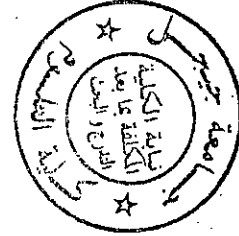


جامعة جيجل
المكتبة المركزية
رقم الجرد: 552/3

552/3

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

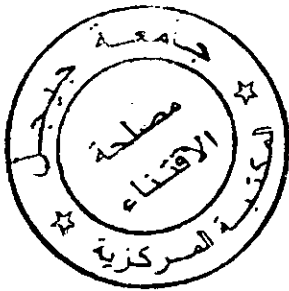
Université de Jijel
Faculté des Sciences
Département de géologie



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en géologie
Optin : géologie de l'ingénieur

Thème :

**Application des méthodes géophysiques aux études
géologiques et géotechniques (Cas du P.O.S de
Mezghitane – W. JIJEL)**



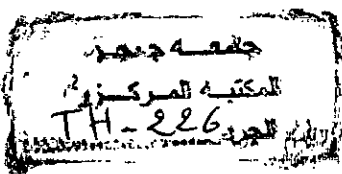
Présenté par Melle BOUAZI ROKIA

Soutenu publiquement le : 15 juin 2008

Devant le Jury composé de :

Président :	Dr. BOUFTOUHA Youcef	M.C Université de JIJEL
Rapporteur :	Dr. SHOUT Hocine	M.C Université de CONSTANTINE
Examineur :	Dr. ZENNIR Abdelmalek	M.C Université de JIJEL
Examineur :	Dr. DJELLIT Hamou	Directeur de Recherche –CRAAG, ALGER
Examineur :	Dr. BOUMAZBAR Abderahmane	M.C Centre Universitaire de TEBESSA
Invité :	BOURAIYOU Mohamed Cherif	Docteur, C.T.C-Est- CONSTANTINE

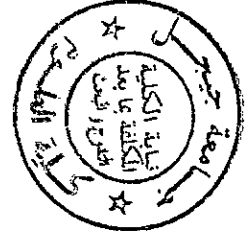
Année 2008



554/3

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Jijel
Faculté des Sciences
Département de géologie



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en géologie
Optim : géologie de l'ingénieur

Thème :

**Application des méthodes géophysiques aux études
géologiques et géotechniques (Cas du P.O.S de
Mezghitane – W. JIJEL)**

Présenté par Melle BOUAZI ROKIA

Soutenu publiquement le : 15 juin 2008

Devant le Jury composé de :

Président :	Dr. BOUFTOUHA Youcef	M.C Université de JIJEL
Rapporteur :	Dr. SHOUT Hocine	M.C Université de CONSTANTINE
Examineur :	Dr. ZENNIR Abdelmalek	M.C Université de JIJEL
Examineur :	Dr. DJELLIT Hamou	Directeur de Recherche –CRAAG, ALGER
Examineur :	Dr. BOUMAZBAR Abderahmane	M.C Centre Universitaire de TEBESSA
Invité :	BOURAIYOU Mohamed Cherif	Docteur, C.T.C-Est- CONSTANTINE

Année 2008

Remerciements

Je tiens à remercier plusieurs personnes qui m'ont aidé durant la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, merci à Monsieur Shout Houcine (encadreur) et Monsieur Bouraiou Mohamed chérif (rapporteur) pour leurs soutiens et leurs précieux conseils tout au long de mes travaux, j'ai vraiment l'honneur et la chance de travailler avec vous.

Merci à Mr. Djellit Hamou et à Mr. Bouftouha Youcef qui ont m'aidé à réaliser la partie géologique et qui m'ont fourni une sortie sur terrain très bénéficiaire.

Merci à Mr Bouzanoun Azdine pour m'avoir écouté tout le temps, pour ton encouragement et tes précieux conseils.

Je voudrais à présent remercier tous ceux qui ont participé activement aux différentes campagnes de mesures géophysiques sur le terrain, en particulier Kissasra Fares, Baghdad Abed Elmelek, Derouiche, et mon encadreur Schout Houcie, tous ceux qui ont m'accompagné durant les sorties sur le terrain, mes collègues : Baghdad Abed Elmelek, Kebbab Hamza, boubazine Leila et ma soeur Nouara. Merci à vous tous pour votre aide inestimable.

Merci à tous collègues et à tous enseignants de la Post graduation à qui Je garderai de très bons souvenirs.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin, tout particulièrement mes amis et ma famille, merci pour votre encouragement et votre amour.

Enfin, je remercie tout le staff d'enseignants spécialistes, choisi par notre faculté à juger ce modeste travail ; MERCI.

Résumé

La région de Mezghitane, zone d'étude dans le cadre de ce mémoire de Magister a été choisie suite à l'intérêt grandissant et la priorité soutenue par les autorités locales dans le cadre de l'expansion urbanistique de la wilaya de Jijel.

Ainsi sur le POS de Mezghitane une étude géotechnique ponctuelle et préliminaire a été exécutée, cette étude a permis d'identifier les principaux ensembles constituant le sol et les formations superficielles. Cette étude ponctuelle n'a cependant pas permis d'avoir une vision continue de la variabilité spatiale des différents matériaux.

Sachant que toutes les projets de construction sont assujettis à des études géotechniques (étude de sol etc...) lors de ces études on réalise des essais in situ et des essais de laboratoire pour déterminer les différentes caractéristiques du sous-sol, ces essais malgré qu'elles offrent des informations précises sur les caractéristiques du sous-sol, elles demeurent ponctuelles.

Afin de pallier à ces insuffisances et éclaircir d'avantage l'image structurale, nous avons fait appel à une étude géophysique par sondage électrique dense ; un panneau électrique qui nous a permis d'avoir des résultats présentés sous forme de profilage géoélectrique mettant en évidence les différents compartimentages structuraux de la zone d'étude.

On a trouvé une adéquation idéale entre les données géotechniques ponctuelles et les données géophysiques bidimensionnelles :

L'étude géologique et géotechnique du POS de Mezghitane (principalement les sondages carottés) met en évidence quatre principaux types de roches : des argiles sableuses, des argiles schisteuses, des grès et des calcaires gréseux en blocs.

Les résultats de la prospection géophysique réalisée dans ce milieu sédimentaire portant fracturé et complexe, sont en adéquation avec les principales formations observées (sur les affleurements ou en sondages) à l'exception des blocs de calcaires gréseux qui n'ont pas été détectés par les sondages électriques.

L'abondance des terrains meubles représentés par des argiles sableuses et des argiles schisteuses avec des épaisseurs allant jusqu'à 30m nous a obligé de faire une étude de stabilité.

Parmi les quatre profils étudiés et testés, pour les deux premiers profils (I et II) le talus est à la limite de la stabilité car le coefficient de sécurité est entre 1.25 et 1.50 donc des travaux de confortement doivent être réalisés afin d'améliorer la stabilité du terrain en place. Pour les deux autres profils III et VI la stabilité est assurée car le coefficient de sécurité est supérieur à 1.5.

Mots-clefs : sondage électrique, stabilité, étude préliminaire, profilage, coefficient de sécurité.

Abstract

The region of Mezghitane, an area for study, has been chosen due to the growing interest and the supported priority by the local authorities within the framework of the urban expansion of wilaya of Jijel.

Thus, a punctual and preliminary geotechnical study was executed on POS of Mezghitane. This study has permitted to identify the main groups that build up the soil and superficial formations. However, this punctual study has not permitted to have a continuous vision about the spatial varieties of different materials.

Knowing that all the projects of construction are subject to geotechnical studies (the study of soil ...etc) during these studies we realize tests in field and tests in the laboratory to determine different characteristics of sub-soil. Although these tests provide précised information about the characteristics of sub-soil, these remain prompt.

To palliate these deficiencies and to clarify the structural image we have worked geophysical study by electrical poll.

We have formed that an adequacy balances between the punctual geotechnical data and the two-dimentional physical data.

The geophysical and geotechnical study of POS of Mezghitane highlight show four main rock types: sandy clays, schistose clays, sandstone and calcareous sandstone blocs.

The results of the geophysical prospective realised in this place bearing fractured and complex se, are in line with the adequate with the principle formations observed with the exception of calcareous sandstone blocs, which were not detected by the electrical polls.

The abundance of movable land represented by sandy clays and schistose clays in thickness up to 30m has forced us to study of stability. Among the four studied and tested profiles there were.

For the first two profiles (I and II) the slope are at edge of stability because the safety factor is between 1.25 and 1.50, therefore confrontment works must be carried in order to improve the stability of ground up. For the two other two profiles (III and IV) the stability is assured because the safety factor is greater than 1.5.

Key-words : electrical poll, stability, preliminaries study, profile, safety ratio.

تلخيص

ناحية مزغيطان منطقة الدراسة في إطار مذكرة الماجستير اختيرت نظرا للأهمية المتزايدة و الأولوية المعطاة من طرف السلطات المحلية في إطار التوسيع العمراني الذي تشهده ولاية جيجل.

على مستوى مخطط شغل التربة لمزغيطان أجريت دراسة جيوتقنية دقيقة و تمهيدية سمحت بتوضيح أهم البنى التي تتكون منها التربة و التربة التحتية. لكنها لم تسمح بتكوين نظرة متواصلة للتغيرات السطحية لمختلف المواد التي تكون التربة. علما أن كل المشاريع العمرانية بدراسات جيوتقنية تجري أثناء هذه الدراسات تجارب ميدانية و أخرى مخبرية لتحديد مختلف خصائص التربة. رغم هذه التجارب توفر معلومات دقيقة حول خصائص التربة تبقى دائما نقطية.

لتعويض هذه النقائص و توضيح الصورة البنوية قمنا بانجاز دراسة جيوفيزيائية مكثفة و فرت لنا نتائج على شكل مقاطع جيوكهربائية مبينة لمختلف التقسيمات البنوية لمنطقة الدراسة.

لقد وجدنا تناسب مثالي بين معطيات الدراسة الجيوتقنية النقطية و نتائج الدراسة الجيوفيزيائية ثنائية الأبعاد. الدراسة الطين الرملي الطين الطيني الحجر الرملي : الجيولوجية وضحت أربع مكونات أساسية لمخطط شغل التربة لمزغيطان و الكلس الرملي على شكل كتل.

نتائج الدراسة التنقيب المجرى في هذا الوسط الصخري و المعقد متناسبة مع أهم المكونات الملاحظة باستثناء الكلس الذي لم يكشف من طرف المعاينة الكهربائية.

انتشار الأراضي المرنة ممثلة بالطين الرملي و الطين الطيني بسماك يصل حتى 30 متر فرض علينا إجراء دراسة استقرار للتربة. من بين أربع مقاطع مدروسة و مخبرية نجد اثنان منها في حد الاستقرار أي عامل الأمن بين 1.25 و 1.50 أين يجب انجاز أعمال دعم لتحسين عامل الأمن.

بالنسبة للمخططات الأخرى المنحدر مستقرا لان عامل الأمن أكثر من 1.50

Tables des matières

Remerciement.....	i
Résumé.....	ii
Tables des matières.....	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux.....	x
Liste des symboles.....	xii
Chapitre 1 : introduction.....	1
1. Introduction.....	2
2. Contenu du mémoire.....	2
Chapitre.2 : géographie du milieu physique	4
2.1 Localisation du site de Mezghitane	4
2.2 Hydrogéologie.....	4
2.2.1 Hydroclimatologie	4
2.2.1.2 Les données disponibles	5
2.2.2 Hydrologie	6
2.2.3 Hydrogéologie	7
Chapitre 3 : Caractérisation géologique du POS de Mezgithane	9
3.1 Contexte géologique	9
3.1.2 : Géologie régionale	9
3.1.2.1 Le domaine Kabyle	10
3.1.2.2 Le domaine des flyschs.....	10
3.1.2.2.1 Le flysch maurétanien.....	11
3.1.2.2.2 Le flysch massylien.....	11
3.1.2.2.3 Le flysch numidien.....	11
3.1.2.3 Le formations telliennes et de l'avant pays	12
3.1.2.3.1 Les formations telliennes	12
une série ultra-tellienne	12
Une série méso-tellienne.....	12
Une série peni-tellienne	12
3.1.2.4 Les formations post nappes	13
3.1.2.5 Le magmatisme	13
3.1.2.6 L'Oligo-Miocène Kabyle	13
3.1.2.7 Les Olistostromes	13
3.1.2.8 Le Nummulitique	13
3.1.3 Géologie locale	14
3.1.3.1 Flysch de Guerrouch	14
3.1.3.2 Flysch dissocié	15
3.3.3 Le flysch numidien	15
3.4 Géologie du site	16
3.4.2 Tectonique.....	19
3.4.3 Géomorphologie du site.....	21
Chapitre 4 : Les applications géophysiques à Mezghitane (rappels).....	22
Introduction.....	22

4.1.1 Objectifs.....	22
4.1.1 Choix des méthodes géophysiques	22
4.1.3 Problématique du choix de la méthode géophysique à Mezghitane.....	25
4.1.4 Approche historique de la méthode géophysique (Grellier, 2005 ; Laurent, 2004) ...	26
4.1.5 Domaines d'application de la géophysique.....	27
A) Application en hydrogéologie	27
B) Application en environnement	28
C) Applications en géotechnique et génie civil	28
4.1.6 Domaines d'application de l'électromagnétisme cas du géoradar.....	29
A) Applications à la géologie.....	29
B) Applications en géotechnique et génie civil	29
4.1.7 Domaines d'application de la méthode électrique.....	30
A) Applications en géotechnique et génie civil	30
4.2 Bases théoriques des méthodes géophysiques utilisées	31
4.2.1 Méthode électrique	31
4.2.1.1 Méthodes de résistivité	31
1) Résistivité électrique des roches	31
2) Facteurs influençant la résistivité électrique.....	32
4.2.2 Bases théoriques de la méthode électrique	33
4.2.2.1 Potentiel et résistivité électrique	33
4.2.2.1 Potentiel et résistivité électrique	33
4.2.2.2 Dispositif de mesure	35
1) Dispositif Schlumberger.....	36
2) Dispositif Wenner	36
3) Dispositif pôle – pôle	37
4) Dispositif dipôle – dipôle	37
4.2.2.3 Acquisition et représentation des données	39
1) Sondage électrique	39
2) Traîne de résistivité.....	39
3) Panneau électrique	40
Profondeur d'investigation	40
Instrumentation électrique	40
La polarisation spontanée.....	41
4.3 Méthode électromagnétique (cas du géoradar).....	42
4.3.1 Bases théoriques de la méthode géoradar.....	42
Introduction	42
4.3.1.1 Paramètres électromagnétiques de la matière.....	42
Paramètres du champ magnétique.....	44
Paramètres du champ électrique	44
4.3.1.2 Equations de Maxwell	47
1) Equations de Maxwell dans le vide	47
2) Equations de Maxwell dans un milieu diélectrique	48
4.3.1.3 Les équations de diffusion et de propagation	48
4.3.2 Acquisition des données radar.....	51
4.3.2.1 Principe de fonctionnements	51
4.3.2.2 Le matériel géoradar	52

Différent types de radar géologique.....	54
4.3.3 Acquisition des données radar	57
3.4.3.1 Les différents modes d'acquisition	57
1) Le mode réflexion	57
2) Le mode transmission	59
4.3.4 Le traitement et le prétraitement	60
1) Le traitement des données géoradars.....	60
2) Interprétation	62
3) Le radar de surface SIR 2000, exemple d'application	63
Chapitre 5 : Résultats de la campagne géophysique.....	70
5.1 Travaux de terrain.....	70
5.1 Prospection électrique.....	70
5.1.1 Equipement géophysique (Méthode de Résistivité).....	70
5.1.2 Mise en oeuvre	70
5.1.3 Le dispositif de mesure.....	70
5.1.4 Equipement de prospection électrique	71
5.2 Acquisition des données sur le terrain.....	72
4.2.2 Choix des profils	73
5.2.3 Dispositif de mesure.....	74
5.3 Traitement par inversion des données de sondages électriques	74
5.4. Résultats de la prospection électrique	74
5.4.1 Analyse des données	74
Chapitre 6 : caractérisation géotechnique du POS de Mezghjtane	83
6.1 Introduction	83
6.2 Programme d'essais.....	83
A) Les essais in situ.....	83
B) Les essais de laboratoires.....	84
A) Propriétés physiques	84
B) Propriétés mécaniques	85
6.3 Résultats de la prospection géotechnique.....	85
6.3.1 Les essais in situ	86
1) Sondages carottés	86
2) essais de pénétration dynamique.....	86
6.3.2 Les essais de laboratoires.....	87
A) Propriétés physiques	87
B) Caractéristiques mécaniques.....	88
C) Analyse chimique	89
6.4 Choix et calcul de fondations.....	90
Calcul de la contrainte admissible	90
1) A partir des essais in situ - essai de pénétration dynamique.....	90
2) A partir des résultats des essais de laboratoire	92
6.5 Étude de stabilité.....	95
6.5.1 Les mouvements de terrain.....	95
6.5.2 Conditions d'apparition d'un mouvement de terrain au niveau du site de Mezghjtane.....	95

Les facteurs intrinsèques	96
Les facteurs aggravants ou dégradants	97
6.5.3 Calcul de stabilité	101
L'objectif d'un calcul de stabilité	101
Méthode de calcul	101
1) Méthode globale	101
2) Méthode de tranche	102
Méthode de Fellinus (ou méthode Suédoise)	102
Méthode de Bishop simplifiée	105
6.5.4 Calcul du coefficient de sécurité	106
Logiciel de calcul	107
Stabilité du talus naturel	109
Stabilité du talus terrassé	113
6.5.5 Cartographie géotechnique par zonage	114
Chapitre 7: Interprétation et synthèse.....	116
7.1 Introduction	116
7.2 Confrontations des résultats de prospections géophysique à ceux de la géotechnique	116
7.3 Interprétation des coupes géoélectriques	118
7.4 Conclusion.....	122
7.5 Conclusion générale	123
7.6 Recommandation.....	126
Bibliographie.....	127
Annexes.....	

Table des figures

Figure 2.1 Localisation du POS de Mezghitane.....	4
Figure 3. 1 Structure de la chaîne alpine de la Kabylie occidentale.....	9
Figure 3.2. : Colonne lithologique synthétique du flysch numidien au niveau de Djebel Mezghitane.....	17
Figure 4.3 : Grés épais riches en dragées de quartz.....	18
Figure 4. 4 : Argiles à intercalations gréseuses.....	18
Figure 3. 5 Coupe au niveau des formations tendres.....	19
Figure 3. 6 : photo illustrant un plan de faille	20
Figure 3. 7 : photo illustrant un pli	20
Figure 3. 8 :Coupe au niveau des formations tendres.....	21
Figure3. 9 : Coupe géologique synthétique.....	21
Figure 3.10 : Carte de pente simplifiée.....	22
Figure 4.1 : Principe de la prospection électrique en dispositif Wenner alpha.....	31
Figure 4.2 :Effet de l'injection d'un courant à travers deux électrodes A et B dans un terrain homogène.....	35
Figure 4.3: Les différents dispositifs utilisés en prospection électrique.....	38
Figure 4.4 : Mesures de résistivité d'un sol par sondage et par traînée	40
Figure 4.5 : Evolution de la permittivité diélectrique sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Propriété d'additivité des susceptibilités électriques	45
Figure 4.6: Principe de fonctionnement du géoradar.....	52
Figure 4 : Présentation schématique d'un système géoradar	53
Figure 4.8: Schémas des différentes conceptions d'antennes équipant les géoradars.....	55
Figure 4.9 : Illustration du mode réflexion. La distance inter-antennes est constante.	58
Figure 4.10 : Illustration du mode CMP (Common MidPoint). La distance inter-antennes augmente le long du profil radar (Jeannin,2005).....	59
Figure 4.11: Le matériel géo radar de surface SIR 2000.....	63
Figure 4.12 : Radar gramme montrant le passage de deux conduites.....	66

Figure 4.13 Profil géo radar révélant les différentes anomalies (Acier ; PVC).....	67
Figure 4.14 : résultats d'interprétations des données radars.....	68
Figure 5.1 Equipement de prospection électrique.....	71
Figure 5.2 plan de d'implantation des sondages électriques.....	72
Figure 5.3 Profil de résistivité / données brutes.....	82
Figure 6.1 : plan de situation des essais in situ.....	87
Figure 4.1 Diagramme de plasticité Casagrande des échantillons de mezghitane.....	89
Figure 6.3 : profil de stabilité n I.....	109
Figure 6.4 : Talus n° II.....	110
Figure 6.5 : Talus n° III.....	111
Figure 6.6. Talus n° IV.....	112
Figure 6.7 : Photo illustrant les désordres observés au cours de la phase de terrassement...	113
Figure 6.8 : Carte des zones instables.....	115

Table des tableaux

Tableau 2.1 : répartition mensuelle de la pluviométrie (de Station de Djendjen et de l'Aéroport Farhat Abess).....	5
Tableau 2.2 : pluviométrie moyenne saisonnière (l'Aéroport Farhat Abess et le port de Djendjen).....	6
Tableau 2.3 : température moyenne mensuelle.....	7
Tableau 4.1 résume la description des dispositifs et de leurs propriétés.....	39
Tableau 4.2: Valeurs de la résistivité des eaux et des roches.....	42
Tableau 4.3: Valeurs de la constante diélectrique et de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans l'eau et des roches.....	47
Tableau 4.4 : Valeurs typiques des quelques paramètres physiques qui caractérisent les ondes électromagnétiques de fréquence 100 MHz pour les principaux matériaux géologiques rencontrés dans la nature.....	51
Tableau 4.5 : Paramètres d'acquisition Antenne 400D.....	64
Tableau 4.6 : Résultats d'acquisition et d'interprétation des différents radar grammes portés sur des profils. Mode d'acquisition: compte pas.....	68

Tableau 6.1 : résultat de l'analyse granulométrique (LNHC Rouiba, 2003).....	88
Tableau 6.2 : Résultats des essais mécaniques (LNHC Rouïba).....	89
Tableau 6.3 : Résultats de l'analyse chimique (laboratoire Al Ardh).....	90
Tableau 6.3 : valeur de la contrainte admissible à partir des essais de pénétration dynamique réalisé par le LNHC unité de Rouiba.....	92
Tableau 6.4 : valeur de la contrainte admissible à partir des essais de pénétration dynamique réalisé par le laboratoire ALARDH, Site 400 logements OPGI.....	92
Tableau 6.3 : valeur de la contrainte admissible à partir des essais de laboratoire réalisé par le LNHC unité de Rouiba.....	93
Tableau 6.5 : valeur de la contrainte admissible à partir des essais de laboratoire réalisé par le laboratoire AL ARDHLNHC.....	94
Tableau 6.6 : valeur de la contrainte admissible à partir des essais de laboratoire réalisé par le laboratoire fondasoil.....	94
Tableau 4.3 : des caractéristiques (c, ϕ) non drainées.....	107
Tableau 6.10 : Coefficient de sécurité minimale pour le talus 1.....	109
Tableau 4.5. Coefficient de sécurité minimale pour le talus 2.....	110
Tableau 6. 11 : Coefficient de sécurité minimale pour le talus 3.....	111
Tableau6. 12 : Coefficient de sécurité minimale pour le talus 4.....	113

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

- c : célérité de la lumière 3.10^8 m/s(0.3m/ns).
- ϵ : Permittivité électrique.
- ϵ_r : Permittivité électrique relative.
- ϵ_0 : Permittivité du vide ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m).
- m : mètre.
- μ : perméabilité magnétique.
- μ_r : perméabilité magnétique relative.
- ρ : résistivité électrique.
- ρ_a : résistivité électrique apparente.
- ρ_e : résistivité électrique de l'eau interstitielle.
- σ : conductivité électrique.
- I : intensité du courant en milliampères (m.A).
- J : densité du courant.
- ΔV : différence de potentiel en millivolts.
- K : coefficient géométrique.
- S : surface en m^2 .
- r : rayon en m.
- t : temps double ou durée d'aller-retour des ondes.
- V : vitesse moyenne des ondes en m/ns.
- p : profondeur en m.
- ω : fréquence radiale.
- ρ_{pol} : densité volumique de charge de polarisation (C/m^3).
- χ_e : susceptibilité électrique (sans dimension).
- \vec{P} : vecteur dipolaire (C/m^2).
- j_c : densité de courant de conduction (X/m^2).
- j_d : densité de courant de déplacement .

E : champ électrique (V/m).
 H : champ magnétique.
 B : induction magnétique (T).
 D : induction électrique (C/m²).
 k : nombre d'onde.
 β : facteur de phase (rad/m).
 α : facteur d'atténuation (rad/m).
 f : fréquence.
 T_x : antenne de transmission.
 R_x : antenne réciptrice.
 EM : onde électromagnétique.
 δ_d : poids volumique sec en (t/m³).
 δ_h : poids volumique humide en (t/m³).
 δ_w : poids volumique de l'eau ($\delta_w = 10 \text{ kN/m}^3$).
 W : teneur en eau (%).
 S_r : degré de saturation en (%).
 W_l : limite de liquidité.
 R_{\min} : résistance dynamique minimale en pointe.
 q_{adm} : contrainte admissible du sol.
 D : ancrage de la fondation.
 L : longueur de la semelle.
 B : largeur de la semelle.
 δ_1 : poids spécifique du sol sus la fondation.
 δ_2 : poids spécifique du sol sous la fondation.
 ρ : rayon moyen .
 N_c : facteur de portance dû au poids des terres.
 N_s : facteur de portance dû à la surcharge.
 N_q : facteur de portance dû à la cohésion.

I_p : indice de plasticité.
 P_c : pression de consolidation.
 C_c : coefficient de compressibilité.
 C_g : indice de gonflement.
 Z_w : hauteur de l'eau.
 C : cohésion.
 F_s : coefficient de sécurité.
 W : poids de chaque tranche.
 B : la largeur de la tranche.
 n : nombre total de tranche.

Chapitre 1



Introduction

1. Introduction

La caractérisation des sols par les méthodes géotechniques traditionnelles est difficile, coûteuse et donne des résultats ponctuels. Un sol n'est jamais homogène et quelque soit le nombre des reconnaissances et des essais effectués, il subsistera des incertitudes. La présence d'un bloc rocheux ou de niveaux durs peut par exemple être à l'origine d'un refus lors d'un essai pénétrométrique. Une prospection géotechnique détaillée donne des précisions sur la nature du sol et les caractéristiques mécaniques. Cependant, les prospections nécessitent de nombreux sondages, essais in situ et de laboratoire et en conséquence beaucoup de temps et d'argent du fait que les sondages représentent les conditions en un seul point uniquement. Actuellement, seules les méthodes géophysiques peuvent pallier à ce manque d'information.

L'utilisation de méthodes géophysiques non destructives permet une meilleure définition de la géométrie et des propriétés du sol.

Le POS n 2 mezghitane a été sélectionné pour réaliser cette étude. Notre choix du site est d'une part justifié par l'intérêt grandissant qu'apporte les autorités locales à la région (POS N° 02 OULED BOUNNAR- MEZGHITANE) et l'expansion urbanistique de la partie Ouest de Jijel (dont Il est prévu à recevoir 2500 logements, 10 équipements : 01 agence postale, 01 lycée, 01 C.E.M, 03 écoles primaires, 01 mosquée, 01 centre culturel, 01 centre de santé, 02 hôtels) d'autre part, il a déjà fait l'objet d'études détaillées et que par conséquent les résultats géophysiques peuvent être contrôlés et étalonnés par les informations directes recueillies à partir des forages .

Sur le POS de Mazghitane, une étude de prospection géotechnique "ponctuelles" a été réalisée. Cette étude a permis d'identifier les principaux ensembles constituant le sol et les formations superficielles du POS. Il s'agit :

- des argiles sableuses et des sols limoneux,
- des argiles schisteuses,
- des grés et
- des calcaires gréseux en blocs.

Cette étude ponctuelle n'a cependant pas permis d'avoir une vision continue de la variabilité spatiale des différents matériaux. L'objectif de ce travail est de décrire l'organisation tridimensionnelle du sol et des matériaux géologiques sous-jacents qui constituent généralement le substrat du secteur. Pour cela, nous avons choisi de mesurer la résistivité électrique pour accéder à moindre coût à des informations en profondeur. Le second objectif est de cartographier la profondeur d'apparition du socle à partir de cette prospection géophysique.

Pour ce faire, des mesures électriques ponctuelles ont été réalisées, selon un écartement variable des électrodes afin d'explorer des couches de plus en plus profondes et ainsi d'analyser les discontinuités verticales.

2. Contenu du mémoire

Le présent travail est divisé en sept chapitres.

Le premier chapitre : est d'ordre introductif, il est réservé à l'introduction générale et à la description du mémoire chapitre par chapitre.

Le deuxième chapitre : est consacré à la localisation du site d'application, le site choisi est le POS n° 2 Mezghitane, nous avons localisé le site par rapport au nord algérien puis par rapport à la wilaya de Jijel. Nous avons décrit aussi les caractéristiques hydrologiques, hydrogéologiques de la région de Jijel en générale car le site est dépourvu de station pluviométrique.

Le troisième chapitre : présente les principales caractéristiques géologiques et géomorphologiques du site. Nous avons essayé de situer la zone étudiée dans son contexte régionale et locale, d'étudier la géologie du site en basant sur les sorties de terrain et en utilisant les photos aériennes et les différents études réalisés sur la partie ouest de la wilaya de Jijel.

Le quatrième chapitre : présente la théorie reliée aux méthodes géophysiques utilisées pour effectuer l'étude, l'application des deux méthodes géophysiques à l'étude des sols est

examinée. Les notions fondamentales propres aux méthodes électriques en courant continu la loi d'Ohm pour la méthode électrique et en particulier à la résistivité ou à la conductivité des sols et des formations géologiques décrites sont discutés. Nous décrivons les différents paramètres physiques en jeu, nous décrivons les équations de diffusions-propagation pour les ondes électromagnétiques dans le sol, ainsi que le matériel géoradar et électrique, les différents modes d'acquisition et les étapes de traitement et de l'interprétation.

Le chapitre 5 : présente les résultats des campagnes de terrain pour la méthode géophysique utilisée ainsi que l'analyse des résultats. Les caractéristiques du site et les résultats des deux méthodes géophysiques utilisées sont présentés.

Au chapitre 6 : une étude géotechnique et une analyse de stabilité du site sont présentées ; nous avons décrit par détaille le programme d'essais géotechniques réalisés par les différents laboratoires englobant les essais in situ et de laboratoire. Comme le POS est phase d'aménagement nous avons essayé de d'effectuer une analyse de stabilité, d'apprécier la stabilité initiale du site et d'évaluer la modification que va entraîner la réalisation des différents projets (déboisement, terrassement, construction etc....).

Le dernier chapitre : concerne une interprétation des résultats géophysiques, une confrontation des résultats de prospection géophysique à ceux de la géotechnique, la conclusion générale et les recommandations.

Chapitre 2



Milieu physique

2.1 Localisation du site de Mezghitane

Le POS N° 2 ; Mezghitane qui fait l'objet de la présente étude est situé à 4km à l'ouest de la ville de Jijel (figure 2.1). Le site se trouve en aval du Djebel Mezghitane dont l'accès est assuré par la route n°43 reliant Jijel à Bejaia, il s'étend sur 47ha et limité au nord par la route n°43, au sud par Djebel Mezghitane, à l'ouest par le village d'Ouled Bounnar et à l'est par le village de l'El Aarayeche.

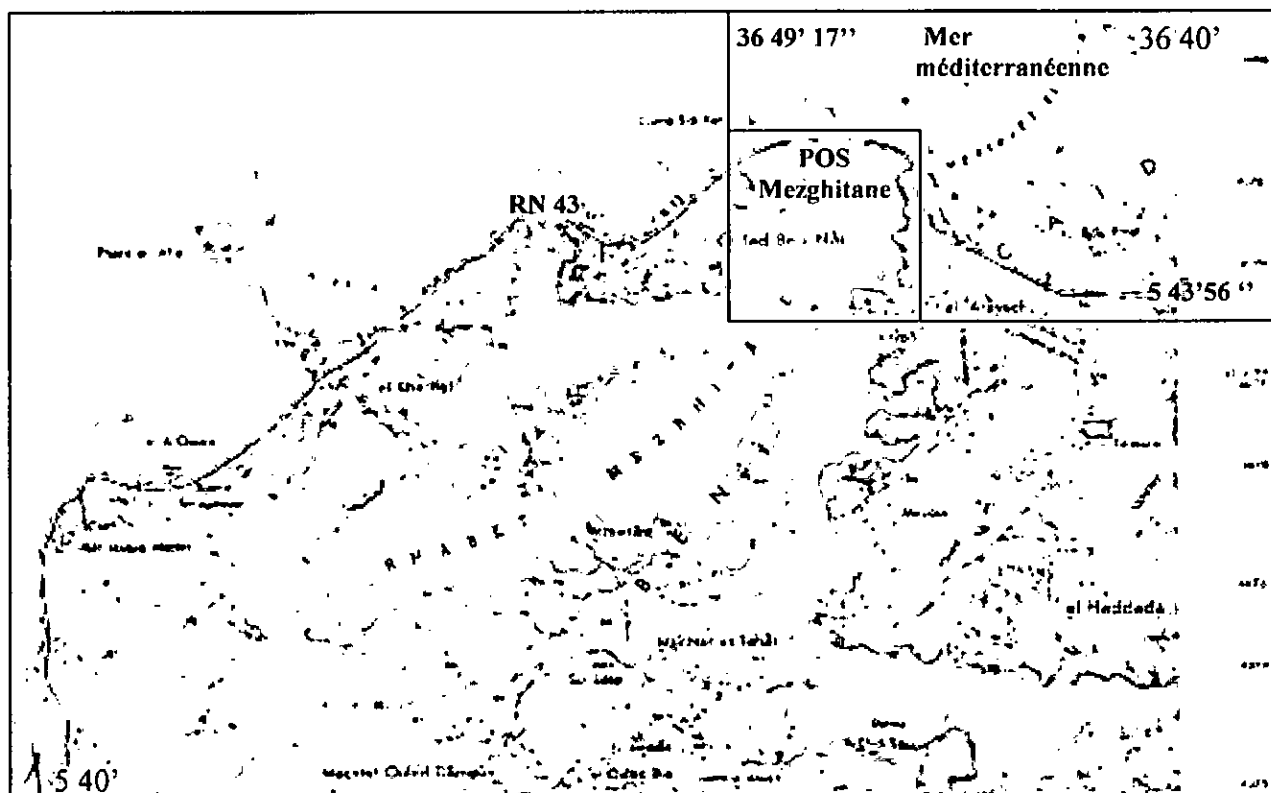


Figure 2.1 Localisation du POS de Mezghitane

2.2 Hydrogéologie

2.2.1 Hydroclimatologie

Le climat général dans la wilaya de Jijel est de type méditerranéen caractérisé par une alternance de saison humide et douce, marquée par de fortes pluies (Novembre à Avril) et de saison sèche et chaude (Mai à Septembre).

La pluviométrie annuelle moyenne dépasse 900mm et plus de 85% de ces précipitations tombent entre Octobre et Avril.

Les données disponibles

Les phénomènes météorologiques du versant de Mezghitane sont mal connus en raison de l'absence dans son aire et sa périphérie des stations pluviométriques et météorologiques. Pour étudier la pluviométrie du site de Mezghitane, on a eu recours aux données pluviométriques de deux stations (station de l'Aéroport Farhat Abbas et du port de Djendjen) qui sont les plus proches du site d'étude.

Nous étions obligés de prendre des périodes différentes pour analyser les différents paramètres qui nous intéressent :

- série (1982 à 1992) : station de port de Djendjen.
- série (1992 à 2006) : station de l'Aéroport Farhat Abbas.

▪ **Variations mensuelles et saisonnières**

L'étude des variations saisonnières permet de connaître la répartition des précipitations par saison et par mois.

Variations mensuelles

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	moyenne
1982-1992	54	94	121	180	134	109	105	68	46	9	3	4	927
1993-2006	80	75	147	190	149	119	54	80	46	14	3	15	972

Tableau 2.1 : répartition mensuelle de la pluviométrie (de Station de Djendjen et de l'Aéroport Farhat Abbas).

La répartition mensuelle des pluies montre qu'en dehors des mois d'été, les précipitations sont constantes. Elles varient entre 46mm et 180mm pour la station du port de Djendjen et entre 46mm et 190mm pour la station de l'aéroport Farhat Abbas.

Le nombre de mois déficitaires est un peu plus élevé que celui des mois à chutes supérieures à la moyenne (56.54%, 43.45% et 62.87% ,37.12%, pour la station du port de Djendjen et de l'Aéroport Farhat Abess respectivement).

Variations saisonnières

	Automne	Hiver	Printemps	Eté
1982-1992	269	423	219	16
	29.01%	45.63%	23.62	1.72%
1993-2006	302	458	180	32
	31.06%	47.11	18.51%	3.29%

Tableau 2.2 : pluviométrie moyenne saisonnière (l'Aéroport Farhat Abess et le port de Djendjen).

Les précipitations sont relativement élevées, avec plus de 900mmen moyennes de pluies annuelles, et un maximum de pluie en hiver, un peu moins de la moitié du volume (48%) étant enregistré pendant les mois d'hiver, la période la plus sèche est l'été (seulement 3mm de pluie en Juillet pour l'Aéroport Farhat Abess et le port de Djendjen), pendant une période de trois mois, il tombe moins de 3%de la moyenne annuelle (tableau 2.2).

La température

Moyenne annuelle et mensuelle

La température moyenne annuelle est modérée (18°C), avec une amplitude entre le mois le plus chaud (Août) et le mois le plus froid (Février) de15°C.

La température varie autour de 11 à 12°C durant l'hiver, de 21 à 26°C durant l'été et de 13 à 23°C durant l'automne et le printemps.

La variation mensuelle de la température révèle un minimum durant l'hiver, par contre, le maximum se produit au cours des mois de l'été.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	O	annuelle
Port de Djendjen	24.26	20.9	17.03	13.75	12.39	12.75	13.8	15.62	18.19	21.44	25.26	25.7	18.42
	19.33			11.68			15.67			24			18.42
Aéroport	23.35	20.46	15.38	12.68	11.52	11.45	13.47	15.11	18.68	21.76	24.91	25.68	17.88
Farhat Abbas	19.73			11.88			15.75			24.11			17.88

Tableau 2.3 : température moyenne mensuelle.

2.2.2 Hydrologie

Lu calcul du bilan permet de diviser l'année hydrologique en deux périodes :

-une période humide : allant du mois de novembre jusqu'au mois de mai, où les précipitations sont largement supérieures à l'évapotranspiration. Lors de cette période se manifestent les glissements de terrain et les coulées boueuses car le sol est saturé en eau et toute augmentation de la teneur en eau favorise l'instabilité.

-une période déficitaire : de juin à octobre où les précipitations sont très faibles, les valeurs de l'évapotranspiration atteignent leur maximum au mois d'été. Cette période provoque des fissurations par retrait des sols argileux superficiels, ce qui facilite l'infiltration de l'eau dans les fissures lors d'épisodes pluvieux et déstabilisant des mois de l'automne.

2.3 Hydrogéologie

Il faut noter l'absence des piézomètres qui donnent des informations sur le niveau d'eau, mais la présence de nombreuses sources sur le versant traduisent vraisemblablement une nappe phréatique semble donc superficielle.

Les études hydrogéologiques de la région de Jijel par l'ANRHC unité de Rouïba permettent de différencier deux ensembles hydrogéologiques.

1°/ un ensemble sédimentaire

- Nappe alluviale du Quaternaire

Elle est associée aux dépôts gésio-argileux (numidien) ainsi qu'aux alluvions des oueds représentés par des graviers et des limons sableux. La puissance de ces derniers dépôts ne dépasse pas une dizaine de mètre. Vers le NE de Jijel le substratum de la nappe est représenté par des argiles du Miocène.

- Nappes de grés fissurés et marnes alternant avec les argiles (Miocène inférieur) :
Elle repose en discordance sur les grés de l'assise supérieure de l'Oligocène et borde les roches éruptives au nord et au sud.
- Nappe aquifère des grés de l'Oligocène
Elle est faiblement développée dans les parties est et sud de la région. La puissance de cette assise est de 200m, le substratum est représenté par des argiles de puissance de 200m.
- Nappes de grés fissurés alternant avec les argilites: cette nappe est représentée par des grés fissurés d'environ 650m d'épaisseur affleurant au sud du massif éruptif de Cavallo. Le substratum de cette nappe est représenté par des bancs d'argilites compactes.

2°/ Ensemble éruptif

Dans cet ensemble c'est la nappe de fissure qui existe dont les fissures ouvertes favorisent l'écoulement des eaux.

Chapitre 3



Caractérisation géologique du POS de Mezgithane

3.1 Contexte géologique

3.1.1 Géologie régionale

La géodynamique globale de la tectonique des plaques a structuré l'Algérie en deux domaines.

- domaine allochtone au nord ; l'Algérie alpine.
- domaine autochtone au sud ; la plate forme saharienne.

Le nord de l'Algérie à structure géologique très complexe, est constitué de chaînes à relief jeune, modelé au cours du Tertiaire par les mouvements alpins. Ces chaînes constituant la branche sud de la chaîne *la chaîne Alpine (maghrebide)* sont représenté par trois pointements : le massif de Chenoua à l'ouest, le massif de la grande Kabylie au centre, le massif de la petite Kabylie à l'est.

La chaîne de la petite Kabylie dans la quelle se localise le site d'étude est caractérisée par des structures en nappes à vergence sud et comporte du nord au sud deux domaines principaux (figure 3.1) :

Le domaine interne ou domaine Kabyle situé au nord.

Le domaine externe : situé au sud et comporte le domaine des flyschs et le domaine tellien.

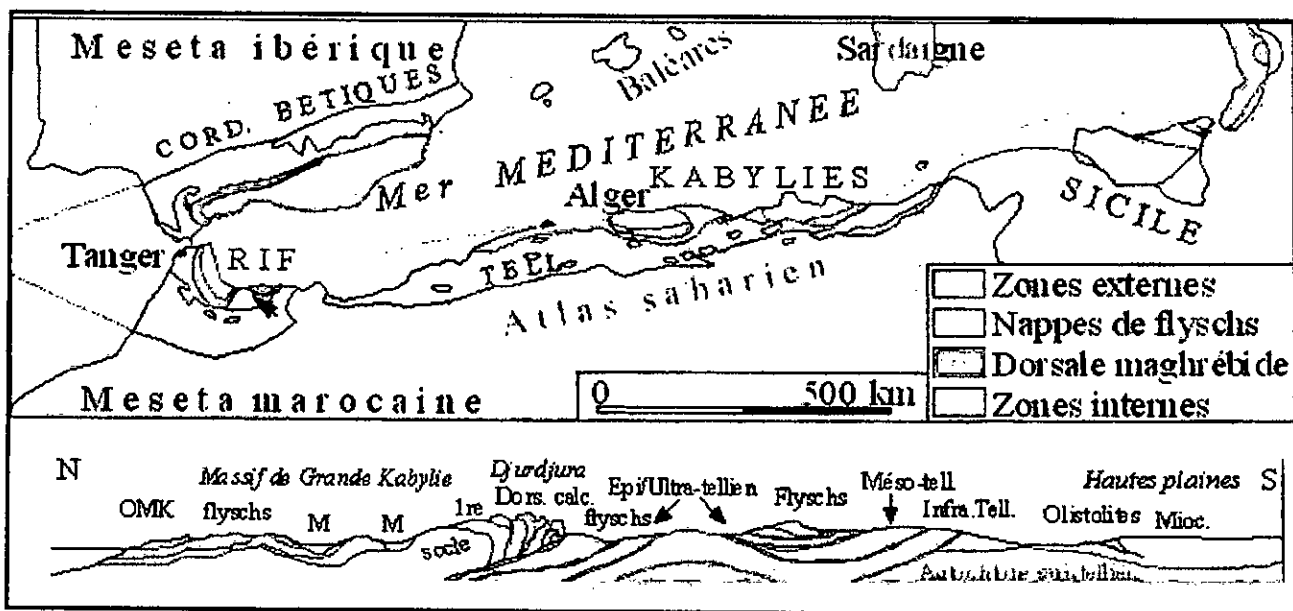


Figure 3.1 Structure de la chaîne alpine de la méditerranée occidentale (Durant Delga, 1969, modifiée).

3.1.2.1 Le domaine Kabyle : comprend le socle Kabyle cristallin et sa couverture sédimentaire.

○ Le socle Kabyle

Constitué par des formations cristallophylliennes antétriasiques charriées vers le sud sur les terrains Mésozoïques et Paléogènes (Durant Delga, 1955 ; Boullin, 1977 ; Boullin, 1984).

Les formations cristallophylliennes du socle Kabyle comportent deux grands ensembles :

- un ensemble supérieur formé essentiellement de schistes, de micaschistes et de phyllades surmontées en discordance par des formations siluriennes (Durant Delga ; 1955).

-un ensemble inférieur constitué de gneiss à intercalation de marbres et d'amphibolites.

○ La dorsale Kabyle :

L'appellation de dorsale kabyle a été introduite par Durant Delga (1969). La dorsale kabyle est la couverture calcaire du socle kabyle. Elle comporte des terrains d'âge Jurassique à Eocène.

La dorsale kabyle est représentée par des lambeaux écaillés, alignés suivant une direction est ouest (Raoult, 1974). L'analyse des écailles permet de distinguer trois séries dites internes, médianes et externes.

- La dorsale interne : elle montre une série complète du Pero-Trias au Néocomien constituée de conglomérats à la base et du calcaire au sommet.
- La dorsale médiane : elle est caractérisée par des dépôts marno-calcaires à microfaunes pélagiques du Turonien au Lutétien inférieur et par des faciès à microfaune benthique (Nummulite) du Lutétien supérieur.
- La dorsale externe : elle est caractérisée par un Lias à *Pynchoneles* et à *Armioceras* et par des formations détritiques du Crétacé supérieur et Eocène.

3.1.2.2 Le domaine des flyschs : il forme une bande presque continue située au sud des massifs anciens et scindé en unité affleurant en :

- bande coincée entre le domaine kabyle et tellien.

- en superstructure tectonique (flysch numidien).

Trois grands types de séries ont été distinguées avec le flysch maurétanien (Gélard, 1969), le flysch massylien (Raoult, 1971) et le flysch numidien. En Algérie ces formations occupent une position allochtone.

3.1.2.2 .1 Le flysch maurétanien

Le flysch maurétanien comporte des terrains allant du Néocomien au Lutétien, il montre de bas en haut (Raoult et al, 1973) :

- un préflysch calcaire du Tithonique-Néocomien.
- un puissant ensemble (300m) à grés fins homométrique, à cassure verdâtre (flysch de Guerrouch) attribué à l'albo-aptien (Boullin et al ; 1970).
- des phtanites rouges et blanches du Cénomaniens supérieur (Djellit , 1989).
- des microbrèches à ciment spathique du Sénonien.
- au sommet des conglomérats et des grés micacés tertiaires (Eocène à Oligocène).

3.1.2.2.2 Le flysch massylien

Ce flysch comporte des formations allant du Néocomien au Lutétien terminal et regroupe trois ensembles qui sont de bas en haut :

- le classique flysch albo-aptien composé d'argiles verdâtres, et de grés quartzitiques vert olivâtres, et localement des niveaux conglomératiques (Boullin et al, 1970).
- marnes et calcaires fins du Vraconien, jaunâtres, des microbrèches et des conglomérats du Cénomaniens inférieur et moyen auquel sont associés des phtanites noires du Cénomaniens supérieur (Djellit, 1989).
- au sommet, des bancs de calcaires à microfaunes pélagiques du Turonien – Cénomaniens et des marnes microbréchiques du Turonien-Maestritien (Djellit, 1989).

3.1.2.2.3 Le flysch numidien

Le terme de numidien a été créé par Ficheur en 1890. Maintenant le terme numidien est réservé pour les grés numidiens et les argiles dites « sous numidiennes ».

Le flysch numidien occupe généralement la position la plus haute dans l'édifice structural alpin. Il affleure dans la région de Collo et de Skikda ainsi que dans la région d'El Milia et de Jijel et comporte de bas en haut :

- des argiles sous-numidiennes de teinte verte à rouge violacé contenant fréquemment des *Tubatomaculum* d'âge Oligocène moyen à supérieur.
- des grés en bancs épais (jusqu'à 200m) à grains grossiers, jaunâtres à blanchâtres, localement riches en dragées de quartz roulés (Boullin et Raoult, 1971) datés Aquitanien à Burdigalien inférieur.
- des formations supranumidiennes comportant des argiles et des marnes à intercalation de sélixites du Burdigalien basal.

3.1.2.3 Les formations telliennes et de l'avant pays

3.1.2.3.1 Les formations telliennes

Le domaine tellien correspond aux zones situées sur la paléo marge africaine. Il est caractérisé par la prédominance de faciès de marno-calcaires, qui s'étalent du Néocomien au Lutétien (Boullin 1977).

Les séries telliennes sont constituées par un empilement de trois grandes séries qui sont d'après Durant-Delga (1969) du Nord au Sud :

-une série ultra-tellienne

Cette série comporte les formations marneuses et marno-calcaires d'âge Crétacé à Eocène (Durant Delga, 1969).

-Une série méso-tellienne

Cette série correspond aux formations carbonatées du Jurassique. Elle est considérée comme la couverture de la plate forme constantinoise (Vila, 1980).

-Une série peni-tellienne

Cette série se distingue par des formations jurassico-crétacées, caractérisées par des faciès intermédiaires entre les faciès de la plate forme (calcaire et marno-calcaire du néritique) et des faciès de bassin (marne du domaine tellien).

3.1.2.4 Les formations post nappes

Les formations post nappes dans la région de Jijel sont caractérisées par un Burdigalien marneux riche en plancton et un Paléocène constitué par des conglomérats épais, mal classés et de tailles variables (Durant Delga et Magné, 1952).

3.1.2.5 Le magmatisme

Une intense activité magmatique a intéressée la région de la petite Kabylie, qui se traduit par la mise en place des roches granotoides. Ce magmatisme est en relation directe avec l'évolution géodynamique de la méditerranée occidentale et des chaînes alpines périméditerranéennes.

La région de la petite Kabylie est caractérisée par la prédominance de roches plutoniques par rapport aux roches volcaniques.

Les formations magmatiques affleurent en trois régions :

- dans la région d'El Aouana : rhyolite, micro diorite.
- dans la région d'El Milia : granite, microgranite.
- dans la région de Collo : granite et péridotite.

3.1.2.6 L'Oligo-Miocène Kabyle (O.M.K)

L'OMK constitue la couverture sédimentaire transgressive et discordance du socle kabyle. Il est formé de grés micacés admettant des conglomérats à leur base et des sélinites à leur sommet, d'âge Oligocène supérieur à Aquitanien. A cet Oligo-Miocène Kabyle succèdent les olistostromes (Raoult ; 1974-1975, Boullin ; 1977).

3.1.2.7 Les Olistostromes

Ce sont des formations tectono-sédimentaires synchronappes constituées de blocs et des klippes de flysch dans des passées de grés-micacés. L'âge de ces formations est supposé Aquitanien à Burdigalien inférieur probable (Boullin et Raoult, 1971 ; Boullin et al 1973 et Boullin 1977).

3.1.2.8 Le Nummulitique

Constitue la couverture de la dorsale kabyle et du flysch maurétanien et représenté par des formations grés-micacées. Il est d'âge fin Lutétien à Oligocène supérieur.

3.1.3 Géologie locale

La région de Jijel est caractérisée par deux zones :

- La zone ouest dont fait partie notre secteur d'étude, caractérisée par l'affleurement essentiel des nappes à matériel flysch.
- La zone est qui supporte :
 - Au nord : des formations olistostromiques à flyschs dissociés surmontés par des dépôts miopliocènes.
 - Au sud : le socle kabyle chevauchant le complexe volcanosédimentaire, et reposant sur les zones externes.

Structuralement, l'édifice actuel est composé de deux compartiments (Djellit, 1989) :

- Le compartiment structural inférieur : regroupe les unités frontales infra kabyles et le socle kabyle qui les chevauche.
- Le compartiment structural supérieur : caractérisé par une tectonique de glissement superficiels de nappes gravitaires, séparées par des contacts anormaux « plats » subhorizontaux. Cet ensemble englobe :
 - flysch de Guerrouch.
 - Flysch dissocié.
 - Flysch numidien.

3.1.3.1 Flysch de Guerrouch

La colonne lithologique du flysch de Guerrouch (Djellit, 1989) :

- à la base : un pré flysch calcaire à l'est et gréseux à l'ouest du Bériasien-Valenginien.

Le préflysch calcaire se présente en bancs réguliers d'épaisseur centimétrique (30-50cm) à granulométrie moyenne et à stratification oblique.

Le préflysch silteux montre des bancs de grés micacés à granulométrie moyenne, généralement séparés par des interlits argileux, et fondé localement sur des microbrèches.

- Un flysch argilo-gréseux de l'Albien montrant de bas en haut :

- Grés de Guerrouch (50-100m).
- Alternance argilo-gréseuse (180-200m).
- 10-20m de lentilles et niveaux de grés micacés et de quartzites vertes.
- Au sommet : marnes et argiles de Vraconien – Cénomaniens :
 - 50 à 80m du calcaire silicifiés du Cénomaniens.
 - 50 à 80m de marnes calcaires du Vraconien.

3.1.3 .2 Flysch dissocié

Il est difficile voire même impossible de trouver une coupe continue représentant bien la lithologie complète du flysch dissocié. La série la plus développée est rencontrée sur la lame de l'oued Bourchaid et du col d'El Aouana, dont l'étude de ces coupes ont permis de connaître, dans la lame nord du flysch dissocié, de bas en haut (Djellit, 1989):

- un flysch argilo-quartzitique "albo-aptien" qui ne dépasse pas 150m d'épaisseur dans le cas le plus favorable.
- Un flysch rythmique d'Albien inférieur-moyen? marneux à passées détritiques de 50 à 100m d'épaisseur.
- Des marnes bleues à beef (40-50m) à passées calcareuses du Vraconien.
- Un ensemble de pélites, marnes et microbrèches à Globotruncana du Sénonien (50-70m).
- Localement : ces ensembles sont surmontés directement par des argiles rouges à intercalation de calcaires à Nummulites de l'Eocène.

3.1.3 .3 Le flysch numidien

Le flysch numidien a donné lieu à de nombreuses controverses tantôt sur l'âge, tantôt sur leur position structurale, ou encore sur les quartz constituant les grés numidiens.

Lithologie

Le numidien est bien représenté au niveau des Djebels Tidiouane et Mezghitane, sa lithologie sera étudiée en détail dans la géologie du site.

Age de la série numidienne

Les données micropaléontologiques concernant la série numidienne sont très rares et de plus d'interprétations délicates. La rareté des niveaux fossilifères a donné lieu à diverses controverses. Les récentes datations de Raymond en 1976 ont estimé l'âge du numidien de l'Aquitaniens élevé à Burdigalien basal.

3.1.4 Géologie du site

La zone à étudier est dominée par une nappe de flysch numidien d'âge aquitanien élevé à Burdigalien basal (Raymond, 1976) reposant par un contact anormal sur les molasses aquitano-séravaliennes.

La nappe numidienne apparaît sous forme de blocs et /ou de « klippes» tectono-sédimentaires et présente au niveau de Djebel Mezghitane des structures anté-glissement représentés par des plis nord-sud. Les matériaux de cette nappe sont formés (Djellit ; 1989)(figure2.3) :

- I. à la base 50m d'argile varicolores: vertes, rouges, jaunes et grises à intercalations calcaro-gréseuses à glauconies (a).
- II. par-dessus 10-20m d'une alternance de pelites bleutés et de marne à intercalations gréseuses décimétriques ; soit en niveaux continus (a) ; soit en niveaux lenticulaires (b) et à figure de base (flûte cast ,figure de charge etc.) .
- III. ensuite un ensemble (150-160m) de grés de teinte jaune-blanc (rouille à l'altération), à grains grossiers de quartz roulé.
- IV. enfin 10 à15 m de bancs de calcaires gréseux associés à des marnes calcaires terminent cette succession.

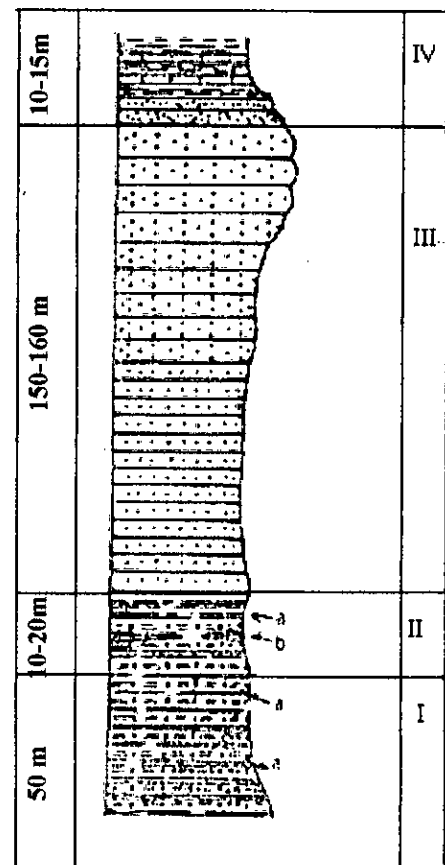


Figure 3.2 : Colonne lithologique synthétique du flysch numidien au niveau de Djebel Mezghitane (Djellit, 1989).

Le site est dominé par deux niveaux :

- Un niveau dure de grés épais à cassure blanchâtre et à grains grossiers à moyens riches en dragées de quartz.

Cet ensemble affleure largement à la surface et on peut le suivre sur des grandes distances aussi bien sur le terrain que sur photographie aérienne. Il est disposé en bancs épais (2 à 3m) de direction entre N 160 à 175 E (NNW-SSE) et prolongent vers le ENE avec un pendage varie entre 40 et 80°. Ce niveau gréseux est affecté par un réseau de fractures.

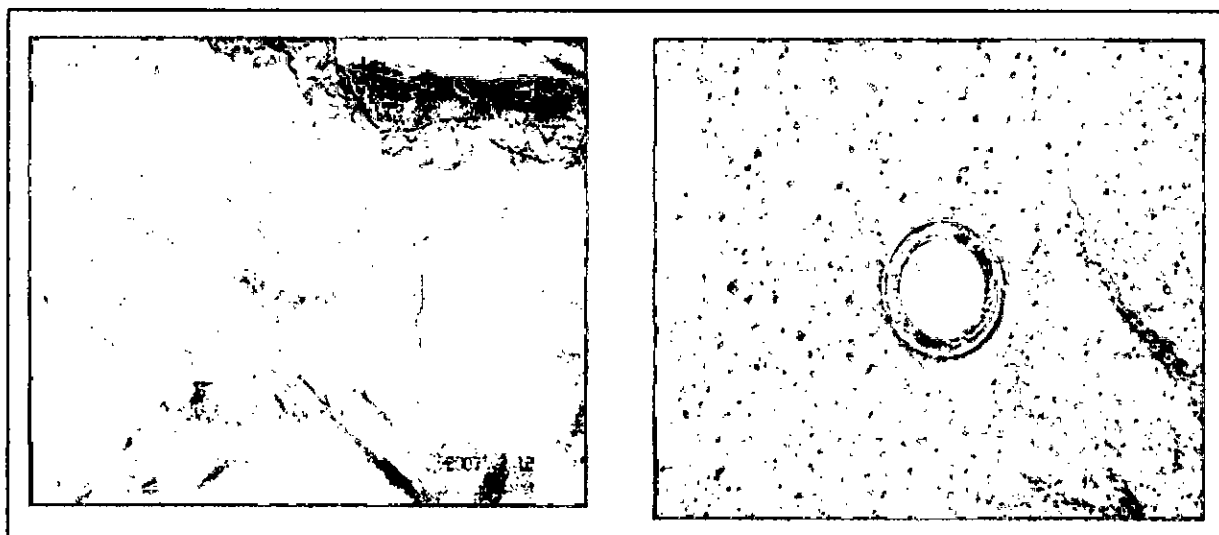


Fig. 3.3 : photo illustrant des grés épais riches en dragées de quartz

- Un niveau tendre d'argiles grises à bleues (figure 3.4 et 3.5) à intercalation de niveaux gréseux (de 10 à 40cm). Avec la profondeur les argiles deviennent de plus en plus schisteuses. L'aspect schisteux est probablement dû aux charges lithostatiques.

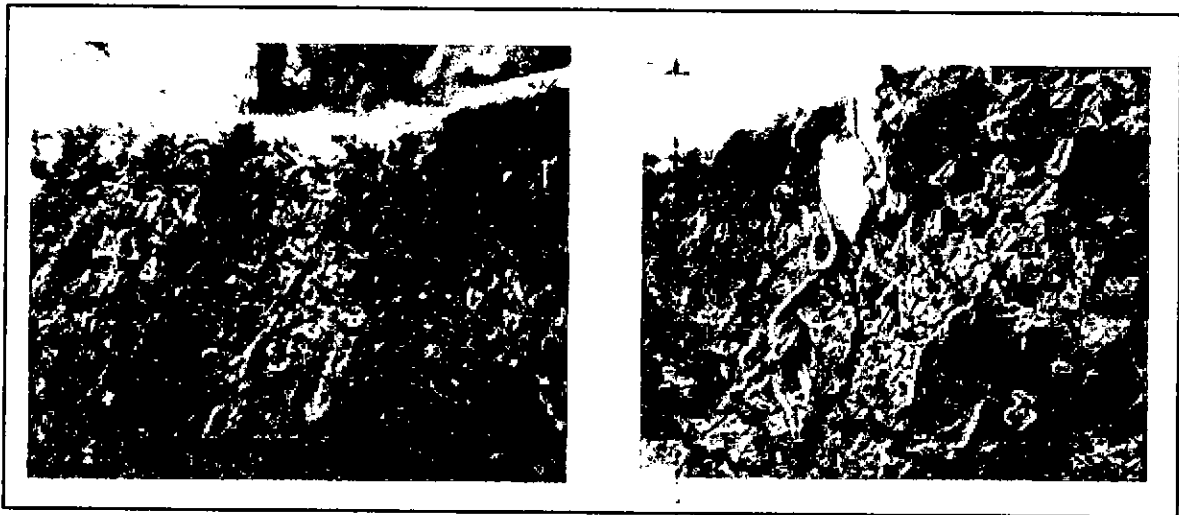


Fig 3. 4: Photo illustrant les argiles à intercalations gréseuses.

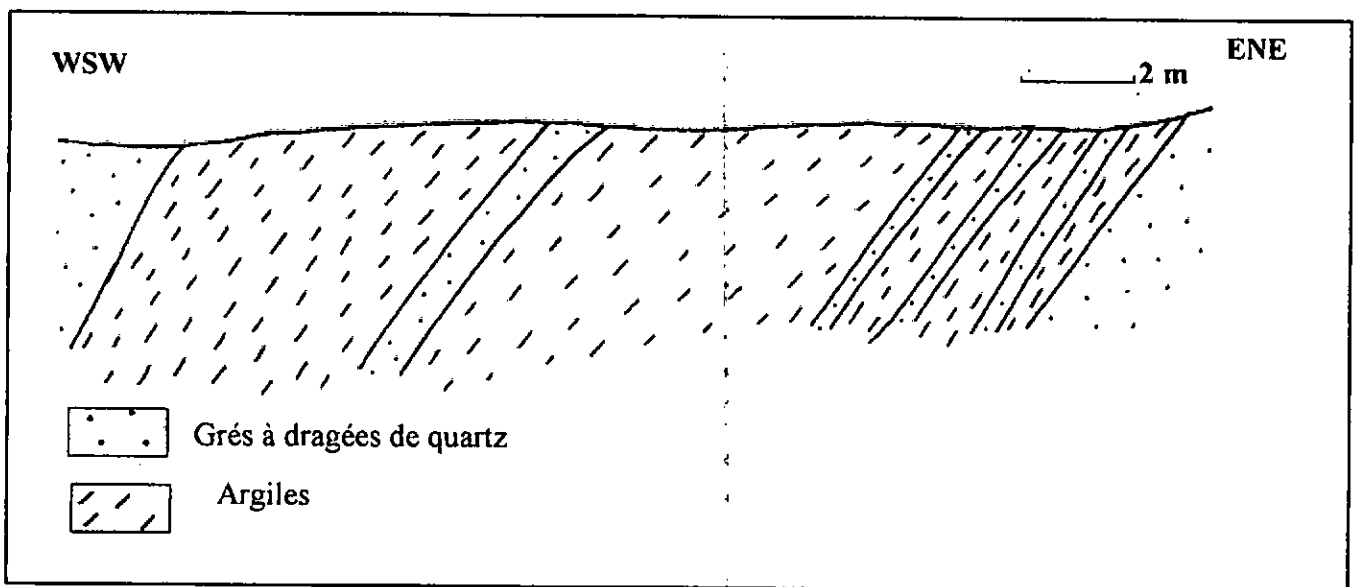


Fig 3. 5 Coupe au niveau des formations tendres.

Le recouvrement quaternaire (couverture d'altération) est réduit et même absent sur le niveau gréseux, il est représenté par des sols sableux, silteux et argileux résultant de l'altération des grés.

Sur le niveau tendre le recouvrement quaternaire est très important, il est constitué de 2 à 3m d'argile de limon et de terre végétale.

3.1.4.2 Tectonique

Le grès numidien préserve mal les stries de faille, les traces de la tectonique cassante sont très rares sur les affleurements qui présentent de nombreuses directions de fractures. Ces fractures ne montrent pas de traces évidentes du plan de faille (avec stries caractéristiques) mais elles sont en revanche « remplies » de matériaux témoignant de la mobilisation de fer. Seul un plan de faille a été observé (fig 3.6). C'est une faille normale décrochante dextre de direction N150 E 70 E. Au niveau de ce plan de faille, les couches deviennent verticales. Les fractures sont abondantes, elles ont affecté les formations gréseuses. La tectonique souple est matérialisée par des plis NE-SW affectant les formations argileuses (figure 3.6, 3.7 et 3.8).



Figure 3. 6 : photo illustrant un plan de faille de direction N-S.



Figure 3. 7 : photo illustrant un pli de direction NE-SW.

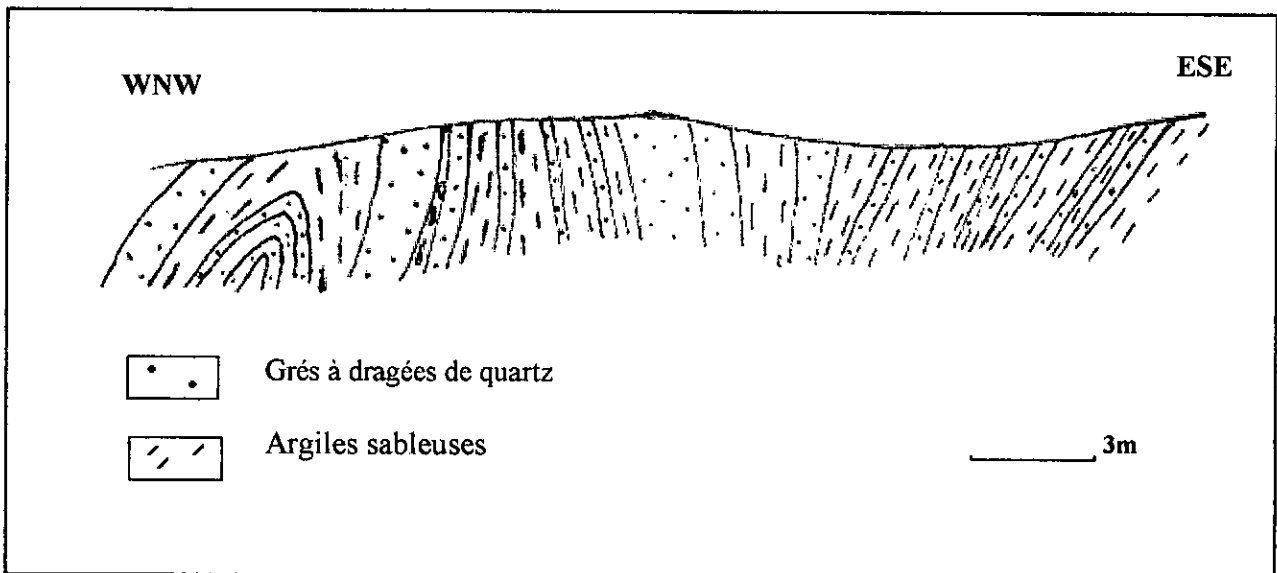


Figure 3. 8 : Coupe au niveau des formations tendres.

Les différentes formations sont regroupées sur la coupe synthétique de la figure 3.9.

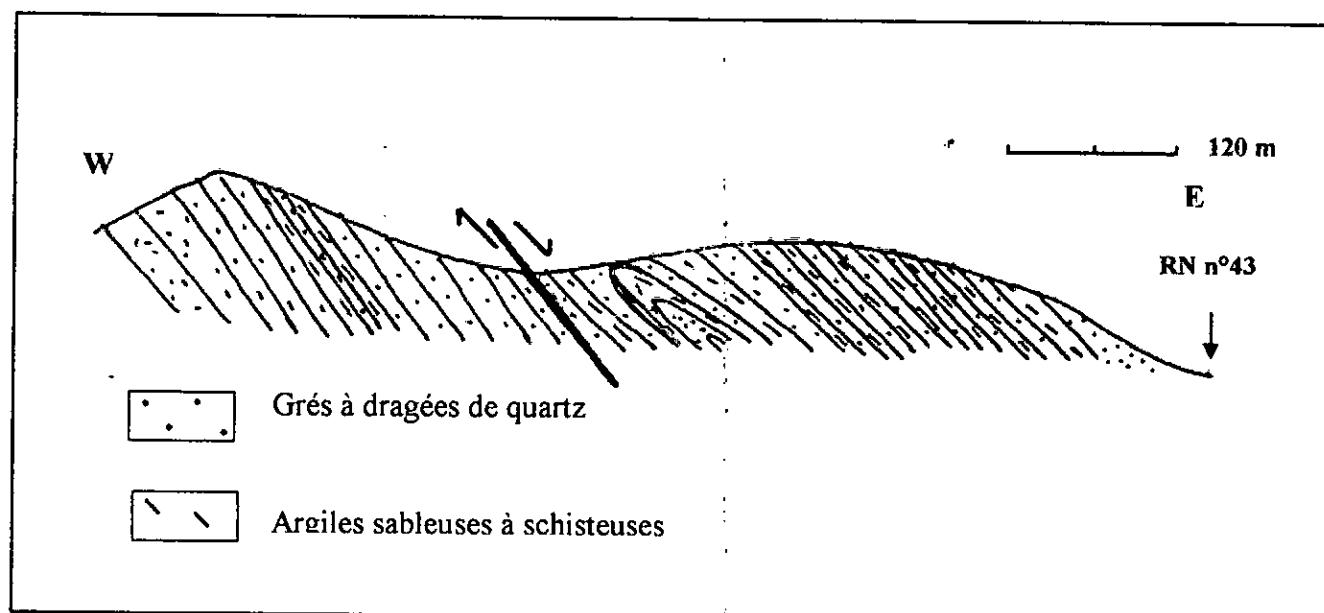


Figure 3.9 : Coupe géologique synthétique.

2.1.4.3 Géomorphologie du site

Le site est constitué d'un plateau entouré par des terrains ravinés à déclivité importante. Il présente un relief topographique assez accidenté, avec une pente d'orientation sud-nord en générale.

Les classes I et II (10 à 15% et 15 à 20%) sont les plus importantes (fig3.10); elles caractérisant la partie centrale du terrain, les classes V (30 à 35) et VI (plus de 40%), correspondent à des talus qui longent la limite nord-est du site.

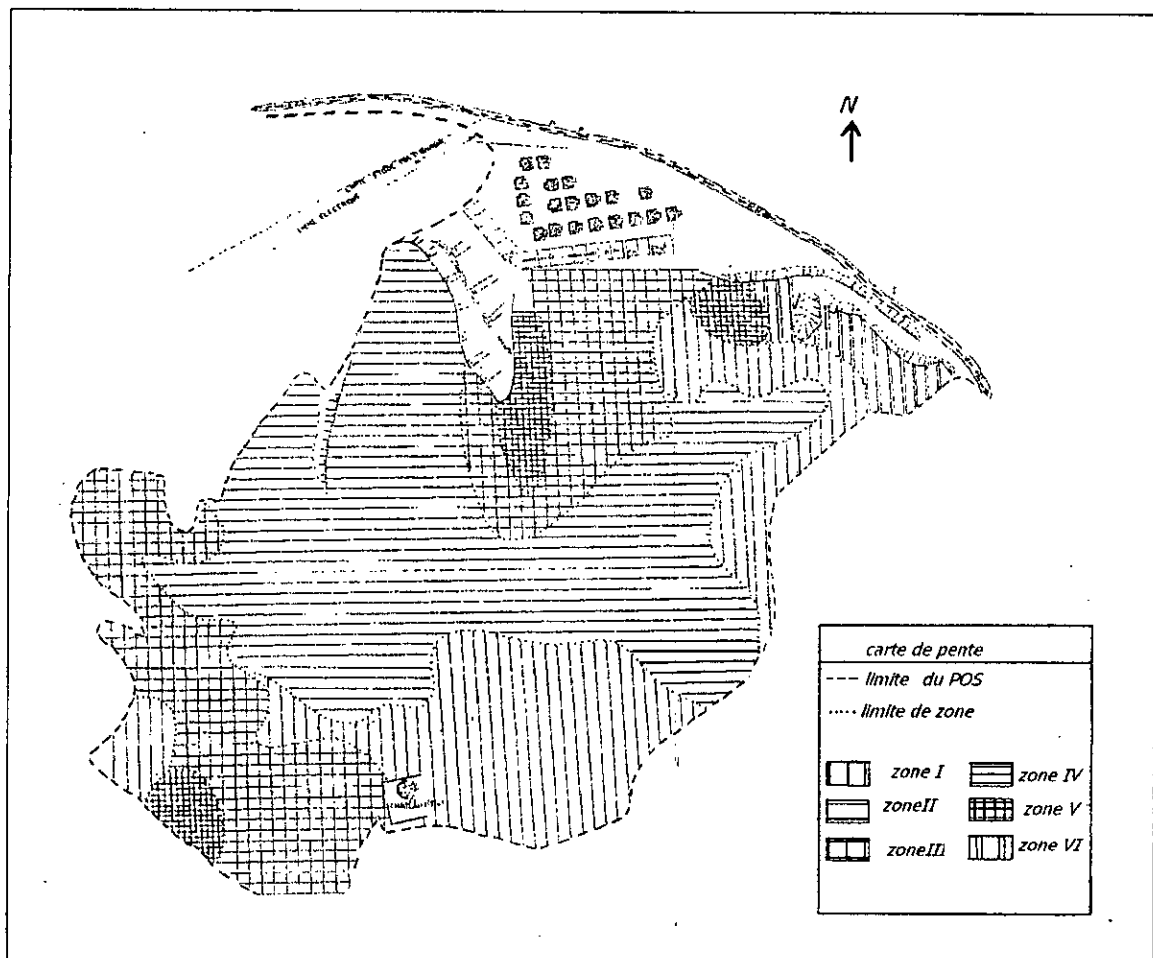


Figure 3. 10 : carte de pente simplifiée (LNHC, unité de Rouïba)

(Zone I) 10-15% (zone II) 15-20% (zone III) 20-25% (zone IV) 25-30% (zone V) 30-35% (zone VI) au dessus de 40%.

Chapitre 4



Applications géophysiques (rappels)

4.1 Introduction

La prospection géophysique est une technique non destructive très répandue en géologie de l'ingénieur, elle permet une investigation rapide et peu coûteuse d'un grand volume de sols et capable de caractériser des sols sur une surface étendue ainsi qu'éventuellement de détecter des variations latérales à l'échelle du site. La prospection géophysique devient alors un outil extrêmement puissant pour optimiser les campagnes de forage et réduire leur coût (Savard, 2006).

4.1.1 Objectifs

L'objectif principal de la présente étude est de déterminer par imagerie géophysique, quelles sont les conditions géologiques et géotechniques caractérisant le sol et le sous sol du POS de Mezghitane et de connaître ainsi la géométrie des structures du sous sol. La géométrie des structures du sous-sol est importante pour comprendre comment se développent les glissements de terrain dans une région particulière et, ainsi, elle permet d'établir des cartes de risque géologique (Bruno, 2002). La géométrie des couches du sous-sol constitue le paramètre principal dans les calculs de stabilité de pente et fournit une aide pour décider de la meilleure stratégie d'assainissement (Bruno, 2002).

Caractérisation géologique :

- Détermination des types de strates et leur épaisseur ;
- Evaluation de la topographie du socle sous le matériel;
- Détection et délimitation de zones fracturées qui contrôlent l'écoulement dans les roches;
- Localisation, délimitation et caractérisation des nappes aquifères ;

Caractérisation géotechnique :

- Détermination des zones géologiques et des frontières qui contrôlent la stabilité au glissement ou le tassement, telles que couches de marne ou d'argile ;

Objectifs spécifiques de l'étude :

- l'objectif spécifique de ce travail est de tester l'apport de deux techniques géophysiques récentes à l'étude des POS : la résistivité électrique et le géoradar ;
- de réaliser des profilages de résistivité électrique le long du site d'étude ; et

- de démontrer si l'imagerie géoradar et électrique peuvent être utilisées pour déterminer les propriétés physiques du sol en place.

4.1.2 Choix de méthode géophysique utilisée

Le choix de la méthode géophysique parmi les autres méthodes (électrique, sismique, électromagnétique, gravimétrique, magnétique,...) est basé sur des indications sur la nature du sous-sol par le biais de l'étude de la variation d'un paramètre physique (la résistivité électrique, la vitesse de propagation des ondes élastiques, la densité et la susceptibilité magnétique). Ce choix est en fonction de:

- la nature de la cible recherchée qui doit provoquer une anomalie suffisante pour être mesurée ;
- la précision recherchée, qui doit être en adéquation avec le pouvoir de résolution de la méthode et de l'équipement sélectionné ;
- l'objectif des travaux de prospection et notamment à l'échelle sur laquelle elle est entreprise, qui conditionne le cadre de la mise en œuvre des mesures sur le terrain et ;
- l'efficacité de la méthode géophysique utilisée à détecter de telles anomalies.

4.1.3 Problématique du choix de la méthode géophysique à Mezghitane

Dans l'étude du POS de Mezghitane, nous avons opté après analyse de la situation et test d'équipement radar géologique et prospection électrique.

Le radar géologique a connu des difficultés à visualiser les terrains humides gorgés d'eau, l'effet skin de l'onde électromagnétique ne favorise pas la réflexion et disperse l'onde électromagnétique. Contrairement à la méthode électrique en utilisant un système d'acquisition similaire au panneau électrique (une technique qui dérive de la sismique) et qui est proche du radar géologique. Les résultats ont été acceptables.

Le radar géologique aussi appelée géoradar ou GPR (acronyme du nom anglais ground probing radar) est une méthode d'investigation géophysique de subsurface, fondée sur l'analyse de la propagation et la réflexion des ondes électromagnétiques (EM) hautes fréquences (la gamme de fréquence centrales utilisées est très étendue .Elle varie de

quelques dizaines de Mhz au Ghz). Cette méthode utilisée depuis les années 60 (Annan, 2002) permet de sonder le sous sol sur de grande distance, rapidement sans être obligé de creuser (Loefler, 2005).

L'imagerie électrique est la reconnaissance multidimensionnelle des propriétés électriques du milieu étudié au moyen d'électrodes servant à appliquer un courant électrique (Laurent, 2004). Cette méthode, peu invasive et de faible coût, est couramment utilisée en prospection géophysique (Laurent, 2004).

4.1.4 Approche historique de la méthode géophysique (Grellier, 2005 ; Laurent, 2004)

La géophysique ou physique de la terre a pour but d'étudier les propriétés physiques du globe terrestre. L'objectif principal est de déduire les propriétés physiques et la constitution de la terre à partir des phénomènes physiques qui leur sont associés (champ géomagnétique, la force de pesanteur, la propagation des ondes sismiques...) (Grellier, 2005).

Des Anglais, Gray, Wheeler et Watson se sont intéressés aux propriétés électriques des roches et ont mesuré leurs conductivités dès le milieu du *XVII^{ème}*. Les premiers travaux importants en prospection électrique sont dus à Fox (1789-1877) qui est le premier à observer les phénomènes de polarisation spontanée. Le problème de la détermination de la résistivité électrique d'un milieu non-homogène a été discuté par Maxwell en 1891. Il a souligné l'importance de l'utilisation de quatre électrodes, plutôt que deux, pour mesurer la résistance générée par un courant dans un milieu conducteur tridimensionnel.

Le début du *XX^{ème}* siècle a annoncé le développement des méthodes électriques, notamment grâce à l'intervention de deux principales écoles. L'école la plus active c'était l'école française qui a connu son commencement en 1912 lorsque Conrad Schlumberger lança une série d'expérience afin de trouver des ressources minérales par des méthodes électriques. La méthode de polarisation spontanée était la première à être mise en point, puis en 1914 celle des cartes de potentiel. En 1920, il fit son premier relevé de résistivité électrique qu'il appliqua à la recherche minière et pétrolière. Six ans plus tard, il créa la société de prospection électrique, cette dernière allait donner naissance à deux grandes organisations, la Compagnie Générale de Géophysique de France (CGG) et la Schlumberger Well Surveying Corporation. L'école Américaine fut fondée par Wells,

Daft et Williams en 1906, mais surtout en 1912 par Frank Wenner qui fit une étude théorique du système de mesure électrique de résistivité électrique au moyen de quatre électrodes, ainsi que du théorème de réciprocité appliqué à ce système. Les Russes et les Scandinaves ont également fait des recherches importantes. A partir de cette époque, la prospection par courant continu s'est essentiellement concentrée sur la mise en œuvre et l'interprétation des sondages électriques et des profils (ou cartes) de résistivité. Une nouvelle représentation des données sous la forme de panneaux électriques s'est apparue dans les années 1970. Il faut attendre 20 ans pour voir le développement des méthodes d'imagerie 2D et 3D associés à des algorithmes d'inversion performants grâce au progrès des moyens informatiques.

Les premières applications du radar remontent au début du siècle, en Allemagne (1926) et en Autriche (1929) dans le but de déterminer la profondeur d'un glacier. Au milieu des années 60 les techniques d'imagerie à partir de géoradar ont débuté mais se n'est qu'au milieu des années 80 que le géoradar devient populaire. Les techniques d'imagerie à partir de géoradar sont accélérées depuis les dix dernières années.

4.1.5 Domaines d'application de la géophysique

Contrairement à la géologie, qui utilise les observations de surface pour en déduire l'architecture du sous-sol, la géophysique essaye de déterminer la structure du sous-sol en mesurant certaines propriétés physiques depuis la surface : géologie et géophysique sont donc deux sciences complémentaires et indissociables (Jeannin, 2005). L'exploration géophysique fournit une connaissance détaillée du sous-sol. L'exemple le plus connu est celui de l'industrie d'exploration pétrolière qui utilise systématiquement la géophysique pour déterminer l'emplacement de forages, très chers à implanter (Bruno, 2002).

Les domaines d'application de la géophysique sont très variés et couvrent l'ensemble des sciences de la terre, de la géotechnique et du génie civil.

A) Application en hydrogéologie

La géophysique intervient en hydrogéologie, principalement sous forme d'une approche indirecte par la quelle le prospecteur localise les structures poreuses ou fracturées qui peuvent faciliter les transferts et les stockages d'eau (Ptitfils et al ,1981 in Tabbagh 1995). Au début, le rôle de la géophysique lors des études hydrogéologiques se

réduisait à délimiter les zones les plus favorables à la présence d'une eau douce à faible profondeur (Shields et Sopper, 1969; Aster, 1971). Plus tard, différentes méthodes de la géophysique ont été employées dans des zones restreintes, proches des centres d'utilisation, villes ou usines, pour déterminer les meilleurs emplacements des puits d'eau.

B) Application en environnement

Avec l'apparition des problèmes environnementaux la géophysique a développé une nouvelle discipline, celle de la géophysique environnementale. Il s'agit des études de haute résolution dont les cibles se trouvent à petite profondeur sous la surface (5 à 15m).

C) Applications en géotechnique et génie civil

Le fait que d'un point de vue géotechnique, le sol est un milieu hétérogène, signifie alors que la prospection géophysique peut jouer un rôle très important dans la cartographie géotechnique dès lors que les couche de lithologie, de porosité et de teneur en eau différente, la présence des fracturations offrent des contrastes de propriétés électriques et électromagnétiques. Les méthodes géophysiques trouvent leur utilité à différents stades de l'étude géotechnique, par exemple, elles permettent d'apprécier l'hétérogénéité d'un site et d'implanter judicieusement les sondages. En aucune manière, Les méthodes géophysiques ne peuvent substituer totalement aux investigations par sondage, cependant elles permettent une meilleure approche du programme de reconnaissance par une réduction du nombre de sondages (Philipona, 2003). Malgré que l'application de certaines méthodes géophysiques puisse donner des informations du sous-sol très intéressantes pour les géologues et/ou les géotechniciens, l'utilisation de la prospection géophysique en géotechnique et génie civil reste restreinte.

4.1.6 Domaines d'application de l'électromagnétisme cas du géoradar

Le géoradar est un outil de mesure précieux et ses domaines d'utilisations sont multiples tant dans le domaine de caractérisation géophysique que pour l'auscultation des ouvrages de génie civil. Leur champ d'application est très vaste, allant de l'étude des bassins sédimentaires (Bano et Gérard, 2001) à l'auscultation du béton (Sbartai, 2005) en passant par l'investigation hydrogéologique, paleotologiques (Noorman et al, 2001) archéologique (Leckebusch, 2001), en glaciologie, environnement (Loefler,2005) etc.

Dans le domaine de géotechnique et de génie civil, le géoradar est utilisé pour l'étude des revêtements des routes ou aéroport, la surveillance des tunnels ou le contrôle des maçonneries pour les ouvrages d'arts etc.

Les utilisations du Radar en Génie Civil sont très variées, elles dépassent la stricte géophysique pour toucher aussi l'auscultation d'ouvrages d'art et de chaussées (détermination des différentes couches et de leur épaisseur). La principale utilisation est probablement la recherche de canalisations en milieu urbain. Par rapport aux autres méthodes, notamment électriques, la caractéristique principale du Radar est le grand détail d'information qu'il permet d'acquérir.

A) Applications à la géologie

Dans le domaine d'investigation géophysique, le géoradar est largement utilisé en glaciologie pour estimer l'épaisseur de la glace et pour détecter le contact neige-glace (Leofler.2006). En volcanologie, il est possible d'imager et de détecter d'anciens dépôts volcaniques par le géoradar. En environnement, le géoradar a été utilisé pour localiser et suivre l'évolution d'un polluant (Leofler, 2006). En archéologie, le géoradar est un outil d'auscultation non destructif pour découvrir des objets enfouis et des sites historiques (Alexis Mojica Abrego, 2007 ; Lambert et Saillard, 2003). Enfin, le géoradar a été utilisé pour imagerie les structures tectoniques comme les plis et les failles (Bano ; 2000).

B) Applications en géotechnique et génie civil

Le géoradar est un outil indispensable pour le contrôle non destructif permettant de localiser les cibles sans être obligé de dégrader le milieu. Ses applications dans le monde du génie civil et de la géotechnique sont nombreuses ; en plus de l'utiliser pour caractériser la teneur en eau d'un sol (Leoffler, 2006), il a été utilisé par (Dérobert et al, 2001, Dérobert., Coffec. 2001.) pour contrôler le revêtement des routes, par (Uberti, 2005) pour la reconnaissance de l'état des fondations, par (Dérobert et Durand, 2003 ; Sbartaï et al, 2003) pour localiser les armatures et caractériser les structure en bétons et par (Dérobert et Durand, 2003 ; Fauchard et Durand, 2003) pour déterminer l'épaisseur bitume sur les routes.

En milieu urbain, les préoccupations des aménageurs sont très variées. Parmi celles-ci les reconnaissances de tracées linéaires pour la mise en place des canalisations. Il s'agit

d'être capable de prédire les matériaux que rencontreront les engins de terrassement (tranchées, canalisations préexistantes...) pour choisir la méthode de creusement et les caractéristiques de la machine. Le géoradar permet de définir l'emplacement de ces matériaux.

Plus récemment le géoradar est à l'étude en vue de faciliter la localisation des mines antipersonnel et antichar. Il semble être une solution prometteuse dans ce domaine.

4.1.7 Domaines d'application de la méthode électrique

Les domaines d'applications de la méthode électrique sont de plus en plus diversifiés (Savard, 2006). La prospection électrique est couramment utilisée en exploration minière dans le but de détecter la présence de gisements de minéraux souterrains et en particulier les gisements métalliques. Elle est de plus en plus utilisée en sédimentologie pour déterminer la stratigraphie et la géométrie des dépôts. L'emploi de la prospection électrique prend également de l'expansion en archéologie pour détecter la présence de vestiges archéologiques. En environnement, la prospection électrique a été employée pour délimiter des décharges et déceler des migrations de polluant dans le sol (Grellier, 2005).

A) Applications en géotechnique et génie civil

L'imagerie électrique est une méthode relativement récente et de plus en plus utilisée pour des applications en géotechnique et en génie civil. Elle suscite un intérêt grandissant pour l'auscultation des structures du génie civil et de leur environnement. La méthode électrique permet de déterminer avec précision de la configuration des terrains sous un glissement (Ardisson al. 1997), y compris la surface de rupture séparant le matériel déplacé de celui en place. Elle permet également la localisation d'accumulation d'eau dans le sol, cela est important puisqu'il permet de stabiliser un glissement de terrain en pompant cette eau lorsqu'elle est détectée.

B) Applications en hydrogéologie

L'hydrogéologie constitue le domaine privilégié de la prospection électrique. La prospection électrique est la méthode géophysique la plus employée pour l'hydrogéologie car le principal paramètre cible de cette méthode (la résistivité ou son inverse la conductivité) est influencée par la nature des roches mais également par la quantité et la

qualité d'eau d'imbibition. La méthode électrique est utilisée pour cartographier l'extension des biseaux salés dans les aquifères à proximité de la mer. Pour des cas de contaminations de la nappe phréatique (Naudet, 2004).

4.2 Bases théoriques des méthodes géophysiques utilisées

4.2.1 Méthode électrique

La prospection électrique est une méthode géophysique classique s'appuyant sur la mesure de la résistivité électrique du sol (Schout, 1999). Elle permet de déterminer la résistivité du sous-sol à partir de mesures effectuées en surface.

Le principe de la méthode électrique consiste à injecter un courant électrique en surface entre deux électrodes impolarisables (A et B) et à mesurer la différence de potentiel électrique ΔV générée par le passage du courant entre deux autres électrodes de réception (Met N) (figure 4.1).

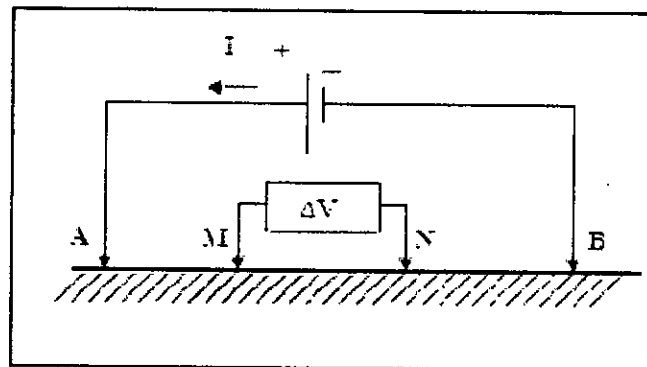


Figure 4.1 : Principe de la prospection électrique en dispositif Wenner alpha, ($AM=MN=NB=a$).

4.2.1.1 Méthodes de résistivité

Ces méthodes consistent à mesurer le potentiel induit par l'injection dans le sol d'un courant continu au moyen d'électrodes métalliques plantées en surface. Les mesures sont généralement réalisées en courant continu, éventuellement à basse fréquence (quelques Hz) (Ray, 2005 ; Marescot, 2007).

1) Résistivité électrique des roches

La résistivité électrique (noté ρ exprimée en $\Omega.m$) est une mesure de la facilité avec laquelle le courant électrique traverse un milieu donné. L'inverse de la résistivité est la conductivité en siemens/mètre (S/m). La résistivité des différents matériaux, inertes ou vivants, est donc une propriété physique variant dans de grandes proportions, ce qui constitue un atout majeur des méthodes électriques. Dans la nature la gamme des résistivités est très étendue, variant de moins d'1 $\Omega.m$ à plusieurs milliers d' $\Omega.m$ (Jeannin, 2005). En effet les terrains argileux et humides sont les plus conducteurs, les terrains secs et rocheux, les plus résistants.

En général, la résistivité électrique du sol ne peut pas être mesurée directement, elle est déduite de la mesure de la différence de potentiel entre deux points.

2) Facteurs influençant la résistivité électrique (Krivochieva, 2004)

Pour la plupart des roches proches de la surface du sol (moins de 15km), la résistivité est entièrement électrolytique ; le courant électrique passe à travers l'eau qui est contenue dans les roches. La quantité et la composition de cette eau sont donc particulièrement déterminantes de la résistivité électrique et d'après Desclotres (1998) parmi les facteurs qui influencent ce paramètre on trouve : La porosité des roches : la forme et la taille des pores, la connexion et les passages entre les pores ; La fracturation des roches : le type, la taille et les dimensions des fractures ; La présence de sels dans l'eau : la mobilité, la concentration et le degré de dissociation des ions ; La température : la résistivité électrique diminue avec l'augmentation de la température a raison de $0.19\Omega .m$ par degré ; Le type de roches : les sols et les roches peuvent être différenciés par leur résistivité électrique. Le tableau III.2 montre quelques valeurs et les intervalles typiques de la résistivité de différentes roches et formations.

Il y a trois modes de propagation (circulation) des courants électriques (Astier, 1971 in Chalikakis, 20006) :

- Par conduction électronique (métallique), qui caractérise la plupart des minéraux. Elle est due à la présence des «électrons libres pouvant se déplacer facilement dans le cristal métallique. Dans ce cas la résistivité électrique est faible.

- Par conduction électrolytique, qui est due aux ions des liquides présents dans les roches poreuses. En fait, elle correspond au mode de propagation des courants électriques le plus commun dans la roche va dépendre de la quantité et de la qualité de l'électrolyte (eau d'imbibition) et de la géométrie des pores.
- Par conduction diélectrique, qui existe dans les semi conducteurs besoin d'énergie pour libérer des électrons.

4.2.2 Bases théoriques de la méthode électrique

4.2.2.1 Potentiel et résistivité électrique

La méthode de prospection électrique par courant continu est fondée sur l'utilisation de la loi d'Ohm. Mais cette loi ne s'applique que dans le cas d'un conducteur linéaire. Pour calculer le potentiel créé par l'injection d'un courant I à travers une surface S , il faut introduire le vecteur de densité J dirigé dans le sens de propagation du courant. La valeur de la densité de courant J peut être obtenue en divisant l'intensité du courant total I par la surface S traversée par le courant :

$$J = \frac{I}{S} \quad (4.1)$$

Avec :

I : intensité du courant en milliampères,

L'air de cette surface étant $4\pi r^2$, la densité de courant J à la distance r est :

$$J = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (4.2)$$

La loi d'Ohm s'écrit :

$$E = \rho J \quad \text{ou} \quad J = \frac{1}{\rho} E = \sigma E \quad (4.3)$$

Avec ρ : résistivité électrique du milieu homogène en $\Omega.m$ d'où :

$$E = \frac{\rho I}{4\pi r^2} \quad (4.4)$$

Le potentiel V à une distance r de l'électrode est donné par :

$$V = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (4.5)$$

A la surface du sol, le courant va se répartir dans un demi-espace, la densité de courant est alors :

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (4.6)$$

Et la valeur du potentiel dans le cas d'une seule électrode s'écrit :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (4.7)$$

En réalité deux électrodes sont nécessaires pour que le courant circule dans le sol, une électrode pour injecter le courant, l'autre pour le faire ressortir.

Le potentiel en M pour une injection entre les points A et B est :

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (4.8)$$

Avec : AM : la distance entre A et M.

BM : la distance entre B et M.

En pratique, on mesure la différence de potentiel et non le potentiel. Donc, pour un dispositif de quatre électrodes (quadripôle ABMN) la différence de potentiel s'écrit :

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N \quad (4.9)$$

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \text{ Ou } \Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} k \quad (4.10)$$

$$k = \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (4.11)$$

Avec :

I : intensité du courant en milliampères,

ΔV : différence de potentiel en millivolts,

K : coefficient géométrique.

Le facteur géométrique k dépend du dispositif de mesure utilisé, c'est-à-dire de la disposition relative des électrodes de courant et de potentiel.

La résistivité du demi-espace est alors s'écrit :

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (4.12)$$

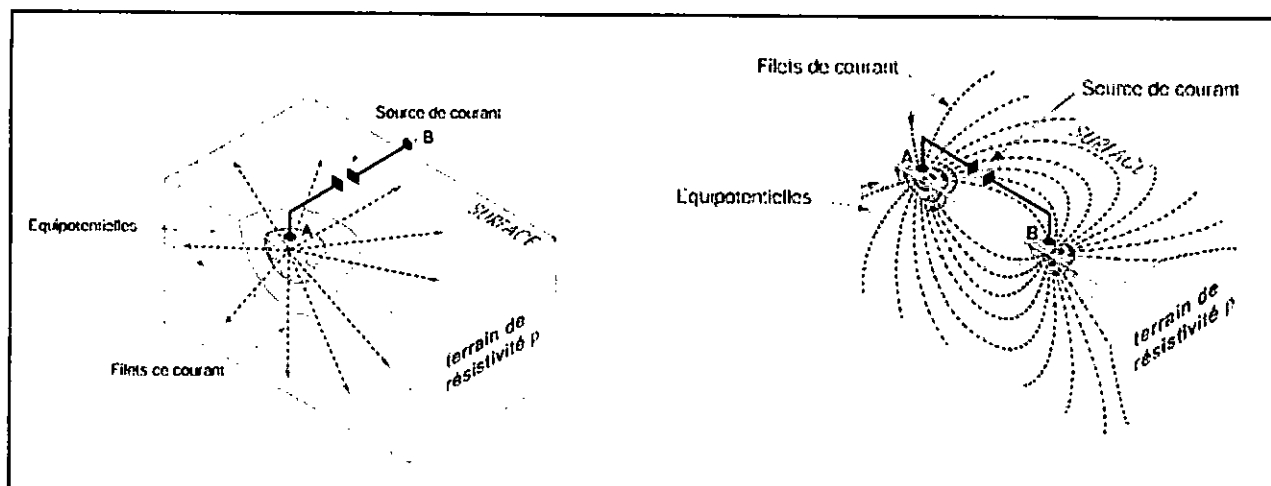


Figure 4.2 Effet de l'injection d'un courant à travers deux électrodes A et B dans un terrain homogène (Chappelier , 2001)

Lorsque le sol n'est pas homogène (ce qui est le cas pour quasiment tous les terrains), la résistivité mesurée est dite apparente (ρ_a) elle est en fonction des caractéristiques du sous sol et elle n'est pas égale de la résistivité réelle ou intrinsèque du sol que dans le cas d'un sol homogène et isotrope. Pour obtenir la résistivité réelle d'un milieu hétérogène complexe, il faut passer par une inversion des données de résistivités apparentes.

4.2.2.2 Dispositif de mesure

Le but de l'imagerie électrique est de fournir des renseignements sur la distribution spatiale des résistivités dans un sol (Anterrieu, 2006). Plusieurs dispositifs sont disponibles pour déterminer la répartition des résistivités dans le sous-sol. La configuration du dispositif est choisie selon la problématique étudiée (Laurent, 2004). La figure (4.3) illustre les configurations des électrodes les plus utilisées pour la prospection électrique ; le coefficient géométrique est également donné.

1) Dispositif Schlumberger

Les électrodes d'injection A et B sont écartés systématiquement de part et d'autre du centre du profil ; les électrodes de potentiel M et N (avec la particularité que la distance MN doit être inférieure à la distance AB divisée par 5) restent autant que possible fixes jusqu'à atteindre un niveau signal/bruit trop faible obligeant à écarter M et N, tout en gardant A et B fixe (c'est ce qui est communément appelé un embrayage), avant de recommencer à agrandir AB.

La profondeur d'investigation croît avec l'augmentation de l'écartement entre les électrodes d'injection A et B. En général, la profondeur d'investigation admise est inférieure à AB/4 (elle peut aller de AB/2 à AB/10, c'est une valeur empirique).

Pour un quadripôle AMNB, nous avons :

La résistivité est calculée par :

$$\rho_o = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{où} \quad K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \approx \frac{\pi AB^2}{4MN} \quad (4.13)$$

2) Dispositif Wenner

Dans ce dispositif, les quatre électrodes (A, B, M et N) sont également espacés le long d'un profil (figure 4.3). Ce dispositif est utilisé pour des profondeurs d'investigations intermédiaires, une résolution intermédiaire. Il offre une sensibilité modérée au bruit géologique et une bonne intensité du signal de réponse. Il est peu sensible au bruit tellurique.

Deux modes de mesures peuvent être réalisés selon la combinaison des électrodes :

- Le Wenner normal (ou Wenner- α) où les électrodes sont alignées respectivement en AMNB. Pour ce mode de mesure on a :

$$AM = MN = NB = \alpha \quad \text{où} \quad \alpha : \text{constante}$$

La différence de potentiel entre M et N est :

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho l}{2\pi} \cdot \frac{1}{a} \quad (4.14)$$

Donc :

$$K=2\pi a \quad (4.15)$$

$$\rho_a = K_{Normal} \frac{\Delta V}{I} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (4.16)$$

- Le Wenner dipole-dipole (Wenner- β) où les électrodes sont alignées en ABMN. La résistivité électrique dans ce cas est égale à :

$$\rho_a = K_{DD} \frac{\Delta V}{I} = 6\pi \frac{\Delta V}{I} \quad (4.17)$$

Avec : $K=6\pi a \quad (4.18)$

3) Dispositif pôle – pôle

Cette géométrie permet de se déplacer sur le terrain avec seulement deux électrodes ; l'une en émission (A) et l'autre en réception (M). Les deux autres (B et N) sont placées à une distance d'au moins 20 fois celle de l'écartement entre A et M (figure). Ce dispositif atteint de grandes profondeurs d'investigation, mais il présente une résolution faible et une sensibilité modérée au bruit géologique mais considérable au bruit tellurique.

Les électrodes sont alignées respectivement en AMN. Pour ce mode de mesure on a :

$$K=2\pi a \quad (4.19)$$

4) Dispositif dipôle – dipôle

Ce dispositif offre une bonne résolution mais sa profondeur d'investigation est faible. Il est très sensible aux bruits d'origines géologique et tellurique. La figure 3.8c illustre la géométrie de ce dispositif.

Les électrodes sont alignées respectivement en ABMN. Pour ce mode de mesure on a :

$$K = \pi n(n+1)(n+2) a \quad (4.20)$$

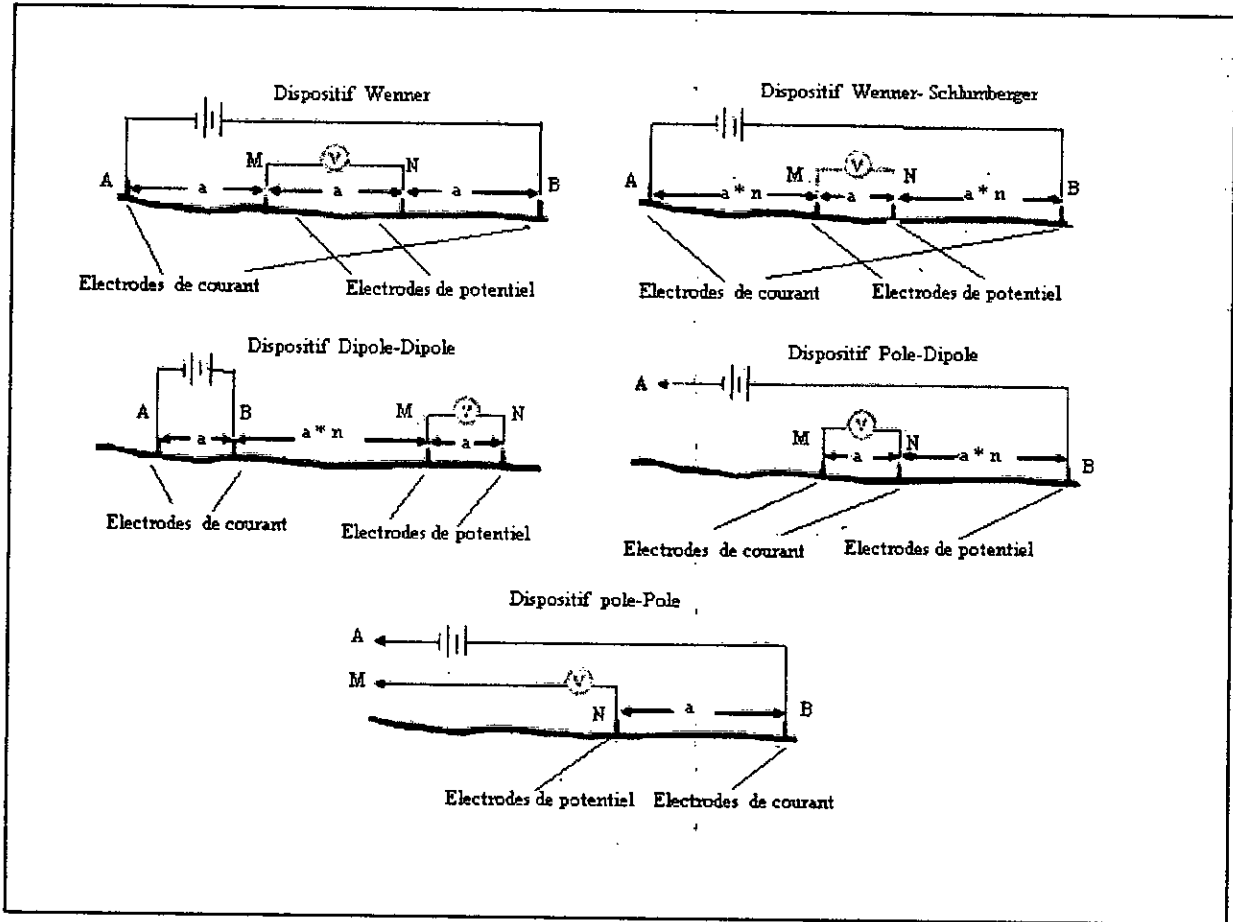


Figure 4.3 Les différents dispositifs utilisés en prospection électrique (d'après Hack, 2000 in Jeannin, 2005).

Le tableau résume la description de ces dispositifs et de leurs propriétés (d'après Ward, 1990 in Grellier, 2005).

Dispositif de mesure	Wenner- α	Pôle dipôle	Dipôle dipôle	Schlumberger
Rapport signal/bruit	1	3	4	2
Couplage EM	4	2	1	3
Sensibilité à la localisation latérale	4	2	1	3
Résolution aux structures abruptes	2*	4	3	1*
Profondeur d'investigation	4	1	2	3
Résolution des couches horizontales	1	2	2	1
Sensibilité à la profondeur	1	3	2	1
Sensibilité à la l'inclinaison	1	4	3	1
Sensibilité aux hétérogénéités de surface (en sondage)	2	3	3	1

Sensibilité à la topographie du socle	3	1	2	3
Sensibilité aux effets latéraux	3*	2	1	3*
Sensibilité à la topographie	#	#	#	#
Code : 1= le meilleur, 4= le moins bon, *= estimation incertaine, #= estimation impossible				

Tableau 4.1 résume la description des dispositifs et de leurs propriétés.

4.2.2.3 Acquisition et représentation des données électrique

Toutes les techniques diverses de mesures utilisées sont fondées sur la comparaison de la distribution du potentiel crée par l'envoi d'un certains courant avec ce que serait cette distribution dans un milieu homogène (Parasnis, 1986in Chalikakis, 2006).

En surface, les mesures peuvent être effectuées en gardant le centre du dispositif fixe et en écartant les électrodes d'injections (sondage électrique) ou en déplaçant un dispositif à écartement constant (traîné de résistivité).

1) Sondage électrique

Le sondage électrique est une méthode d'investigation permettant de déterminer quantitativement les variations de la résistivité électrique des formations du sous-sol en fonction de la profondeur. Le plus souvent, le dispositif Schlumberger est utilisé.

Cette méthode consiste à injecter grâce à deux électrodes un courant électrique dans le sol avec une intensité connue. La différence de potentiel induite est mesurée entre deux autres électrodes. On mesure donc une résistivité apparente du sol. Avec cette méthode on obtient la variation de la résistivité en 1 D sous le dispositif.

Au fur et à mesure que l'on éloigne les électrodes d'injection, la tranche du sous-sol concernée est de plus en plus importante.

2) Traîné de résistivité

Le traîné est une technique qui permet de mesurer qualitativement les variations latérales de la résistivité électrique apparente du sol à une profondeur quasi-constante.

Elle consiste à mesurer les variations latérales de la résistivité apparente le long d'un profil rectiligne où l'on déplace les dispositifs AB et MN.

Avec le même matériel utilisé en sondage vertical, on fixe un espacement des électrodes constant et on déplace l'appareil et les électrodes selon une maille de points, la traînée électrique permet de caractériser une zone pour une profondeur à peu près constante.

En combinant ces deux techniques, il est possible de réaliser des panneaux électriques : sensibles aux variations tant verticales que horizontales de la subsurface (Laurent, 2004).

3) Panneau électrique

Le terme de panneau électrique est traduit de l'anglais « Electrical imaging » ou « Electrical Resistivity tomography ». La méthode d'imagerie électrique est en fait une combinaison de sondage et de traînés mise au point pour obtenir une coupe des résistivités du sous-sol, qui tienne compte des variations verticales et horizontales dues à la géologie. Ce terme de tomographie a pour origine le mot grec $\tau\omicron\mu\sigma$ qui signifie section ou tranche. Ce concept, dans la littérature géophysique est relativement récent alors que durant des décennies on utilisait des techniques pour créer des représentations du sous-sol telles que les pseudo-sections. La tomographie est plus connue dans son application dans le domaine de la médecine où le scanner est utilisé pour obtenir des images en section du corps.

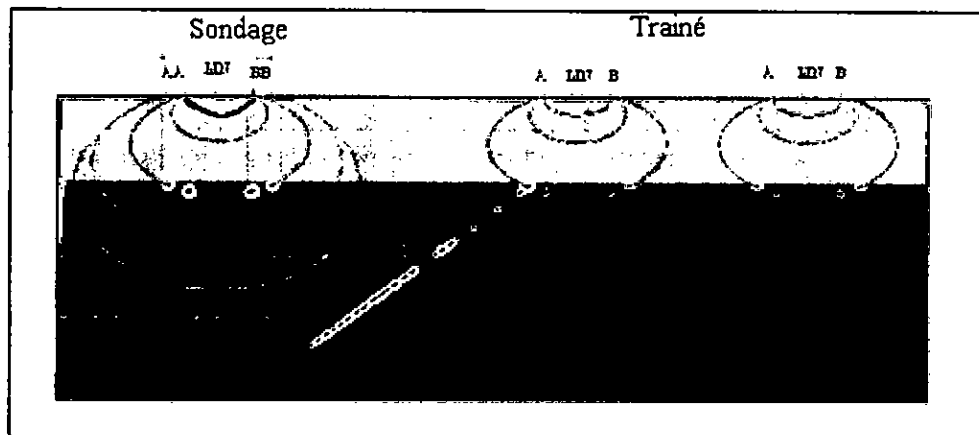


Figure 4.4 Mesures de résistivité d'un sol par sondage (gauche) et par traînée (droite).

Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation correspond à la profondeur maximale de détection atteinte par la méthode électrique, elle est fortement dépendante de l'espacement inter-électrodes, plus cet espacement est important, plus la profondeur d'investigation est

grande, elle est aussi liée à de nombreuses caractéristiques intrinsèques au milieu investigué comme ses contrastes de résistivité et sa géométrie (Anterrieu, 2006).

Instrumentation électrique

En prospection électrique, on injecte un courant dans le sol entre des électrodes et on mesure la différence de potentiel entre deux autres électrodes. Ceci donne une valeur de résistivité électrique apparente dans la zone de mesure. A l'heure actuelle, il est possible de trouver des dispositifs électriques qui fonctionnent aussi bien en courant continu (DC) qu'en courant alternatif.

La polarisation spontanée

La polarisation spontanée (PS) est une technique de mesure sans (source externe) de la variation des potentiels électriques naturels existants dans le sous-sol. Elle fournit des informations sur l'écoulement d'eaux souterraines. Cette méthode peut être utilisée pour étudier des zones où l'on peut attendre des variations d'origine électrochimiques du champ électrique dues à la présence de métaux ou à la circulation de l'eau dans le sol (Chalikakis, 2006).

Eaux ou roches	Résistivité ($\Omega.m$)
Eau de mer	0.2
Eau de nappes alluviales	10-30
Eau de source	50-100
Sable et graviers secs	1000-10000
Sable et graviers imbibés d'eau douce	50-500
Sable et graviers imbibés d'eau salée	0.5-5
argiles	0.2-20
Marnes	20-100
calcaires	300-10 000
Grés argileux	50-300
Grés, quartzites	300-10 000
Cinérites, tufs volcaniques	20-100
laves	300-10 000
Schistes graphiteux	0.5-5

Schistes argileux ou altérés	100-300
Schistes sains	300-3000
Gneiss, granites altérés	100-1000
Gneiss, granites sains	1000-10 000

Tableau 4.2 valeurs de la résistivité des eaux et des roches (Astier, 1971 in Al-Fares, 2002)

4.3 Méthode électromagnétique (cas du géoradar)

4.3.1 Bases théoriques de la méthode géoradar

Introduction

La méthode géoradar est une méthode de prospection géophysique relativement comparable à celle de la sismique réflexion. C'est une méthode non destructive qui utilise la propagation des ondes à haute fréquence, allant du Mhz au Ghz où des fréquences inférieures à 500 Mhz sont utilisées pour des recherches à grandes profondeurs et des fréquences allant jusqu'à 1.5 Ghz pour des applications d'ingénierie de faible profondeur et d'auscultations d'ouvrages de génie civil.

4.3.1.1 Paramètres électromagnétiques de la matière

La théorie des méthodes électromagnétiques est basée sur les lois de propagation des champs électrique et magnétique dans le sous-sol conducteur de la terre. Lorsque le sous-sol est soumis à un champ électrique $E [V/m^{-1}]$, les charges se déplacent.

Paramètres du champ magnétique :

Le champ magnétique $\vec{H} (A/m)$ et l'induction magnétique $\vec{B} (T)$ sont reliés dans le vide par la perméabilité magnétique μ_0 :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (4.21)$$

Dans un milieu isotrope, en l'absence de moment magnétique permanent, la perméabilité magnétique μ d'un matériau est défini de la manière suivante :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.22)$$

Dans les matériaux, une telle interaction existe mais elle est due à une contribution multiple de champs magnétiques : le champ externe H et le champ interne (aimantation) M (A/m).

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (4.23)$$

En supposant que l'aimantation est proportionnelle au champ magnétique appliqué par la susceptibilité magnétique du matériau (sans dimension) :

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (2.24)$$

Donc (1.3) vaut :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \chi_m \vec{H}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \quad (4.25)$$

Par analogie avec la relation (1.2) on trouve :

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m) \quad (2.26)$$

Dans la grande majorité des matériaux géologiques, sauf quelques minéraux particuliers tels que la magnétite ou l'hématite, la susceptibilité magnétique est négligeable. Les minéraux faisant exception sont plutôt rares dans les milieux où le géoradar est utilisé.

$$\mu = \mu_0 \quad (4.27)$$

Cependant, il faut remarquer que dans de nombreuses applications de la méthode radar, les objets que l'on cherche à localiser ne sont pas des matériaux géologiques mais sont des éléments de nature métallique (fûts, canalisations, câbles, etc.). Dans ce cas, l'hypothèse $\mu = \mu_0$ n'est plus valide et on doit tenir compte de la variabilité de μ .

Paramètres du champ électrique

En présence d'un champ électrique, un matériau est soumis à un mouvement des charges libres, caractérisé par la densité de courant de conduction j_c (X/m^2), et le mouvement de charges liées, caractérisé par la densité de courant de déplacement j_d (ou de polarisation), dépendant respectivement de la conductivité électrique σ (S/m) et de la permittivité diélectrique ε (F/m).

La conductivité électrique

Sous l'effet d'un champ électrique, le mouvement des charges libres est caractérisé par la conductivité électrique σ (S/m) selon la loi d'Ohm qui relie le champ électrique \vec{E} à la densité de courant de conduction j_d :

$$j_c = \sigma \vec{E} \quad (4.28)$$

La conductivité est souvent un paramètre complexe :

$$\sigma = \sigma' + i\sigma'' \quad (4.29)$$

La résistivité est l'inverse de la conductivité $\rho = \frac{1}{\sigma}$ et s'exprime en Ohm.m.

La présence d'une partie imaginaire montre que le matériau ne réagit pas instantanément à l'action d'un champ électrique.

La permittivité diélectrique

Sous l'effet d'un champ électrique le mouvement des charges liées est caractérisé par la permittivité diélectrique ε (F/m).

La permittivité diélectrique traduit la capacité d'un milieu à se polariser sous l'influence d'un champ électrique.

La polarisation peut avoir différentes origines (Annan, 2001) :

- La polarisation électronique : due à la déformation du nuage électronique par rapport au noyau de l'atome sous l'action d'un champ.
- La polarisation ionique : due au déplacement relatif des ions dans un milieu cristallin.

- La polarisation dipolaire ou d'orientation : due à l'orientation des molécules dipolaires (c'est le résultat d'un moment dipolaire non nul et permanent de certaines molécules soumises à un champ).
- La polarisation interfaciale (polarisation des charges) : une accumulation des ions au niveau des interfaces dans un matériau hétérogène soumis à un champ (les ions se bloquent au niveau des interfaces et ne participent pas à la conductivité).

Les gammes des fréquences auxquelles ses phénomènes prédominent sont présentées en figure suivante. Dans le cas du radar géologique, c'est la polarisation dipolaire qui est prépondérante.

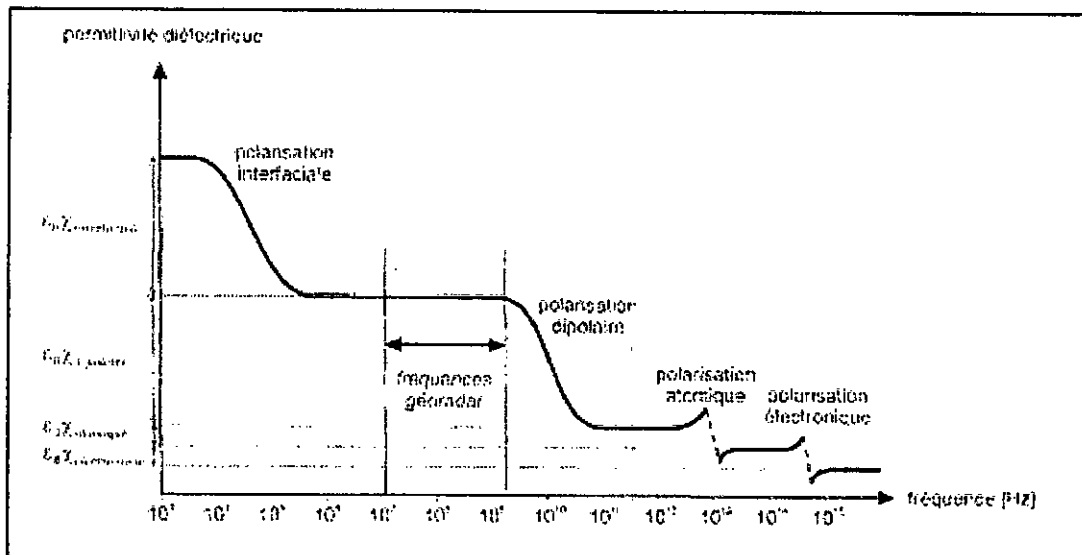


Figure 4.5 Evolution de la permittivité diélectrique sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Propriété d'additivité des susceptibilités électriques (d'après Guégen et Palciauskas 1992 in Hollender ; 1999).

Le moment dipolaire par unité de volume est appelé vecteur dipolaire \vec{P} (C/m^2) dont :

$$\text{div } \vec{P}_e = \rho_{pol} \quad (4.30)$$

Où : ρ_{pol} est la densité volumique de charge de polarisation (C/m^3).

Le vecteur dipolaire associé au champ électrique forme l'induction électrique \vec{D} (C/m^2) :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_e \quad (4.31)$$

Dans le cas d'un milieu isotrope et linéaire la susceptibilité électrique χ_e (sans dimension) est défini par :

$$\vec{P}_e = \epsilon_0 \cdot \chi_e \cdot \vec{E} \quad (4.32)$$

En utilisant la relation (1.12) dans l'égalité (1.11), on obtient :

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} \quad (4.33)$$

Donc la permittivité diélectrique est la constante reliant l'induction \vec{D} (C/m²) et le champ électrique \vec{E} .

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (4.34)$$

On trouve :

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \quad (4.35)$$

La relation (1.15) introduit la notion de permittivité diélectrique ϵ_r , dont :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (4.36)$$

La permittivité diélectrique ϵ_r (ou constante diélectrique) de la majeure partie des matériaux naturels varie entre 1 et 81. Elle est de 1 pour l'air et de 81 pour l'eau à une température de 20^oc (Leofler ; 2006). Le constant diélectrique est très sensible à la quantité d'eau présente dans le matériau, de manière générale, une augmentation de la teneur en eau aura comme effet d'augmenter le constant diélectrique du matériau (Reynolds, 1997 in Compos, 2004).

matériau	Constante diélectrique	Vitesse de propagation (m/ μ s)
Air	1	300
Eau	81	33
neige	1.4-3	194-252
Glace	2.5-8	78-168
Permafrost	1-8	106-300
Sable côtier (sec)	10	95
Sable sec	3-6	120-170
Sable humide	25-30	55-60
Silt humide	10	95
Argile humide	8-15	86-110

Sol argileux sec	3	173
Tourbe	12	86
Mort terrain (moyenne)	16	75
Granite	5-8	106-120
Calcaire	7-9	100-113
Dolomite	6.8-8	106-115
Basalt humide	8	106
Shale humide	7	113
Grés humide	6	112
Charbon	4-5	134-150
quartz	4.3	145

Tableau 4.3: Valeurs de la Constante diélectrique résistivité des roches et vitesse de propagation des ondes électromagnétique dans différents matériaux géologique (Mari et al, 1998).

Par analogie avec la conductivité peut être considérée comme un paramètre complexe :

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (4.37)$$

La loi de conservation des charges permet de trouver une relation exprimant aussi les courants de déplacement :

$$j_d = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4.38)$$

4.3.1.2 Equations de Maxwell

1) Equations de Maxwell dans le vide

Les équations de Maxwell sont les relations qui lient les paramètres décrivant les phénomènes électriques ($\vec{E}, \vec{D}, \varepsilon, \sigma$, etc.) aux paramètres décrivant les phénomènes magnétiques (\vec{H}, \vec{B}, μ , etc.)

L'induction magnétique est notée B (T) et le champ électrique est noté E (en V/m). Les relations de Maxwell dans le vide sont les suivantes :

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (4.39)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4.40)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (4.41)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.42)$$

2) Equations de Maxwell dans un milieu diélectrique

Pour retrouver les équations de Maxwell dans un milieu diélectrique, on introduit les propriétés dues à l'interaction du champ électrique ou de l'induction magnétique avec le matériau.

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4.43)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_i \quad (4.44)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.45)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.46)$$

4.3.1.3 Les équations de diffusion et de propagation

Dans un milieu isotrope et linéaire, les équations (2.40), (2.41), (2.42) avec (2.45) et (2.46) donnent :

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (4.47)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4.48)$$

En prenant le rotationnel de ces dernières relations, nous obtenant les équations de diffusion propagation.

$$\Delta \bar{E} = \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (4.49)$$

$$\Delta \bar{H} = \mu \sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (4.50)$$

Ces deux expressions montrent :

-un terme de diffusion $\left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial t}, \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \right)$

-un terme de propagation $\left(\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \right)$

Pour une onde harmonique électrique la relation (1.28) devient :

$$\Delta \bar{E} + (\mu \varepsilon \omega^2 - j \omega \mu \sigma) \bar{E} = 0 \quad (4.51)$$

L'équation (1.30) est l'équation de **Halmholtz** pour un champ électrique, elle est aussi réécrite sous forme :

$$\Delta \bar{E} + k^2 \bar{E} = 0 \quad (4.52)$$

où $k^2 = \mu \varepsilon \omega^2 - j \omega \mu \sigma$ est le carré du nombre d'onde.

Si l'on suppose que les propriétés du milieu sont des valeurs réelles.

Pour $\sigma \gg \omega \varepsilon$ donc $\sigma \mu \omega \gg \mu \varepsilon \omega^2$ et $k^2 = -j \omega \mu \sigma$ dans ce cas l'énergie se transmet principalement selon le mode de diffusion par des courants de conduction.

Pour $\sigma \ll \omega \varepsilon$ donc $\sigma \mu \omega \ll \mu \varepsilon \omega^2$ et $k^2 = \mu \varepsilon \omega^2$ dans ce cas l'énergie se transmet principalement selon le mode de propagation par des courants de déplacement.

Aux fréquences radars, la plupart des matériaux géologiques transmettent l'énergie sous le mode de propagation. Les mesures permettent de trouver les contrastes de permittivité dans le milieu.

La solution de l'équation (1.32) pour une onde plane polarisée dans la direction de z (m) se propageant dans la direction x (m) dans le domaine de Fourier s'écrit :

$$E = E_0(\omega, x=0) e^{ikx} \quad (4.53)$$

Le nombre d'onde k se décompose en une grandeur complexe reliant le facteur de phase β

(rad/m) et le facteur d'atténuation α (rad/m) avec :

$$k = \alpha + i \beta \quad (4.54)$$

Avec

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.55)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.56)$$

La vitesse v (m/s) est obtenue à partir du facteur de phase :

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad (4.37)$$

Dans le vide, l'onde électromagnétique se propage sans atténuation à la vitesse c égale à 3.10^8 m/s. D'après la relation (1.37) nous trouvant :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (4.58)$$

Pour la plupart des matériaux géologiques (où le géoradar est utilisé) $\mu = \mu_0$.

La vitesse de l'onde radar est réécrite en utilisant les relations (1.16), (1.37) et (1.38) :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.59)$$

Matériel	Constante diélectrique (ϵ)	Conductivité σ (mS/m)	Vitesse V (m/ns)	Atténuation α (dB/m)
Air	1	0	0.3	0
Eau distillée	80	0.01	0.033	0.002
Eau douce	80	0.5	0.033	0.1
Eau salée	80	30000	0.01	1000

Sable sec	3-5	0.01	0.15	0.01
Sable humide	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Calcaire	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1.0
Marne	5-15	1-100	0.09	1-100
Silt	5-30	1-100	0.07	1-100
Argile	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granite	4-6	0.01-1.0	0.13	0.01-1.0
Sel sec	5-6	0.01-1.0	0.13	0.01-1.0
Glace	3-4	0.01	0.16	0.01

Tableau 4.4 Valeurs typiques des quelques paramètres physiques qui caractérisent les ondes électromagnétiques de fréquence 100 MHz pour les principaux matériaux géologiques rencontrés dans la nature (Annan, ,2001)

4.3.2 Acquisition des données radar

4.3.2.1 Principe de fonctionnements

Le principe de fonctionnement du géoradar est relativement simple, il est similaire à la méthode sismique, mais il diffère par la nature de l'onde propagée. Il repose sur la transmission d'une impulsion électromagnétique dans la structure auscultée par l'intermédiaire d'une antenne

Une antenne émettrice (Tx) transmet au milieu étudié une impulsion électromagnétique de très faible longueur d'onde spatiale. L'onde se propage dans le sol, en s'atténuant, et se réfléchit partiellement à chaque interface présentant un contraste de propriétés diélectriques (conductivité σ , permittivité relative ϵ_r). Une antenne réceptrice (Rx) enregistre les différents échos réfléchis jusqu'à la surface. La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permet de construire une coupe-temps (dont l'unité de temps est la nanoseconde), souvent présentée avec une échelle de couleurs, ou de niveaux de gris, corrélée aux amplitudes des signaux et qui donne des informations géométriques sur le milieu investigué ou la structure auscultée.

L'émission d'une impulsion électromagnétique se traduit par la propagation simultanée d'ondes sur une large bande de fréquence. La longueur d'onde de cette impulsion

correspond physiquement à la fréquence centrale (ce qui donne le nom aux antennes), où le maximum d'énergie est rayonné.

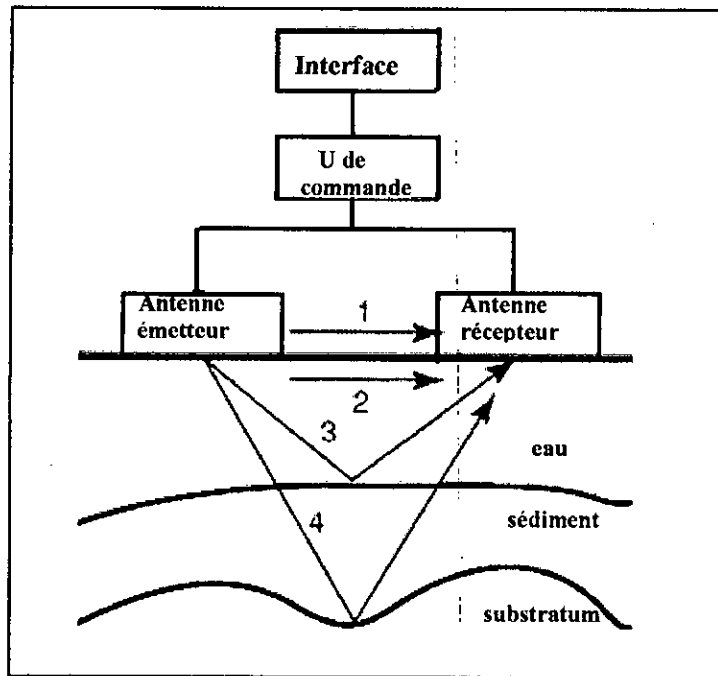


Figure 4.6 principe de fonctionnement (MOORMAN, 2001)

4.3.2.2 Le matériel géoradar

Il existe une grande variété de géoradar, dont certains sont au stade du développement ou conçus pour une application précise de recherche, d'autres, déjà largement qualifiés et commercialisés. Parmi les types de matériel géoradar les plus connus on peut en citer trois:

- Pulse EKKO, fabriqué par Sensors & Software Inc. (Canada).
- RAMAC, fabriqué par Mala Geoscience (Suède).
- SIR (Subsurface Interface Radar), fabriqué par Geophysical Survey System, Inc. (USA).

A l'exception faite aux radars multifonctionnels qui sont au stade de développement, tous les radars suivent le même principe de fonctionnement (Hollender ; 1999): un émetteur génère une onde électromagnétique qui réagit avec le milieu étudié (sous-sol,

structure d'ouvrage d'arts, etc.) ; un récepteur enregistre le signal retour qu'il s'agit ensuite d'interpréter. Les géoradar sont en général composé des éléments suivants (figure) :

- une unité de commande et de stockage des données (micro-ordinateur) ;
- une unité de contrôle, chargée de synchroniser et de servir d'interface entre les différents éléments.
- une électronique d'émission, chargée de générer le courant qui est appliqué à l'antenne d'émission.
- une électronique de réception, chargée d'amplifier et de numériser le signal mesuré par l'antenne réceptrice.
- une batterie de type batterie automobile.
- Deux antennes, l'une servant à l'émission d'ondes électromagnétiques, et l'autre à la réception de ces mêmes ondes. Chaque couple d'antenne fonctionne sur une bande de fréquence définie, que l'on caractérise par sa fréquence centrale.

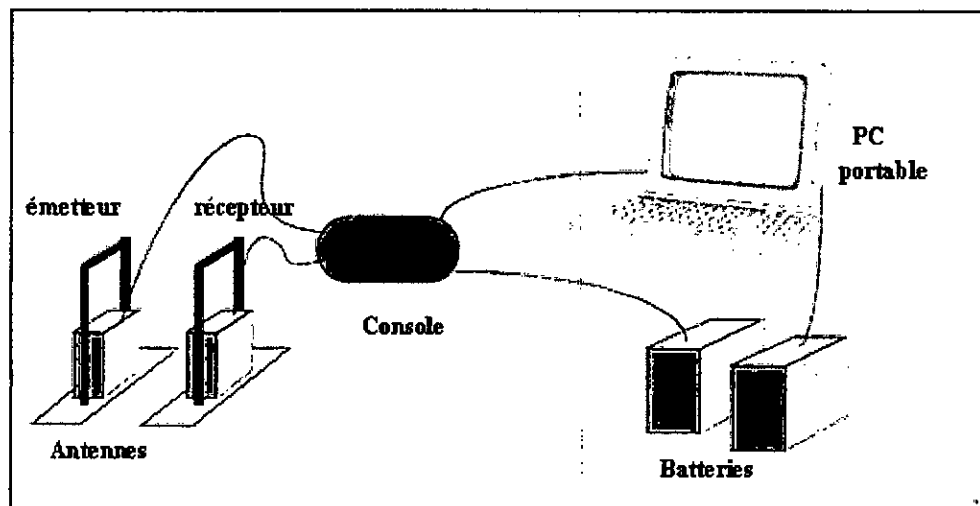


Figure 4.7 Présentation schématique d'un système géoradar.

Les antennes du géoradar peuvent être blindées ou non blindées selon le coût du matériel géoradar.

Les antennes blindées sont recouvertes d'une coque métallique qui dirige les ondes vers le sol et évite des signaux parasites aériennes. Ils sont utilisés dans les environnements encombrés (villes par ex).

Pour les antennes non blindées, l'énergie et aussi dirigée vers le haut, se réfléchit sur les obstacles (arbres, pylônes électriques, bâtiments...), ceci produit un signal qui est enregistré et peut être interprété comme venant du sous sol.

1) Différent types de radar géologique

Les radars géologiques sont classés selon l'emplacement des antennes en radar de surface et radar de forage, comme ils peuvent être classés selon leurs mode d'émission en radars impulsionsnels et radars à ondes synthétiques.

Radars de surface et radar de forage

La mise en œuvre des radars est essentiellement en mode surface où l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice sont situées sur une même surface.

Les radars de puit sont utilisés dans certains cas où les terrains superficiels sont conducteurs (ce qui limite fortement la profondeur de pénétration) ou non accessibles (terrains accidentés). Pour les radars en forage les antennes sont placés dans des sondes étanches et peuvent être descendues plus profondément ou plus près de l'endroit à investiguer. Les radars en forage ont été créés au milieu des années 80, cependant, malgré les efforts déployés pour les améliorations techniques, les fabricants ne sont pas nombreux et les systèmes commerciaux encore moins (Rucareanu, 1999), et l'utilisation de ces derniers a resté relativement restreinte.

Radars impulsionsnels et radars à ondes synthétiques

Les radars impulsionsnels génèrent des signaux large bande, de durée courte (de durée de nanoseconde égale à l'inverse de la fréquence de l'antenne). Le signal émis est obtenu en appliquant un courant très bref aux bornes de l'antenne d'émission.

Les radars à ondes synthétiques génèrent des signaux de plus longue durée, de forme sinusoïdale. La fréquence de ce signal est modifiée en fonction du temps.

Les différentes antennes de radars impulsionsnels

La grande variété des géoradars commercialisés permet de choisir parmi les fréquences nominales allant de 20 MHz à 2.5 GHz.

Différentes géométries d'antennes sont et décrites ci-dessous (figure 4.8) :

-les antennes dipolaires ou résistivement chargées sont les plus répandues, commercialisés par pulse EKKO (Sensors & Software) et RAMAC (Mala Geoscience), le principe de fonctionnement est le suivant : la résistivité augmente du centre des dipôles qui est le point d'injection de l'impulsion électrique vers les extrémités.

- Les antennes papillon ou biconiques, peuvent être considérées comme des variantes des antennes dipolaires .Elles sont notamment utilisées dans le cas de la plupart des dispositifs commercialisés par GSSI pour des antennes moyennes et basses fréquences .

- Les antennes cornets sont les dispositifs de très haute fréquence de GSSI .Ces antennes destinées à l'inspection des revêtements routiers, permettent une meilleure directivité de l'énergie émise mais la pénétration est faible.

- L'antenne boucle c'est l'antenne de forage commercialisée par la société Mala .Le principe fonctionnement est basée sur l'utilisation de 4 boucles positionnées perpendiculairement deux à deux.

- Les antennes creuses : ce sont des antennes qui génèrent un champ électrique polarisé perpendiculairement à leur axe. Elles permettent d'envisager des mesures polarimétriques. Cependant, la profondeur d'investigation est faible.

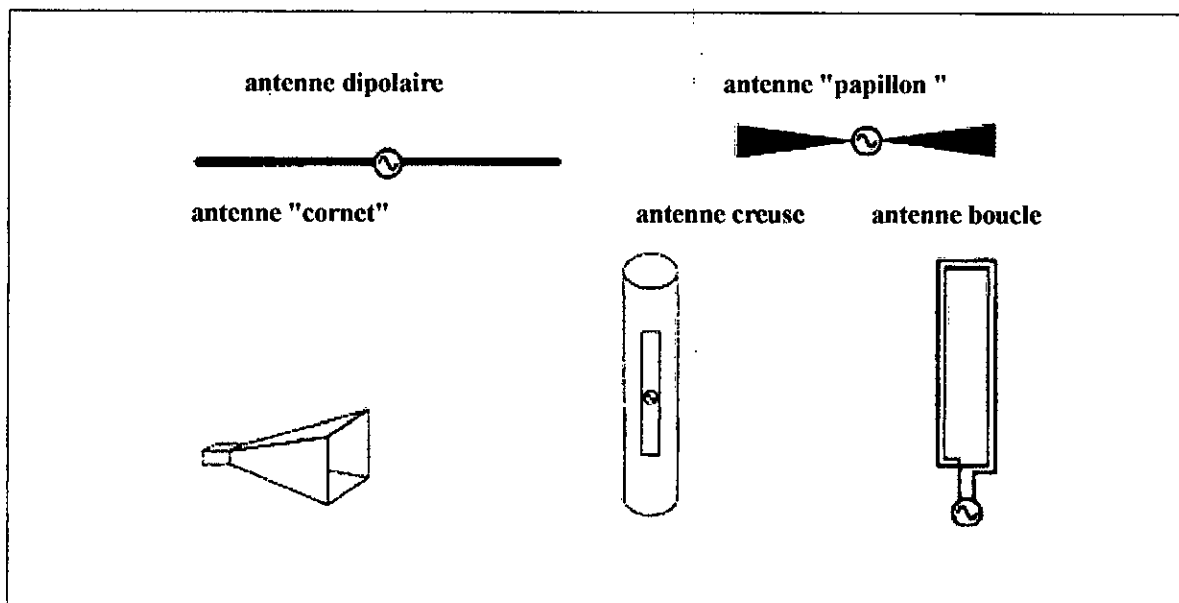


Figure 4.8 Schémas des différentes conceptions d'antennes équipant les géoradars (d'après Hollender ,1999).

La profondeur de pénétration des ondes radars et la résolution dépendent de la fréquence de l'antenne, et des caractéristiques électromagnétiques des milieux

Le choix de la fréquence

La grande variété des géoradars commercialisés a des fréquences centrales allant de 20MHz à 2.5 GHz (Hollender, 1999), cette fréquence dépend de la taille des antennes, elle est élevée plus la taille est grande.

Le choix de la fréquence d'émission est important pour la profondeur d'investigation et la résolution verticale, plus la fréquence centrale de l'impulsion électromagnétique émise est grande, plus la profondeur de pénétration est faible, mais plus la résolution verticale est grande.

Avec les dispositifs basse fréquence (20 à 100 MHz), la résolution est de l'ordre du mètre, la distance de d'investigation est très variable en fonction des caractéristiques électromagnétiques du milieu.

Les dispositifs hautes fréquences (900 MHz à 2.5 GHz) présentent quant à eux des résolutions de l'ordre du centimètre pour des distances d'investigation plurimétriques à métriques (Hollender ; 1999) ce qui amène à travailler en basse fréquence si on souhaite une profondeur importante.

La profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation c'est la profondeur maximum à la quelle le radar peut découvrir un objet. Elle est désignée comme la distance de propagation théorique pour la quelle l'amplitude initiale du champ électrique est divisée par e . (Pérez ; 2005).

La profondeur de pénétration dépend à la fois de la fréquence de l'onde fréquence, donc de l'antenne utilisée et des caractéristiques électromagnétiques du milieu investigué. Une antenne de 100 MHz permet d'investiguer des structures plus profondes qu'une antenne de 500 MHz et encore plus profonde pour une antenne de 1.5 GHz.

Pour une même fréquence, un milieu conducteur atténuera rapidement l'énergie, la profondeur d'investigation est alors réduite, elle varie de quelques mètres dans les terrains argileux ou dans les zones à forte minéralisation métallique jusqu'à plusieurs centaines de mètres dans des situations exceptionnelles (comme da

La résolution

La résolution est la distance minimale entre deux objets peut être détecter. La résolution doit être séparer en : résolution verticale et latérale.

La résolution verticale dépend de la fréquence du signal émis, elle augmente avec la fréquence, deux objets ou deux interfaces horizontaux doit être d'autant plus séparés que la fréquence est basse pour être détecter ou séparer. La résolution verticale est d'environ le tiers ou la moitié de la longueur d'onde (λ) avec :

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Où v est la vitesse de propagation et f la fréquence.

La résolution latérale dépend du pas d'échantillonnage, de l'écartement entre l'émetteur et le récepteur et de la zone d'influence (zone de Fresnel).

Le pas d'échantillonnage doit être choisi afin d'être au moins trois fois plus fin que les cibles recherchées (Annan et Daniel, 1989 in Gloaguen, 2004).

4.3.3 Acquisition des données radar

L'acquisition est une phase importante, non seulement au niveau opératoire mais également au niveau du chois des paramètres.

Les principaux paramètres sont essentiellement le chois des gains, éventuellement des filtres, la diélectrique des terrains, il faut avoir une idée très précise sur ce paramètres et par conséquent sur le terrains meubles qu'en terrains très consolidés.

3.4.3.1 Les différents modes d'acquisition

1) Le mode réflexion

Dans la plupart des applications, les géoradars sont mises en œuvre en mode réflexion. Pour ce mode d'acquisition, les antennes émettrices et réceptrices sont placées dans la même zone à investiguer (sur une même surface ou dans un même forage) avec un pas de mesure préalablement déterminé selon la résolution souhaitée (Rucareanu, 1999) .Le signal réfléchi comprend les réflexion aux interfaces départageant les milieux de propriétés électriques différentes (Gloaguen, 2004).

On distingue les profils de réflexion à offset constant et les profils de réflexion à offset variable.

Acquisition à offset constant

C'est le mode d'acquisition le plus utilisé dans les mesures radar. Les deux antennes séparées d'une distance constante (offset constant) sont disposées perpendiculairement au profil et parallèles entre eux. Elles sont décalées ensemble le long d'un profil au cours de l'acquisition.

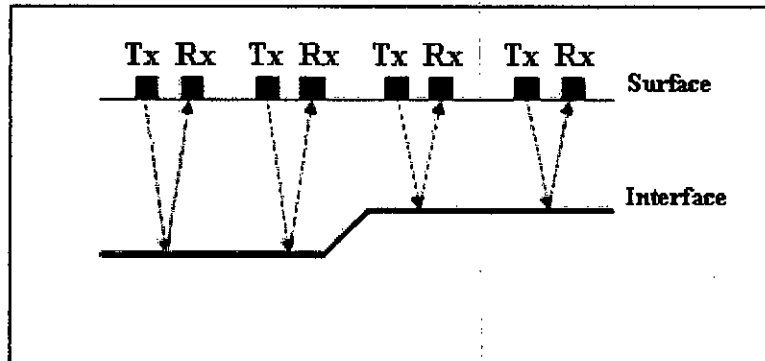


Figure4.9 : Illustration du mode réflexion. La distance inter-antennes est constante. Le profil radar s'obtient en déplaçant les antennes le long d'une ligne (horizontale ou verticale)(Jeannin,2005).

Acquisition à offset variable

Acquisition point milieu commun (Savard, 2006)

Le levé du point milieu commun (Common Mid-Point ou CMP) de géoradar permet d'obtenir la vitesse de propagation de l'onde EM dans les milieux où elle se propage. Cela permet alors de convertir le temps de propagation de l'onde EM en une profondeur de pénétration sur le profil en mode réflexion. Le levé consiste à éloigner les antennes l'une par rapport à l'autre selon un intervalle de distance régulier par rapport à un point milieu commun conservé fixe. Le temps de propagation d'une onde EM à partir de l'antenne émettrice pour atteindre un réflecteur et l'antenne réceptrice est de plus en plus grand en augmentant la distance de séparation des antennes. Cette augmentation du temps de propagation n'est pas linéaire, elle suit plutôt une fonction hyperbolique. Pour un réflecteur donné, le temps de propagation de l'onde EM porté au carré en fonction de la distance de séparation entre les antennes portée aussi au carré est porté sur un graphique. La racine carrée de l'inverse de la pente de la droite de ce graphique donne alors la vitesse

de propagation de l'onde EM dans le milieu jusqu'au réflecteur. La profondeur de ce réflecteur peut être obtenue de l'équation suivante:

$$h = \frac{1}{2}vt_0$$

Où t_0 est le temps de propagation de l'onde EM pour se rendre jusqu'au réflecteur dans le cas où les antennes se trouveraient au même endroit. En pratique, pour des raisons de couplage électromagnétique, les antennes ne peuvent pas être à une distance de séparation inférieure à une certaine valeur en fonction de la fréquence de l'onde EM émise. Le temps t_0 est alors trouvé par une construction graphique, en déterminant l'ordonnée à l'origine du graphique précédent de t_2 en fonction de x_2 et en calculant la racine carrée de cette ordonnée à l'origine.

Des réflecteurs ont pu être identifiés sur le levé ce qui a permis de déterminer la vitesse de propagation de l'onde EM dans le milieu. Cette vitesse est obtenue en mettant en graphique le temps de propagation au carré en fonction de la distance de séparation au carré du réflecteur identifié à la figure. La racine carrée de l'inverse de la pente donne alors la vitesse de propagation recherchée.

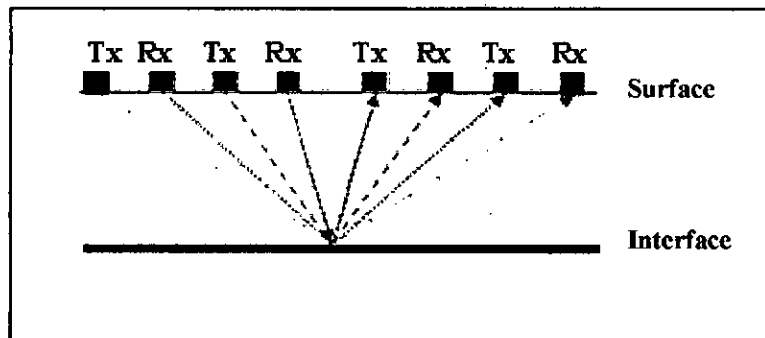


Figure4.10 : Illustration du mode CMP (Common MidPoint). La distance inter-antennes augmente lelong du profil radar (Jeannin, 2005)..

2) Le mode transmission

Ce mode a pour but d'enregistrer la décroissance en amplitude ainsi que le temps de parcours de l'impulsion initiale ayant traversé directement la distance entre émetteur et récepteur.

Ce mode d'acquisition peut se faire avec des antennes des surfaces (ex : autour d'un pilier), mais il est souvent en associés au mesure en forage ou l'émetteur et le récepteur sont placés dans des puits différents.

4.3.4 Le traitement et le prétraitement

1) Le traitement des données géoradars (Anterrieu, 2006)

Les données acquises par le géoradar nécessitent un traitement pour pouvoir être interprétées afin d'obtenir une image réelle correspondante au milieu investiguer.

Le traitement repose sur l'élimination des signaux parasites qui peuvent masquer les informations et de ressortir les signaux réelles, il se résume en :

- transfert des données.
- filtre dewow.
- correction statique.
- application d'une fonction de gain.
- filtre passe bande.
- lissage des traces par interpolation.

Traitements préliminaires

Ils consistent à réorienter les profils et à les mettre à la même échelle de couleur pour qu'ils puissent être comparés. Les traces sont tronquées à partir du moment où le bruit de fond devient prépondérant.

Filtre de Dewow

En appliquant un filtre de Dewow, le signal très basse fréquence est supprimé.

Correction statique

Toutes les amplitudes des premières arrivées (aériennes ou directes) d'un radargramme doivent être alignées horizontalement car, en mode réflexion, l'espacement Tx-Rx reste constant et la vitesse de propagation des ondes aériennes est constante. Un décalage temporel des premières arrivées est donc un défaut expérimental. Pour y

remédier, les premières arrivées sont pointées (méthode semi automatique du picking qui permet d'aligner les traces horizontalement).

Gain

L'amplitude du signal radar décroît avec le temps. Pour mettre en évidence les structures contenues dans les traces, il est parfois nécessaire d'appliquer un gain. Pour mettre en évidence des variations d'amplitudes, liées à des contrastes de compositions, il est conseillé d'appliquer un gain SEC (Spreading and Exponential gain Compensation).

Filtre passe-bande

Ce filtre permet de retirer de chaque trace l'information contenue en dehors d'une fenêtre fréquentielle fixée par l'utilisateur.

Modélisation des hyperboles de diffraction

Sur un radargramme, la signature d'une structure ponctuelle (ou pseudo ponctuelle) située en surface (pylône, arbre...) ou dans le sous-sol (tuyau, bloc de roche, morceau de métal, etc.) est une hyperbole de diffraction. On peut modéliser des hyperboles de diffraction et les comparer avec celles observées sur un radargramme.

Comme l'ouverture de l'hyperbole augmente avec la vitesse de propagation des ondes EM, il est possible de savoir si l'hyperbole observée est due à une diffraction sur une structure en surface ou dans le sous-sol. Pour cela, on choisit couramment de modéliser une hyperbole correspondant à la propagation d'onde EM dans l'air (0.3 m/ns) et de la comparer avec celles du radargramme. Si l'ouverture des deux hyperboles est la même, la structure est située en surface (propagation d'onde aérienne). Si l'ouverture de l'hyperbole modélisée est plus grande que celle observée, ($V_{\text{observée}} < V_{\text{dans l'air}}$), la structure est située en sub-surface. Si c'est le contraire, la vitesse de propagation est supérieure à la vitesse de la lumière (0,3 m/ns). Cette situation est physiquement impossible. Un tel artéfact peut être causé par la réflexion d'ondes radar sur des structures non orthogonales au profil radar.

Migration

La migration est basée sur la sommation des signaux selon l'axe x. Elle permet de focaliser l'énergie de diffraction et de réflexion à la source afin d'avoir une image plus

réaliste de la position des structures. Grâce aux hyperboles modélisées, on détermine un modèle de vitesse qui servira dans la migration. Cette migration peut être de deux types : temporelle ou en profondeur. Dans le premier cas, l'image obtenue présente la longueur du profil en abscisse et le temps double de propagation des ondes radar en ordonnée. Dans le deuxième cas, l'image obtenue présente la longueur du profil en abscisse et la profondeur en ordonnée.

2) Interprétation

L'interprétation géophysique consiste à transformer les données enregistrées lors des mesures de terrain en corps physiques réels avec des propriétés spécifiques. L'objectif de la présentation des données est d'obtenir une image très proche de surface du sous sol (Uberti, 2002).

L'acquisition d'un ensemble de traces de sol permet d'établir une section géoradar ou radargramme généralement présenté comme une image en 2 D. Le radargramme constitue la section continue du sous-sol ou de la structure sur laquelle l'abscisse correspond aux distances le long du parcours du transceveur et l'ordonnée au temps aller-retour employé par les ondes pour atteindre les objectifs.

L'interprétation quantitative, qui consiste à transformer les temps en profondeur, requiert la détermination de la vitesse moyenne des ondes dans les terrains recouvrant les objectifs.

La vitesse moyenne est alors déterminée par la relation suivante :

$$\varepsilon_r = (c/V)^2$$

Avec ε_r : constante diélectrique relative.

c : célérité de la lumière $3 \cdot 10^8$ m/s (0.3m/ns).

V : vitesse moyenne des ondes en m/ns.

$$p = V t/2$$

Avec p : profondeur en m des contacts et autres objectifs.

t : temps double ou durée d'aller-retour des ondes réfléchies.

Les unités utilisées ne sont pas forcément les unités communes du système international, dont les vitesses sont exprimées en m/ns et le temps en ns avec $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ (Loffler, 2005).

3) Le radar de surface SIR 2000, exemple d'application

Les données présentées dans ce mémoire ont été enregistrées avec le dispositif SIR (Subsurface Interface Radar), fabriqué par Geophysical Survey System, Inc. (USA).

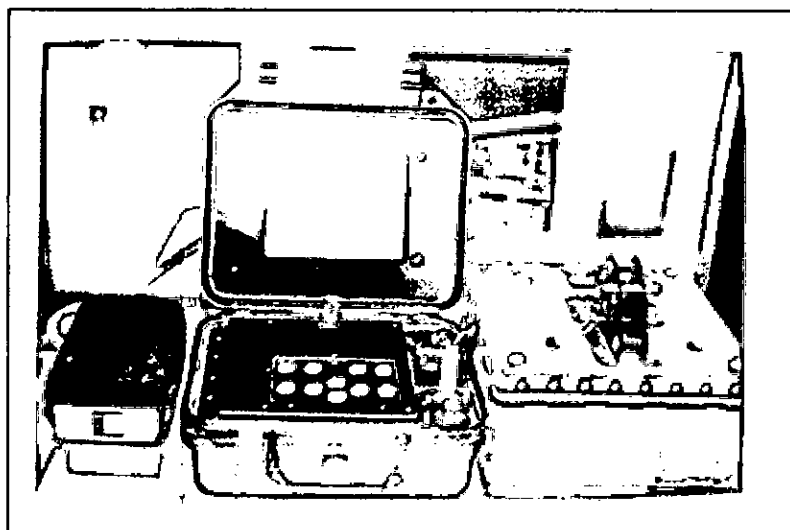


Figure 4.11: Le matériel géo radar de surface SIR 2000.

Dans le cas du système d'acquisition SIR2000, nous avons trois modes d'acquisition : le mode d'acquisition de données continu, le mode d'acquisition contrôlé par le compte pas, le mode d'acquisition de donnée par point discret (Schout, H. 2005).

Le mode d'acquisition de donnée **continu**

Ce mode d'acquisition, permet au système de transmettre le signal continuellement dans le sol et enregistrer les données avec visualisation en temps réel. Le radar est ainsi roulé le long du profil sans interruption.

Le mode d'acquisition de donnée contrôlé par le **compte pas**

Dans ce mode d'acquisition de donnée, l'acquisition est contrôlée par un compte pas attaché à l'antenne, toutes les lignes auront donc les mêmes graduations horizontales ; ce mode est préférable pour les relevés qui demandent une localisation précise des lignes. Le compte pas doit être calibré sur le site de relevé de mesure avant utilisation.

Méthode d'acquisition de données, point de données discrètes

Ce mode d'acquisition est réservé pour les terrains accidentés quand l'acquisition de données continue est impossible dans les sols où le signal est très faible à des profondeurs difficiles à pénétrer et où une augmentation du signal est réclamée.

Acquisition des données géoradars

Afin de bien réussir l'acquisition des données radar, on doit s'assurer dès le départ, de certaines conditions que le signal radar doit avoir, sachant que l'information utile recherchée se trouve noyée dans ce signal.

Par conséquent, il faut bien s'assurer de son bon conditionnement.

Les paramètres de départ sont choisis en fonction de la profondeur de la cible : choix du diélectrique, choix de la profondeur d'intérêt (range), choix des gains, choix des filtres, balayage ou Scan, échantillon par balayage, bits par échantillon, balayage par seconde

Paramètres d'acquisition Antenne 400D (standards)

Les paramètres pris pour cette antenne sont :

Profondeur de vue	Diélectrique	Mode d'acquisition	Range	Echantillonnage par balayage	Résolution	Nombre de point gain	Filtre passe Haut	Filtre passe bas	Balayage par seconde
5m	9	Compte pas	100 ns	512	8 bits	5	30 MHz	800 MHz	32

Tableau 4.5 : Paramètres d'acquisition Antenne 400D.

Acquisition des données radar

L'acquisition des données radar a été effectuée en utilisant le mode compte pas et en suivant l'objectif que nous avons prédéfini au départ, à savoir vérifier s'il existe une corrélation entre les événements recensés sur le site et leur manifestation sur les radar grammes obtenus.

Ainsi avons-nous retenu pour cette étude 13 profils. La description est reportée sur le tableau 2.

Prétraitement et traitement des radars grammes

Lors des prétraitements, les fichiers acquis sont contrôlés, du point de vue rapport signal sur bruit, on peut modifier constamment les paramètres d'acquisition, le choix du diélectrique, la profondeur d'investigation, les gains, les filtres appliqués et le pas d'échantillonnage.

L'opération du traitement des données des fichiers des radar grammes est assurée comme suit :

- Transfert des fichiers du SIR2000 vers le ordinateur
- Application des corrections de surface (time zero)
- Recherche d'une loi de vitesse
- Application d'une loi de vitesse et différents filtres
- Interprétation interactive

Interprétation des radars grammes.

Procédure d'interprétation des radars grammes : L'interprétation qualitative et immédiate.

Dans cette phase d'interprétation, on s'intéresse plutôt à la présence ou à l'absence d'anomalies et leur individualisation; on note également une description sommaire de chaque événement.

L'interprétation quantitative suit les traitements appliqués aux radar grammes, qui consiste à transformer réellement et correctement les temps en profondeur ainsi que l'individualisation de chaque anomalie. Cette transformation requiert la détermination de la vitesse moyenne des ondes dans les terrains recouvrant les objectifs:



Figure 4.12 : Radar gramme montrant le passage de deux conduites.

$$P = V \cdot T/2$$

P: Profondeur ; V : Vitesse moyenne en m/ns ; T : Temps double en nano seconde.

Parmi les applications, celles des filtrages numériques, du calcul des différentes corrections (corrections statiques ou d'altitude), le calcul d'une loi de vitesse, pour retrouver les interfaces plus juste des différents réflecteurs.

Le dépouillement de ces radar grammes, profil par profil, nous a permis de faire une première interprétation, à savoir la localisation des objectifs recherchés puisque les anomalies à retrouver sont très localisées; il s'agit de canalisations d'eau potable ainsi que celles d'égouts, les câbles électriques ainsi que des zones très sombres associées à la présence d'eau stagnante (ou zones de broyage). Les profils ont été fixés perpendiculairement à ces anomalies. La résolution du problème inverse était aisée puisque il s'agissait de faire la corrélation entre les anomalies obtenues sur les radars grammes et les anomalies réelles portées sur le plan de position.

Les paramètres à tirer sont la profondeur des anomalies et la description de leur environnement.

L'étude de synthèse consiste à porter sur le plan de situation des profils, les différents événements constatés au niveau de chaque profil, puis à chercher au niveau des intersections des profils considérés, la validité de ces anomalies par rapport aux anomalies réelles.

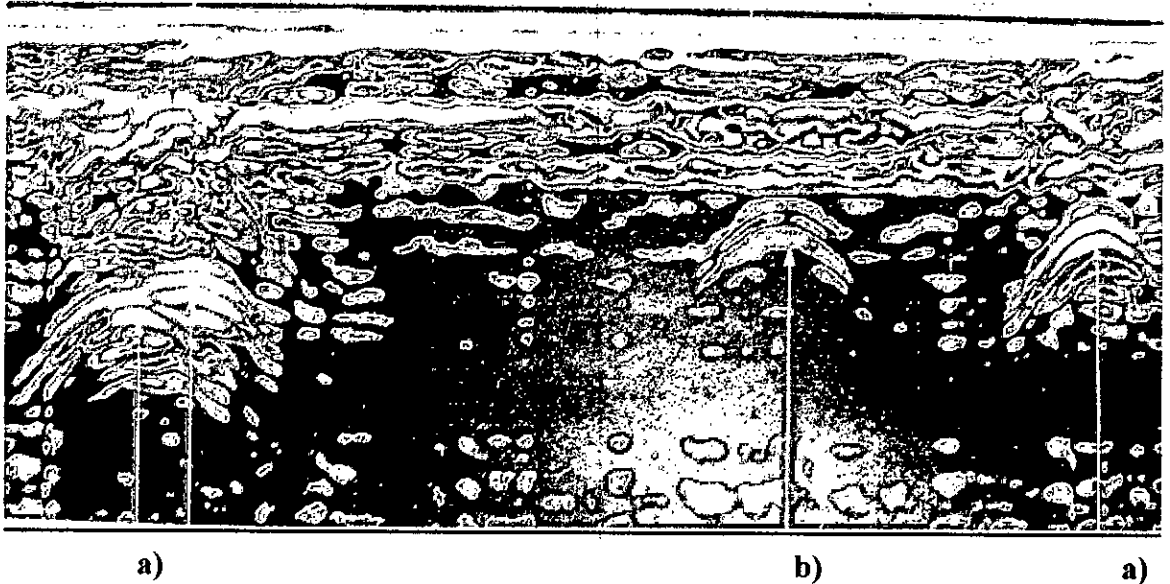


Figure 4.13 Profil géo radar révélant les différentes anomalies (Acier ; PVC).

Interprétation des données géoradars

Les résultats (Fig. 3 et 4) montrent la position des diverses anomalies liées au différents événements révéler sur les radar grammes ; ainsi, a-t-on reporté sur les profils, les différentes intersections d'anomalies, qui sont représentés par différentes couleurs :

Le rouge représente le passage des canalisations des eaux usées ou égouts,

Le bleu représente les conduites d'eau potables,

Le noir représente le passage des câbles électriques,

Le violet représente la présence de zones humides (rupture de canalisation, fuite d'eau, zone d'effondrement).

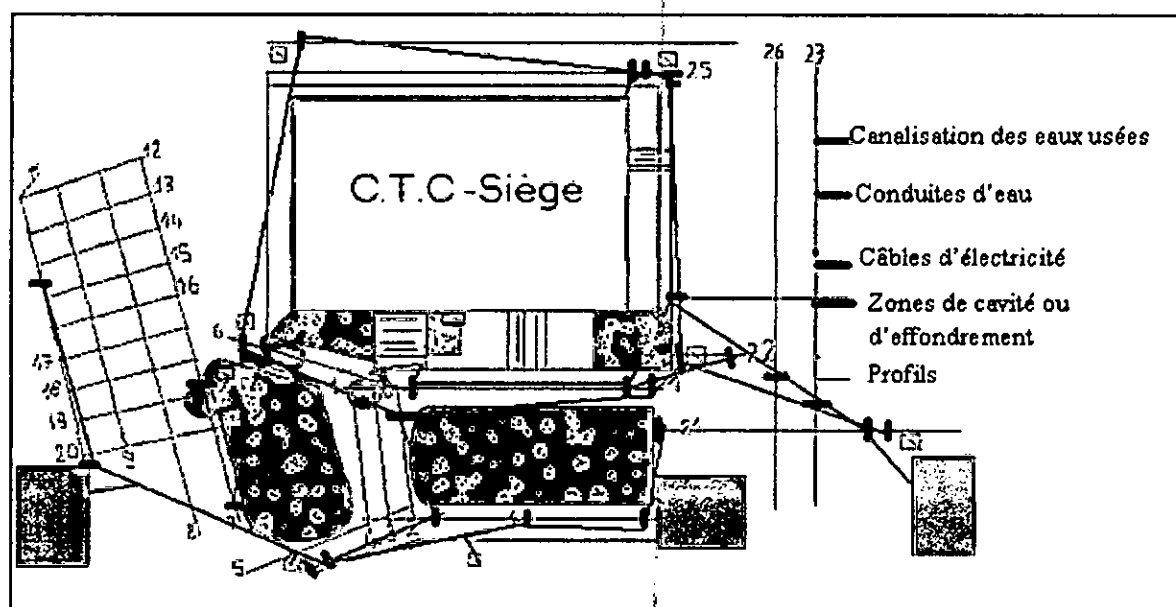


Figure 4.14 : résultats d'interprétations des données radars.

Profils	Événements détectés	Fichiers	Profils	Événements détectés	Fichiers
1	Conduite d'eau et canalisation des eaux usées.	3	8	Présence d'une forte réflexion au niveau des 26 m avec des échos ou multiples.	25
2	Zones très humide.	5	11	Hyperbole et forte réflexion.	28
4	Localisation de câbles électriques et d'une canalisation d'eaux usées.	11	18	Réflexion coïncidant avec celle observée sur le profil 6.	40
5	Câble d'éclairage public et présence d'une canalisation.	12	21	Passage de câbles électriques..	48
6	Le passage du radar sur une flaque d'eau montre une zone sombre. - passage de canalisation.	14	22	Présence de canalisation ou égout.	49
7	0-5m : terrain horizontal. 20-26m : réflexion forte correspondant au passage d'une canalisation.	16	23	Conduite d'eau.	51

Tableau 4.6 : Résultats d'acquisition et d'interprétation des différents radar grammes portés sur des profils. Mode d'acquisition: compte pas.

Conclusion

Les résultats de cette étude ont permis de cartographier les différents événements liés à la présence de canalisations et des conduites (eau et gaz) ainsi que différents câblages

(électricité) enfouis sous terre du Bloc administratif de la C.T.C Est – Constantine.

Grâce à cet instrument de la famille des équipements de géophysique, nous avons pu étudier et cartographier le terrain de la proche surface et révéler les anomalies dont le contenu est représenté sur les figures 3 et 4.

Ce travail était pratiquement impossible à réaliser dans un environnement urbain assez complexe et dense, du point de vue faisabilité et sécuritaire [5].

Cela s'explique également par le fait que ni la sismique ni les méthodes électriques ou électromagnétiques classiques ne pouvaient résoudre ce genre de problème car, d'une part, ces équipements ne sont pas adaptés à un espace urbanisé, et d'autre part, le coût des opérations pour atteindre ces objectifs, revient trop cher.

Chapitre 5



Résultats de la campagne géophysique

5.1 Travaux de terrain

5.1 Prospection électrique

5.1.1 Equipement géophysique (Méthode de Résistivité).

La méthode de résistivité consiste à étudier le paramètre **résistivité** électrique d'un terrain donné.

L'étude de la variation de ce paramètre en fonction de la profondeur, permet de localiser les structures géologiques conductrices ou résistantes, présentes dans le milieu.

L'expression finale de la résistivité: (en Ohm)

$$\rho_a = K. \Delta V / I$$

C'est la formule de Schlumberger exprimant la proportionnalité entre la résistivité apparente: ρ_a , le coefficient du dispositif K , la tension entre les électrodes de réception ΔV_{MN} et le courant d'émission I .

5.1.2 Mise en oeuvre

Les mesures sur le terrain ont consisté tout d'abord à la matérialisation des sondages électriques d'après leur plan de position (carte topographique).

Les sondages ont été prédéfinis, en fonction de l'objectif à atteindre, dans notre cas, l'objectif principal est l'étude des variations des épaisseurs de la couverture superficielle et des différentes couches sous jacentes.

Nous avons choisi de mettre ces sondages en amont et en aval de chaque plateau, relativement à chaque site.

Une fois sur le terrain et sur le site, on étale finalement le dispositif de mesure du sondage électrique à réaliser.

5.1.3 Le dispositif de mesure.

Le dispositif de mesure, est une figure géométrique mise en oeuvre sur le terrain à l'aide de câbles d'émission de courant électrique, des câbles de réception et des électrodes : émission (AB) et réception MN, permettant ainsi la mesure de la différence de potentiel entre les deux électrodes de réception. La longueur de ligne **AB** choisie,

dans le cas de notre étude de sub-surface, ne dépasse pas 35 m, car les profondeurs de nos objectifs ne dépassent guère les 50 m.

Dans le cas de notre étude le dispositif choisi est celui de Schlumberger, le coefficient du dispositif utilisé est telle que : $K = \pi (a^2 - b^2) / 2b$.

5.1.4 Equipement de prospection électrique

L'équipement électrique est composé d'un coffret d'injection alimenté à partir d'une batterie externe de 12V capable de débiter au moins 10 ampères.

La tension interne d'alimentation peut être contrôlée entre la douille banane noire et la petite douille rouge à gauche du coffret: cette tension n'est présente que lorsque l'interrupteur général est sur "MARCHE".

La ligne d'injection AB est branchée entre les douilles banane, (+) et (- HT) à droite du coffret.

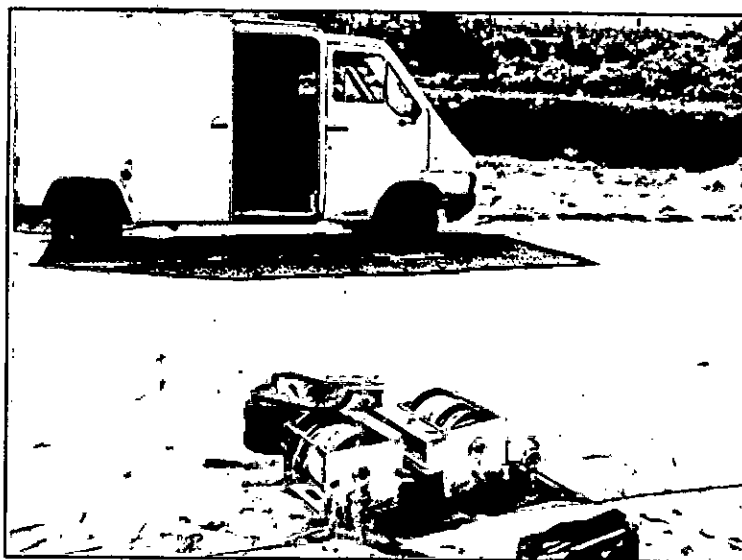


Figure 5.1 Equipement de prospection électrique

L'injection du courant n'a lieu que lorsque l'opérateur maintient appuyé le bouton poussoir situé en bas à droite du coffret, c'est-à-dire le temps juste nécessaire de la mesure, ce qui limite la consommation et permet une bonne autonomie de l'appareil.

Si l'alarme sonore se déclenche lors de l'injection, c'est que le courant souhaité ne peut être atteint par suite de la résistance de la ligne AB.

Le résistivimètre permet de mesurer d'une part le courant injecté entre deux électrodes A et B (I_{AB}) et d'autre part, la différence de potentiel (spontanée ou induite entre les deux électrodes M et N (V_{mn}).

5.2 Acquisition des données sur le terrain.

La méthode consiste à choisir sur le site les points représentatifs (sondages) Fig.5.2, afin de mieux caractériser la répartition géo électrique des roches et les intercalations argilmeuses qu'il faut étudier et délimiter (leur extension en surface et en profondeur. Ainsi, nous avons choisi au niveau du profil AA'-BB' (ligne proposée pour progeter frontalement les sondages répartis sur la surface du site).

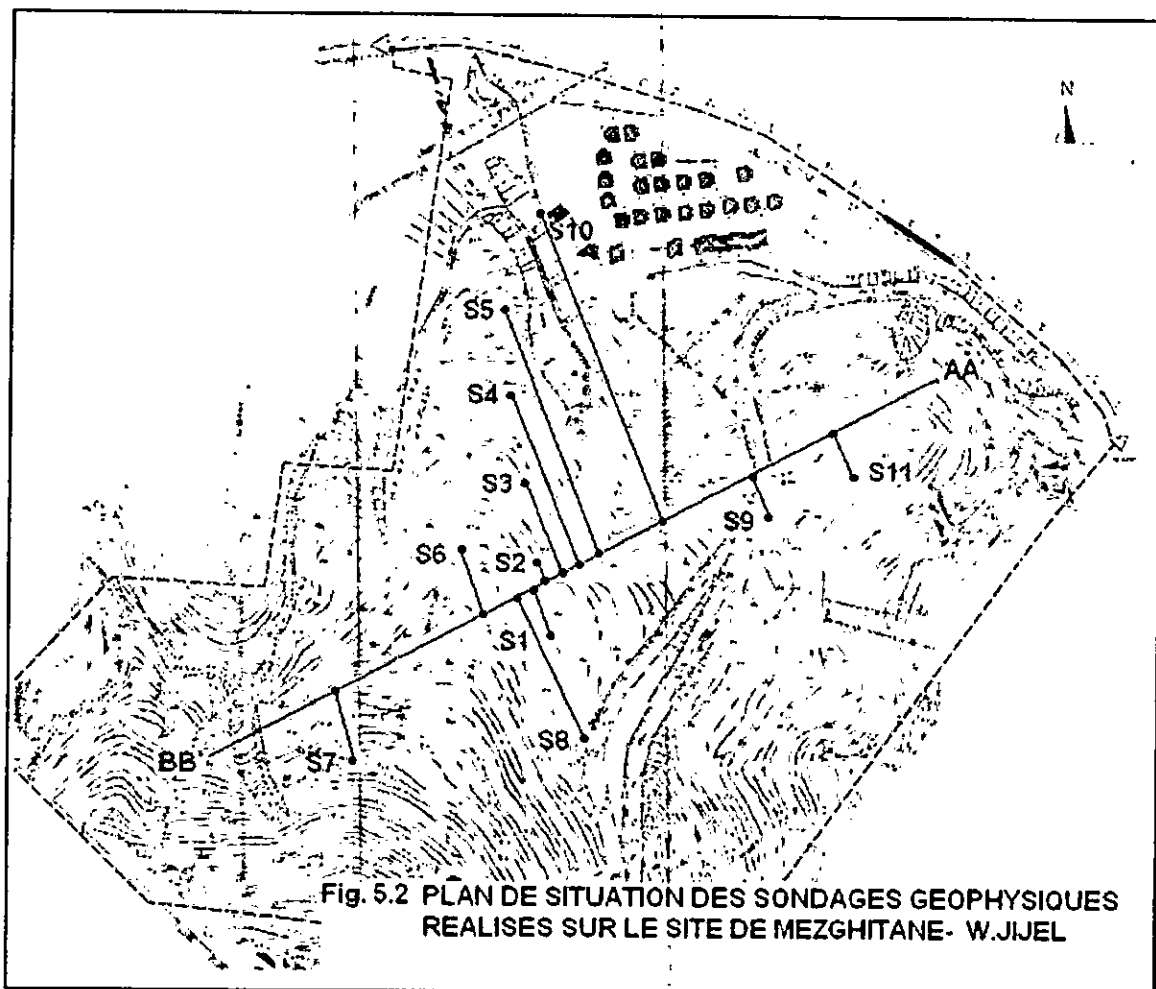


Figure 5.2 plan de d'implantation des sondages électriques.

Des sondages électriques verticaux ont été réalisés dans le but de mesurer la résistivité électrique de dépôts quaternaires ainsi que celle des dépôts sous-jacents afin de connaître les propriétés du sol.

11 sondages électriques verticaux ont été effectués sur le site (les sondages sont notés Sdg1 à Sdg 11, voir plan de situation, figure). Chaque sondage fait une longueur totale de 300m. Les premiers levés (de 1 à 5) sont alignés et espacés de 20m de façon à obtenir un panneau électrique, ce profil de longueur 980m a été réalisé au centre du site, il est d'orientation NW-SE à NNW-SSE.

4.2.2 Choix des profils

Lors du choix des levés électrique on a pris en considération trois paramètres principaux qui sont :

- topographie du site : lors de l'acquisition de données géophysiques, la présence d'une topographie irrégulière est un obstacle qui peut être aisément corrigé lors du traitement des données. Cependant, lorsque les conditions de terrain le permettent, il est préférable d'effectuer des levés sur une surface plane afin de minimiser les erreurs et le temps alloué au traitement (Compos ; 2004).
- alignement des levés : un profil électrique doit être rectiligne et les points ABMN soient alignés, tous les levés sont choisis de manière à respecter ce paramètre.
- La nature lithologique des dépôts de surface : les électrodes doivent être pénétrer dans le sol qui aurait été impraticable dans les terrains compacts tels que les grès.
- Les conditions d'accès : il a souligné que le choix des profils est influencé par les conditions d'accès car en présence de la forêt ou d'une déclivité importante le déplacement d'un matériel lourd est compliqué et le travail l'opérateur est fatigant.

5.2.3 Dispositif de mesure

Le dispositif de mesure employé est celui de Schlumberger, un ensemble de quatre électrodes symétriques, le générateur du courant électrique est une batterie de 12 Volts type automobile (fig.). Un courant continu d'intensité (20, 50 et 100 mA) est injecté dans deux électrodes et la tension est mesurée par deux autres électrodes. Le rapport de ces deux quantités permet le calcul de la résistivité électrique apparente en un point donné. Sur chaque site, 11 mesures de résistivité ont été faites, l'écartement inter-électrodes étant de (4.2m, 6.4m, 9m, 13m, 20m, 30m, 42m, 90m, 130m, 200m, 300m) alors qu'elle est (1m, 6m, 24m) entre les électrodes M et N, correspondant à une profondeur d'investigation du sol voisine de 50m. Les positionnements des points de mesures sont mesurés par un GPS de précision entre 1 et 5m.

Les profils ont été recalés afin de constituer une carte d'isorésistivité. Plus de 115 mesures ont été utilisées. L'ensemble de la campagne a nécessité une semaine de terrain avec trois opérateurs.

5.3 Traitement par inversion des données de sondages électriques

Nous avons utilisé un programme d'inversion de données de sondages électriques développé au C.R.G (Centre de Recherche Géophysique de Garchy - CNRS - France et adapté par J. TABBAGH du Laboratoire de Géophysique Appliquée (Université de Paris 6).

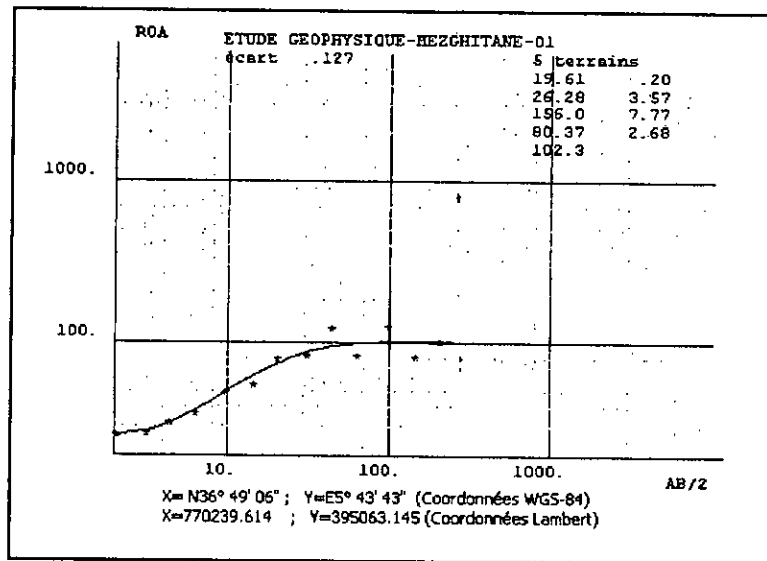
Ce programme consiste à résoudre le problème inverse en retrouvant la distribution résistivité épaisseur à partir de la courbe expérimentale d'un sondage donné.

5.4. Résultats de la prospection électrique

5.4.1 Analyse des données

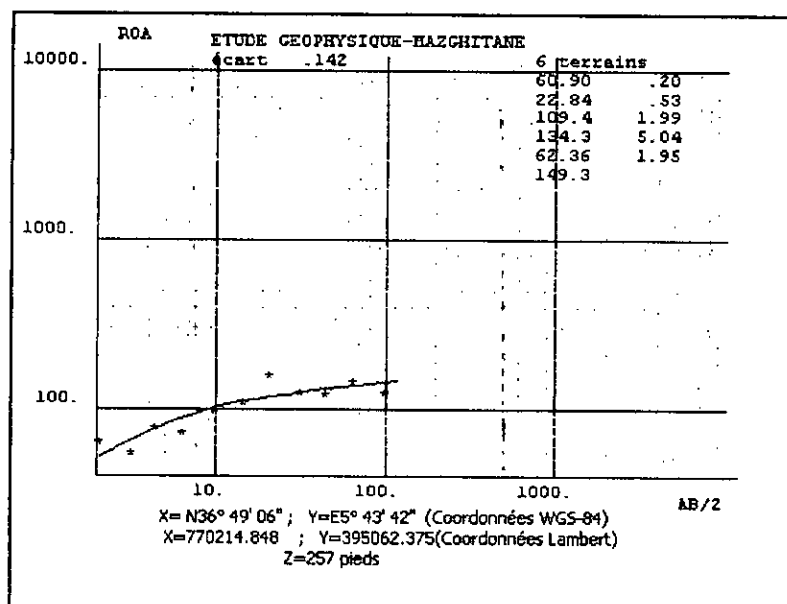
Les courants injectés dans le sol par l'appareil varient entre 20mA et 100mA. Les valeurs de résistivité électrique apparente enregistrées lors de la prospection varient de 16 à 650 Ωm . Les valeurs faibles ($< 40 \Omega m$) sont caractéristiques des milieux conducteurs (argiles dans notre cas) alors que les valeurs élevées jusqu'à 600 Ωm sont caractéristiques de grès plus ou moins argileux, d'argiles schisteuses et de calcaires.

Sondage électrique 1



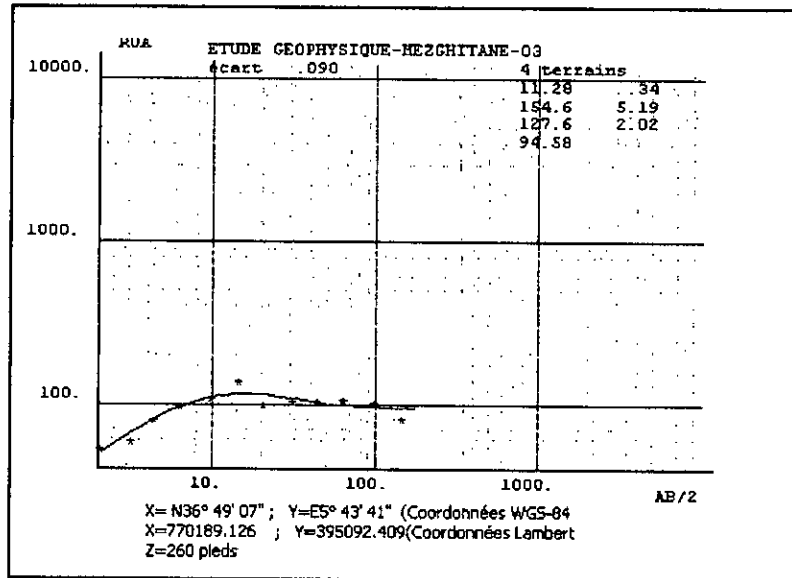
Au niveau du sondage N°1, on remarque suivant le modèle obtenue après inversion une structure composée de 5 terrain géo électrique , en surface deux couches successives altérées légèrement conductrice de faible épaisseur (4m), suivie de trois couches résistantes, d'épaisseur allant jusqu'à 11m, révélant probablement l'existence d'une dalle gréseuse.

Sondage électrique 2



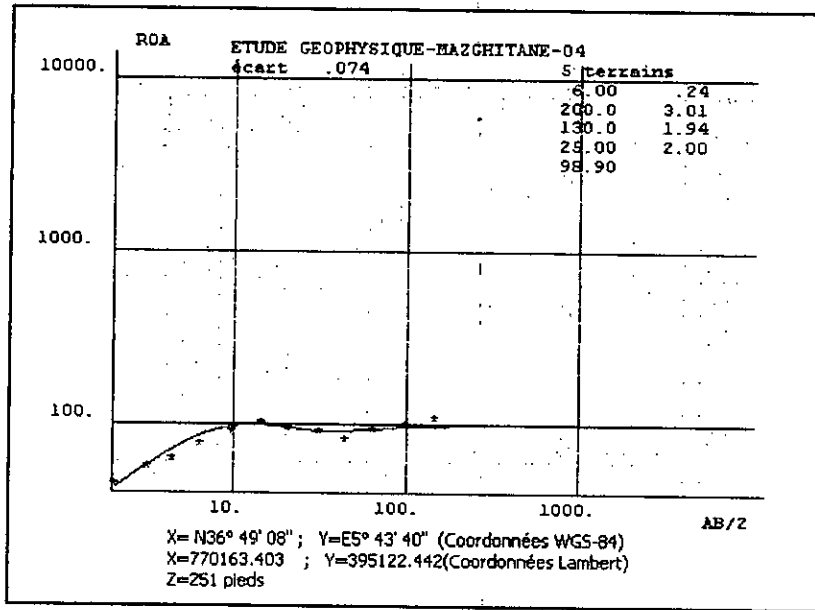
Au niveau des sondages N°2, l'hétérogénéité est superficielle, mais montre également une certaine anisotropie latérale liée à l'altération. Ce sondage est globalement plus résistant, donc ils sont les plus proches du noyau résistant de la masse gréseuse, d'une épaisseur globale allant jusqu'à 10m.

Sondage électrique 3



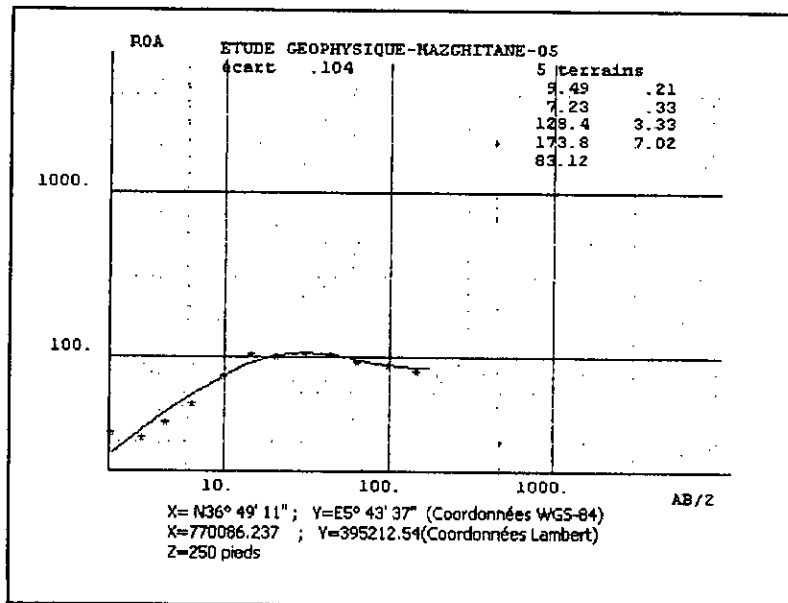
Au niveau du sondage N°3, le modèle de quatre terrains révèle la succession d'un terrain superficiel légèrement conducteur de faible épaisseur suivi de trois terrains résistants dont l'épaisseur allant jusqu' à 8m, suivie par une couche altéré, fracturée très accentuée latéralement, néanmoins le terrain reste très résistant.

Sondage électrique 4



Au niveau du sondage N°4, on remarque la similitude du modèle avec celui du sondage N°3, un modèle très perturbé, la fracturation superficielle a rendu la simulation très sensible, mais le noyau semble identique, révèle sa nature plus résistante.

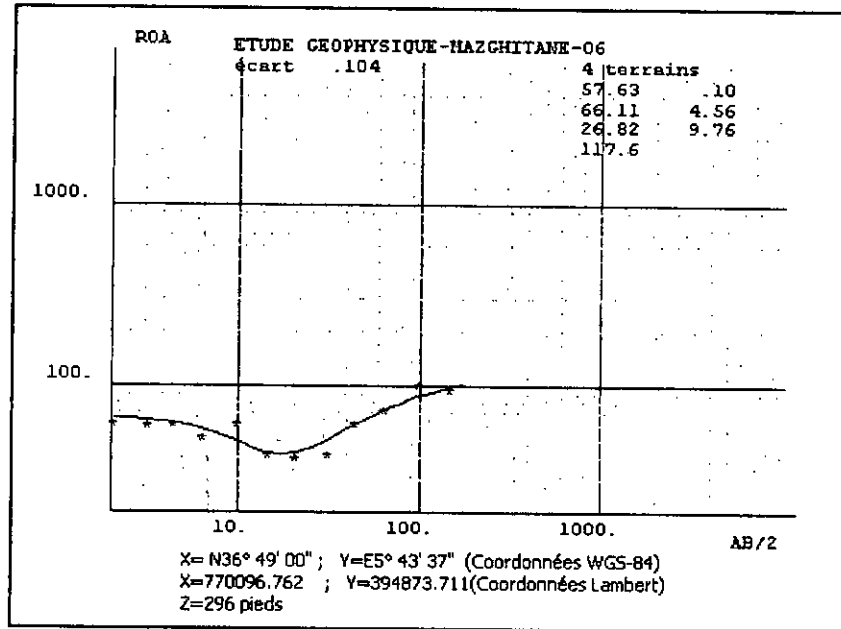
Sondage électrique 5



Au niveau du sondage N°5, on remarque suivant le modèle obtenue après inversion une structure composée de 5 terrain géo électrique, en surface deux couches successives altérées légèrement conductrice de très faible épaisseur (0.5m), suivie de trois couches

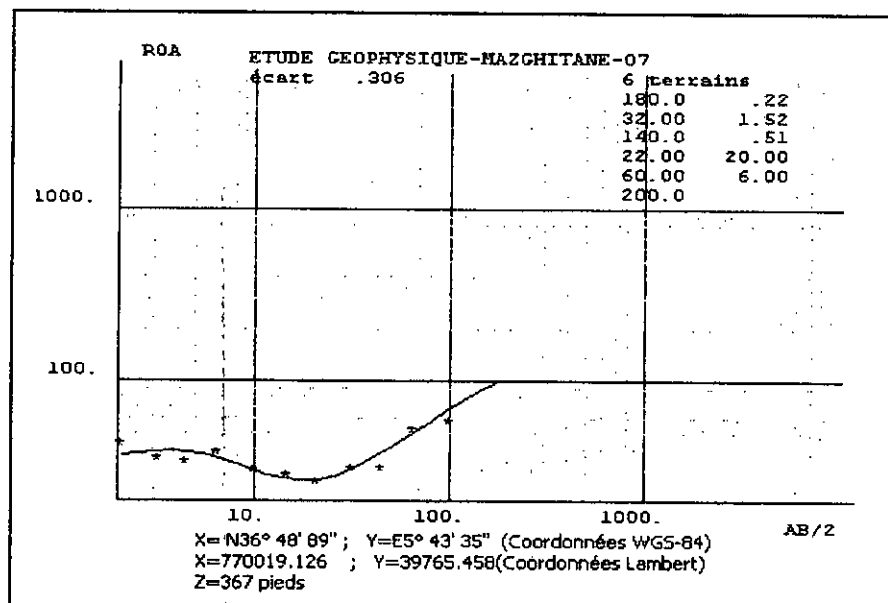
résistantes, d'épaisseur allant jusqu'à 11m, révélant probablement l'existence d'une dalle gréseuse altérée.

Sondage électrique 6



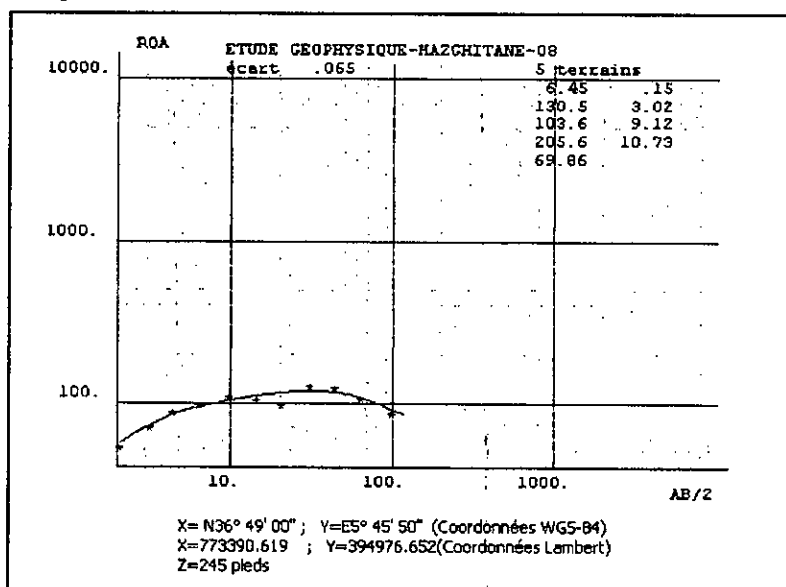
Au niveau de sondage N°6, l'hétérogénéité est superficielle, mais montre également une certaine anisotropie latérale liée à l'altération. Ce sondage a l'allure d'un trois terrains un conducteur de 10m entre deux résistants; dont le dernier est globalement plus résistant.

Sondage électrique 7



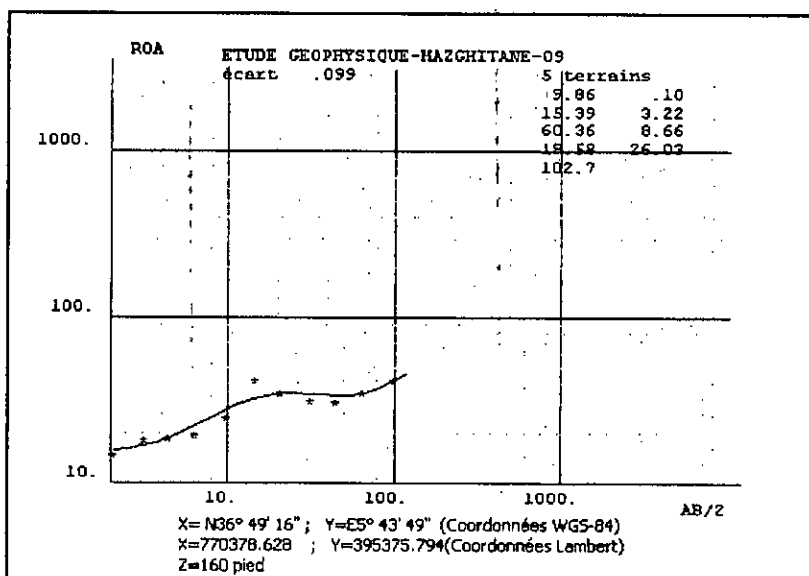
Au niveau du sondage N°7, le modèle de sept terrains révèle la succession d'un terrain superficiel légèrement résistant, suivi d'un conducteur de faible épaisseur (2m); Le troisième conducteur est piégé entre le troisième terrain et le cinquième d'une épaisseur assez importante (20m), surmonté de terrains très résistant.

Sondage électrique 8



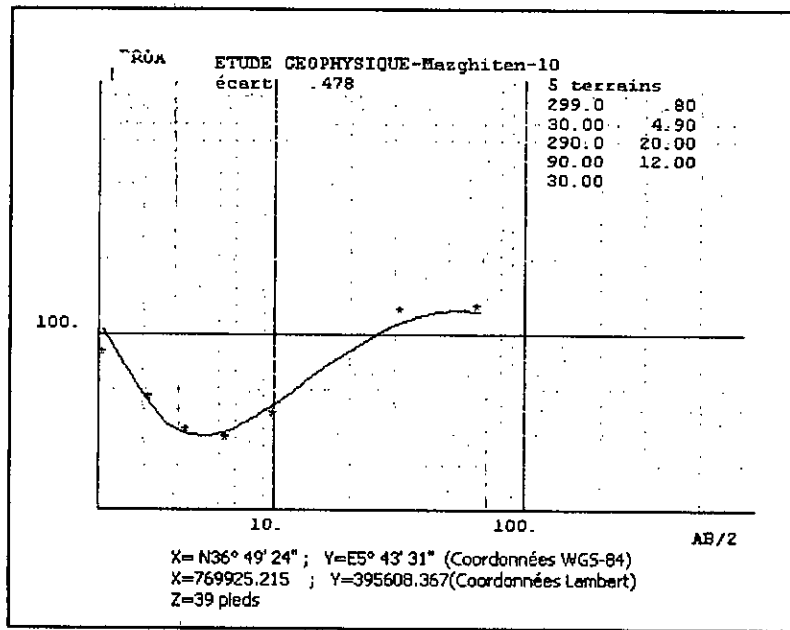
Au niveau du sondage N°8, on remarque la similitude du modèle avec celui du sondage N°3, un modèle très perturbé, la fracturation superficielle a rendu la simulation très sensible, mais le noyau semble identique, révèle sa nature résistante.

Sondage électrique 9



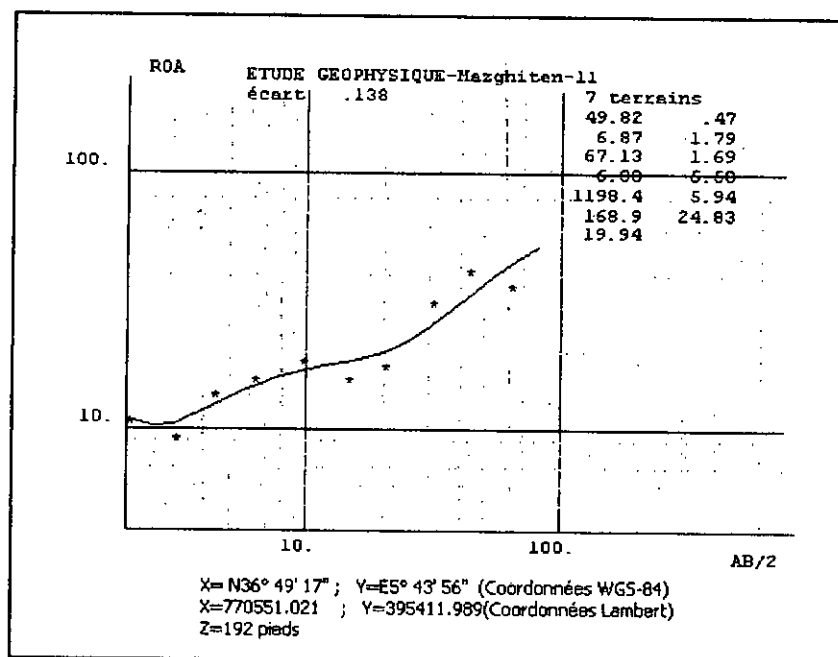
Au niveau du sondage N°9, la structure du modèle présenté celui de cinq terrains, l'hétérogénéité est superficielle, mais montre également une certaine anisotropie latérale liée à l'altération. Ce sondage présente deux plateaux légèrement conducteurs dans un environnement résistant. La courbe révèle le passage d'une zone très fracturée d'une épaisseur atteignant 37m, surmontée par une couche à tendance résistante.

Sondage électrique 10



Au niveau de ce sondage N°10, le modèle de cinq terrains révèle en fait une, au fond du bateau. Un résistant suivi d'une couche conductrice de 5m, recouverte d'une dalle plus résistante d'épaisseur atteignant 32m.

Sondage électrique 11



Au niveau du sondage N°11, on remarque la similitude de ce modèle avec celui du sondage N°9, un modèle très perturbé, la fracturation superficielle a rendu la simulation très sensible. La courbe révèle le passage d'une zone très fracturée d'une épaisseur atteignant 40 m.

5.4.2 Profil de résistivité des données électriques

1- Profil Géo électrique

Le profil Géo électrique AA'-BB' voir Fig. 5.3 représente une projection le long de la ligne médiane, centrée autour des sondages (2 ; 3 ; 4).

Cette coupe révèle un compartimentage très accentué superficiellement en blocs conducteur et résistant, traduisant ainsi une dense fracturation.

Cette différence disparaît progressivement en profondeur au niveau des 20 à 30 mètres.

En effet, au niveau du sondage N°11, on constate que l'évolution de la résistivité en fonction de AB/2 est très faible, on est en présence d'une couche conductrice épaisse, les limites de ce compartiment (Bloc B) conducteur s'arrêtent au niveau des sondages

9&10 au-delà des 5 premières mètres ; le second compartiment se situe entre les sondages N°10 & N°4 ou (Bloc A) c'est une zone de transition et marque le passage vers un compartiment plus résistant et plus étalé en profondeur, latéralement; au niveau des sondages N°4,3,2& N°1

On est sur le (Bloc C) un bloc conducteur superficiellement mais le noyau résistant se situe plus en profondeur.

Au niveau du sondage N°1 ; 6 & 7, une zone très conductrice en surface et plongeante en profondeur, ceci marque le passage d'une zone de transition.

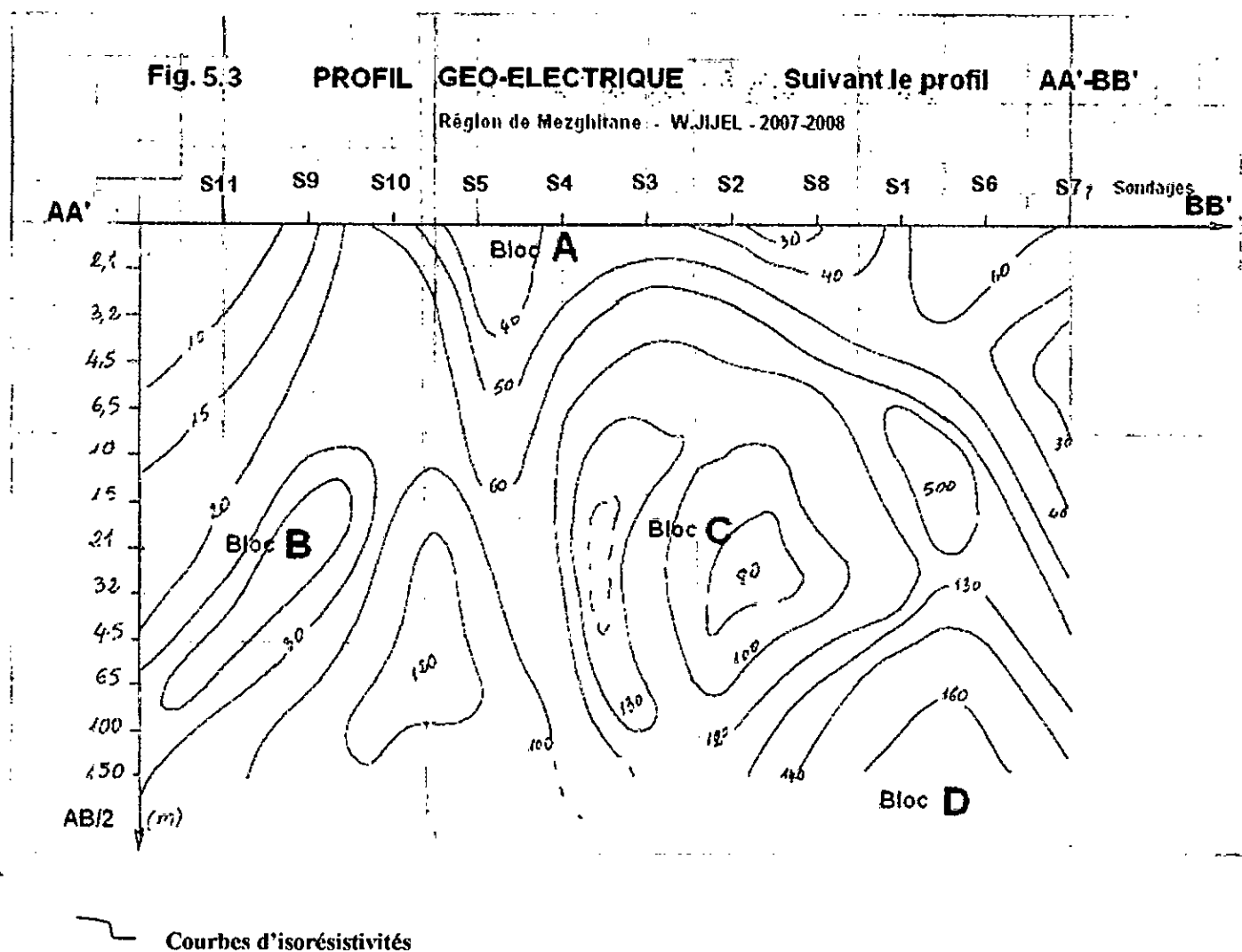


Fig. 5.3 Profil Géo électrique AA'-BB'.

2- Modèle Géo électrique 2D (Coupe géo électrique suivant AA'- BB')

Le modèle bidimensionnel obtenu par projection le long du même profil Géo électrique AA'- BB' ; Révèle une structuration en profondeur, présentant une certaine harmonie géologique, l'ensemble est soumis à une fracturation, mettant ainsi en place différents blocs ; Voir Fig.5.4.

Ce compartimentage en blocs résistants et conducteurs est soumis à une fracturation très accentuée en surface créant ainsi des zones de broyages très faillées où d'infiltration par les eaux superficielles.

Ainsi au niveau des sondages : N°11, N°9, & N°10 ; On constate la disposition en blocs séparés par des failles : (Bloc A) résistant et (Bloc B) conducteur induisant facilement l'écoulement des lignes de courant électrique, et provoquant ainsi une zone de broyage ou anomalie conductrice.

Le troisième bloc associant le (Bloc C) superficiellement et le (Bloc E) plus en profondeur, constitués de couches résistantes et très fracturées compris entre les sondages. N°10 & N°8

Le dernier bloc qui se situe au niveau des sondages N°1, N°6 & N°7 (Bloc D) formant plusieurs couches graduellement résistant en profondeur.

Fig. 5.4 MODELE GEO-ELECTRIQUE 2D Suivant le profil AA'-BB'

Région de Mezghitane - W.JIJEL - 2007-2008

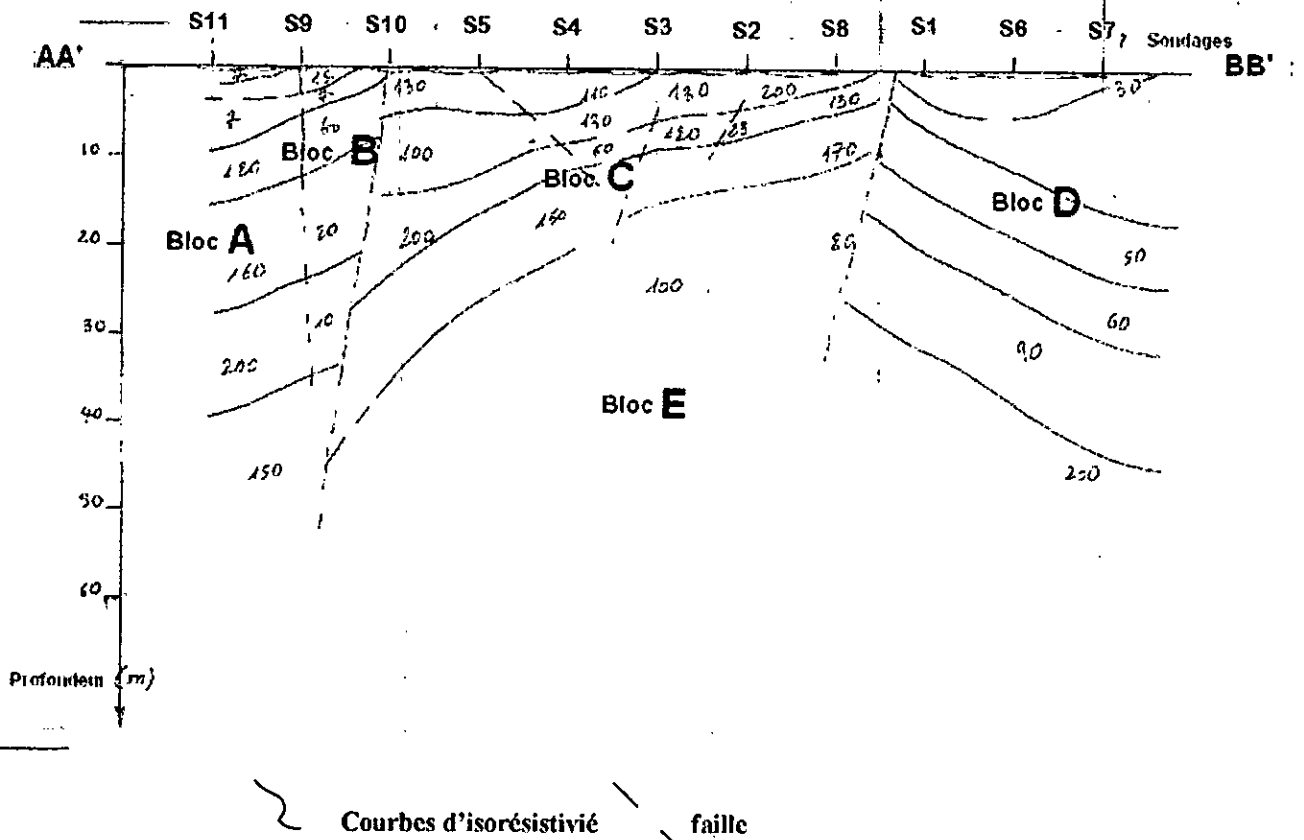


Fig.5.4 : Coupe Géo électrique AA'- BB' (Modèle 2D).

Chapitre 6



Caractérisation géotechnique du POS de Mezghitane

6.1 Introduction

Le POS N°2 Mezghitane a été le siège d'une étude géotechnique réalisée par le laboratoire LNHC unité de Rouïba. Une étude géotechnique complémentaire a été réalisée au droit de chaque zone de projets de construction.

Nous avons pris en considération quatre rapports d'étude : le rapport d'étude du POS de Mezghetane réalisée par le laboratoire LNHC unité de Rouïba, le rapport d'étude géotechnique 200 logements Mezgithane réalisé par le bureau d'étude Fondasoil, le rapport d'étude géotechnique 400 logements réalisé par le Laboratoire Al ARDH, le rapport d'étude géotechnique 250, 100, 45, 25 logements réalisé par le Laboratoire de contrôle d'étude et d'expertise (LCEE).

Pour le laboratoire LNHC unité de Rouïba, une campagne de reconnaissance géotechnique a porté sur la réalisation de 58 essais de pénétration dynamique, 13 sondages carottés et 18 échantillons soumis aux différents essais de laboratoires effectués par le LNHC. Le Laboratoire Al ARDH a réalisé 15 sondages carottés et une dizaine d'échantillons a été soumis aux différents essais de laboratoire et le bureau d'étude Fondasoil a réalisé 4 sondages carottés dont 7 échantillons ont été soumis aux essais de laboratoire.

6.2 Programme d'essais

A) Les essais in situ

1) Les sondages carottés

Les sondages carottés sont utilisés pour évaluer la structure de la roche de fond, ils ont pour but la mise en évidence des différents termes lithologiques et la précision de leur épaisseur et leur étendue latérale. Les sondages sont utilisés pour obtenir des échantillons en vue des essais de roches et de sols, et pour détecter les surfaces de glissement potentielles. Un forage a l'avantage de permettre une observation directe des échantillons collectés, pouvant également être utilisés pour les essais de roches et de sols.

2) Essais de pénétration dynamique

Les essais de pénétration dynamique sont effectués dans le but de quantifier la résistance dynamique du sol à différentes profondeurs. Le principe d'essai consiste à enfoncer dans le terrain un train de tige métallique par battage au moyen d'un mouton de masse M , tombant en chute libre d'une hauteur fixe H . Les résultats de cet essai sont représentés sous forme de diagrammes. Ces diagrammes fournissent un profil continu de la résistance du terrain à la pénétration, jusqu'au refus.

B) Les essais de laboratoires

Les essais de laboratoires réalisés sur des échantillons prélevés du site d'étude comportent : l'analyse granulométrique, le poids volumique, la teneur en eau, les limites d'Atterberg, l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande, l'essai oedométrique et l'analyse chimique. Ces essais sont effectués afin de quantifier les caractéristiques physiques et mécaniques des sols.

A) Propriétés physiques

1) Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique se propose de définir la répartition des grains constitutifs d'un sol par classes de taille. Il s'agit de séparer les grains en fonction de leur dimension au moyen d'une série de tamis normalisés.

2) Limites d'ATTERBERG

Pour un sol fin, elles mettent en évidence l'influence de la teneur en eau sur la consistance du matériau (Filliat, 1981).

La limite de liquidité est la teneur en eau au-dessus de laquelle le sol se comporte comme un semi-liquide et s'écoule sous son propre poids (elle sépare l'état liquide de l'état plastique).

L'indice de plasticité représente les teneurs limites entre lesquelles les matériaux sont aptes à se déformer sous l'action des facteurs externes comme la gravité ou la pression (cet indice est élevé dans tous les matériaux du versant de Mezghjtane).

B) Propriétés mécaniques

1) Essais de cisaillement

La résistance au cisaillement est mesurée au moyen de trois catégories de matériel : l'appareil triaxial, l'appareil de cisaillement rectiligne (boîte de Casa grande).

Pour mesurer la résistance au cisaillement on a utilisé l'essai de cisaillement rectiligne à boîte de Casagrande, cet essai permet le cisaillement d'un sol suivant un plan imposé et défini par le contact des deux demi boîtes constituant l'appareil, il permet l'exécution des essais consolidé-drainé, consolidé-non drainé et non consolidé-non drainé.

Le principe de l'essai est de mesurer les composantes τ et σ de la contrainte critique provoquant la rupture d'un échantillon cisailé suivant un plan imposé. A partir de la droite de Coulomb : ($\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$), nous déterminons les paramètres de la résistance au cisaillement à savoir la cohésion c et l'angle de frottement interne (ϕ).

2) Essais de compressibilité à l'oedomètre

C'est l'essai principal d'étude de la compressibilité des sols argileux et limoneux. Son principe correspond au schéma-type de la théorie de la consolidation de Terzaghi : drainage par ses deux faces d'une couche chargée uniformément.

Il consiste à exercer sur l'échantillon des contraintes normales par paliers successifs en présence d'eau. La variation du volume est mesurée à chaque palier jusqu'à qu'une stabilisation soit atteinte. Les résultats sont donnés sous forme de courbes visualisant la variation de l'indice des vides du sol en fonction du $\log \sigma$. A partir de ces courbes, on déduit graphiquement les coefficients de gonflement (C_g) et de compressibilité (C_c).

6.3 Résultats de la prospection géotechnique

Afin de déterminer la stratigraphie des dépôts et la surface de refus, des sondages carottés (de 8 à 20 de profondeur) et des sondages de pénétration dynamique ont été réalisés sur le site de Mezghjtane.

6.2.1 Les essais in situ

1) Sondages carottés

Plus de 56 sondages carottés ont été réalisés sur site dont la profondeur varie entre 8 et 20m.

Les coupes sondeurs montrent que le terrain est constitué d'argiles schisteuses en profondeur, surmontés par une alternance de sables fins à moyens, des argiles sableuses et des limons argileux d'une part et de grés sains en profondeur et altéré en surface d'autre part. Ces formations sont recouvertes par une couche de terre végétale. On marque la présence de blocs de calcaires gréseux aux droits des sondages S3, S6, S9, S10, S11, S12 à partir de 2m, 7.8m, 4.8m, 5.4m, 9m, 4m de profondeur respectivement.

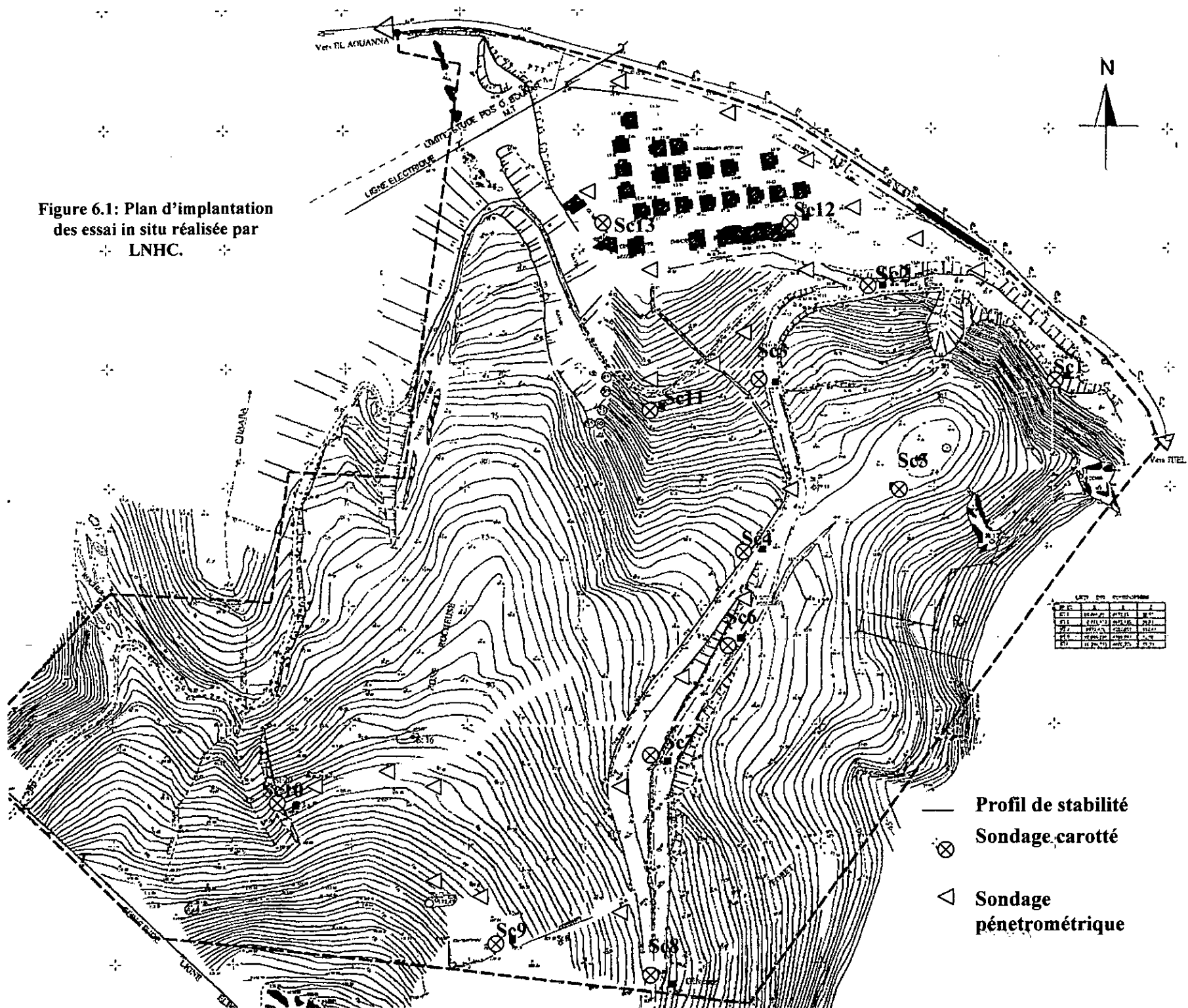
2) Essais de pénétration dynamique

Les sondages au pénétromètre dynamique de type BORRO B2 montrent que le sol présente une bonne résistance en pointe qui varie entre 40 et 50 bars, Les refus sont enregistrés entre 2 et 7m.

Le sol se comporte de deux façons :

- la résistance à la pointe croit assez rapidement, de façon linéaire pour atteindre le refus entre 2 et 7m de profondeur (cas des couches gréseuses altéré à la surface et saines en profondeur).
- des surfaces de résistance (pics) dont la résistance à l'abattage varie entre 40 et 50 bars, en dehors de ces pics les valeurs varient entre (10 et 90 bars) (profondeurs correspondant aux terrains argileux). Mais la présence de blocs de différentes tailles et à différentes profondeurs semble être à l'origine de ces pics.

Figure 6.1: Plan d'implantation des essais in situ réalisés par LNHC.



6.2.2 Les essais de laboratoires

Les essais de laboratoires ont été réalisés sur plus 80 échantillons prélevés sur les sondages carottés à des profondeurs ente 1.20 et 8.50 m.

A) Propriétés physiques

2) Analyse granulométrique

Les analyses granulométriques effectuées sur les sols en place ont donné les résultats suivants :

N° De Sondage	S2	S4	S5	S5	S5	S7	S7	S7	S9	S9	S10	S11	S11	S12	S13
Profondeur (m)	3.0-3.50	2.0-2.40	1.70-2.00	2.20-2.40	2.20-2.60	3.0-3.30	5.0-5.30	6.0-6.40	1.70-2.0	4.30-4.50	3.50-3.80	3-3.30	6.0-6.40	2.60-2.90	2.50-2.70
Passant à 2 mm (%)	98	97	97	98	84	83	87	91	95	98	80	90	95	99	86
Passant à 80 µm (%)	86	87	54	50	46	70	68	40	56	57	77	78	84	58	60
<2 µm (%)	42	47	25	16	23	34	37	24	21	22	36	36	47	20	28

Tableau 6.1 : résultat de l'analyse granulométrique (LNHC Rouiba, 2003)

Les résultats montrent que la fraction limono-argileuse représente des matériaux du versant. 46% des échantillons ont donné un pourcentage d'éléments fins (<80 µm) supérieur à 50% (très élevé). % 54 des échantillons présentent un passant 80 µm<50% (faible) .

D'après la norme NFP11-300 basée sur le D max, le passant à 80 µm et l'indice de plasticité, il s'agit un mélange de sols fins (classes A₁, A₂, A₃ : argile et limon et marne peu plastique, argile et limon très plastique) et de sols sableux et graveleux avec des fines ; ce qui confirme les résultats de l'étude géologique : alternance d'argile intercalée par des niveaux gréseux, et du grès à grains grossiers à moyens .

La présence des argiles dans les matériaux du versant a des répercussions sur la stabilité en fonction de leurs caractéristiques géotechniques et minéralogiques.

3) limites d'ATTERBERG

Le report des valeurs des limites d'Atterberg sur l'abaque de Casagrande montre que 87% des échantillons se trouvent dans la zone des argiles peu plastiques (présentent des indices de plasticités (IP) entre 8 et 34 %, et des limites de liquidité (Wl) entre 25 et 50%), alors que 6 % sont à la limite entre les argiles peu et très plastique et 5 % se trouve dans la zone des argiles très plastiques (présentent un IP entre 20.6 et 29%et un Wl entre 50et 62).

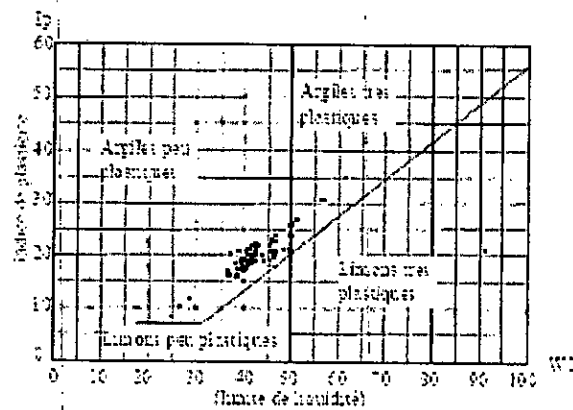


Fig.6.2 Diagramme de plasticité Casagrande des échantillons de mezghitane

B) Caractéristiques mécaniques

Les paramètres de comportement mécanique ont été mesurés à partir de deux types d'essais :

Résultats des essais mécaniques

paramètres	Cc (%)	Cg (%)	Cu (bar)	ϕ_u (°)
Limons argileux	9.6 – 13.3	1.6 – 6.8	0.24 – 1.60	14 – 28
Argiles sableuses	11.7 – 20.3	2.1 – 8.5	0.55 – 0.81	12 – 17

Tableau 6.2 : Résultats des essais mécaniques (LNHC Rouiba).

Les valeurs obtenus montrent que :

- les limons argileux présentent un caractère non gonflant et peu compressible.
- Les argiles sont gonflantes et moyennement compressibles.

Ces résultats de la compressibilité sont calculés en basant sur le l'indice de compressibilité Cc et l'indice des vides initial (en référant à Philliponnat).

C) Analyse chimique

L'analyse chimique effectuée sur des échantillons comporte la teneur en sulfates, en chlorures et en carbonates. Les carbonates sont présentes en faibles quantités généralement et souvent en trace sauf pour le site 400 logements où la teneur en carbonates est entre 6.7 et 28.2 %.

Toutes les échantillons analysées présentent des teneurs en sulfates très faibles, ce qui relève une agressivité nulle selon la norme NFP 18-011 du 06/92.

échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Carbonates (%)	8.2	15.4	10.6	6.7	9.4	28.2	10.3	9.0	7.2	8.3
Sulfates (%)	-	-	0.12	-	-	0.12	-	-	-	-

Tableau 6.3 : Résultats de l'analyse chimique (laboratoire Al Ardh).

6.4 Choix et calcul de fondations

Les efforts et les charges provenant de l'ouvrage sont transmis au sol d'assise par les fondations. Selon que les efforts sont reportés à la surface du sol ou en profondeur, les fondations seront superficielles ou profondes.

Le choix de type de fondation est dicté par la nature géologique du terrain d'assise, si le terrain de surface ou de faible profondeur est capable de supporter l'effort de la construction, la fondation superficielle est meilleure solution. Les fondations profondes sont utilisées lorsque les couches de surface sont incapables de supporter l'effort de la construction. Elles font appel à la résistance fournie par le sol directement sous la fondation, ainsi qu'éventuellement à la résistance que peut engendrer le frottement des faces latérales de la fondation sur le terrain encaissant.

Calcul de la contrainte admissible

La contrainte admissible du sol a été déterminée par deux méthodes :

- la première consiste en l'application de formules semi-empiriques en utilisant les résultats des essais in situ.
- la deuxième méthode est basée la théorie de plasticité et qui utilise les résultats des essais de laboratoire.

1) À partir des essais in situ - essai de pénétration dynamique-

La contrainte admissible du sol déduite des essais de pénétration dynamique est égale aux vingtièmes de la valeur de la résistance dynamique minimale moyenne enregistrée sur une couche d'épaisseur égale trois fois la largeur de la semelle. Avec un facteur de sécurité égale à 4.

$$q_{adm} = \frac{Rd_{min}}{20}$$

Avec :

q_{adm} : contrainte admissible du sol.

R_{min} : résistance dynamique minimale en pointe sur une couche d'épaisseur (3B) sous la fondation

Les valeurs de contrainte admissible obtenues pour des niveaux d'ancrages pris entre 1 et 3m sont regroupées dans le tableau ci-après.

N° de sondage						N° de sondage					
	1	1.5	2	2.5	3		1	1.5	2	2.5	3
P1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	P30	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5
P2	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	P31	0.9	refus	refus	refus	refus
P3	0.9	0.9	1.2	1.2	6.95	P32	2.1	refus	refus	refus	refus
P4	0.9	0.9	1.75	1.75	1.75	P33	2.5	>3	>3	>3	>3
P5	refus	refus	refus	refus	refus	P34	2	>3	>3	>3	refus
P6	1.3	2.5	2.7	2.7	3.6	P35	0.45	>3	>3	>3	refus
P7	1.95	1.95	1.95	1.95	5	P36	2	>3	>3	>3	refus
P8	0.9	0.9	2.3	2.3	2.5	P37	2.1	2.5	refus	refus	refus
P9	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	P38	>3	refus	refus	refus	refus
P10	3.75	3.75	2.8	2.8	2.8	P39	1.25	>3	>3	refus	refus
P11	>3	>3	refus	refus	refus	P40	2.5	2.5	>3	refus	refus
P12	refus	refus	refus	refus	refus	P41	>3	>3	>3	>3	refus
P13	refus	refus	refus	refus	refus	P42	0.45	0.9	2.8	refus	refus
P14	0.95	0.95	3.75	>3	refus	P43	2.5	refus	refus	refus	refus
P15	refus	refus	refus	refus	refus	P44	>3	>3	refus	refus	refus
P16	refus	refus	refus	refus	refus	P45	1.3	2.8	>3	>3	refus
P17	refus	refus	refus	refus	refus	P46	0.9	0.9	0.9	0.9	2.5
P18	0.9	0.9	1.25	1.2	refus	P47	2.7	2.7	2.7	>3	>3
P19	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	P48	2.5	2.95	2.9	>3	refus
P20	1.6	2.25	2.25	2.25	4.25	P49	>3	>3	>3	>3	>3
P21	3	3	3	3	refus	P50	>3	>3	>3	>3	>3
P22	2.1	2.5	2.5	2.5	refus	P51	2.7	2.7	2.7	2.7	>3
P23	2.1	2.1	>3	>3	>3	P52	2.5	>3	>3	refus	refus
P24	>3	>3	>3	>3	>3	P53	2.5	>3	>3	>3	refus
P25	>3	refus	refus	refus	refus	P54	refus	refus	refus	refus	refus

P26	refus	refus	refus	refus	refus	P55	2.5	>3	>3	>3	>3
P27	refus	refus	refus	refus	refus	P56	2.5	>3	>3	>3	>3
P28	>3	refus	refus	refus	refus	P57	3	3	>3	>3	>3
P29	2	2.25	2.25	refus	refus	P58	2.8	>3	>3	>3	>3

Tableau 6. 4 : valeur de la contrainte admissible à partir des essais de pénétration dynamique réalisé par le LNHC unité de Rouiba.

	ancrage						ancrage				
	1	1.5	2	2.5	3		1	1.5	2	2.5	3
P1	1	1.5	2	2.5	3	P11	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
P2	2	2	>3	>3	>3	P12	>3	>3	>3	>3	>3
P3	>3	>3	refus	refus	refus	P13	1	1.75	1.75	1.75	1.75
P4	2	2	>3	>3	>3	P14	1.6	1.6	3	3	>3
P5	0.75	0.75	1.6	1.6	1.6	P15	1.5	1.5	refus	refus	refus
P6	1.2	1.2	2.6	2.6	2.6	P16	1.2	>3	>3	>3	>3
P7	0.45	0.45	0.45	0.65	0.65	P17	>3	>3	>3	>3	>3
P8	0.45	1	1	1	1	P18	1.6	2.5	2.5	2.5	2.5
P9	2	2	2	2	2	P19	>3	>3	>3	>3	>3
P10	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45						

Tableau 6. 5 : valeur de la contrainte admissible à partir des essais de pénétration dynamique réalisé par le laboratoire ALARDH, Site 400 logements OPGI.

2) À partir des résultats des essais de laboratoire

Vu la nature géologique du terrain et son bon comportement vis à vis de la pénétration dynamique les fondations superficielle sont les plus adaptées.

Le calcul par la méthode considère une fondation superficielle à base horizontale, encastree dans un sol homogène et supportant une charge verticale centrée.

La formule générale utilisée comprend trois termes ; un terme de surface, un terme de profondeur et un terme de cohésion.

$$q_{adm} = \delta_2 D + \frac{1}{F_s} \left[\rho \delta_1 N_\delta + \delta_2 (N_q - 1) + \left(1 + 0.3 \frac{B}{L} \right) CN_c \right]$$

Avec :

q_{adm} : contrainte admissible du sol.

D : ancrage de la fondation.

F_s : coefficient de sécurité pris égal à 3.

L : longueur de la semelle.

B : largeur de la semelle

δ_1 : poids spécifique du sol au-dessus la fondation.

δ_2 : poids spécifique du sol au-dessous la fondation.

ρ : rayon moyen ($\rho = 0.5 B/(1+B/l)$).

N_c, N_δ, N_q : coefficient dépendants de l'angle de frottement interne du sol avec :

N_c : facteur de portance dû au poids des terres.

N_δ : facteur de portance dû à la surcharge.

N_q : facteur de portance dû à la cohésion.

Les résultats de la contrainte admissibles sont regroupés dans le tableau ci-après.

Sondage	Semelles	ancrage	Q_{adm}
S2	Carrée	2	3.2
	filante	2	2.7
S4	Carrée	2	4.6
	filante	2	3.8
S5	Carrée	2	2.3
	filante	2	1.7
S7	Carrée	2	25.6
	filante	2	24.2
S8	Carrée	2	12.7
	filante	2	10.4
S9	Carrée	2	18
	filante	2	14
S10	Carrée	2	4.7
	filante	2	3.8
S11	Carrée	2	4.4
	filante	2	3.5
S12	Carrée	2	5.4
	filante	2	4.8
S13	Carrée	2	3.3
	filante	2	2.7

Tableau 6. 6 : valeur de la contrainte admissible à partir des essais de laboratoire réalisé par le LNHC unité de Rouiba.

Sondage	Semelles	ancrage	Q_{ad}
Sc2	Carrée	1.5	2.9
	filante	1.5	2.6
Sc3	Carrée	1.5	4.7
	filante	1.5	3.8
Sc4	Carrée	1.5	4.5
	filante	1.5	3.9
Sc'1	Carrée	1.5	8.7
	filante	1.5	7.5
Sc'3	Carrée	1.5	6.2
	filante	1.5	5.3
Sc'4	Carrée	1.5	2.5
	filante	1.5	2.3
Sc'5	Carrée	1.5	4.6
	filante	1.5	3.75
Sc''3	Carrée	1.5	7.9
	filante	1.5	6.7
Sc''4	Carrée	1.5	2.7
	filante	1.5	1.9
Sc''5	Carrée	1.5	5.5
	filante	1.5	4.5
Sc''6	Carrée	1.5	7
	filante	1.5	6.1

Tableau 6. 7 : valeur de la contrainte admissible à partir des essais de laboratoire réalisé par le laboratoire AL ARDHLNHC.

Sondage	Semelles	ancrage	Q_{adm}
S1	Carrée	1.8	2.2
	filante	1.8	1.8
S2	Carrée	1.8	1
	filante	1.8	0.9
S3	Carrée	1.8	2.6
	filante	1.8	2.2
S4	Carrée	1.8	1.4
	filante	1.8	1.2

Tableau 6. 8 : valeur de la contrainte admissible à partir des essais de laboratoire réalisé par le laboratoire fondasoil

6.5 Étude de stabilité

6.5.1 Introduction

Tout projet de construction (comme c'est le cas du POS de Mezghitane) sur un versant doit toujours précéder d'une étude de stabilité car l'absence de mouvements passés ou présents n'est pas une garantie de la stabilité pour l'avenir, une étude de stabilité comporte:

- Une appréciation de l'état de la stabilité initiale du site par une analyse détaillée concernant le calcul de stabilité.
- Une appréciation de la modification que va entraîner, sous cet angle, la réalisation du projet (déboisement, terrassement, construction etc....).
- Une définition de la zone la plus menacée du site et la géométrie d'une rupture éventuelle.
- Une définition des dispositions confortative à prévoir si la stabilité modifiée s'avère insuffisante dans telle zone du versant ou pour telle des travaux.

L'expérience montre que lorsque l'étude précédente n'est pas effectuée, il peut en résulter, soit en cours de chantier, soit après la construction, des désordres qui posent des problèmes difficiles à résoudre (Filliat, 1985).

6.5.1 Les mouvements de terrain

Définition

Le terme générique « mouvements de terrain » désigne l'arrachement et le déplacement le long des pentes, de sols et de matériaux rocheux sous l'effet direct de forces de gravité.

6.5.2 Conditions d'apparition d'un mouvement de terrain au niveau de Mezghitane

Un mouvement de terrain s'explique par la conjonction de facteurs intrinsèques ou de prédisposition (relief, nature et structures des formations géologiques etc.) et de facteurs aggravants ou dégradants (Jeannin, 2005) qui peuvent jouer le rôle de facteurs

déclenchants comme la pluie, une secousse sismique ou des travaux de terrassements malencontreux.

Une bonne compréhension du type du mouvement de terrain, du mécanisme et de ses causes est nécessaire pour réduire les conséquences en termes de pertes de vies, de dégâts aux infrastructures et des préjudices aux activités humaines. De telles études sont également utiles pour établir des cartes de risque requises pour planifier le développement durable des régions vulnérables. Traditionnellement, les études des versants instables incluent plusieurs disciplines comme la géologie, la géomorphologie, la climatologie et géotechnique (Bruno, 2002).

C'est seulement lorsque les causes d'un mouvement de terrain sont clairement établies qu'il devient possible d'examiner, avec quelques chances de succès, les dispositions confortative capables de redonner au site sa stabilité (Balideau, 2005).

6.5.2.1 Les facteurs intrinsèques

Les facteurs intrinsèques ou de prédisposition, regroupent l'ensemble des caractéristiques, propre à la roche. On distingue :

- **La nature lithologique des formations géologiques.** les comportements mécaniques des roches seront différents en fonction de leur nature (Jeannin, 2005). La nature de terrain constituant le site représente la donnée de base imposée par la géologie du site. Lorsque la nature de terrain est bien définie le comportement de la formation est facilement appréhendable.

La grande majorité des mouvements de terrain apparaissent dans des terrains argileux ou dans des formations grenus suffisamment chargées en argile.

Les formations géologiques distinguées dans le site de Mezghitane sont :

- les grés numidiens qui occupe la plus grande partie du POS.
- Des formations argileuses intercalées par des horizons gréseux.

Pour le grés numidien (c'est un bon sol), le risque de mouvement est négligeable, mais le niveau argileux est très favorable au glissement de terrain, il peut causer des

problèmes d'instabilité s'il est réuni avec d'autres facteurs tel que la pente qui varie entre 30 et 35%.

- **Les caractéristiques structurales :** de nombreuses fracturations qui matérialisent les niveaux gréseux participent certainement à la déstabilisation en fragilisant le sol. La géométrie des différentes discontinuités détermine une orientation favorable ou non à l'instabilité du massif. Par exemple la stratification sera défavorable si elle est inclinée vers l'intérieur du versant. En revanche elle sera favorable si elle est inclinée vers la pente, car elle peut engendrer des glissements de la masse.
- **Rôle de la pente :** la pente représente un paramètre qui conditionne la stabilité d'un talus. Elle représente un élément fondamental de l'érosion et de l'instabilité. Pour un talus de hauteur et de caractéristiques géotechniques données, il existe une pente limite au delà de laquelle la rupture est inévitable (si la pente du talus est supérieur à l'angle du frottement interne du sol la rupture est inévitable). Le risque de mouvement de terrain est d'autant plus important que la pente du versant est raide.

Pour le site de Mezghjtane : la fréquence des affleurements de roches meubles et plastiques (Argile en particulier), le fractionnement tectonique des roches et les fortes pentes constituent des facteurs imminents favorables à une dynamique de mouvement de masse.

6.5.2.2 Les facteurs aggravants ou dégradants

Les facteurs aggravants ou dégradants regroupent l'ensemble des éléments externes agissant sur la roche. Ils contribuent à plus ou moins long terme, à augmenter de façon irréversible le degré d'instabilité du massif (apparition de nouvelles fissures, altération de surface, érosion) (Jeannin, 2004). Les facteurs ci-dessous sont souvent considérés comme responsables du déclenchement de l'instabilité. On peut distinguer :

-Facteurs d'origine naturelle : fortes pluies, fonte des neiges, secousses sismiques etc....

-Facteurs d'origine anthropique (humaine) suite à des travaux : surcharge en tête d'un talus ou d'un versant déjà instable, décharge en pied supprimant une butée stabilisatrice, rejets d'eau volontaires ou non, déboisement...

- **L'action rhéologique de l'eau** : les eaux souterraines et de surface jouent un rôle déstabilisant sur les sols. Les écoulements permanents conduisent au développement de pressions interstitielles qui modifient l'état de contrainte, à l'altération physico-chimique, et à des actions mécaniques (abrasion, érosion, et transport de particules) (Jeannin, 2004). Pour beaucoup de sols, mais pour les sols fins et argileux en particulier, l'apport d'eau entraîne une baisse de résistance du milieu (par réduction des caractéristiques mécaniques d'une part et de réduction de la consistance d'autre part).

Réduction des caractéristiques mécaniques

Pour les milieux argileux, l'accroissement de la teneur en eau entraîne systématiquement une réduction des caractéristiques ϕ et c donc la résistance au cisaillement, un accroissement de w de quelques pourcent peut entraîner une réduction de moitié de la valeur de c (Filliat, 1981).

Réduction de la consistance

L'accroissement de la teneur en eau d'une argile entraîne son ramollissement continu, c'est-à-dire : un accroissement progressif de sa déformabilité sous charge.

Pour les formations argileuses qui représentent un part important du site d'étude l'influence des agents météorologiques (surtout la pluviosité) intéresse particulièrement la tranche des terrains superficielle, mais par la présence de discontinuités (tectoniques et stratigraphiques) elle peut s'exercer plus profondément dans le sol.

Les roches meubles du versant de Mezghjtane sont intercalées par des niveaux gréseux généralement fracturés. La fracturation du matériel gréseux à créer des zones de faiblesse qui ont accéléré l'infiltration d'eau et l'humidification des niveaux argileux. Cette humidification est favorisée par l'inclinaison des couches

Les conditions litho-structurales, ajoutés à une pente forte (>25%) peuvent participer à la déstabilisation du versant et au déclenchement d'un glissement de terrain.

- **La suppression de la butée de pieds par terrassement.** Les terrassements ou les excavations en pied de la pente posent souvent, un grave problème de sécurité. Lorsque le terrassement est effectué en période sèche, le glissement n'apparaît en général qu'aux premières pluies faisant suite aux travaux (la rupture peut alors être brutale).

Sur le plan mécanique, l'élimination de la butée de pied réduit les forces résistantes qui agit sur la masse de terre en équilibre limite.

En plus de l'action mécanique, l'entaille de pied favorise le drainage des eaux qui s'écoulent dans le versant. Il en résulte une pression de courant dont le couple moteur s'ajoute au précédent.

Egalement la concentration des filets liquide dans la zone de l'entaille, favorise l'érosion interne, d'où il résulte un ameublissement et un affaiblissement du pied du versant.

- **Implantation d'une surcharge sur le versant :** lorsqu'elles sont placées en partie haute ou demi pente d'un versant, les surcharges sont fréquemment à l'origine de glissement de terrains. Elles accentuent les forces motrices favorables à l'apparition d'une rupture rotationnelle.

A l'inverse de ce qui vient d'être dit, les surcharges de pied de versant, par la force stabilisatrice qu'elles apportent, accroissent pratiquement toujours la stabilité du site.

- **L'effet du déboisement :** Les arbres ont un rôle stabilisateurs qui se résume en : Un ancrage par les racines, une rétention des eaux de pluie, un drainage par évapotranspiration, une protection contre l'érosion. Le site de Mezghitane a été affecté par un déboisement intense afin de dégager les terrains prévus à recevoir les constructions ce qui apportera des conséquences néfaste sur la stabilité du site.

Une pluviométrie exceptionnelle, un séisme (aura modifié l'équilibre antérieur) serait des facteurs de déclenchement d'un glissement de terrain (un glissement de terrain sera inévitables).

- **L'effet d'un séisme et des vibrations.** L'effet d'un séisme peut être d'ordre purement mécanique : apparition d'une surface de cisaillement par dépassement de la résistance du milieu. En plus les vibrations provoquées par les séismes peuvent être à l'origine de la propagation des fractures, de la mobilisation des blocs instables, ou d'une phase d'accélération du versant pouvant conduire à la rupture (Jeannin, 2004)

Dans un milieu saturé –un séisme- comme toute vibrations donne aussi naissance à une pression interstitielle qui peut entraîner la liquéfaction instantanée, partielle ou totale du site.

- **L'effet d'une pluviométrie exceptionnelle.** Généralement, les instabilités de pentes se déclarent ou se réactivent pendant ou immédiatement après des pluies intenses, ou après de longues périodes humides. Les épisodes de très forte pluie engendrent de multiples instabilités superficielles et des glissements de terrain. Ainsi, une pluie brève de très forte intensité entraînera de nombreux glissements superficiels et des coulées alors que des pluies d'intensité modérée mais persistant plusieurs semaines sont susceptibles de provoquer des glissements de grande ampleur.

La zone est totalement déboisée et terrassée, ceci facilite l'érosion du versant, l'infiltration des eaux, la mise à nu les formations argilo-marneuses plastiques.

Il est à craindre l'apparition des mouvements de terrains de grande ampleur à l'avenir dans le versant où les conditions environnementales sont présentes et n'attendent que le facteur déclenchant. (L'analyse de stabilité permet d'en conclure que les conditions environnementales favorables à l'instabilité sont présentes et n'attendent que le facteur déclenchant.

Sur le site de Mezghitane, les facteurs d'instabilité (nature géologique de terrain : argiles, pente, déboisement intense) sont présentes et le risque lié aux mouvements de terrains est donc loin d'être négligeable.

Mais les travaux confortatifs sont indispensables, de tels travaux ne peuvent se réaliser sans définir exactement la surface de rupture et établir avec exactitude causes principales d'instabilité, au moyen de calculs de stabilités.

6.5.3 Calcul de stabilité

Pour un versant apparemment stable, il faut connaître par une étude de stabilité si le talus est instable ou non et de déterminer dans le cas d'instabilité la surface de rupture possible et à quelle profondeur sera produite cette rupture.

La mise en équation du problème de l'équilibre d'une masse de sol peut se faire de deux manières différentes (Benayoun, 2002):

- 1) soit on étudie l'équilibre de l'ensemble de la zone en glissement ; la ligne de rupture est la plupart du temps supposé circulaire. C'est la méthode globale (méthode de TAYLOR, de CAQUOT, de BIAREZ...).
- 2) Soit on décompose le talus en tranches dont on étudie d'abord l'équilibre individuel, avant de globaliser le résultat en faisant intervenir certaines hypothèses simplificatrices, c'est la méthode des tranches.

1) Objectif d'un calcul de stabilité

L'objectif d'un calcul de stabilité est de définir la surface de glissement qui, parmi l'infinité de surface envisageables, aurait le plus de chance d'apparaître. La méthode de calcul consiste, par tâtonnement, à tester le plus grand nombre de surface de rupture possible par calcul de stabilité.

Après un nombre suffisant de surfaces ainsi testées, la surface de rupture la plus probable qui, parmi toutes les surfaces de rupture possibles, fournira le coefficient de sécurité minimal.

2) Méthode de calcul

Méthode globale

Cette méthode suppose en principe un milieu homogène et isotrope défini par δ, ϕ, c et u si le milieu est aquifère, elle consiste à étudier l'équilibre du corps, considéré comme un solide indéformable, sous l'action du système des forces qui lui est appliqué (Filliat, 1981).

Méthode de tranche

Elle consiste à diviser le volume instable en un certain nombre de tranches verticales, chaque tranche, considérée comme un solide indépendant, est en équilibre limite sur la ligne de rupture, sous l'action des forces et des moments qui la sollicitent (Filliat, 1981).

Le choix du nombre de tranches tient compte des données géologiques, géotechniques et géométriques du talus (nature lithologique du terrain, position de la nappe phréatique et des surcharges...) et plus le talus est divisé en petites tranches, plus l'erreur de calcul sera petite.

Cette méthode, imaginée par Petterson (1916), a subi, au fil des ans, de nombreuses adaptations. Elle est développée pour les ruptures circulaires par Fellinus en 1927 puis par Bishop en 1954.

Méthode de Fellinus (ou méthode Suédoise)

Elle consiste à admettre, en même temps qu'une ligne de rupture circulaire, que pour chaque tranche les forces \overline{F}_i et \overline{F}_{i+1} sont égales et opposées. Elle se base sur trois hypothèses :

Hypothèse 1 : la ligne de rupture est circulaire

Hypothèse 2 : les forces inter tranches sont négligées

Hypothèse 3 : La méthode ne tient pas compte de l'eau dans les relations.

Principe de la méthode

Considérant un talus recoupant un certain nombre de couches de sol de caractéristiques différentes (c, φ, δ).

Soit un cercle quelconque de centre O et de rayon R pour lequel on vérifie la sécurité vis-à-vis du risque de glissement.

On définit par rapport au centre O :

-le moment moteur, comme celui du poids des terres W, et des surcharges éventuelles tendant à provoquer le glissement.

-Les moments résistants, comme ceux des réactions s'opposent globalement au glissement.

Le coefficient de sécurité au glissement (F_s) est défini par le quotient :

$$F_s = \frac{\sum \text{Moments moteurs}}{\sum \text{Moments résistants}}$$

▪ **Etude de la tranche**

Les forces agissantes sur cette tranche sont les suivantes :

- Le poids W (se décompose en une force normale (N) et une force tangentielle (T)).
- La force résistante due à la cohésion et à l'angle de frottement interne du sol.
- Les réactions sur les forces verticales BC et AD décomposées en réactions horizontales H_n et H_{n+1} et en réactions verticales V_n et V_{n+1} .

Le moment résistant est la valeur maximale que peut prendre la composante tangentielle de R_n . D'après Coulomb :

$$R = c_i \cdot AB + N \operatorname{tg} \varphi_i$$

Pour n tranche :

$$\sum_1^n [c_i \cdot ab + N \operatorname{tg} \varphi_i]$$

Avec : n : nombre total de tranche.

c_i, φ_i : Caractéristiques mécaniques (cohésion et angle de frottement interne) de la couche dont la quelle est situé AB.

$$F_s =$$

Avec : $N = W \cdot \cos \alpha$.

$$T = W \cdot \sin \alpha.$$

$$L = ab = \frac{b}{\cos \alpha}.$$

La formule devient :

$$F_s = \frac{c \frac{b}{\cos \alpha} + tg \varphi \sum_{n=1}^{n=m} w \cos \alpha}{\sum W \cdot \sin \alpha}$$

Si le sol est homogène : $c=Cte$ et $\varphi=Cte$: la formule devient :

$$F_s = \frac{cL + tg \varphi \sum_{n=1}^{n=m} N_n}{\sum_{n=1}^{n=m} T_n}$$

Les paramètres géométriques intervenant dans le calcul de F_s sont donc :

- b , la largeur de la tranche.
- α , l'angle orienté que fait le rayon du cercle passant par le milieu de la base de la tranche avec la verticale.

▪ Présence de la nappe

Dans les sols meubles, l'eau présente entre les grains solides développe une pression interstitielle u . La loi de Terzaghi introduit la relation entre contraintes totales σ , contraintes effectives σ' (s'exerçant sur le squelette solide) et pression interstitielle u :

$$\sigma = \sigma' + u.$$

Ainsi la loi de Coulomb doit s'écrire :

$$T_f = (\sigma - u)tg \varphi \quad \text{pour les sols pulvérulents.}$$

$$T_f = c + (\sigma - u)tg \varphi \quad \text{pour les sols cohérents.}$$

▪ Détermination de la pression interstitielle (u)

La valeur de « U » est donnée par : $U = \delta_w \cdot Z_w$

Avec Z_w : la hauteur de l'eau.

δ_w : Le poids volumique de l'eau ($\delta_w = 10kN/m^3$).

Donc : $W = \delta_d \cdot v_1 + \delta_{sat} \cdot v_2$ avec :

v_1, v_2 : Les volumes des tranches situées respectivement au dessus et au dessous de la surface de la nappe.

δ_d : Poids volumique du sol sec.

δ_{sat} : Poids volumique du sol saturé.

δ_w : Poids volumique de l'eau.

La résistance maximale au cisaillement le long de AB est donnée par l'expression :

$$c' \cdot AB + (N - u \cdot AB) \operatorname{tg} \varphi'$$

Pour toutes les tranches la formule devient :

$$F_s = \frac{c \frac{b}{\cos \alpha} + \operatorname{tg} \varphi \sum_{n=1}^{n=m} \left(w \cos \alpha - U \cdot \frac{b}{\cos \alpha} \right)}{\sum_{n=1}^{n=m} W \cdot \sin \alpha}$$

▪ Action de courant

La poussée d'Archimède agit vers le haut et est égale au poids du volume d'eau déplacé par les grains. Cette force peut être prise en compte dans le calcul de stabilité en remplaçant, pour la partie immergée du sol, le poids spécifique total δ_{sat} par le poids spécifique immergée $\delta' = \delta_{sat} - 1$.

Sa simplicité explique que, malgré ses insuffisances, la méthode de Fillinus est la plus utilisée.

Méthode de Bishop simplifiée

Par rapport aux hypothèses de Fellenius, Bishop suppose que seule $dT=0$ c'est à dire que les forces inter-tranches sont supposées horizontales, mais il a conservé la rupture circulaire.

$$F_{Bish} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=m} W_i \sin \alpha_i} \sum_{n=1}^{n=m} \frac{(c_i \cdot b + W_i \cdot \text{tg} \varphi_i)}{\cos \alpha_i \left(1 + \text{tg} \alpha_i \cdot \frac{\text{tg} \varphi_i}{F} \right)}$$

- **Présence de la nappe**

$$F_{Bish} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=m} W_i \sin \alpha_i} \sum_{n=1}^{n=m} \frac{c_i \cdot b + (W_i - U \cdot b_i) \cdot \text{tg} \varphi_i}{\cos \alpha_i \left(1 + \text{tg} \alpha_i \cdot \frac{\text{tg} \varphi_i}{F} \right)}$$

Le coefficient de sécurité F_s est calculé par itération successive, on prend comme première valeur de F_s , le coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Fillinus.

La méthode de Bishop est actuellement très utilisée. Elle a donnée lieu à l'établissement de plusieurs programmes de calcul sur ordinateur.

Pour un calcul de stabilité possible, il devrait déterminer préalablement et avec exactitude la géométrie du talus, la géométrie de la nappe phréatique ainsi que les caractéristiques géotechniques et mécaniques des différentes couches constituant le talus.

- **Stabilité à court terme et stabilité à long terme**

Pour le versant de Mezghitane, le sol est argileux donc le drainage influe directement sur la résistance au cisaillement, il convient donc d'effectuer deux modes de calcul de stabilité :

- calcul de stabilité à court terme à partir des caractéristiques (c, ϕ) non drainées issues des essais à la boîte de casa grande.
- Calcul de stabilité à long terme à partir des caractéristiques (c, ϕ) drainées issues de l'essai triaxial.

Ainsi, pour le versant de Mezghitane, nous ne pourrons faire q'un calcul de stabilité à court terme vu que nous ne disposons pas des caractéristiques drainées.

L'essai de cisaillement non consolidé non drainé (UU) réalisé à la boîte a fourni les résultats représentés sur le tableaux.

Paramètres	C_u (bar)	ϕ (°)
Limon argileux	0.24 -1.60	14 -28
Argile	0.55 -0.81	12 -17

Tableau 6. 9: des caractéristiques (c, ϕ) non drainées

6.5.4 Calcul par ordinateur

L'avantage du calcul par logiciel est de pouvoir tester, en quelque minutes, plusieurs centaines de cercles de ruptures potentielles, et de définir pour chacun d'eux la valeur du coefficient de sécurité qui lui correspond.

On va vérifier la stabilité des trois cas suivants :

- stabilité du terrain naturel.
- Stabilité du talus terrassé.

Logiciel de calcul

J'ai utilisée le logiciel GéoSlope version 5 (2001) pour calculer le coefficient de sécurité. SLOPE / W est un logiciel qui utilise la théorie de l'équilibre limite pour calculer le coefficient de sécurité des sols et des talus rocheux. La formulation complète de SLOPE / W permet d'analyser facilement des problèmes simples et complexes de stabilité de la pente en utilisant une variété de méthodes (Fillinus, Bishop, Junbu et Morgenstern-price) pour calculer le coefficient de sécurité. SLOPE / W est dans la demande d'analyse et de conception pour la géotechnique, le génie civil, et les projets de génie minier. Le logiciel permet de faire entrer dans le calcul les données géométriques, géotechniques et hydrogéologiques du versant :

Données topographiques

Profil topographiques, disposition géométriques de n couches de terrains rencontrées dans le site, une fois introduites, ces données constituent le canevas de base du calcul.

Données géotechniques

Les données géotechniques δ, ϕ et c se présentent, pour n couches. Les données nécessaires pour calculer la stabilité (δ, ϕ et c) sont obtenues suite à la réalisation d'essais de mécanique des sols au laboratoire. Mais un sol n'est jamais homogène et quel que soit le nombre des reconnaissances et des essais effectués, il subsistera toujours des incertitudes qui échappent au calcul et dont il faut savoir tenir compte (000).

Données hydrauliques

Le toit de la nappe. En ce qui concerne la position de la nappe dans le versant, nous avons repris les informations données par LNHC, en fixant le niveau piézométrique entre 2 et 3m de profondeur.

Quatre profils parallèles de calcul ont été retenus : la position des profils est présentée dans la figure.

- **Stabilité du terrain naturel**

Parmi les 4 profils étudiés 2 présentent des coefficients de sécurité minimale inférieurs à 1 donc le talus est instable. Les 2 autres présentent des coefficients de sécurité minimale supérieurs à 1.5 donc le talus est stable.

	Méthode ordinaire	Méthode de Bishop	Méthode de Janbu	Méthode Morgenstern-price
Talus 1 sans facteurs sismique	1.04	1.20	1.10	1.23
Talus avec seisme	0.96	1.01	0.97	1.01

Tableau 6.10 : Coefficient de sécurité minimale pour le talus 1.

	lithologie	δ_d ($u m^3$)	C (K Pa)	ϕ ($^\circ$)
Couche n°1	Argile sableuse	15.5	59	12
Couche n°2	Argile schisteuse	20.5	29	33
Couche n°3	Grès	20	109	40

Tableau 6.11 : Caracteristiques mécaniques du Talus I

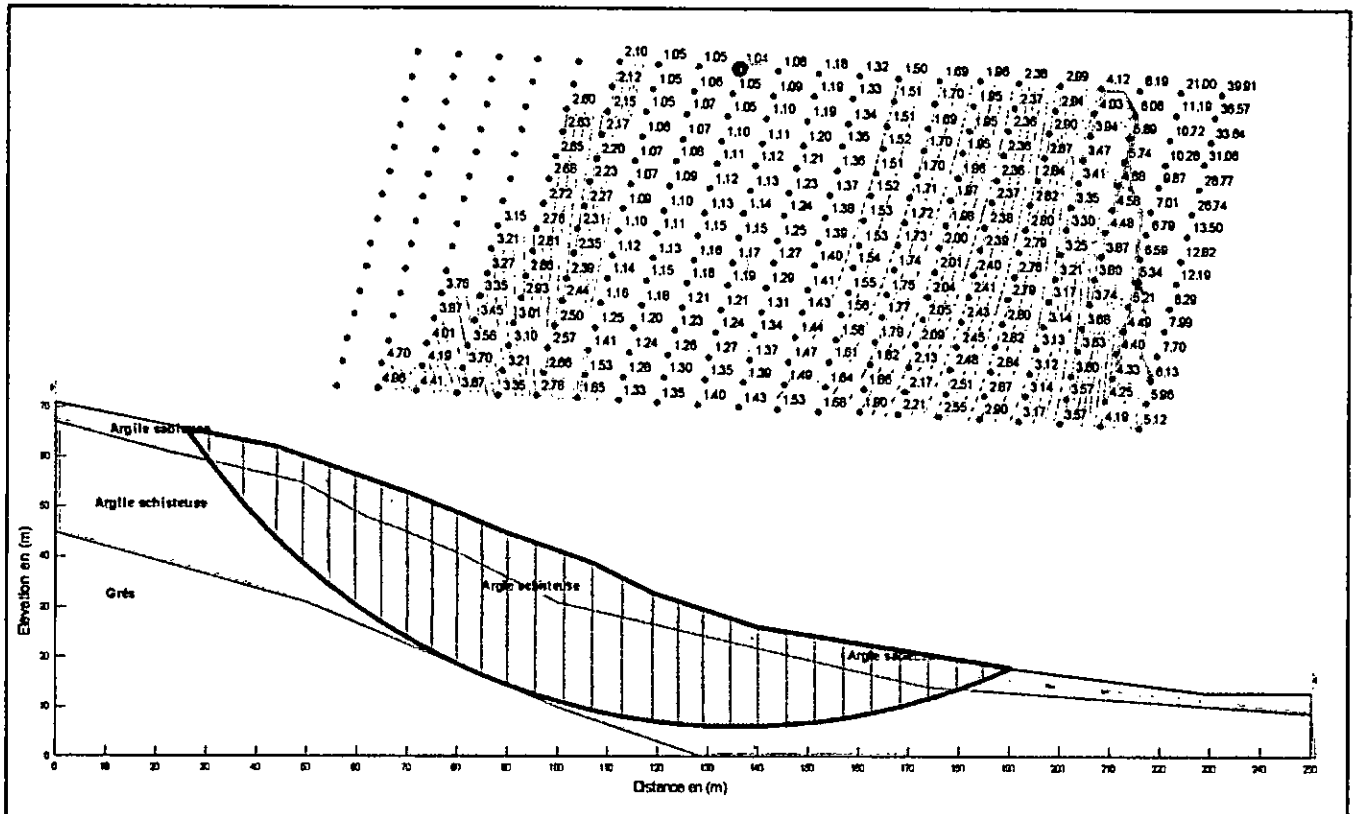


Fig. 6.3 : profil de stabilité n I.

	Méthode ordinaire	Méthode de Bishop	Méthode de Janbu	Méthode de Morgenstern-price
Talus 2 sans facteurs sismique	1.46	1.63	1.49	1.61
Talus avec séisme	1.20	1.32	1.18	1.40

Tableau 6.12 : Coefficient de sécurité minimale pour le talusII.

	lithologie	δ_d ($u m^3$)	C (K Pa)	ϕ ($^{\circ}$)
Couche n°1	Limon argileux	19.8	50	14
Couche n°2	Sable	20.8	109	28
Couche n°3	Argile sableuse	16.8	59	17
Couche n°4	sable	20.8	109	28
Couche n°5	Argile sableuse	16.8	59	17

Tableau 6.13 : Caractéristiques mécaniques du talus II

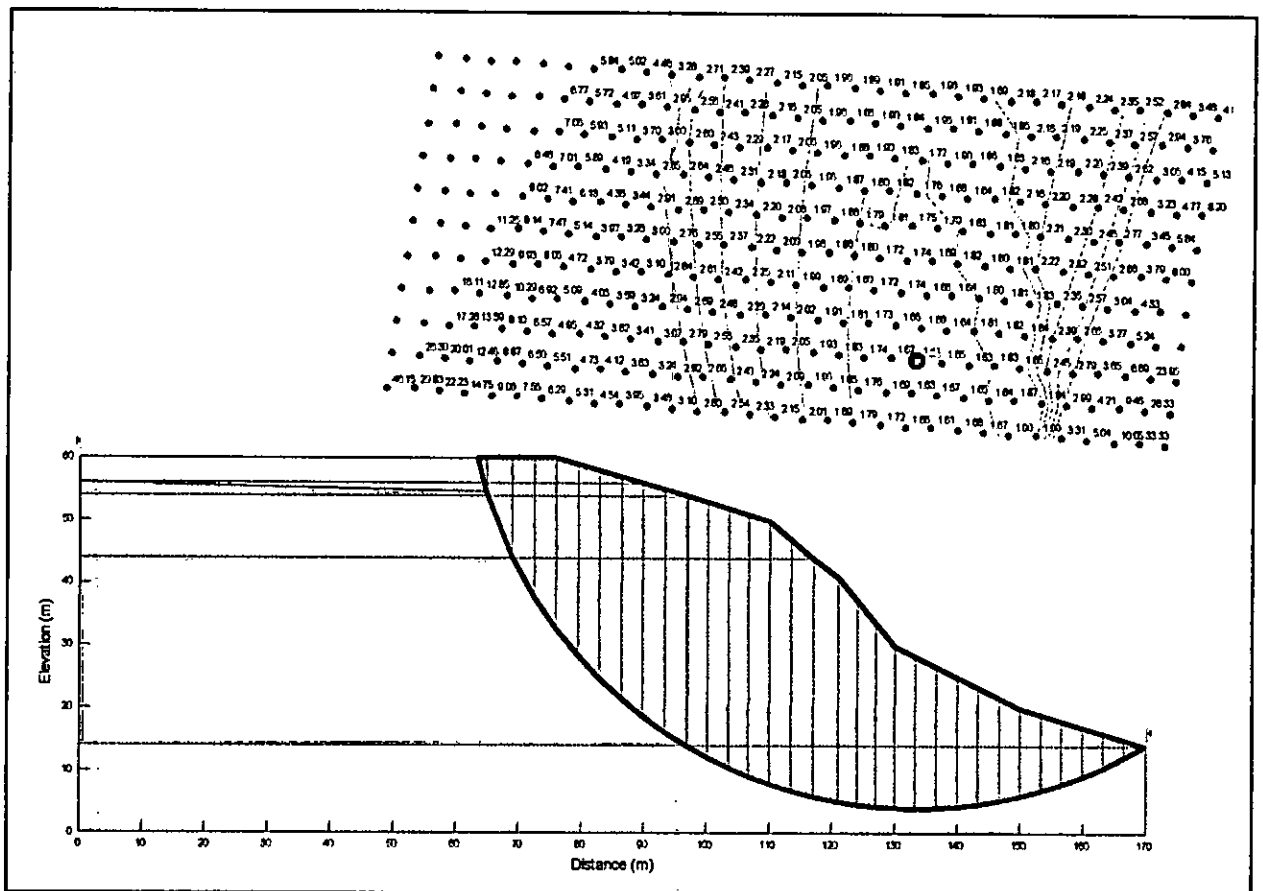


Fig. 6. 4 : Talus n° II.

	Méthode ordinaire	Méthode de Bishop	Méthode de Janbu	Méthode Morgenstern-price
Talus 3 sans facteurs sismique	>1.5	>1.5	>1.5	>1.5
Talus avec séisme exceptionnel	>1.5	>1.5	>1.5	>1.5

Tableau 6. 14 : Coefficient de sécurité minimale pour le talus III.

	lithologie	δ_a ($u m^3$)	c (K Pa)	ϕ ($^\circ$)
Couche n°1	Limon argileux	18.3	109	28
Couche n°2	Argile sableuse	20.2	240	42
Couche n°3	Grés argileux	20.8	109	22

Tableau 6.15 : Caractéristiques mécaniques du Talus III

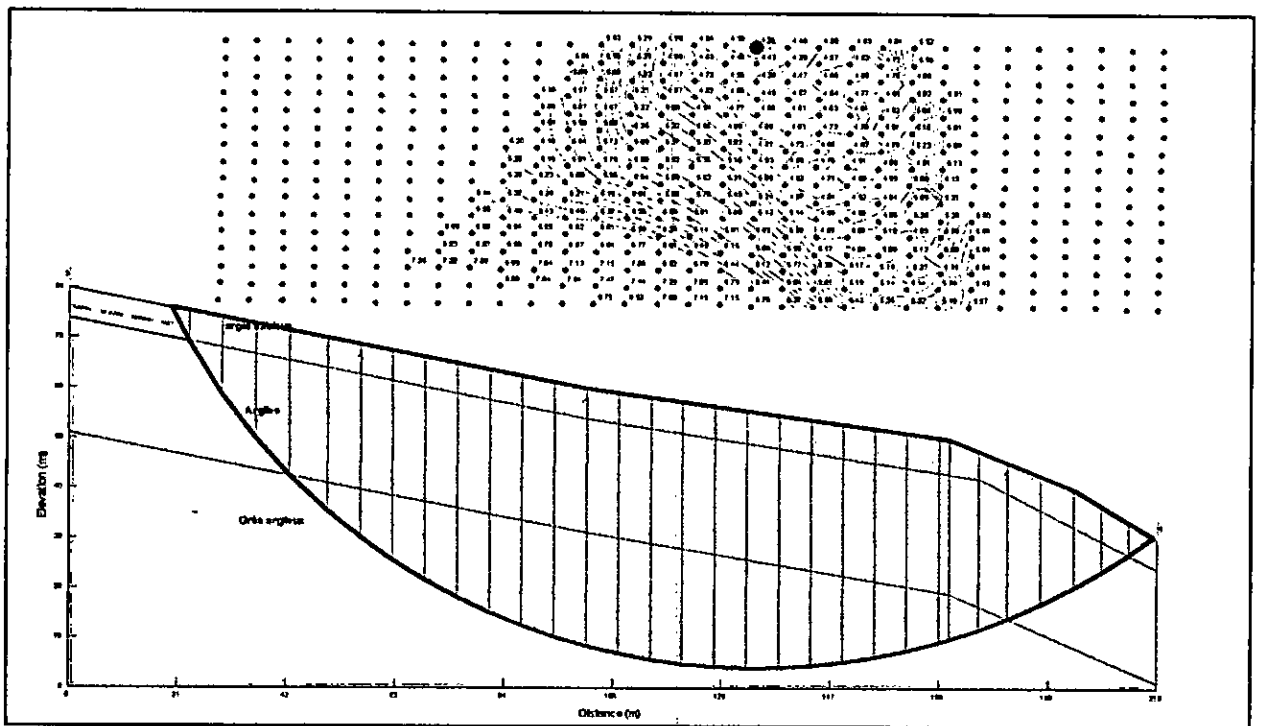


Fig 6. 5 : Talus n°III.

	Méthode ordinaire	Méthode de Bishop	Méthode de Janbu	Méthode de Morgenstern- price
Talus 2 sans facteurs sismique	1.50	1.70	1.50	1.70
Talus avec séisme	1.10	1.25	1.09	1.25

Tableau 6. 16 : Coefficient de sécurité minimale pour le talusIV.

	lithologie	δ_a (μm^3)	c (K Pa)	ϕ ($^\circ$)
Couche n°1	Limon argileux	17.6	22	25
Couche n°2	Sable et argile	19.6	100	16

Tableau 6.17 : Caractéristiques mécaniques du Talus IV.

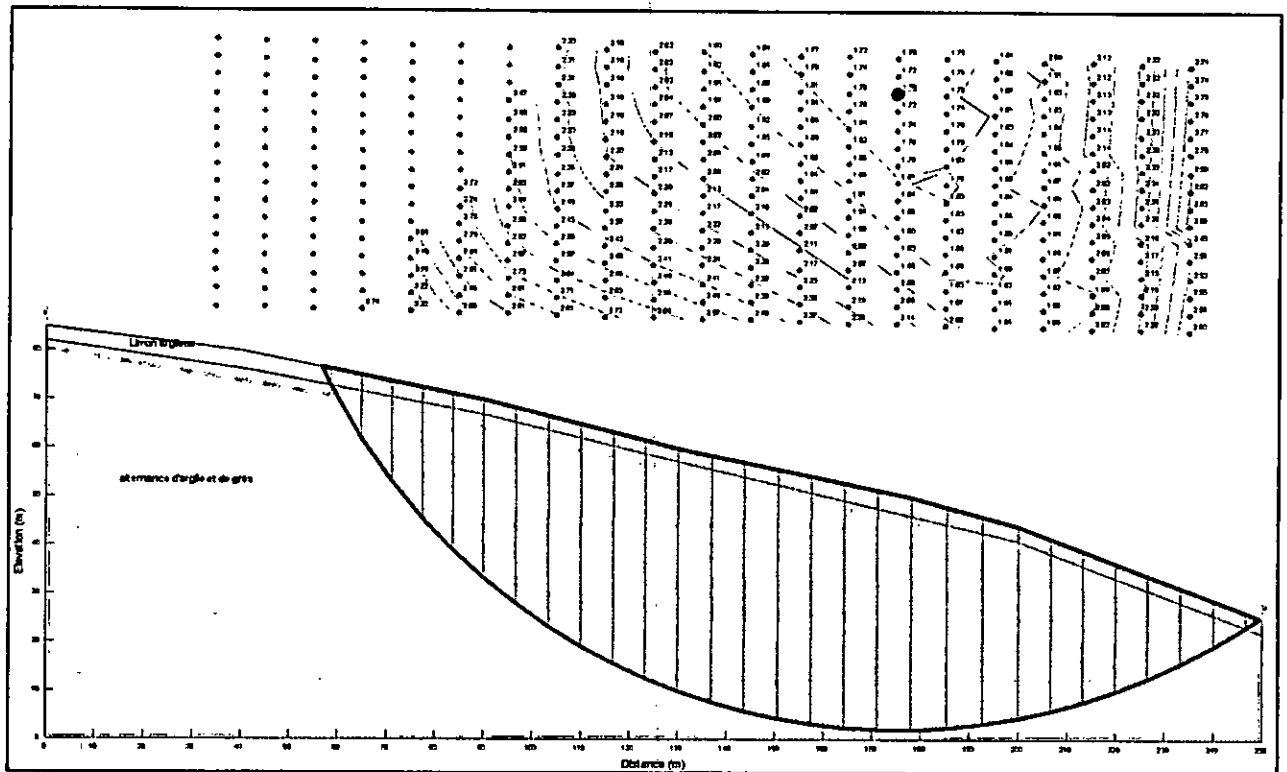


Fig. 6. 6. Talus n° IV.

▪ **Stabilité du talus terrassé**

Il y a diminution du coefficient de sécurité minimale pour les talus douteux de 42% comme pour les talus stables.

Les cercles de sécurité sont des cercles superficiels, ils correspondent à des glissements de chantier de 2 à 3m de profondeur. Ces désordres sont déjà observés durant le mois de mars 2007 comme illustre la figure 6.7.



Fig.6 .7 : Photo illustrant les désordres observés au cours de la phase de terrassement.

La stabilité initiale du site est approximative, donc des travaux confortatifs doit être envisagée et étudiés dans le cadre même du projet, faute de quoi des accidents graves et onéreux seront susceptibles de se produire pendant ou après les travaux à la suite d'une secousse sismique ou d'une pluviométrie exceptionnelle.

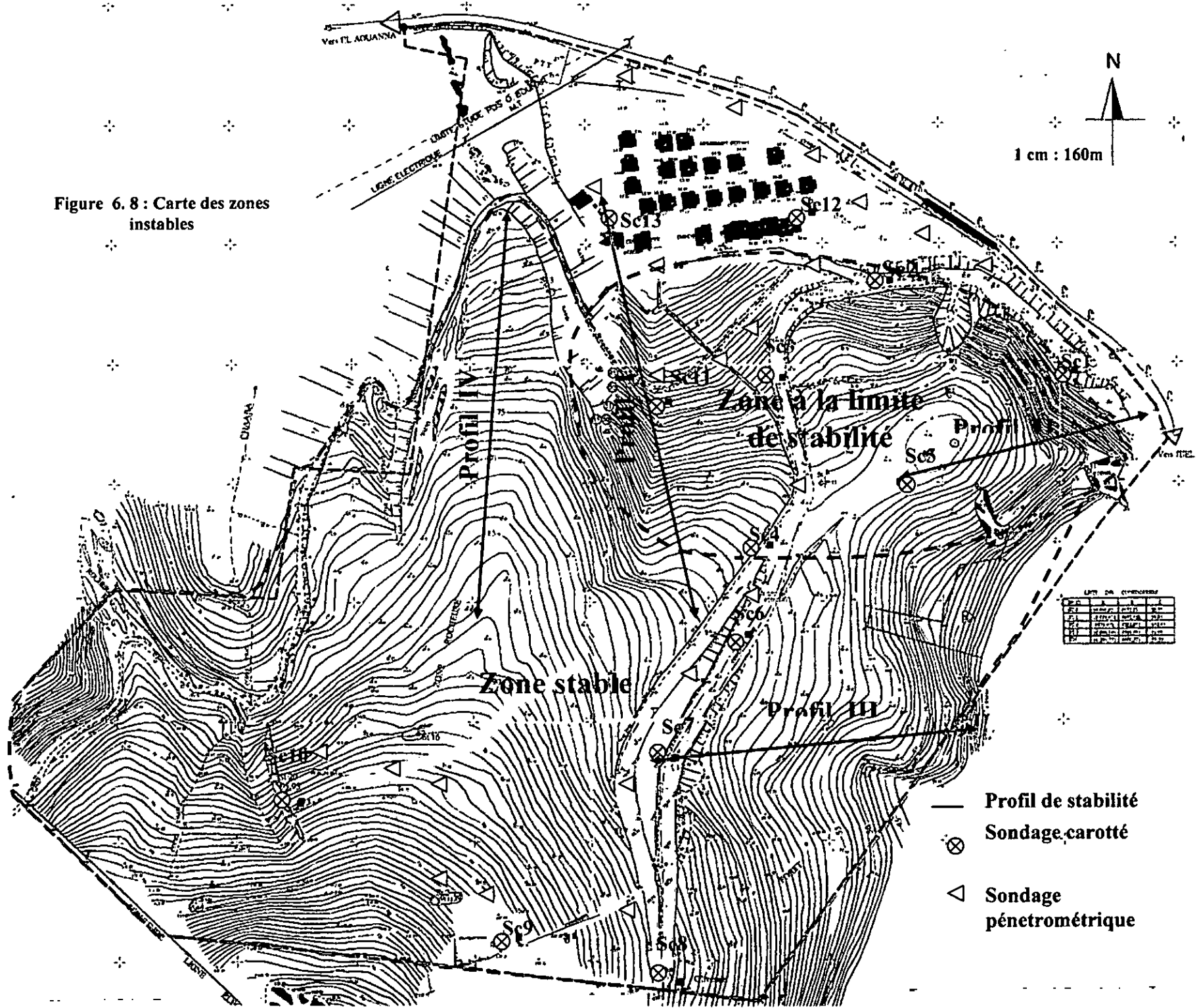
6.5.5 Cartographie géotechnique par zonage

Un zoning géotechnique a été effectué, il a été basé sur l'étude de stabilité, la lithologie, la morphologie et les caractéristiques géotechniques du sol, ce zoning nous a permet de distinguer deux zones bien distinctes :

Zone I : zone stable, le coefficient de sécurité minimale dépasse largement 1.5 que se soit pour un talus naturel (avec une profondeur de 12m concernant la tranche des terrains superficielle), terrassé ou chargé. La lithologie dominante est celle du grés à droit de quartz et en deuxième position des alternances d'argile et de grés à bancs centimétriques, la fracturation est minimale et la topographie est assez régulière.

Zone II : zone douteuse, le coefficient de sécurité minimale est entre 1 et 1.5. Elle se trouve entre deux failles, la première de direction N150 E , la deuxième est détectée par la géophysique, cette zone est dominé par des argiles sableuses qui deviennent de plus en plus schisteuses avec la profondeur et des alternances des grés et d'argiles. La pente est importante.

Figure 6.8 : Carte des zones instables



Chapitre 7



Interprétation et synthèse

7.1 Introduction

La prospection géophysique fournit des informations très importantes (les paramètres pétrophysiques des roches) telles que les épaisseurs des différentes formations ou des résistivités électriques. La prospection géotechnique ouvre des résultats très précises sur la nature lithologique des roches par l'observation des carottes et les différentes caractéristiques physiques et mécaniques par différents essais de laboratoire (poids volumique, teneur en eau, cohésion, angle de frottement interne.) mais locaux et ponctuels. Cependant chaque méthode employée (géophysique ou géotechnique) dans l'étude de cette zone nous fournit des éléments d'information intéressants, et leur corrélation nous a aidé à interpréter les résultats.

7.2 Confrontations des résultats de prospections géophysique à ceux de la géotechnique

Les résultats géophysiques ont été étalonnés avec des observations géologiques de surface et avec des données de forage.

La configuration du dispositif utilisé pour la prospection électrique correspond à une profondeur d'investigation voisine de 30m, la profondeur d'observation des sondages carottés est entre 12 et 20m. Nous rappelons que 11 profils géophysiques ont été effectués proche du nombre des sondages carottés (13 sondages).

Les sondages électriques Sdg 1, Sdg2, Sdg3, Sdg4 et Sdg5

Ces sondages assez semblables montrent la succession suivante :

- en surface des terrains conducteurs (de 9 à 22 $\Omega \cdot m$) de 0.20m à 4m.
- une série de couches résistantes dont l'épaisseur varie de 6 à 13m (13m est la profondeur d'investigation maximale pour ces 5 profils). Les résistivités électriques apparente pour ces 5 profil diminue avec la profondeur, elles sont supérieures à 130 $\Omega \cdot m$ (état hydrique sec) et inférieures à 100 $\Omega \cdot m$ au-delà de cette profondeur. Ce changement semble provoqué par un changement de la teneur en eau des terrains. Les résistivités électriques des terrains résistants se trouvent dans la marge des grés argileux (selon le tableau d'Astier, 1982),

Malgré qu'aucun sondage carotté n'a été réalisé dans cette partie du POS, l'homogénéité des terrains et la présence des excavations et des terrassements ont facilité l'interprétation des résultats.

Le sondage électrique Sdg 6 montre de haut en bas :

- un premier terrain résistant ($66 \Omega \cdot m$) de 4.5m.
- un second terrain conducteur ($27 \Omega \cdot m$) d'une épaisseur de 10m pouvant être une argile.
- à partir de 14m de profondeur le terrain est gréseux. Aucun sondage n'a été réalisé dans cette partie du POS, mais la présence des excavations a facilité l'interprétation de ce profil.

Le sondage électrique Sdg7

Il montre une alternance de terrains conducteurs avec des terrains résistants. L'épaisseur de terrains conducteurs (argiles) dépasse largement l'épaisseur des couches résistantes gréseuses (2 conducteurs avec 1.5m et 20 m d'épaisseur contre 3 couches résistantes avec 0.20m, 0.50m et 6m).

Le sondage électrique Sdg 8

Il montre de haut en bas : une mince couche conductrice (0.1m) surmontant une succession de couches résistantes (20m d'épaisseur) (en comparant la résistivité électrique de ces terrains avec le tableau d'Astier, 1982, la couche conductrice se trouve dans la marge d'argile alors que les terrains résistants se trouvent dans la marge de schiste argileux) et dont l'existence est prouvée par le sondage Sc4. Ce sondage carotté confirme l'existence d'une couche d'argile sableuse de 3m superposant une couche de schiste argileux à partir de 3m et jusqu'à la fin du sondage à 12m de profondeur.

Le sondage électrique Sdg 9

Ce sondage montre une alternance de terrains conducteurs (6 à $19 \Omega \cdot m$) et des terrains résistants (49.82 et $198 \Omega \cdot m$), c'est une alternance de couche de grès et d'argile. Le sondage carotté le plus proche Sc5 montre 4m de limon argileux suivi d'une couche d'argile sableuse.

Le sondage électrique Sdg10 montre

- un premier terrain résistant de 0.80m (grés).
- un deuxième terrain conducteur d'une épaisseur de 4.30 m d'argile sableuse d'après le sondage carotté Sc13.
- un troisième terrain très résistant (290 Ω .m) par rapport au deuxième de 20m d'épaisseur qui doit être d'une argile schisteuse (hypothèse la plus probable si on se réfère aux sondages carotté SC13.
- un quatrième terrain résistant (à 90 Ω m) d'une épaisseur de 12m (grés).
- un dernier conducteur (30 Ω m) pouvant être du grés imbibé d'eau salée car il existe à 12m sous le niveau de la mer.

Le sondage électrique Sdg 11

Ce sondage montre une alternance de terrains conducteurs (6 à 19 Ω .m) et des terrains résistants (49.82 et 198 Ω .m), c'est une alternance de couche de grés et d'argile. Le sondage carotté le plus proche Sc5 montre 4m de limon argileux suivi d'une couche d'argile sableuse.

7.3 Interprétation des coupes géoélectriques

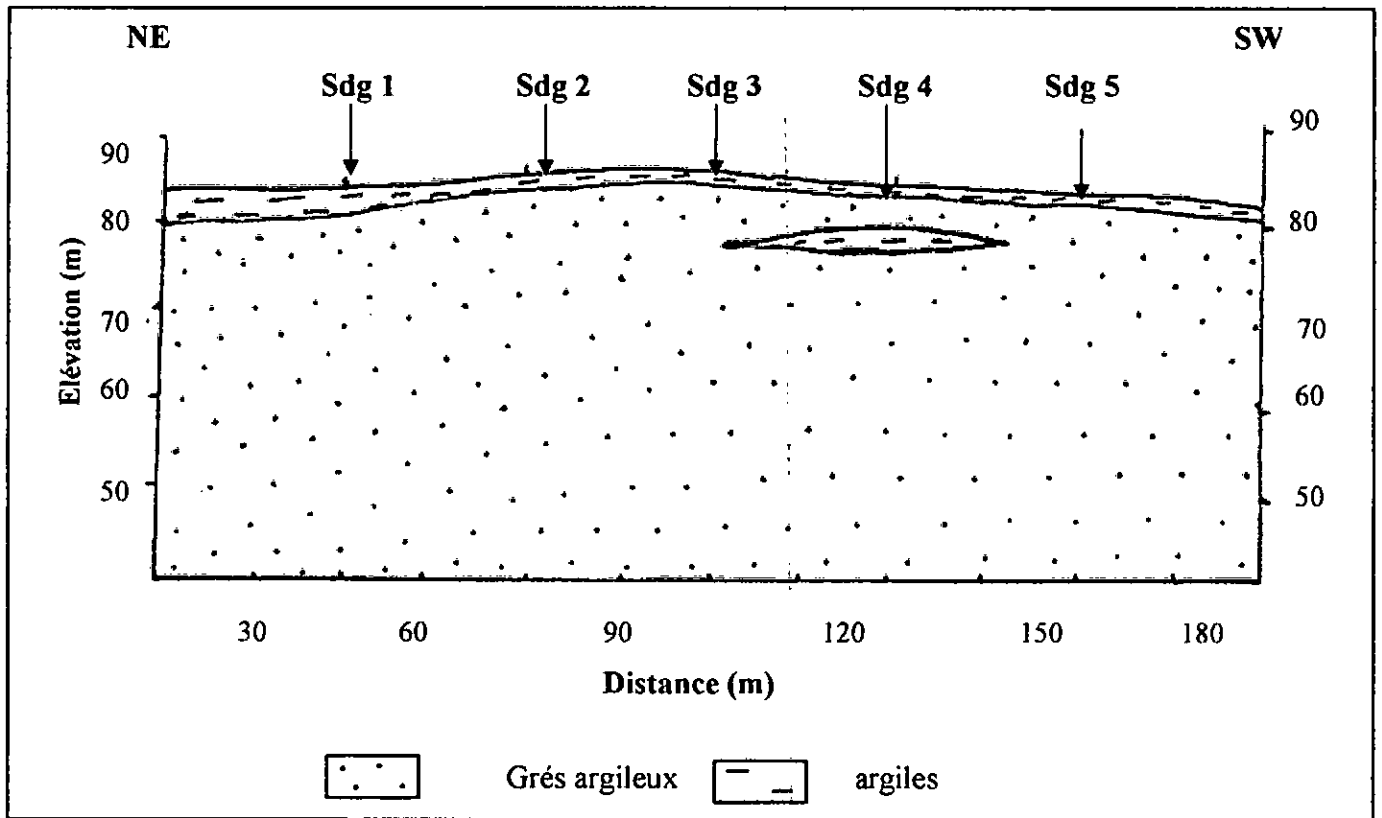
L'interprétation des résultats électriques à l'aide du tableau des résistivités électriques apparentes (chap.4 ; tab.4.2) et la comparaison avec les sondages carottés les plus proches nous permet de réaliser les coupes géologiques suivantes :

La coupe 1

Cette coupe a été produite suite à une interpolation entre les sondages électriques Sdg1, Sdg 2, Sdg 3, Sdg 4 et Sdg 5, elle montre la succession suivante :

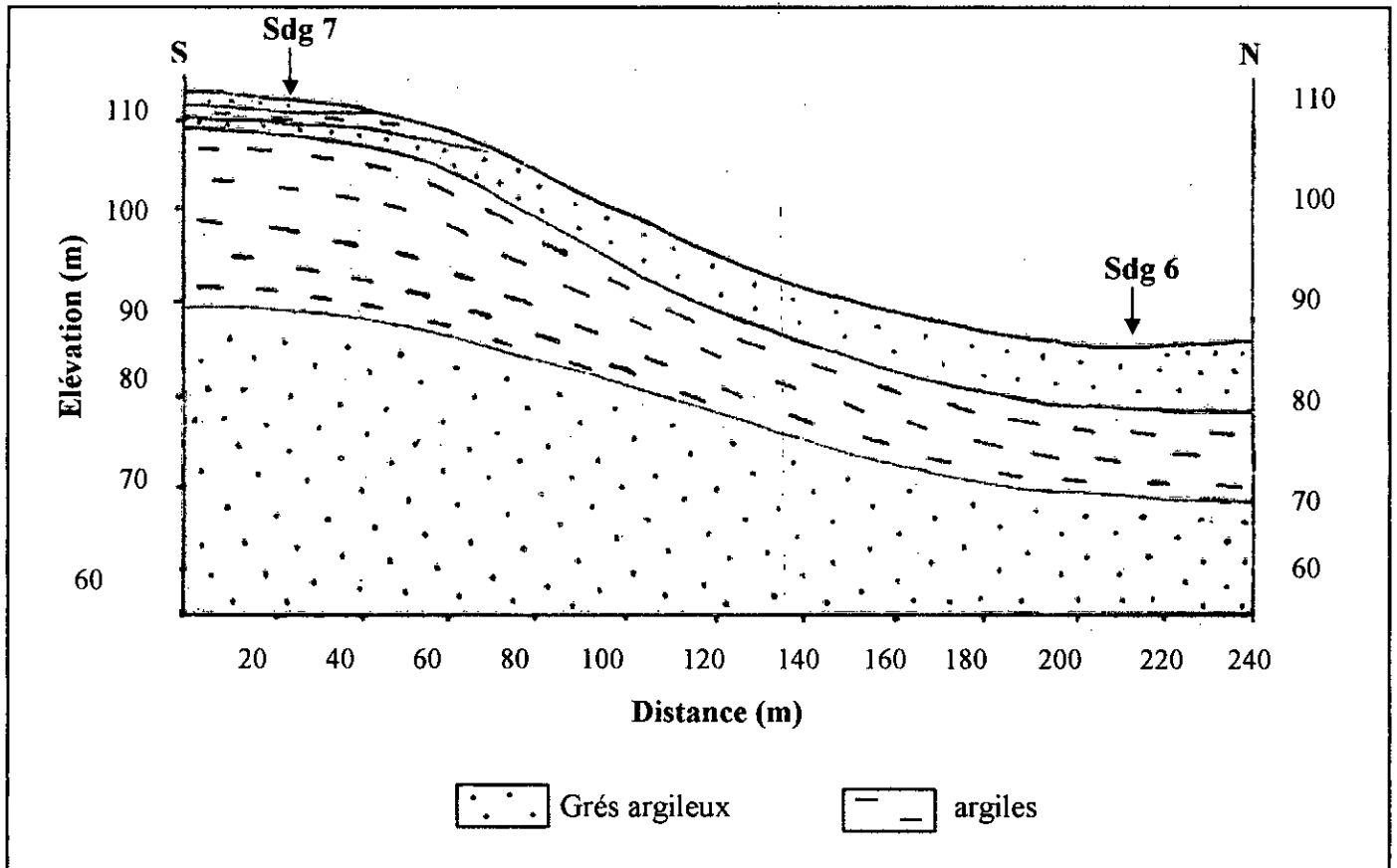
- une première couche d'argiles quaternaires.
- sous cette couche quaternaire ; une succession de trois couches gréseuses. Ces couches de grés contient une lentille argileuse de 20 m d'épaisseur.

Pour une première lecture de ce profil, il faut savoir que la résistivité est d'autant plus élevée que la roche est saine (grés sains en profondeur et altéré près de la surface) ou que le terrain est sec (grés sec en surface et mouillé en profondeur).



La coupe 2

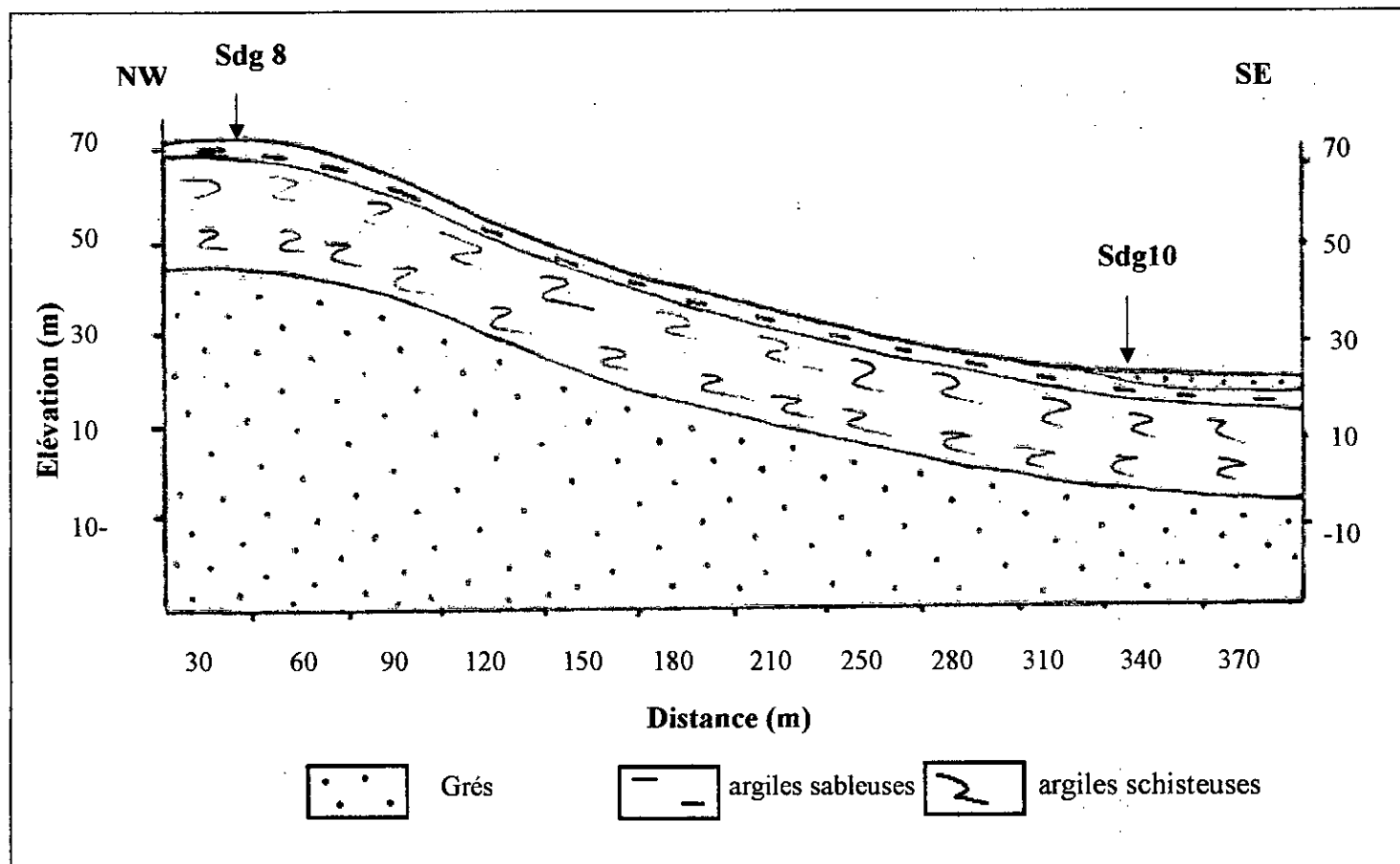
Une corrélation entre les sondages électriques verticales Sdg 6 et Sdg 7 nous a permis de réaliser la coupe 2 orientée NW-SE.



Cette coupe montre une alternance de couches gréseuses et argileuses, vers le sud, on trouve une couche de terre végétale (0.22m) sur une couche de grés de 1.5m. Une couche de grés dont l'épaisseur varie entre 0.5m vers le sud et 4.5m plus au nord. Sous cet horizon demeure une couche d'argile (entre 10m vers le nord et 20m au sud). A partir de cette profondeur le terrain est constitué de grés.

La coupe 3

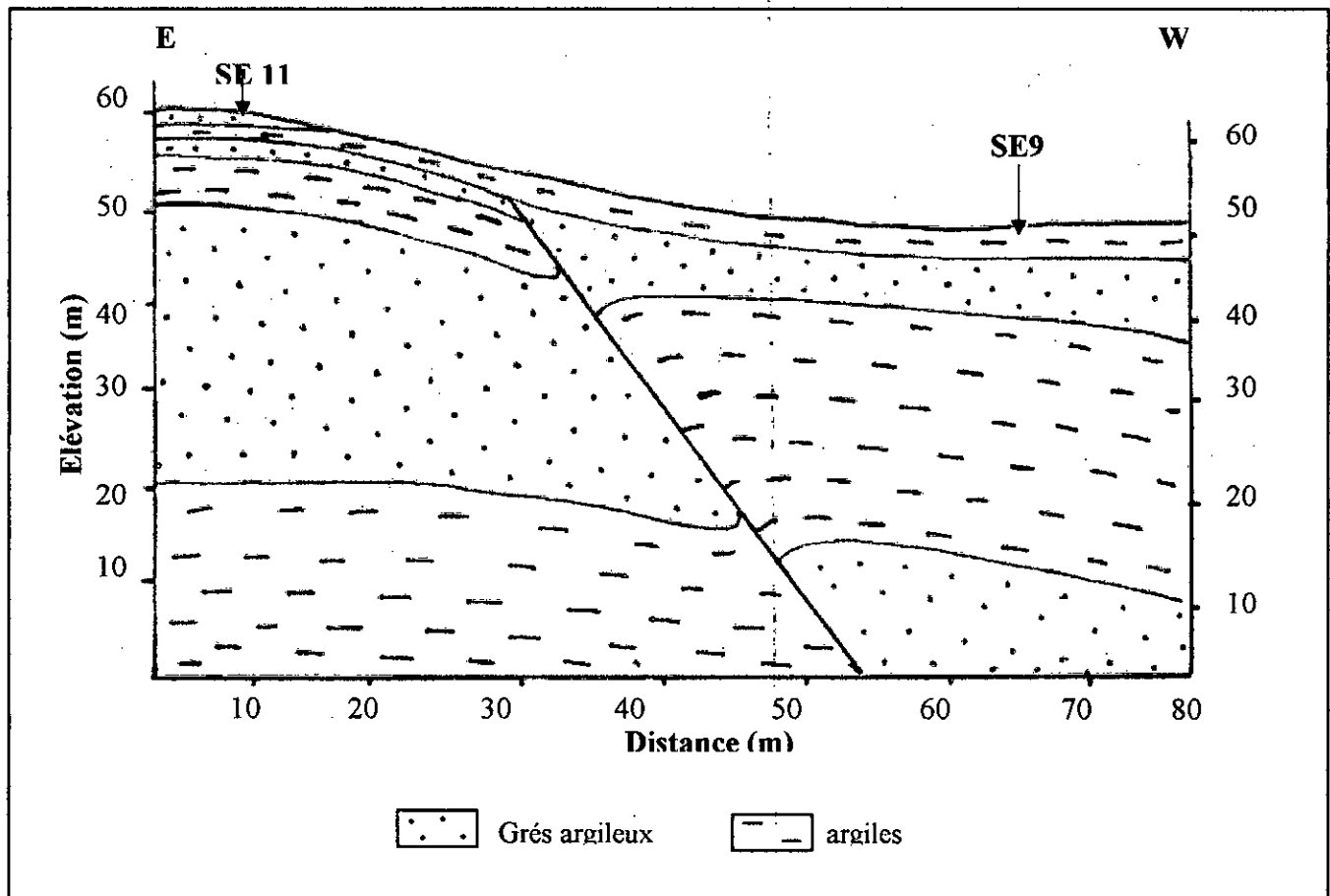
Cette coupe orientée NW-SE est le résultat de la corrélation entre les sondages électriques Sdg 8 et Sdg 10.



La coupe 3 montre une dalle gréseuse de 0.80m d'épaisseur vers le NW. Le terrain est composé d'une couche d'argile dont l'épaisseur varie entre 0.15m et 4.90m, ces argiles deviennent schisteuses et constituent une épaisse couche (d'argile schisteuse) de 20 à 23m. A partir de cette profondeur le terrain est constitué de grés.

La coupe 4

Cette coupe réalisée suite à une interpolation entre les sondages électriques Sdg 9 et Sdg 11 est orientée E-W.



La coupe 4 montre une alternance des horizons gréseux et argileux dont l'épaisseur augmente avec la profondeur. On note la présence d'une faille qui n'apparaît pas en surface car le terrain est recouvert par un horizon de sol limoneux.

7.4 Conclusion

L'étude géophysique réalisée sur les 11 sites, montre et confirme la nature d'un terrain légèrement fracture à la surface par endroit avec la présence de zones légèrement conductrice, les terrains superficiels sont recouverts en général par de terrains résistant dont l'épaisseur varie par endroit.

Le résultat de cette étude montre qu'en aval des sites 1, 2, 3, 4, 5,6, les terrains sont moins épais et résistant que les sites en amont.

D'autre part, les sondages électriques permettent (malgré que la topographie qui ne nous laisse pas employer des longueurs de lignes suffisantes) de différencier ces trois roches :

- des formations superficielles représentés par des argiles et des limons : Ces terrains de recouvrement s'épaississent peu à peu de 0.20m à 4m.
- des argiles sableuses : dont l'épaisseur est varié entre 10 et 20m.
- des argiles schisteuses : dont les mesures de résistivités de ces roches tirées de différentes campagnes de prospection électrique montrent que les argiles schisteuses sont beaucoup plus résistants que les argiles sableuses.
- des grés : ces formations sont les plus dominantes et leurs épaisseur dépassent 5m.

7.5 Conclusion générale

Cette étude met en évidence l'intérêt de la géophysique pour les études géologiques et géotechniques. Elle ouvre de nouvelle perspective au géotechnicien : en premier lieu, la possibilité de cartographier des caractéristiques des sols comme la profondeur et l'épaisseur de niveaux argileux ou plus généralement l'épaisseur des formations meubles pouvant prochainement être à l'origine des tassement et des mouvements de terrain (donc sol à éviter de construire), en deuxième lieu la possibilité de cartographier le substratum (ou le bon sol) qui servira comme sol porteur des fondations pour les constructions.

Il existe une bonne adéquation entre les données géotechniques ponctuelles et les données géophysiques bidimensionnelles :

L'étude géologique et géotechnique du POS de Mezghitane (principalement les sondages carottés) met en évidence quatre principaux types de roches : des argiles sableuses, des argiles schisteuses, des grés et des calcaires gréseux en blocs.

Les résultats de la prospection géophysique, réalisé dans ce milieu sédimentaire portant fracturé et complexe, sont en adéquation avec les principales formations observées (sur les affleurements ou en sondages) à l'exception des blocs de calcaires gréseux, qui n'ont pas été détectés par les sondages électriques.

Les deux approches géophysique et géotechnique sont donc complémentaires pour caractériser les roches et les formations à grande échelle.

La géophysique appliquée dans ce mémoire faisant appel aux techniques par panneau électrique est une méthode de prospection rapide non destructive. C'est une méthode de prospection détaillée permettant de minimiser le nombre de sondage carotté dans le cas d'un sol homogène sur une grande distance et aide à répartir et à choisir les points représentatifs de ces sondages si le terrain est hétérogène. **Cependant les investigations géophysiques doivent être réalisées en amont de l'étude géotechnique afin de mieux orienter l'implantation des sondages géotechniques.**

La Géophysique à notre avis était davantage connue et plus employée dans l'étude du POS de Mezghitane, associée à des sondages géotechniques judicieusement positionnés, elle nous a permis de lever bien des inconnues sur la nature, les propriétés, et les épaisseurs des différentes formations du sous-sol pour un investissement ne représentant que quelques pourcents du prix des travaux et qui évite souvent des dépassements de coût, pouvant atteindre plus de 100%. C'est donc un investissement très rentable.

Les résultats géophysiques sur ce terrain révèlent d'une part une complexité structurale (géologie complexe, présence de fractures et failles) et d'autre part un compartimentage de terrain distinct confirmant l'hétérogénéité géologique (zone de broyage etc.).

➤ Quelle est la géométrie du socle ?

Elle semble complexe. C'est probablement les profils électriques 2D qui nous renseigneront le mieux. Il devrait être possible de dresser une vue d'ensemble des ondulations du socle.

➤ Où se situent les nappes phréatiques superficielles ?

Sur ce point, les résistivités mesurées ou calculées ne révèlent aucune anomalie. Mais on peut déjà dire que la gamme de résistivité est large. Ce sont surtout des investigations (sondages carottés) qui nous renseigneront le mieux puisque j'ai constaté la présence quasi-affleurante des poches d'eau.

- Quels sont les terrains meubles d'épaisseurs importantes ?

Elles ressortent à priori très bien sur les sondages électriques. Leurs épaisseurs allaient jusqu'à 30m. Leur nature a été identifiée par sondages carottés. Il s'agit d'argile sableuse et des argiles schisteuses.

- Y a-t-il des accidents (failles, filons) pouvant guider les écoulements souterrains? Ces accidents ne se distingueraient pas aisément par des méthodes de résistivité seules.

- Quelle est la nature des formations superficielles ?

Les profils géophysiques permettent une reconnaissance grossière des affleurements des terrains quaternaires. Il sera possible de faire une carte de ces affleurements. Pour les autres états de surface, les sols semblent bien être assez sableux, parfois argileux.

7.6 Recommandation

L'étude des caractéristiques physiques et mécaniques des sols contenus dans le rapport géotechnique du laboratoire national de l'habitat et de la construction et des différents laboratoires (FONDASOIL, AL ARDH et LCEE), le calcul de la contrainte admissible du sol à partir des essais in situ et des essais de laboratoire et l'étude de stabilité nous a permis de tirer les points suivants :

La portance du sol est généralement bonne, elle dépasse souvent 2 bars pour des ancrages des fondations entre 1.5m et 2m à l'exception de la zone II qui se trouve en aval du site où la portance du sol est inférieure à 2 bars et elle n'atteint que 0.9 bars dans deux sondages pour un ancrage de 1.80m. Les fondations les plus adaptées sont des fondations superficielles de type carrés ou filantes avec des largeurs de la semelle entre 1.20 et 1.50m.

Le caractère gonflant des argiles en particulier a obligé d'assurer une imperméabilisation des terrains sous les ouvrages par la collecte des eaux de surfaces et de bien choisir les types des plantes (car les arbres peuvent accentuer le phénomène de

gonflement). Les sols argileux se gonflent en période de pluie et se rétractent en période de sécheresse.

En tenant compte de la chute du coefficient de sécurité minimal après terrassement, il est recommandé de réaliser une étude sérieuse de terrassement et d'éviter les terrassements aléatoires, de couler le béton immédiatement après l'ouverture des fouilles, de ne pas laisser les fouilles et les radiers ouverts et exposés aux eaux de pluie et de ruissellement (surtout que des projets importants vont se réaliser simultanément) pour ne pas avoir au cours des travaux des instabilités et des désordres difficiles à résoudre.

Pour les profils I et II le talus est à la limite de la stabilité car le coefficient de sécurité est entre 1.25 et 1.50 donc des travaux de confortement doivent être réalisés afin d'améliorer la stabilité du terrain en place.

Sachant que l'eau joue un rôle principale dans la stabilité car d'une part le site reçoit chaque année un taux de précipitation qui dépasse 998mm, la forte perméabilité des roches gréseuses qui couvrent la major partie du site et la dénudation du terrain après les travaux de terrassement de la construction et d'autre part le coefficient de sécurité a amélioré de 1.42 à lorsqu'on a baissé le niveau de la nappe de 2m. Il est recommandé de réaliser des travaux de drainage.

Après terrassement il y a diminution du coefficient de sécurité minimale. Des talus d'une hauteur supérieur à 2 m sont dangereux, donc pour éviter des glissements de chantier il faut réaliser un des travaux suivants :

- Soit adoucir la pente par un reprofilage (des talus de 90° sont déconseiller).
- Soit réaliser des murs de soutènement émidatement après terrassement.

BIBLIOGRAPHIE

Alexis Mojica Abrego, M. 2007. *Application des méthodes géophysiques à la détection des sites précolombiens dans la région centrale de Panama et paramétrisation géoarchéologique dans le site hispanique de Panama Viejo*. Thèse de doctorat de l'université de Paris 6.

Ardisson M ,H et al. 1997. *Prospection électrique pour l'étude de glissement de terrain dans la région volcanique du Pichincha (Equateur)*. Colloque GEOFCAN Géophysique des sols et des formations superficielles. 11-12 septembre 1997, Bondy, France BRGM, INRA, ORSTOM, UPMC. P 87-90.

Annan, A.P. 2001. *Ground Penetrating Radar. Workshop Notes*, Sensors & Software Inc.,Canada.192 p.

Anterrieu, O. 2006. *Caractérisation géophysique de la structure interne d'une halde à stériles*. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées. Université de Montréal.

Balideau, C ., Genois, A. 2005. *Cartographie des zones exposées aux glissements de terrain dans les dépôts meubles. Guide d'utilisation des cartes des zones de contraintes et d'applications du cadre normatif*. Dépôts légaux. Bibliothèque nationale du Québec.

Bano, M. 2000. *Imagerie de la proche surface par géoradar*. Mémoire d'habilitation à diriger des Recherches, Université Louis Pasteur, Strasbourg I. 71 p.

Bano, M. et Girard, J.F. 2001. *Radar reflections and water content estimation of aeolian sand dune*. Geophys. Res. Lett., 28, 3207-3210.

Bazie, P ., Koussbé, Y., Nakolendoussé, S., Savadogo, A, N.2003. *Typologie des courbes de sondages électriques verticaux pour la reconnaissance des formations superficielles et leur incidence en hydrogéologie de socle cristallin du Burkina Faso*. Sud science & technologie.

Benayoun, F. 2002. *Stabilité d'une pente – cas réel*. Université de constantine. Mémoire de magister, centre universitaire de Tébessa.

Boullin et al. 1970. *Définition d'un flysch massylien et d'un flysch maurétanien au sein des flysch allochtones de l'Algérie*. C.R.Acad.sC.Paris, t.270, p.2249-2252.

Boullin, J, P et Raoult J, F. 1971. *Présence sur le socle kabyle du Constantinois d'un olistostrome lié au charriage des flyschs ; le Numidien peut-il être un né-autochtone*. Bull.Soc.géol.de France (7), XIII, n° 3-4, p.338-362.

Boullin et al. 1973. *les olistostromes d'âge miocène inférieure liés aux flyschs allochtones kabyles de l'orogène alpin d'Algérie*. Bull. Soc. Géol. de France (7), n° 3-4.

Boullin, J. 1977. *Géologie alpine de la petite kabylie dans la région de Collo et d'El Milia*. Thèse de doctorat de l'université de Paris. 511 p.

Boullin et al. 1984. *mise au point sur l'âge des socles métamorphiques kabyles (Algérie)*. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 298, Série II, n° 15. pp 655-660.

Bruno, F. 2002. *Geophysikalischer Ansatz für die Untersuchung instabiler Hänge*. Alp.relève 2002 - Les Alpes sous la loupe des jeunes chercheurs Chur/Coire, 14. /15.3. 2002. 5 p.

Chalikakis, M. K. 2006. *Application de méthodes géophysiques pour la recherche et la protection des ressources en eau dans les milieu karstiques*. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Paris 6.

Chapellier, D. 2001. *Prospection électrique de surface. Cours en ligne de géophysique*, institut français du pétrole, université de Lausanne. 102 p.

Compos, D. 2004. *Une étude de caractérisation de la structure interne d'une haltes à stérile par méthodes géophysiques* (diplôme de maîtrise les sciences appliquées) Université de Montréal. 197 p.

Dérobot, X et al. 2001. *Performances de radars d'auscultation des chaussées sur des sites tests*. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées 230-janvier –février-2001- Réf. 4352 - PP. 15-22.

Dérobot, X ., Coffec, O. 2003. *Localisation des armatures des ouvrages d'art en béton armé ou précontraint par les techniques de radar*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 230, 57-65.

Djellit, H. 1987. *Evolution tectono-métamorphique du socle kabyle et polarité de mise en place de nappes de flysch en petite Kabylie occidentale (Algérie)*. Thèse de doctorat de l'université de Paris XI, centre d'Orsay. 206 p.

Durand Delga, M ., Magné J. 1952. *Note préliminaire sur le Néogène du bassin de Djidjelli (Nord Constantinois, Algérie)*, (Extrait du C.R.S. de la société géologique de France, N° 11).

Durand Delga, M. 1955. *Etude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique*. Thèse. Sciences. Paris. Pub. Serv. Carte géol. Algérie.Ns.Alger. 553 p.

Durand Delga, M. 1969. *Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie*. Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, vol 39, pp 89-131.

El-Fares, W. 2002. *Caractérisation des milieux aquifères karstiques et fracturés par différentes méthodes géophysiques*. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Montpellier.

Filliat, G. 1982. *la pratique des sols et fondations* Ed. Moniteur.

Gloaguen, E. 2004. *Reconnaissance des images bidimensionnelles de levés de radar géologique en forage*. Thèse soutenue à l'Université de Montréal. 166 p.

Grellier, S. 2005. *Suivi hydrologique des centres de stockage de déchets-bioreacteurs par mesures géophysiques*. Thèse de doctorat de l'université Paris VI,

Hollender, F. 1999. *Interprétation de la distorsion des signaux géoradar propagés et réfléchis. Développement d'une tomographie par bandes de fréquences*. Thèse de doctorat. INPG Grenoble. 197 p.

Jeannin, M. 2005. *Etude des processus d'instabilités des versants rocheux par prospection géophysique Apport du radar géologique*. Thèse Pour obtenir le titre de Docteur De l'Université Joseph Fourier – Grenoble I.

Laurent, M. 2004. *Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis*. Thèse de Doctorat en Cotutelle, Diplôme délivré par l'Université de Nantes, d'une part et par l'Université de Lausanne, d'autre part.

Loeffler, O. 2005. *Modélisation géoradar de la proche surface, estimation de la teneur en eau et influence d'un polluant*. Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I. 194 p.

Marescot, L. 2007. *Géophysique appliquée à l'archéologie. Partie 1: méthodes électriques, sismiques et gravimétriques*. Cours bloc. Université de Fribourg. p 5-63.

Mari J. L., Arens G., Chapellier D., et Gaudiani P., 1998. *Géophysique de gisement et de génie civil*, Publications de l'Institut Français du Pétrole, ed. Technip, Paris, 468 p.

Naudet, V. 2004. *Les méthodes de résistivité électrique et de potentiel spontané appliquées aux sites contaminés*. Thèse de doctorat de l'université Paul Cézanne.

Noorman, B, J. 2001. *Ground-penetrating radar applications in paleolimnology*. Earth Science Program University of Calgary. Canada.

Philipponnat, G et Bertrand, H. 2003. *Fondations et ouvrages en terres*, Ed. Eyrolles.

Raoult, J. et al. 1973. *Le flysch maurétanien de Guerrouch : cadre structural, données sédimentologiques et géochimiques (petite Kabylie, Algérie)*. Bull. soc. géol. Fr. (7), t. XXIV, n°3, p661.662.

Raoult, J. 1974. *Géologie du centre de la chaîne numidique (nord Constantinois, Algérie)*. thèse. Sc. Paris. Mem. Soc. Géol. Fr. ns. L III, Mem. N° 21. Paris.

Rey, E. 2005. *Caractérisation de sols hétérogènes par des méthodes géophysiques*. Thèse de l'université Joseph Fourier-Grenoble I. 251 p.

Rucareanu, M. 1999. *Inversion tomographique des données de radar en forage avec correction des variations instrumentales*. (Diplôme de maîtrise les sciences appliquées) Université de Montréal. 107 p.

Savard, C. 2006. *Imagerie électrique de la sous-fondation pergélisolée des pistes d'atterrissage au Nunavik*. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.). Université Laval –Québec.

Schout, H. 1999. *la méthode géophysique pour les géologues. Tome 1 ; méthode de prospection électrique*. Editions de l'université de Constantine . 79 p.

Schout, H. 2005. *Les applications géoradars en géophysique de subsurface, dans le génie civil et dans les diagraphies de forage*. 1st International Symposium on Electromagnetism, Satellites and Cryptography ISESC'05.

Tabbagh, A. 1995. *Méthodes électriques et électromagnétiques appliquées à l'archéologie et à l'étude de l'environnement*. Fsica de la terra, n. °7,161-192. Servicio de Publicaciones. Universidad Complutense.

Uberti, K. 2002. *Traitement des données géoradar et sismique réfraction pour la reconnaissance des fondations d'un pylône électrique*. Rapport de stage .DEA. Université Joseph Fourier. Paris. 57 p.

Laboratoire national de l'habitat et de la construction, 2003. *Etude géotechnique d'urbanisation POS N° 2 –Ouled Bounnar- Mezgethane*.

Fondasoil, 2005. *Etude géotechnique 200 logements Mezgithane*.

Laboratoire AI ARDH, 2005. *Étude géotechnique 400 logements OPGI – Jijel*.

Laboratoire de contrôle d'étude et d'expertise (LCEE), 2006. *Étude géotechnique 100, 45,25 logements*.

GEOSLOPE, manuel d'utilisation.

Annexes

Annexes

Tableaux récapitulatifs des résultats des essais de laboratoire

Rapport LNHC

N° De S	Prof (m)	δ_d (νm^3)	W (%)	Sr (%)	δ_h	2 mm (%)	80 μm (%)	3 μm (%)	Wl	Ip	Pc	Cc	Cg	W (%)	C	ϕ (°)	Ca Co3	lithologie
S2	3.0-3.50	1.60	24	92	1.98	98	86	42	47	25				24-29	0.55		trace	Argile marneuse, légèrement sableuse
S4	2.0-2.40	1.64	22	92	2.01	97	87	47	50	28	2.87	0.203	0.085	24-26	0.59	17	1.99	Argile marneuse grisâtre
S5	1.70-2.00	1.95	12	86	2.19	97	54	25	41	22	3.56	0.133	0.068	11-15	0.19	14	0.88	Limon argileux, carbonaté
S5	2.20-2.60	1.98	12	93	2.22	98	50	16	39	21	2.9	0.103	0.046					Limon argileux, carbonaté
S5	2.20-2.40	1.68	15.6	69	1.95	84	46	23	41	21	1.95	0.143	0.055				1.41	Argile marneuse parfois sableuse
S7	3.0-3.3	2.01	11	90	2.24	83	70	34	45	24	3.03	0.110	0.050	10-15	0.24	42	Trace	Marne gris blanchâtre
S7	5.0-5.30	2.02	12	94	2.26	87	68	37	43	24	3.47	0.096	0.040				0.53	Marne gris blanchâtre
S7	6.0-6.40	2.12	8	78	2.29	91	40	24	37	20	1.84	0.083	0.010					Marne gris blanchâtre
S8	2.50-2.80	1.91	11	72	2.12	96	46	19	42	23	3.19	0.096	0.018	8-16	1.63	19	1.58	Limon légèrement, argileux, graveleux
S9	1.70-2.00	1.83	13	76	2.08	95	56	21	39	21	2.48	0.110	0.016	17-20	1.09	28	0.70	Sable argileux marron rougeâtre à blanchâtre
S9	4.30-4.50	1.88	14	86	2.14	98	57	22	91	21	1.76	0.103	0.018	16-21	1.27	14	0.35	Sable argileux marron rougeâtre à blanchâtre
S10	3.50-3.80	1.65	17	73	1.94	80	77	36	43	24				15-20	0.63	16		Argile carbonatée, gris blanchâtre
S11	3.0-3.30	1.55	23.1	84	1.92	90	78	36	46	25	1.01	0.200	0.060	21-25	0.81	12		Argile sableuse, légèrement graveleuse
S11	6.0-6.40	1.64	18	75	1.94	95	84	47	51	27	1.54	0.186	0.057					Argile sableuse, légèrement graveleuse
S12	2.60-2.90	1.91	12.2	79	2.14	99	58	20	41	21	2.37	0.120	0.027	14-19	0.24	23		Argile sableuse
S13	2.50-2.70	1.78	16	82	2.06	86	60	28	42	21	1.69	0.133	0.021	17-22	0.6	17	1.99	Argile sableuse, jaune grisâtre
S13	5.0-5.30	1.86	14	83	2.12	88	63	25	46	25	0.86	0.117	0.030	16-26	0.59	13	1.94	Argile sableuse, jaune grisâtre
S13	8.0-8.50	2.05	9	80	2.24	85	28		37	20	2.59	0.080	0.016	8-10	0.29	33	trace	Schiste grisâtre

LCEE Nedjema 110 LSP :

04 sondages carottés ,08 sondages pénétrométriques.

N° de sondage	Profondeur (m)	δd (t/m^3)	C (kg/cm^2)	Φ (°)	Cc	Cg	σ_c	<2mm	<80 μm	<3 μm	Caco3 (%)	Wl (%)	Ip (%)	W (%)	lithologie
Sc1	1.30	1.69	0.40	27	0.167	0.009	1.80	71	38	6	69.00	40	17		tufs
Sc1	3.00	1.79	0.20	30	0.177	0.012	1.91	70	34	10	77.60	41	18		tufs
Sc2	1.40	1.66	0.20	29	0.169	0.013	1.74	72	32	6	73.70	43	19		tufs
Sc2	3.20	1.83	0.20	27	0.169	0.010	2.05	68	28	1	70.70	39	16		tufs
Sc3	1.40	1.68	0.40	30	0.179	0.009	1.78	74	37	9	77.05	44	19		tufs
Sc3	2.90	1.82	0.25	32	0.170	0.012	1.96	70	31	2	70.90	40	17		tufs
Sc4	1.50	1.69	0.35	25	0.184	0.010	1.65	77	40	11	79.10	47	21		tufs
Sc4	3.00	1.79	0.40	30	0.157	0.013	2.05	74	38	8	78.56	40	19		tufs

2) LCEE 45 LSP Hamdania :

03 sondages carottés ,03 sondages pénétrométriques.

N° de sondage	profondeur	δd (t/m^3)	c	Φ (°)	Cc	Cg	σ_c	<2mm	<80 μm	<3 μm	Caco3	Wl (%)	Ip (%)	W (%)	lithologie
Sc1	1.50	1.67	0.25	22	0.170	0.011	1.90	81	35	2	71.10	37	17	19.7	tufs
Sc2	1.50	1.70	0.40	27	0.174	0.025	1.85	80	31	4	74.25	40	19	19.4	tufs
Sc3	1.40	1.68	0.40	25	0.170	0.015	2.00	78	28	1	74.30	38	18	20.4	tufs

ALARDH 400LSP OPGI :

15 sondages carottés, sondages pénétrométriques.

a) 90 LSP :

N° de sondage	profondeur	δd (t/m^3)	δh (t/m^3)	Cu (kg/cm^2)	Φ (°)	Cc	Cg	<2mm	<80 μm	<3 μm	Caco3	wl	Ip	w	lithologie
Sc1	3.50	1.50	1.80	-	-	-	-	88	50	30	6.7	-	-	12	Sable limoneux
Sc2	4.20	1.60	2.0	0.13	24	-	-	98	48	32	28.2	-	-	16	Sable limoneux
Sc3	5.50	1.55	1.76	0.65	17	-	-	80	55	36		-	-	16.84	Sable à limons
Sc4	4.80	1.73	1.88	0.26	25	-	-	68	53	43		-	-	12.21	Sable limoneux

N° de sondage	profondeur	lithologie
Sc1	3.50	Sable limoneux à argileux à graveleux
Sc2	4.20	Sable limoneux + blocs
Sc3	5.50	Sable à limons argileux + blocs+graves
Sc4	4.80	Sable limoneux +graves + blocs

b) 130 LSP :

N° de sondage	prof	δd (t/m ³)	δh (t/m ³)	Cu (kg/c m ²)	Φ (°)	Cc	Cg	<2mm	<80 μm	<3 μm	wl	Ip	w	lithologie
Sc1	3.20	1.49	1.88	0.36	30	-	-	98	91	70	52	27	26.3	Sable argileux
Sc2	3.60	1.58	1.92	-	-	-	-	97	76	44	50	26	21.8	Sable argileux
Sc3	4.60	1.51	1.89	0.28	27	0.210	0.022	96	80	35	57	31	25.3	Sable argileux
Sc4	5.40	1.42	1.75	0.09	25	-	-	92	77	46	50	20.6	16.5	Sable
Sc5	4.50	1.69	1.94	0.62	17	0.156	0.017	90	67	35	41	20.1	21.1	Sable

N° de sondage	profondeur	lithologie
Sc1	3.20	Sable argileux à limoneux + blocs fracturés
Sc2	3.60	Sable argileux à limoneux + blocs fracturés
Sc3	4.60	Sable argileux à limoneux + blocs fracturés
Sc4	5.40	Sable à limons argileux
Sc5	4.50	Sable à limons argileux

ALARDH 400LSP OPGI

b) 180 LSP :

N° de sondage	Prof (m)	δd (t/m ³)	δh (t/m ³)	Cu (kg/cm ²)	Φ (°)	Cc	Cg	<2mm	<80 μm	<3 μm	Wl (%)	Ip	w	lithologie
Sc1	3.80	1.58	1.99	-	-	-	-	96	88	48	62	35	26.2	Sable à limons +
Sc2	3.50	1.46	1.84	-	-	-	-	92	78	38	57	31	26.3	Sable limoneux
Sc3	4.40	1.76	1.97	0.30	31	-	-	90	67	34	27	10	18.2	Sable limoneux
Sc4	5.40	1.65	1.98	0.22	20. 25	0.210	0.022	92	77	39	29	12	20.0	Sable limoneux
Sc5	4.50	1.60	1.94	0.68	18. 10	0.192	0.090	93	67	34	41	20	21.1	Sable argileux
Sc6	3.70	1.69	2.00	0.35	28. 40	-	-	96	64	39	25	8	18.7	Sable limoneux

N° de sondage	profondeur	lithologie
Sc1	3.80	Sable à limons argileux + blocs + graves
Sc2	3.50	Sable limoneux à argileux + blocs
Sc3	4.40	Sable limoneux parfois argileux
Sc4	5.40	Sable limoneux à argileux + blocs
Sc5	4.50	Sable argileux à argileux + blocs
Sc6	3.70	Sable limoneux à argileux

Fondasoil 200LSP GIPEST :

4 sondages carottés.

N° de sondage	profondeur	δd (t/m ³)	δh (t/m ³)	C (kg/cm ²)	Φ (°)	Cc	Cg	<2mm	<80 μm	<3 μm	Caco3 (%)	Wl (%)	Ip (%)	lithologie		
Sc1	2.00- 3.00	1.71	2.06	0.15 ↓ 0.45	6 ↓ 16	12.50 ↓ 22.70	5.80 ↓ 7.30					40	18	Mélange de grés et d'argile sableuse		
Sc2	3.70- 3.90	1.69	2.00								Sc2 3 à 03.70 : 5.60					Argile sableuse bariolée
Sc2	4.70- 4.90	1.75	2.07													Argile sableuse à passé de mame
Sc3	1.60- 2.00	1.60	1.99													Argile sableuse
Sc4	1.00- 1.80	1.57	1.89													Argile sableuse
Sc4	5.50- 5.80	1.59	1.97													Argile bariolée
Sc4	6.20- 6.50	1.70	2.06													Argile sableuse

Le site 45 LSP GETCO (LCEE) :

N° de sondage	prof	δd (t/m ³)	c	Φ (°)	Cc	Cg	σ_c	<2mm	<80 μm	<3 μm	Caco3	Wl (%)	Ip (%)	W (%)	lithologie
Sc1	1.40	1.70	0.30	25	0.135	<u>0.014</u>	1.85	77	35	4	87.13	36	16	26.318.3	tufs
Sc2	1.60	1.72	0.50	30	0.140	<u>0.010</u>	1.90	74	32	2	80.54	40	17	20.2	tufs

Le site 25 LSP BELHI (LCEE) :

N° de sondage	profondeur	δd (t/m ³)	c	Φ (°)	Cc	Cg	σ_c	<2mm	<80 μm	<3 μm	Caco3	Wl (%)	Ip (%)	W (%)	lithologie
Sc1	1.20	1.77	0.40	22	0.171	<u>0.020</u>	1.78	70	30	4	70.22	39	17	21.2	tufs
Sc2	1.20	1.73	0.50	29	0.170	<u>0.011</u>	1.80	77	34	9	78.00	41	19	21.5	tufs