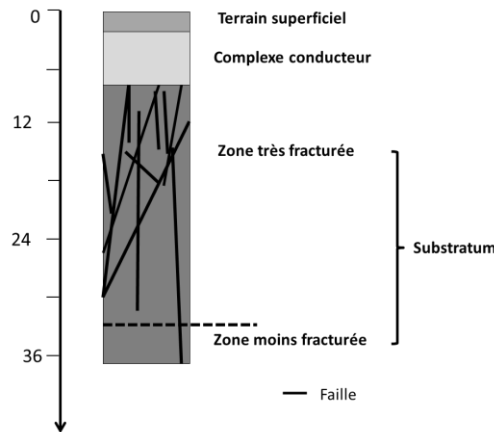


Figure III.71: Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ13

❖ Sondage électrique SJ 22 :

Le sondage SJ22 est caractérisé par une courbe ascendante. A l'image du sondage SJ10, cela correspond à une augmentation progressive de la résistivité intrinsèque des roches avec la profondeur. Le modèle de résistivité calculé met en évidence la superposition de trois terrains de résistivités intrinsèques très contrastées que nous interprétons en tant que zone altérée, substratum fracturé et substratum sain (Fig. III.73).

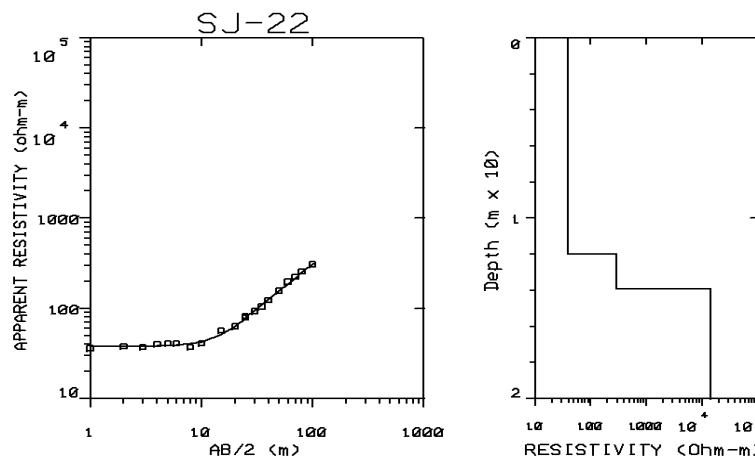


Figure III.72 : Allure du sondage électrique SJ22

Tableau III.13 : Résultats de l'interprétation du sondage électrique SJ22 par RESIX Plus

Sondage électrique	Résistivités (ohm.m) et Epaisseurs (m)			Erreur (%)
SJ22	Couche 1	Couche 2	Couche 3	4.6
	$\rho_1 = 39.3$ $Ep_1 = 11.9$	$\rho_2 = 289.6$ $Ep_2 = 2$	$\rho_3 = 14624.9$	

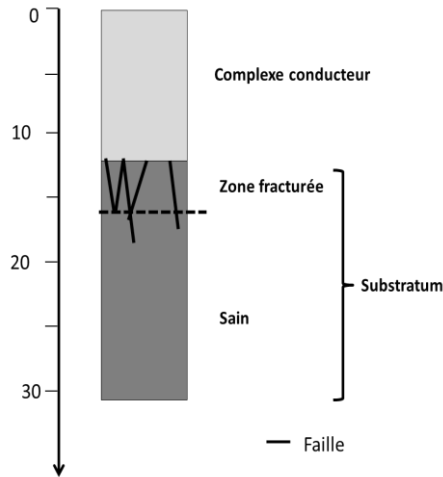


Figure III.73 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ22

❖ Sondage électrique SJ 23 :

L'interprétation de ce sondage permet d'obtenir un modèle à quatre terrains attribués de haut en bas à :

- des limons encroûtés ;
- des schistes altérés ;
- un substratum fracturé ;
- un substratum saint.

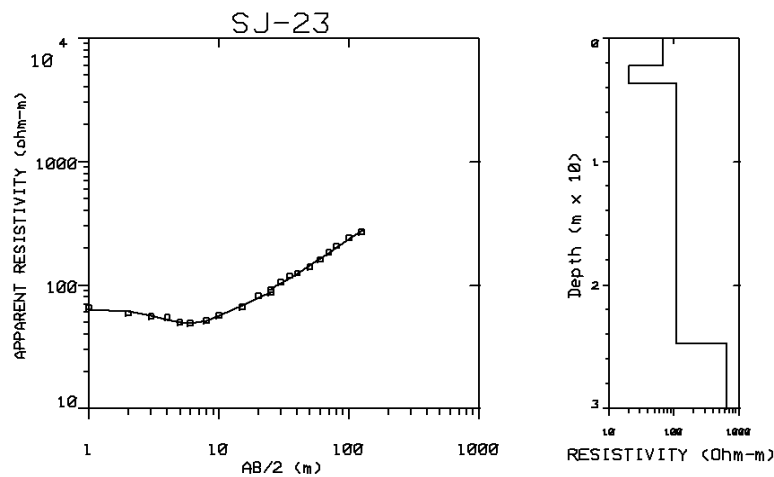


Figure III.74 : Allure du sondage électrique SJ23

Tableau III.14 : Résultats de l'interprétation du sondage électrique SJ23 par RESIX Plus

Sondage électrique	Résistivités (ohm.m) et Epaisseurs (m)				Erreur (%)
SJ23	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	2.4
	$\rho_1 = 68.2$ $Ep_1 = 2.3$	$\rho_2 = 19.8$ $Ep_2 = 1.3$	$\rho_3 = 109.7$ $Ep_3 = 21.1$	$\rho_4 = 652$	

Les résultats de l'interprétation montrent un terrain relativement résistant attribué à des limons encroûtés suivit d'un terrain d'un mètre contenant des schistes tendres altérés qui se termine par un substratum faillé.

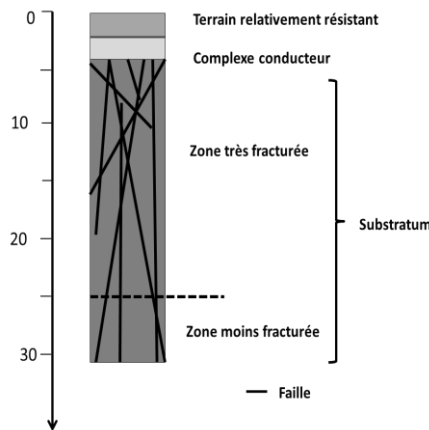


Figure III.75 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ23

❖ Sondage électrique SJ 31 :

L'allure de la courbe du sondage électrique SJ31 est en « fond de bateau » avec un à-coup de prise au niveau de $AB/2 = 22$ m. Les résultats de l'interprétation révèle l'existence de quatre terrains de résistivité différentes (Fig. III.76).

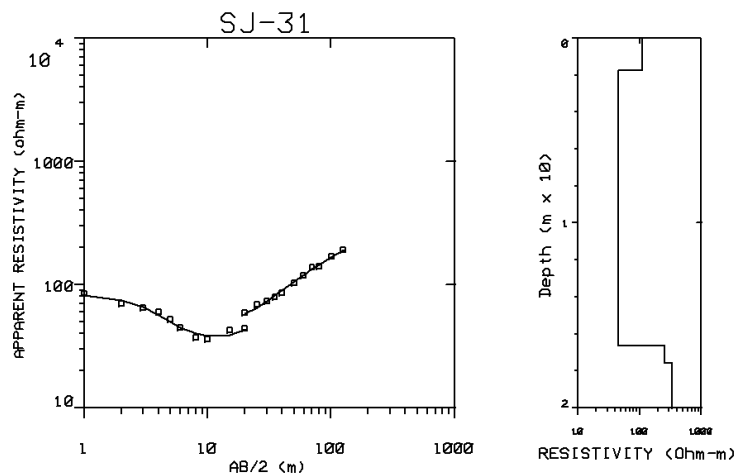


Figure III.76 : Allure du sondage électrique SJ31

Tableau III.15 : Résultats de l'interprétation du sondage électrique SJ31 par RESIX Plus

Sondage électrique	Résistivités (ohm.m) et Epaisseurs (m)				Erreur (%)
	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	
SJ31	$\rho_1 = 111.6$ $Ep_1 = 1.8$	$\rho_2 = 44.7$ $Ep_2 = 14.8$	$\rho_3 = 255.6$ $Ep_3 = 2.8$	$\rho_4 = 338.6$	4.5

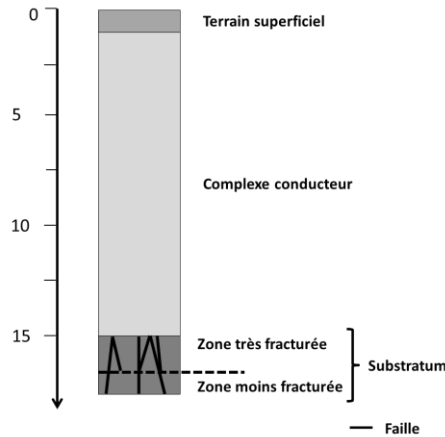


Figure III.77 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ31

❖ Sondage électrique SJ 39 :

La courbe du sondage SJ39 montre une évolution de la résistivité marquée au début par une légère baisse pour les faibles valeurs de AB/2, suivie d'une hausse importante et quasi continue pour le reste des mesures. L'inversion des données de ce sondage aboutit à un modèle à quatre terrains (Fig. III.78) :

- Le premier terrain est relativement résistant attribué à des limons encroûtés.
- Le deuxième terrain correspond aux schistes tendres altérés ayant une épaisseur de 4m.
- Les deux derniers terrains correspondent au substratum fracturé au sommet et saint à la base.

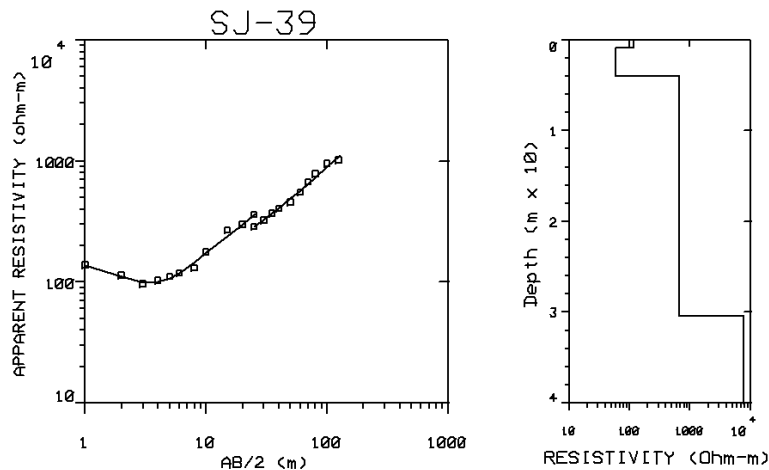


Figure III.78 : Allure du sondage électrique SJ39

Tableau III.16 : Résultats de l'interprétation du sondage électrique SJ39 par RESIX Plus

Sondage électrique	Résistivités (ohm.m) et Epaisseurs (m)				Erreur (%)
	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	
SJ39	$\rho_1 = 119.8$ $Ep_1 = 0.8$	$\rho_2 = 58.8$ $Ep_2 = 3.1$	$\rho_3 = 666.2$ $Ep_3 = 13.7$	$\rho_4 = 7659.7$	4.8

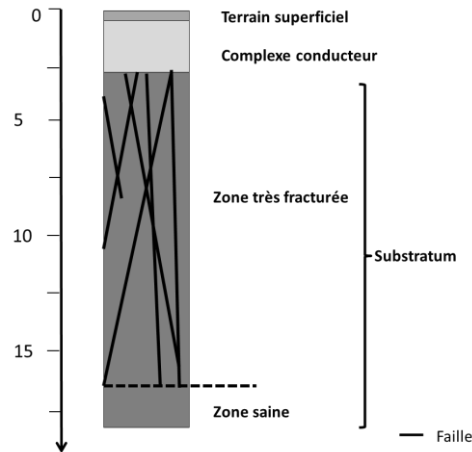


Figure III.79 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ39

❖ Conclusion

L'analyse des résultats de la réinterprétation des huit sondages électriques permet de retenir particulièrement les points suivants :

Les modèles de résistivité intrinsèque mis en évidence dans le cadre de la présente étude permettent d'identifier plusieurs entités géo-électriques différenciées par leurs résistivités intrinsèques et interprétées typiquement selon un schéma suivant :

- Une mince couche de recouvrement superficiel correspondant soit à la terre végétale, soit à des formations encroutées, sa résistivité est variable ;
- La zone altérée du socle hercynien caractérisée par une baisse de la résistivité.
- La zone fracturée du socle
- Le socle sain

Ce schéma interprétatif général peut varier d'un sondage à l'autre. Les variations concernent aussi bien la nature des unités mises en évidence que leurs épaisseurs comme le montre la figure III.62. Ainsi, l'aquifère des altérites se montre le plus développé au niveau des sondages SJ12 et SJ31. Les sondages SJ13, SJ23 et SJ39 montrent plutôt un épaissement de l'aquifère de fissures (III.80).

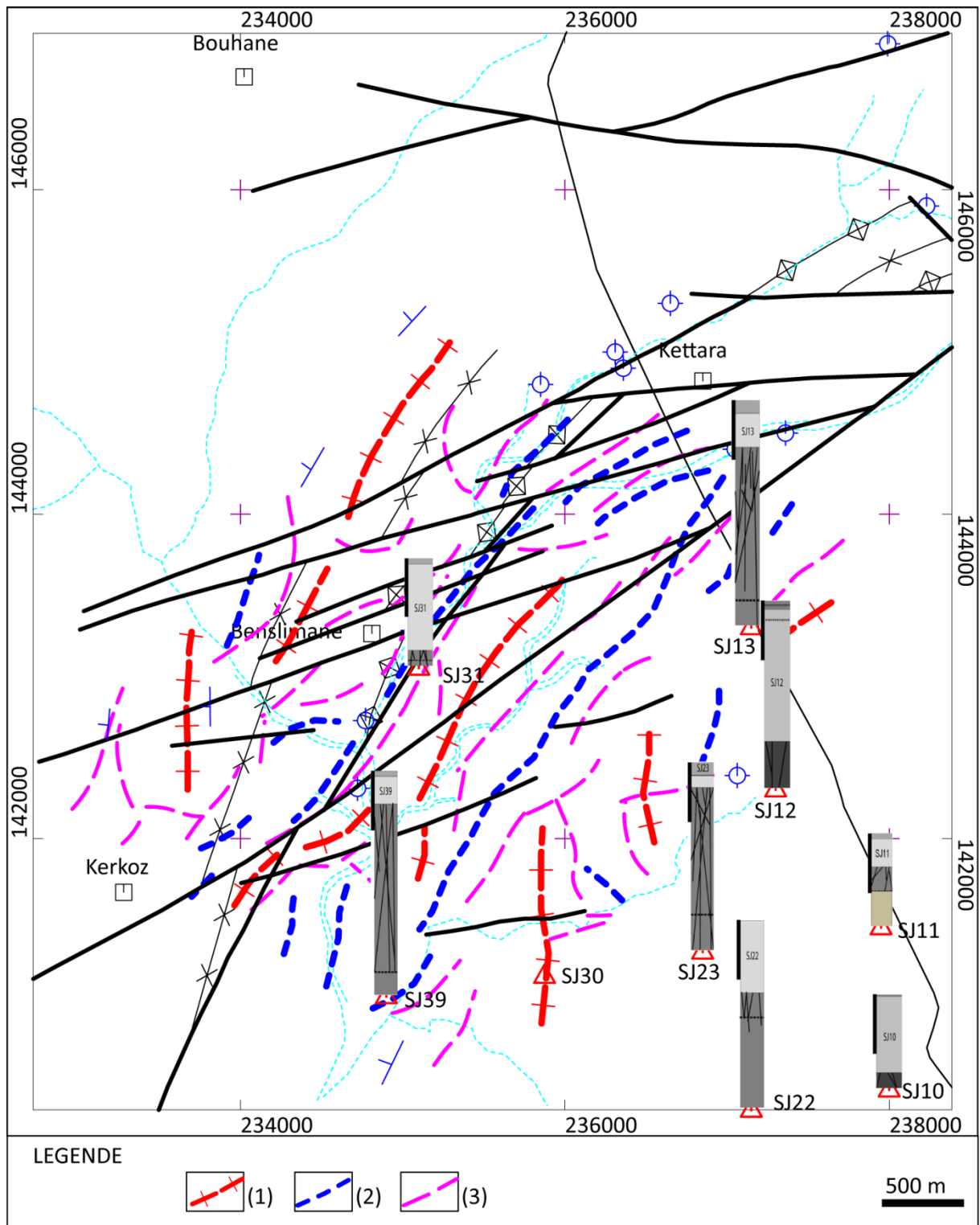


Figure III.80 : Schéma récapitulatif de Gravimétrie, du Magnétisme et des Sondages électriques, 1. Axes des hauts de gravimétrie, 2. Axes des bas de gravimétrie, 3. Linéaments des analyses de contact.

III.2.4- Tomographie électrique

III.2.5.1- Acquisition des données

La prospection par tomographie électrique a été initialement planifiée selon un grille de plusieurs profils visant principalement le réseau de failles NE-SW passant par le village de Benslimane et au nord de celui-ci. Les mesures ont commencé la journée du 1^{er} avril 2013 durant laquelle, nous avons réalisé le premier profil (Fig. III.81). Celui-ci se situe à l'Est de la zone concernée par le levé de tomographie électrique. Un résistivimètre de type Syscal Junior Switch 48 opérant en mode multi-électrodes a été utilisé pour mener ces travaux (Photo III.6). Cet appareil a été paramétré pour prendre les mesures automatiquement en configuration Wenner. Pour se faire, nous avons déployé un dispositif de 48 électrodes espacées de 10 mètres, soit une longueur de ligne de 480 m. Avant de se rendre sur le terrain, nous avons évidemment programmé la séquence de mesure en optant pour un nombre de niveau qui permet d'imager le sous-sol jusqu'à une soixantaine de mètres de profondeur. Compte tenu de l'objectif de l'étude, nous avons choisi de mesurer uniquement la résistivité.

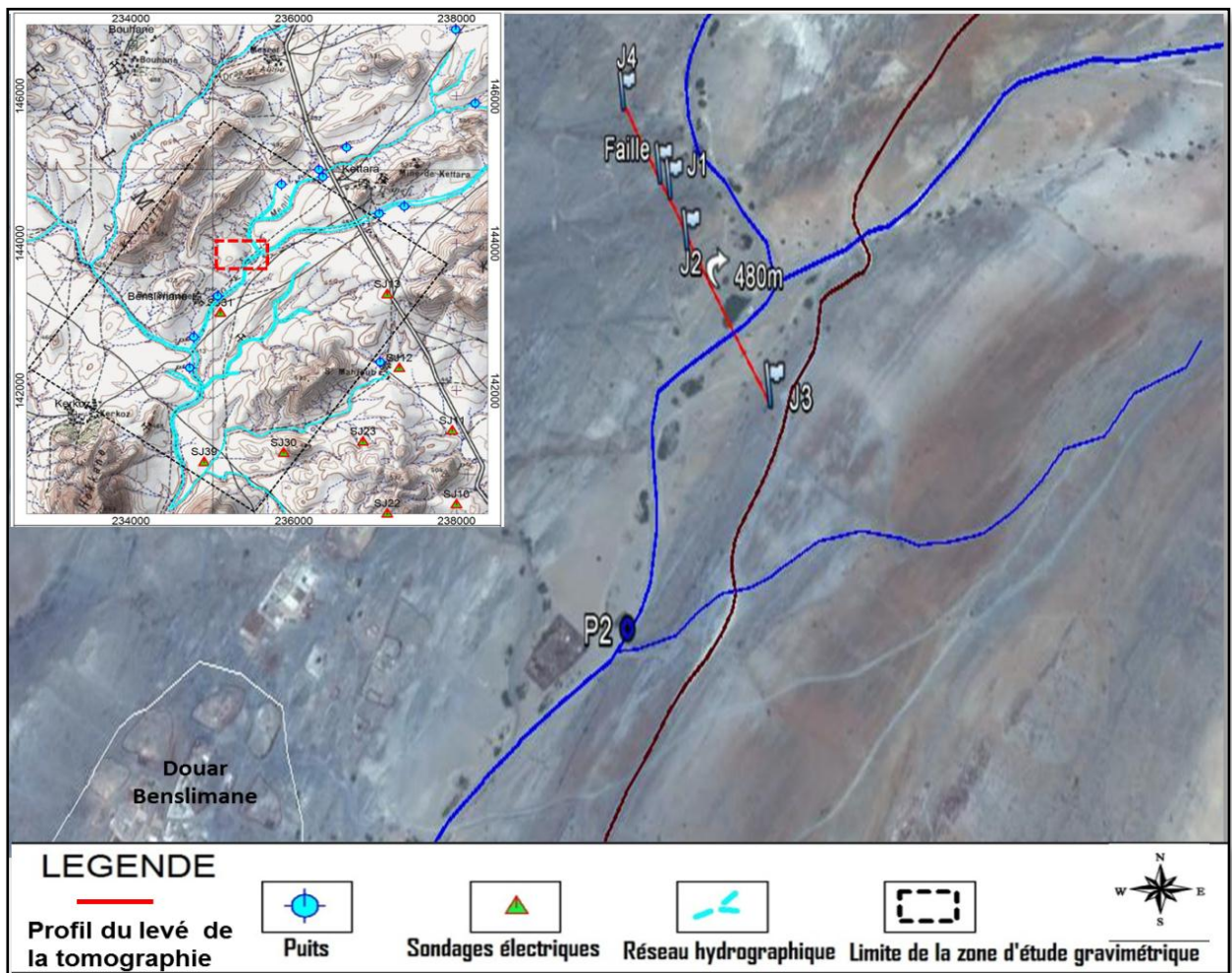


Figure III.81 : Localisation du profil du levé tomographique réalisé

Les caractéristiques adoptés pour le dispositif, séquence des mesures ; longueur des câbles, ont été définis avant de se rendre sur le terrain à l'aide du logiciel Electre II. Compte tenu de l'objectif de l'étude, nous avons opté pour la mesure de la résistivité. L'envergure totale du dispositif a permis d'atteindre une profondeur d'investigation maximale de l'ordre de 60m.

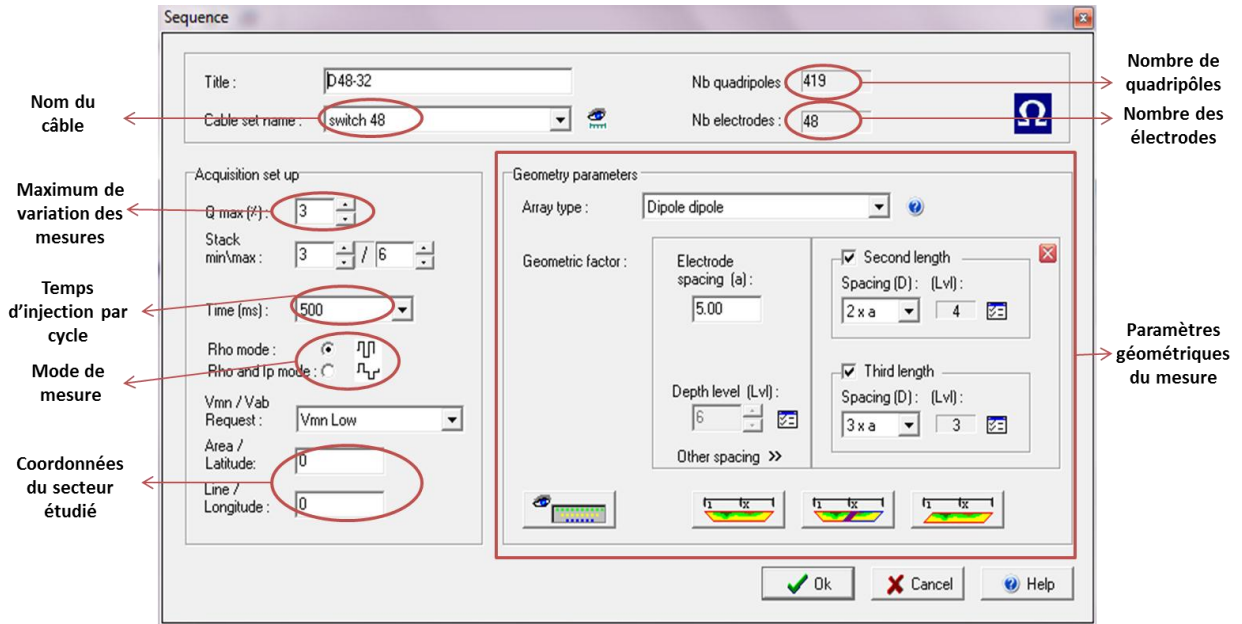


Figure III.82 : Création des séquences et des câbles sous le logiciel ELECTRE

Après la validation des informations introduites une autre fenêtre s'ouvre indiquant les niveaux de mesures déduites à partir des paramètres choisis (Fig. III.82).

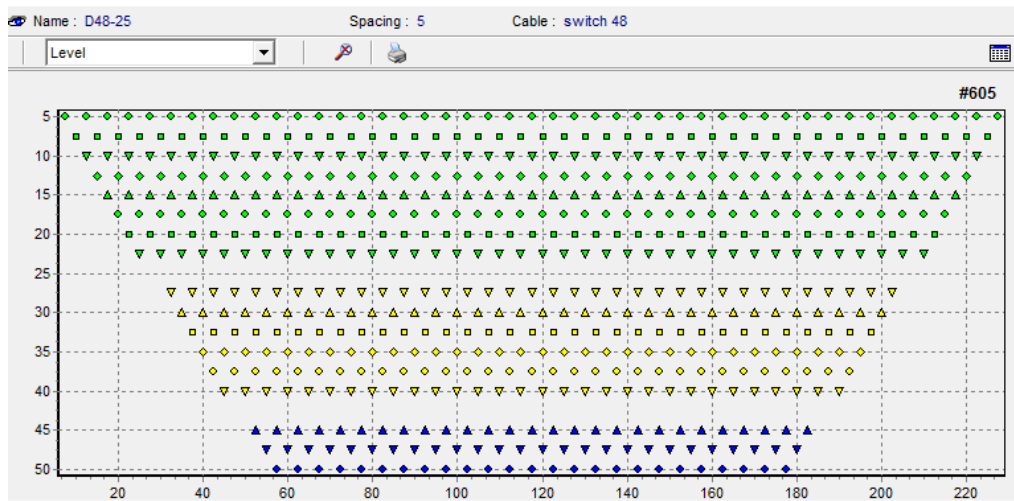


Figure III.83 : Pseudosection prévue pour les mesures sur terrain



Photo III.6 : Dispositif Syscal Junior Switch-48 utilisé pour les mesures de la tomographie

Avant de télécharger au niveau du dispositif le fichier contenant les informations sur les séquences et le câbles à utiliser, on implante chaque dix mètres sur un profil de 500m une électrode ayant une longueur de 30 cm dans le sol de telle manière à laisser que 2 cm à l'échelle de l'affleurement (Photo III.7). Simultanément à cette tâche on étale deux câbles de 24 électrodes et de 240 m de longueur chacun respectivement branchés aux deux sorties de l'appareil de mesure. Le câble et l'électrode vont être reliés à l'aide d'un connecteur (Photo III.8).

La dernière étape est de vérifier l'état de la batterie interne et la connexion entre les électrodes et le câble. On relie l'appareil à une autre batterie externe afin d'assurer l'envoi continu de 400V au cours de la mission et on lance les mesures.

Les valeurs de la résistivité apparente mesurées sont reportées au milieu du dispositif à une pseudo-profondeur proportionnelle à la distance n que nous avons déjà déterminé sous le logiciel Electre. Ceci conduit à l'établissement d'une pseudosection.



Photo III.7 : Electrode, Connecteur et le Câble de mesure



Photo III.8 : Téléchargement du fichier crée sous Electre contenant la séquence et le câble à utiliser

Un incident survenu au moment où on s'apprêtait à partir sur le terrain le deuxième jour nous a malheureusement contraint à mettre fin à cette campagne de prospection par tomographie électrique. Il s'agit de l'endommagement du résistivimètre Syscal Switch 48. On va donc se limiter à l'analyse de l'unique profil que nous avons enregistré.

III.2.5.2- Traitement et interprétation

Les données de tomographie électrique récoltées sur terrain ont été représentées sous forme de pseudosection et interprétées à l'aide du logiciel RES2DINV de la société Geotomo Software. Ceci nous a permis d'obtenir un modèle de la résistivité du sous-sol. Le résultat de cette interprétation, pour l'unique profil réalisé, est présenté sur la figure III.84 ci-dessous qui montre le modèle précité ainsi que les deux pseudosections observée et calculée.

Le profil de tomographie électrique a été réalisé à un kilomètre environ à l'Est du village de Benslimane. L'analyse des données de la résistivité apparente enregistrées le long de ce profil permet de constater que les valeurs varient de 20 Ohm.m à 420 Ohm.m environ. Le modèle d'inversion a été calculé avec une erreur de 1.96 % atteinte après 12 itérations. Cette importante dispersion des valeurs de la résistivité apparente a conduit à un modèle de résistivité du sous-sol beaucoup plus contrasté.

L'analyse de ce modèle en coupe verticale permet d'identifier les entités suivantes :

- Un terrain conducteur superficiel d'épaisseur variable avoisinant les 15 mètres au Sud entre les stations 80 et 120 et diminuant progressivement vers le nord jusqu'à s'annuler entre les positions 280 et 320. Nous pensons que ce terrain correspond à la couche altérée du socle hercynien compte tenu de la baisse significative de la résistivité qui la caractérise et de son épaisseur qui est de l'ordre de grandeur de celle obtenue plus au sud par le sondage électrique SJ31 (Fig. III.76 et III.77). Toujours vers le Sud, ce terrain est recouvert par une couche plus résistive et discontinue. D'après les observations que nous avons faites sur le terrain, cette partie du profil se situe au niveau d'un large talweg et la couche

relativement plus résistive devrait correspondre aux alluvions à dominance sableuse mise en place à l'oued.

- Sous ce premier terrain qu'on peut qualifier d'altérites superficielles, le modèle de résistivité montre d'importantes variations latérales et verticales de la résistivité qui témoignent des hétérogénéités locales du substratum. Ces variations permettent d'identifier quatre zones modérément à fortement résistives, notées R1 à R4, intercalant avec des plages plus conductrices baptisées C2 et C3. Sachant que les études géologiques antérieures montrent que la zone de Benslimane-Kettara correspond à un synclinorium (Fig. II.14 et II.15), et sachant que le présent profil de tomographie électrique se situe dans une zone charnière de ce synclinorium, nous pensons que les variations observées de la résistivité reflètent des hétérogénéités de faciès. Ainsi, les zones résistives pourraient correspondre à des faciès plus gréseux ou plus calcaireux, tandis que les plages conductrice C2 et C3 représenteraient des alternances avec des zones de nature plus pélitique.
- Les données de tomographie électrique montrent également que la portion du socle hercynien imagée par le présent profil est affectée par deux failles sub-verticales notées F1 et F2 (Fig. III.85). La superposition avec les données géologiques permet de se rendre compte que l'accident F1 ne figure pas sur la carte géologique par contre la F2 coïncide avec le point d'intersection de deux failles existantes. Ce nœud structural confirmé par la géophysique pourrait receler un certain potentiel en matière de ressources hydriques souterraines (aquifère de fissures) d'autant plus qu'il coïncide aussi avec un axe gravimétrique négatif.

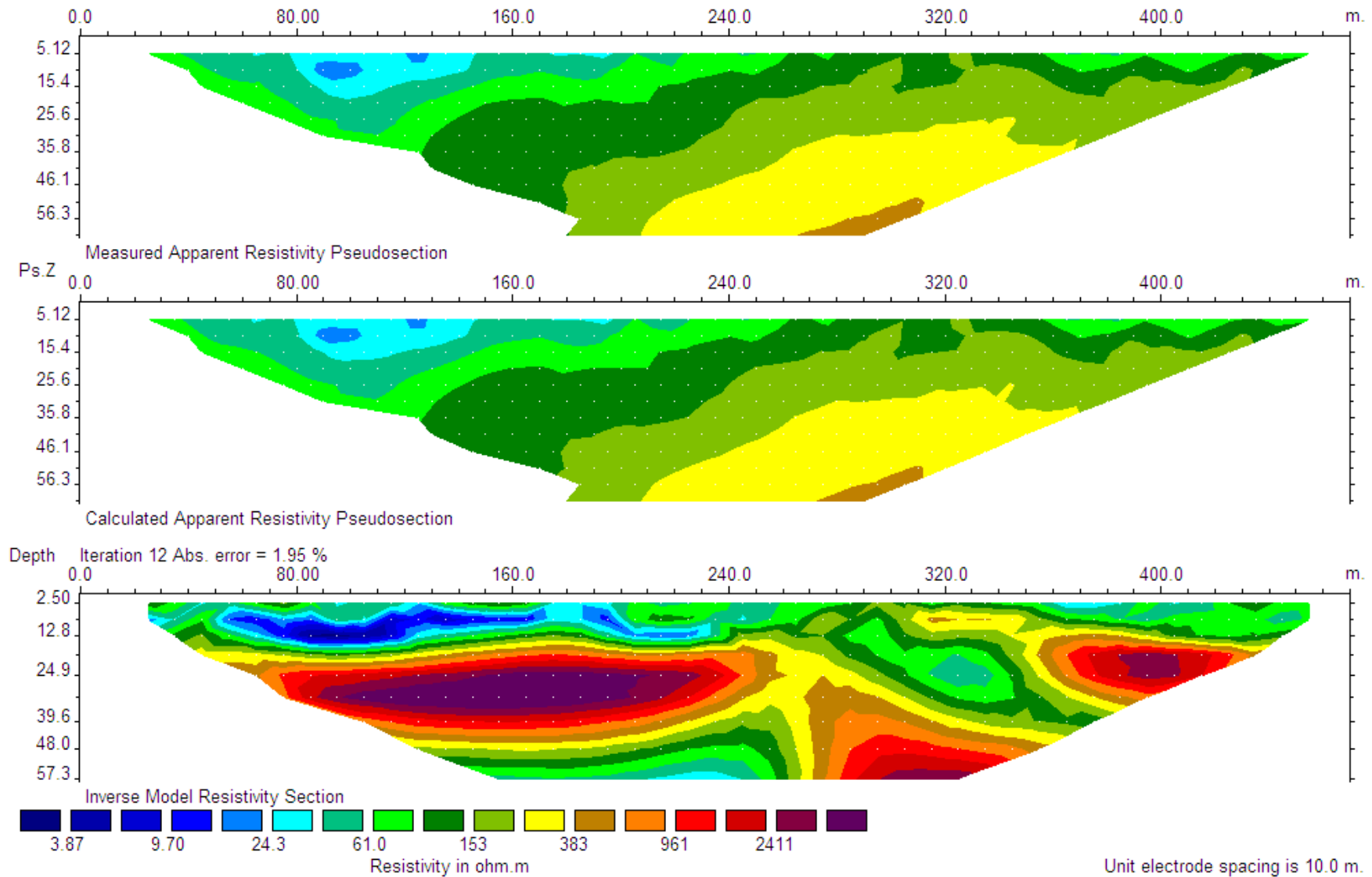


Figure III.84 : Pseudosections de la résistivité modélisée du profil réalisé dans le secteur de Benslimane

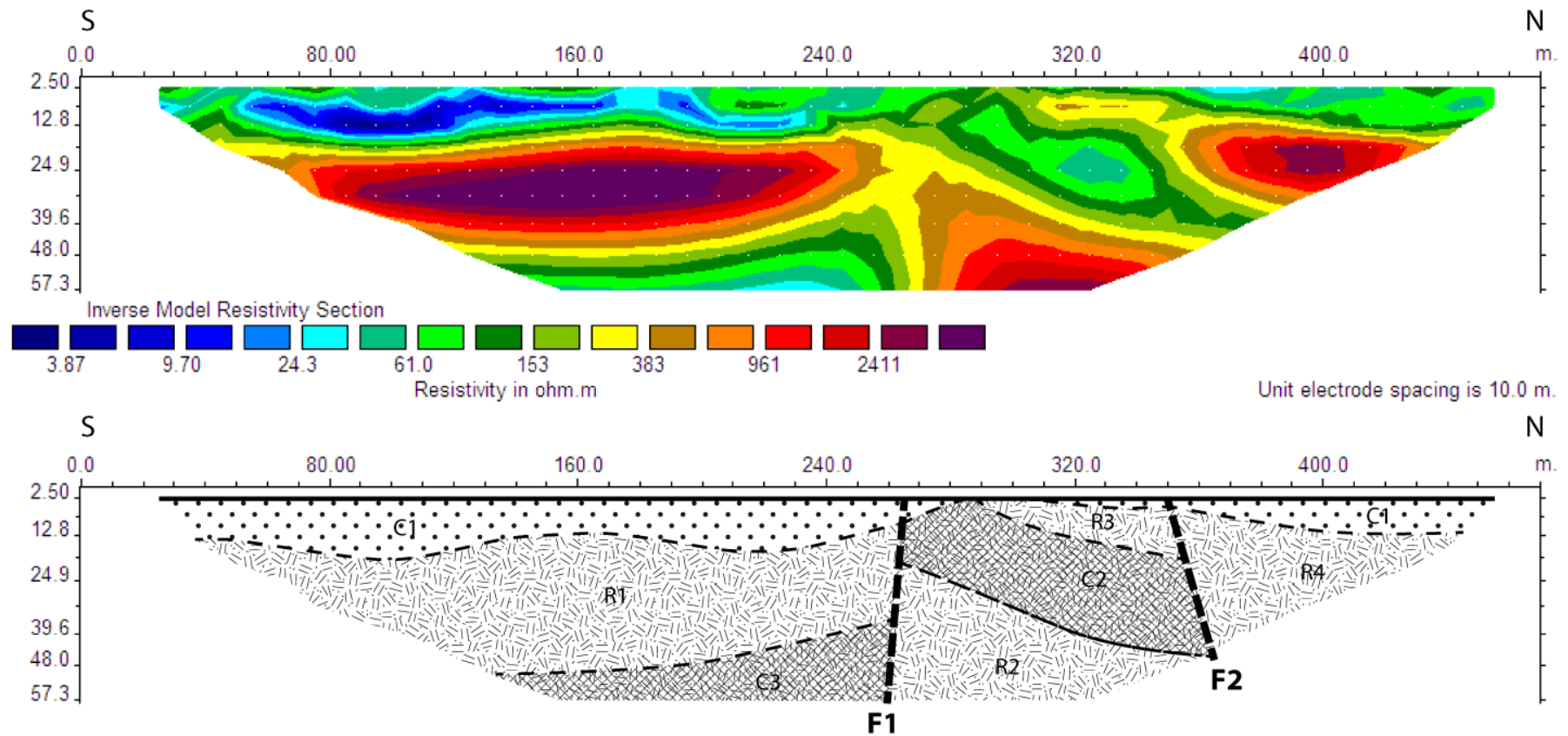


Figure III.85 : Interprétation des résultats du levé de tomographie électrique réalisé dans le secteur de Benslimane

III.2.5- Résonance magnétique des protons

La seconde méthode de prospection géophysique mise en œuvre dans le cadre de cette étude est le Sondage par Résonance Magnétique Protonique (RMP). L'application de cette méthode à l'étude hydrogéologique du secteur de Benslimane a été l'un des objectifs de notre étude, compte tenu de son caractère novateur et du fait qu'elle représente un outil directement sensible à la présence d'eau. La RMP constitue ainsi le complément idéal à l'approche géophysique classique.



Photo III.9 : Missions des levés RMP

III.2.5.1- Mise en œuvre sur le terrain

Nous avons expérimentée la méthode de la résonance magnétique des protons dans le secteur de Benslimane le 15 mai 2013, sur un site situé non loin de la zone où a eu lieu le levé de tomographie électrique.

Pour se faire, il a fallu mobiliser les moyens humains et techniques ci-dessous en utilisant l'équipement Numis Plus, afin de recouvrir une superficie d'un hectare.

- Personnels :
 - Professeur ingénieur en géophysique appliquée ;
 - Tuteur au niveau de l'organisme d'accueil ;
 - Doctorant chercheur en géologie minière ;
 - Doctorante chercheur en géophysique appliquée ;
 - Masterant chercheur en géophysique appliquée.
- Equipements :
 - Magnétomètre à proton;
 - Susceptibilimètre ;
 - Analyseur de bruit ;
 - Récepteur ;
 - Convertisseur continu/continu (24V à l'entrée 420V) pour notre boucle de 100m (on utilise deux convertisseurs pour une boucle de 150m) ;
 - Unité d'accord (Bloc de capacité) pour l'optimisation de l'énergie des impulsions d'excitation ;
 - Unité centrale (émetteur-récepteur) pour la génération des impulsions et la mesure des signaux ;

- Système d'acquisition relié au convertisseur, à l'ordinateur et au condensateur gérant la tension à envoyer ;
- Câble de 400 mètres de longueur utilisé en tant qu'antenne à la fois pour l'émission et la réception ;
- Ordinateur portable portant le système d'acquisition ;
- Deux batteries de 24V pour l'envoi du courant, une batterie pour la recharge de l'ordinateur.

La mise en œuvre sur le terrain du levé RMP s'effectue en deux étapes. La première étape a pour objectif d'étudier les conditions de faisabilité du levé RMP, la deuxième étape est de réaliser le levé RMP.

a. Etude des conditions de faisabilité du sondage RMP :

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

En pratique, pour étudier les conditions de faisabilité du sondage RMP, on installe en premier temps la boucle de mesure de la résonance magnétique des protons de 100 mètres de côté. Chaque câble de 100 mètres sera relié à un autre par des connecteurs (Fig. III.86). Sur l'aire de la boucle, on procède au mesurer du champ magnétique terrestre à l'aide d'un magnétomètre à proton afin de déterminer la fréquence de Larmor à utiliser lors des sondages RMP (Fig. III.87).



Figure III.86 : Connecteur des coins de la boucle

La démarche de mesure est de prendre les valeurs du champ magnétique terrestre au niveau des quatre coins et sur les deux diagonales de la boucle (cf. Annexe 2).

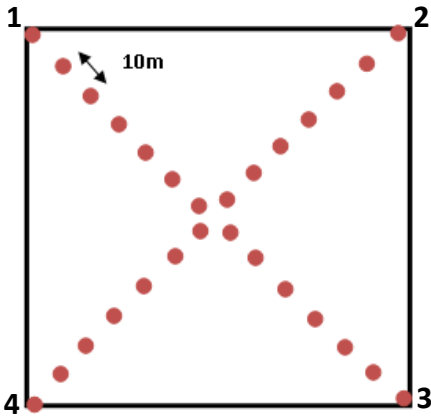


Figure III.87 : Représentation schématique des points de mesures du champ magnétique terrestre

Tableau III.17 : Coordonnées géographiques des coins de la boucle

Coins	Longitude X	Latitude Y	Élévation Z
1	W 8° 11' 36.8"	N 31° 51' 16.1"	434
2	W 8° 11' 38.9"	N 31° 51' 13.3"	432
3	W 8° 11' 41.7"	N 31° 51' 15.2"	427
4	W 8° 11' 39.7"	N 31° 51' 17.9"	429

L'ordre de grandeur du champ magnétique terrestre dans la région de Kettara est de 40675.9 nT, qui est proche de la moyenne de la ville de Marrakech (40600 nT), variant très peu à l'échelle de la zone de déploiement de la boucle (Fig. 90), au cours des mesures on a constaté que la stabilité de ce dernier au niveau de la boucle était de l'ordre +/- 2 nT, c'est-à-dire que nous pouvant passer aux autres mesures puisqu'on ne s'approcher pas de la condition de limite (variation de +/- 20 nT).

Tableau III.18 : Valeur moyenne du champ magnétique terrestre mesuré au coin de la boucle et sur ses diagonales

Emplacement	Coin 1	Coin 2	Coin 3	Coin 4	Diagonale 1	Diagonale 2
Valeur moyenne du champ magnétique terrestre (nT)	40 656	40 656.4	40 679.9	40 681.7	40 675.9	40 674.1

A partir du moyenne du champ magnétique mesuré on peut déterminer la fréquence de Larmor qu'on va utiliser lors du levé RMP :

$$f_L = 0.04258 * H_0$$

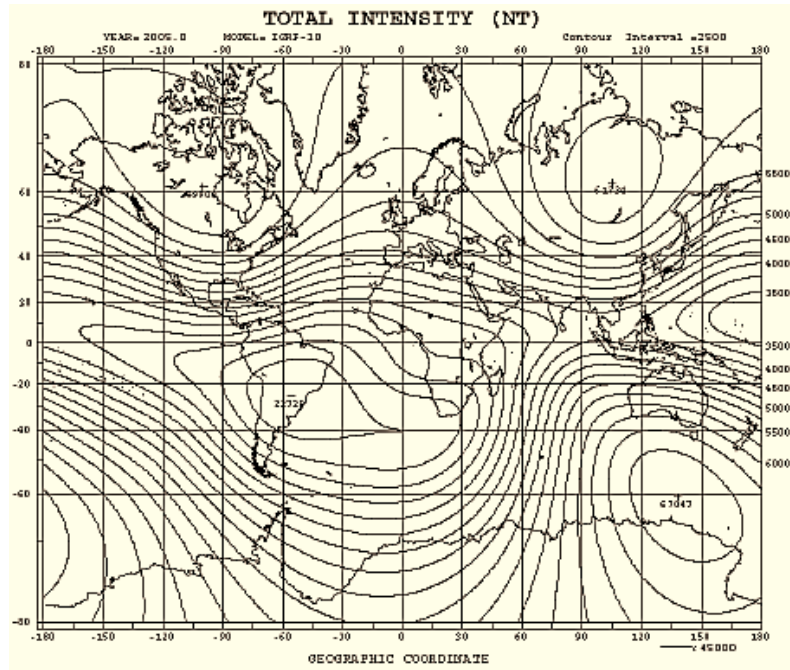


Figure III.88 : Intensité totale du champ géomagnétique en 2005 (en nT) au niveau de la mer, isolignes tous les 2500 nT, d'après l'IGRF

Mesure de la susceptibilité magnétique des roches :

Après avoir vérifié la stabilité du champ magnétique terrestre, on procède aux mesures de la susceptibilité magnétique des roches existantes dans l'aire d'étude.

D'après les résultats on constate que nous avons des légères variations de la susceptibilité magnétique des roches existantes et que son ordre de grandeur est $0.6 \cdot 10^{-3}$ unités SI. Cette valeur renseigne sur la possibilité d'appliquer la résonance magnétique des protons au niveau de la parcelle (cf. Annexe 3).

Tableau III.19: Valeur de la susceptibilité magnétique des roches au niveau des coins

Emplacement	Susceptibilité mesurée SI 10^{-3}
X ₁	0.7
X ₂	0.57
X ₃	0.65
X ₄	0.49

Mesure du bruit existant

Le bruit est un élément limite de la méthode des sondages de la résonance magnétique des protons. Pour cette fin, on prend les mesures au niveau des quatre coins et du centre en déplaçant la boucle du testeur d'analyse de 6.25 mètres de côté.

Pour déterminer la fréquence à utiliser au cours des mesures, on calcul la fréquence de Larmor à partir de la valeur du champ magnétique terrestre moyen de l'aire

On a $H_0 = 40675.9 \text{ nT}$, donc la fréquence de Larmor à utiliser est :

$$f_L = 0.04258 * H_0$$

$$f_L = 1731.98$$

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

Tableau III.20: Valeur du bruit mesuré

1500 Hz	2 μV	X1	X2	X3	X4
		0.234	0.233	0.233	0.235
2000 Hz	2 μV	0.235	0.231	0.233	0.232

L'ordre de grandeur du bruit est de $0.233\mu\text{V}$, il nous a renseignés sur le type de la boucle à installer (Fig. III.89). D'après ce diagramme on constate que la boucle à utiliser est de type circulaire.



Figure III.89 : Type des boucles à installer selon le niveau du bruit

b. Réalisation du levé de résonance magnétique des protons :

Pour la réalisation de ce levé RMP nécessite comme matériels : La boucle émettrice-réceptrice du signal, l'équipement NUMIS Plus et le logiciel d'acquisition.

Au cours des mesures, La boucle joue deux rôles qui sont l'envoi d'un courant électrique alternatif créant un champ magnétique oscillant à la fréquence de Larmor, et la réception de la réponse RMP. Puisque la boucle est déjà installée, on procède au montage des équipements suivant un ordre bien précis (Photo III.10 et Fig. III.90):

- Convertisseur - Unité centrale ;
- Boucle - Unité centrale ;
- Bloc de capacité - Unité centrale ;
- Récepteur - Unité centrale ;
- Récepteur - Batteries ;
- PC portable - Unité centrale.

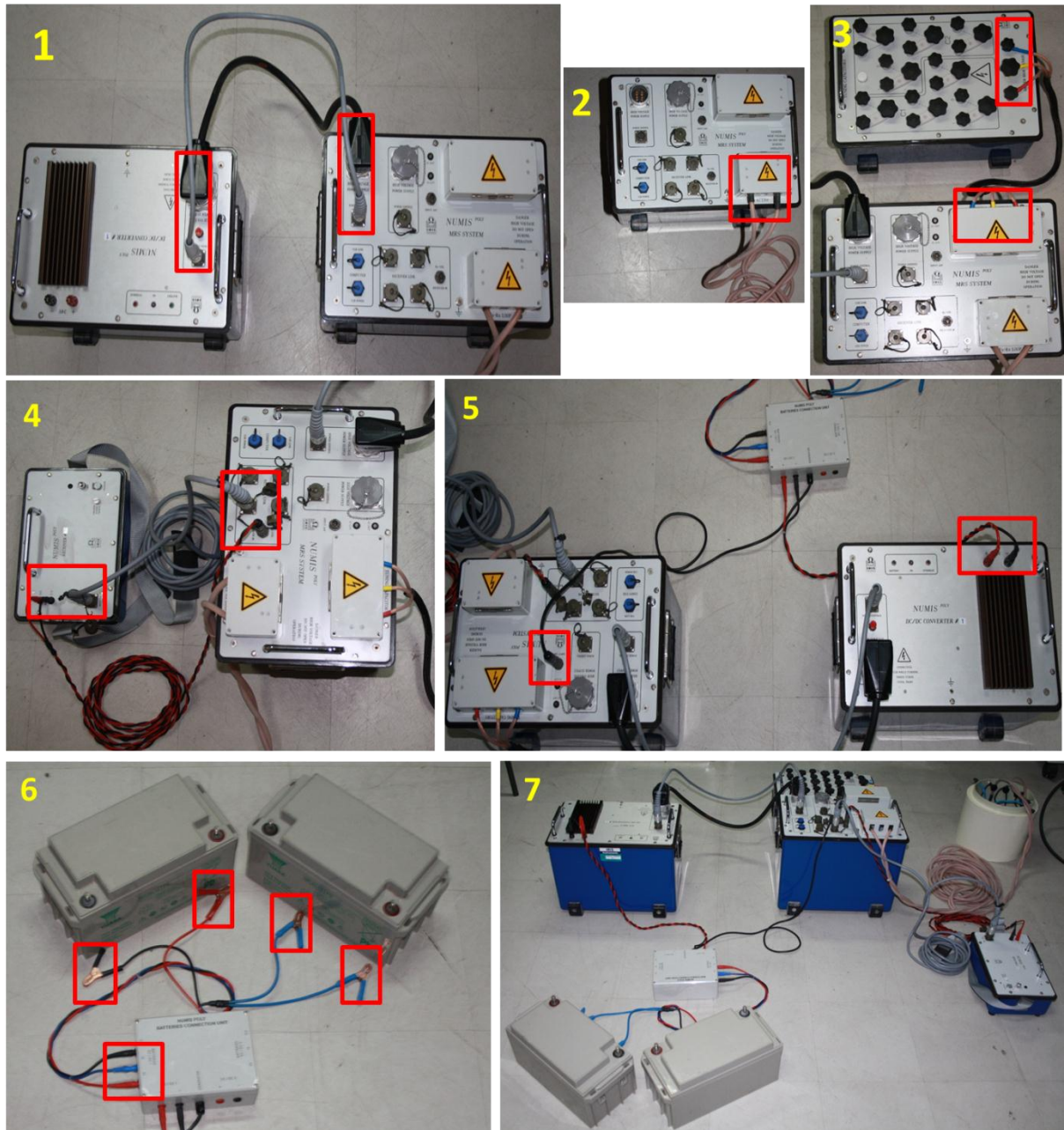


Photo III.10 : Etapes de montage des équipements NUMIS Plus

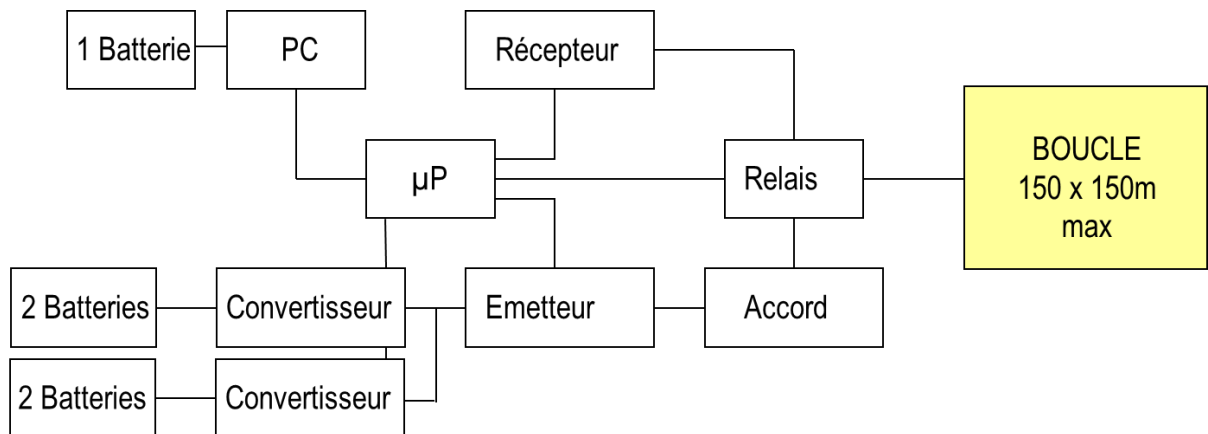


Figure III.90 : Diagramme de montage des équipements NUMIS Plus

Lorsque la communication PC – Système Numis est établie l'opérateur doit introduire les paramètres mentionnés au niveau de la figure ci-dessous sur le logiciel d'acquisition Prodiviner.

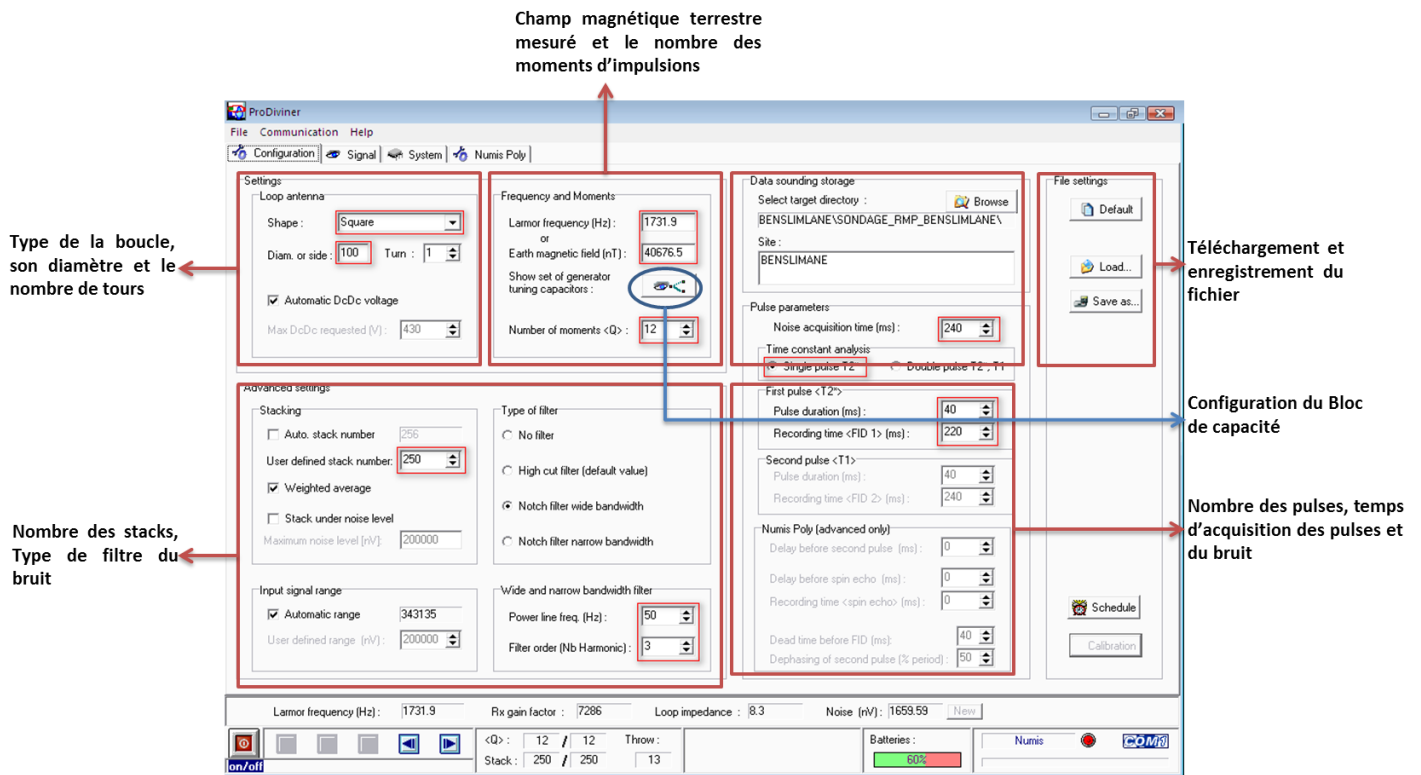


Figure III.91 : Paramètres configurés sur le logiciel Prodiviner

Quand le sondage RMP sera lancé, chaque paramètre configuré aura une signification :

- Le diamètre de la boucle renseigne sur la profondeur d'investigation. A savoir que ce dernier est en fonction aussi de la résistivité des terrains et du moment d'excitation (produit du courant primaire par sa durée d'injection).
- La durée d'enregistrement du signal reçu était prise par défaut 240 ms, mais il peut être comprise entre 240 ms et 1040 ms.
- Le nombre des moments d'impulsion, on a choisi 12 moments, ce paramètre permet une mesure plus détaillée puisque le nombre des moments indique la subdivision du volume investigué en plusieurs niveaux. La durée d'impulsion était de l'ordre de 240 ms avec un nombre de stacks de 250 afin d'augmenter le rapport signal bruit.
- L'option de filtration permet d'éliminer les signaux dont la valeur est un multiplicateur de la valeur déterminée par l'opérateur, on a choisi de filtre avec la valeur 50 Hz et ses multiplicateurs (100, 150...).
- Le pulse singulier permet de mesurer la constante du temps de décroissance du signal T_2^* qui est liée à l'environnement dans lequel se situent les protons. Les principaux facteurs qui vont influencer la constante de temps sont la taille moyenne de pores et l'inhomogénéité du champ statique. Plus la taille de s de la

roche est grande (porosité totale élevée), plus le temps de décroissance est long (Tableau III.21).

Tableau III.21 : Valeurs du temps de décroissance de quelques formations aquifères (Chalikakis, 2006)

Types de formations aquifères	Temps de décroissance T_2^* (ms)
Argiles sableuses	<30
Sables argileux, sables très fins	30-60
Sables fins	60-120
Sables moyens	120-180
Sables à gros grains et graveleux	180-300
Graviers	300-600
Eau libre	600-1000

Après l'introduction de l'ensemble des paramètres de configuration, on lance les mesures du sondage RMP. L'opérateur peut suivre l'acquisition des données par la courbe du signal émis par les protons (enveloppe sinusoïdale à décroissance exponentielle) et la courbe du bruit accumulée de même façon que le signal (Fig. III.92).

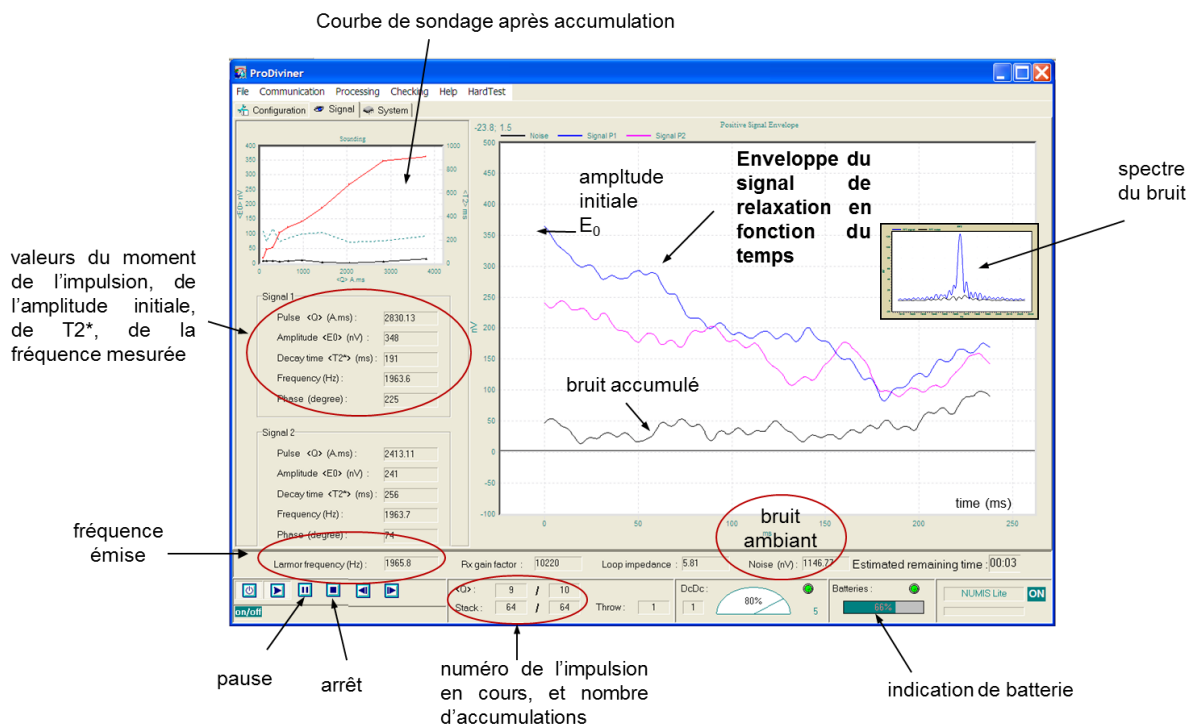


Figure III.92 : Courbes du signal et du bruit au cours de mesure et après accumulation

III.2.5.2- Traitement des données RMP

Le niveau élevé de bruit électromagnétique observé avec le testeur a été confirmé lors de l'acquisition des données à l'aide du logiciel Prodiviner. En effet, nous avons constaté que pour l'ensemble du sondage réalisé, la courbe du signal (en bleu) se superposait presque tout le temps à celle du bruit électromagnétique (en noir) comme le

montre la figure III.92. En effet, sur les quatre pulses que cette figure présente seul le pulse 5 semble montrer un faible signal RMP.

Le traitement de ces données avec le logiciel SAMOVAR a permis :

1. de représenter graphiquement les courbes RMP obtenues pour chaque pulse (Fig. III.94), la courbe globale du sondage illustrant la variation de l'amplitude initiale du signal en fonction du pulse (Fig. III.95) ;
2. d'effectuer l'inversion des données qui permet de calculer la distribution de la teneur en eau et de la perméabilité en fonction de la profondeur. Bien entendu ces résultats concernent le volume de roches investigué situé sous la boucle de mesure. Ils correspondent à une investigation 1D localisée au centre de la boucle. La modélisation inverse des données RMP nécessite une connaissance préalable de la résistivité du sous-sol au niveau de la zone prospectée. Les données de résistivité sont introduites sous forme d'une matrice qu'on doit calculer avant de lancer le logiciel d'inversion. Dans le cas de notre étude, on s'est basé sur les résultats du sondage électrique SJ31 et surtout sur le profil de tomographie électrique que nous avons réalisé à proximité du sondage RMP.

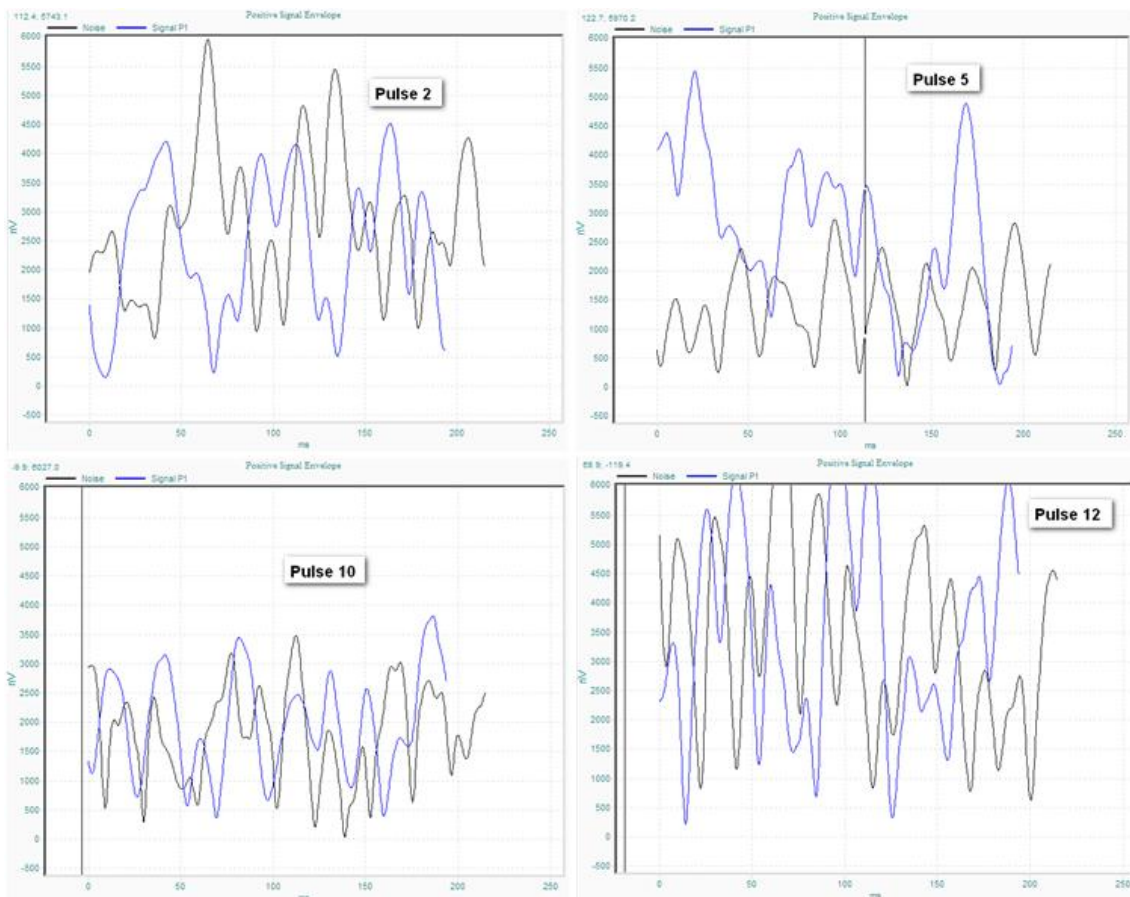


Figure III.93 : Résultats du sondage RMP au niveau de la région de Kettara près du Douar Benslimane

Comme nous l'avons signalé auparavant, le signal RMP enregistré a été malheureusement très perturbé par un bruit électromagnétique ambiant. L'amplitude moyenne de ce bruit variait au fur et mesure de la progression des mesures. Nous avons constaté que les rares pulse pour lesquels la courbe du signal commençait à s'écarter de celle du bruit est celui où ce bruit était le plus faible. C'est le cas du pulse 5 qui correspond à un niveau moyen du bruit de 707.9 nV (Fig. III.93) ou encore le pulse 3 avec un niveau de bruit de 661.1 nV. La plus forte valeur qui s'élève à 3223.5 nV a été observée au niveau du pulse 12. Cette première analyse des données brutes ainsi que les observations effectuées même lors de l'acquisition sur le terrain, laisse présager un sentiment de pessimisme quant aux résultats qu'on peut s'attendre de ce sondage RMP. Aucune courbe typique d'un signal RMP de forme exponentielle décroissante n'a pu être observée, à l'exception de celle du pulse 5 qui reste tout de même très affectée par le bruit. La courbe du sondage illustrée sur la figure III.95 montre aussi clairement l'aspect très bruité des données.

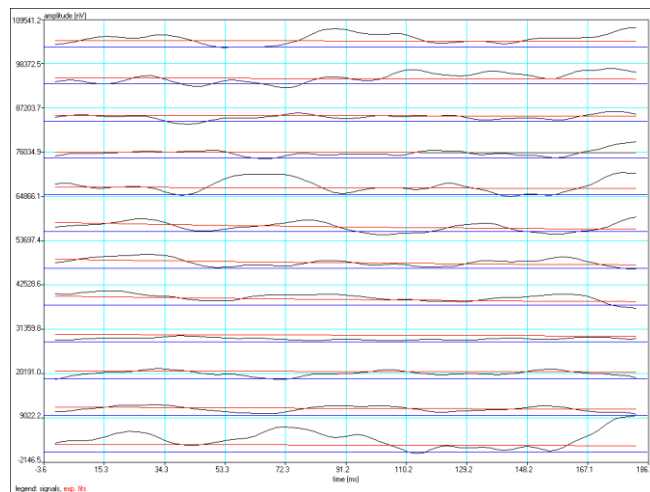


Figure III.94 : Signaux RMP enregistrés pour les douze impulsions utilisées.

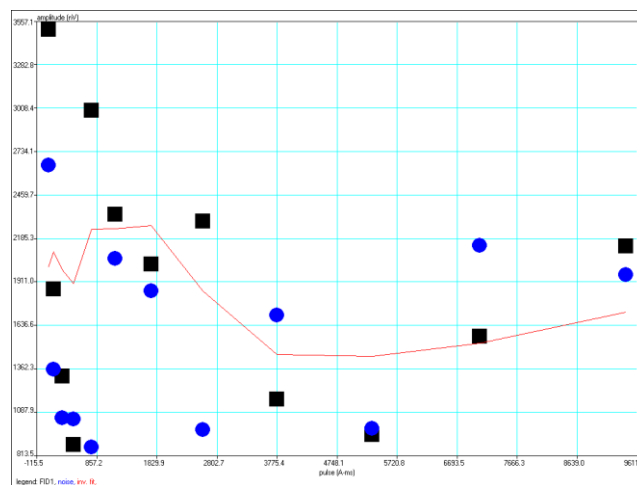


Figure III.95 : Courbe du sondage RMP réalisé dans le secteur de Benslimane.

Malgré ce bruit, nous avons essayé d'inverser les données à l'aide du logiciel SAMOVAR. Les résultats de cette inversion présentés sur la figure III.96 font part de la présence d'eau souterraine à trois niveaux différents avec des pourcentages qui dépassent les 100%, ce qui est évidemment complètement insensé. Vu les limites de filtrage du bruit du logiciel SAMOVAR, nous avons contacté un spécialiste de la RMP, en l'occurrence M. Konstantinos de l'université de Rouen, en lui demandant de tenter le traitement avec le logiciel plus performant NUMRUN qui n'est pas à notre disposition. La conclusion de M. Konstantinos c'est que les données sont très bruitées et non exploitables.

Ainsi, bien que l'expérimentation de la RMP sur le site de Benslimane n'a pas été très concluante, elle nous aura permis d'apprendre à utiliser cette technique sur le terrain, à traiter les données et réfléchir sur les aspects de leur interprétation, en espérant d'avoir l'occasion dans le future de l'appliquer de façon plus systématique sur le site de Benslimane ou ailleurs.

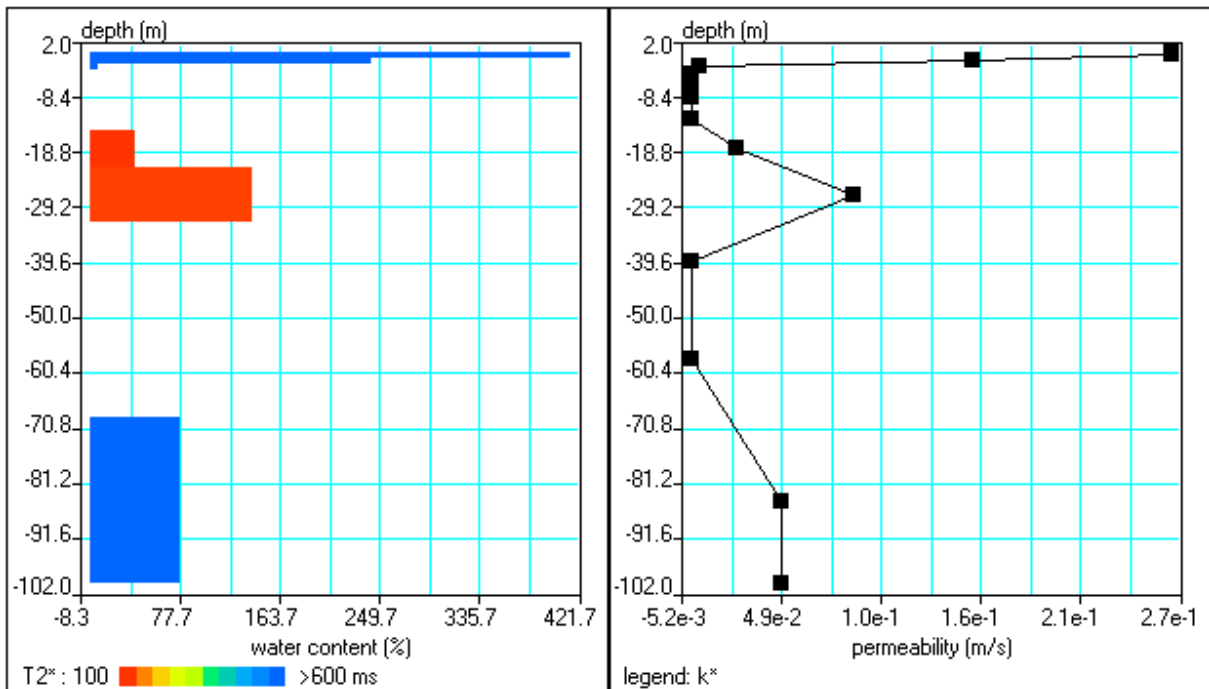


Figure III.96 : Résultats de l'inversion des données recueillies du sondage RMP de Benslimane.

CONCLUSIONS

Conclusions

Le climat semi-aride qui règne dans la région de Kettara et la succession des années de sécheresse qui a sévi lors des deux dernières décennies ont conduit à un déficit en ressources hydriques souterraines. Si on ajoute à cela, la qualité médiocre de ces ressources déterminée par les analyses physico-chimique et la surexploitation pour les besoins des populations locales et la nature géologique de cette zone (socle métamorphique), on se rend compte des difficultés auxquelles peut être confrontées les campagnes d'exploration de telles ressources.

Partant de ces considérations, nous avons mené une étude visant à contribuer à la mise en valeur du potentiel hydrique de cette région. Cette étude se base essentiellement sur l'apport des méthodes géophysique à la caractérisation de la structure du socle hercynien et à la connaissance de son hydrogéologie. Elle porte sur la réinterprétation des données géophysiques existantes (gravimétrie, magnétisme et sondages électriques verticaux) et l'acquisition de nouvelles données (tomographie électrique et résonance magnétique des protons).

Le traitement des données gravimétriques et leur interprétation basée notamment sur la technique d'analyse des contacts a permis de mettre en évidence un réseau de structures dont la plupart n'ont pas été observées auparavant et constitue un complément de la carte structurale existante sur laquelle sont également représentées les limites approximatives des anomalies gravimétriques négatives qui pourrait coïncider avec les zones de fortes épaisseur de l'aquifère d'altérites (Fig. III.78). De nouveaux éléments ont également été intégrés à cette carte suite à l'analyse des données magnétiques. Il s'agit de linéaments magnétiques et d'accidents qui les décalent.

Par ailleurs, la réinterprétation des données des sondages électriques disponibles a permis une caractérisation ponctuelle de la zone d'étude en se basant sur les variations verticales de la résistivité liées au phénomène d'altération. Les résultats obtenus mettent en évidence un modèle du sous-sol montrant typiquement la superposition de trois entités : un substratum saint à la base, une zone de schistes fracturés et une couche d'altérites, avec des variations latérales d'épaisseur qui concernent notamment l'augmentation de la profondeur des schistes saints du Sud-Est au Nord-Ouest. Les résultats de l'analyse des données de sondages électriques sont représentés sur la carte de synthèse (Fig. III.98)

La mise en œuvre d'un profil de tomographie électrique à quelques centaines de mètres du site minier de Kettara a permis l'obtention d'un modèle du sous-sol sous forme d'une coupe verticale montrant la distribution de la résistivité. Ce modèle met notamment en évidence deux failles s'enracinant jusqu'à une 60 mètres de profondeur. Celles-ci pourraient constituer des zones de drainage des eaux souterraines et sont par

conséquent de cibles potentielles pour la mise en place de forage hydraulique ou de puits.

Dans le cadre de cette étude, nous avons eu la possibilité d'expérimenter sur le site de Kettara, une technique moderne de prospection des eaux souterraines. Il s'agit de la Résonance Magnétique des Protons (RMP) qui permet de détecter directement les eaux souterraines en se basant sur la résonance des atomes d'hydrogènes. Le niveau très élevé du bruit électromagnétique ambiant régnant dans la zone d'étude a fortement affecté les mesures et n'a pas permis de d'obtenir de résultats exploitables.

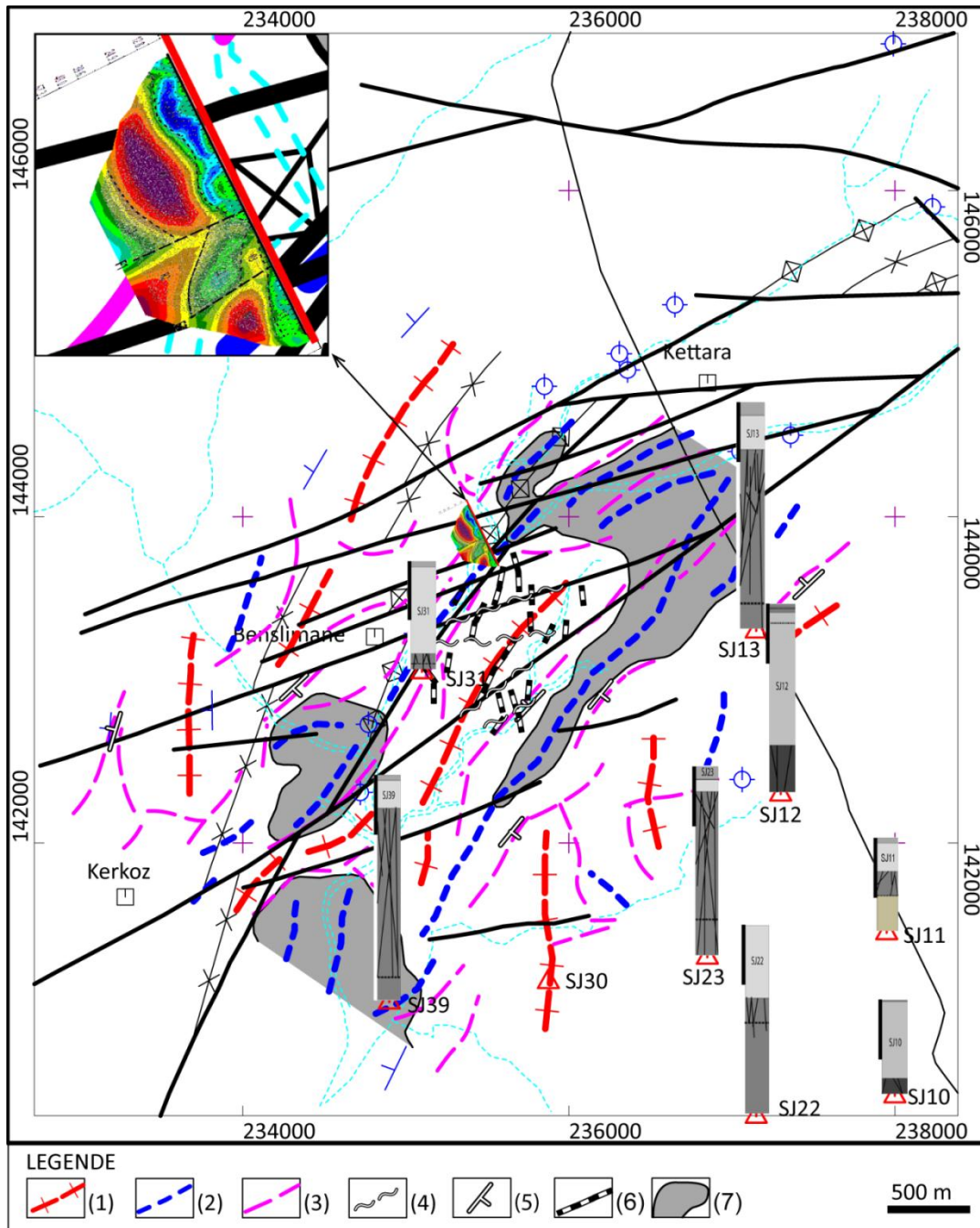


Figure III.97 : Carte de synthèse des résultats des différentes études géophysiques, 1. Axes des hauts de gravimétrie, 2. Axes des bas de gravimétrie, 3. Linéaments des analyses de contact, 4. Failles interprétées, 5. Direction de pendage, 6. Linéaments magnétique, 7. Zones magnétique.

Annexes

Annexe 1 : Protocole des analyses physico-chimiques

1. Dosage des sulfates (RODIER J. 1984) longueur d'onde 650 nm

- Principe :

Les sulfates sont précipités en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum. Le précipité ainsi obtenu est stabilisé à l'aide d'une solution de Tween 20 ou de polyvinyl-pyrrolidone. Les suspensions homogènes sont mesurées au spectromètre.

Réactifs :

- Solution d'acide chlorhydrique au 1/10.
- Solution de polyvinyl-pyrrolidone ou de Tween 20 à 25 %.
- Solution de chlorure de baryum stabilisée :
Chlorure de baryum ($\text{BaCl}_2, 2 \text{H}_2\text{O}$) 10 g
Solution de Tween 20 [polyoxyéthylène (20) sorbitan monolaurate]

- Etablissement de la courbe d'étalonnage :

On prépare dans 7 fioles jaugées (un essai témoin et six échantillons) dont les concentrations en NaSO_4 (solution d'étalon), sont : 0 ; 1 ; 3 ; 5 ; 7 ; 9 et 10. On ajoute 1 ml de HCl, 5 ml de BaCl_2 stabilisé et on termine avec de l'eau distillée jusqu'au 39 ml. On agite 2 ou 3 fois énergiquement les solutions. Après 15 minutes de repos, on agite à nouveau puis on remplit successivement la cuve et on fait la lecture au spectromètre. (Voir tableau).

Tableau IV.22 : les volumes utilisés pour préparer la solution étalon et les échantillons à mesurer

Numéro de fioles	T	I	II	III	IV	V	VI
Solution étalon de SO_4	0	1	3	5	7	9	10
Eau distillée	39	38	36	34	32	30	29
HCl 10%	1	1	1	1	1	1	1
Chlorure de baryum stabilisé	5	5	5	5	5	5	5
Correspondance mg/l de SO_4	0	3	9	15	21	27	30

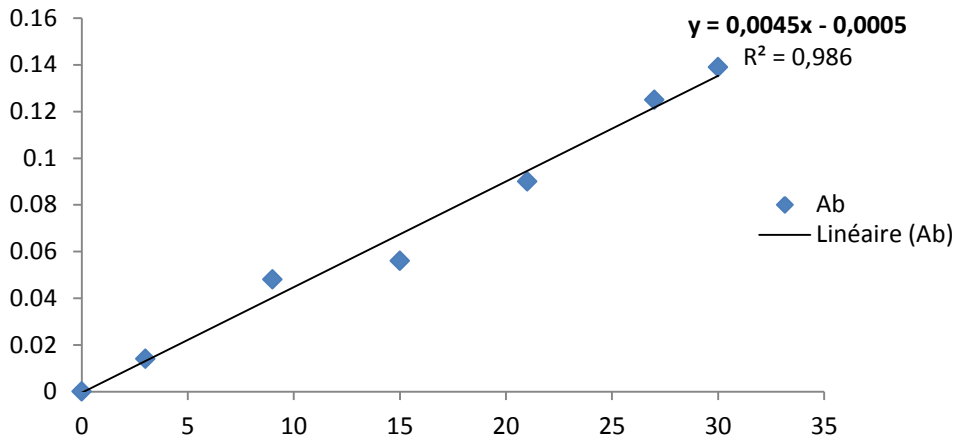


Figure IV.98 : Courbe d'étalonnage des sulfates

- Mode opératoire :
 - ✓ On va ajouter à l'eau étudiée les BaCl₂ : $BaCl_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2O + Ba^{2+}$
 - ✓ On fait passer en solution les ions de Ba²⁺ afin de les liés aux ions de SO₄²⁻ :

$$SO_4^{2-} + Ba^{2+} \rightarrow BaSO_4$$
 - ✓ On empêche la décantation en stabilisant la solution par l'ajout d'un adjuvant nommé Tween 20. Pour ne pas sous-estimer les résultats.
 - ✓ On ajoute HCl 10% Pour ne pas avoir du BaCO₃²⁻ dans la solution, ce qui donne des résultats surestimer.
 - ✓ Enfin, on va mesurer l'absorbance avec un spectrophotomètre.

- Résultats :

Tableau IV.23 : Résultats des analyses des sulfates

Echantillon	Absorbance	Facteur de dilution	SO ₄ ⁻ (mg/l)	MOYENNE	ECART TYPE
P2	0.191	1	29.80	29.87	0.11
	0.192	1	29.95		
P3	0.704	15	1647.36	1646.19	1.65
	0.703	15	1645.02		
P4	0.682	15	1595.88	1597.05	1.65
	0.683	15	1598.22		
P5	0.485	15	1134.9	1134.9	0
	0.485	15	1134.9		
P6	0.32	15	748.8	747.63	1.65
	0.319	15	746.46		
P7	0.208	15	486.72	486.72	0
	0.208	15	486.72		

2. Dosage des chlorures (AFNOR T90-014) Méthode de Mohr

- Principe :

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent.

Réactifs :

- Acide nitrique pur.
- Carbonate de calcium pur.
- Solution de chromate de potassium à 10 %.
- Solution de nitrate d'argent 0,1 N.

- Mode opératoire

Introduire 100 ml d'eau à analyser (préalablement filtrée si nécessaire). Ajouter 2 à 3 gouttes d'acide nitrique pur puis une pincée de carbonate de chaux et 3 gouttes de solution de chromate de potassium à 10 %.

Verser alors au moyen d'une burette la solution de nitrate d'argent jusqu'à apparition d'une teinte rougeâtre, qui doit persister 1 à 3 minutes. Soit V le nombre de millilitres de nitrate d'argent 0,1 N utilisés.

- Résultats :

Tableau IV.24 : Résultats des analyses des chlorures et de NaCl

Echantillon	volume versé	Cl ⁻ (mg/l)	MOYENNE (mg/l)	ECART TYPE	NaCl (mg/l)	MOYENNE (mg/l)	ECART TYPE
P2	0.6	85.2	94.67	8.20	140.4	156	13.51
	0.7	99.4			163.8		
	0.7	99.4			163.8		
P3	0.9	127.8	118.33	8.20	210.6	195	13.51
	0.8	113.6			187.2		
	0.8	113.6			187.2		
P4	0.8	113.6	113.6	0	187.2	187.2	0.00
	0.8	113.6			187.2		
	0.8	113.6			187.2		
P5	1.4	198.8	194.07	8.20	327.6	319.8	13.51
	1.3	184.6			304.2		
	1.4	198.8			327.6		
P6	1.3	184.6	194.07	8.20	304.2	319.8	13.51
	1.4	198.8			327.6		
	1.4	198.8			327.6		
P7	1	142	146.73	8.20	234	241.8	13.51
	1	142			234		
	1.1	156.2			257.4		

3. Dosage de N-NH₄ par bleu d'indophénol (AFNOR T90-015) longueur d'onde 630 nm

- Principe

En milieu alcalin et en présence de nitroprussiate qui agit comme un catalyseur, les ions ammonium traités par une solution de chlore pour les transformer en monochloramine (NH₂Cl) et de phénol donnent du bleu d'indophénol susceptible d'un dosage par spectrométrie d'absorption moléculaire.

- Mode opératoire

Introduire dans une fiole conique de 100 ml, 20 ml d'eau à analyser puis poursuivre le dosage comme pour la courbe d'étalonnage. Préparer de la même façon un témoin avec 20 ml d'eau déionisée. Effectuer les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 630 nm et tenir compte de la valeur lue pour le témoin. Se reporter à la courbe d'étalonnage.

- Résultats :

Tableau IV.25 : Résultats des analyses de l'ammonium

PUITS	Absorbance pour dilution de 10	NH ₄ ⁺ (mg/l)	MOYENNE (mg/l)	ECAT TYPE
P2	0.009	0.090	0.090	0.0002
	0.009	0.090		
P3	0.006	0.060	0.065	0.0069
	0.007	0.070		
P4	0.006	0.060	0.006	0.0002
	0.006	0.060		
P5	0.007	0.070	0.070	0.0002
	0.007	0.070		
P6	0.002	0.020	0.025	0.0070
	0.003	0.030		
P7	0.003	0.030	0.035	0.0070
	0.004	0.040		

4. Dosage de N-NO₂- diazotation (AFNOR T90-023) longueur d'onde 537 nm

- Principe :

Les nitrites sont déterminés par spectrométrie après diazotation avec la sulfanilamide et copulation avec la N-1 naphthyléthylènediamine.

Réactif spécial :

- acide phosphorique 100 ml
- sulfanilamide 40 g
- dichlorhydrate de N-1 naphthyléthylènediamine 20 g
- eau déionisée 1 000 m

- Résultats :

Tableau IV.26 : Résultats des analyses de nitrites

Echantillon	Absorbance	NO ₂ - (mg/l)	MOYENNE	ECART TYPE
P2	0.031	0.092	0.092	0
	0.031	0.092		
P3	0.02	0.060	0.075	0.02
	0.03	0.089		
P4	0.035	0.104	0.106	0.002
	0.036	0.107		
P5	0.02	0.060	0.058	0.002
	0.019	0.057		
P6	0.08	0.239	0.239	0
	0.08	0.239		
P7	0.035	0.104	0.106	0.002
	0.036	0.107		

5. Dosage de l'Alcalinité

À l'inverse de l'acidité, l'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité résulte le plus généralement à la présence d'hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes.

D'autres sels d'acides faibles peuvent aussi être dosés et interfèrent dans la mesure : acides humiques, phosphates, citrates, tartrates... La silice ionique peut aussi interférer notamment lorsque le pH est supérieur à 8,5.

On distingue comme pour la mesure de l'acidité, deux titres qui sont le titre alcalimétrique ou titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC).

- Principe

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré.

Réactifs :

Acide chlorhydrique ou sulfurique 0,02 N.

Solution de phénolphtaléine dans l'alcool à 0,5 % (voir acidité).

Solution de vert de bromocrésol et de rouge de méthyle

- Mode opératoire

- ✓ Détermination du TA

Prélever 100 ml d'eau à analyser dans une fiole conique. Ajouter 1 à 2 gouttes de solution alcoolique de phénol phtaléine. Une coloration rose doit alors se développer. Dans le cas contraire le TA est nul, (pH < 8,3) Verser ensuite doucement l'acide dans la fiole à l'aide d'une burette, en agitant constamment, et ceci jusqu'à décoloration complète de la solution (pH 8,3). Soit V le volume d'acide utilisé pour obtenir le virage.

- ✓ Détermination du TAC

Utiliser l'échantillon traité précédemment ou le prélèvement primitif s'il n'y a pas eu de coloration. Ajouter 2 gouttes de solution de vert de bromocrésol et de rouge de méthyle et titrer de nouveau avec le même acide jusqu'à disparition de la coloration bleu verdâtre et apparition de la couleur rose (pH 4,5). Le dosage doit être effectué rapidement pour réduire les pertes de CO₂ qui pourraient entraîner une élévation du pH de virage (voir ci-dessus).

Soit V' le volume d'acide 0,02 N versé depuis le début du dosage.

On note que tous les échantillons que nous avons analysés ont resté incolore après l'ajout du Phénolphtaléine, donc on passe au dosage du TAC qu'on va le calculer par la formule suivante:

$$\text{TAC (HCO}_3^- \text{ mg/l)} = \text{Volume versé d'HCl} * 40$$

- Résultats :

Tableau IV.27 : Résultats des analyses des Bicarbonates

Echantillon	Volume versé	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	MOYENNE	ECART TYPE
P2	5.6	224	226	2.83
	5.7	228		
P3	7	280	282	2.83
	7.1	284		
P4	6.5	260	262	2.83
	6.6	264		
P5	6.8	272	272	0
	6.8	272		
P6	5.5	220	218	2.83
	5.4	216		
P7	6.2	248	248	0
	6.2	248		

6. Dosage de la dureté totale par complexométrie

Tableau IV.28 : Résultats des analyses de la dureté totale

Echantillon	Volume versé	DT (mg/l de CaCO ₃)	MOYENNE	ECART TYPE
P2	4	160	158	2.83
	3.9	156		
P3	17.5	700	700	0
	17.5	700		
P4	17.4	696	698	2.83
	17.5	700		
P5	6.6	264	266	2.83
	6.7	268		
P6	10.5	420	418	2.83
	10.4	416		
P7	6	240	242	2.83
	6.1	244		

Annexe 2 : Manuel d'utilisation du Magnétomètre à proton G 856 Magnétomètre à proton

Procédure de mesure

1. Installation de l'équipement :

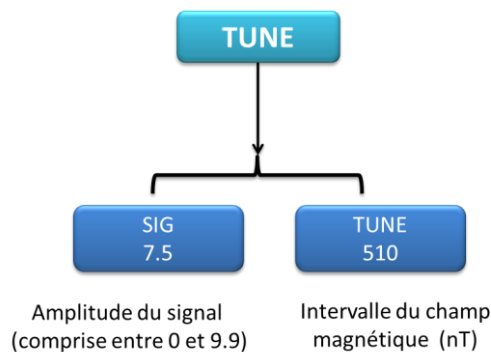
La première des choses à vérifier avant d'aller sur terrain c'est l'état des batteries, la quantité de l'huile au niveau du détecteur et aussi avoir une idée sur la valeur moyenne du champ magnétique de la ville.

Pour commencer les mesures on va monter l'appareil, en connectant le détecteur à l'unité principale après avoir le relié au tube porteur.

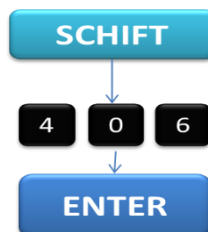
2. Calibration de l'appareil de mesure :

Le calibrage est une étape fondamentale pour déterminer si les valeurs mesurées sont réelles et incluses dans l'intervalle du champ magnétique de l'aire étudiée, les étapes à suivre sont :

- ✓ On clique sur **TUNE** une clique pour savoir l'amplitude du signal qui doit être comprise entre 0.0 et 9.9, une autre clique pour déterminer l'intervalle du champ magnétique (nT) attribuée lors de la dernière mission.



- ✓ Pour introduire un nouvel intervalle du champ magnétique (nT), On clique sur **SCHIFT** et on entre la valeur voulu et on clique **ENTER**. (exemple le champ magnétique terrestre à Marrakech est 40 600 nT).

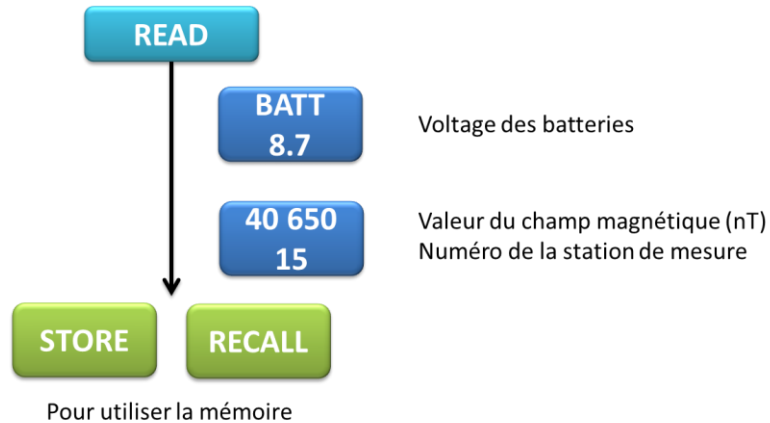


- ✓ La dernière étape est de vérifier si l'amplitude du signal est assez élevée pour prendre des mesures en cliquant **TUNE**.

3. Mesure sur terrain :

La réception des mesures se fait après avoir vérifié l'état des batteries qui est un voltage de 8.7 V, et qui doit être supérieur à 7.5 V pour commencer les mesures.

On clique **READ** deux fois, une pour savoir l'état des batteries et une autre pour lancer la mesure.



La mémorisation des résultats obtenus sur terrain se fait en cliquant **STORE** puis **RECALL**.

NB : le champ magnétique terrestre mesuré doit être stable d'une station à l'autre en ne dépassant pas +/- 20 nT.

Annexe 3: Manuel d'utilisation du Susceptibilimètre MAGNETIC SUSCEPTIBILITY-METER SM-20

La susceptibilité magnétique des roches est le rapport de l'aimantation produite dans la roche au champ magnétique terrestre, qu'on va la mesurer à l'aide de l'instrument **Magnetic susceptibility meter- SM 20**.



1. Mesure de la susceptibilité magnétique des roches

a. Mesures instantanées :

- Allumer l'appareil : cliquer sur **Memory/On**
- Placer l'appareil sur la roche dont on veut mesurer le champ
- Cliquer sur **Measure/Off** légèrement, il affichera des tirets « --- » puis une valeur X précédée de la lettre r « **r X** », la valeur X signifiant le nombre attribué à la mesure.
- Immédiatement après la valeur X affichée, placer l'appareil loin de la surface de la roche (plus que 30 cm), et cliquer une autre fois sur la touche **Measure/Off** légèrement (pour des mesures de références, il s'affichera une autre fois des tirets « --- » suivi de la valeur de la susceptibilité magnétique de la roche (en 10^{-3} SI).

b. Mesures continues :

- Allumer l'appareil : cliquer sur **Memory/On** ;
- Placer l'appareil sur la roche dont on veut mesurer le champ ;
- Cliquer sur la touche **Measure/Off** longuement puis la touche **Memory/On** légèrement, au niveau de l'écran le mot « **Cont** » s'affiche signifiant que les mesures que vous allez les prendre dorénavant sont des mesures continues;
- Placer l'appareil loin de la roche (plus de 30 cm) et cliquer sur la touche **Measure/Off** légèrement.

L'acquisition des données commencera après ces étapes et l'appareil affichera les valeurs de la susceptibilité magnétique (en 10^{-3} SI) chaque seconde, c'est-à-dire plus que 60 lectures va être mesurées, à ce niveau vous pouvez placer l'appareil sur les roches que vous voulez mesurer leur susceptibilité. Pour arrêter les mesures on clique la touche **Measure/Off**.

2. Stockage et suppression des données

✓ **Stockage** : La mémoire de l'appareil permet d'enregistrer plus que 120 répertoires contenant les mesures récoltées sur terrain, pour activer cette option on

clique sur la touche **Memory/On** après les mesures, où il s'affichera « **r X** » dont la lettre **X** signifié le nombre du répertoire d'enregistrement.

✓ **Suppression** : tenir longuement la touche **Memory/On** puis la touche **Measure/Off** pour une durée d'un peu près 5 secondes, au niveau de l'écran s'affichera le mot « **Clr** » signifiant (Clear = vider).

Ensuite, cliquer sur la touche **Memory/On**, il affichera « **Done** » signifiant que la suppression des données a été effectuer.

3. Les messages d'erreur

Message	Signification
Err	Vous avez pris beaucoup du temps entre deux étapes
bt	Batterie faible (low battery)
FL	Mémoire pleine (full memory)
OL	Surcharge (overload)

Noté Bien :

- Pour allumer l'appareil cliquer légèrement sur la touche **Memory/On** ;
- Pour éteindre l'appareil cliquer longuement sur la touche **Measure/Off** ;
- pour minimiser la perte de charge l'appareil s'éteint automatiquement après 2min de non utilisation ;
- la durée de vie de la batterie est typiquement 160 heures.

Annexe 4 : Liste des figures, des photos et des tableaux

Liste des figures

Figure I.1 : Situation générale du massif des Jebilets sur la carte du domaine structural méséto-atlasique du Maroc (Huvelin, 1977).....	14
Figure I.2 : situation géographique du secteur étudié (image satellite traitée sous Global mapper).....	15
Figure I.3 : Carte des domaines structuraux du Maroc (Michard, 1976).....	18
Figure I.4 : Situation du massif Hercynien des Jebilets (d'après Maier et <i>al.</i> , 1988, modifiée)	19
Figure I.5 : Carte géologique des Jebilet centrales (Huvelin, 1977).....	20
Figure I.6 : Répartition des zones bioclimatiques au Maroc (EMBERGER, 1955 ; <i>in</i> BENABID, 1988).....	23
Figure I.7 : Précipitation mensuelle en (mm) de l'an 2011 (donnée ABHT, 2013).....	23
Figure I.8 : a) Humidité moyenne annuelle de 1998 jusqu'à 2011, b) Humidité moyenne mensuelle de l'an 2011 ; déclarée par la station Abadla (Données ABHT, 2013).....	24
Figure I.9 : a) Température moyenne annuelle depuis 1998 jusqu'au 2011, b) Température moyenne mensuelle de 2011 de la station Abadla (Données ABHT, 2013).....	25
Figure I.10 : a) Evaporation totale annuelle mesurée de 1998 jusqu'à 2011 par Bac Colorado en (mm) et PICHE en (ml), b) Evaporation totale mensuelle de 2011 mesurée par Bac Colorado en (mm) et PICHE en (ml) ; Station Abadla (Données ABHT, 2013).....	26
Figure I.11 : a) Vitesse moyenne annuelle du vent en m/s de 1998 jusqu'à 2011, b) Vitesse moyenne mensuelle du vent de l'an 2011 ; déclarée par la station Abadla (Données ABHT, 2013).....	27
Figure I.12 : Réseau hydrographique de la région de Kettara avec l'attribution de la classification de Strahler.....	28
Figure II.13 : Relation entre la transmissivité et le débit d'exploitation théorique (Vouillamoz, 2003)	33
Figure II.14 : Carte géologique simplifiée du synclinorium Kettara mettant en évidence les trois coupes géologiques réalisées par HATHOUTI (MAIER et EL HAKKOUR, 1984 ; <i>in</i> HATHOUTI, 1990)	34
Figure II.15 : Coupe AB montrant la structure de l'aquifère du secteur d'étude (MAIER et EL HAKKOUR, 1984 ; <i>in</i> HATHOUTI, 1990).....	35
Figure II.16 : Emplacement des sondages électriques réalisés par Guessous en 1996.....	37
Figure II.17 : Carte piézométrique du secteur d'étude montrant la répartition spatiale des puits.....	41
Figure II.18 : Localisation des puits échantillonnés.....	42
Figure II.19 : Variations du pH de l'amont vers l'aval du bassin.....	43
Figure II.20 : Variations de la conductivité de l'amont vers l'aval	44
Figure II.21 : Variation des teneurs en SO_4 de l'amont vers l'aval du Bassin.....	45
Figure II.22 : Carte de distribution des sulfates au niveau de l'aire d'étude.....	46
Figure II.23 : Variation des teneurs Cl^- de l'amont vers l'aval du bassin	47
Figure II.24 : Variation des teneurs de NaCl de l'amont vers l'aval du bassin.....	47
Figure II.25 : Carte de distribution des chlorures au niveau de l'aire d'étude.....	47
Figure II.26 : Variation de l'ammonium de l'amont vers l'aval du bassin	48
Figure II.27 : Comparaison entre les teneurs en ammonium et le pH.....	48
Figure II.28 : Carte de distribution des ammoniums au niveau de l'aire d'étude.....	49
Figure II.29 : Variation du nitrite de l'amont vers l'aval.....	49
Figure II.30 : Carte de la distribution des nitrites au niveau de l'aire d'étude.....	50
Figure II.31 : Variation des bicarbonates de l'amont vers l'aval.....	50
Figure II.32 : Carte de la distribution des bicarbonates au niveau de l'aire d'étude	51
Figure II.33 : Variation de la dureté totale de l'amont en aval.....	51
Figure II.34 : Carte de la distribution de la dureté totale au niveau de l'aire d'étude.....	52
Figure II.35 : Répartition des puits sur le diagramme de piper suivant la nature des faciès.....	52
Figure III.36 : Principe des mesures gravimétriques. a) Modèle géologique montrant une structure de densité ρ_1 encaissée dans un matériel de densité plus élevée ρ_2 . b) L'hétérogénéité de densité engendre des variations latérales de l'attraction de pesanteur qui se traduit par une anomalie gravimétrique (c). (Klaus Knödel et al. 2007).....	55
Figure III.37 : Représentation d'une anomalie gravimétrique provoquée par un contact vertical et de son gradient horizontal.....	57

Figure III.38 : Représentation schématique du vecteur champ magnétique.....	58
Figure III.39 : Nature dipolaire du champ magnétique terrestre.....	59
Figure III.40 : Variation de la forme des anomalies magnétiques en fonction de l'inclinaison du vecteur champ magnétique terrestre.....	59
Figure III.41 : Mise en œuvre d'un levé magnétique.....	60
Figure III.42 : Illustration schématique de la réduction au pôle. 1) Anomalie magnétique provoquée par un dyke vertical à une latitude moyenne ($I=45^\circ$). 2) Résultat de la réduction au pôle de la même anomalie.	62
Figure III.43 : Illustration du principe général de la prospection électrique	63
Figure III.44 : Disposition générale des électrodes de courant A et B et de potentiel M et N.....	64
Figure III.45 : Dispositif Schlumberger	65
Figure III.46 : Schéma d'un dispositif Wenner	65
Figure III.47 : Etablissement d'une pseudosection dans le cas d'un dispositif multi-électrodes mis en œuvre en configuration Wenner.	66
Figure III.48 : Illustration du principe d'un sondage RMN.....	67
Figure III.49 : Appareillage de la résonance magnétique des protons.....	68
Figure III.50 : Illustration schématique du principe de la méthode RMN : l'émission d'une impulsion d'excitation (en rouge) est suivie de la réception d'un signal de relaxation (en bleu) après une courte période de temps mort.....	68
Figure III.51 : Carte de l'anomalie de Bouguer (1), Carte gravimétrique (anomalies régionales) (2) de la région de Benslimane.....	69
Figure III.52 : Carte gravimétrique (anomalies résiduelles) de la région de Benslimane.....	70
Figure III.53 : Superposition des données géologiques et des axes gravimétriques à la carte du gradient vertical des anomalies résiduelles	71
Figure III.54 : Superposition des logs géoélectriques des sondages réalisés dans le secteur Benslimane (données Guessous, 1996) à la carte des anomalies résiduelles (données Hathouti, 1990).....	72
Figure III.55 : Cartes gravimétrique résiduelle du secteur de Benslimane et ses prolongements vers le haut aux altitudes de 100, 250 et 500 m.....	73
Figure III.56 : Contacts gravimétriques obtenus à partir des maxima du gradient horizontal calculé pour la carte d'anomalies résiduelle et pour ses prolongements vers le haut 100 m, 250 m et 500 m.....	74
Figure III.57 : Schéma structural de la zone d'étude complété par les linéaments gravimétriques, 1. Axes des hauts de gravimétrie, 2. Axes des bas de gravimétrie, 3. Linéaments des analyses de contact, 4. Failles interprétées, 5. Direction de pendage.....	75
Figure III.58 : Localisation de la prospection magnétique au niveau du secteur de Benslimane	76
Figure III.59 : Cartes magnétique du secteur de Benslimane. Champ total (à gauche) et réduction au pôle (à droite).	78
Figure III.60 : Cartes magnétique du secteur de Benslimane. Gradient vertical (à gauche) et interprétation (à droite).	78
Figure III.61 : Schéma structural de la zone d'étude complété par les linéaments magnétiques, , 1. Axes des hauts de gravimétrie, 2. Axes des bas de gravimétrie, 3. Linéaments des analyses de contact, 4. Failles interprétées, 5. Direction de pendage, 6. Linéaments magnétique.	79
Figure III.62 : Sondage paramétrique SJ 12 interprété à l'aide du logiciel ELEC (Guessous, 1996).....	80
Figure III.63 : Localisation des sondages électriques situés au niveau de la région de Kettara (extrait de la carte de Jbel Sarhlef 1/50000).....	82
Figure III.64 : Allure du sondage électrique SJ12.....	83
Figure III.65 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ12	84
Figure III.66 : Allure du sondage électrique SJ10.....	84
Figure III.67 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ10	85
Figure III.68 : Allure du sondage électrique SJ11.....	85
Figure III.69 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ11	86
Figure III.70 : Allure du sondage électrique SJ13.....	86
Figure III.71 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ13	87
Figure III.72 : Allure du sondage électrique SJ22.....	87
Figure III.73 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ22	88
Figure III.74 : Allure du sondage électrique SJ23.....	88

Figure III.75 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ23	89
Figure III.76 : Allure du sondage électrique SJ31.....	89
Figure III.77 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ31	90
Figure III.78 : Allure du sondage électrique SJ39.....	90
Figure III.79 : Interprétation géo-électrique du sondage électrique SJ39	91
Figure III.80 : Schéma récapitulatif de Gravimétrie, du Magnétisme et des Sondages électriques, 1. Axes des hauts de gravimétrie, 2. Axes des bas de gravimétrie, 3. Linéaments des analyses de contact	92
Figure III.81 : Localisation du profil du levé tomographique réalisé.....	93
Figure III.82 : Création des séquences et des câbles sous le logiciel ELECTRE	94
Figure III.83 : Pseudosection prévue pour les mesures sur terrain	94
Figure III.84 : Pseudosections de la résistivité modélisée du profil réalisé dans le secteur de Benslimane....	98
Figure III.85 : Interprétation des résultats du levé de tomographie électrique réalisé dans le secteur de Benslimane.....	99
Figure III.86 : Connecteur des coins de la boucle.....	101
Figure III.87 : Représentation schématique des points de mesures du champ magnétique terrestre	102
Figure III.88 : Intensité totale du champ géomagnétique en 2005 (en nT) au niveau de la mer, isolignes tous les 2500 nT, d'après l'IGRF	103
Figure III.89 : Type des boucles à installer selon le niveau du bruit.....	104
Figure III.90 : Diagramme de montage des équipements NUMIS Plus.....	105
Figure III.91 : Paramètres configurés sur le logiciel Prodiviner	106
Figure III.92 : Courbes du signal et du bruit au cours de mesure et après accumulation	107
Figure III.93 : Résultats du sondage RMP au niveau de la région de Kettara près du Douar Benslimane	108
Figure III.94 : Signaux RMP enregistrés pour les douze impulsions utilisées.....	109
Figure III.95 : Courbe du sondage RMP réalisé dans le secteur de Benslimane.....	109
Figure III.96 : Résultats de l'inversion des données recueillies du sondage RMP de Benslimane.....	110
Figure III.97 : Carte de synthèse des résultats des différentes études géophysiques, 1. Axes des hauts de gravimétrie, 2. Axes des bas de gravimétrie, 3. Linéaments des analyses de contact, 4. Failles interprétées, 5. Direction de pendage, 6. Linéaments magnétique, 7. Zones magnétique.....	113
Figure IV.98 : Courbe d'étalonnage des sulfates.....	116

Liste des photos

Photo II.1 : Schistes de Sarhlef aux alentours du Douar Benslimane.....	38
Photo II.2 : Filons de quartz laiteux près du Douar Benslimane	38
Photo II.3 : Fracturation de direction N150 sur le socle hercynien près du Douar Benslimane	39
Photo II.4 : Mallette des analyses physico-chimique <i>in-situ</i>	44
Photo II.5 : Spectrophotomètre.....	45
Photo III.6 : Dispositif Syscal Junior Switch-48 utilisé pour les mesures de la tomographie.....	95
Photo III.7 : Electrode, Connecteur et le Câble de mesure.....	95
Photo III.8 : Téléchargement du fichier crée sous Electre contenant la séquence et le câble à utiliser	96
Photo III.9 : Missions des levés RMP.....	100
Photo III.10 : Etapes de montage des équipements NUMIS Plus	105

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Caractéristiques hydrodynamiques des deux réservoirs de la région de Kettara	30
Tableau II.2 : Paramètres hydrauliques calculés à partir de quelques ouvrages du socle des Jebilet.....	31
Tableau II.3 : Mesures piézométriques de quelque puits sur une partie du bassin versant étudié.....	40
Tableau III.4 : Grandeurs mesurées par la RMP et paramètres hydrogéologiques associés	67
Tableau III.6 : Coordonnées Lambert de quelques sondages électriques (Guessous, 1996).....	81
Tableau III.5 : Coordonnées Lambert et caractéristique du forage mécanique SP 1924 (DRH-Marrakech ; <i>in</i> Guessous, 1996)	81
Tableau III.7 : Résistivités réelles des différentes formations issues des résultats des sondages paramétriques et les forages mécaniques (Guessous, 1996).....	81

Tableau III.8 : Résultats d'interprétation du sondage électrique SJ12 par RESIX Plus.....	83
Tableau III.9 : Résultats d'interprétation du sondage électrique SJ10 par RESIX Plus.....	84
Tableau III.10 : Résultats d'interprétation du sondage électrique SJ11 par RESIX Plus.....	85
Tableau III.11 : Résultats de l'interprétation du sondage électrique SJ13 par RESIX Plus.....	87
Tableau III.12 : Résultats de l'interprétation du sondage électrique SJ22 par RESIX Plus.....	88
Tableau III.13 : Résultats de l'interprétation du sondage électrique SJ23 par RESIX Plus.....	89
Tableau III.14 : Résultats de l'interprétation du sondage électrique SJ31 par RESIX Plus.....	90
Tableau III.15 : Résultats de l'interprétation du sondage électrique SJ39 par RESIX Plus.....	91
Tableau III.16 : Coordonnées géographique des coins de la boucle.....	102
Tableau III.17 : Valeur moyenne du champ magnétique terrestre mesuré au coin de la boucle et sur ses diagonales.....	102
Tableau III.18 : Valeur de la susceptibilité magnétique des roches au niveau des coins.....	103
Tableau III.19 : Valeur du bruit mesuré.....	104
Tableau III.20 : Valeurs du temps de décroissance de quelques formations aquifères (Chalikakis, 2006).....	107
Tableau IV.21 : les volumes utilisés pour préparer la solution étalonne et les échantillons à mesurer.....	115
Tableau IV.22 : Résultats des analyses des sulfates.....	116
Tableau IV.23 : Résultats des analyses des chlorures et de NaCl.....	117
Tableau IV.24 : Résultats des analyses de l'ammonium.....	118
Tableau IV.25 : Résultats des analyses de nitrites.....	119
Tableau IV.26 : Résultats des analyses des Bicarbonates.....	121
Tableau IV.27 : Résultats des analyses de la dureté totale.....	121

Référence bibliographique

- AARAB E. M., (1984) – Mise en évidence du caractère cogénétique des roches magmatique basiques et acides dans la série volcano-Sédimentaire de Sarhlef (Jebilets, Maroc hercynien). Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Nancy.
- AARAB E. M., (1995) – Genèse et différenciation d'un magma tholeïtique en domaine extensif intracontinental : l'exemple du magmatisme pré-tectonique des Jebilets (Maroc hercynien). Thèse Doctorat D'état, Univ. Cadi Ayyad Marrakech, Maroc. 253 pp.
- ARCHIBALD N., GOW P., & BOCHETTI F., (1999) – Multiscale edge analysis of potential field data. *Exploration Geophysics*, 30: 38-44. Doi: 10.1071/EG999038
- BARRINGER A. R. & WHITE J. F., (1968) –Groundwater survey method and apparatus. U. S. Patent # 3 398 355.
- BORDONARO M., GAILLET J.L., et MICHARD A., (1979) – Le géosynclinal carbonifère sud-Mesétien dans les Jebilet (Maroc); une corrélation avec la province pyriteuse du sud de l'Espagne, *Compte Rendus Académie Sciences Paris 288-D* (1979), pp. 1371–1374.
- BORDONARO M., (1983) – Tectonique et pétrographie du district à pyrrhotine de Kettara. Paléozoïque des Jebilet, Maroc. Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Strasbourg. Fr., 132p.
- BORDONARO M., (1984) – La ceinture ibéro-marocaine. Géologie structurale du district de Kettara. Thèse de 3^{ème} cycle, Strasbourg.
- BOUABDELLI M., (1989) – Tectonique et sédimentation dans un bassin orogénique : le sillon viséen d'Azrou Khénifra (Est du massif hercynien central du Maroc). Thèse d'Etat, Strasbourg.
- BOULOTON J., et LE CORRE C., (1985) – Le problème de la tectonique tangentielle dans les Jebilets (Maroc Hercynien) : Données et Hypothèses, *Hercynica*, 1-2, pp : 121-129.
- BLAKELY R.J., & SIMPSON R.W., (1986) – Approximating edges of sources bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51: 1494-1498. doi:10.1190/1.1442197.
- CHALIKAKIS K.M., (2006) –Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques. Thèse de 3^{ème} cycle, France.
- CHENNOUF T., KHATTACH D., MILHI A., ANDRIEUX P., et KEATING P., (2004) –Détermination de la structure du bassin des Triffa par interprétation conjointe des données gravimétriques et sismiques : implications hydrogéologiques (résumé étendu), in : Actes du 2^e Colloque de géophysique appliquée, pp. 30–32.
- CORDELL L., GRAUCH V.J.S., (1982) – Mapping basement magnetic zones from aeromagnetic data in San Juan basin, New Mexico, in: *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*, SEG Publication, pp. 181–197.

- DAHLIN T., (2001) – The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27 (9), 1019-1029.
- EDWARDS L.S., (1977) – A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, 42 (5), 1020-1036.
- EL MANDOUR A., (1990) – Actualisation des connaissances hydrogéologiques du massif des Jebilet, Meseta occidentale-Maroc.
- EMBERGER L., (1955) – Une classification biogéographique des climats. *Travaux Laboratoire Botanique Zoologie, Faculté des Sciences, Service Botanique Montpellier ; 7 : 3-43.* (Carte bioclimatique)
- ESSAIFI A., (1995) – Relations entre magmatisme, déformation et altération hydrothermale, l'exemple des Jebilet Centrales (Hercynien, Maroc). *Mémoires Géosciences Rennes*, 66: 340.
- EVERAERTS M., et MANSY J.L., (2001) – Le filtrage des anomalies gravimétriques, une clé pour la compréhension des structures tectoniques du Boulonnais et de l'Artois (France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 172, 3: 267-274. doi:10.2113/172.3.267
- FABRE J., (1971) – Structure de l'Algérie saharienne. Eléments pour une carte tectonique. *Bull. Serv. Géol., Algérie, nouvelle série, V. 41, p. 161-185.*
- GAILLET J.L., et BORDONARO M., (1981) – La tectogenèse hercynienne dans le massif dinantien des Jebilet centrales (Maroc). *Sci. Géol., Bull.*, 34, p. 117-122.
- GERARD A., et GRIVEAU P., (1972) – Interprétation quantitative en gravimétrie ou magnétisme à partir des cartes transformées de gradient vertical, *Geophys. Prospect.* 20 459–481.
- HATHOUTI M., (1990) – Etude gravimétrique et magnétique des amas sulfurés viséens de la région de Marrakech. PHD Thesis, Université des sciences et techniques du Languedoc, Centre géologique et géophysique, Montpellier, France, PAGES.
- HOEPFNER C., (1987) – La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc.
- HUNTLEY D., NOMMENSEN R., STEFFEY D., (1992) – The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured-rock aquifer. *Ground Water* 30 (3), 396–402.
- HUVELIN P., (1977) – Etude géologique et géologique du Massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental). Notes et mémoires du service géologique du Maroc, Rabat 232 bis 307p.
- JABRAOUI R., RAHIM A., (2004) – Etude géologique et géophysique des amas sulfurés de Benslimane (Jebilet Centrales), Rapport de projet de fin d'étude, MST Géophysique Appliquée, Fac. Sci. Technique, Beni-Mellal.
- KHATTACH D., MRAOUI H., et SBIBIH D., (2004) – Un exemple d'application des ondelettes dans le traitement des données gravimétriques : Analyse multi-échelle des contacts (résumé étendu), in : Actes du 2e Colloque de géophysique appliquée, pp. 214–216.
- KHATTACH D., KEATING P., MILI E.M., CHENNOUF T., ANDRIEUX P., et MILHI A., (2004) – Apport de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin des Triffa (Maroc nord-oriental) : implications hydrogéologiques, *C. R. Géoscience* 336, 1427–1432.

- LAGARDE J. I., & MICHARD A., (1986) – Stretching normal to the regional thrust displacement in a thrust wrench shear zone. Rehamna Massif, Morocco. *Journal Structural Geology* 8, 483-492.
- LEBLANC M., et LANCELOT J., (1980) – Interprétation géodynamique du domaine panafricain (précambrien terminal de l'Anti-Atlas (Maroc) à partir des données géologiques et géochronologiques. *Jour. Can. Sci. Terre*, V. 17, p. 142-155.
- LOKE M.H., & BARKER R.D., (1996) – Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method *Geophysical Prospecting*, 44 (2), 131-152.
- MRINI Z., (1985) – Age et origine des granites hercyniens du Maroc, apport de la géochronologie et de la géochimie isotopique (Sr-Nb-Pb). Thèse, Uni. Clermont Ferrand II.
- PIQUÉ A., (1994) – Géologie du Maroc : Les domaines régionaux et leur évolution structurale. Editions PUMAG, Marrakech, 284 p.
- PIQUÉ A., & MICHARD A., (1989) – Moroccan Hercynides: a synopsis. The Palaeozoic sedimentary and tectonic evolution at the Northern margin of West Africa. *American Journal Earth Sciences* 289, pp. 286-330.
- PIQUÉ A., (1979) – Evolution structurale d'un segment de la chaîne hercynienne ; la Meseta marocaine nord-occidentale. Thèse Doc. ès-Sciences, Strasbourg.
- MAIER O.W., et EL HAKKOUR A., (1984) – Les amas sulfurés volcano-sédimentaires des Jebilet centrales. Journées Nationales du Soufre, Rabat 11-12 octobre 1984.
- MAIER O.W., BERNARD A.J., & MELLAL A., (1988) – Aperçu sur les amas sulfurés massifs des hercynides marocaines. *Mineralium deposita*, 23: 104-114.
- MICHARD A., et al., (1983) – La structure de la Meseta marocaine, une revue, in le Maroc et l'orogénie paléozoïque. The Calédonien orogen, Rabat symposium, Résumé service géologique du Maroc, p. 24.
- SAQUAQUE A., (1985) – Déformation et mise en place d'un pluton granitique syntectonique, l'exemple du granite hercynien de Bramram-Tabouchent-Bamega, (Jebilet centrales, Maroc). Thèse de 3^{ème} cycles, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech Maroc.
- GRINGARTEN A.C., HENRY J., RAMEY H.J., et RAGHAVAN R., (1974) – Unsteady state pressure distributions created by a well in a well with single infinite conductivity vertical fracture », *SPE*, p. 347-360.
- 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.
- VARIAN R.H., (1962) – Ground liquid prospecting method and apparatus. US patent, 3019383.
- VOUILLAMOZ J.M., (2003) – la caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par résonance magnétique protonique. Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. De Paris XI.