

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de génie de la construction

Département du génie civil



Mémoire de master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique et Environnement

Présenté par : HAMITI Youcef

Thème

**Etude des glissements de terrain des villages Echétel
et Ouled Ali dans la wilaya de Bejaia, par méthodes
géophysiques.**

Proposé par: African Geosystem Company (www.agc-dz.com)

Dirigé par : Professeure Karima BOUZELHA

Promotion : 2013/2014

Remerciements

Mes remerciements vont d'abord à ma directrice de mémoire Mme BOUZLHA Karima, professeur au département du Génie Civil de l'université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou, qui a accepté de diriger ce travail. Ses orientations, ses remarques et son soutien constant m'ont permis de mener à bien ce travail. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance

Je tiens également à remercier tout particulièrement Mr HAMMOUM Hocine maître de conférences A et chef de département de Génie Civil de l'Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou, pour son soutien, ses conseils et ses précieuses orientations tout au long de ce travail.

*J'*adresse aussi mes remerciements aux membres du jury qui me font honneur de juger ce mémoire et participer à ce jury.

Je tiens à remercier tous ceux, qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail. Je cite : Z. Aldjia.

Enfin, je remercie ma famille, mes parents mes frères et sœurs et mes amis.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents, ma mère que j'aime beaucoup, et mon père que

j'adore

Que dieu vous garde pour nous.

Mes frères et sœurs.

Mes adorables neveux et nièces Célia, Achour, Ramedane, Fatema,

Mériame, Imane, Samy, Chabane, Sarah, Kamel, Yasemine et Kenza

que dieu les protège.

Mes chers amis : Boudjmaa, Farid, Belaid, Yacine et Ahmed.

Tables des matières

Introduction générale

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Introduction	2
1.1. Généralités sur la géophysique	2
1.1.1. Définition de la géophysique	2
1.1.2. Modèle géophysique.....	3
1.1.3. Disciplines et technique de la Géophysique	3
1.1.4. Techniques de la géophysique.....	4
1.2. Paramètre physiques utilisés en géophysique.....	4
1.2.1. Caractéristiques élastiques (modules d'élasticité, vitesses des ondes mécanique).....	5
1.2.2. Caractéristiques électriques	7
1.2.3. Caractéristiques magnétiques et électromagnétiques	7
1.2.4. Radioactivité des roches	7
1.2.5. Masse volumique.....	8
1.3. Domaines d'application de la Géophysique	9
1.4. Choix des méthodes à adopter	16
1.5. Déroulement d'une campagne de géophysique	17
1.6. Limites d'application des prospections géophysiques	17
1.7. Fiabilité des résultats obtenus à partir des méthodes géophysiques	18
1.8. Avantages de la prospection géophysique.....	18
Conclusion.....	18

Chapitre 2 : Description des méthodes géophysiques utilisées

Introduction	20
2.1. Imagerie électrique	20
2.1.2. Principe de l'imagerie électrique	20
2.1.3. But de la méthode	21
2.1.4. Résistivité électrique	21
2.1.4.1. Sondage électrique.....	22
2.1.4.2. Panneau électrique	23
2.1.5. Les différents dispositifs utilisés.....	24

2.1.6. Présentation de l'appareil utilisé	26
2.1.7. Différents étapes à suivre pour effectuer une prospection électrique et les logiciels Utilisés	27
2.2. Méthode Sismique.....	30
2.2.1. Domaine d'utilisations	30
2.2.2. L'équipement utilisé	30
2.2.3. Principe de la méthode.....	31
2.2.4. Sismique réfraction.....	33
2.2.4.1. Principe de la méthode.....	33
2.2.4.2. Domaine d'application.....	34
2.2.4.3. Conditions d'application	35
2.2.4.4. Organisation et déroulement d'une campagne réflexion	35
2.2.4.4.1. Conception.....	35
2.2.4.4.2. Paramètre d'acquisition.....	35
2.2.4.4.3. Interprétation des données.....	35
2.2.4.4.4. Profondeur d'investigation	36
2.2.5. Sismique réfraction.....	36
2.2.5.1. Domaine d'application et le principe de la méthode	36
2.2.5.2. Réalisation de la sismique réfraction	37
2.2.5.3. Interprétation des résultats	38
2.2.5.4. Paramètres mesurés	39
2.2.6. Inventages de la méthode sismique	40
2.2.7. Inconvénients de la Sismique.....	40
Conclusion.....	40

Chapitre 3 : Caractérisation des glissements de la région d'étude

Introduction	43
3.1. Situation géographique de la région d'étude	43
3.2. Localisations du périmètre d'étude	44
3.3. Description des glissements.....	47
3.4. Condition majeures à la formation du glissement.....	48
3.4.1. Contexte géologique	48
3.4.2. Morpho lithologie.....	51
3.4.3. Situation topographique.....	52

3.4.4. Contexte Hydro climatique	53
3.4.4.1. Température	53
3.4.4.2. Pluviométrie	53
3.4.4.3. Humidité.....	54
3.4.5. Contexte sismiques.....	56
3.6. Historique du glissement de terrain dans les zones voisines	58
3. 7. Désordres observés dans les zones d'études.....	60
3.8. Causes probables du déclenchement du glissement.....	63
Conclusion.....	66

Chapitre 4 : Application de la tomographie électrique et de la sismique réfraction, pour la caractérisation des glissements d'Echtel et D' Ouled Ali

Introduction	69
4.1. Objectif de l'étude.....	69
4.2. Campagne topographique	69
4.2. Prospection électrique	70
4.2.1. Procédure de mesure.....	70
4.2.2. Présentation des résultats et interprétation.....	71
4.2.1.1. Site du village Echtel	73
4.2.1.2. Site du village Ouled Ali.....	76
4.3. Prospection sismique.....	81
4.3.1. Procédure de mesure.....	81
4.3.2. Présentation des résultats	82
4.3.2.1. Site du village Echtel	82
4.3.2.2. Site du village Ouled Ali.....	85
Conclusion.....	93
Conclusion générale	95
Références bibliographiques.....	96
Annexes.....	103

Liste des figures

Figure 1.1 : Modèle géophysique	2
Figure 1.2 : Onde longitudinale P	6
Figure 1.3 : Onde transversale S	6
Figure 1.4 : Sections de résistivité électrique et de polarisation induite réalisées dans le secteur du Camp Garneau de la ZEC Owen	10
Figure 1.5 : Principe du dispositif gradient ou rectangle	11
Figure 1.6 : Coupe à 2D de la région	11
Figure 1.7 : Localisation du site affecté par les eaux souterraines (Ech.1/25.000).....	13
Figure 1.8 : Répartition des résistivités (a) et lithologique (b) sur le profil 2 à partir des mesures de résistivité électrique.	13
Figure 1.9 : Localisation et photo de la zone de glissement, avec positionnement des profils	14
Figure 1.10 : Profil P19 en sismique a), et en résistivité électrique b)	14
Figure 1.11 : Profils d'imagerie électrique avec surface de glissement.....	15
Figure 1.12 : Zone industrielle de Portovesme	16
Figure 2.1 : Prospection électrique par courant continu : schéma de principe.....	21
Figure 2.2 : Gamme des résistivités des principaux sols terrestres (Laoufi., et al 2011)	22
Figure 2.3 : Principe d'un sondage électrique (dispositif Wenner)	23
Figure 2.4 : Principe d'un panneau électrique (dispositif Wenner).....	24
Figure 2.5 : Montage Wenner.....	24
Figure 2.6 : Montage Wenner-Schlumberger	25
Figure 2.7 : Montage Dipôle-Dipôle	25
Figure 2.8 : Façade supérieure du Resistivimetre Syscal junior R1 (AGC, 2012).....	26
Figure 2.9 : Façade de branchement du Resistivimetre	26
Figure 2.10 : Câbles multi électrode	27
Figure 2.11 : Connexion d'une électrode au câble multi électrode	27
Figure 2.12 : Etapes de la méthode d'inversion en prospection électrique	29
Figure 2.13 : Les étapes d'acquisition et de traitement des données	29
Figure 2.14: Summit X Stream Pro (DMT) (AGC-2012).....	30
Figure 2.15 : Exemple d'enregistrement montrant de belles réflexions (trait bleu) sous les	

Liste des figures

premières arrivées (trait rouge), en vert l'onde sonore et jaune les ondes de surface (Beddou, 2012).....	31
Figure 2.16 : Onde longitudinal P (Illoul, 2013)	32
Figure 2.17 : Onde transversal S (Illoul, 2013)	32
Figure 2.18 : Onde de love onde de rayleigh (Illoul, 2013).....	32
Figure 2.19 : Propagation des ondes en sismique réflexion (Beddou, 2012).....	33
Figure 2.20 : schéma d'aquisition de la sismique réflexion (Beddou, 2012).....	34
Figure 2.21 : Sismique Réfraction	36
Figure 2.22 : Vitesse de la sismique réfraction (AGC, 2012)	37
Figure 2.23 : Exemple d'enregistrement d'un tir en bout avec le picking des 1eres arrivées (en rouge) (AGC, 2012).....	38
Figure 2.24 : Exemple d'enregistrement d'un tir au centre avec le picking des 1eres arrivées (en rouge) (AGC, 2012).....	38
Figure 2.25 : Coupe romochronique (AGC, 2012).....	39
Figure 3.1 : Situation géographique des régions d'études	44
Figure 3.2 : Localisation du village Ouled Ali sur un fond d'images en 3D (Google-Earth).....	45
Figure 3.3 : Localisation du village Echetal sur un fond d'images en 3D (Google-Earth)....	45
Figure 3.4 : Carte d'état Majore de Bejaia NJ-31-VI-33Est, prise de vue aérienne de 1985 complété sur le terrain en 1988, publié par le Ministère de la défonce Nationale, institut Nationale de Cartographie et de Télédétection.....	46
Figure 3.5 : Village Echetal menacée par le glissement de terrain (AGC, 2012)	47
Figure 3.6 : Village Ouled Ali menacée par le glissement de terrain (AGC- 2012).	47
Figure 3.7 : Extrait de Carte géologique de Bejaïa, levers effectués de 19673 à 1975 par M.J.M.VILLA, publiée par l'office national de la géologie	48
Figure 3.8 : Carte géologique de l'Algérie Oued Amizou effectuées par M.LEIKINE et M.GRAVELLE de 1964 à 1970, B.SEMROUD en 1981, publiée en 1988 par l'office national de la géologie	48
Figure 3.9 : Formation géologique du village Echetal.....	49
Figure 3.10 : Présentation des pentes à 20% du village Ouled Ali.....	50
Figure 3.11 : Coupe schématique de la morpho lithologie des sites des villages Echetal et Ouled Ali.....	51
Figure 3.12 : Carte topographique du villages ouled Al	52
Figure 3.13 : Carte topographique du village Echetal	52

Liste des figures

Figure 3.14: Diagramme ombrothermique de la région d'étude	56
Figure 3.15 : Carte de Zonage sismique du territoire nationale (CGS, 2012).....	57
Figure 3.16 : Carte de zonage sismique du territoire national.....	58
Figure 3.17 : Action de la pente raide et de relief accidenté (Bendadouche et al., 2008)	58
Figure 3.18 : Description du glissement de la région Sidi Ahmed Bejaia (Bendadouche et al., 2008)	59
Figure 3.19 : Glissement de Aach El Baz Bolimat station balnéaire à 20 km de Bejaia Ouest (Bendadouche et al., 2008).....	59
Figure 3.20 : Glissement de Tizi quartier de Bejaia. Basculement d'une habitation (Bendadouche et al., 2008).....	60
Figure 3.21 : Glissement spectaculaire d'un pont qui relie les deux communes Ait Smail et Ouled Ali.....	61
Figure 3.22 : Vues des dégâts au site étudié village Ouled Ali commune Teskriout	61
Figure 3.23 : Vues des dégâts au site étudié village Ouled Ali commune Teskriout (suite)	62
Figure 3.24 : Vues des dégâts au site étudié village Echetal commune Ait Smail.....	62
Figure 3.25 : Vues des dégâts au site étudié village Echetal commune Ait Smail (suite)	62
Figure 3.26 : Vues des dégâts au site étudié village Echetal commune Ait Smail (suite)	63
Figure 3.27 : Vues des dégâts au site étudié village Echetal commune Ait Smail (suite)	63
Figure 3.28 : Vue du site étudié village Echetal commune Ait Smail	64
Figure 3.29 : Vue du site étudié village Ouled Ali commune Teskriout	64
Figure 3.30 : Glissement de terrain a cause des travaux au village Echetal	65
Figure 3.31 : Localisation du lycée sur un fond d'images en 3D (Google-Earth)	66
Figure 4.1 : Levés topographique villages Echetal et Ouled Ali.....	70
Figure 4.2 : Station totale LEICA TS02	70
Figure 4.3 : Positionnement des électrodes sur site village Echete et Ouled Ali	71
Figure 4.4 : Positionnement des profils électrique et sismique sur site village Echetal	72
Figure 4.5 : Modèle de résistivité interprété du profil P1 Echetal	73
Figure 4.6 : Restitution géologique du profil PE1 Echetal	74
Figure 4.7 : Modèle de résistivité interprété du profil P2 Echetal	74
Figure 4.8 : Restitution géologique du profil PE2 Echetal	74
Figure 4.9 : Positionnement des profils du site - village Ouled Ali.....	75
Figure 4.10 : Modèle de résistivité interprété du profil P1 Ouled Ali	76
Figure 4.11 : Restitution géologique du profil PE1 Ouled Ali.....	76

Liste des figures

Figure 4.12 : Modèle de résistivité interprété du profil PE2 Ouled Ali.....	77
Figure 4.13 : Restitution géologique du profil PE2 Ouled Ali.....	77
Figure 4.14 : Coupe naturel montrant l'importance de la formation de marne schisteuse du site Ouled Ali.....	78
Figure 4.15 : Modèle de résistivité interprété du profil PE3 Ouled Ali.....	78
Figure 4.16 : Restitution géologique du profil PE3 Ouled Ali.....	78
Figure 4.17 : Modèle de résistivité interprété du profil PE4 Ouled Ali.....	79
Figure 4.18 : Restitution géologique du profil PE4 Ouled Ali.....	79
Figure 4.19 : Modèle de résistivité interprété du profil PE5 Ouled Ali.....	79
Figure 4.20 : Restitution géologique du profil PE5 Ouled Ali.....	80
Figure 4.21 : Modèle de résistivité interprété du profil PE6 Ouled Ali.....	80
Figure 4.22 : Restitution géologique du profil PE6 Ouled Ali.....	80
Figure 4.23 : Summit X Stream Pro (DMT)	81
Figure 4.24 : Enregistrement du tir direct du profil PS1	81
Figure 4.25 : Enregistrement du tir centré du profil PS1	82
Figure 4.26 : Modèle de vitesse sismique correspondant aux profils PS1,PS2,PS3 et PS4,site village Echotel	82
Figure 4.27 : Modèle de vitesse sismique correspondant aux profils PS5, PS6, PS7 et PS8, site village Echotel.....	83
Figure 4.28 : Modèles de vitesse sismique correspondant au profil PS9.....	83
Figure 4.29 : Modèles de vitesse sismique correspondant aux profils PS10 et PS11	83
Figure 4.30 : Modèles de vitesse sismique correspondant aux profils PS12 et PS13	84
Figure 4.31 : Coupe sismique des profils PS1 et PS2 site village Ouled Ali.....	85
Figure 4.32 : Coupe sismique des profils PS3 et PS4 site village Ouled Ali.....	86
Figure 4.33 : Coupe sismique des profils PS5 et PS6 site village Ouled Ali.....	86
Figure 4.34 : Coupe sismique des profils PS7 et PS8 site village Ouled Ali.....	86
Figure 4.35 : Coupe sismique des profils PS9 et PS10 site village Ouled Ali.....	87
Figure 4.36 : Coupe sismique des profils PS11 et PS12 site village Ouled Ali.....	87
Figure 4.37 : Coupe sismique des profils PS13 et PS14, site village Ouled Ali	87
Figure 4.38 : Coupe sismique du profil PS15, site village Ouled Ali.....	88
Figure 4.39 : Coupe sismique du profil PS16, site village Ouled Ali.....	88
Figure 4.40 : Coupe sismique du profil PS17, site village Ouled Ali.....	88
Figure 4.41 : Coupe sismique du profil PS18, site village Ouled Ali.....	89
Figure 4.42 : Coupe sismique des profils PS19 et PS20, site village Ouled Ali	89

Liste des figures

Figure 4.43 : Coupe sismique du profil PS21, site village Ouled Ali.....	89
Figure 4.44 : Coupe sismique du profil PS22, site village Ouled Ali.....	89
Figure 4.45 : Coupe sismique du profil PS23, site village Ouled Ali.....	89
Figure 4.46 : Coupe sismique du profil PS24, site village Ouled Ali.....	90
Figure 4.47 : Coupe sismique des profils PS25 et PS26, site Ouled Ali	91
Figure 4.48 : Coupe sismique des profils PS27 et PS28, site village Ouled Ali	91
Figure 4.49 : Coupe sismique du profil PS29, site village Ouled Ali.....	91
Figure 4.50 : Coupe sismique des profils PS30 et PS31, site village Ouled Ali	92
Figure 4.51 : Coupe sismique du profil PS32, site village Ouled Ali.....	92

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Méthodes géophysique et leurs paramètres physiques	2
Tableau 1.2 : Guide d'emploi des techniques géophysiques adaptées au génie civil. (Mary et al., 1998)	5
Tableau 1.3 : Synthèse des propriétés physiques pour quelques matériaux géologiques (Mary et al., 1998).....	8
Tableau 1.4 : Utilité des différentes méthodes géophysiques (Mary et al., 1998)	17
Tableau 2.1 : Différents dispositifs de l'imagerie électrique	25
Tableau 3.1 : Situation topographique	52
Tableau 3.2 : Températures moyenne mensuelles (2000-2012) en °C	53
Tableau 3.3 : Caractéristique de la station pluviométrique	54
Tableau 3.4 : Précipitations moyennes mensuelles (2000-2012) en mm.....	54
Tableau 3.5 : Humidité moyennes mensuelles en « % ».....	55
Tableau 3.6 : Moyennes mensuelles des températures et précipitations.....	55
Tableau 3.7 : Répartition des zones sismique en Algerie.....	57
Tableau 4 .1 : Vitesse sismique site Echetal	85
Tableau 4.2 : Vitesse sismique Ouled Ali	93

Résumé

Résumé

La présente étude entre dans le cadre d'une expertise en rapport avec la problématique posée par les glissements de terrain au niveau des villages Echétel (commune d'Ait Smail) et Ouled Ali (commune de Taskriout) dans la wilaya de Bejaia. Ces glissements de terrain de type complexe sont localisés essentiellement au centre et à l'Est du village Ouled Ali et selon une direction NW-SE pour le village Echétel. Ces glissements de terrains sont caractérisés par la formation d'une surface de rupture le long de laquelle se sont produits des déplacements de matières (éboulis de pente).

La compréhension de la dynamique de ces glissements de terrain passe par la détermination des structures internes du sous sol. A cet effet, des levés géophysiques par imagerie électrique et sismique réfraction ont été réalisés dans le but de déterminer le plan de rupture et la profondeur de ces glissements. Cette vision globale du sous-sol permet de comprendre géomorphologie de ces derniers.

Mots clés : Glissements, Morpho- dynamique, Géophysique, Résistivité électrique, Sismique réfraction.

Abstract

This study is part of an expertise in relation to the problems posed by landslides in villages Echétel (city Ait Smail) and Ouled Ali (city Taskriout) in the province of Bejaia. These landslides of complex type are mainly located in the center and east of the village Ouled Ali and in a NW-SE direction for Echétel village. These landslides are characterized by the formation of a fracture surface along which material movement occurred (scree slope).

Understanding the dynamics of these landslides requires the determination of the internal structures of the basement. To this end, geophysical electrical imaging and seismic refraction were performed in order to determine the fracture plane and the depth of these landslides. This global view of the basement allows to can understand the geomorphology of these latters.

Keywords: Landslides, Morpho-dynamics, geophysics, Electrical resistivity, Seismic refraction.

Introduction Générale

Introduction Générale

Les mouvements de terrains constituent l'un des phénomènes considérés souvent comme étant des risques naturels déclenchés et réactivés par la seule force de nature. Cependant, l'action humaine est souvent prépondérante dans ce type d'aléas et constitue l'un des facteurs déclenchant les plus répandus des instabilités. Une étude approfondie de ce phénomène, de ses causes et conséquences peut contribuer à la réduction des désordres et des risques de pertes en vies humaines.

La géomorphologie du Nord de l'Algérie est caractérisée essentiellement par des pentes raides et abruptes, affectées souvent par des mouvements de terrains plus au moins importants. Ce risque constitue l'un des phénomènes naturels les plus répandus dans cette région du pays. En effet, plusieurs wilayas (Alger, Constantine, Mila, Médéa, Tizi-Ouzou et Bejaia) sont affectés par des mouvements de terrain très actifs ces dernières années.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons à l'étude des glissements de terrains qui ont affecté deux villages : Echétel (commune d'Ait Smail) et Ouled Ali (commune de Taskriout), dans la wilaya de Bejaia. Il s'agit de mouvements de terrains de grande ampleur caractérisés par des périodes de calme et de réactivation (Ouled Ali), localisés dans des pentes raides et déclenchés généralement par des incidents climatiques exceptionnels.

Pour mieux analyser ces instabilités aux niveaux de ces deux villages Echétel et Ouled Ali, une étude géophysique de sub-surface, par imagerie électrique et la sismique réfraction, a été réalisée. Le caractère non destructif des méthodes géophysiques et leur rapidité d'exécution présentent un attrait non négligeable pour les bureaux d'études qui interviennent dans l'aménagement et l'urbanisme.

La présente étude a pour objectif la caractérisation de ces deux glissements de terrain au niveau des deux villages, la détermination de leurs surfaces de rupture et de leurs profondeurs, ainsi que l'étude de la structure interne de la masse instable ; à travers l'analyse des paramètres géophysiques que nous confèrent les méthodes utilisées (l'imagerie électrique et la sismique réfraction).

Pour mieux illustrer ce travail, nous avons réparti ce mémoire en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les méthodes géophysiques, leurs domaines d'application, et les cas pratiques ayant été traités dans différents domaines (pétrolier, minier, génie civil, environnement et autres).

Introduction Générale

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation des deux méthodes géophysiques utilisées pour la caractérisation des glissements de notre région d'étude ; à savoir l'imagerie électrique et la sismique réfraction. Ainsi, nous exposons leur principe, les équipements utilisés, les différentes étapes à suivre pour ces campagnes géophysiques et enfin les logiciels à exploiter pour interpréter les résultats de mesure.

Au troisième chapitre est présentée la région d'étude (Echetel et Ouled Ali). Par ailleurs, pour la caractérisation des glissements de la région en question, nous présentons le contexte géologique, morpho-lithologique, topographique, hydro climatique et sismique. Les causes probables du déclenchement de ces glissements ainsi que l'historique des glissements de terrain dans les zones avoisinantes ont fait également l'objet de notre intérêt.

Au quatrième et dernier chapitre, nous exposons les profils géophysiques qui ont été imagés sous-sol par les deux méthodes suscitées et leur interprétation. La fiabilité de ces profils sera confirmée par la confrontation de ces profils (électriques et sismiques), en s'appuyant sur les profils géologiques restitués.

Enfin, notre travail s'achève par une conclusion générale relatant les principaux résultats de notre étude. Aussi, nous présentons en annexe 2 des généralités et des définitions sur les différents mouvements de terrains pour comprendre la morpho-dynamique des glissements.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

Introduction

La géophysique est un outil de reconnaissance qui a la capacité de déterminer les paramètres physiques (résistivité, conductivité, vitesse, etc.) et géométriques du sous sol. Elle peut apporter une solution appropriée pour connaître la profondeur du toit du substratum (distance terrain meubles socle) ainsi que les paramètres qui peuvent influencer sur la stabilité du sol comme la circulation d'eau.

La géophysique joue également un rôle important dans le domaine du génie civil en apportant des éléments de solutions dans le but de stabiliser les sols et ainsi limiter les dommages matériels et humains que causent les glissements de terrain.

C'est alors, que nous consacrons ce premier chapitre à la définition de la géophysique, aux différents domaines d'application, en citant des exemples pratiqué.

1.1. Généralités sur la géophysique

1.1.1 Définition de la géophysique

La géophysique concerne l'étude des caractéristiques physiques des sols et des roches dans le but de caractériser leurs constituants et leur géométrie. La géophysique se propose à l'aide d'hypothèses géologiques, de valider un model issu de mesures faites sur le terrain. De nombreuses méthodes existent, basées sur les mesures de paramètres physiques, tels que la densité, la résistivité, le magnétisme, la vitesse de propagation d'ondes sismiques ou électromagnétiques. Tableau (1.1).

Tableau 1.1 : Méthodes géophysique et leurs paramètres physiques.

Méthode	Grandeur mesurée	Paramètre	Origine du champ physique
Gravimétrie	Champ de pesanteur	Masse volumique	Naturelle
Sismique	Temps de trajet	Vitesse d'ondes mécaniques	Provoquée
Électrique	Potentiel électrique	Résistivité	Provoquée
Magnétique	Champ magnétique	Susceptibilité magnétique	Naturelle
Électromagnétique	Champ électromagnétique	Résistivité et permittivité	Provoquée
Radioactivité	Nombre d'événements	Radioactivité des roches	Naturelle ou provoquée

Le tableau (1.1) nous donne une idée générale de paramètres tels que l'épaisseur des zones altérées, la structure du massif, l'appréciation de la qualité du rocher en profondeur, la détermination et la géométrie d'un accident.

1.1.2. Modèle géophysique

Un modèle géologique est un ensemble de représentations d'un site sous ses différents aspects (nature, répartition, propriétés des matériaux qui le constituent). Ces représentations prennent matériellement la forme de cartes, de coupes, de blocs diagrammes, de coupes de sondages, de textes ou même de maquettes (figure 1.1).

Au départ, la reconnaissance est toujours fondée sur un premier modèle géologique, qui peut être très sommaire, imprécis ou peu fiable. Le but de la reconnaissance est de l'améliorer, de le rendre fiable, précis, le plus complet possible afin de permettre une conception de l'ouvrage qui repose sur les données dont on a besoin, et qui soient les plus sûres possible (Lagabrielle, 2012).

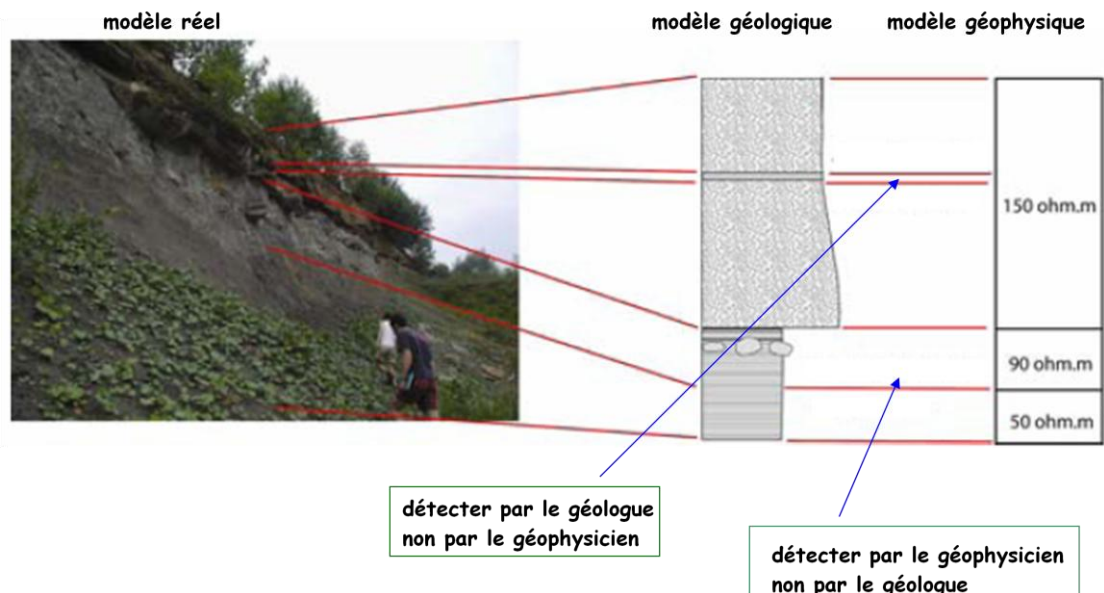


Figure 1.1 : Modèle géophysique.

1.1.3. Disciplines et techniques de la Géophysique

La Géophysique comprend plusieurs disciplines ou spécialités. Pour comprendre le comportement physique de la terre, des concepts et des techniques particulières ont été mises en place au vingtième siècle. Parmi les techniques utilisées pour sonder la terre, certaines peuvent être particulièrement efficaces pour étudier un site de subsurface. Nous distinguons :

➤ **La Sismologie et la Sismique**

Ces deux techniques étudient la propagation des ondes acoustiques ou sonores naturelles et provoquées. Elles mesurent le temps de propagation de ces ondes acoustiques. Le paramètre physique qui caractérise le milieu est la vitesse V .

➤ **La Gravimétrie**

Celle-ci s'intéresse au champ gravifique. La grandeur physique des constituants est la densité d . En relation avec la fréquence des mesures, on parle de Gravimétrie et de Micro gravimétrie.

➤ **Le Magnétisme**

Il étudie le champ magnétique. La grandeur physique du milieu est la susceptibilité magnétique μ .

➤ **Méthodes électriques**

Elles étudient les courants électriques naturels et artificiels à travers plusieurs méthodes de prospection (Polarisation Spontanée PS, Polarisation Induite PI et Polarisation Provoquée PP).

➤ **Méthodes électromagnétiques**

Plusieurs techniques électromagnétiques sont développées pour les champs électromagnétiques provoqués et naturels (EM, Radar, Interférométrie, Magnétotellurique MT et AMT). Le paramètre physique du champ électromagnétique provoqué est la conductivité électrique σ . Le champ électromagnétique naturel (tellurique) est caractérisé par 05 composantes dont 02 électriques (E_x et E_y) et 03 magnétiques (H_x , H_y et H_z)

➤ **Radiométrie**

Qui s'intéresse à l'énergie et/ou concentrations radioactives des éléments radioactifs prépondérants de Potassium K et des séries de Thorium Th et d'Uranium U.

➤ **Diagraphies**

Elles consistent à mesurer dans un sondage (forage) différents paramètres physiques. Toutes les grandeurs physiques de la Géophysique de surface sont pratiquement mesurées dans les puits de forage.

1.1.4. Techniques de la géophysique

Comme le montre le Tableau (1.2) de nombreuses méthodes géophysiques peuvent être utilisées pour résoudre les difficultés qui se posent à l'ingénieur. Plusieurs facteurs interviennent dans le choix des méthodes à employer:

- la présence d'un contraste suffisant ;
- la pénétration ;
- le pouvoir de résolution ;
- une interprétation non univoque.

Tableau 1.2 Guide d'emploi des techniques géophysiques adaptées au génie civil (Mary et al., 1998).

Techniques	Gravimétrie	Sismique	Résistivité	Electro-magnétisme	Radar	Magnétisme	Acoustique champ total	Autres diagraphies
Fondations	0	+++	++	++	++	0	++	++
Modules mécaniques	0	+++	0	0	0	0	+++	++
Zone d'emprunt de matériaux	0	+++	+++	++	0	0	0	+
RipabilitéTerrassement	0	+++	0	0	0	0	0	0
Etudes de tracés route, etc.	0	+++	+++	++	0	0	0	0
Recherche de cavités	++	++	++	0	++	0	++	+
Glissement stabilité	0	++	++	++	0	0	++	++
Venues d'eau	0	++	+++	++	++	0	+	+++

- ✓ 0 : Technique non adaptée.
- ✓ + : Technique d'emploi limité.
- ✓ ++ : Technique adaptée, à combiner avec d'autres méthodes géophysiques.
- ✓ +++ : Technique généralement utilisée.

1.2. Paramètres physiques utilisés en géophysique

Comme nous avons mentionné plus haut, ce sont les variations des propriétés physiques du sous sol qui sont mises en évidence par les différentes méthodes de prospection géophysique chacune de ses propriétés à sa dynamique qui lui est propre. On les présente ici de façons simplifiées (Guéguen et al., 1992), et (Mavko et al., 1998).

1.2.1. Caractéristiques élastiques (modules d'élasticité, vitesses des ondes mécaniques)

La vitesse de propagation des ondes mécaniques dans les matériaux dépend de leurs modules d'élasticité (modules d'Young et de Poisson, coefficients de Lamé) et de leur masse volumique. Les méthodes sismiques ont pour but de découvrir la répartition des vitesses des ondes mécaniques. Quand on applique une contrainte sur un objet élastique, par exemple en lui tapant dessus, la déformation qui en résulte se propage en s'éloignant du point d'impact. On a alors deux types d'ondes élastiques : les ondes de volume et les ondes de surface (Shout, 2012).

On ne s'intéressera ici qu'aux propriétés relatives aux ondes de volume.

- **Ondes de volume**

On peut déformer un milieu élastique de deux façons : par compression dilatation ou par cisaillement. On distingue alors deux types d'ondes de volume.

Pour les ondes de compression-dilatation, la déformation résulte en un changement de volume sans rotation des particules constituant le milieu de propagation; cela veut dire que la polarisation est parallèle à la direction de propagation. Ces ondes sont nommées **ondes P** (figure 1.2).

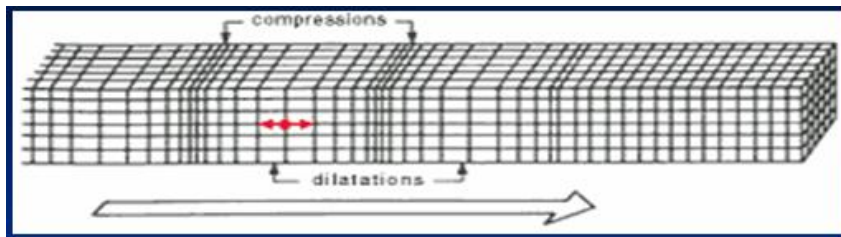


Figure 1.2 : Onde longitudinale P.

Pour les ondes de cisaillement, les particules du milieu bougent perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde. Ces ondes sont nommées **ondes S** (figure 1.3).

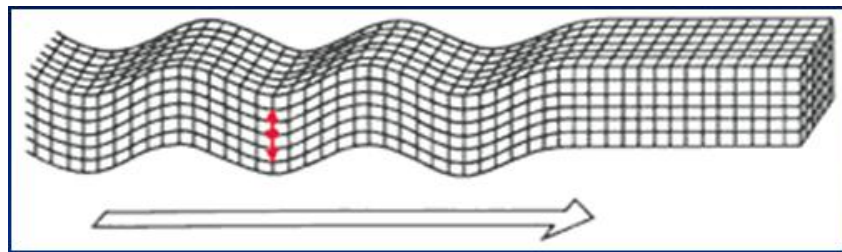


Figure 1.3 : Onde transversale S.

Les expressions de ces vitesses, exprimées en termes de constantes élastiques sont données par :

$$v_p = \frac{K + 4\frac{\mu}{\rho}}{\rho} \quad (1.1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.2)$$

où **K** représente le module de compressibilité, **μ** le module de cisaillement et **ρ** la masse volumique du milieu.

1.2.2. Caractéristiques électriques

Les matériaux du sous-sol sont conducteurs de l'électricité. La conductivité, notée σ , est la grandeur qui caractérise cette propriété. Elle se mesure en siemens par mètre (S/m). La résistivité, notée ρ , est l'inverse de la conductivité, elle se mesure en ohms-mètres ($\Omega.m$). Plus ρ est faible, plus le matériau est conducteur. La résistivité peut prendre des valeurs qui couvrent plusieurs ordres de grandeur, de quelques ohms-mètres pour des terrains très argileux et très humides à plusieurs dizaines de milliers d'ohms-mètres pour des matériaux rocheux très sains, en passant par toutes les valeurs intermédiaires.

Il y a donc entre les matériaux des contrastes de résistivité très forts. Cela confère aux méthodes fondées sur la recherche de la répartition de la résistivité un grand pouvoir de discrimination entre les matériaux. Ces méthodes sont la prospection électrique par courant injecté et les méthodes électromagnétiques en basses fréquences (**Shout, 2012**)

1.2.3 Caractéristiques magnétiques et électromagnétiques

Les propriétés magnétiques des matériaux sont quantifiées par la perméabilité magnétique relative μ_r et la susceptibilité magnétique X :

$$\mu_r = 1 + X \quad (1.3)$$

Elles sont peu utilisées en génie civil. Une méthode magnétique est parfois utilisée pour rechercher des objets contenant du fer sur un site qui peut avoir servi de décharge.

Les caractéristiques électromagnétiques autres que μ_r et X sont encore la conductivité σ , déjà citée, et la permittivité relative ϵ_r : Celle-ci a une influence sur la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques qui vaut :

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.4)$$

C étant la vitesse de la lumière dans le vide (3.108 m/s). Les méthodes géophysiques fondées sur la détermination de la répartition des caractéristiques électromagnétiques (σ et ϵ_r) sont le radar géologique et la tomographie électromagnétique en ondes monochromatiques (**Shout, 2012**).

1.2.4. Radioactivité des roches

Les roches contiennent en quantités variables des éléments naturels radioactifs, le potassium 40, le radium et l'uranium. Elles sont donc naturellement plus ou moins radioactives. Cette propriété est mise à profit en géophysique pour les distinguer. Ainsi, parmi les matériaux sédimentaires, les argiles sont les matériaux les plus radioactifs, les calcaires

purs ne le sont pas et les marnes et marno - calcaires le sont plus ou moins suivant leurs teneurs en minéraux argileux. Parmi les matériaux cristallins, les granites sont les plus radioactifs. En fin, les propriétés d'absorption des rayonnements par les matériaux sont exploitées. L'absorption des rayons γ permet la mesure en place, très précise, de leur masse Volumique (diagraphie γ - γ). L'absorption des neutrons permet la mesure de leur teneur en eau (diagraphie neutron - neutron) (Shout, 2012).

1.2.5. Masse volumique

La masse volumique (ou de densité) dépend essentiellement de la composition du matériau. On la détermine simplement en laboratoire.

L'ordre de grandeur courant de la masse volumique des sols en place est de 2000kg/m³. Le champ de pesanteur dépend de la répartition des masses donc de la répartition de la masse volumique des matériaux du terrain. Par exemple, l'existence d'une cavité souterraine correspond à un déficit de masse et provoque une anomalie négative de la pesanteur mesurée en surface. La gravimétrie est la méthode qui exploite ces phénomènes.

Une autre méthode géophysique est utilisée pour déterminer précisément la valeur de la masse volumique et sa répartition; il s'agit de la méthode de diagraphie différée appelée gamma-gamma (Shout, 2012).

Le tableau (1.3) qui est résume quelques propriétés physiques de différents matériaux géologiques.

Tableau 1.3 : Synthèse des propriétés physiques pour quelques matériaux géologiques (Mary et al., 1998).

Matériau (unité)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Résistivité ($\Omega.m$)	Densité (kg/m ³)	Permittivité ($\times \epsilon_0$)	Susceptibilité ($\times 10^{-6}$ SI)
Air	330	0	∞	1	1	0
Eau	1500	0	3-100	1000	81	0
Argile	1100-2500	650-1500	3-100	1500-1700	8-12	0-1000
Schistes	2400-5000	1400-3000	3-30	2100-2600	4-5	0-1200
Grès	2000-4500	1200-2700	30-1000	2150-2650	4-5	35-1000
Tills	1500-2600	900-1600	30-1000	1500-2000	5-10	0-2000
Sable	1200-1900	700-1100	300-10000	1600-2000	4-30	0-2000
Calcaire	3500-5000	2000-3000	300-10000	2500-2750	6-8	10-25000
Sel	4000-5500	2400-3200	1000-10000	2100-2400	1	-10
Roches altérées	2500-3800	1500-2300	3-300	2600-2900	8-12	>40000
Roches saines	5500-6300	3200-3700	1000-100000	2700-2900	4-5	>40000
Amas sulfurés	5000-6000	3000-3500	0.01-1	4900-5200	4-5	1000-5000
Graphite	1400-1600	800-900	0.1-10	2000	4-5	-200- -80

1. 3. Domaines d'applications de la Géophysique

➤ **Recherche pétrolière** : La Géophysique est présente en exploration et caractérisation des réservoirs potentiels. Les principales disciplines sont : la sismique et les diagraphies, les méthodes complémentaires: la Gravimétrie, le Magnétisme. c'est ainsi que le champ de Hassi Messaoud (environ 10Gb) a été découvert grâce à la sismique réfraction, (**Laherrère, 2000**). Toute fois la réflexion ne montrait, au niveau du réservoir, que des événements médiocre ou il était impossible de pointer de façon sure un horizon en continu. Cependant le traitement des données sismique réflexion, intervenant après les phases de prétraitement, et d'estimation du modèle de vitesse peuvent servir de base à la caractérisation litho-sismique du réservoir (**Joucour, 2005**). En effet lorsqu'elle est faite avant sommation, en profondeur et en amplitude préservée, elle permet d'obtenir les réflectivités du sous -sol en fonction de l'angle d'incidence de l'onde sismique.

✓ (**Crémer, 1983**) proposé pour l'Institut Français du Pétrole, porte sur la caractérisation de la sédimentation détritique sur les talus et glacis des marges continentales, dans le but d'une application à l'exploration pétrolière. A l'aide de deux exemples, l'un actuel (l'éventail du Cap-Ferret), l'autre ancien (la série des Grés d'Annot) et par des méthodes d'approche complémentaires (analyse morphologique, sédiment logique, interprétation sismique).

✓ (**André Haas et al., 1993**) ont mené une étude sur la sismique pétrolière, car la sismique permet d'obtenir différentes images possibles de réservoirs pétroliers, en tenant compte des données de puits, de la variabilité spatiale, mais aussi de mesures sismique 3D. La méthode a été appliquée à la simulation d'impédances acoustiques et peut donc être aux méthodes d'optimisation existantes qui ne fournissent qu'une seule solution. La validité des résultats dépend au plus haut point de la qualité des données sismiques et de leur calage aux puits.

➤ **Recherche minière** : La Géophysique intervient dans l'exploration de l'ensemble des minerais. Elle contribue dans la mise en valeur des gisements ou mines. Les disciplines utilisées sont: les méthodes électriques (PP, PI voire PS) et électromagnétiques (EM, AMT,...), Radiométrie et Diagraphies. La Gravimétrie et le Magnétisme peuvent intervenir dans ce domaine.

✓ (**Itée, 2011**) à effectuée trois levés de résistivités électriques dans les secteurs du village de St-Eusèbe et du Camp Garneau de la ZEC d'Owen, là où des anomalies de gaz naturel

dans les sols ont été identifiées par les levés «soil gas». La section du Camp Garneau est présentée à la (figure1.4). Les levés ont été réalisés à l'aide du nouveau système Terrameter LS à 12 canaux d'ABEM couplé à un système de câbles multi-électrodes totalisant 1,6 km de longueur. L'objectif du levé du Camp Garneau était de vérifier si des méthodes non sismiques, mais toutefois relativement pénétratives, pouvaient être utilisées pour documenter les variations géologiques présentes à quelques centaines de mètres de profondeur sous les zones où des anomalies de gaz naturel ont été identifiées dans les sols de la propriété.

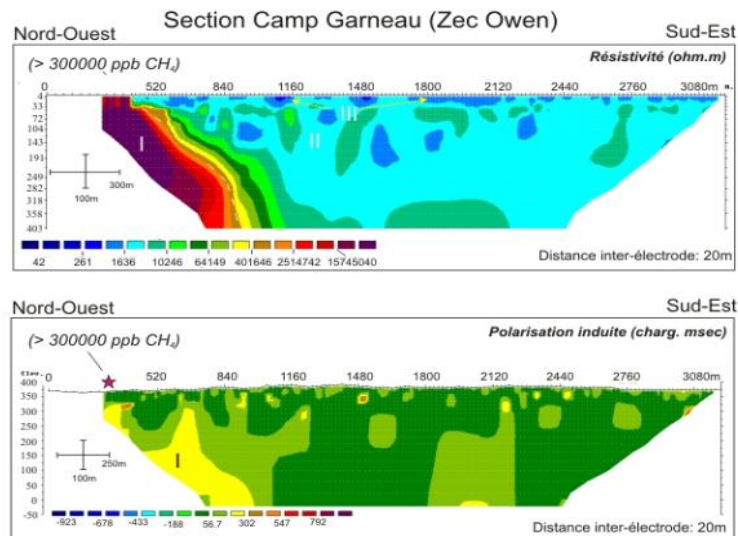


Figure 1.4 : Sections de résistivité électrique et de polarisation induite réalisées dans le secteur du Camp Garneau de la ZEC Owen.

- **Recherche hydrique :** La Géophysique est présente en exploration des ressources en eaux souterraines (nappes superficielles et phréatiques). Les principales disciplines sont les méthodes électriques.
- ✓ **(Kouassi et al., 2013)** ont mené une étude détaillée en Côte d'Ivoire proposant une étude du fonctionnement des forages en exploitation basée sur les mesures géophysiques dans l'hypothèse que le dépérissement serait dû à une mauvaise implantation du forage (méthode géomorphologique). L'objectif de cette étude est d'analyser la productivité des forages en exploitation, implantés par la méthode géomorphologique, à partir de mesures géophysiques. Cette étude conduit dans un premier temps à l'interprétation graphique des mesures de terrain (résistivité électrique), préalable à la détermination des minima préparés avant d'envisager une analyse comparative entre ceux ci et les sites de forage existants. Les méthodes électriques qui sont des méthodes de champ sont bien adaptées à la caractérisation des variations de la géologie et sont donc les mieux indiquées pour l'identification des fractures et de la profondeur du socle (figure1.5).

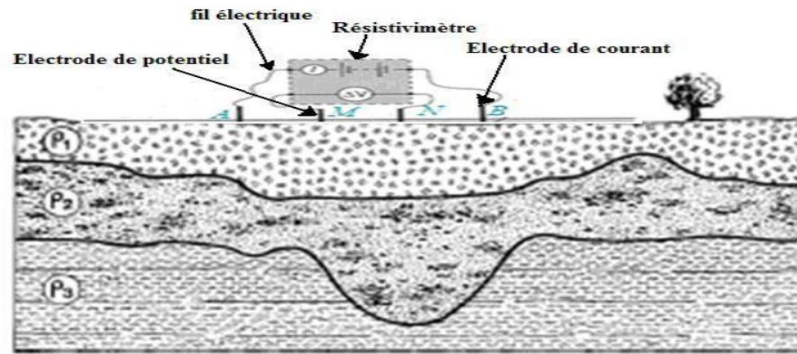


Figure 1.5 : Principe du dispositif gradient ou rectangle.

✓ (Nouar et al., 2004) ont réalisé une étude de site de barrage d'hydraulique dans la wilaya de Skikda et dans le but de mener le projet de l'emplacement d'un barrage dans le site oued charchar commune de Bouchetat, une étude par méthodes géophysique à été effectuée par le **CRAAG (Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique)** pour le compte de l'agence nationale des barrages(ANB). La compagne de géophysique a fait appel à trois méthodes : la sismique réfraction, la méthode des résistivités et la méthode VLF dans le but de déterminer la lithologie des différentes formations et leur géométrie, la profondeur du substratum, l'épaisseur des zones altérées et les caractéristiques des zones d'emprunt.

✓ (Nindaoua Savadogo et al., 2011) ont réalisé une étude géophysique du tracé de la digue du futur barrage de Yakouta au Burkina Faso. Complémentarité des méthodes électriques et radar en milieu dunaire. Cette étude géophysique a permis de préciser la géométrie des terrains en présence ; terrains dont la nature a été identifiée par les premiers sondages de reconnaissance. La complémentarité des techniques utilisées permet de retenir les éléments principaux suivants: la prospection électrique et électromagnétique en traîné permet une implantation optimale des mesures électriques 2D (figure1.6).

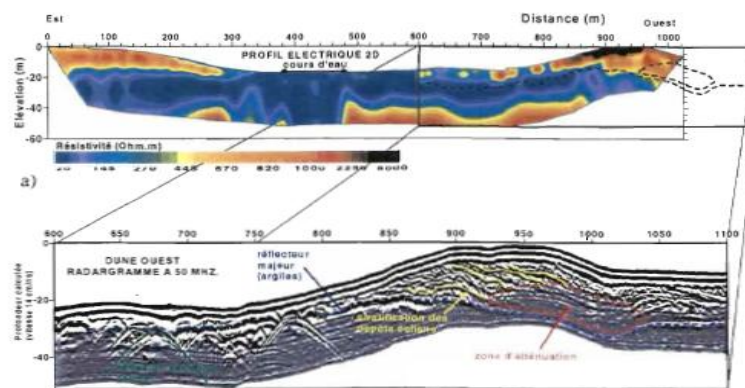


Figure 1.6 : Coupe à 2D de la région.

➤ **Surveillance sismique** : La Géophysique intervient dans l'ensemble des risques sismiques majeurs (tremblements de terre) ou mineurs (liés aux grands ouvrages d'art: barrages, ponts,..) par l'implantation de réseaux de surveillance fixes et/ou mobiles. La principale discipline est la sismologie.

✓ (Sokhal, 2014) a mené une étude détaillée sur le séisme de Zemmouri du 21 Mai 2003 (Mw=6.8) qui a secoué l'Atlas tellien d'Algérie et a causé des dégâts importants dont l'effet est ressenti sur un rayon de 150km. Des effets de surface sont observés, notamment l'élévation de la cote, liquéfaction du sol,...etc. Lors de cette étude, il a été présenté une inversion conjointe des anomalies gravimétriques et des temps d'arrivées enregistrés dans la région épiscopentrale de Zemmouri-Boumerdes. Les données sismologiques ont été recueillies par un réseau de 15 stations permanentes et temporaires implantées dans la dite zone épiscopentrale après le choc principal. C'est ainsi qu'un ensemble de 557 événements locaux ont été enregistrés et traités. Les données gravimétriques résultent d'un levé gravimétrique réalisé dans la région d'Alger-Boumerdes-Zemmouri. Un modèle de vitesse obtenu par tomographie sismique local a été utilisé pour construire un modèle gravimétrique 3D initiale en utilisant une relation linéaire de densité-vitesse (loi de Birch). Pour obtenir le modèle de vitesse-densité, qui combine les deux types d'observations, un programme a été mis en exploitation d'inversion conjointe développé par (Tiberi et al., 2003).

➤ **Domaine du Génie civil** : La Géophysique est indispensable dans l'étude des sols pour le bâti ou la réalisation des grands ouvrages (tracé d'autoroutes et de pipe-line, pistes d'aéroports, ponts,...etc). Les principales disciplines sont : toutes les méthodes électriques et électromagnétiques de surface, la Micro gravimétrie et la Sismique.

✓ (Hammoum et al., 2014) ont utilisée la résistivité électrique pour le dimensionnement d'un ouvrage de drainage. La présente étude rentre dans le cadre de l'expertise relative à la remontée des eaux souterraines au niveau d'une plate-forme de construction de bâtiments à usage d'habitation dans une école de formation, située à l'ouest d'Alger (Algérie) (figure1.7). Pour assurer la protection de la zone d'habitations, il est nécessaire de dimensionner et d'implanter un système de drainage efficace. La prospection géophysique par la méthode électrique (contrastes de résistivités) a permis de distinguer avec précision ces différents niveaux. Dans le but de vérifier la continuité horizontale de la distribution de faibles valeurs de résistivités du niveau de la nappe d'eau souterraine, deux profils d'imagerie électrique ont été réalisés. Les résultats de la campagne géophysique ont permis de déterminer les

caractéristiques du système de drainage à projeter, son site d’implantation, son orientation optimale (perpendiculaire a l’écoulement souterrain) ainsi que sa profondeur d’ancrage.

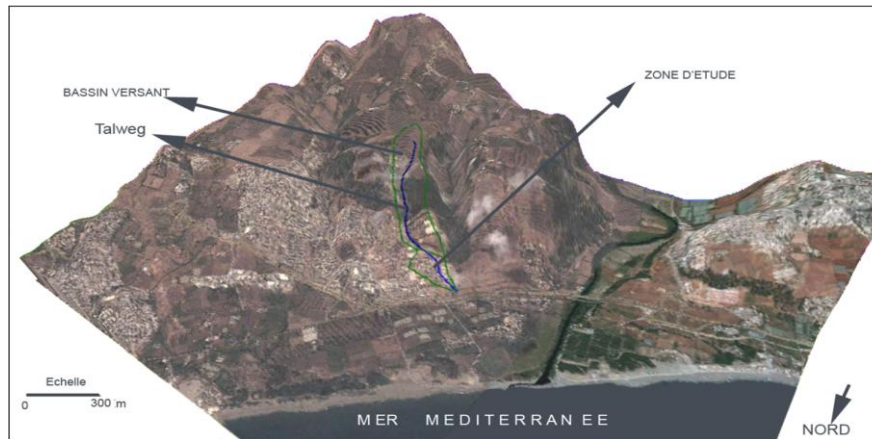


Figure 1.7 : Localisation du site affecté par les eaux souterraines (Ech.1/25,000_).

✓ (Hammoum et al., 2012) ont mené une étude géophysique (résistivité électrique) sur un glissement de terrain au niveau du barrage de tamellaht. La présente étude entre dans le cadre de l’expertise en rapport avec la problématique posée par les glissements de terrain au niveau du chantier du barrage de Tamellaht, Tissemsilt, Algérie. Le glissement de terrain de type circulaire est localisé essentiellement en rive gauche. La prospection géophysique par la méthode électrique (figure1.8) été réalisé dans le but de déterminer le plan de rupture et l’étendue du cercle de glissement. Cette vision globale du sous-sol permet de comprendre l’évolution géomorphologique de la rive gauche du barrage et de dépasser la vision des déplacements en surface.

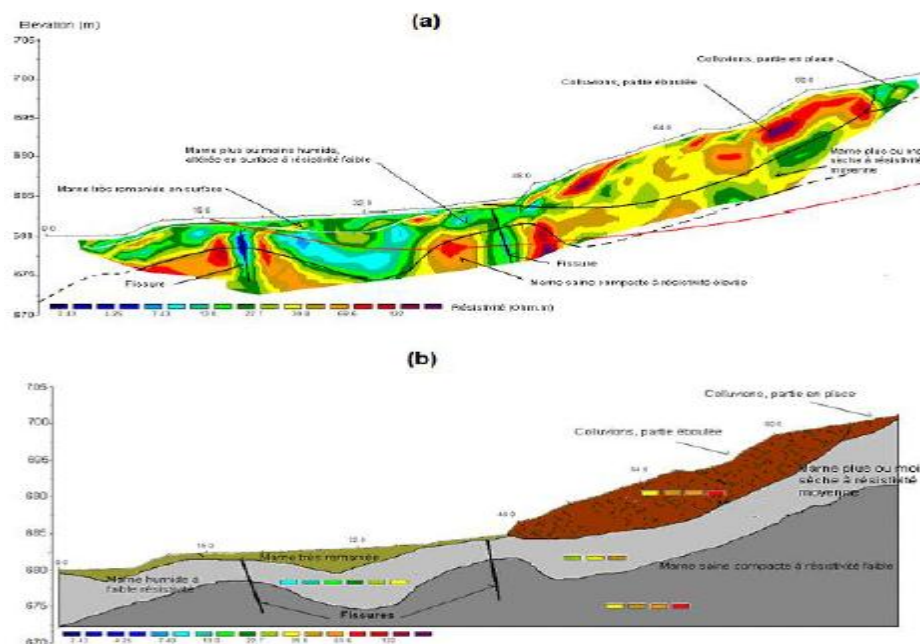


Figure 1.8 : Répartition des résistivités (a) et lithologique (b) sur le profil 2 à partir des mesures de résistivité électrique.

- ✓ (Sanchez et al., 2007) ont réalisés l'imagerie géophysique d'un glissement de terrain alpin. L'étude du glissement de terrain de Laval est situé sur le site du CEMAGREF de Draix (Alpes-de Haute-Provence). Des données de résistivité électrique et de vitesses sismiques recueillies par une équipe du BRGM ont été traitées (figure 1.9). Le but de cette étude est d'appliquer des techniques d'imagerie géophysique afin de déterminer la structure de glissements de terrain et d'estimer certains paramètres contrôlant leurs dynamiques. Les attributs géophysiques étudiés sont la résistivité électrique (ρ) des sols ainsi que les champs de vitesses des ondes sismiques P (V_p) et S (V_s) (figure 1.10).



Figure 1.9 : Localisation et photo de la zone de glissement, avec positionnement des profils.

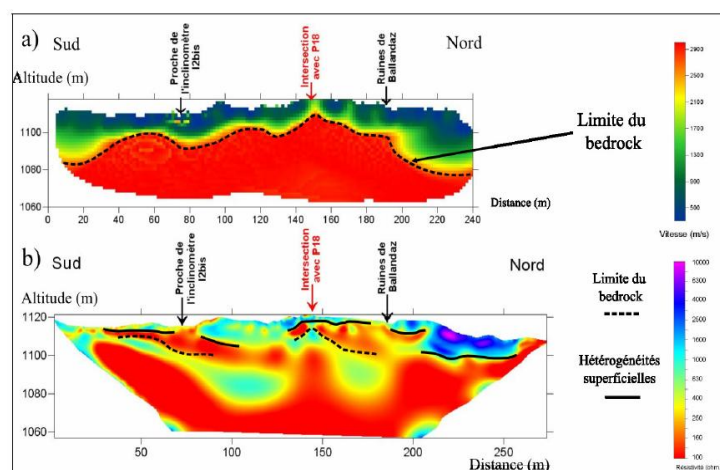


Figure 1.10 : Profil P19 en sismique a), et en résistivité électrique b) (Acquis avec le dispositif pôle-dipôle).

✓ (Ghenifi, 2011) a mené une analyse de l'état de stabilité actuel de la zone du marché de Ain El Hammam. Il s'est basé sur les observations de terrain et l'exploitation des différentes études géotechniques réalisées sur le site depuis l'apparition du mouvement, notamment celle du BET GÉOMICA. Pour cela, il a adopté les points suivants :

Une étude de la géologie régionale et locale fondée sur des travaux antérieurs, et une géologie de la zone du glissement basée sur les données de sondages carottés, les données de la géophysique, et les observations sur le site.

✓ (Laoufi et al., 2011) ont traité l'apport de l'imagerie électrique et de l'électromagnétique slingram à l'étude d'un glissement de terrain : cas du glissement de Takerietz (W. Bejaia). Les méthodes géophysiques de sub-surface telles que la méthode électromagnétique et l'imagerie électrique, (figure 1.11) sont un bon outil pour réaliser le suivi des glissements de terrain et surtout pour orienter la prospection géotechnique par l'implantation des carottages, des essais in situ et d'une surveillance du glissement. Le caractère non destructif des méthodes géophysiques et leur rapidité d'exécution présentent un attrait non négligeable pour les bureaux d'études qui interviennent dans l'aménagement et l'urbanisme.

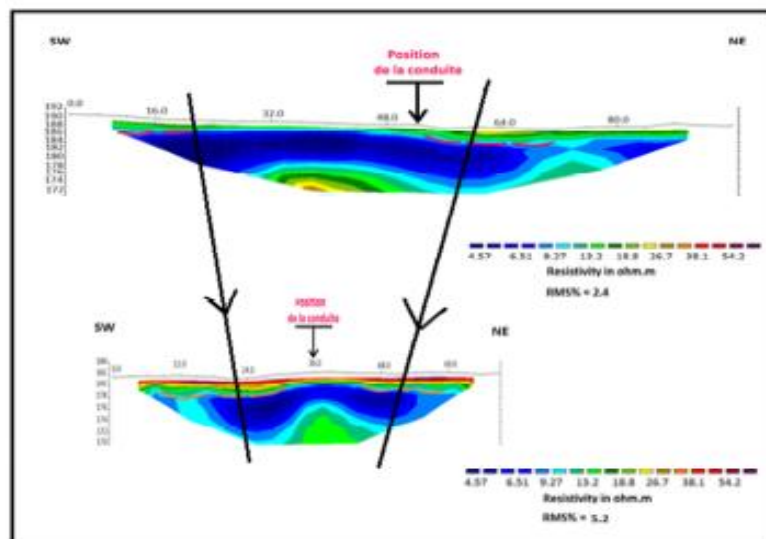


Figure 1.11 : Profils d'imagerie électrique avec surface de glissement.

➤ **Environnement :** La Géophysique est utile dans les études de pollutions naturelles et/ou artificielles et d'aménagement du territoire. Les principales disciplines sont : toutes les méthodes électriques et électromagnétiques de surface, la Micro gravimétrie, la Radiométrie et la Sismique.

✓ **(Ranieri et al.,)** ont mené une étude sur une zone située dans la plaine de Portovesme (Sardaigne sud-occidentale), où à partir du début des années 70 plusieurs industries chimiques, sidérurgiques et électriques ont été actives (figure 1.12). Actuellement, des phénomènes de pollution de l'air, des sols et des eaux y sont considérables et étendus. Toute la zone a été déclarée « zone à risque ambiant élevé ». Le but de cette étude est de connaître l'extension de la pollution dans les deux aquifères et de quelle phase du processus de production d'alumine dérive la pollution, des prospections géophysiques régulièrement réparties ont été mises en œuvre dans un établissement industriel qui utilise le processus Bayer. Ces prospections ont consistés à : 120 sondages FEM en utilisant l'appareil EM-34 (Geonics) avec trois espacements inter-bobines (10, 20 et 40 m), dans les deux configurations (bobines coplanaires horizontales et verticales). une série de 10 sondages TDEM avec le TEM-FAST (AEMR) et une boucle coïncidente de 25 m de côté ; 3 tomographies de résistivité et dépolariation provoquée, avec l'appareil Syscal (Iris Instruments).



Figure 1.12 : Zone industrielle de Portovesme.

1.4. Choix des méthodes à adopter

Il n'y a pas de règles absolues dans le choix des méthodes à adopter, car les problèmes qui se posent dans la nature ne sont d'une part jamais simples et d'autre part jamais suffisamment bien définis en ce qui concerne la succession la nature, les constantes physique des matériaux du sous-sol, la stabilité ou la linéarité des paramètres.

Dans la pratique, le choix des méthodes géophysiques à adopter s'appuie, en général, sur d'autres considérations liées, en dehors de certaines conditions matérielles indépendantes du sous-sol, aux possibilités physiques des diverses méthodes devant les problèmes géologiques posés, et à la recherche du meilleur rendement économique possible dans un cadre budgétaire donné. Pour cela on propose le tableau (1.4) récapitulatif d'utilités des méthodes géophysiques suivant **(Mary et al., 1998)**.

Tableau 1.4 : Utilité des différentes méthodes géophysiques (Mary et al., 1998).

Problème	Réfract	Réflex	Résist	ElMag	Radars	Gravi	Mag
Structures Géologiques	+	+	+	o	o	+	+
Aquifères	o	o	+	+	+	x	x
Décharges	o	x	+	+	+	o	+
Contaminants	x	x	+	+	o	x	x
Glissement de terrain	o	x	+	x	o	o	x
Archéologie	o	x	+	+	+	o	+
Socle	+	+	+	o	+	+	+
Compétence	+	+	x	x	x	x	x
Fuites	o	o	+	+	+	x	x
Cavités	o	o	+	o	+	+	+
Tuyaux-Métaux	x	x	o	+	o	x	+

+ : bon résultats ;

0 : passable ;

X ; utile .

1.5. Déroulement d'une campagne de géophysique

Une campagne de géophysique comporte toujours cinq phases :

- la conception ;
- la mesure sur le terrain ;
- le traitement des mesures ;
- l'interprétation géophysique des mesures ;
- l'interprétation en termes du problème de reconnaissance à résoudre.

1.6. Limites d'application des prospections géophysiques

La géophysique ne peut pas fournir d'indications très détaillées. Les principes utilisés ne permettent en effet d'aboutir qu'à une image globale de la disposition des terrains (lorsqu'ils sont différenciés). Ces méthodes, bien qu'elles fassent parfois apparaître une anomalie localisée, ne peuvent la définir avec une grande précision. Il en va de même pour les structures complexes présentant des accidents ou des variations de nature de terrain à petite échelle. Les anomalies ont plus de chance d'être détectées si elles sont proches de la surface, leur influence sur la mesure devenant négligeable à grande profondeur. Elles sont également d'autant mieux caractérisées que le contraste de la propriété physique mesurée est grand. D'une manière générale, la géophysique n'est à utiliser que pour des investigations à une profondeur maximale de l'ordre de un à trois cents mètres, étant donné le degré de précision

nécessaire (des méthodes peuvent descendre plus bas, mais la précision est souvent largement insuffisante alors). Chaque méthode a des zones interdites (souvent liées au bruit ambiant ou à la sécurité). La prospection géophysique doit être systématiquement étalonnée (**Faochard et al., 2004**).

1.7. La fiabilité des résultats obtenus à partir des méthodes géophysiques

Elle dépend énormément de la qualité de la prestation fournie par l'opérateur ayant effectué l'étude. Il faudra en outre s'assurer du fait que :

- ✓ les méthodes choisies sont les mieux adaptées au problème posé.
- ✓ les prestations géophysiques seront exécutées suivant les règles de l'art.

les résultats seront présentés en indiquant clairement les limites de l'incertitude (**Faochard et al., 2004**).

1.8. Avantages de la prospection géophysique

La prospection géophysique présente le triple avantage :

- ✓ D'être rarement destructive ; aucune installation de chantier n'est nécessaire et ne subsiste pour quelques méthodes les trace du passage de l'équipe sur terrain.
- ✓ D'être rapide ; suivant les difficultés et la longueur de la prospection la campagne nécessite de quelques jours à deux semaines.

D'être peu coûteuse par rapport au forage, ce qui en fait un excellent complément pour donner des indications entre forage, pour toutes des raisons, il ya intérêt à utiliser la prospection géophysique chaque fois que le problème posé sy prête. Les résultats ainsi obtenus rapidement et meilleure organisation et une réduction des prospections coûteuses ultérieures (**Faochard et al., 2004**).

Conclusion

Ce chapitre illustre les généralités sur la géophysique et les différentes méthodes les plus connues de la géophysique qui peuvent être utilisées en génie civil. Ces méthodes ont été appliquées par les différents auteurs et sur les différents domaines qu'on a déjà cités. Aussi nous avons montré le déroulement d'une campagne géophysique et la limite d'application des prospections. Chaque méthode a ses paramètres et ses particularités et sa précision. Dans le cadre de notre étude nous avons opté, pour l'imagerie électrique et les méthodes sismiques. Ces méthodes seront donc le but du chapitre 2 que nous allons largement exposer pour la suite de ce chapitre.

Chapitre 2

Description des méthodes géophysiques utilisées

Introduction

Depuis une quarantaine d'années, la géophysique a peu à peu acquis une place importante parmi les méthodes utilisées en prospection. Elle est la seule méthode qui permet d'obtenir, de manière non destructive, des informations sur les structures présentes dans le sous-sol qu'aucun indice ne signale en surface. Notre objectif est de montrer l'extraordinaire source d'informations que sont les images géophysiques et le renouvellement des problématiques de recherche qu'induit l'utilisation de ces méthodes.

Certaines méthodes de grand rendement et capables de déterminer les grands traits de la structure géologique sont la sismique réfraction et les méthodes électriques particulièrement mises en œuvre dès les premiers stades de l'étude d'un projet (faisabilité géotechnique). Ces mesures sont réalisées quasi obligatoirement pour les études de tracés linéaires (routes, glissement de terrain, voies ferrées...etc).

Ce chapitre à caractère bibliographique, recense d'une manière détaillée les méthodes utilisées, pour l'analyse de glissement de terrain au niveau des villages Echetal et Ouled Ali commune Ait Smail et Teskriout dans la Wilaya de Bejaia.

Ce pendant, nous avons uniquement utilisé dans le cadre de ce travail de fin d'études la méthode sismique et la méthode d'imagerie électrique dans le cadre de la partie pratique.

2.1. Imagerie électrique

L'imagerie électrique est un outil de prospection des sols qui permet d'obtenir à partir de la surface du sol une image représentant les formations géologiques souterraines. Cette représentation imagée traduit des mesures de résistivités. L'imagerie électrique est basée sur la détermination des mesures de résistivités apparentes. La résistivité vraie de sous-sol est obtenue par l'application de la méthode de l'inversion. Cette méthode est plus adaptée dans les zones difficiles d'accès pour les engins et elle permet également d'effectuer des essais non destructifs.

2.1.2. Principe de l'imagerie électrique

Le principe de cette méthode est illustré par la (figure 2.1) ci dessous. Elle consiste à injecter un courant électrique dans le sol au moyen de deux électrodes d'injection A B et de mesurer la différence de potentiel induite à l'aide de deux autres électrodes M et N.

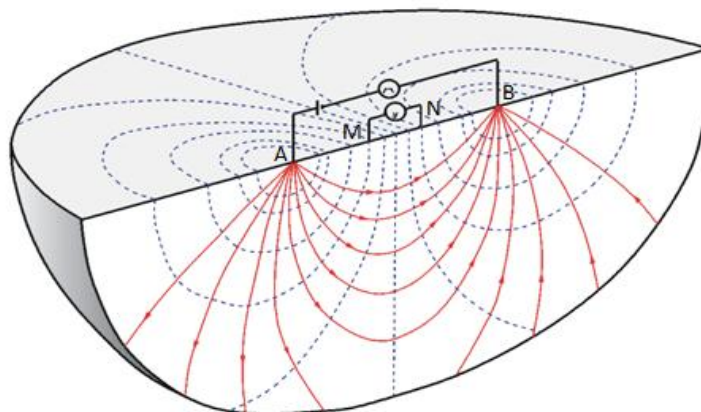


Figure 2.1 : Prospection électrique par courant continu : schéma de principe.

2.1.3. But de la méthode

Le but de la méthode est d'imager le sous-sol sous forme d'une carte des résistivités des structures étudiées afin de déterminer les anomalies existantes est de caractériser des fractures détecter des cavités ou des corps gelés, imager des intrusions ou des migrations d'eau salée dans le sol, détecter la présence de vestiges archéologiques, étudier la structure des sols et de la proche surface ou encore délimiter des décharges et déceler des migrations de polluants dans le sol.

Les méthodes électriques ont pour but la détermination de la conductivité électrique σ exprimée par équation (2.1) des structures étudiées. En prospection électrique par courant continu, le paramètre de résistivité électrique ρ (en Ωm), est l'inverse de la conductivité σ , est plus couramment utilisé (Illoul, 2013).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.1)$$

2.1.4. Résistivité électrique

La résistivité électrique ρ est la capacité d'un milieu à s'opposer au passage d'un courant électrique. Ce paramètre varie fortement dans la nature et elle dépende de nombreux paramètres physiques tel que : la qualité du fluide, la saturation, la porosité ou encore la température du milieu étudié. Dans la nature, la gamme de résistivité est très étendue, variant de moins de 1 Ωm à plusieurs milliers d' Ωm . Elle peut être déduite à partir de la résistivité apparente donnée par la formule suivante :

$$\rho_{\text{app}} = k \frac{\Delta V}{I} \quad (2.2)$$

Où :

ρ_{app} : résistivité apparente (en Ohm.m) ;

ΔV : différence du potentiel (en Volt) ;

I : intensité du courant injecté (en Ampère) ;

K : coefficient géométrique dépendant de la disposition des électrodes de courant (A et B) et de potentiel (M et N) (en mètre).

$$K=2\pi\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)^{-1} \tag{2.3}$$

• **Propriétés électriques des roches**

La méthode électrique donne une image de la distribution de résistivité dans le sous-sol. Pour convertir cette image en un modèle géologique, il est nécessaire de connaître la résistivité électrique pour différents matériaux géologiques (figure 2.2).

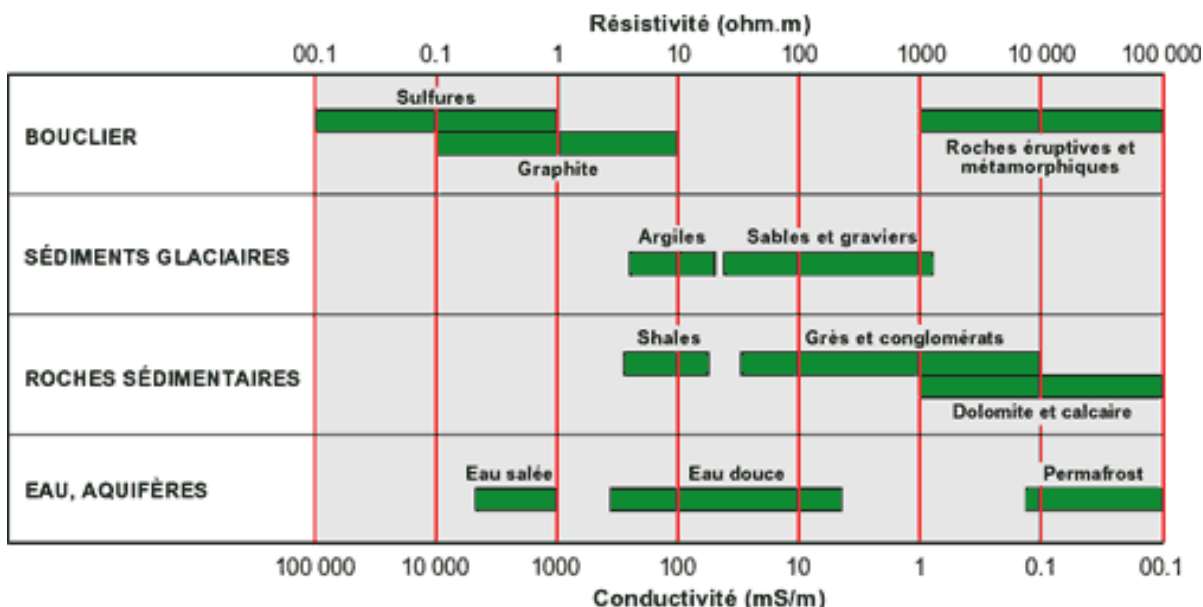


Figure 2.2 : Gamme des résistivités des principaux sols terrestres (Laoufi et al., 2011).

2.1.4.1. Sondage électrique

La réalisation d'un sondage électrique consiste à réaliser des mesures de résistivité apparente ρ_{app} en faisant varier l'écartement des électrodes de courant et de potentiel (les dimensions du dispositif de mesure) par rapport à un point central fixe (figure 2.3). Les différentes mesures fournissent alors une courbe de sondage de la résistivité apparente en fonction des dimensions du dispositif (pseudo-profondeur). Cette courbe est ensuite interprétée en considérant que les variations de résistivité électriques dans le terrain étudié ne se font qu'en une dimension (hypothèse 1D) pour obtenir la variation de résistivité en fonction de la profondeur.

Cette technique, efficace et simple à mettre en place, fournit une information en profondeur à partir d'une interprétation 1D des mesures. Elle est donc très sensible aux variations latérales de résistivité du sous-sol, qui ne sont pas prises en compte lors de l'interprétation. Elle n'est donc réservée qu'aux terrains tabulaires ne présentant pas de variations de résistivité significatives à l'horizontale dans la zone étudiée. Pour étudier les milieux à deux (ou trois) dimensions, le panneau électrique (ou le couplage de plusieurs panneaux) est plus approprié (Beddou, 2012).

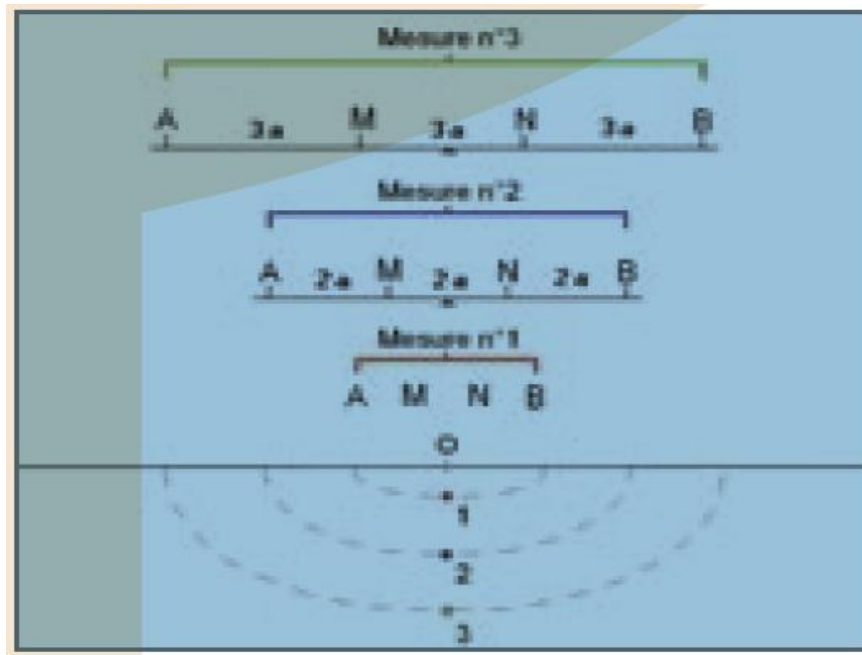


Figure 2.3 : Principe d'un sondage électrique (dispositif Wenner).

2.1.4.2. Panneau électrique

Le panneau électrique (appelé également imagerie de résistivité électrique ou tomographie de résistivité électrique) correspond à une succession de sondages électriques réalisés les uns à côté des autres. Pour cela, un réseau d'électrodes est installé le long d'un profil rectiligne avec un espacement constant a (figure 2.4), choisi de façon à optimiser la longueur du profil, la profondeur d'investigation et la résolution désirée (Chapellier, 2000). Les mesures sont présentées sous forme de pseudo-section de résistivité apparente en fonction de la position le long du profil et de la pseudo-profondeur.

Ces deux techniques sont classiquement utilisées pour définir les structures et la géométrie du milieu souterrain. Leur simplicité et leur faible coût les rendent populaires en milieu côtier (Vouillamoz et al., 2003).

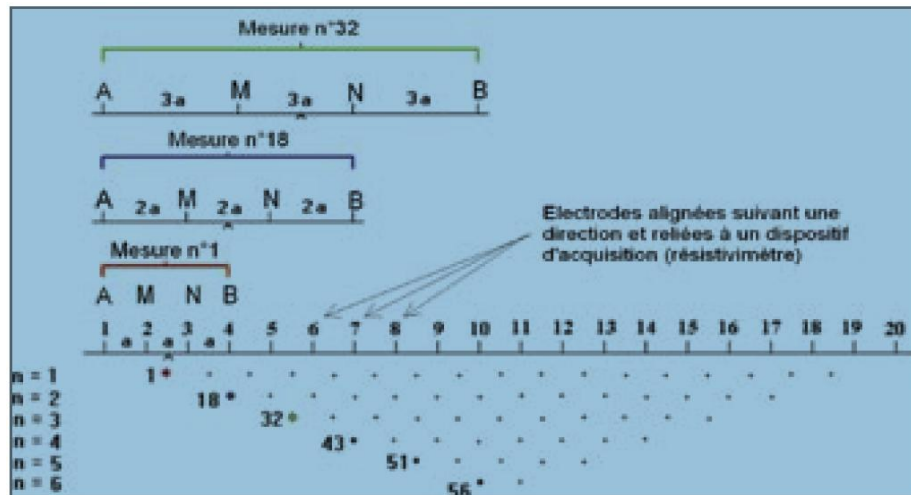


Figure 2.4 : Principe d'un panneau électrique (dispositif Wenner), modifié d'après Loke (2004).

2.1.5. Différents dispositifs utilisés

Il existe une gamme de dispositifs géométriques qui se différencient par l'écartement des électrodes et par la position respective des électrodes d'émission AB et de réception MN. Chaque dispositif est caractérisé par une certaine profondeur d'investigation et un certain pouvoir de résolution. Sans rentrer dans le détail. Parmi les plus communs, on rencontre les dispositifs suivants :

a -1 Dispositif Wenner

Recommandé pour les structures horizontales, et l'écart inter-électrodes est constant. La profondeur d'investigation et le nombre de points à l'acquisition sont inférieurs à ceux des dispositifs Dipôle-Dipôle et Wenner-Schlumberger, en particulier sur les bords du profil (figure 2.5).

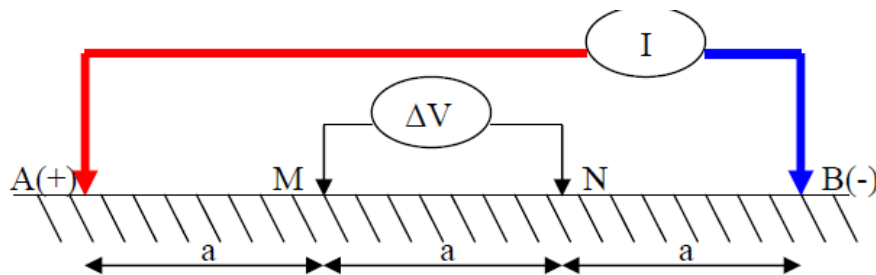


Figure 2.5 : Montage Wenner.

a-2 Wenner-Schlumberger

Recommandé pour les structures horizontales et verticales. La profondeur d'investigation obtenue est plus élevée qu'avec le Wenner, et le nombre de points à l'acquisition est plus important (figure 2.6).

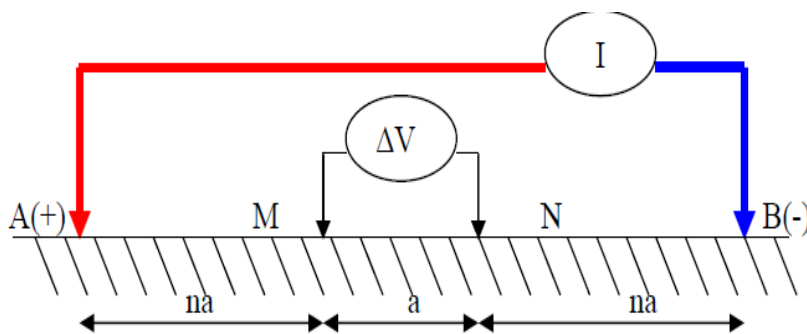


Figure 2.6 : Montage Wenner-Schlumberger.

a-3 Dispositif dipôle- dipôle

Recommandé surtout pour les structures verticales. Sa profondeur d’investigation est plus grande que pour les dispositifs Wenner et Wenner-Schlumberger. Le nombre de points d’acquisition est également plus important (figure 2.7).

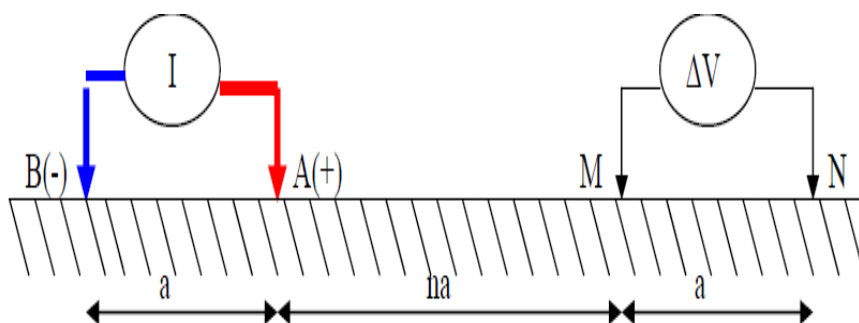


Figure 2.7 : Montage Dipôle-Dipôle.

Le tableau (2.1) récapitule tous les dispositifs utilisés et leur profondeur d’investigation en imagerie électrique :

Tableau 2.1 : Différents dispositifs de l’imagerie électrique.

Configurations	Fact. Géom. (k)	Prof. D’invest.	Remarques - commentaires
Wenner 	$2 \cdot \pi \cdot a$	0.11 x 3a	Dispositif classique de trainé Sensible aux structures horizontales et verticales.
Schlumberger 	$\frac{\pi \cdot (L^2 - l^2)}{2 \cdot l}$	0.125 x 2L	Dispositif pour le SEV (en pratique classiquement x=0, et on doit vérifier que L > 5.l)
Dipôle dipôle 	$\pi \cdot an(n+1)(n+2)$	0.195 x (n+2)a	Bonne résolution, 'faible' profondeur d’investigation, sensible aux bruits de mesure
Pôle-dipôle 	$\frac{2 \cdot \pi \cdot ab}{b - a}$		Intermédiaire aux pôle-pôle et dipôle-dipôle
Pôle-pôle 	$2 \cdot \pi \cdot a$	0.35 x a	Résolution 'moyenne', bonne profondeur d’investigation.

Le choix du (ou des) dispositif(s) à employer pour l'étude d'un terrain repose donc sur :

- le type de structure que l'on cherche à définir (une stratification horizontale ou un contact vertical par exemple) ;
- la profondeur de cette structure ;
- les caractéristiques du profil (longueur, nombre d'électrodes) ;
- le bruit ambiant.

2.1.6 Présentation de l'appareil utilisé

L'appareil d'acquisition de données utilisé par la société d'études et d'Ingénierie African Geosystem Company (AGC) dans ses prospections géophysique par imagerie électrique est le Résistivimètre Syscal junior R1 d'Iris Instrument (figure 2.8).



Figure 2.8 : Façade supérieure du Résistivimètre Syscal junior R1 (AGC, 2012).



Figure 2.9 : Façade de branchement du Résistivimètre.

Le résistivimètre (figure 2.8) est composé :

- ✓ des électrodes au nombre 48 (figure 2.10 a);
- ✓ deux câbles multi électrodes de longueur égale 120 m chacun qui permettent de relier les électrodes au SYSCAL (figure 2.9) ;

- ✓ un câble de communication type USB d'iris Instrument (figure 2.10 b) ;
- ✓ unité principale SYSCAL illustrée par la figure ci-dessus muni d'une source d'alimentation interne de 100 W ;
- ✓ une batterie externe;



Figure 2.10 : Câbles multi électrode.

-les câbles à pince permettent de relier les électrodes aux câbles (figure 2.10)



Figure 2.11 : Connexion d'une électrode au câble multi électrode.

2.1.7. Différent étapes à suivre pour effectuer une prospection électrique et logiciels utilisés

1-La veille, il faut charger le protocole d'acquisition approprié sur le SYSCAL. Le logiciel de transfert utilisé est *Electre II*.

2-La mise en place du dispositif : les électrodes doivent être placées le long d'une ligne droite avec une précision ± 5 cm et, leur enfoncement est d'environ 20 cm et de garder le sol humide autour d'elles. L'appareil doit être placé dans un endroit sec, et le protéger du soleil en cas des températures élevées car l'appareil s'arrête si la température interne devient trop élevée.

3-Procédure d'acquisition : une fois le dispositif mis en place et toutes les connexions faites :

- a) Allumer le SYSCAL et vérifier l'état de la batterie système : touche BATT.
- b) Sélectionner une séquence de quadripôles : touche E.ARRAY.
- c) Introduire les paramètres AREA et LINE via la touche SPACING (ces paramètres seront présents dans les fichiers résultats et permettront ainsi de repérer les profils de mesure plus facilement).
- d) Vérifier les connexions des sorties des câbles avec leur électrode et le bon fonctionnement de chacune d'entre elles : touche RS CHECK.
- e) Sélectionner deux quadripôles (un à faible espacement entre AB et MN, et l'autre à grand espacement) afin de vérifier les niveaux des voltages en réception : cette opération est très importante pour assurer la qualité des données : touche MONITOR.
- f) Éventuellement modifier le paramétrage de la mesure (durée d'injection, stacks) avant de lancer l'acquisition et également sélectionner la valeur de tension de réception souhaitée (VMN) : touche SET UP.
- g) Lancer la mesure : START. En mode Multi-Electrode, le stockage des données s'effectue automatiquement.
- h) Enfin de mesure, vérifier les valeurs de quelques points de résistivité obtenues : touche RESULT.
- i) Éteindre l'appareil, les données sont en mémoire.

4-Interprétation des résultats : Une fois les données sont acquises, leur transfert vers l'ordinateur se fait à l'aide d'un logiciel *Prosys II*. Le résultat du terrain est représenté sous forme d'une image appelée panneau électrique. Il donne une idée très approximative de la répartition des résistivités dans une structure du sol et nous permet de tirer quelque hypothèse sur la distribution des résistivités vraies du sous-sol.

Un panneau électrique comporte 3 coupes (figure 2.12) ; la première représente les résistivités apparentes mesurées « *pseudo-section* ». La troisième coupe représente les résistivités vraies ou « *le modèle* » du sous-sol. La deuxième coupe représente les résistivités apparentes calculées « *pseudo-section calculée* » ; le logiciel d'inversion *Res2dinv* calcule à partir des *de*

modèle (troisième coupe) les résistivités apparentes calculées en injectant un courant électrique fictif. Ensuite, Le logiciel compare la pseudo-section mesurée et celle calculée et fournit un pourcentage d'erreur (*RMS*) entre les deux. Cette erreur doit être la plus faible possible, ce qui permet de valider le modèle. Pour cela, il faut choisir les paramètres d'inversion de façon à minimiser l'écart entre la pseudo-section mesurée et calculée.

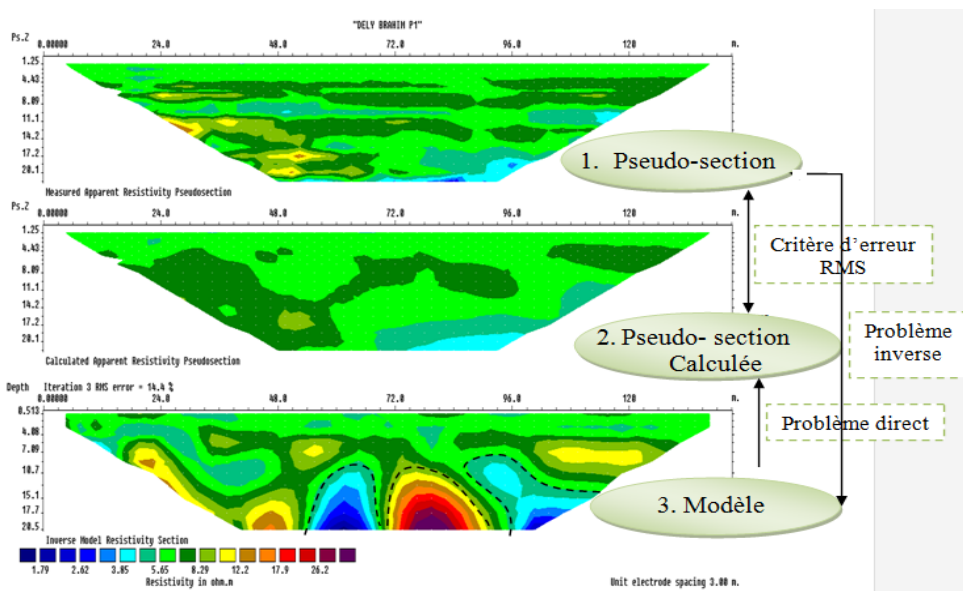


Figure 2.12 : Etapes de la méthode d'inversion en prospection électrique.

Les étapes d'une campagne de prospection électrique par la technique de tomographie électrique sont illustrées par la (figure 2.12).

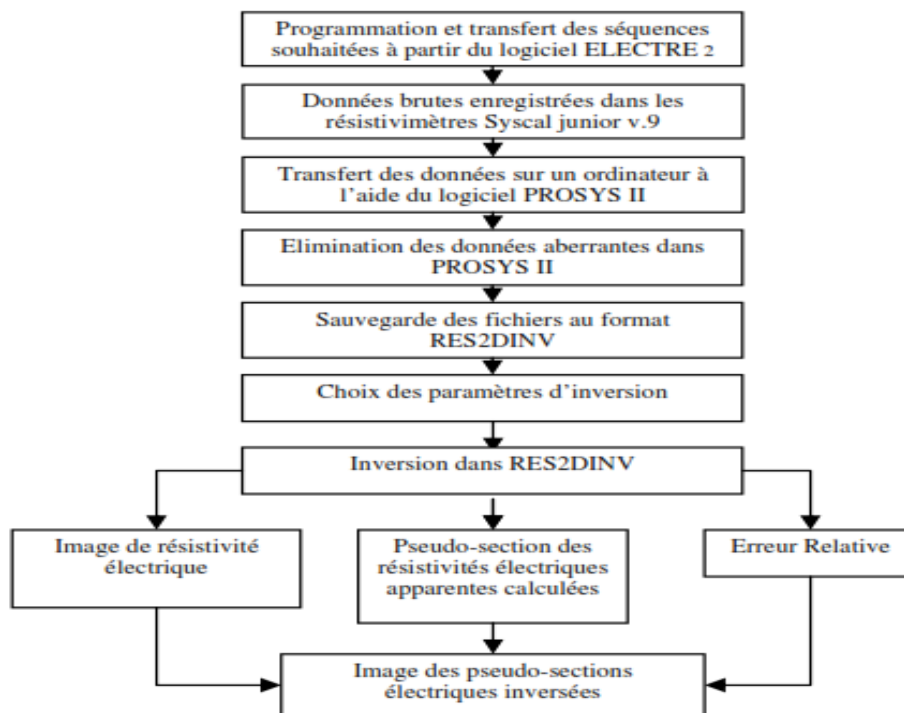


Figure 2.13 : Les étapes d'acquisition et de traitement des données.

2.2. Méthode sismique

Les méthodes sismiques permettent de distinguer des couches possédant un contraste de vitesse/densité, elle fait très importante. Les roches ou les masses en glissement ont pratiquement toujours des vitesses sensiblement plus lentes que le substratum en place non tectonisé. Par contre, seule une bonne connaissance de la géologie locale peut permettre au géophysicien d'attribuer une vitesse à une unité lithologique car, dans certains cas, deux faciès très différents peuvent posséder la même vitesse sismique, comme par exemple une moraine très consolidée et un substratum rocheux altéré (**Beddou, 2012**).

La méthode sismique est la méthode la plus utilisée en raison de :

- ✓ sa grande précision ;
- ✓ son excellente résolution ;
- ✓ sa pénétration profonde.

2.2.1. Domaine d'utilisation

- L'exploration pétrolière (essentiellement).
 - Hydrogéologie (recherche de l'eau).
 - Génie civil.
 - Exploitation minière (peu ou pas du tout)
- } **Importante utilisation**

2.2.2. L'équipement utilisé

Le matériel utilisé pour la réalisation de nos profils sismiques est le SUMMIT X STREAM Pro de DMT – Allemagne (figure 2.13).



Figure 2.14: Summit X Stream Pro (DMT) (AGC-2012).

Les accessoires utilisés sont les suivants :

- ✓ un câble sismique avec 24 sorties (take out) espacées de 5m ;
- ✓ 24 géophones verticaux de fréquence 10Hz ;
- ✓ un déclencheur (Trigger) avec une extension de 150m ;
- ✓ une alimentation (batterie 12V) ;
- ✓ un marteau ;
- ✓ et une plaque métallique.

2.2.3. Principe de la méthode

Le principe de la méthode sismique est d'envoyer des ondes de type sonore dans le sol et d'enregistrer le retour en surface des ondes directes, réfléchies ou réfractées. Les ondes réfractées sont toujours les premières à atteindre les géophones (figure 2.14). Sur un même enregistrement tous les types d'ondes peuvent être visibles: réfléchies réfractées, ondes P, ondes S, ondes de surface, bruit aérien...ceci explique l'aspect parfois complexe des enregistrements sismiques (Beddou, 2012).

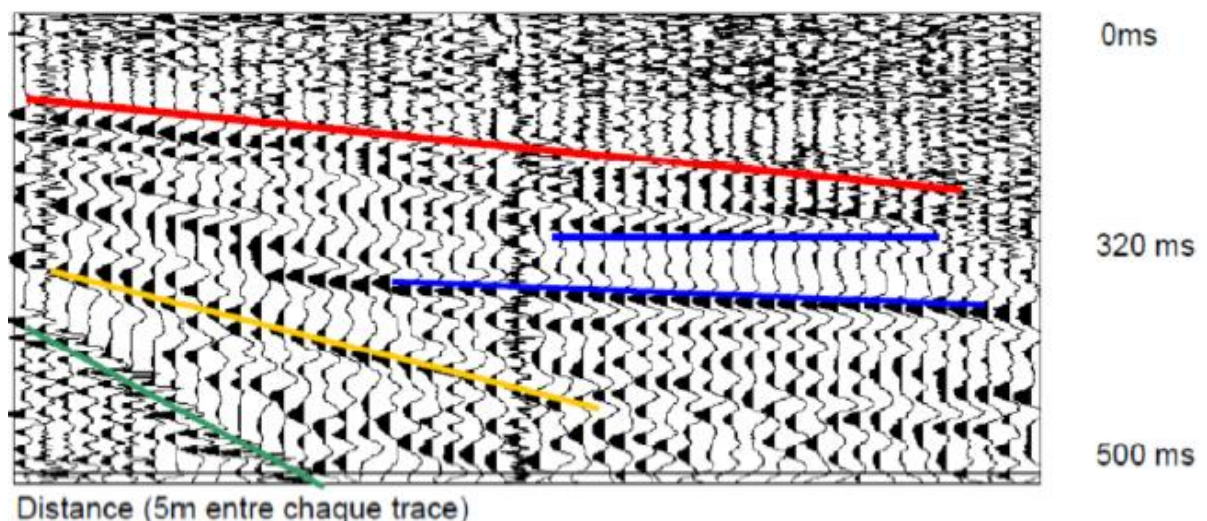


Figure 2.15 : Exemple d'enregistrement montrant de belles réflexions (trait bleu) sous les premières arrivées (trait rouge), en vert l'onde sonore et jaune les ondes de surface (Beddou, 2012).

Il existe 3 Types de sources :

- ✓ sources Explosives (ex : Dynamite) ;
- ✓ chute de poids (ex : Marteau) ;
- ✓ sources Vibratoire (ex : Camions Vibreur).

Dans un milieu homogène, infini, isotrope et élastique deux sortes d'ondes peuvent principalement se propager : les ondes **P** et les ondes **S** = **ondes de volume**.

La première est constituée par les ondes de **compression**, ou encore ondes **longitudinales**, ou ondes **P**, car ce sont elles qui se propagent le plus vite et sont observées en premier sur un enregistrement des mouvements du sol ; le phénomène élastique correspondant est un

phénomène de compression-dilatation du matériau dans la direction de propagation de l'onde (figure 2.16).

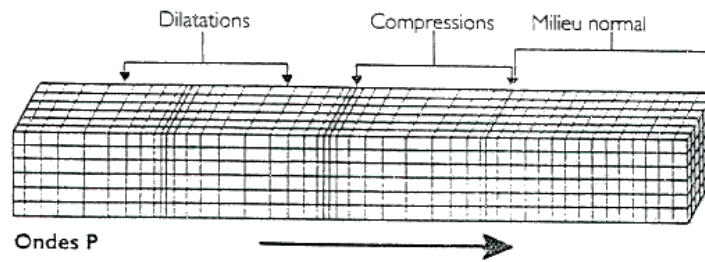


Figure 2.16 : Onde longitudinale P (Illoul, 2013).

La seconde est celle des ondes de **cisaillement**, ou encore ondes **transversales**, ou ondes **S**, car elles se propagent plus lentement que les ondes P (mais plus vite que les ondes de surface) et que leur arrivée est le second événement observé sur un enregistrement des mouvements du sol ; le phénomène élastique correspondant est un phénomène de cisaillement du matériau (sans modification de la masse volumique) dans la direction perpendiculaire à celle de la propagation de l'onde (figure 2.17).

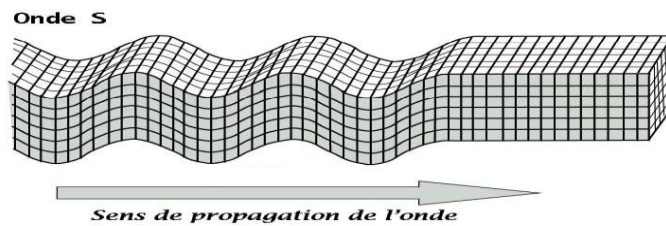


Figure 2.17 : Onde transversal S (Illoul, 2013).

D'autres ondes apparaissent et se propagent le long des surfaces qui agissent comme guide d'ondes. Ces ondes sont appelées ondes de surface ou ondes guidées. Ce sont principalement des ondes de rayleigh et des ondes de love (figure 2.18). Ces dernières ont un mouvement de particules elliptiques dans le plan perpendiculaires à la surface de la direction de propagation.

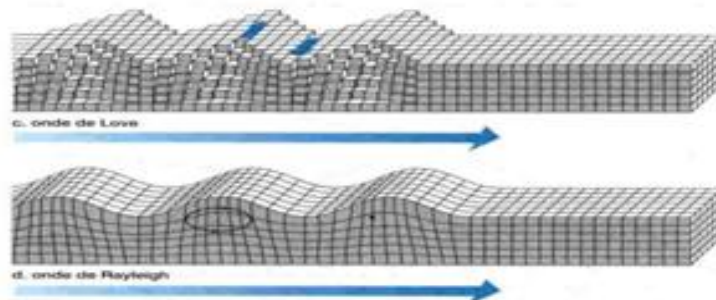


Figure 2.18 : Onde de love onde de rayleigh (Illoul, 2013).

2.2.4. Sismique réflexion

Le principe de la sismique réflexion consiste à envoyer des ondes en profondeur et de capter, aux moyens de géophones, le retour en surface des ondes réfléchies par les discontinuités lithologiques (figure 2.19).

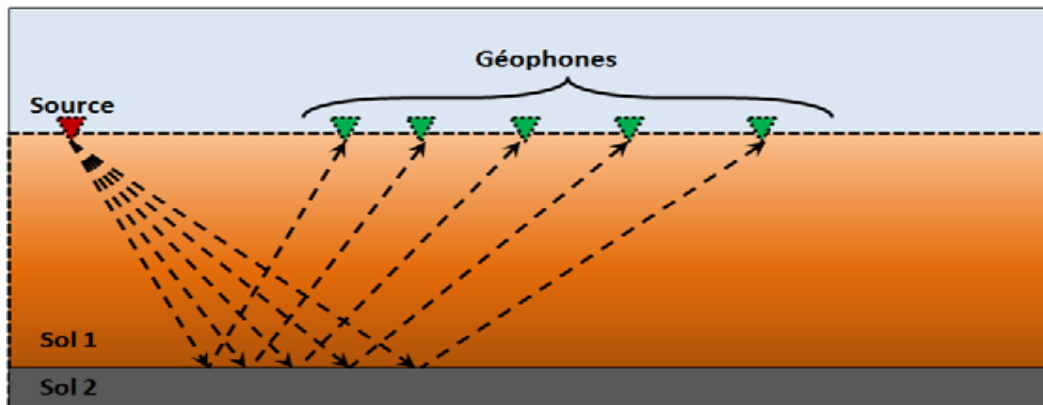


Figure 2. 19 : Propagation des ondes en sismique réflexion (Beddou, 2012).

Par contre, cette méthode exige un plus grand nombre de tirs et des lignes suffisamment longues du fait qu'il faut plusieurs tirs pour que le nombre de traces additionnées soit suffisant. Le matériel employé sur le terrain est souvent le même que pour la sismique réfraction, même si un nombre plus important de géophones actifs est souhaitable (minimum 24 géophones). Le traitement des données se fait entièrement à l'aide de l'ordinateur et nécessite des logiciels spécifiques, relativement peu coûteux mais demandant une bonne connaissance du traitement (Beddou, 2012).

La sismique réflexion qui enregistre les ondes qui se sont propagées par réflexion sur les différentes interfaces dans le sol. Cette approche permet de très grande profondeur d'investigation et une très bonne description des propriétés des sols. Les parcours des ondes à travers différents milieux, variables en propriétés et en géométrie, peuvent rendre complexe l'interprétation des résultats. Ils nécessitent souvent un traitement lourd des données pour aboutir à un résultat de qualité. Le but du traitement est de convertir les données brutes enregistrées sur le terrain en sections sismiques montrant l'agencement des réflecteurs le long des profils. Ces réflecteurs donnent une image des différences de lithologie des couches du sous-sol (Beddou, 2012).

2.2.4.1. Principe de la méthode

La méthode consiste à envoyer dans le sol une impulsion mécanique sous la forme d'un choc (explosif, chute de poids...) qui se propage dans le sol et se réfléchit (figure 2.20) sur les différentes interfaces caractérisées par un contraste d'impédance acoustique entre les couches

(produit de la vitesse de l'onde par la densité du matériau). On place des géophones sur la surface du sol suivant une ligne rectiligne. La distance source-géophones est faible devant la profondeur de l'interface. A chaque géophone (capteur de vitesse particulière), on enregistre le signal sismique en fonction du temps. Celui-ci est formé d'une série d'impulsions réfléchies sur les interfaces successives.

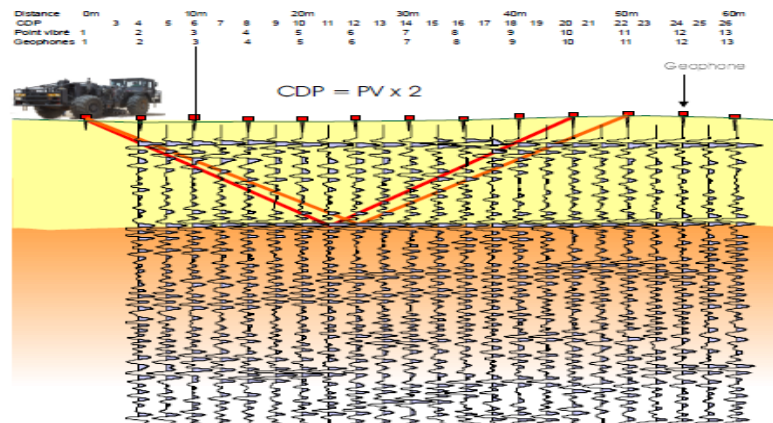


Figure 2.20 : schéma d'acquisition de la sismique réflexion (Beddou, 2012).

L'ensemble du dispositif source-géophones est ensuite déplacé. Les signaux correspondant aux positions des dispositifs sont juxtaposés sur une section sismique ou coupe-temps (figure 2.20 suivante) dans laquelle la coordonnée verticale est la coordonnée horizontale la position de la source et les géophones.

2.2.4.2. Domaine d'application

Le domaine d'application de la sismique réflexion est l'étude de la structure du sous-sol lorsque celui-ci est formé de couches sédimentaires plus ou moins plissées et tectonisées en particulier pour les tracés de tunnels à couverture importante (plusieurs centaines de mètres). Pour des profondeurs plus faibles, quelques dizaines de mètres, elle peut être utilisée aussi pour rechercher à l'intérieur d'une structure sédimentaire monotone des hétérogénéités telles :

- ✓ recherche de cavités ;
- ✓ imagerie de glissement de terrain ;
- ✓ imagerie de la couverture quaternaire ;
- ✓ recherche de gisements de substances utiles ;
- ✓ recherche de réservoir en eau ou de sites hydrothermaux ;
- ✓ génie civil pour l'implantation et les fondations des grands ouvrages: (retenues de barrage, tunnels ou galeries, glissement du terrain, tracé de chemin de fer ou routiers, bâtiment industriel...).

2.2.4.3. Conditions d'application

Comme pour la sismique réfraction, il est nécessaire qu'il existe entre les différentes couches des contrastes d'impédance acoustique (vitesse sismique et/ou densité) permettant d'obtenir de bons réflecteurs pour les ondes sismiques. Lorsque les couches présentent des pendages supérieurs à 60° , les réflexions des ondes sont déviées et ne retournent pas en surface. Cela constitue donc une contre-indication majeure à l'emploi de la sismique réflexion (Beddou, 2012).

2.2.4.4. Organisation et déroulement d'une campagne réflexion

2.2.4.4.1. Conception

La conception de la campagne consiste d'abord à vérifier que la méthode est bien indiquée le sous-sol contient des réflecteurs sismiques caractérisés par des contrastes d'impédance acoustique, la structure n'est pas trop complexe, les pendages ne sont pas trop grands. Avec toutes les informations dont on peut disposer (profondeur des couches, vitesses dans les différents matériaux), il peut être utile de procéder à une modélisation préalable et de calculer des signaux sismiques synthétiques.

2.2.4.4.2. Paramètre d'acquisition

On choisit ensuite les paramètres d'acquisition : type et propriétés de la source, en particulier du point de vue du type d'ondes émis (**P** ou **S**) et de son contenu fréquentiel en fonction des profondeurs d'investigation et résolutions visées ; nombre et types de géophones par point de mesure (trace), écartement des traces, pas d'échantillonnage des signaux, distances entre dispositifs sources géophones successifs... Au moment de mesurer, on évalue le niveau de bruit afin de déterminer les réglages d'acquisition optimaux. Un levé topographique est nécessaire afin de corriger les mesures et les rendre comparables.

D'autre part, il faut étudier la zone altérée de surface en déterminant son épaisseur et la vitesse des ondes qui la caractérise au moyen d'une petite campagne de sismique réfraction. Le pas d'échantillonnage est de l'ordre de la milliseconde. Il doit être réglé en fonction du contenu fréquentiel souhaité et constaté des signaux sismiques (Beddou, 2012).

2.2.4.4.3. Interprétation des données

Les différentes réflexions sont interprétées en les associant à des interfaces géologiques dans le sous-sol dont on décrit la structure. En sismique réflexion, peut être plus qu'avec d'autres méthodes géologiques, on utilise au maximum les informations fournies par des forages mécaniques dans lesquels on réalise des diagraphies (vitesse sismique, densité, radioactivité naturelle...) qui servent à caler les interprétations des coupes-temps.

2.2.4.4. Profondeur d'investigation

Elle dépend en premier lieu des caractéristiques de l'onde sonore émise. Les principaux paramètres influant sur la pénétration sont essentiellement : la fréquence, l'énergie émise dans le spectre des fréquences utiles. Mais la pénétration dépend également des caractéristiques du matériau. En effet celui-ci joue le rôle d'un filtre qui élimine les hautes fréquences. Ainsi, une partie de l'énergie se trouve absorbée par le terrain de sorte que la puissance de pénétration disponible diminue en fonction de la profondeur. A niveau égal d'énergie, on constate que les hautes fréquences pénètrent moins profondément que des fréquences plus basses.

2.2.5. Sismique réfraction

Les avantages de la sismique réfraction sont évidents pour l'étude des glissements de terrain. C'est une méthode qui est parfaitement bien adaptée pour les faibles profondeurs, c'est-à-dire moins de 100 mètres. Le matériel nécessaire est assez simple et suffisamment léger pour être transporté à dos d'homme (**Jenny, 2008**). En sismique réfraction, une impulsion, telle que la chute libre d'une masse ou une frappe de marteau, est émise à la surface du sol. Elle se propage sous forme d'ondes coniques dans des milieux supposés stratifiés et homogènes. Elles se réfractent au niveau des interfaces suivant les lois de Snell-Descartes. Les arrivées à la surface du sol des ondes réfractées sont captées par des géophones. Le principe de la sismique réfraction est basé sur le calcul du temps des trajets des ondes sismiques directes et réfractées (figure 2.21).

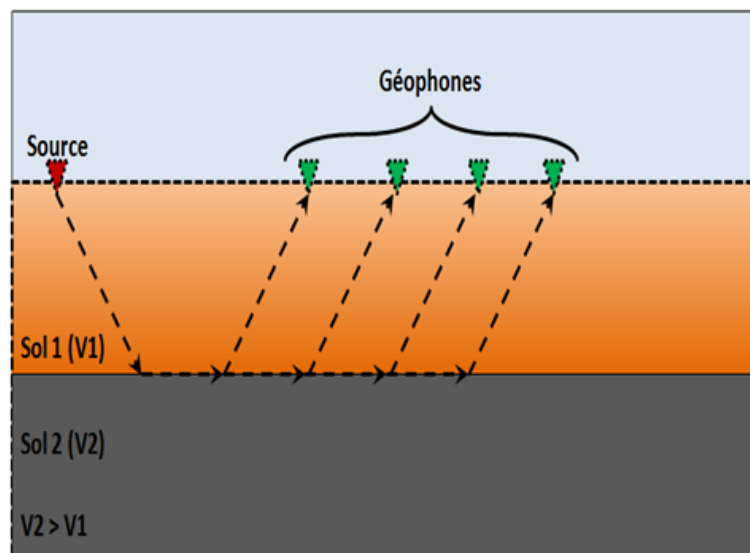


Figure 2.21 : Sismique Réfraction.

2.2.5.1. Domaine d'application et le principe de la méthode

La méthode consiste à étudier la propagation d'ondes sismiques (mécaniques) émises dans le sous sol et réfractées au toit des couches plus dures.

Le principal domaine d'application de la sismique réfraction en génie civil est l'étude du terrain superficiel altéré et du substratum rocheux. L'étude est quantitative puisqu'elle fournit l'épaisseur du terrain altéré et la vitesse des ondes mécaniques dans ce terrain ainsi que le substratum. Ces informations peuvent servir en particulier pour la préparation des terrassements en donnant des indications sur la qualité des matériaux que l'on pourra extraire avec des engins ou au contraire abattre à l'explosif.

Si le terrain superficiel est constitué de plusieurs couches, celles-ci pourront être distinguées. Le résultat d'une campagne de sismique réfraction est un coupé du sol décrivant la géométrie des couches qui le constituent, caractérisées par la valeur de vitesse des ondes mécaniques de compression (Illoul, 2013).

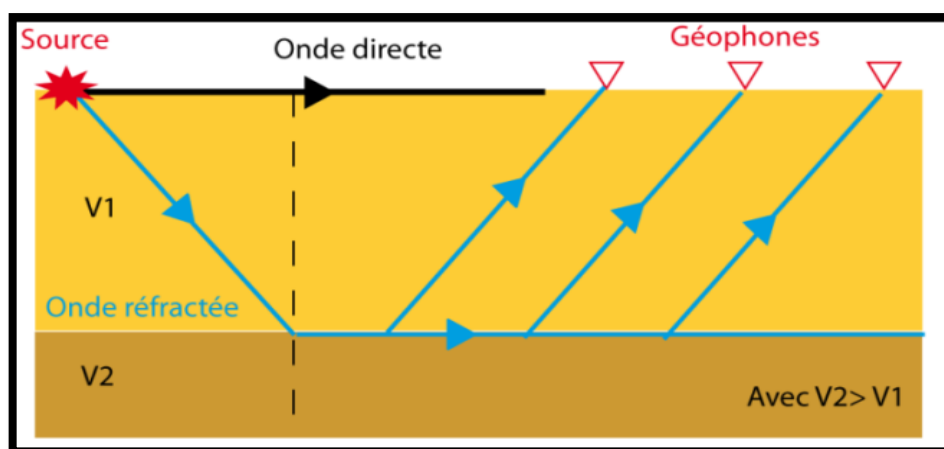


Figure 2.22 : vitesse de la sismique réfraction (AGC, 2012).

2.2.5.2. Réalisation de la sismique réfraction

Des dispositifs de 24 géophones espacés de 5 m ont été utilisés. Lorsqu'un profil est composé de plus d'un dispositif, un géophone de recouvrement est utilisé (le dernier géophone d'un profil correspond au 1er du dispositif suivant). Il y a 7 points de tirs par dispositif.

Ils ont été effectués comme suit :

- ✓ tir offset à 30 m du géophone 1 ;
- ✓ tir direct à côté du géophone 1 ;
- ✓ tir fenêtre au géophone 7 ;
- ✓ tir au centre au géophone 13 ;
- ✓ tir fenêtre au géophone 19 ;
- ✓ tir inverse à côté du géophone 2 ;
- ✓ tir offset à 30 m du géophone 24.

La campagne géophysique réalisée comprend 11 profils sismiques. On notera que selon la topographie, nous avons changé légèrement les dispositifs.

Deux exemples d'enregistrements (figures 2.23 et 2.24), tirs en bout et au centre sont montrés à titre d'exemple ci-après.

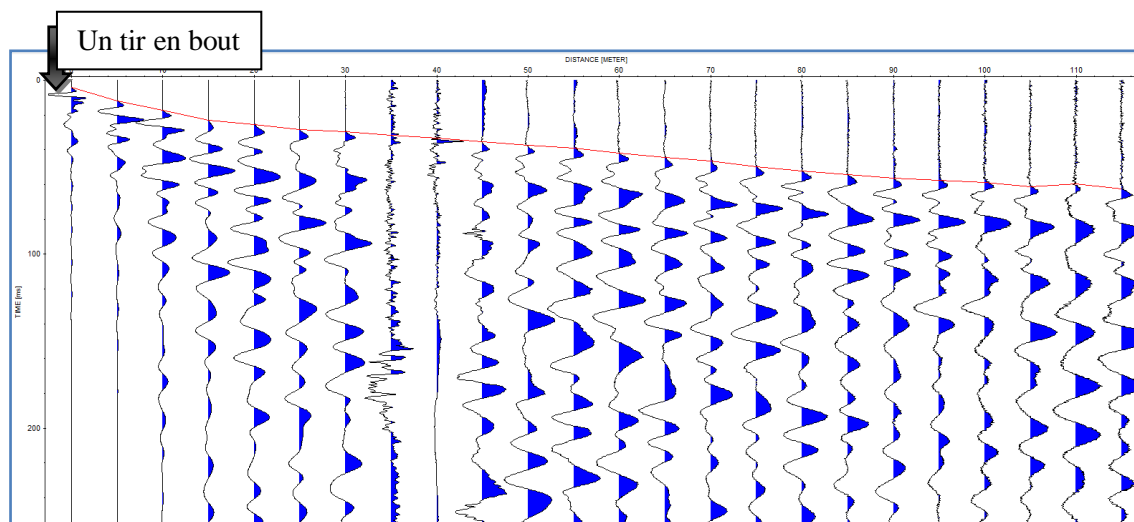


Figure 2.23 : Exemple d'enregistrement d'un tir en bout avec le picking des 1eres arrivées (en rouge)(AGC,2012)

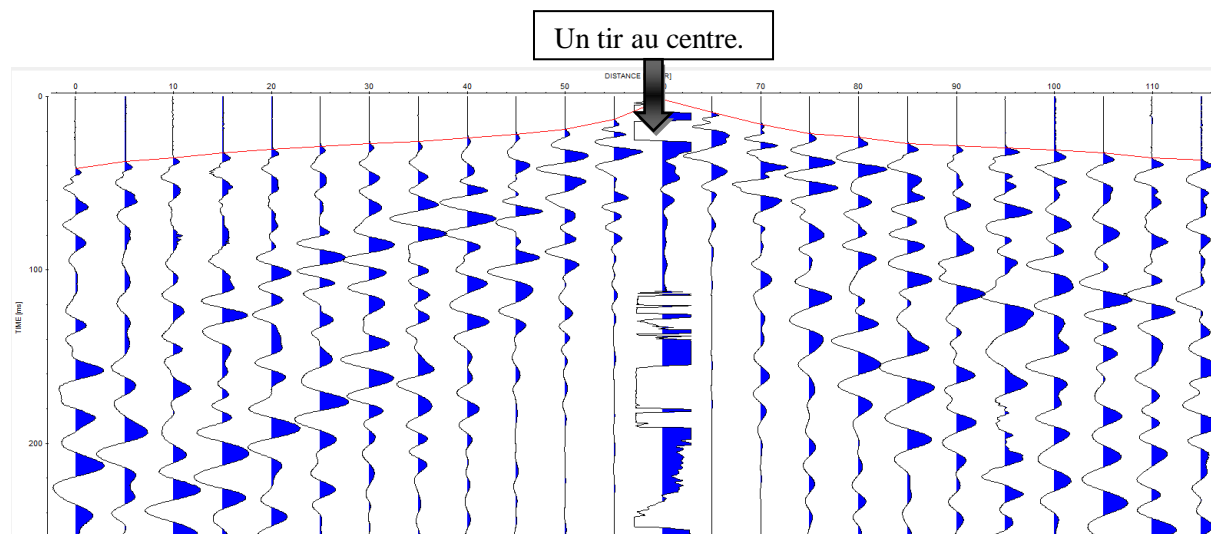


Figure 2.24 : Exemple d'enregistrement d'un tir au centre avec le picking des 1eres arrivées (en rouge) (AGC, 2012).

2.2.5.3. Interprétation des resultats

Après l'acquisition des données, il est nécessaire d'arranger et charger les différents tirs sismiques avec leur géométrie sur un logiciel d'interprétation sismique réfraction. Dans notre cas ici il s'agit du logiciel multi modules "ReflexW" (SandmeierScientific Software – Allemagne).

Plusieurs étapes doivent être respectées avant d'arriver à l'étape finale qui est le modèle de vitesse recherché et qui approchera le plus possible la réalité.

Le pointé des temps des arrivées premières nous permet de construire les courbes dromochroniques : temps=f (distances) « travel-times », que l'on peut voir dans la (figure 2.25). La loi de Snell-Descartes fournit les éléments mathématiques nécessaires pour tracer le trajet des réfractées (AGC, 2012).

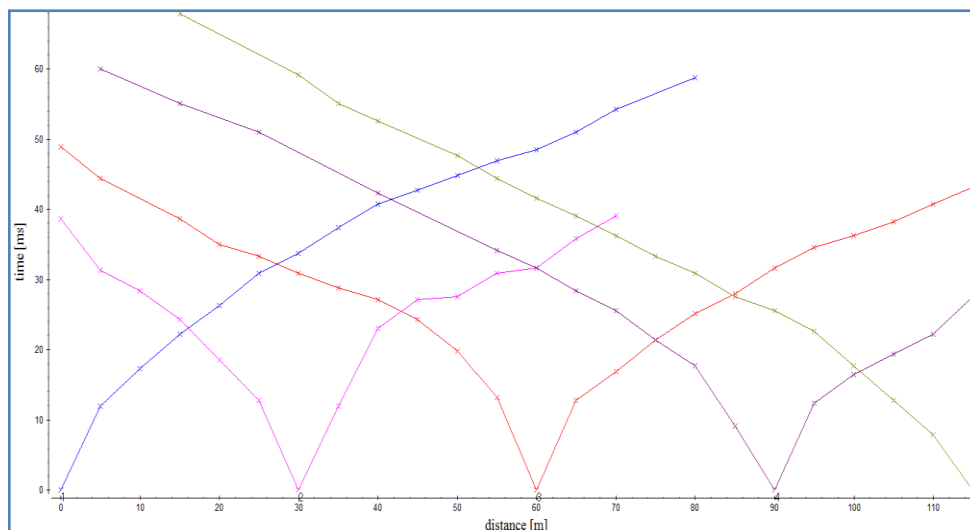


Figure 2.25 : Coupe romochronique (AGC,2012).

L'interprétation des courbes et le choix du nombre des couches, l'utilisation de la méthode d'inversion (inversion du front d'onde) est basée sur le calcul du trajet du front d'onde qui correspond le mieux au trajet réel de l'onde réfractée. Obtention, analyse et validation du modèle final.

2.2.5.4. Paramètres mesurés

- ✓ Le paramètre qui nous intéresse est la vitesse de propagation des ondes dans le sous-sol. En effet chaque roche peut être définie à partir de la mesure de la vitesse sismique qui lui est propre.
- ✓ La propagation des ondes sismiques dépend des propriétés élastiques des roches composant le sous-sol.
- ✓ La théorie de l'élasticité est une théorie mathématique rigoureuse. Elle part du principe suivant : il n'existe pas de corps indéformable. Un solide, s'il est soumis à des tensions, se déforme.

2.2.6. Inventages de la méthodes sismique

- ✓ Théoriquement, la mesure des vitesses sismiques P et S permet le calcul des différents modules ou paramètres géotechniques, à condition de connaître également la densité.
- ✓ En l'absence d'un de ces paramètres, il est possible de relier les vitesses des ondes sismiques au comportement mécanique des sols : (résistance à la compression), moyennant une ou plusieurs hypothèses concernant le module de Poisson, la densité, la vitesse sismique d'une onde particulière. Ces hypothèses doivent clairement apparaître dans les descriptions des méthodes proposées dans le cadre de services.
- ✓ Réfraction : adaptée à la recherche d'un substratum dur sous un recouvrement meuble.
- ✓ Ondes de surfaces : adaptées aux sites urbains (certaines approches travaillent même particulièrement sur la propagation des ondes générées par les activités humaines). Elles permettent une évaluation des vitesses d'onde S, moyennant des hypothèses sur les vitesses d'onde P et la densité.

2.2.7. Inconvénients de la sismique

- ✓ Pour la plupart des méthodes, sensibilité fortes aux bruits sismiques ambiants (notamment en ville avec la circulation, et vibrations liées aux activités humaines) ; seules les méthodes d'analyse des ondes de surface sont facilement exploitables dans ces contextes.
- ✓ Des couches de trop faible épaisseur ne peuvent pas être mises en évidence par l'analyse des ondes de surface ou la sismique réfraction.
- ✓ Pour la réfraction classique : modèle d'interprétation limité et contraint.

Conclusion

Les méthodes électriques et sismiques présentent un moyen puissant de détection des structures superficielles (cavités souterraines, glissements de terrain,..etc). Elles doivent être interprétées avec soin car les terrains conducteurs peuvent masquer les terrains sous-jacents. Leur déploiement est relativement bon marché, ce qui en fait des méthodes de choix pour les aspects géotechniques.

Ce chapitre a donné un aperçu des capacités et limites des méthodes électriques et sismiques qui peuvent apporter au processus de reconnaissance, une contribution riche et variée par la diversité des techniques.

Leurs mises en œuvre et leurs interprétations sont conditionnées par la capacité, des spécialistes, à choisir parmi toutes les méthodes géophysiques (électrique et la sismique), celles qui sont les plus appropriées aux problèmes à résoudre.

C'est ainsi que nous appliquons ces méthodes géophysiques (électrique et la sismique) pour l'analyse d'une étude d'urbanisation des deux villages Echotel et Ouled Ali, commune Ait Smai etTaskriout, wilaya de Bejaia qui sont menacés par un glissement de sol qu'il faut appréhender. La présentation de la zone d'étude et la caractérisation de ces glissements seront présentés au troisième chapitre.

Chapitre 3

Caractérisations des glissements de la région d'étude

Introduction

Les glissements de terrain sont des géo-risques naturels importants qui menacent les vies humaines, les biens et les infrastructures, ainsi que l'environnement naturel en tant que support d'aménagement. Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à un mouvement de versant dans deux villages Ouled Ali (commune d'Ait Smail) et Echtel (commune de Taskriout). Ces glissements de terrain sont situés dans des localités caractérisées par un sol instable considéré comme meuble de type flyschs, marnes et colluvions non cimentés. Ces instabilités sont entretenues par des circulations d'eau superficielle qui saturent les matériaux à forte composante argilo-limoneuse.

Afin de comprendre le processus et les mécanismes du déclenchement et de l'évolution de ces glissements d'Ouled Ali et d'Echtel, nous consacrons ce troisième chapitre à leur caractérisation. Ainsi, nous présenterons le contexte géologique de la région, le contexte morpho lithologique, topographique, hydroclimatique et sismique. L'historique des glissements dans la région fera également l'objet de notre étude.

3.1. Situation géographique de la région d'étude

a- Village Ouled Ali (Commune Ait Smail)

La commune d'Aït-Smail est située à 45 kilomètres au sud-est de Béjaïa. Elle est séparée de la commune de Taskriout depuis 1984. Aït-Smail est entourée de nombreuses montagnes dont Takoucht est le plus haut sommet de la wilaya, culminant à environ 1900 mètres d'altitude. Ait Smail s'étend sur 27,08 km², située à 639 mètre d'altitude. La commune aussi contient des traces de la présence romaine. Elle est délimitée (figure 3.1):

- au Nord par la commune de Tizi N'Berber ;
- à l'Est par la commune de Taskhriout ;
- au Sud par la commune de Taskhriout ;
- à l'Ouest par la commune d'Ait Tizi (Sétif) ;
- et Au Sud Ouest par la commune Dràa El-Kaid.

b-Village Echtel (Commune Taskriout)

La commune **Taskriout** est située dans le daïra de Darguina, au Sud Est de la Wilaya de Bejaia et à 55 km du chef-lieu de la wilaya. Taskriout s'étend sur 31,1 km². Elle située à 3 km au Sud-Ouest de Darguina la plus grande ville aux alentours. Située à 193 mètres d'altitude, la commune de Taskriout est délimitée (figure 3.1) :

- au Nord par la commune de Aokas ;
- à l'Est par la daïra de Darguina ;
- au Nord Est par la commune de Souk El Tenine ;
- au Sud par la commune de Kherrata ;
- à l'Ouest par la commune Ait Smail ;
- au Nord Ouest par la commune de Tizi Berber.

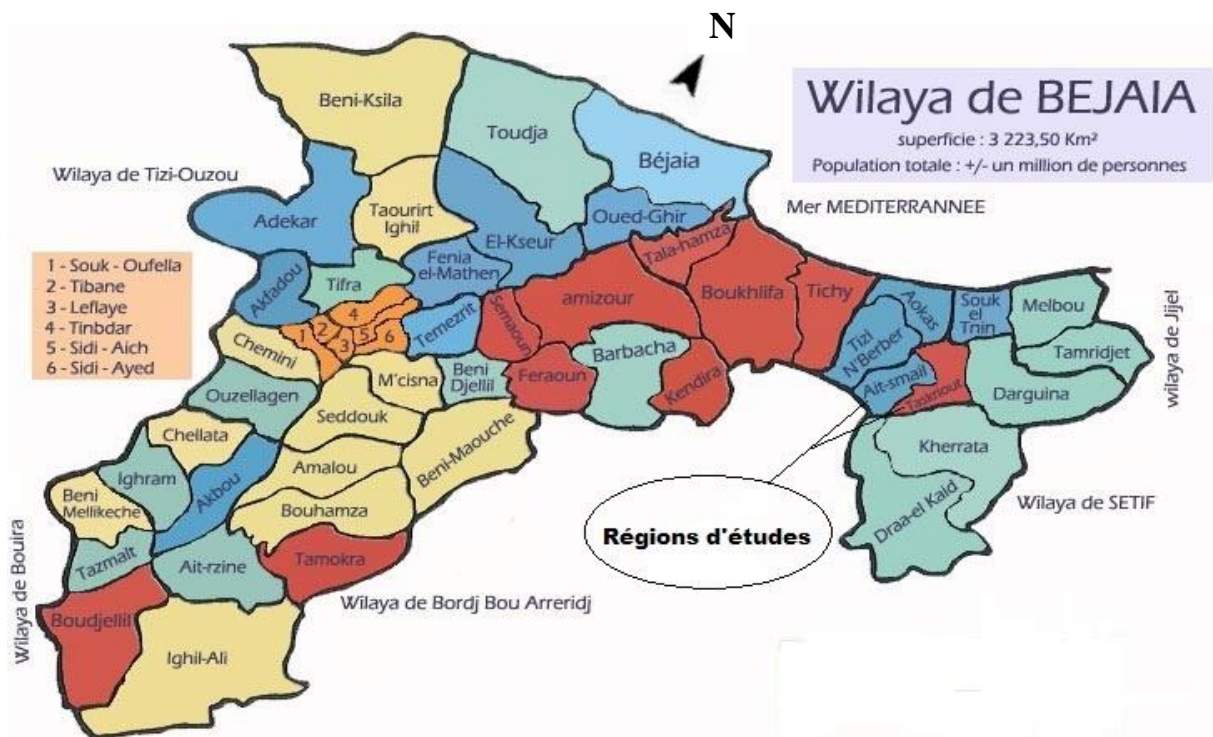


Figure 3.1 : Situation géographique des régions d'études.

3.2. Localisations du périmètre d'étude

Les zones d'études concerne les villages Ehtel (commune Ait Smail) et Ouled Ali (commune Taskriout) qui se situent en zone de hautes montagnes dans la wilaya de Bejaia dont les limites sont définies par les instruments d'urbanisme en vigueur ; à savoir le plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) des communes Ait Smail et Taskriout (figure 3.2 et 3.3). Les coordonnées géographiques sont données ci-dessous :

•Commune Ait Smail

Latitude:36°32'47"Nord.

Longitude: 5°13'47" Est.

•Commune Taskhriout

Latitude:36°32'51"Nord.

Longitude: 5° 16' 24" Est



Figure 3.2 : Localisation du village Ouled Ali sur un fond d'images en 3D (Google-Earth).



Figure 3.3 : Localisation du village Echtel sur un fond d'images en 3D (Google-Earth).

Leurs périmètres sont délimités sur un fond de carte d'état major avec le logiciel MapInfo (figure 3.4).

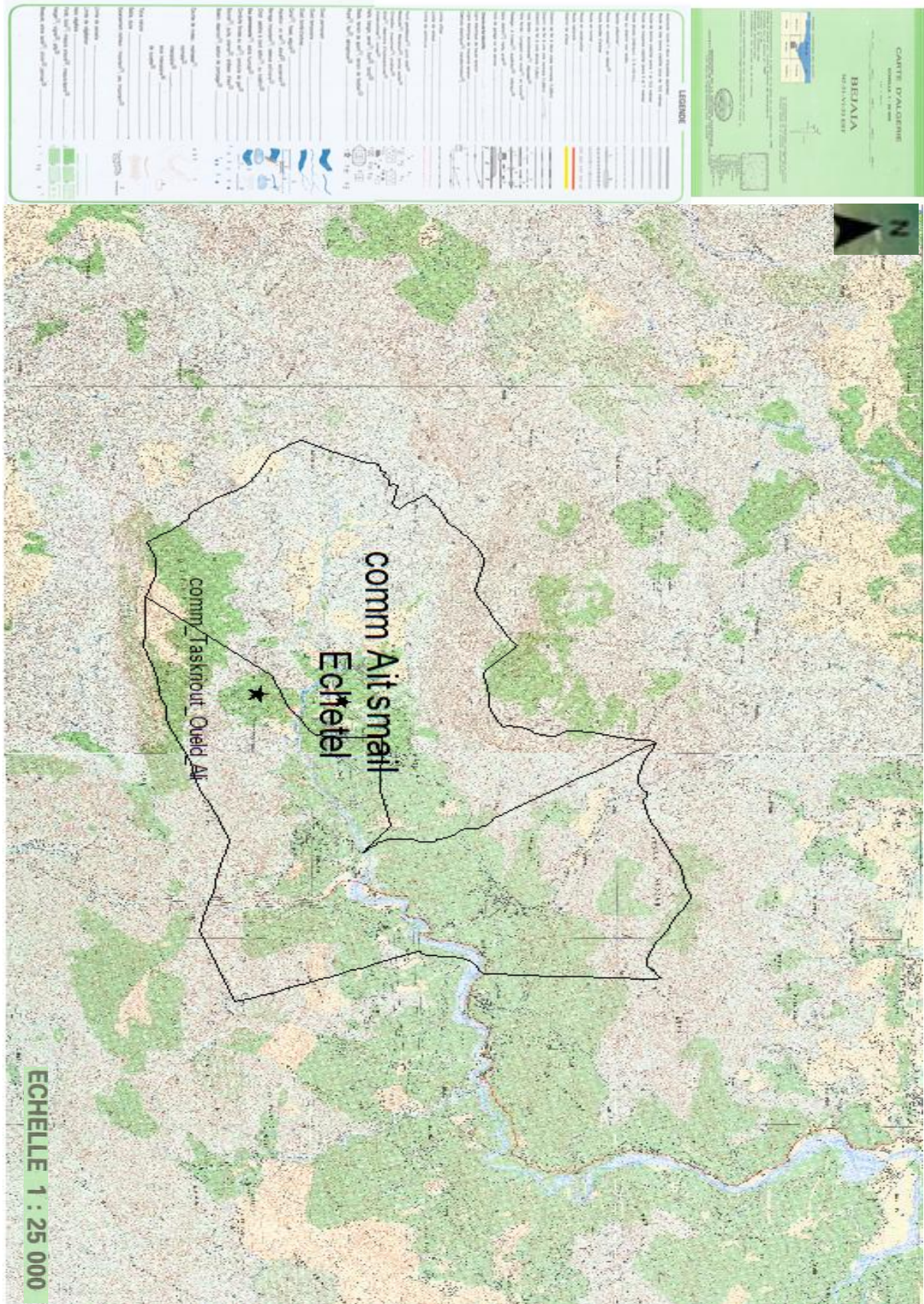


Figure 3.4 : Carte d'état Majore de Bejaia NJ-31-VI-33Est, prise de vue aérienne de 1985 complété sur le terrain en 1988, publié par le Ministère de la défonce Nationale, institut Nationale de Cartographie et de Télédétection.

3.3. Description des glissements

Le phénomène de glissement qui menaçait les villages d'Echetel et Ouled Ali a focalisé toute l'attention des autorités locales, le glissement du village Echetel à déclenchée depuis le début des travaux de construction d'un lycée en 2007. Par contre le glissement du village Ouled Ali a été suite à une réactivation survenue à la fin de l'hiver 2012, celui-ci cause de dégradations importantes sur des immeubles et les voiries (figure 3.5 et 3.6).

Les glissements de terrain ayant affectés ces régions d'études (Ait Samail et Ouled Ali) présentent des formes plus complexes et affectent des espaces plus étendus, impliquant aussi bien les ouvrages anciens que récents (AGC, 2013). La ligne de rupture permet identifier après application de la méthode géophysique ce que nous voire au chapitre 4.



Figure 3.5 : Village Echetel menacée par le glissement de terrain (AGC, 2012).



Figure 3.6 : Village Ouled Ali menacée par le glissement de terrain (AGC, 2012).

3.4. Condition majeures à la formation du glissement

3.4.1. Contexte géologique

a- Géologie régionale

La partie du flanc u Djebel Gouraya est constituée de marnes et marno calcaire. Le blanc sud de Djebel Bou Braham, plus stable, est constitué de brèches, conglomérats éblouis et flyschs. De point de vue géologique, la région de Béjaïa appartient au domaine des babors occidentaux qui comprennent (figure 3.7) :

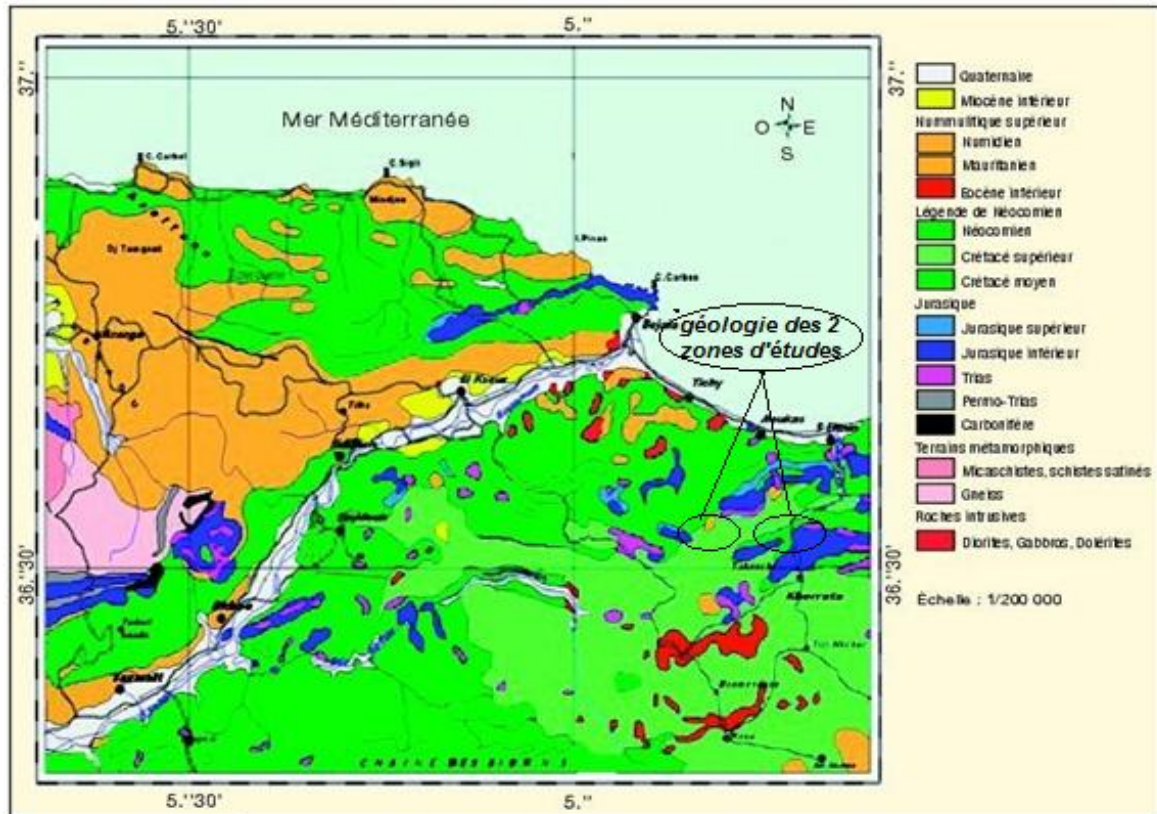


Figure 3.7 : Extrait de Carte géologique de Bejaïa, levés effectués de 19673 à 1975 par M.J.M. VILLA, publiée par l'office national de la géologie.

b-Géologie locale

La formation géologique du village **Ouled Ali**, est constituée d'une alternance de terrains de flysch marno -gréseux et de calcaire gréseux de l'Albien Supérieur. Les éboulis de pente ne représentent qu'une fine couche de sol pédologique et de marne schisteuse peu altérée qui reposent sur ce complexe (figure 3.8).

Le site du village **Echtel** est situé sur une formation géologique du Quaternaire constituée par des éboulis de colluvions des versants à fortes pentes. C'est une zone de comblement, aux pieds de versant. La formation géologique est constituée de terrains de flysch schisto-gréseux de marnes sombres et de calcaire gréseux de l'Albien supérieur,

(figure 3.8). Les éboulis de pente de forte puissance, épaisseur de 20 mètres au pied du talus, reposent sur ce complexe (figure 3.9). Les terrains sont représentés par les calcaire et de la marne schisteuse. Les éboulis de pente sont formés de colluvions humides. L'interface colluvions et les formations schisto gréseuses constituent un plan de glissement.

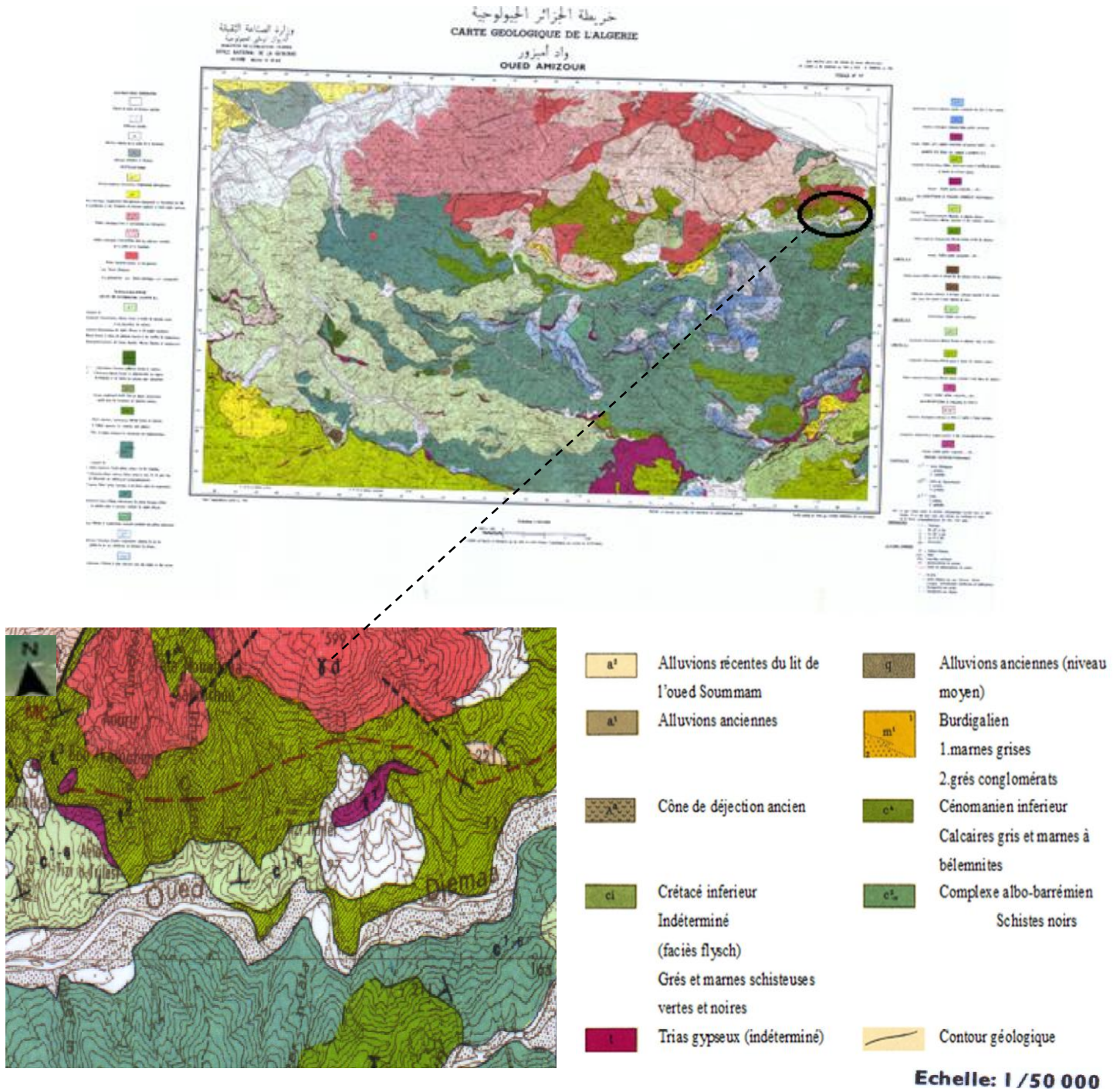


Figure 3.8 : Carte géologique de l'Algérie (Oued Amizour) effectuées par M. LEIKINE et M. GRAVELLE de 1964 à 1970, modifiée par B. SEMROUD en 1981, publiée en 1988 par l'office national de la géologie.



Figure 3.9 : Formation géologique du village Echétel.

Le territoire des communes Ait smail et Tskriout, est géologiquement instable (pente variable comprise entre 16 et 20%), et l'érosion affecte 80 % de la surface totale. On retrouve les pentes fortes qui favorisent le déclenchement des glissements (figure 3.10).

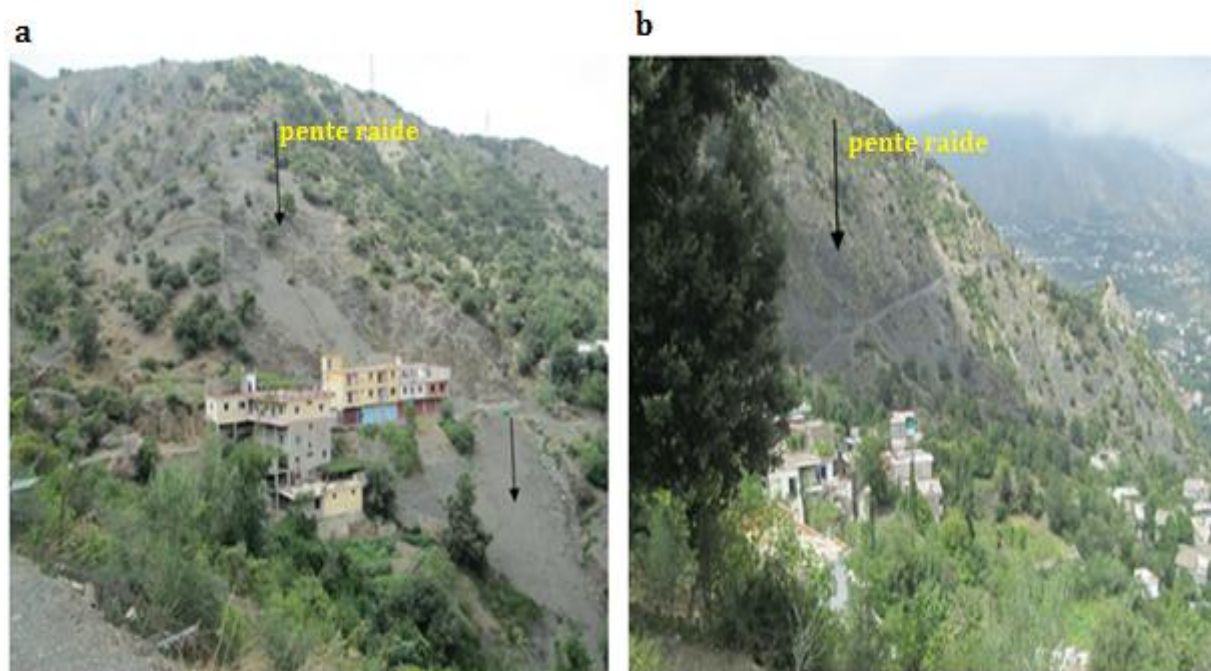


Figure 3.10 : Présentation des pentes à 20% du village Ouled Ali.

3.4.2. Morpho lithologie

Le site du village **Ouled Ali** correspond à la morphologie d'un flanc de versant constitué essentiellement d'une formation de marne schisteuse et d'une mince couche de sol pédologique formés par les éboulis de pente (figure 3.11).

La morpho-lithologie du site village **d'Echtel** correspond à un cône de déjection d'érosion de hautes montagnes constituées :

- ✓ de gros blocs de roches dures provenant des hauts versants qui dominant le village ou affleure largement la formation géologique originelle de roches dures figure (3.10a, 3.10b) du djebel Takoucht qui culmine à 1200m d'altitude (figure 3.11) (carte topographique de Bejaia_NJ-31-VI-33_E à l'échelle du 1/25000).
- ✓ et d'une gangue (**ciment**) marneuse provenant de la formation originelle de marnes schisteuses qui affleurent en certains endroits, juste en amont du site.

Des observations effectuées au niveau d'un forage d'eau en cours de réalisation à hauteur du nouveau lycée en construction donnent une épaisseur des éboulis de pente de 15m et une épaisseur de la formation de marne schisteuse de plus de 100 m.

Les observations de terrain illustré par les photos ci dessous mettent en évidence la nature, l'épaisseur et les indices du glissement étudié.

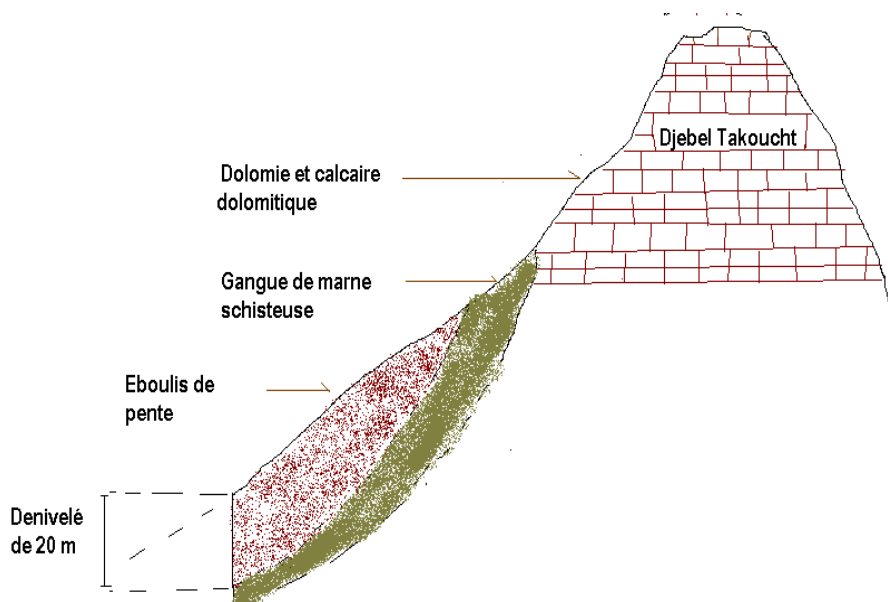


Figure 3.11 : Coupe schématique de la morpho lithologie des sites des villages Echtel et Ouled Ali.

3.4.3. Situation topographique

Les villages Echetel et Ouled Ali se situent dans une zone de montagne qui présente un relief très accidenté (figure 3.12, 3.13). Ce relief est composé de basses et moyennes montagnes avec des altitudes qui varient entre 500 m et 1200 m. Le territoire s'étend sur 120,16 km². Les reliefs sont formés de (tableau 3.1) :

Tableau 3.1 : Situation topographique.

Type de relief	Superficie (km ²)	Pourcentage du relief
Montagne	24,03	20%
Collines et piémont	48,06	40%
Plaines et de plateaux	36,05	30%
Autres	12,02	10%

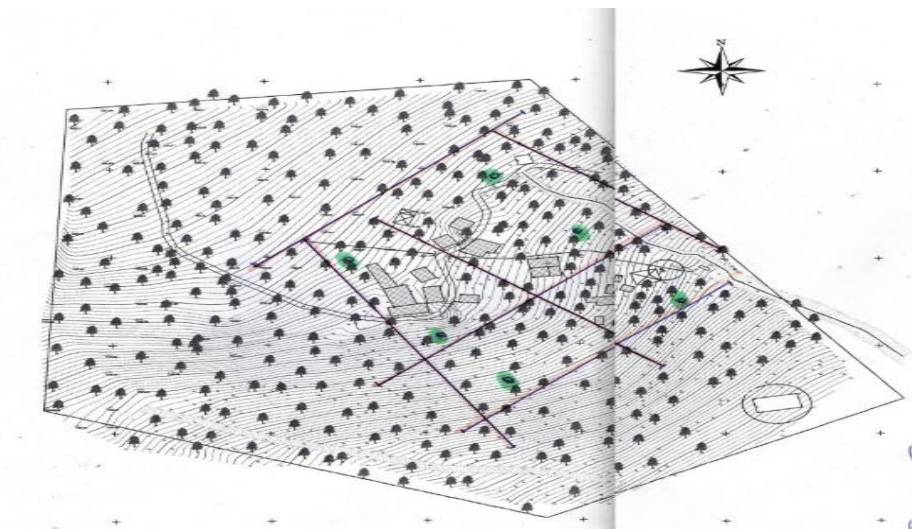


Figure 3.12 : Carte topographique du villages ouled Ali.



Figure 3.13 : Carte topographique du village Echetel.

3.4.4. Contexte Hydro climatique

Cette région s'inscrit dans un climat méditerranéen qui se caractérise, à l'échelle annuelle, par une opposition thermique et pluviométrique avec un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec.

3.4.4.1. Température

La température moyenne annuelle °C de ces communes (d'après la station météorologique de Bejaia), les températures sont élevées en été vers le mois d'Août avec une moyenne de 26.31°C (tableau 3.2) et basses au mois de Janvier avec une moyenne de 10.92°C.

Tableau 3.2 : Températures moyenne mensuelles (2000-2012) en °C.

Mois Année	Jan	Fév	Ma	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Total	Moy
2000	9	12	13	17	19	22	26	26	23	19	16	14	216	18,00
2001	13	11	17	15	18	23	25	26	23	2	15	11	220	18,33
2002	11	12	14	15	18	22	24	25	23	20	16	14	214	17,83
2003	11	11	14	16	18	25	27	28	20	21	16	12	219	18,25
2004	11	13	13	15	17	21	25	26	23	22	14	12	212	17,67
2005	8	9	13	16	19	23	25	25	23	20	15	11	207	17,25
2006	10	11	14	17	20	22	25	25	23	22	18	13	220	18,33
2007	12	14	13	16	19	22	24	26	22	20	14	11	213	17,75
2008	12	12	13	16	19	22	26	26	24	20	14	11	215	17,92
2009	12	11	13	15	20	23	27	27	23	19	16	14	220	18,33
2010	12	13	14	17	19	22	26	26	24	20	16	12	218	18,17
2011	11	11	14	17	19	22	26	26	24	20	16	12	218	18,17
2012	10	8	13	16	19	20	25	31	23	20	17	12	214	17,83
Tota	142	148	178	207	243	287	330	342	297	265	202	160	2801	233,4
Moy	10,92	11,69	13,69	15,92	18,69	22,08	25,38	26,08	22,85	20,38	15,54	12,31	215,45	17,95

Source : Station Météorologique de l'Aéroport de Bejaia.

3.4.4.2. Pluviométrie

Les précipitations représentent un facteur climatique très important. Elles dépendent de l'altitude et de l'exposition des versants aux vents humides. Le tableau 3.4 montre que les précipitations sont irrégulières dans la région d'étude. Les précipitations les plus élevées sont enregistrées aux mois de Décembre et Janvier avec des valeurs de 134 mm et 119,69 mm, la moyenne des précipitations annuelles est de l'ore de 800 mm /an.

Les caractéristiques de la station sont représentées dans le (tableau 3.5) suivant :

Tableau 3.3 : Caractéristique de la station pluviométrique

Nom de la station	Code de la station	Coordonnées de la station
Station Météorologique de l'Aéroport de Bejaia	-Code Aéronautique : D.A.A.E -Code renseignement : 60 402	-Altitude : 1.76m -Latitude : 36° 43 Nord -Longitude : 05° 04 Est

Tableau 3.4 : Précipitations moyennes mensuelles (2000-2012) en mm.

Mois Année	Jan	Fév	Ma	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Total	Moy
2000	73	22	14	27	54	5	1	0	13	77	31	66	383	31,92
2001	212	70	9	66	37	0	0	12	47	3	104	71	631	52,58
2002	69	104	58	18	24	0	108	28	62	36	193	305	1005	83,75
2003	310	69	31	221	27	1	2	2	114	76	46	206	1105	92,08
2004	148	55	87	110	70	26	0	5	19	30	178	128	856	71,33
2005	166	168	60	42	8	0	0	6	28	32	107	172	789	65,75
2006	127	141	47	17	53	5	1	20	35	21	13	133	613	51,08
2007	9	20	175	132	12	10	3	7	63	149	175	207	962	80,17
2008	7	20	120	37	66	7	3	4	144	61	131	73	673	56,08
2009	237	66	63	86	54	1	4	15	190	40	129	133	1018	84,83
2010	53	55	107	44	57	38	1	6	39	135	162	70	767	63,92
2011	55	139	35	74	82	34	0	0	8	159	68	117	771	64,25
2012	90	322	71	92	10	3	1	86	66	55	105	56	957	79,75
Tota	1556	1251	877	966	554	130	124	191	828	874	1442	1737	10530	877,49
Moy	119,69	96,23	67,46	74,3	42,6	10	9,5	14,7	64	67	111	134	810	67,5

Source : Station Météorologique de l'Aéroport de Bejaia

3.4.4.3. Humidité

Les valeurs de l'humidité des deux communes **Ait Smail** et **Taskriout** sont données dans le tableau 3.5. Celles ci montrent que L'humidité est irrégulière dans notre région d'étude. Une humidité 78,4 % en mois de Janvier et une humidité 74,7 % en mois d'Août sont enregistrées.

Tableau 3.5 : Humidité moyennes mensuelles en « % ».

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Total	Moy
2003	77	76	77	82	82	72	73	70	80	81	77	76	923	76,91
2004	79	76	81	78	80	81	75	72	72	67	81	79	921	76,75
2005	82	79	82	76	77	79	73	73	78	77	76	79	931	77,58
2006	76	78	73	76	82	73	75	74	71	70	68	78	894	77,5
2007	74	73	77	83	73	77	78	72	76	80	78	80	921	76,75
2008	77	77	78	73	80	77	75	77	75	79	77	80	925	77,08
2009	81	76	79	80	77	74	72	79	81	79	75	74	927	77,25
2010	75	73	79	84	78	81	79	80	77	78	77	67	928	77,33
2011	81	82	80	82	83	83	75	77	79	77	78	82	957	79,91
2012	82	79	82	76	77	79	73	73	78	77	76	79	931	77,58
Moy	78,4	76,9	78,8	79	78,9	77,6	74,8	74,7	76,7	76,5	76,3	77,4	926	77,16

Source : Station Météorologique de l'Aéroport de Bejaia.

Le diagramme ombrothermique de la (figure 3.16) permet de caractériser l'intensité et l'importance de la période sèche. Et pour cela en abscisses sont portés les mois successifs de l'année et en ordonnées, à droite, les précipitations (P) en mm. A gauche sont portées les températures T en °C ; de telle façon que l'échelle des précipitations soit le double de celle des températures : $P = 2T$.

La saison sèche se détermine quand la courbe (P) est au dessous de la courbe (T).

Tableau 3.6 : Moyennes mensuelles des températures et précipitations.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
T (°C)	10,92	11,38	13,69	15,92	18,69	22,08	25,38	26,31	22,85	20,38	15,54	12,31
P(mm)	119,69	96,23	67,46	74,31	42,62	10,00	9,54	14,69	63,23	67,69	110,92	133,62

Ainsi, et d'après le diagramme (figure 3.14), il ressort une période sèche qui s'étale sur quatre mois (du mois de Juin au mois de Septembre) et une période humide qui s'étale sur huit mois (du mois de Octobre au mois de Mai).

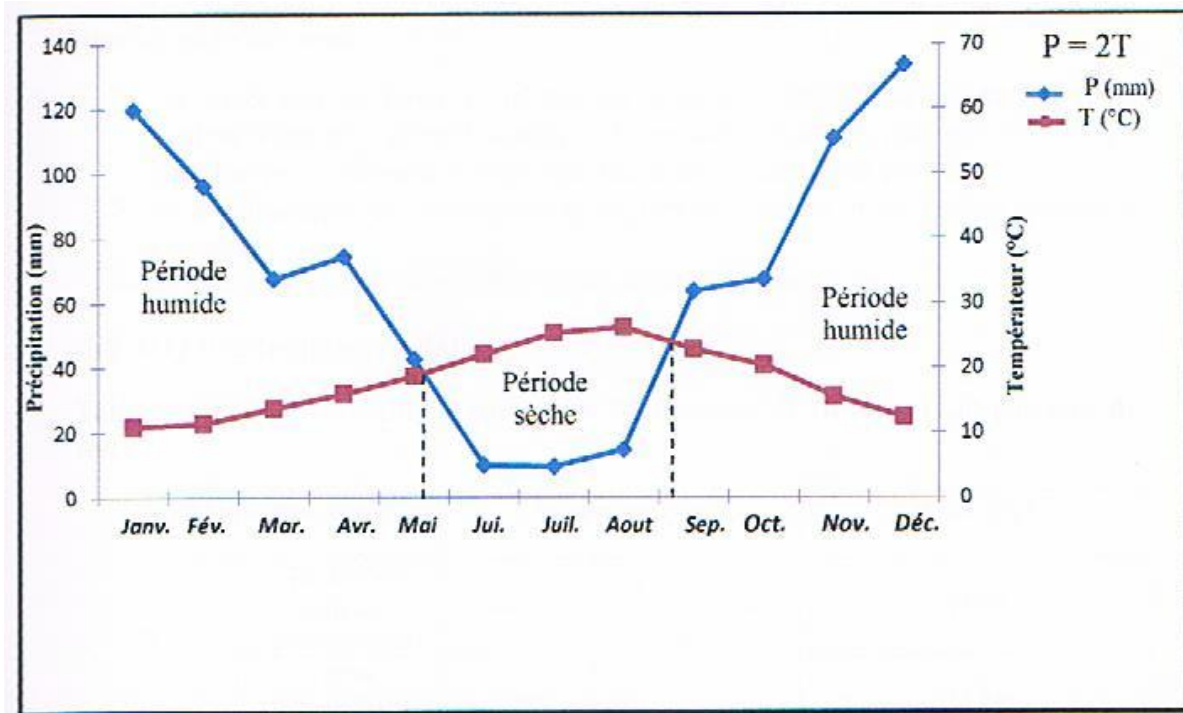


Figure 3.14 : Diagramme ombrothermique de la région d'étude.

3.4.5. Contexte sismiques

Les communes Ait Smail et Taskriout n'ont pas épargnées par le phénomène sismique provoquant ainsi des désordres dans le milieu urbain. Les régions ont été plusieurs fois secouées par les séismes. Les données du CRAAG (**Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique**), montrent que la région d'étude est moyennement active en secousses de moyennes intensités (figure 3.15, 3.16). Le mécanisme générateur est essentiellement lié à la présence d'un pli-faille à Kherrata. Cette activité sismique est générée par la faille active (Kherrata), qui correspond à un anticlinal de direction NE-SW. Après le séisme de Kherrata du 17 avril 1949 ($M_s=4.7$, $I_0=VII$ MSK), des ruptures de surfaces dues à ce séisme s'étaient manifestées.

La région de Kerrata (Sud Est de Béjaïa) est limitée au Nord par la commune Teskriout, à l'Ouest par la commune Ait Smail (au contact des montagnes des Babors occidentaux et des hautes plaines de Sétif).

Le plus destructeur, du 17 février 1949, qui a été remarquablement décrit par (Rothe, 1950), a déclenché un glissement géant, en l'occurrence, celui de Kherrata-Darguina, Ait Smail, Taskriout, lui-même composé de plusieurs glissements de moindre ampleur, se déclenchent indépendamment les uns des autres.

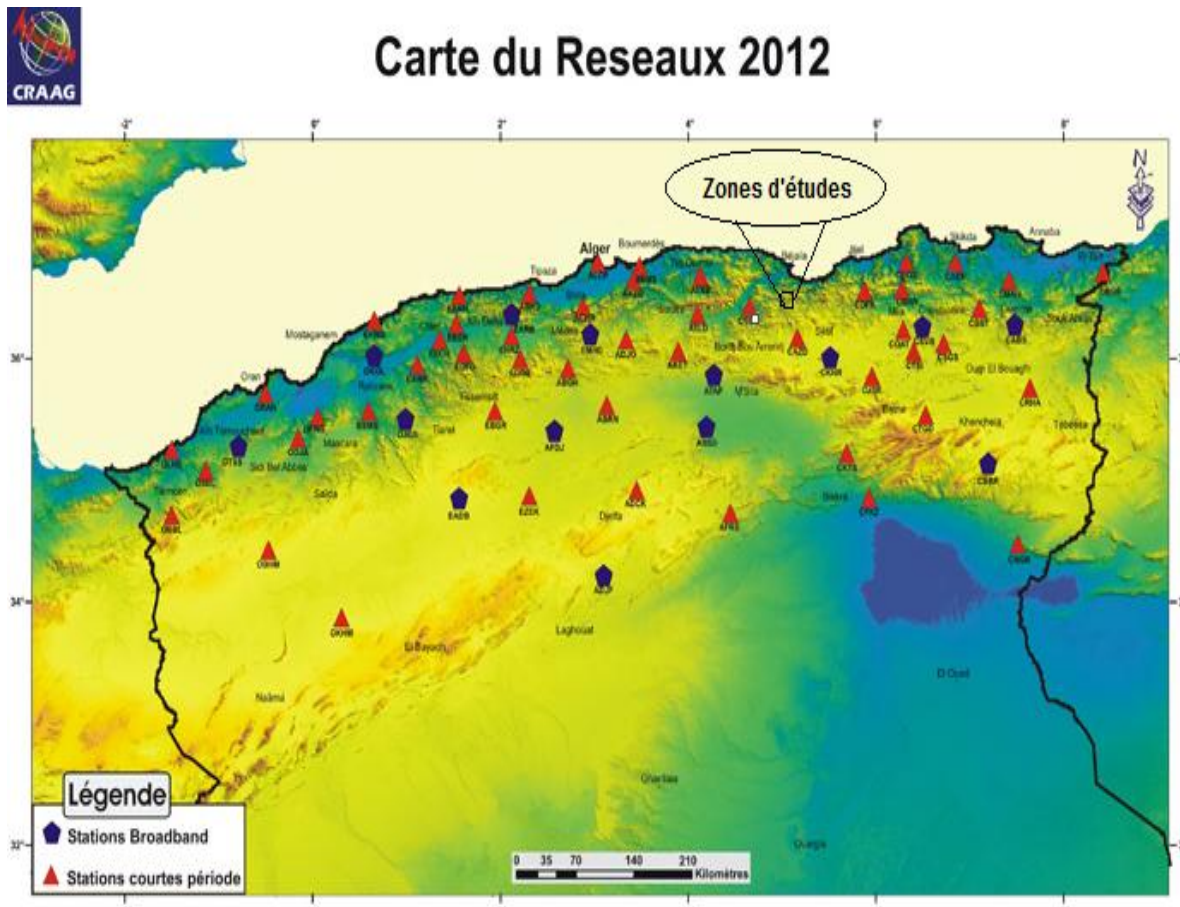


Figure 3.15 : Carte de Zonage sismique du territoire nationale (CGS, 2012).

La conception et la réalisation des ouvrages devront donc tenir compte de la sismicité de la région et se conformer à la réglementation en vigueur. La nouvelle réglementation parasismique (CGS, 2003) classe les zones sismiques comme suit : (voir nouvelle carte de zonage sismique du territoire national).

En Algérie cinq zones sont définies en fonction de leur sismicité croissante (tableau 3.7) :

Tableau 3.7 : Répartition des zones sismique en Algérie.

Zone 0	sismicité négligeable
Zone I	sismicité faible
Zones II a et II b	sismicité moyenne
Zone III	sismicité élevée

Les deux régions d'études sont classées dans la zone de moyenne sismicité. (**Zone II a**)

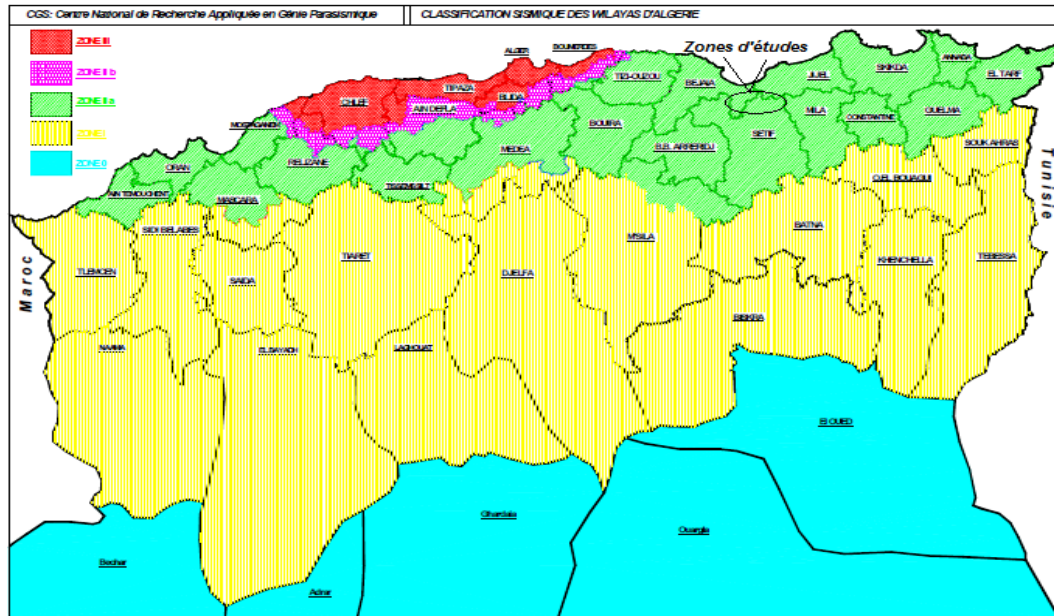


Figure 3.16 : Carte de zonage sismique du territoire national.

3.6. Historique du glissement de terrain dans les zones voisines

Implanté sur des terrains constitués de flancs de collines et de plaines marécageuses, la ville côtière de Bejaia est sujette à des glissements. Dans la majorité des sinistres, le relief du sol a connu de profondes modifications. On citera des glissements spectaculaires dans la région de Bejaia (*Bendadouche et al., 2008*) :

a- **Le glissement de Smina**, situé sur le flan Sud de Gouraya, est caractérisé par un certain nombre de facteurs défavorables (figure 3.17), on citera :

- Terrain en pente ;
- Forte pluviométrie en hiver ;
- Sa situation dans un talweg (exutoire naturel des eaux).



Figure 3.17 : Action de la pente raide et de relief accidenté (*Bendadouche et al., 2008*).

b- **Le glissement de la ZHUN de Sidi Ahmed Bejaia** : Suite à ce glissement, deux blocs d'habitation E14 et E16 en structure voiles porteurs et situés à l'intérieur d'une zone d'habitation urbaine de Sidi-Ahmed ont connu des désordres importants au début de l'année 1993 (figure 3.18).

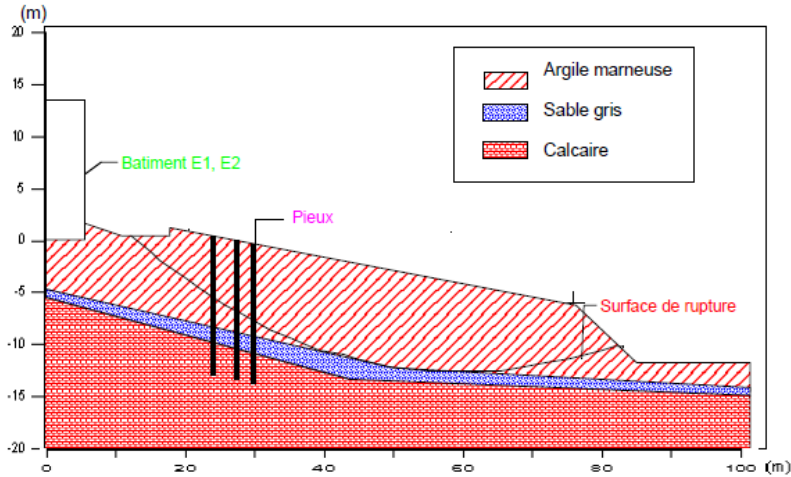


Figure 3.18 : Description du glissement de la région Sidi Ahmed Bejaia (Bendadouche et al., 2008).

c- **Le glissement de Aach el Baz BEJAIA** : Les pluies diluviennes de décembre 2000 ont déclenché un glissement important qui menace maintenant la route nationale RN°24. Une maison se trouvant dans la zone de glissement a carrément basculé (figure 3.19).

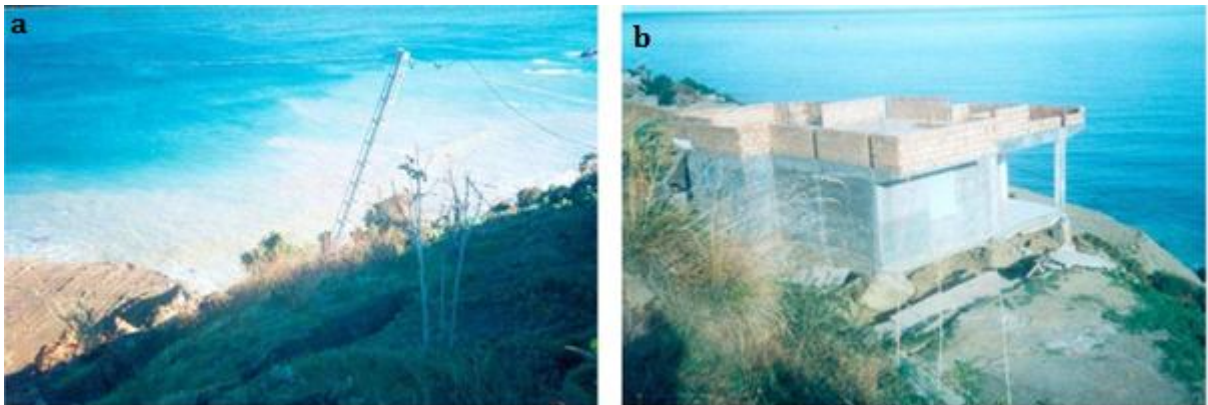


Figure 3.19 : Glissement de Aach El Baz Bolimat station balnéaire à 20 km de Bejaia Ouest (Bendadouche et al., 2008).

d- **Le glissement de Tizi Bejaia** : Situé sur le djebel Sidi Boudraham, le sol avec des pentes supérieures à 20% est composé d'éboulis de pente plaqué contre un substratum de compacité plus forte. Ces éboulis ont des caractéristiques mécaniques très médiocres. En outre des circulations d'eaux d'origines diverses ont été observées in-situ (figure 3.20).



Figure 3.20 : Glissement de Tizi quartier de Bejaia. Basculement d'une habitation (Bendadouche et al., 2008).

3. 7. Désordres observés dans les zones d'études

Les glissements de terrain des deux villages Echétel et Ouled Ali (communes Ait Smail et Tskriout) ont été la source de plusieurs dégâts matériels au niveau de ces régions. Les désordres et les dommages sont d'ampleurs diverses ayant affecté les maisons et les infrastructures existantes au niveau de ce site. Les dégâts observés au niveau de cette zone ont permis de constater que le mouvement de terrain est très actif ; plus précisément pendant les périodes hivernales de ces dernières années (2012) où la réactivation du mouvement a été très importante, ce qui a engendré des dommages et des désordres de plusieurs ouvrages.

Les photos ci-dessous montrent quelques désordres observés au niveau des deux villages **Echétel** et **Ouled Ali** :

- ✓ Dégradation quasi totale des structures avec voilement de l'ensemble figure (3.22a, 3.22b) ;
- ✓ tassements différentiels importants au niveau des terrains (figure 3.24a, 3.27g) ;
- ✓ apparition de grandes fissures, pénétrantes et multidirectionnelles, sur la plupart des structures que ce soit dans les murs extérieurs et intérieurs (figure 3.24b, 3.25c, 3.24a) ;
- ✓ Basculements et effondrements des maisons (figure 3.23d) ;
- ✓ Inclinaison des arabes dans le sens de la pente et des fissurations des murs extérieurs des maisons qui sont dues vraisemblablement au mouvement de masse (figure 3.6) ;
- ✓ Glissement d'un pont qui relie les deux villages Echétel et Ouled Ali (figure 3.21) ;

- ✓ Basculement et affaissement des poteaux électrique (figure 3.27h) ;
- ✓ Eclatement des nœuds (poteau poutre) au niveau des murs de soutènements (figure 3.23c) ;
- ✓ Fissuration a grandes échèle au niveau des terrains (figure 3.26e, 3.26f).



Figure 3.21 : Glissement spectaculaire d'un pont qui relie les deux communes Ait Smail et Ouled.

Ali.



Figure 3.22 : Vues des dégâts au site étudié village Ouled Ali commune Teskriout.



Figure 3.23 : Vues des dégâts au site étudié village Ouled Ali commune Teskriou (suite).



Figure 3.24 : Vues des dégâts au site étudié village Echetal commune Ait Smail.



Figure 3.25 : Vues des dégâts au site étudié village Echetal commune Ait Smail (suite).



Figure 3.26 : Vues des dégâts au site étudié village Echetal commune Ait Smail (suite).



Figure 3.27 : Vues des dégâts au site étudié village Echetal commune Ait Smail (suite).

3.8. Causes probables du déclanchement du glissement

Certaines causes restent toujours inconnues face à ce glissement. On peut citer quelques facteurs ayant probablement conduit à la déstabilisation de la zone d'étude :

a-Effet de la pente

Les deux villages Echetal et Ouled Ali présente une pente raide avec un angle d'inclinaison de 20° à 40°, ce qui favorise l'apparition des instabilités.

Les (figures 3.28, 3.29) montrent la pente importante du versant :



Figure 3.28 : Vue du site étudié village Echetal commune Ait Smail.



Figure 3.29 : Vue du site étudié village Ouled Ali commune Teskriout.

b-Effet de l'eau

b-1. Fortes précipitations

L'existence d'un ancien glissement, la réactivation du glissement de terrain au village Ouled Ali est précédée par des événements climatiques exceptionnels, caractérisés par de fortes précipitations (voir tableau 3.4). Les fortes précipitations hiver 2012, qui caractérisent le climat de la région Ouled Ali, à un rôle important dans le déclenchement du glissement de terrain qui affecte le village.

c-Couverture neigeuse

L'importante couverture neigeuse qui caractérise les deux villages Echetel et Ouled Ali, constitue un facteur favorisant les infiltrations et l'altération dans les versant. En effet, la fonte progressive des neiges sature le sol et favorise l'infiltration de l'eau dans les versant. Et l'effet du gel dégel qui contribue considérablement à la fracturation et à l'altération du schiste. De plus, cette couverture constitue une surcharge du versant.

d-Surcharge importante de la crête

Malgré les signes d'instabilité apparus la surcharge de la crête est importante (terrassements, construction d'immeubles, le trafic important...). L'implantation d'un chantier (construction d'un lycée) en contrebas du village Echetel commune Ait smail ont modifié les conditions de stabilité initiales. Un brise roche a été utilisé pendant les travaux ; qui a fait que les vibrations de brise roche ont causé des glissements qui ont emporté plusieurs oliviers (figure 3.6).

Ce glissement est une rupture de pied de talus de versant, survenu au cours des travaux de terrassement engagés au niveau de la plate-forme du lycée (figure 3.30). C'est un glissement approximativement circulaire (Annexe1). Les sols glissés sont essentiellement des dépôts de pente constitués d'argiles limoneuses renfermant graves et cailloux, la pente est raide. Le terrassement au pied du talus serait à l'origine du désordre (figure 3.31).



Figure 3.30 : Glissement de terrain a cause des travaux au village Echetel.



Figure 3.31 : Localisation du lycée sur un fond d'images en 3D (Google-Earth).

e. l'hétérogénéité couche de sol des

Les matériaux argileux et schisteuse du versant présentent des caractéristiques physiques défavorables, car ils ont une faible résistance.

f. Effet de la sismicité des deux régions

Les séismes jouent un rôle important dans le déclenchement des instabilités (voir le contexte Sismique des deux régions (figure 3.15). L'effet de celui-ci doit être pris en charge dans l'étude du mouvement de terrain qui affecte la région, car il contribue à l'accentuation et à l'amorce des instabilités.

Conclusion

A la lumière de ce qui a été présenté, dans ce chapitre, on conclue que le glissement menaçant les deux villages Echel et Ouled Ali est très complexe. C'est un mouvement de masses de terrain d'épaisseur très variable le long d'une surface de rupture. L'ampleur de ce mouvement, sa vitesse et le volume de matériaux mobilisés sont également très variables. C'est un glissement qui affecte un versant sur plusieurs mètres d'épaisseur. Une grande déstabilisation a été constatée dans les zone étudiées et de nouvelles failles probablement actives sont mise en évidence, et semble être à l'origine du glissement. Nous estimons que la

sismicité, l'effet de développement urbains, la géologie, et l'eau jouent un rôle fondamental dans l'instabilité des ces terrains. Ces glissements ont causé des dommages importants aux infrastructures (routes, habitations...etc.) dans la région. Il est donc utile d'adapter le bâti au type des sols. Une étude géophysique approfondie du sol est donc nécessaire avant l'implantation de la construction à fortiori dans les terrains forte pentes. L'interprétation des résultats de la tomographie électrique et la sismique réfraction pour les deux villages Echétel et Ouled Ali seront présentés au quatrième chapitre.

Chapitre 4

*Application de la tomographie électrique et
de la sismique réfraction*

*pour la caractérisation des glissements
d'Echtel et D' Ouled Ali*

Introduction

Les méthodes géophysiques, comme la méthode sismique et la méthode électrique, sont bien adaptées à l'étude structurale des glissements de terrain et à la compréhension de leurs mécanismes internes. Elles permettent des mesures de vitesse des ondes de compression et de la résistivité électrique, paramètres considérés comme essentiels pour définir les propriétés des matériaux géologiques remobilisés ou en place. L'étude géophysique par sismique réfraction et électrique multi-électrodes en configuration dipôle-dipôle a été effectuée sur deux sites (Echetel et Ouled Ali) dans la wilaya de Bejaia. Elle s'inscrit dans le volet des risques des instabilités des talus

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats des ces méthodes appliquées. Ceci a eu pour impact l'apparition des glissements de terrain à toutes échelles d'observation et peuvent ainsi être utilisées pour caractériser l'étendus des glissements.

4.1. Objectif de l'étude

L'objectif de l'intervention des essais de reconnaissance géophysique par la tomographie électrique et la sismique réfraction, dans le cadre de cette étude, est d'obtenir les informations suivantes :

- la profondeur du substratum ;
- la profondeur des failles existantes ;
- la géométrie des nappes ;
- la géométrie des argiles en place ;
- la nature des couches géologiques traversées ;
- et l'étendue des zones agressives.

4.2. Campagne topographique

Les levés topographiques ont consisté à accompagner les travaux de géophysiques, en relevant les points de sondages électriques et les profils sismiques. Les levés des points vont permettre de caler les données de la géophysique électrique et sismique sur la réalité du terrain. L'intervention s'est effectuée sur les deux sites d'Echetel (**2 profils électriques**) et (**13 profils sismiques**) d'Ouled Ali (**6 profils électriques**) et (**32 profils sismiques**), à l'aide d'une station totale LEICA TS02 (figure 4.2), (voir annexe 3), et d'un véhicule tout terrain.

La nature de la morphologie du terrain d'études a nécessité l'intervention de deux topographes et de trois ouvriers. Le système de projection des coordonnées est le WGS84

UTM zone 31. Le rattachement géodésique s'est effectué à partir d'un repère localisé à Kherrata par cheminement au GPS (annexe 3).

Les résultats de calculs des stations, points et profils levés sont donnés en (annexe 4).



Figure 4.1 : Levés topographique villages Echetel et Ouled Ali.



Figure 4.2 : Station totale LEICA TS02.

4.2. Prospection électrique

4.2.1. Procédure de mesure

Dans cette étude, nous avons utilisé une technique de prospection électrique multi-électrodes en configuration dipôle-dipôle (figure 2.7), appelée "imagerie électrique" ou encore tomographie électrique (figure 4.3a, 4.3b). 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. Les mesures de résistivité apparentes ont été réalisées à l'aide d'un résistivimètre de marque Syscal Junior Switch 48,

composé d'un système multi électrode d'Iris (figure 2.8). Après traitement des données mesurées, une coupe en 2D de la variation des résistivités apparentes du sous sol est obtenue. Les résistivités vraies sont déduites après inversion en utilisant le logiciel Res2dinv, permettant de déterminer la géométrie des différentes formations géologiques après interprétation.



Figure 4.3 : Positionnement des électrodes sur site village Echete et Ouled Ali.

Les conditions de mise en œuvre sur terrain n'ont pas été favorables afin de couvrir les deux zones selon la répartition des points correspondant au plan fourni par le client. La topographie chahutée et l'habitat épars très disperses ont représenté des contraintes difficiles à contourner. En tenant compte de ces aspects contraignant, nous avons réalisé des profils d'imagerie électriques en continu afin de couvrir l'ensemble des deux sites en tenant compte particulièrement de la problématique du glissement. La profondeur d'investigation atteinte se situe entre 15 et 43 m selon l'accessibilité.

4.2.2. Présentation des résultats et interprétation

Les profils de résistivités ont permis d'établir des coupes verticales montrant la résistivité des terrains prospectés jusqu'à une profondeur maximum de 43 mètres environ. Les résultats représentent des coupes de résistivités en couleurs conventionnelles, allant du bleu pour les plus faibles valeurs de résistivités (sol conducteur) au rouge - marron pour les plus fortes résistivités (sol non conducteur).

Les données électriques ont été acquises selon le dispositif gradient. Cette configuration d'électrode apporte un meilleur compromis résolution verticale et latérale.



Figure 4.4 : Positionnement des profils électrique et sismique sur site village Echetal.

4.2.1.1. Site du village Echetel

Les deux panneaux électriques P1 et P2 (figure 4.4) ont été réalisés selon une direction NW-SE. Chacun s'étend sur une longueur de 235m. L'espacement inter électrodes est de 5 mètres. L'implantation de ces profils a permis de mettre en évidence l'allure de la structure en profondeur et d'estimer la profondeur du plan de rupture qui représente la différence entre la profondeur maximale de la ligne de rupture et le plan de la surface libre amont.

L'analyse des résultats de ces panneaux (figure 4.5, 4.6) et (figure 4.7, 4.8) sur le site d'Echetel montre un certain degré d'hétérogénéité dans la distribution spatiale de la résistivité électrique. Cette propriété provient manifestement du degré provoquée par l'hétérogénéité des terrains lors du glissement.

- Tout au long de ces profils, on remarque la présence de terrains résistants d'épaisseur variables allant de 3 à 15 mètres. Les résistivités de ce terrain varient de 200 Ohm.m à 800 Ohm.m. Ces terrains correspondent à des éboulis de pente. Les résistivités élevées observées dans la partie haute de ces deux coupes de résistivités représentent des dépôts de pente grossiers, alors que la partie inférieure de ce terrain correspond à la fraction plus fine.
- La couche sous jacente présente de faibles résistivités inférieure à 40 Ohm.m. Elle correspond probablement à la formation marneuse altérée (Confirme avec le tableau 2.2 du chapitre 2).
- A environ de 35 m de profondeur apparait une formation résistante, probablement attribuée au substratum. La surface de rupture suit une ligne de résistivités d'intensité moyenne comprise entre 20 et 40 Ohm.m. Elle est matérialisée sensiblement par la ligne de discontinuité électrique, elle se situe entre 6 et 15 m de profondeur.

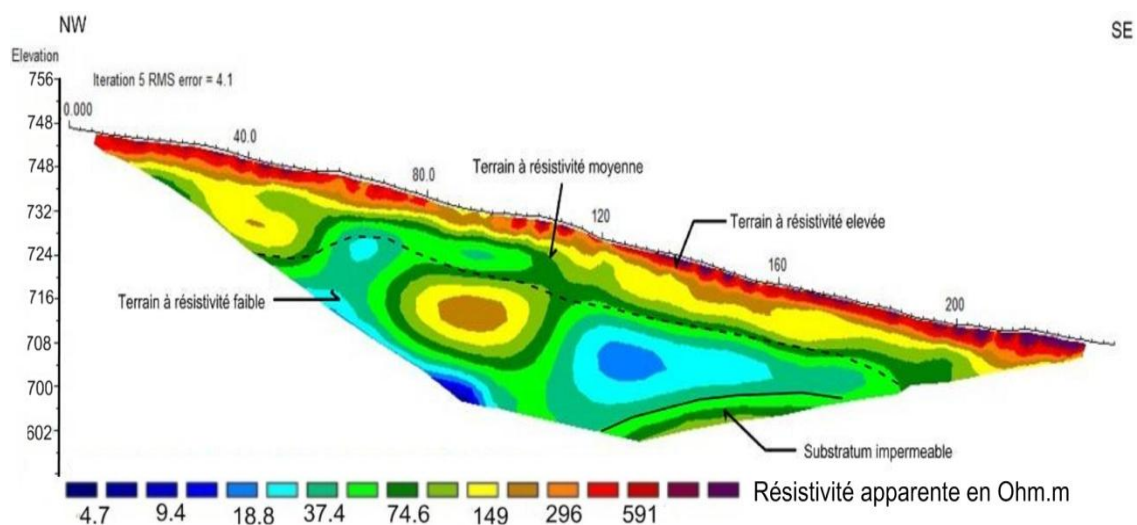


Figure 4.5 : modèle de résistivité interprété du profil P1 Echetel.

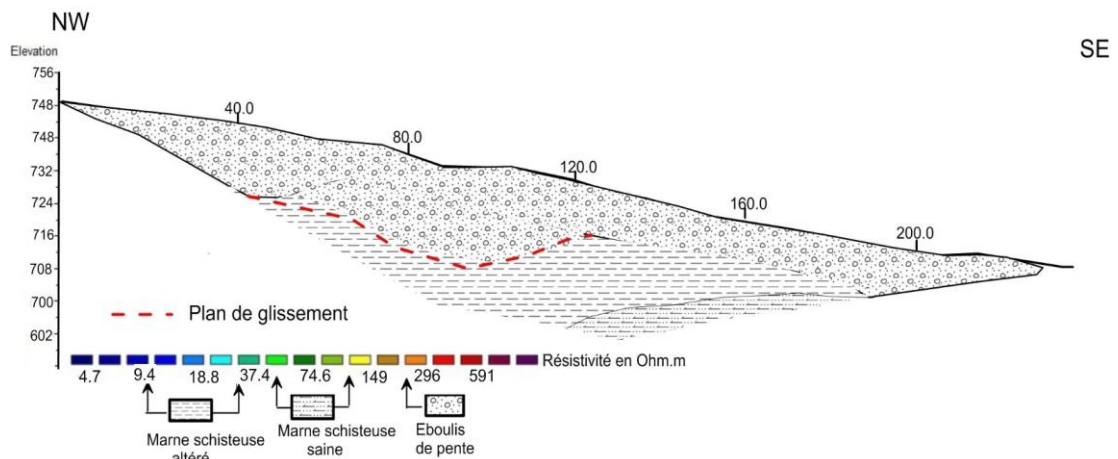


Figure 4.6 : Restitution géologique du profil PE1 Echetel.

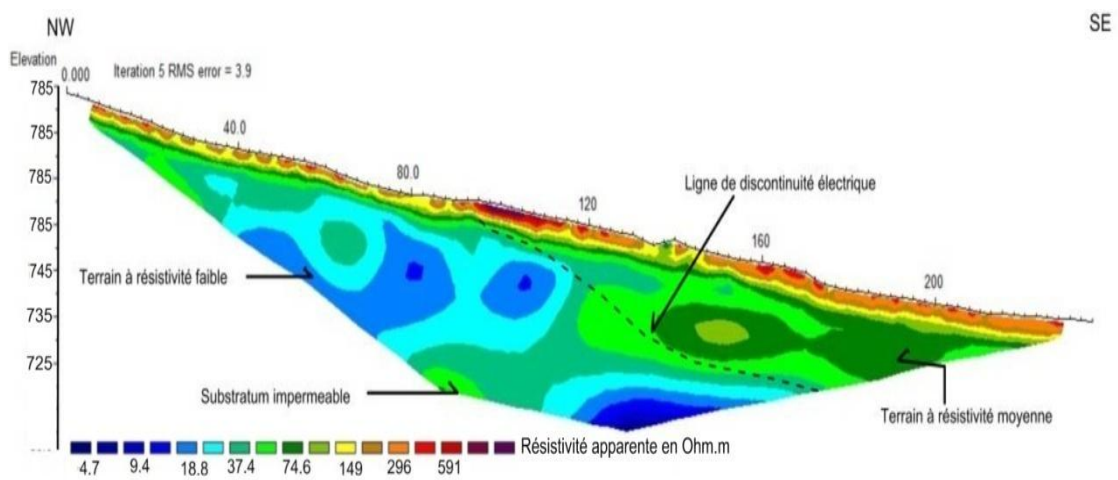


Figure 4.7 : Modèle de résistivité interprété du profil P2 Echetel.

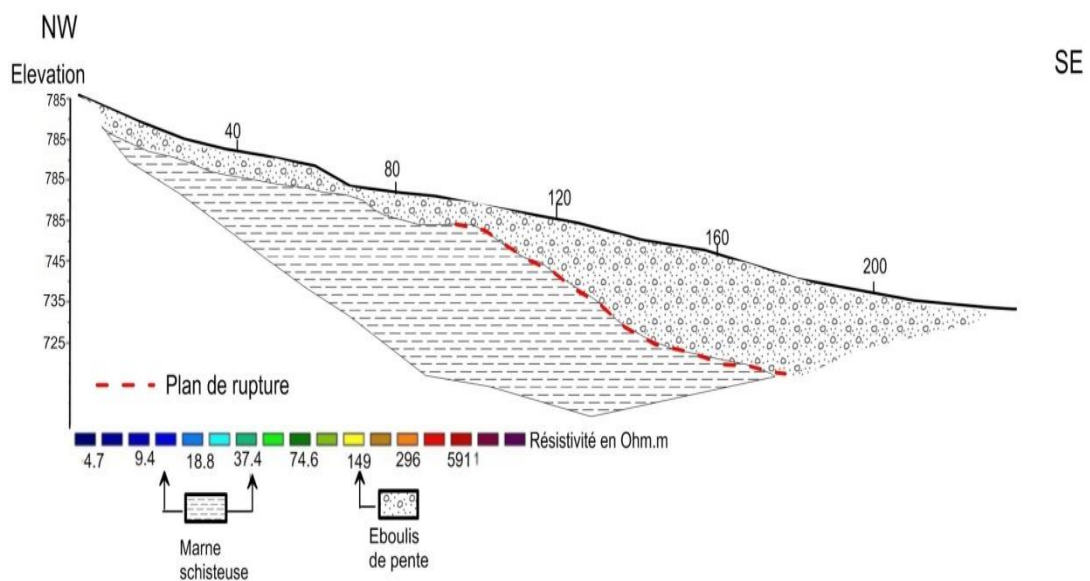


Figure 4.8 : Restitution géologique du profil PE2 Echetel.

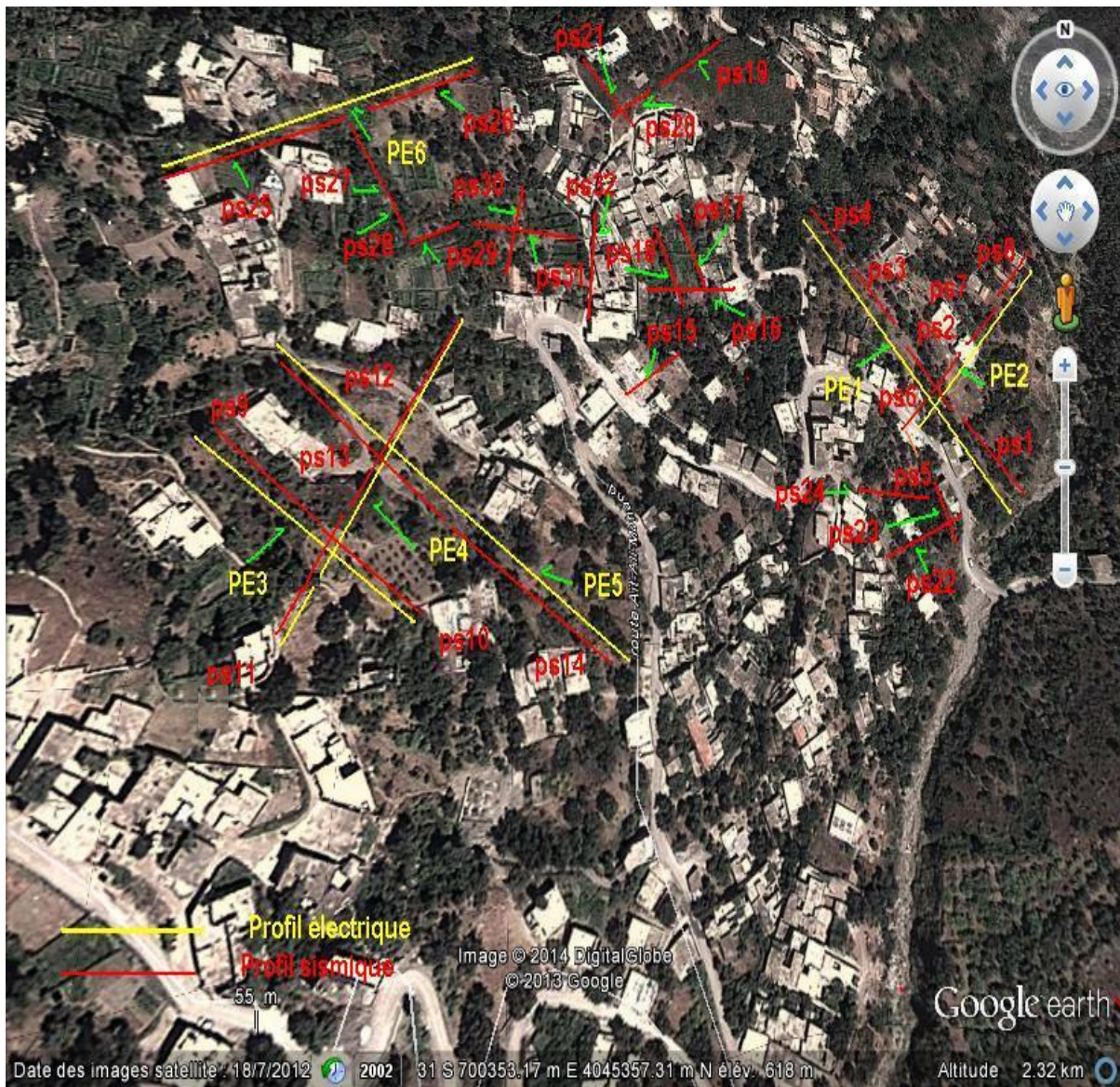


Figure 4.9 : Positionnement des profils du site - village Ouled Ali.

4.2.1.2. Site du village Ouled Ali

L'analyse des deux profils P1 et P2 (figure 4.9) montrent des valeurs de résistivités qui varient de 20 à plus de 600 Ohm.m (figure 4.10, 4.11). Leur interprétation met en évidence deux horizons.

Le premier horizon est conducteur, il correspond à la couche de sol pédologique et la formation de marne schisteuse fortement altérée. Son épaisseur varie de 5 à plus de 15 m. Il est caractérisé par des résistivités moyennes, de l'ordre de 30 Ohm.m. Les eaux infiltrées à travers cette formation sont responsables de la diminution des résistivités observées. En surface, les résistivités sont légèrement plus élevées. Cela peut s'expliquer par un tassement de la matière à cet endroit.

En dessous, nous observons un horizon de résistivités relativement moyennement élevées de 300 Ohm.m. Cette valeur moyenne pourrait être liée à une présence de la formation de marne schisteuse saine.

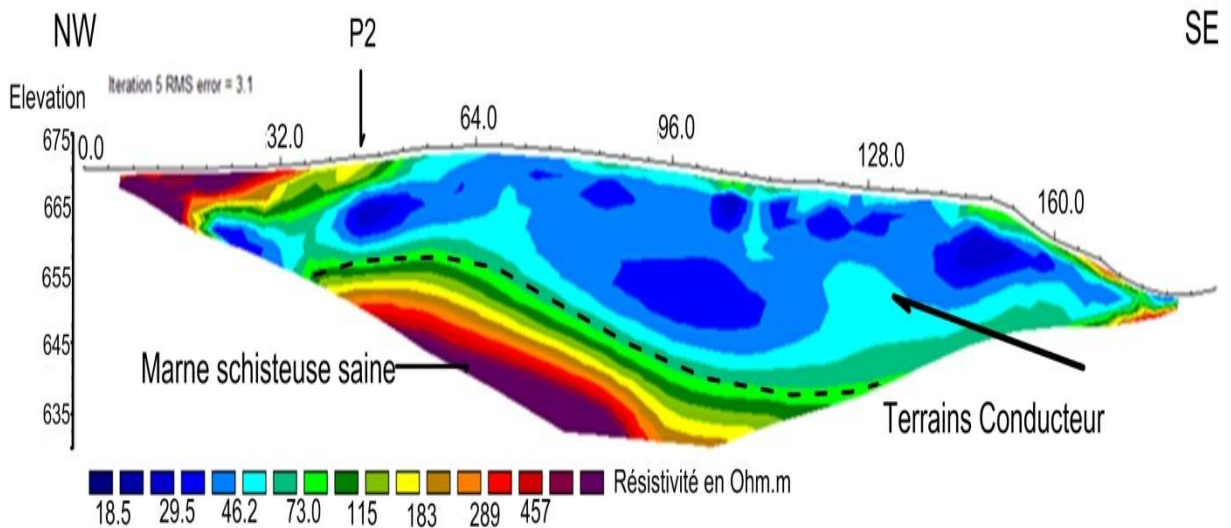


Figure 4.10 : Modèle de résistivité interprété du profil P1 Ouled Ali.

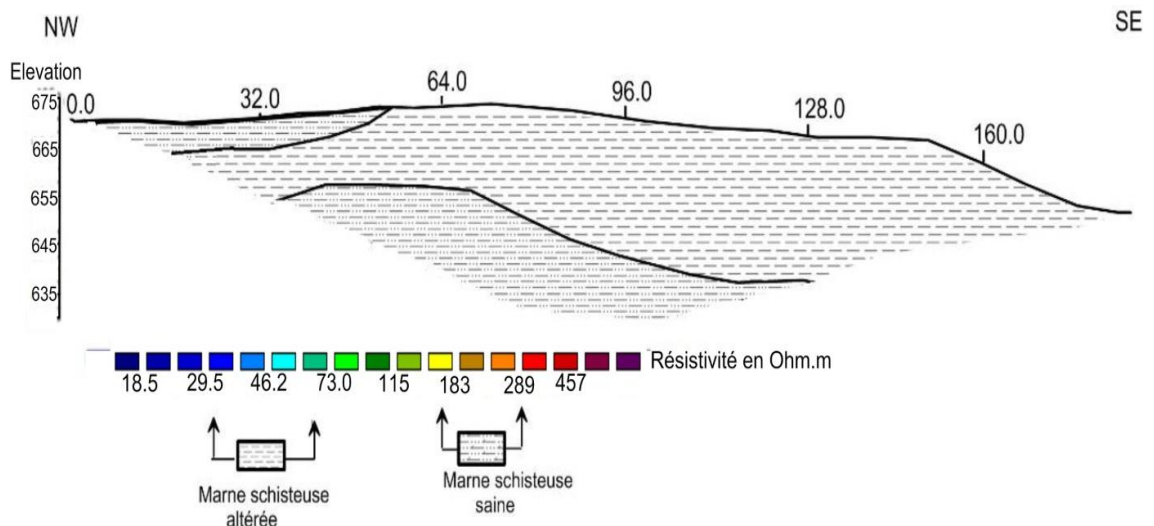


Figure 4.11 : Restitution géologique du profil PE1 Ouled Ali.

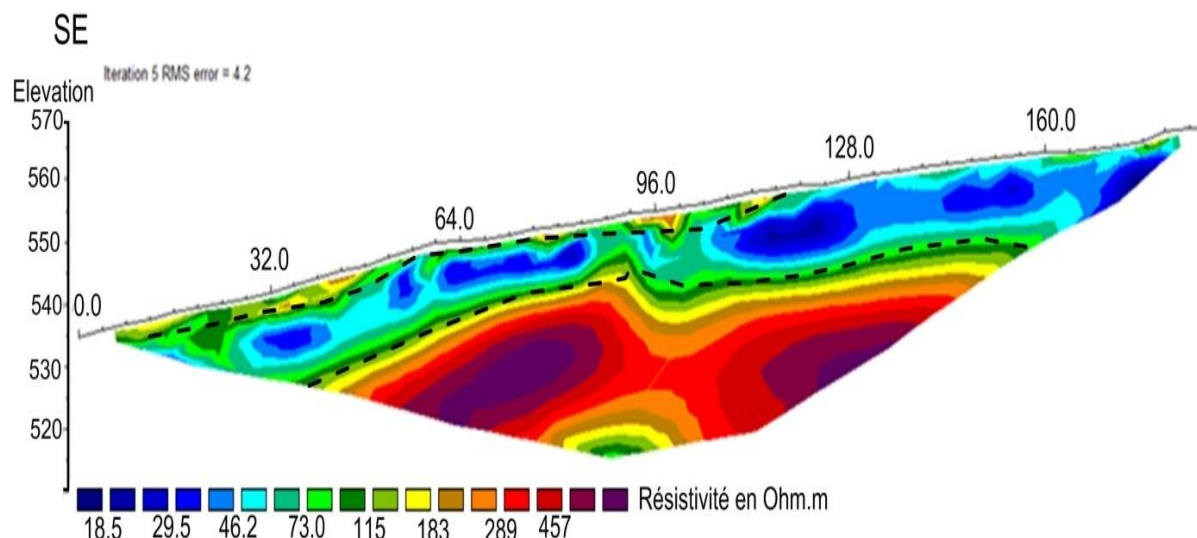


Figure 4.12 : Modèle de résistivité interprété du profil PE2 Ouled Ali.

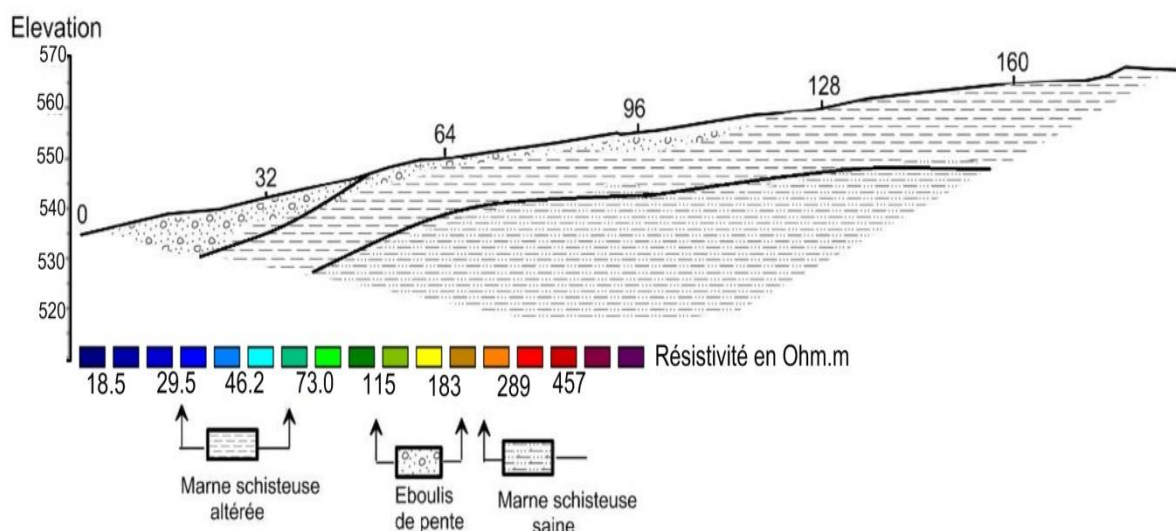


Figure 4.13 : Restitution géologique du profil PE2 Ouled Ali.

Les profils P3 à P6 profils montrent que la résistivité est de 30 Ohm.m en moyenne pour les formations conductrices et de 400 Ohm.m pour les formations moyennement résistantes.

La présence en surface de terrains résistants peu épais correspondent à l'observation de tassement de la formation pédologique (le cas des profils P3 et P4).

L'apparition sous cette mince couche d'une alternance de formations, conductrices à moyennement résistante, inclinées dans le sens de la pente, correspond à la marne-schisteuse aux degrés d'altération variable. Les formations conductrices sont probablement humides. Nous avons repéré aux environs 60 m à l'Est du profil P4, une coupe géologique confirmant nos hypothèses (voir photographie ci après).



Figure 4.14 : Coupe naturelle montrant l'importance de la formation de marne schisteuse du site Ouled Ali.

Ces modèles ont mis évidence l'absence d'accident géologique qui se traduit par un contraste de résistivité important à la profondeur prospectée.

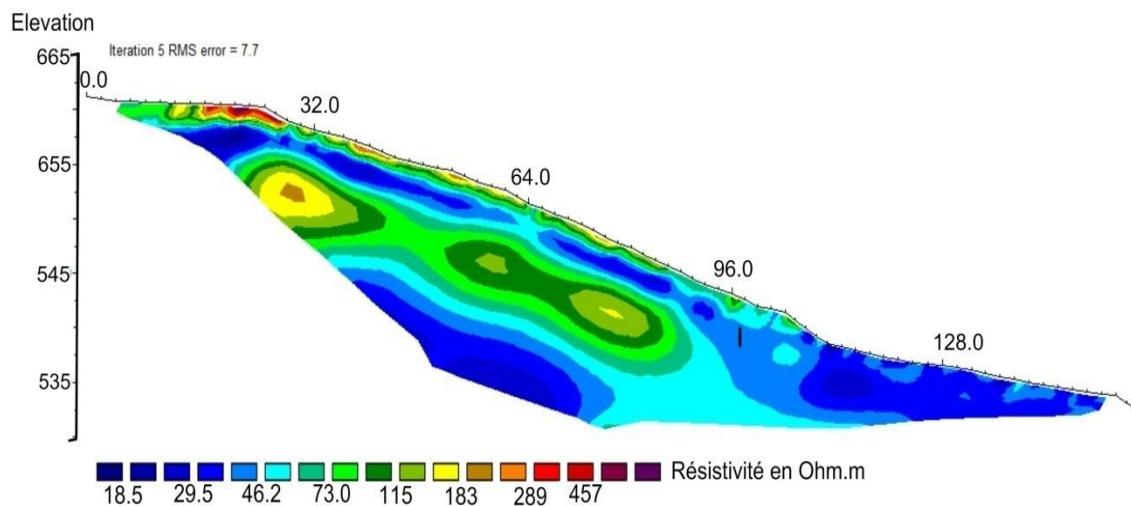


Figure 4.15 : Modèle de résistivité interprété du profil PE3 Ouled Ali.

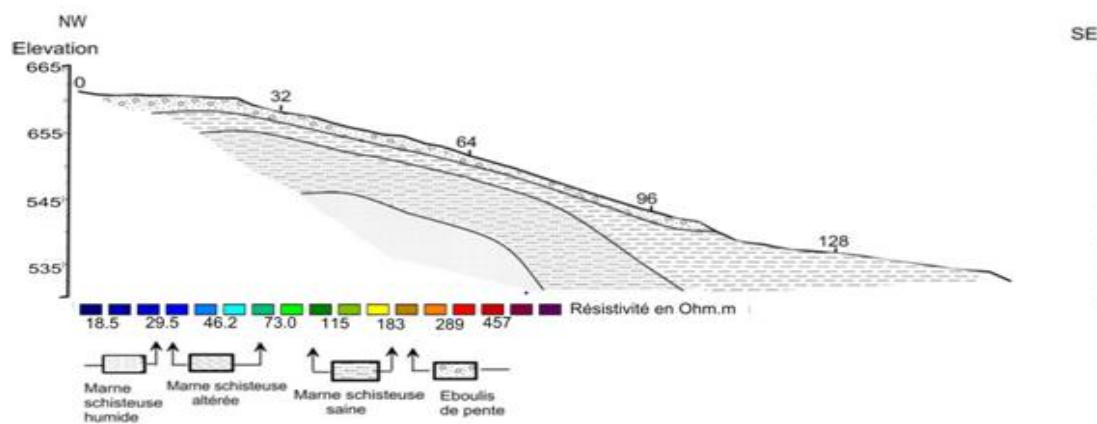


Figure 4.16 : Restitution géologique du profil PE3 Ouled Ali.

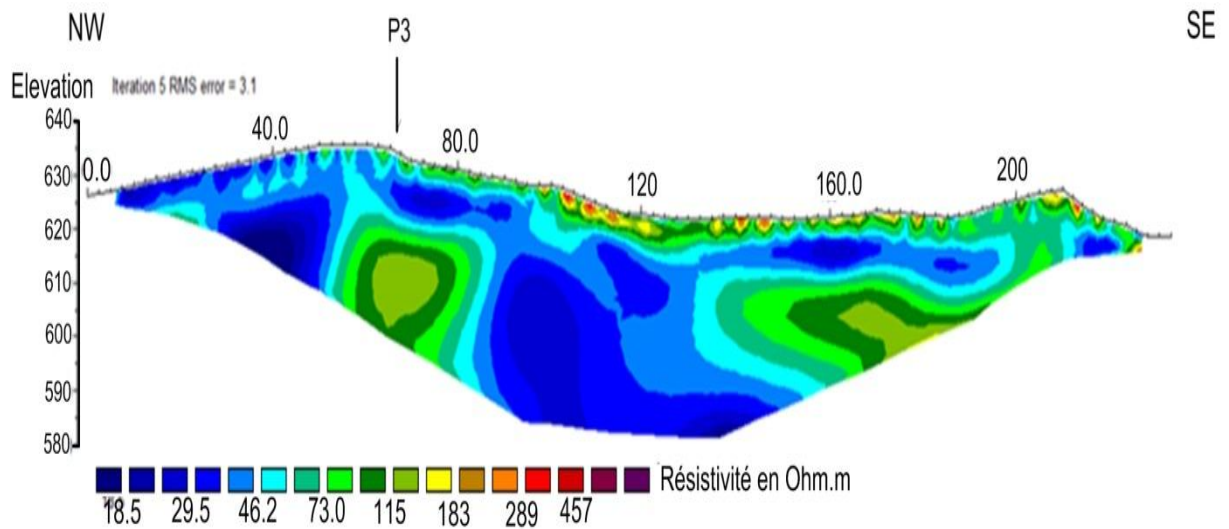


Figure 4.17 : Modèle de résistivité interprété du profil PE4 Ouled Ali.

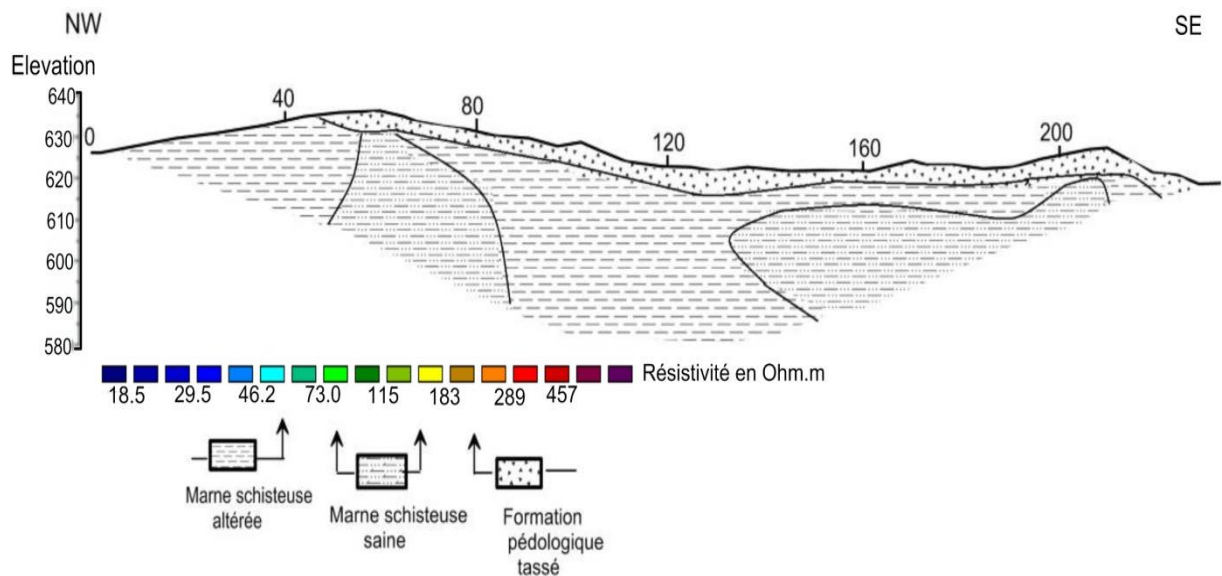


Figure 4.18 : Restitution géologique du profil PE4 Ouled Ali.

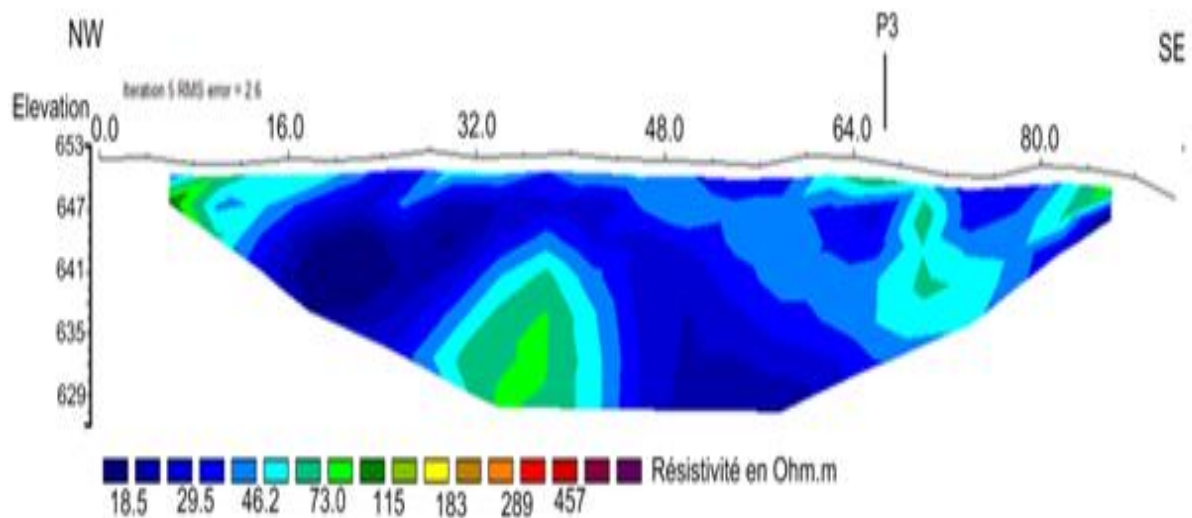


Figure 4.19 : Modèle de résistivité interprété du profil PE5 Ouled Ali .

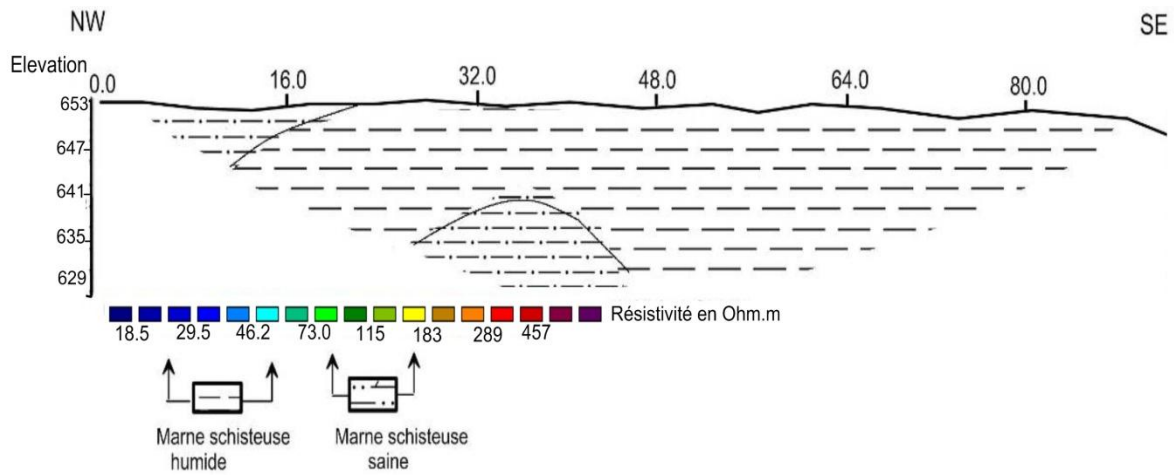


Figure 4.20 : Restitution géologique du profil PE5 Ouled Ali.

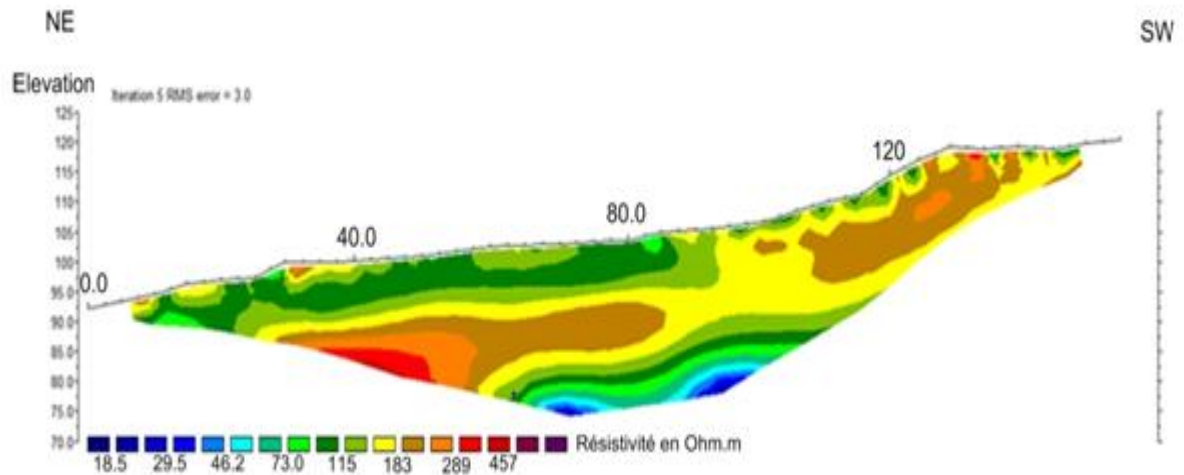


Figure 4.21 : Modèle de résistivité interprété du profil PE6 Ouled Ali.

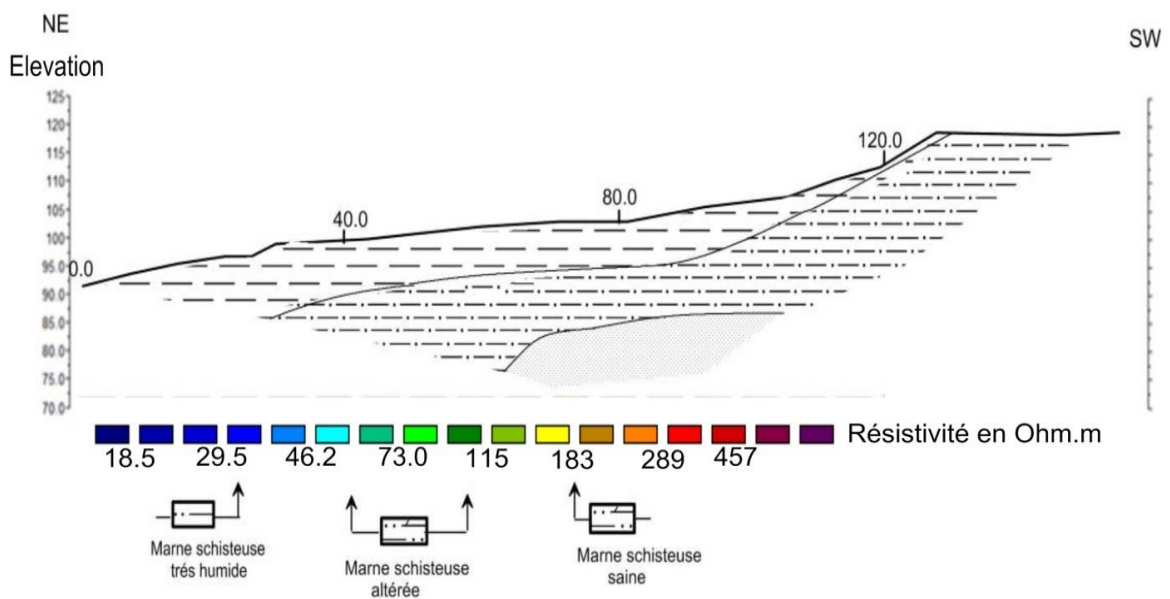


Figure 4.22 : Restitution géologique du profil PE6 Ouled Ali.

4.3. Prospection sismique

4.3.1. Procédure de mesure

Le matériel utilisé pour la réalisation des profils sismiques est le SUMMIT X STREAM Pro de DMT Allemagne à haute résolution avec un ordinateur intégré (figure 2.16).



Figure 4.23: Summit X Stream Pro (DMT).

Un signal sismique est enregistré en un point du sol par un capteur (sismographe ou géophone). Si on dispose un certain nombre de géophones (en général en ligne droite) et qu'on enregistre sur un même document les signaux sismiques obtenus par un même impact, on obtient un film sismique, à partir duquel il est aisé de déterminer les temps de trajet entre le point origine de l'ébranlement, et les divers capteurs.

Les (figure 4.24, 4.25) présentée ci dessous correspond à un enregistrement, ou film sismique, effectué avec un dispositif comprenant 24 capteurs sur les sites Echetel et Ouled Ali.

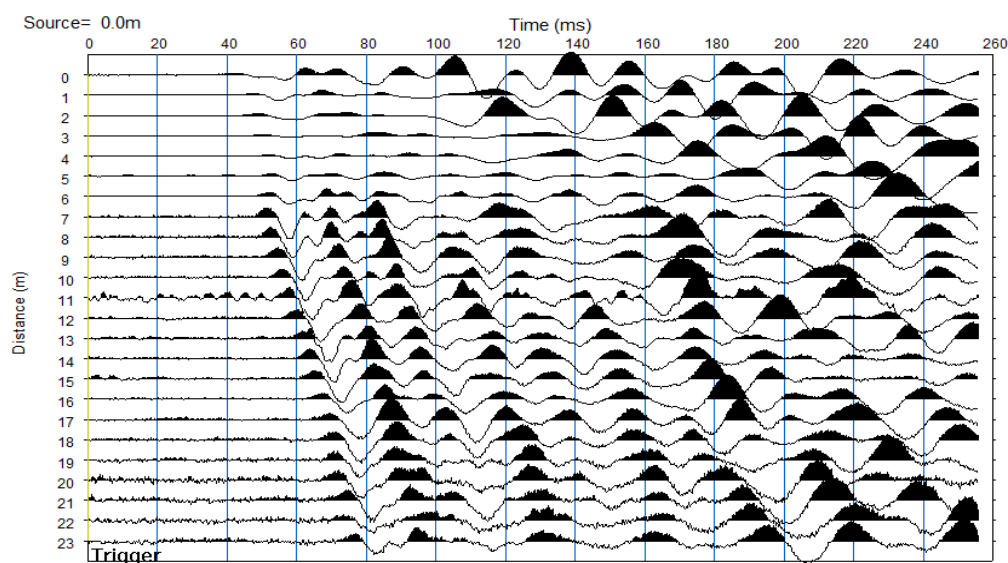


Figure 4.24 : Enregistrement du tir direct du profil PS1.

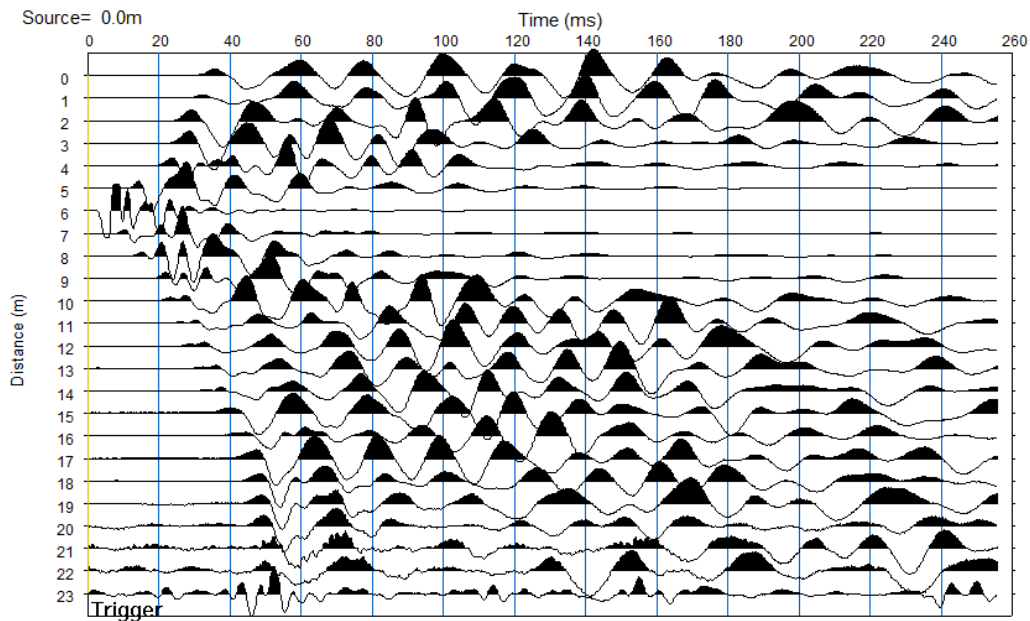


Figure 4.25 : Enregistrement du tir centré du profil PS1.

4.3.2. Présentation des résultats

4.3.2.1. Site du village Echetel

La position des profils sismiques est localisée dans la (figure 4.4). Les modèles de coupe sismique correspondantes aux différents profils sont illustrés par les (figures 4.26, 4.27, 4, 28,4.29 et 4.30) suivantes :

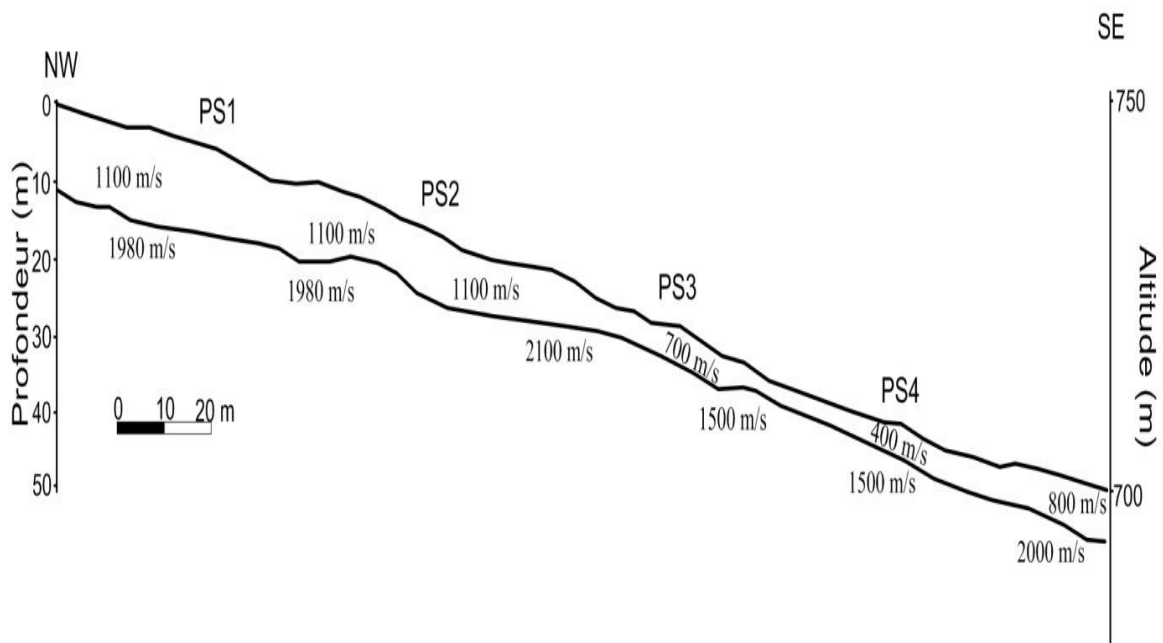


Figure 4.26 : Modèle de vitesse sismique correspondant aux profils PS1,PS2,PS3 et PS4,site village Echetel.

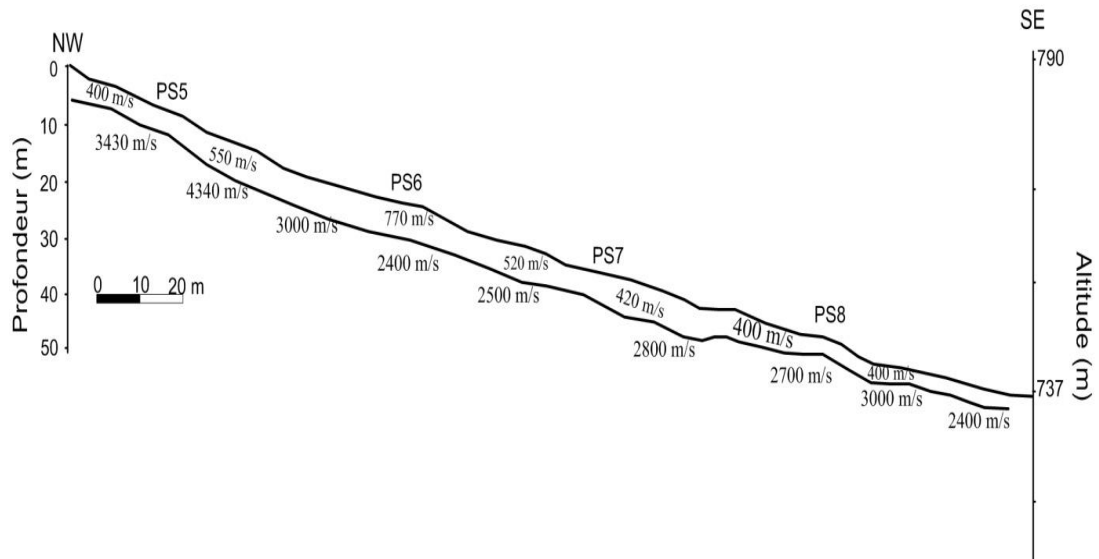


Figure 4.27 : Modèle de vitesse sismique correspondant aux profils PS5, PS6, PS7 et PS8, site village Echetel.

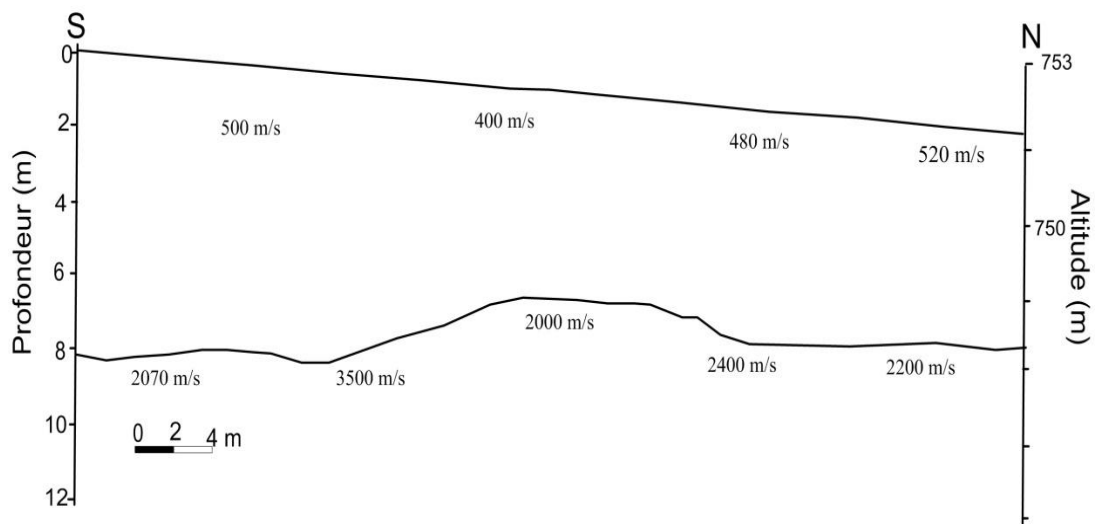


Figure 4.28 : Modèles de vitesse sismique correspondant au profil PS9.

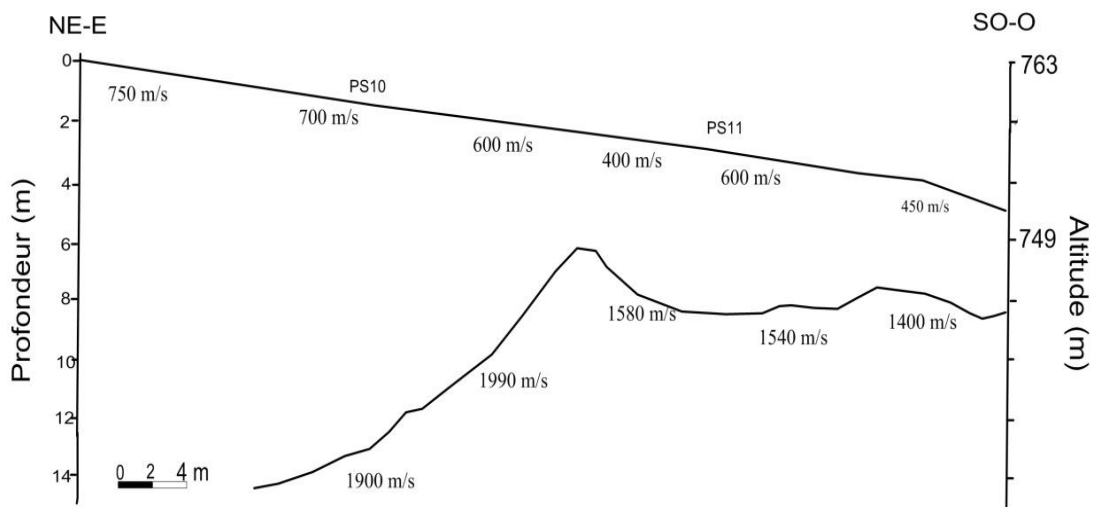


Figure 4.29 : Modèles de vitesse sismique correspondant aux profils PS10 et PS11.

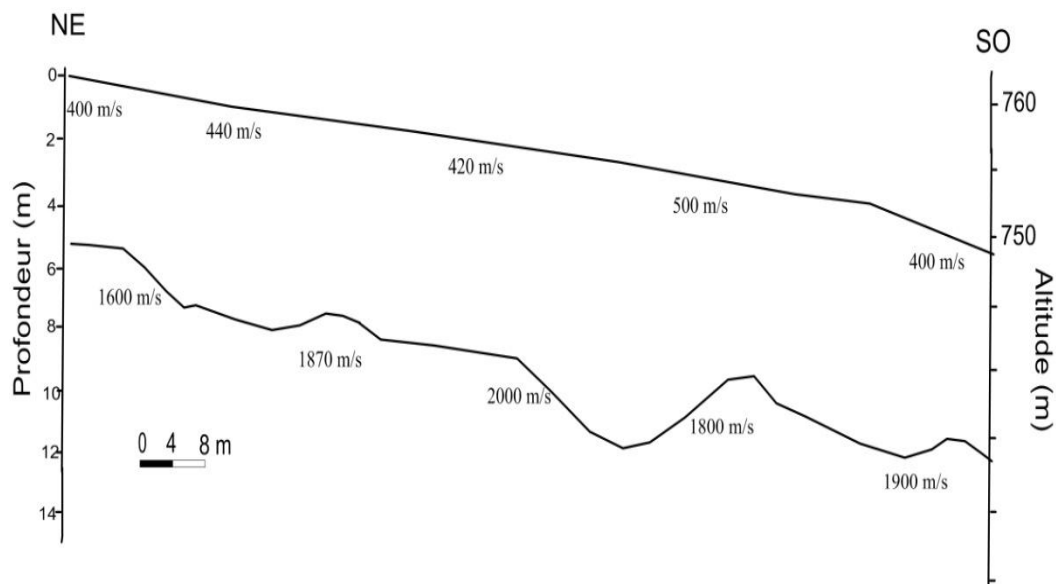


Figure 4.30 : Modèles de vitesse sismique correspondant aux profils PS12 et PS13.

Les coupes sismiques des PS1 à PS13 (figure 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 et 4.30) montrent l'existence de deux (02) couches seulement. En effet, une 1^{ère} couche de surface apparaît sur l'ensemble des profils. Elle a une vitesse assez variable qui va de 350 m/s à 700 m/s. Elle atteint plus de 1000 m/s au niveau du PS2. Ceci est du surement à des hétérogénéités dans sa constitution et particulièrement, elle doit englober du matériau ayant une grande vitesse (gros rochers). Elle représente les éboulis de pente.

Une 2^{ème} couche d'une vitesse allant de 2000 m/s à 3000 m/s a été identifiée le long de tous les profils. Sa vitesse approche quelques fois 4000 m/s (partie sup de PS3) ; elle représente probablement la partie sommitale du socle (Marne-Schisteuse).

Ces résultats, nous les retrouvons en confrontant le profil électrique PE2 de la (figure 4.5) et le profil sismique PS1, PS2, PS3 et PS4 de la (figure 4.26) comme suit :

Il n'a pas été possible de voir une 3^{ème} couche.

L'épaisseur de la 1^{ère} couche est variable. Elle atteint une épaisseur de 12 m en haut du PS2. Cette épaisseur peut être plus grande dans certains endroits où la différenciation des vitesses entre la 1^{ère} couche et la 2^{ème} couche n'est pas évidente. Ceci est particulièrement possible là où la vitesse de la 2^{ème} couche est la plus petite (PS1).

Aussi, Comme on a enregistré aussi une vitesse faible d'environ 1.500 m/s (PS3 et PS10). Probablement, en allant plus bas en altitude, la masse rocheuse des blocs diminue et fait que la vitesse de cette formation diminue aussi.

L'épaisseur de la couche superficielle est variable entre 3 et 10 m. Elle atteint une épaisseur de 12 m en haut du PS2 et de 14 m en haut du PS11. Cette épaisseur peut être plus grande dans certains endroits où la différenciation des vitesses entre la 1^{ère} et la 2^{ème} couche

n'est pas évidente. Aucun décrochement dans les dromochroniques (Annexe 5), synonyme de faille, n'a été observé.

Dans toute la partie en bas de la route, il n'a pas été possible d'estimer l'épaisseur de la couche de remaniement. En effet, il n'a pas été possible de caractériser un horizon profond (une 3ème couche) ayant une vitesse importante qui pourrait être synonyme du socle. On peut supposer que le socle se trouve à de grandes profondeurs à savoir supérieures à 20m.

La corrélation entre vitesse sismique et lithologique est représenté par le (tableau 4.1) suivant :

Tableau 4.1 : Vitesse sismique site Echetel.

Vitesse sismique (m/s)	Formation géologique
320-1000	Eboulis de pente
1200-2000	Schiste argileux altéré
>2000	Schiste argileux sain

4.3.2.2. Site du village Ouled ali

L'acquisition à Ouled Ali peut être différenciée elle aussi en 2 parties : l'une à l'Est (PS3 à PS6) et l'une au centre (PS9 à PS14), comme le montre la (figure 4.10). Les sections issues de l'acquisition dans cette seconde partie sont explicitées par les figures (4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42, 4.43, 4.44, 4.45, 4.46, 4.47, 4.48, 4.49, 4.50 et 4.51) suivantes :

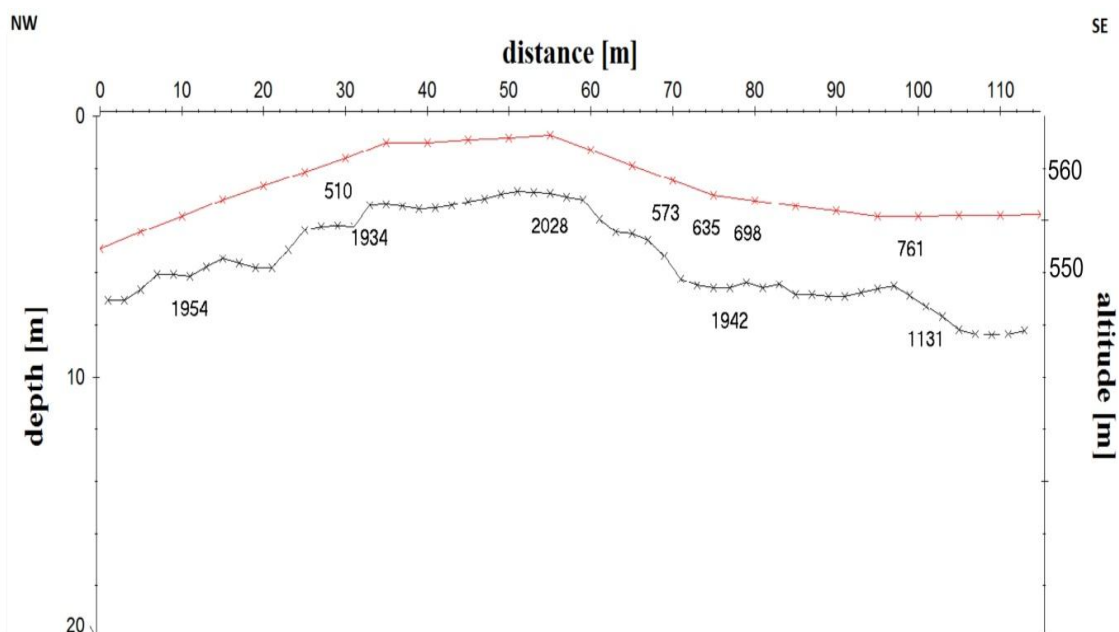


Figure 4.31 : Coupe sismique des profils PS1 et PS2 site village Ouled Ali.

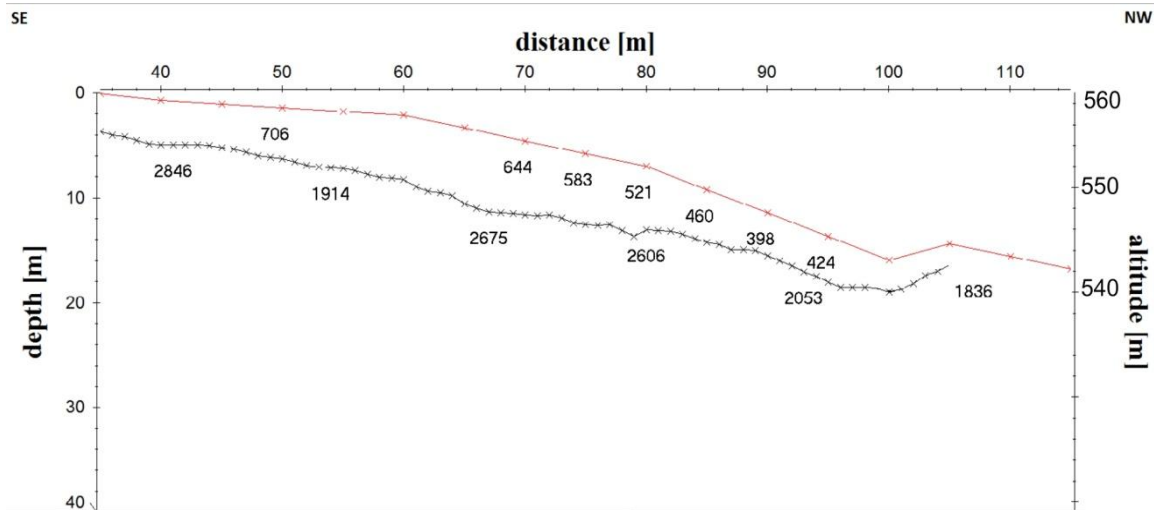


Figure 4.32 : Coupe sismique des profils PS3 et PS4 site village Ouled Ali.

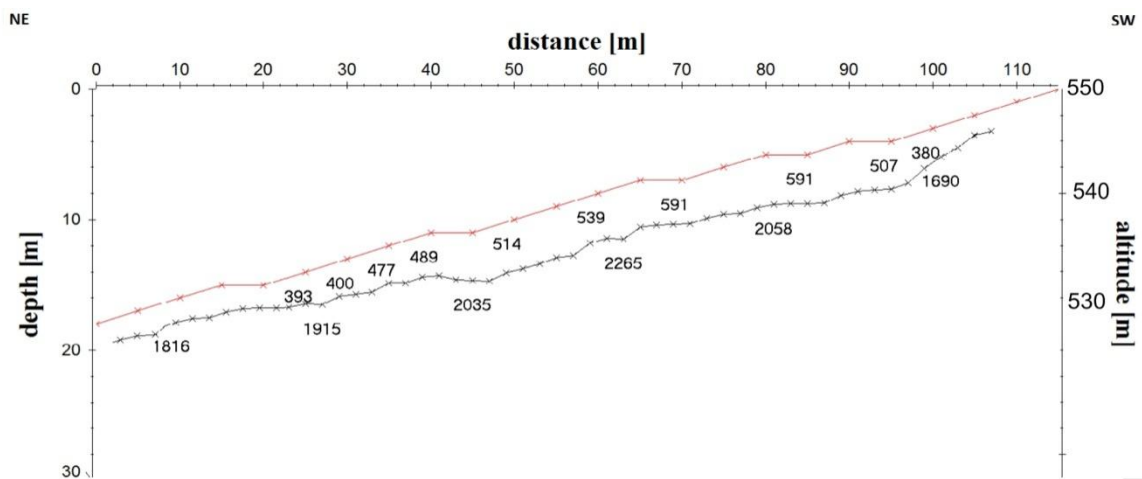


Figure 4.33 : Coupe sismique des profils PS5 et PS6 site village Ouled Ali.

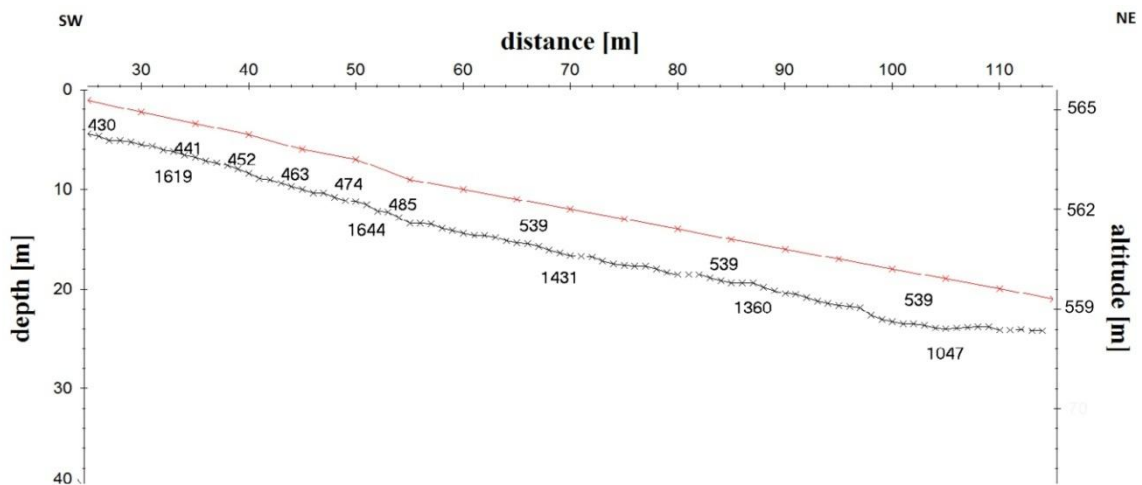


Figure 4.34 : Coupe sismique des profils PS7 et PS8 site village Ouled Ali.

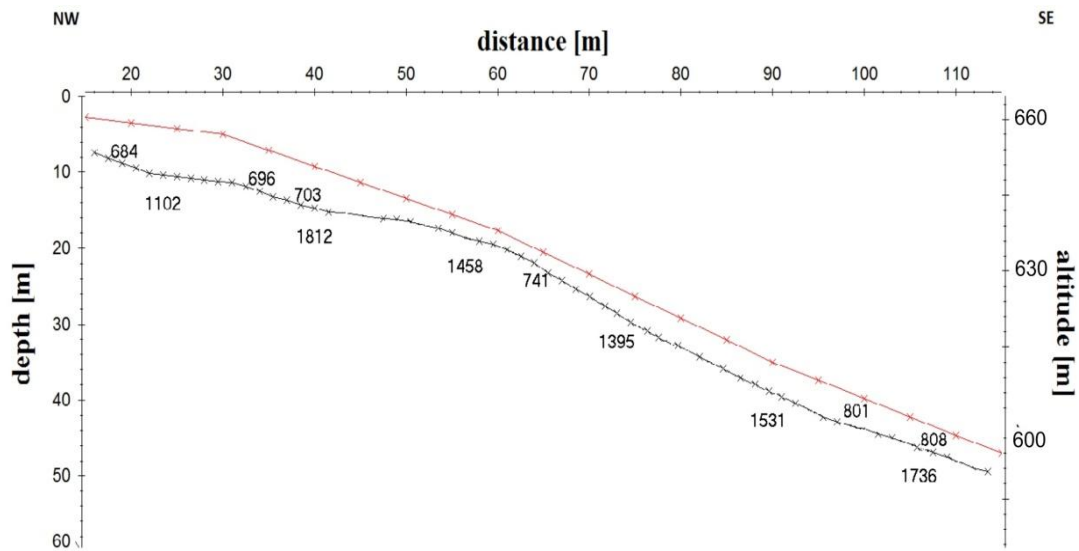


Figure 4.35 : Coupe sismique des profils PS9 et PS10 site village Ouled Ali.

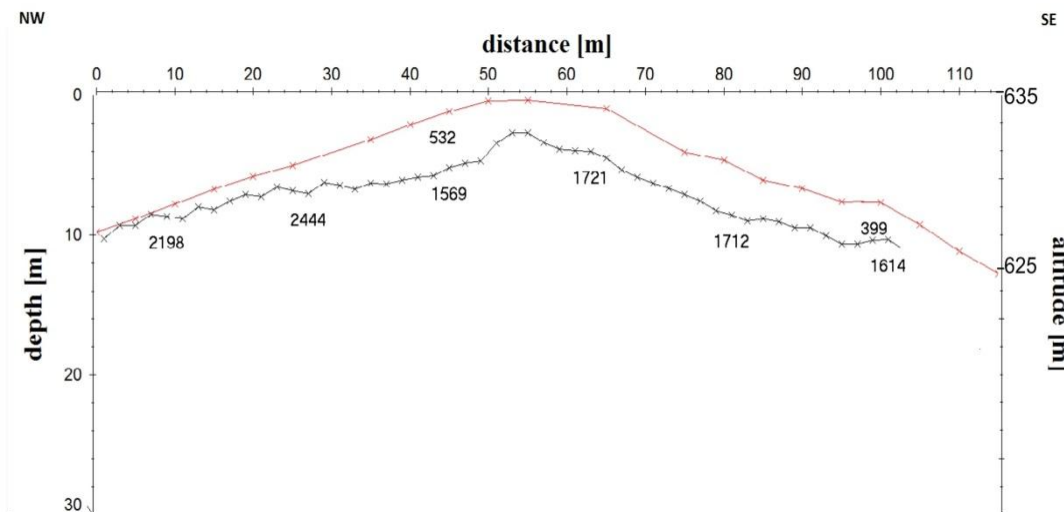


Figure 4.36 : Coupe sismique des profils PS11 et PS12 site village Ouled Ali.

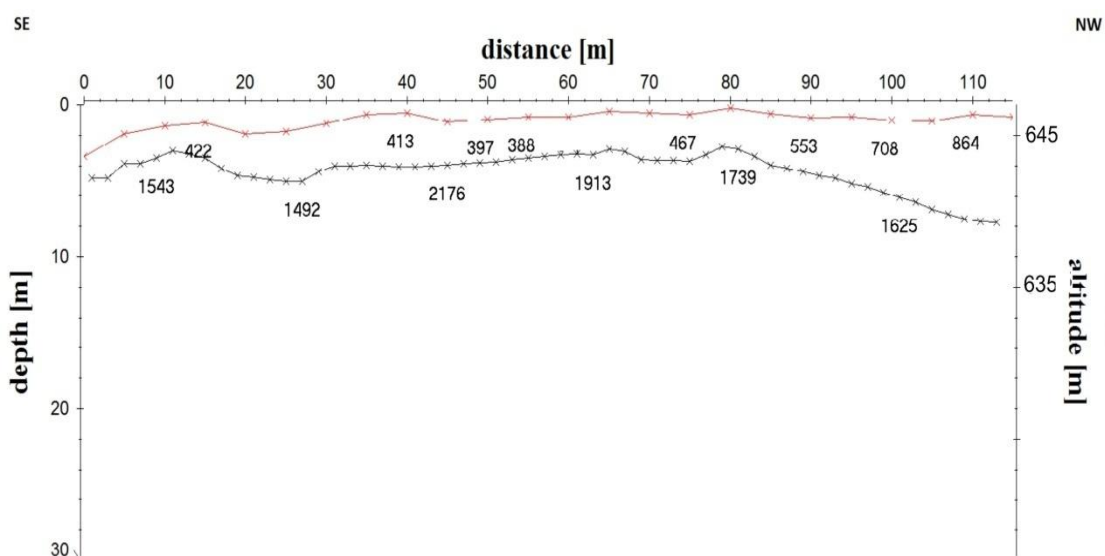


Figure 4.37 : Coupe sismique des profils PS13 et PS14, site village Ouled Ali.

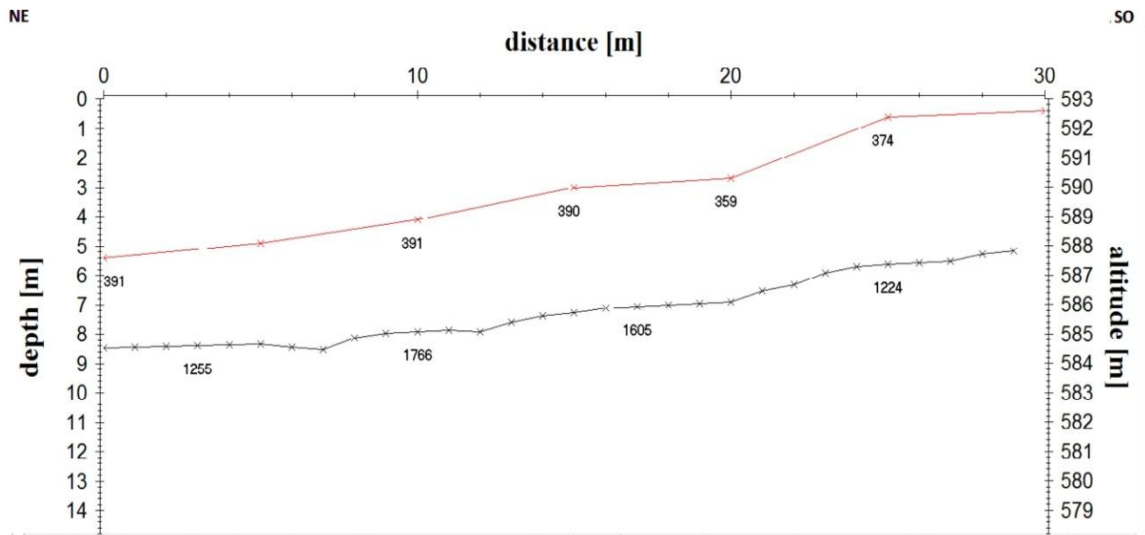


Figure 4.38 : Coupe sismique du profil PS15, site village Ouled Ali.

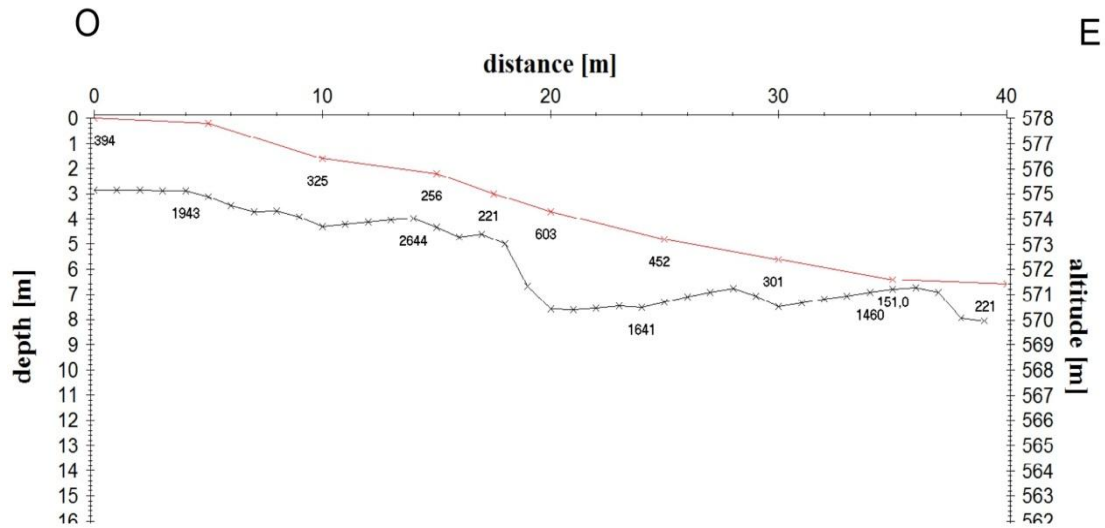


Figure 4.39 : Coupe sismique du profil PS16, site village Ouled Ali.

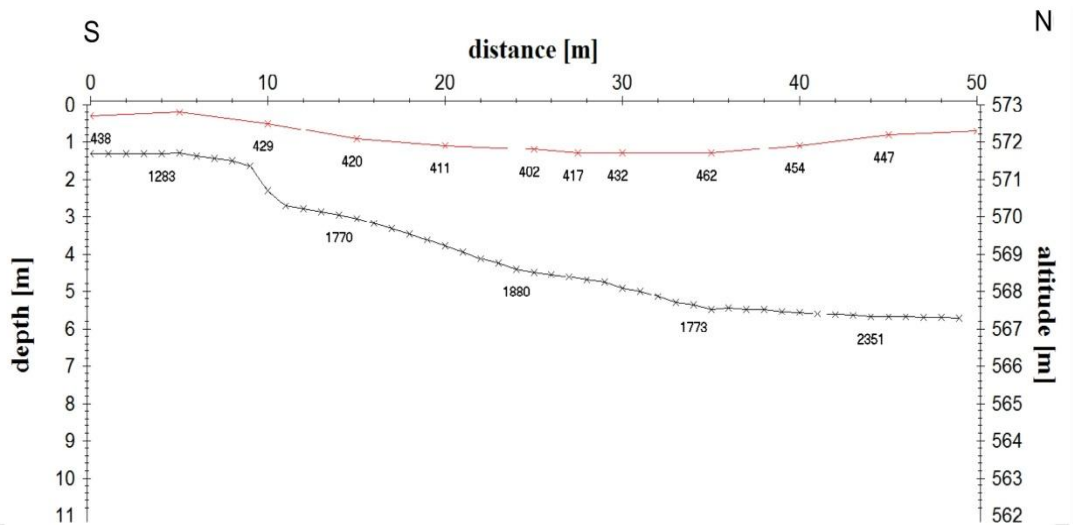


Figure 4.40 : Coupe sismique du profil PS17, site village Ouled Ali.

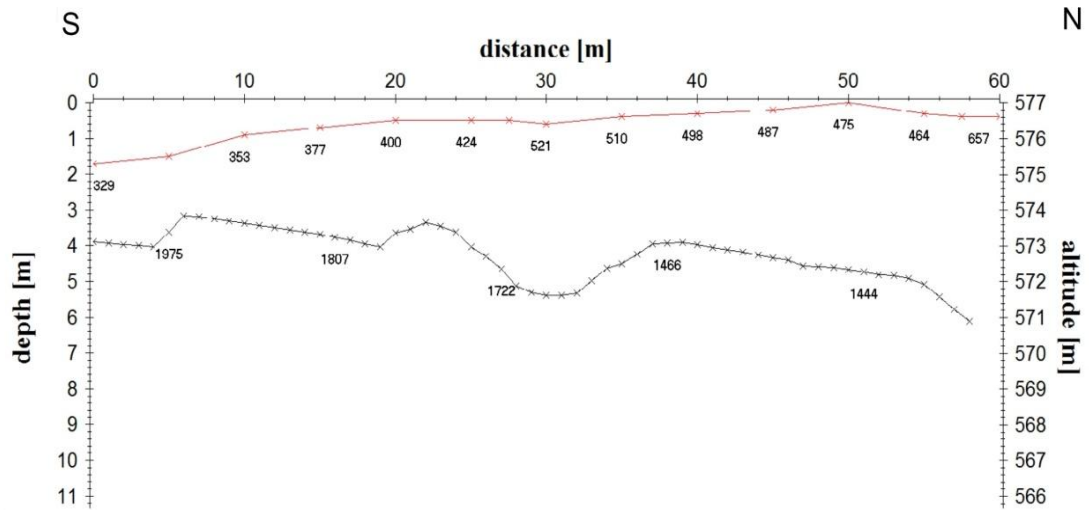


Figure 4.41 : Coupe sismique du profil PS18, site village Ouled Ali.

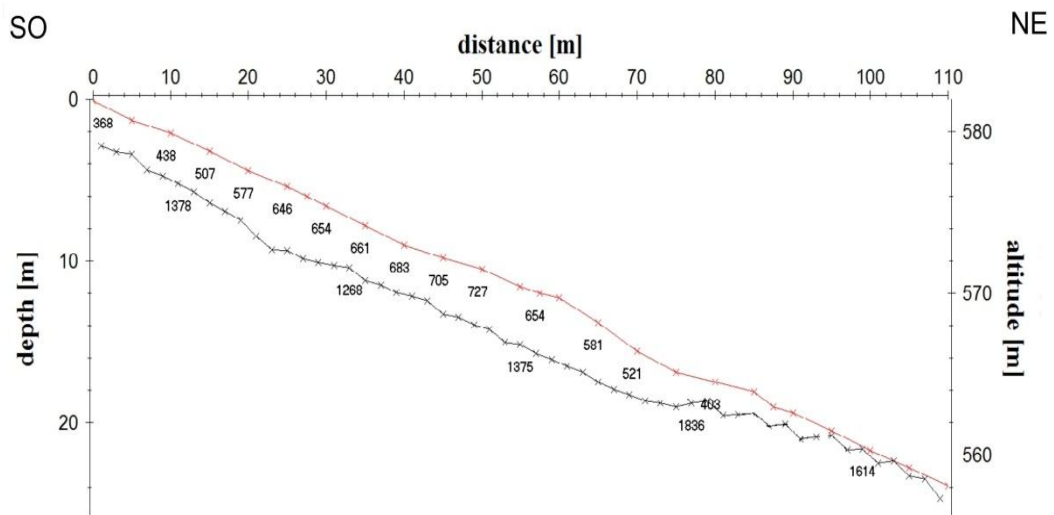


Figure 4.42 : Coupe sismique des profils PS19 et PS20, site village Ouled Ali.

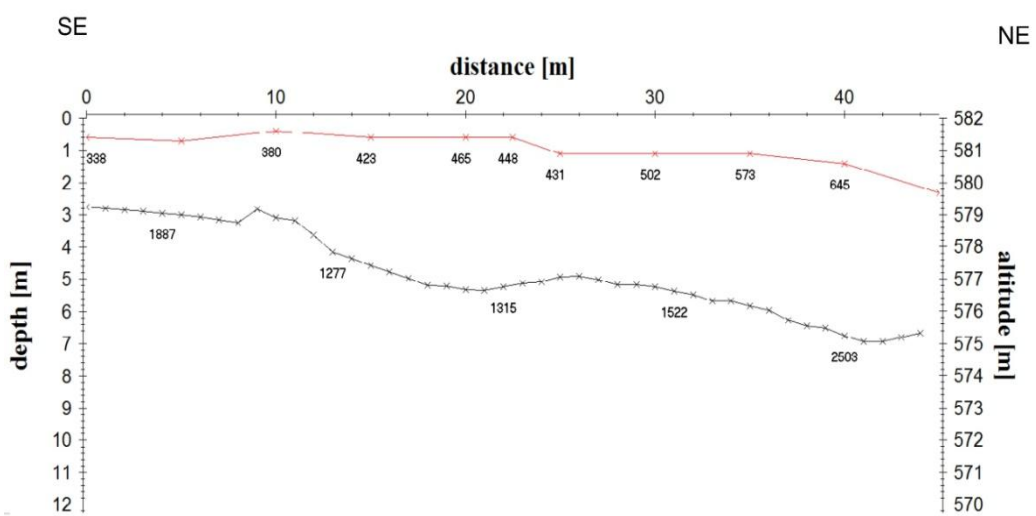


Figure 4.43 : Coupe sismique du profil PS21, site village Ouled Ali.

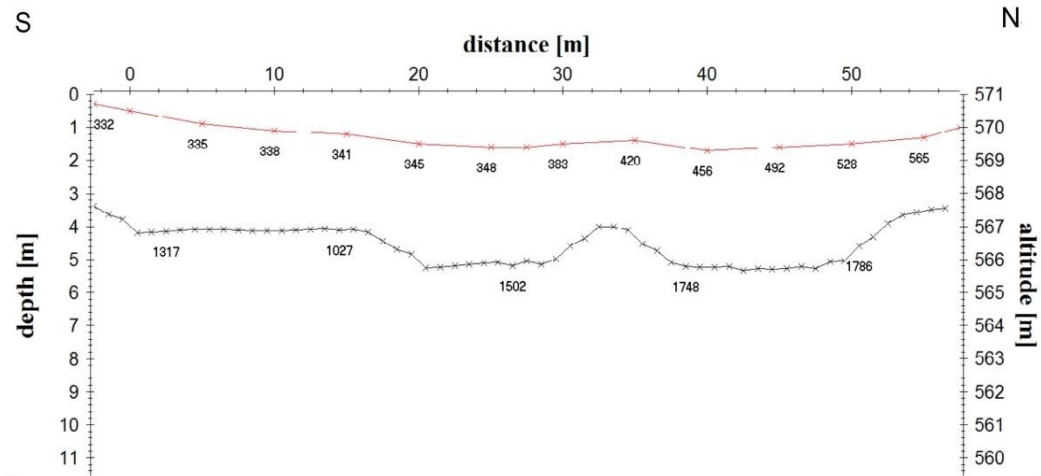


Figure 4.44 : Coupe sismique du profil PS22, site village Ouled Ali.

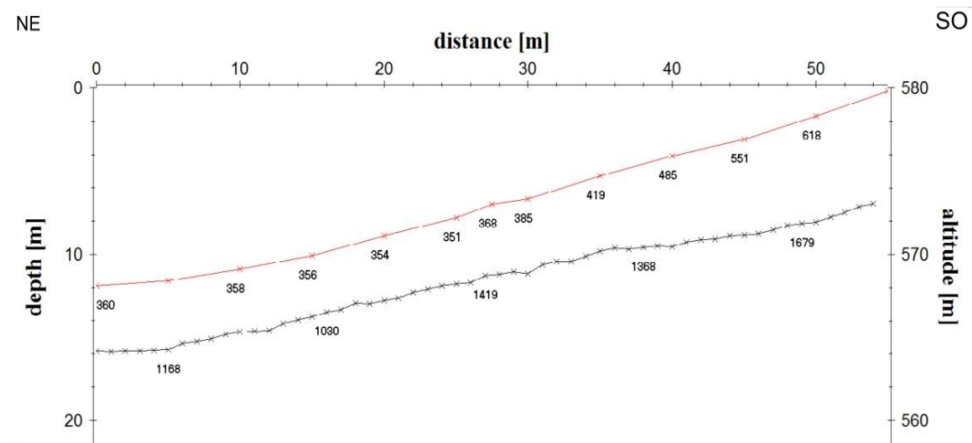


Figure 4.45 : Coupe sismique du profil PS23, site village Ouled Ali.

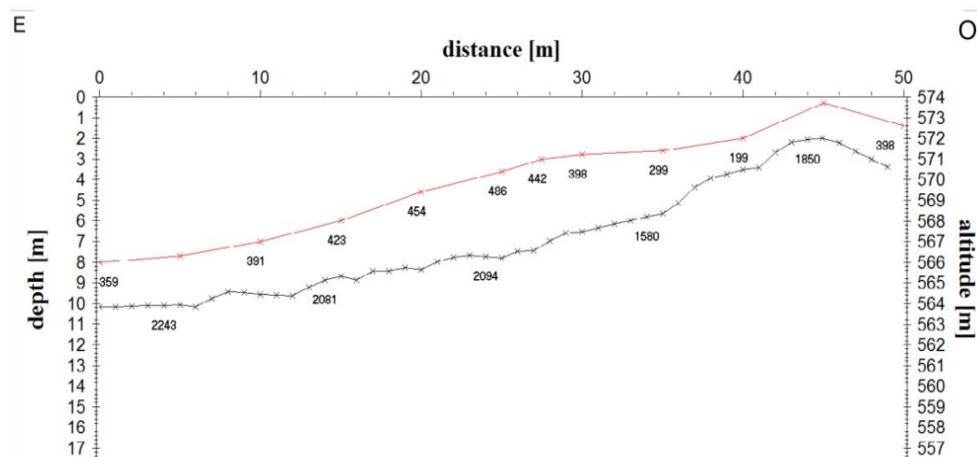


Figure 4.46 : Coupe sismique du profil PS24, site village Ouled Ali.

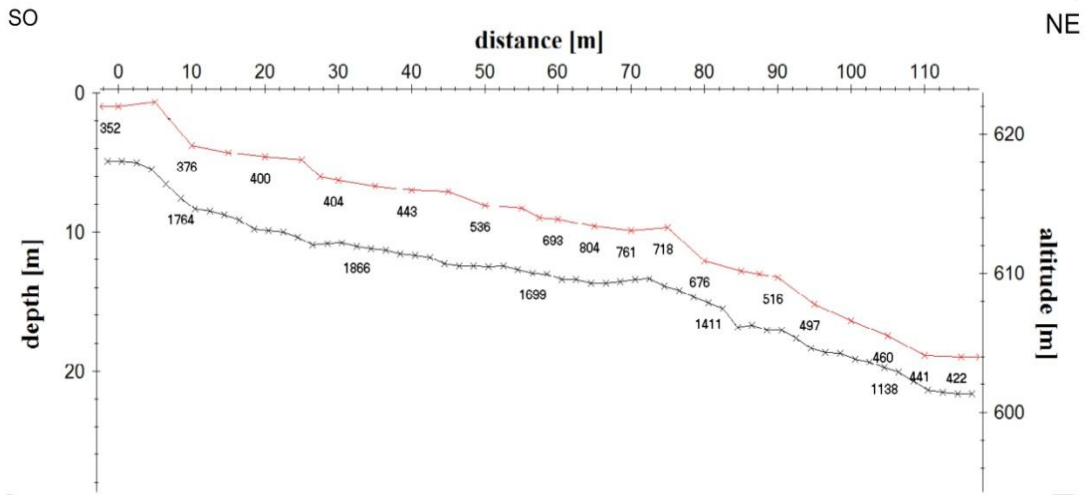


Figure 4.47 : Coupe sismique des profils PS25 et PS26, site Ouled Ali.

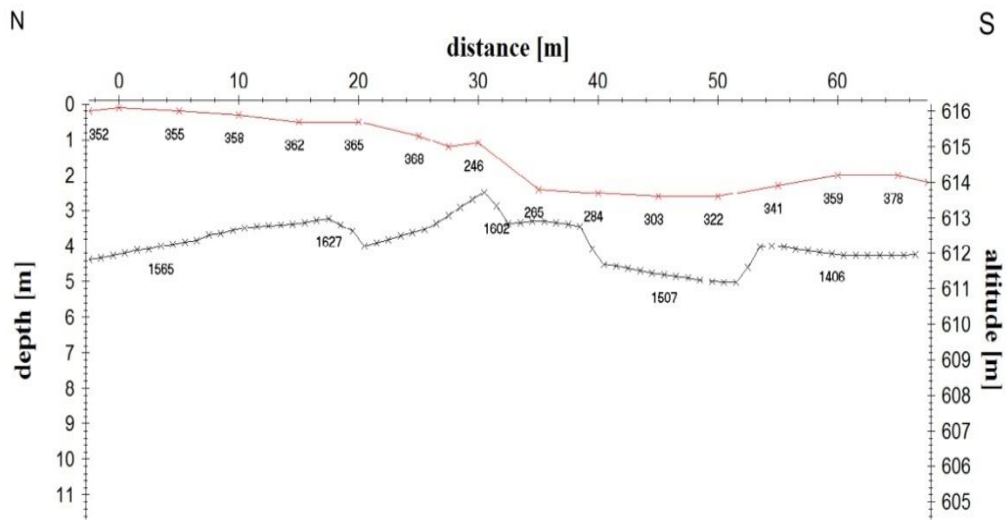


Figure 4.48 : Coupe sismique des profils PS27 et PS28, site village Ouled Ali.

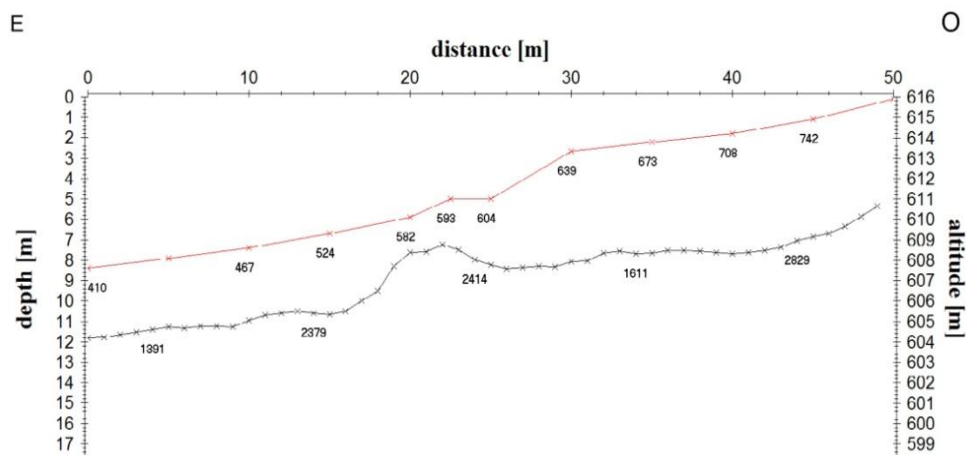


Figure 4.49 : Coupe sismique du profil PS29, site village Ouled Ali.

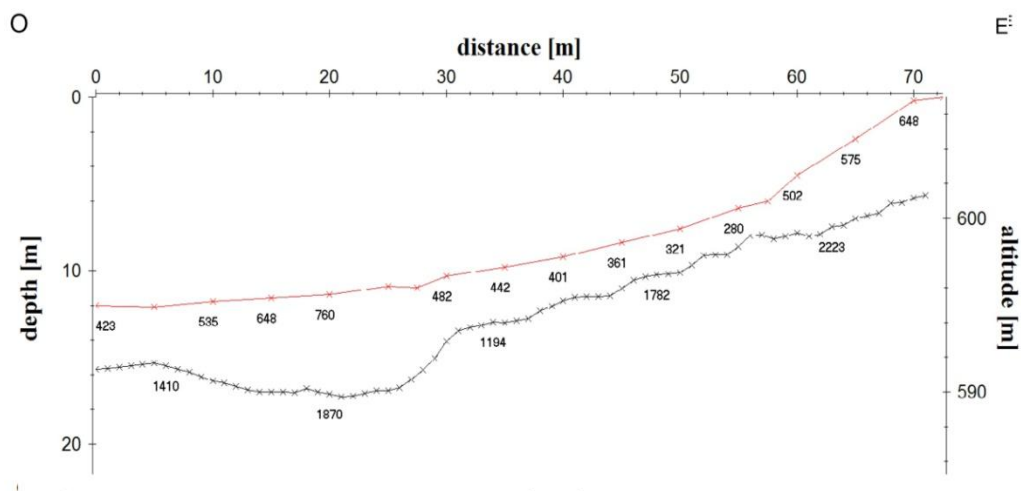


Figure 4.50 : Coupe sismique des profils PS30 et PS31, site village Ouled Ali.

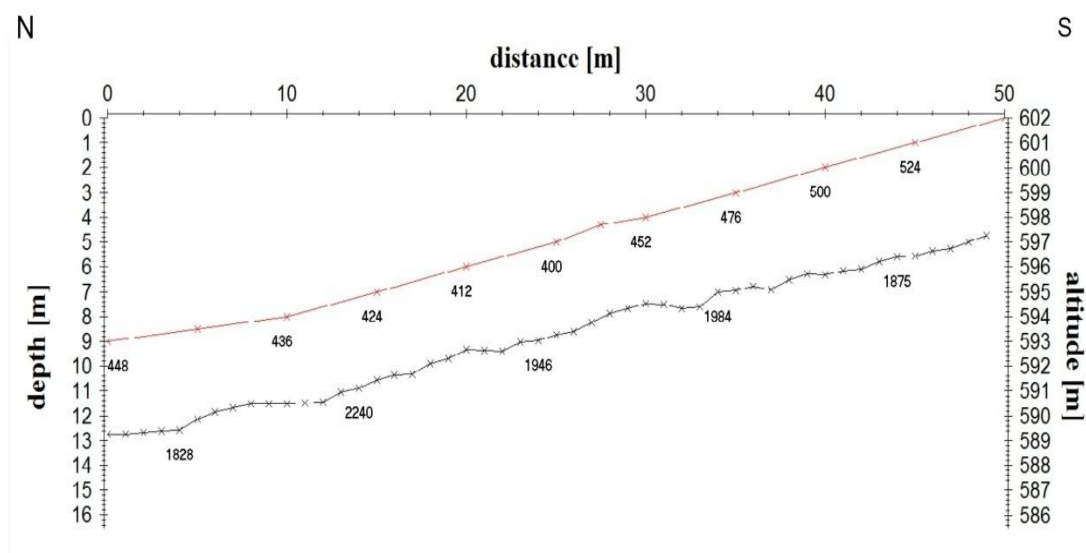


Figure 4.51 : Coupe sismique du profil PS32, site village Ouled Ali.

Comme dans le village d'Echetel, les profils sismiques à Ouled Ali ont montré l'existence de deux (2) couches.

Une 1ère couche d'une vitesse assez homogène variant entre 400 et 800 m/s (absence de grandes vitesses) ; elle correspond à la couverture argilo-sableuse. Cette vitesse est quelque fois d'environ 250 m/s correspondant à une terre végétale ou alors, à des dénivelés topographiques locaux (qui ne pouvaient être corrigées lors du traitement).

L'épaisseur de la 1ère couche est plus faible dans ce village, si on la compare avec celle au village d'Echetel. Elle est en moyenne de 5m. Par endroits, cette moyenne est légèrement dépassée au niveau des (ps31 et ps34) elle atteint son maximum au milieu du PS8 où elle approche les 10m. Par endroits, cette 1ère couche disparaît (ou alors, elle est de très faible valeur, sub-métrique), à l'exemple du nord du PS10.

Une 2ème couche d'une vitesse allant en général de 1500 à 2500 m/s, elle représente probablement la formation de schistes altérée.

Lorsque la vitesse est plus élevée comme au niveau du PS8 où elle dépasse les 2.800 m/s les formations deviennent plus saines et plus consolidées. Elle correspond aux schistes argileux sains.

Ces résultats, nous les retrouvons en confrontant le profil électrique PE5 de la (figure 4.19) et le profil sismique PS13 et PS14 de la (figure 4.38) comme suit :

Il n'a pas été possible de voir une 3ème couche.

Les décrochements dans les dromochroniques, synonyme de faille, n'ont pas été observés (Annexe 5).

La corrélation entre la vitesse de propagation des ondes sismiques et les formations géologiques est représenté par le (tableau 4.2) suivant :

Tableau 4.2 : Vitesse sismique Ouled Ali.

Vitesse	Formation
$V < 1.000 \text{ m/s}$	Sol argileux, zone altérée, terre végétale
$1.500 \text{ m/s} < V < 2.500 \text{ m/s}$	Schiste argileux altéré
$V > 2.500 \text{ m/s}$	Schiste argileux sain

Conclusion

L'investigation géophysique par la méthode électrique et sismique sur le site d'Echetel nous a permis d'explorer le sous sol sur une profondeur d'environ 40 m et de conclure ce qui suit sur l'ensemble des profils PE1, PE2 et de PS1 à PS13 :

- ✓ les formations superficielles les éboulis de pente obtenus avec un contraste résistant ;
- ✓ les formations sous jacentes sont plus ou moins conductrices à partir de 8m de profondeur. ;
- ✓ le substratum apparait à partir de 34 m.

La géométrie des contrastes des résistivités et des vitesses obtenues sur la profondeur prospectée de l'ensemble des profils ne présente pas de variation latérales importantes ceci montre l'absence de faille sur le site étudié. Pour ce qui est du glissement du site du village Echetel la morpho dynamique de cette unité physiographique, le cône de déjection, a été réactivé par le décapage de la butée en aval au niveau du chantier d'implantation du nouveau lycée en cours de réalisation, on observe une inclinaison des arbres dans le sens de la pente et

des fissurations des murs extérieurs, des maisons qui sont dues vraisemblablement au mouvement de toute la masse, qui s'est retrouvée en rupture de pente.

Pour le site d'Ouled Ali, l'investigation géophysique par la méthode électrique et sismique a montré que présente certaines homogénéité des terrains, l'absence d'accident géologique jusqu'à la profondeur prospectée, environ 40m. Enfin cette étude met en évidence la réelle nécessité d'intégration d'une étude géologie géotechnique pour l'une meilleure compréhension de la dynamique du glissement de terrain et de la structure interne.

Conclusion Générale

Les glissements de terrain sont des processus géologiques et géomorphologiques naturels qui s'avèrent dangereux à partir du moment où ils interfèrent avec les activités humaines. Les processus à l'origine des glissements sont très complexes et dépendent rarement d'une seule cause. Les matériaux affectés par l'instabilité sont très variés mais globalement la présence d'eau en forte proportion est toujours un élément défavorable à la stabilité des talus. La géophysique présente un outil puissant pour identifier la géologie interne du sous sol.

Une recherche bibliographique sur les différentes méthodes les plus connus de la géophysique et qui peuvent être utilisées en génie civil a été effectuée. Cette recherche a montré que ces méthodes ont été appliquées par des différents auteurs et dans différents domaines, en fonction de leurs particularités et de leur degré de précision. Ce qui nous permet de conclure que les deux méthodes (imagerie électrique et la sismique réfraction) présentent un moyen puissant de détection des structures superficielles (cavités souterrain, glissement, ...etc.), ainsi leur mise en œuvre et leur interprétations doit être confié à des spécialistes en géophysique.

Les glissements de terrain survenu au niveau des villages Echétel et Ouled Ali, de type complexe, sont des un mouvement de masses de terrain d'épaisseur très variable le long d'une surface de rupture. L'ampleur de ces mouvements, leur vitesse et le volume de matériaux mobilisés sont également très variables. Ce sont de glissements qui affectent deux versants sur plusieurs mètres d'épaisseur. Une grande déstabilisation a été constatée dans les zones étudiées.

Des travaux d'investigation géophysique par la **tomographie électrique et la sismique réfraction** ont été réalisées par le laboratoire **LHC** (Laboratoire de L'Habitat et de la Construction) et le bureau d'étude (**Africain Géosystem Company, 2013**) sur les deux sites, afin de caractériser les causes de ces glissements, de déterminer les profondeurs des plans de rupture, et enfin de se prononcer sur leur stabilité futur.

L'investigation géophysique par la méthode électrique et sismique sur le site d'Echétel nous a permis d'explorer le sous sol sur une profondeur d'environ 40 m et de conclure ce qui suit sur l'ensemble des profils PE1, PE2 et de PS1 à PS13 :

Conclusion Générale

- les formations superficielles sont les éboulis de pente obtenus avec un contraste résistant ;
- les formations sous jacentes sont plus ou moins conductrices à partir de 8m de profondeur ;
- Le substratum apparait à partir de 34 m.

La géométrie des contrastes des résistivités et des vitesses obtenues sur la profondeur prospectée de l'ensemble des profils ne présente pas de variation latérales importantes ceci montre l'absence de faille sur le site étudié

Pour ce qui est du glissement du site du village Echetal La morpho dynamique de cette unité physiographique, le cône de déjection, a été réactivé par le décapage de la butée en aval au niveau du chantier d'implantation du nouveau lycée en cours de réalisation. On observe une inclinaison des arbres dans le sens de la pente et des fissurations des murs extérieurs des maisons (figures 3,25c, 3,24 et 3,24b) qui sont dues vraisemblablement au mouvement de toute la masse qui s'est retrouvée en rupture de pente.

Pour le site d'Ouled Ali, l'investigation géophysique par la méthode électrique et sismique a montré que présente certaines homogénéité des terrains, l'absence d'accident géologique jusqu'à la profondeur prospectée, environ 40m. Enfin cette étude met en évidence la réelle nécessité d'intégration d'une étude géologie géotechnique pour l'une meilleure compréhension de la dynamique du glissement de terrain et de la structure interne.

*Références
Bibliographiques*

Aitadjedjou D. Apports de l'imagerie électrique et de l'électromagnétique Slingram à l'étude d'un glissement de terrain : cas du glissement de Takerietz (W. Bejaia). Mémoire d'ingénieur d'état en Géophysique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2011.

Akrouf S., et al. Étude du glissement de terrain de la carrière de calcaire de la cimenterie de meftah (W.BLIDA). Mémoire de master 2 en géologie option Géologie Appliquée-Géotechnique. Université des Science et de la Technologie Houari Boumediene, 2012.

Belaidi M. Application de l'essai de cisaillement direct dans l'étude des glissements de terrain le long des plans de stratification des sols. Mémoire de master 2 en Génie Civil option géotechnique et environnement. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.

Beddou A. Apport des méthodes géophysiques dans la caractérisation des sols. Mémoire de master 2 en Infrastructure de Base et Géotechnique. Université Aboubekr BELKAID de Tlemcen, 2012.

Candide L. Les glissements de terrain des versants côtiers du Pays d'Auge (Calvados) : Morphologie, fonctionnement et gestion du risque. Thèse de doctorat spécialité Géographie physique, humaine, économique et régionale. Université de Caen Basse-Normandie, 2012.

Chapellier D. Prospection électrique de surface, Université de Lausanne. Institut Français du pétrole, 2000.

Institut National de Cartographie et de Teledetection. Carte Topographique de Bejaia NJ-31-VI-34, Est, à l'échelle 1/25 000°. Feuille N°106 publiée en 1988 par le Ministre de la Défense, 1988.

Djerbal L. Dynamique d'évolution du glissement de terrain d'Ain El Hammam. Mémoire de master 2 en Génie Civil option géotechnique et environnement. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2010.

Djeral L. Analyse des mécanismes de déformation et de la rupture progressive du versant instable d'Ain El Hammam, thèse de doctorat, spécialité Géotechnique et Environnement, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2013.

Fauchard C., et al. Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues. Ed. Cemagref, 2001.

Fauchard C., et al. Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques. Guide technique Chaussées. Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et chaussées 2004.

Feregotto M, Bievre G, Garambois S, Barnier J. Etude d'un glissement de terrain par des méthodes de prospection géophysique. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Grenoble, 2010.

Gilles G, Adnand B, Jean-Ch. Apport de la géophysique a l'étude des glissements de terrain: glissements de super-sauze et ballandaz. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – JNGG, Lyon (France), 2006.

Gourry V. Naudet F. Mathieu A. Saada A. Apports et limitations des méthodes géophysiques dans le cadre de la démonstration de l'atténuation naturelle. Éd. Ademe, 2013.

Guy Marquis, IPG Strasbourg. Géophysique de subsurface, 2002.

Haddad S. Etude de la coulée boueuse d'illten. Mémoire de master 2 en Génie Civil option géotechnique et environnement. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2013.

Hadjaz D. Calcul de stabilité des glissements de terrain d'Azazga Mémoire de master 2 en Génie Civil option géotechnique et environnement. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.

Hammoum H, Khaldaoui F, Zoreik A, Touat M, Chekhar M, Bouzida R. La géophysique, outil de compréhension de la morpho-dynamique des milieux physiques perturbés. Cas du glissement de terrain au niveau du barrage de tamellaht, Algerie

accidentale. Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research, Vol. 2, Issue 2, pp. 151-159, 2012.

Hammoum H, Khaldaoui F, Zoreik M. Touat M, Chekhar R, Bouzida & A. Benamar. Utilisation de la résistivité électrique pour le dimensionnement d'un ouvrage de drainage. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.

Hammoum H, Bouzida R, Pratique des systèmes d'information géographiques (SIG) « Applications sous MapInfo », collection les manuels de l'étudiant, Edition Pages Bleus, 2010.

Illoul A. Apport de la géophysique au glissement de terrain TIGZIRT. Mémoire de Mastère 2 en Génie civil option géotechnique et environnement. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2013.

Kouassi A M, Coulibaly D, Koffi Y, Jean B. Application de méthodes géophysiques à l'étude de la productivité des forages d'eau en milieu cristallin: cas de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire). International Journal of Innovation and Applied Studies, Vol. 2. No. 3, pp. 324-334, 2013.

Lagabrielle R. Géophysique appliquée au génie civil, Éd. Techniques de l'Ingénieur, 2012.

Laoufi S., et al. Apports de l'imagerie électrique et de l'électromagnétique Slingram à l'étude d'un glissement de terrain : cas du glissement de Takerietz (W. Bejaia) Mémoire D'ingénieur d'état en Géophysique. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2011.

Leikine M, Gravelle M de 1964 à 1970, Semroud B. Carte géologique de l'Algérie Oued Amizou, à l'échelle 1/50 000°. Feuille N°47 publiée en 1988 par l'office national de la géologie, 1981.

Mari J., et al. Géophysique de gisement et de génie civil. Ed. Technip, 1998.

Melbouci B, Méthodes de calcul de stabilité des fondations, des talus et des ouvrages de soutènement, Edition EL-AMEL, Algérie, 2009.

Meriç O, Etude de mouvements de terrain par méthodes géophysiques, thèse en vue de l'obtention du titre de Docteur de l'Université Joseph Fourier, spécialité Géophysique, 6 décembre, 2006.

Nindaoua savadogo A, Descloitres M, Nakolendousse S, Camerlynck S, Bazie P, Troquei Y et Koussoube Y. Etude géophysique du tracé de la digue du futur barrage de Yakouta au Burkina Faso. Complémentarité des méthodes électriques et radar en milieu dunaire. 6^{ième} Colloque GEOFCAN, Orléans, 2001.

Robitaille V., et al. Mécanique des sols, Ed. Modulo, 1997.

Sanchez O, Gourry JC, Bitri G A, Grandjean G. 6^{ième} colloque GEOFCAN, Bondy, France, 2007.

Saradjia N., et al. Apport de la prospection électrique a l'étude de glissements des terrains dans la région de Mila. Mémoire D'ingénieur d'état en Géophysique. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2013.

Shout H. La géophysique, université de Constantine département des sciences de la terre, 2012.

Tabbagh A. Méthodes électriques et électromagnétiques appliquées à l'archéologie et à l'étude de l'environnement. Fisica de la Tiena, n°7,167-192 servicio de publicaciones universidal complutense, 1995.

Villa M, J.M.1973 à 1975. Carte géologique de Bejaia à 1/200 000°. Feuille N°145, maître assistant au département de géologie structural de l'université Pierre Marie Curie Paris, collaborateur au service de la carte géologique de l'Algérie.

Wubda M. Reconnaissance géophysique du bassin versant d'ara (djougou, nord benin). Mémoire de fin d'études. Université pierre et Marie curie, 2003.

Annexes

Annexe 1

Généralités sur les mouvements de terrain

Introduction

Un glissement de terrain est un phénomène géologique qui désigne le phénomène de descente d'une masse de terre sur une pente, sur un plan de glissement. Après la mise en mouvement le glissement de terrain conservera sa consistance et sa physionomie, ce qui la différencie des coulées de boue qui elles n'ont pas de forme propre. Des glissements de terrain peuvent être à l'origine de catastrophes naturelles engendrant des morts, notamment suite à des fortes pluies. La déforestation peut être à l'origine de cette catastrophe naturelle.

L'objectif de ce chapitre est de définir en premier lieu les différents types de mouvement de terrain selon leur vitesse et selon la morphologie de leur surface de rupture, d'envisager en second lieu les principales causes qui peuvent mobiliser ces glissements.

1.2. Caractérisation des mouvements de terrain

De nombreuses classifications ont été proposées pour les mouvements de versants instables, elles s'appuient sur des notions de cinématique, de nature de sol, de stratigraphie,...etc. De façon simplifiée, on peut considérer quatre familles principales (figure 1.1).

- les glissements (figure 1.1.a) ;
- les mouvements sans surface de rupture (figure 1.1.b) ;
- les écroulements et chutes de blocs (figure 1.1.c) ;
- les coulées boueuses et laves torrentielles (figure 1.1.d).

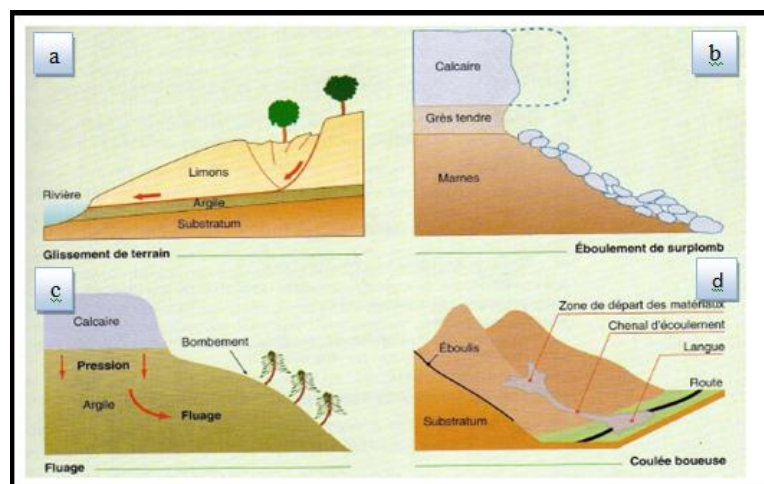


Figure 1.1 : Les quatre grands types de mouvements de terrain.

Les deux dernières familles présentent la particularité de mettre en jeu des déplacements de matériaux importants et rapides ; il n'est généralement pas possible d'intervenir au cours du phénomène ni de remettre en état le site après rupture. L'intervention de l'ingénieur est orientée, dans ces conditions vers la prévention, la prévision et la protection.

Les échelles géométriques et cinématiques des phénomènes sont très étendues :

- ✓ volumes allant de quelques décimètres cubes (pour des chutes de blocs) à plusieurs millions de mètres cubes.
- ✓ vitesses très lentes (quelques millimètres par an) à très rapides (plusieurs dizaines de mètres par seconde pour les éboulements).

Le tableau 1 Eléments caractérisant les différentes familles de mouvements.

Tableau 1.1-Echelle cinématique des mouvements de terrain.

Terrain		Vitesse moyenne	volume	Facteurs déclenchant
Glissement	Sols massif fracturés	Très lente à moyenne	De quelque m ³ à plus de dix millions de m ³	Eau ; terrassements
Fluage	Formations meubles	Très lente	De quelque m ³ à plus de dix mille m ³	Chargement, évolution, du matériau
Eboulement	Massifs rocheux	De très lente à très rapide	De quelque m ³ à plus de dix mille m ³	Eau, gel-dégel, séisme
Coulée	Sols argileux et limoneux lâches	Très rapide	De 10 à plusieurs centaines de milliers de m ³	Très fortes pluies, Rupture de digue

1.3. Définition d'un glissement de terrain

Un glissement de terrain est le déplacement lent ou rapide d'une masse de terrain cohérente (roches homogènes ou hétérogènes), de volume et d'épaisseur variables sur une pente, le long d'une surface de rupture identifiable. Un glissement de terrain peut être superficiel ou profond. Il est le plus souvent provoqué par la gravité, la présence d'eau qui sature les sols et par les tremblements de terre.

Trois unités spatiales distinctes sont observées dans les glissements de terrain actifs (figure1.2).

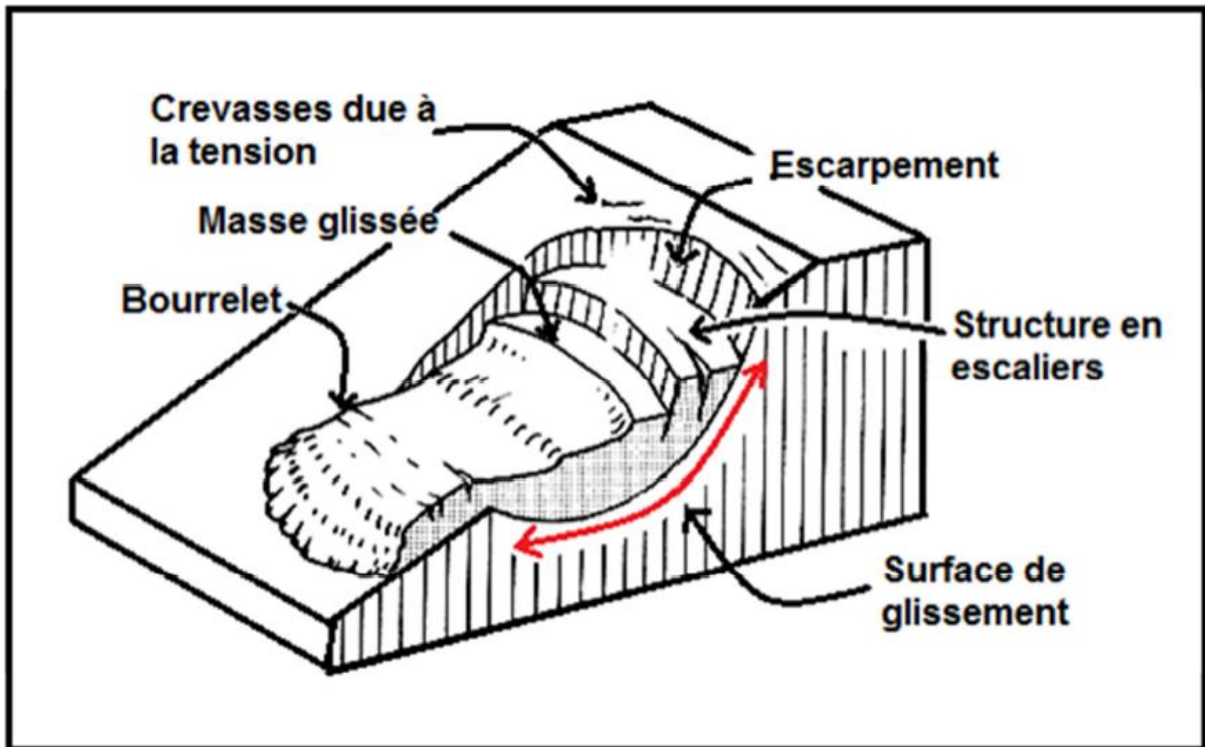


Figure 1.2 : Schéma général d'un glissement de terrain.

- Une zone d'ablation à l'amont, qui présente une morphologie caractéristique, associant un escarpement principal et à son pied des chaos de blocs (accumulation en pied de pente de matériaux déplacés). Un escarpement est considéré comme une cicatrice visible dans la masse remaniée qui présente une structure en escalier.
- La surface de rupture ou de glissement qui sépare la masse glissée des terrains stables.
- Une zone d'accumulation à la base du versant qui prend la forme d'un ou plusieurs lobe(s) étagé(s) et raide(s) définis comme des bourrelet(s).

Parmi les effets observés, les fissures et les arbres basculés sont les plus caractéristiques des glissements de versants.

1.4. Typologie des glissements selon leur forme

La forme de la surface de rupture a permis de définir trois grandes catégories de glissement :

- Glissement rotationnel simple ;
- Glissement plan ;
- Glissement rotationnel complexe.

a. Les glissements de type rotationnel

Ces glissements sont en général de volume limité. Ils se produisent principalement dans des terrains meubles homogènes surtout argileux et silteux. Dans une coupe verticale, la surface de glissement est **circulaire**. En règle générale, le mécanisme du glissement ne provoque qu'un faible remaniement interne du matériel glissé (figure 1.3).

Des dépressions avec des fissures de traction sont souvent visibles dans la moitié supérieure du glissement, alors que la masse glissée tend à s'étaler et à se désagréger au front du glissement, où peuvent se former des écoulements de boue (coulées de terre) en cas de saturation en eau de la masse.

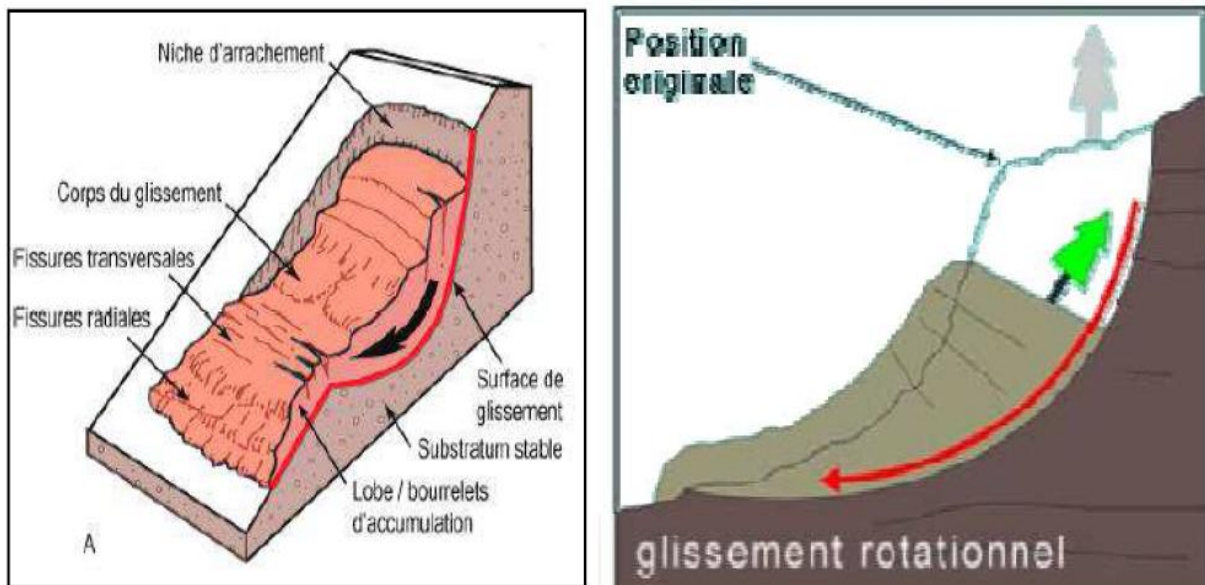


Figure 1.3 : Glissement rotationnel.

b. Les glissements translationnels

Lors de glissements translationnels, les couches de terrain ou les ensembles de couches stratifiées glissent sur une zone de faiblesse existante, (figure 1.4) (pendage stratigraphique, discontinuité.

Stratigraphique, schistosité, plan de fissure ou de rupture). En plan, la taille de tels glissements est très variable et peut comprendre des surfaces allant de quelques mètres carrés à plusieurs Kilomètres carrés.

L'épaisseur des masses en mouvement atteint fréquemment plusieurs dizaines de mètres.

Les schistes marno-calcaires ou les schistes métamorphiques sont les formations les plus sujettes à ce genre de glissement.

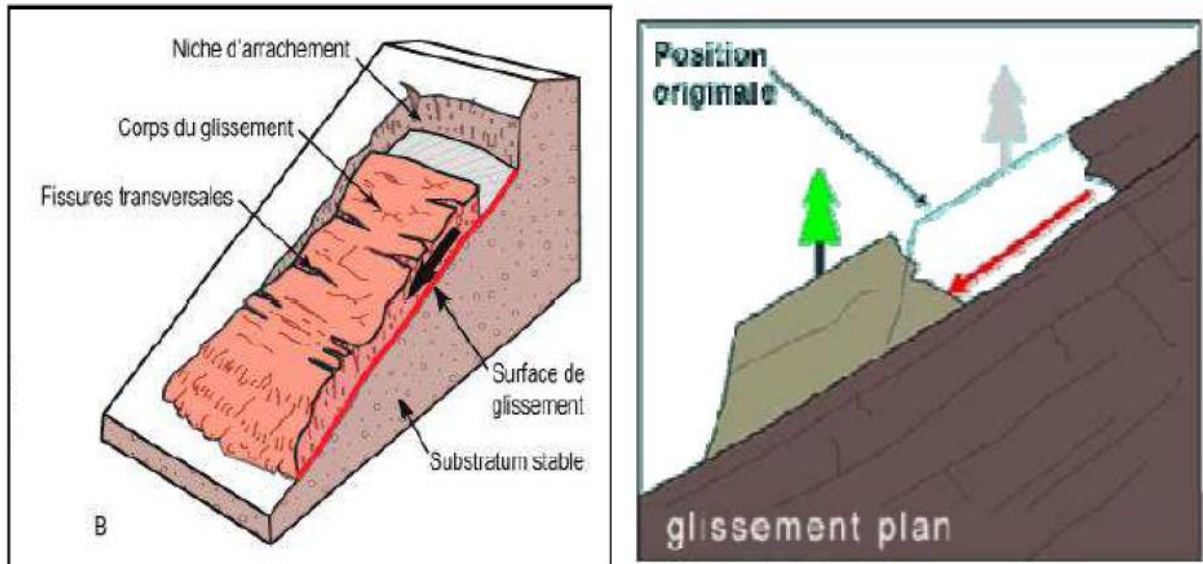


Figure 1.4 : Le glissement plan.

En considérant la longueur du glissement L et son épaisseur sont parvenus à définir un critère pour différencier les deux types de glissements :

- si $D/L < 0.15$, le glissement de translation prédomine ;
- si $0.15 < D/L < 0.35$ on considère que la rupture à lieu par rotation.

c. Glissement rotationnel complexe

Il s'agit de glissements multiples « emboîtés » les uns dans les autres (figure 1.5). L'apparition du premier glissement, en bas de la pente, conduit à une perte de butée pour les terres situées au-dessus, et ainsi provoque des glissements successifs remontant vers l'amont.

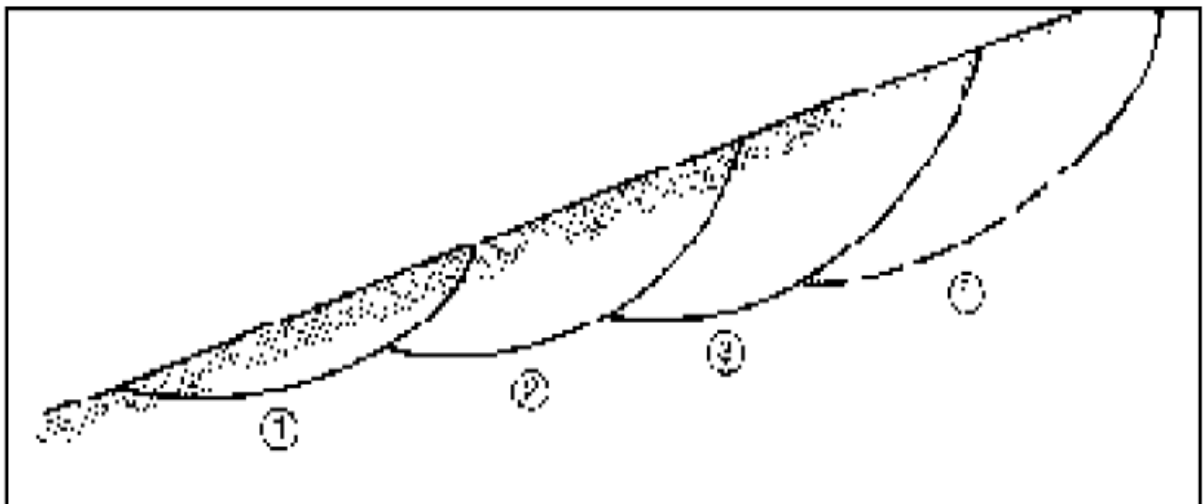


Figure 1.5 : Glissement rotationnel complexe.

L'évolution des glissements de terrain dans le temps suit généralement les quatre phases suivantes :

La phrase 1 : correspond à des mouvements à vitesse pratiquement constante, en général faible (quelques mm/an à quelques cm/an) qui peuvent durer très longtemps (10 à 50 ans).

C'est le cas observé pour de nombreuses pentes proches de la limite de stabilité et où des mesures précises montrent qu'il existe en fait de tels mouvements. Ces mouvements se traduisent par des désordres sur les ouvrages ou les habitations, mais tant que le comportement reste identique il n'y a pas danger imminent de catastrophe.

La phrase 2 : pourrait être considérée comme une variante de la phase 1. Lorsque les mouvements ont globalement une vitesse constante, mais avec les variations du niveau d'eau dans le terrain. On peut dire que ce type de mouvement est vraisemblablement le plus commun. Les vitesses moyennes sont très variables (de 1 cm à 50 cm/an). Cette phase peut durer des siècles.

La phrase 3 : est une phase d'accélération continue menant à la rupture (grande vitesse), sa durée est limitée (quelques jours à 2 ou 3 mois).

La phrase 4 : est celle des mouvements rapides catastrophiques au cours de laquelle il se produit un réajustement des masses conduisant à un nouvel état d'équilibre, en général plus stable que le précédent. Cependant, on n'est pas à l'abri de reprise de mouvements ultérieurs.

Les étapes décrites ne surviennent pas obligatoirement les unes après les autres. On peut avoir plusieurs cycles successifs dans l'histoire d'un glissement lorsque certaines conditions se modifient dans le temps.

1.5. Vitesse moyenne des glissements

La vitesse moyenne de mouvement des glissements atteint le plus souvent quelques millimètres par an pour un glissement substabilisé, très lent, et quelques centimètres à quelques décimètres par an pour un glissement actif (tableau 1.2).

Il existe quelques cas exceptionnels où le glissement peut être bien plus rapide et où la masse en mouvement, sans perdre sa compacité, peut atteindre plusieurs décimètres par jour. Exceptionnellement, des mouvements très rapides peuvent se produire.

Tableau 1.2 : Classification selon l'activité en fonction de l'évaluation de la vitesse moyenne de glissement à long terme.

Glissement	Vitesse de glissement
substabilisé, très lent	0 – 2 cm /an
peu actif, lent	2 – 10 cm /an
actif (ou lent avec phases rapides)	> 10 cm /an

1.6. Classification des glissements selon la profondeur

Les glissements peuvent être classés selon la profondeur estimée de la surface de glissement (tableau1.3) et selon la vitesse moyenne à long terme des mouvements (comme mesure de leur activité). Lors de l'évaluation du danger potentiel que représente un glissement, on ne doit pas seulement considérer le volume ou la vitesse du glissement.

Il faut aussi tenir compte des mouvements différentiels qui se manifestent et qui peuvent conduire au basculement des bâtiments ou à la formation de fissures. Les glissements peuvent aussi se transformer en glissements coulée (coulées de terre) et atteindre des zones très étendues.

**Tableau 1.3 : Classification selon la profondeur de la surface de glissement
(En m sous la surface du sol).**

Glissement	Surface de glissement
superficiel	0 – 2m
semi profond	2 – 10m
profond	>10m

1.7. Phases des glissements

Les glissements de terrain se caractérisent par des phases d'activité variables: des périodes de vitesse de glissement plus élevée alternent avec des phases de calme apparent (figure 1.6).

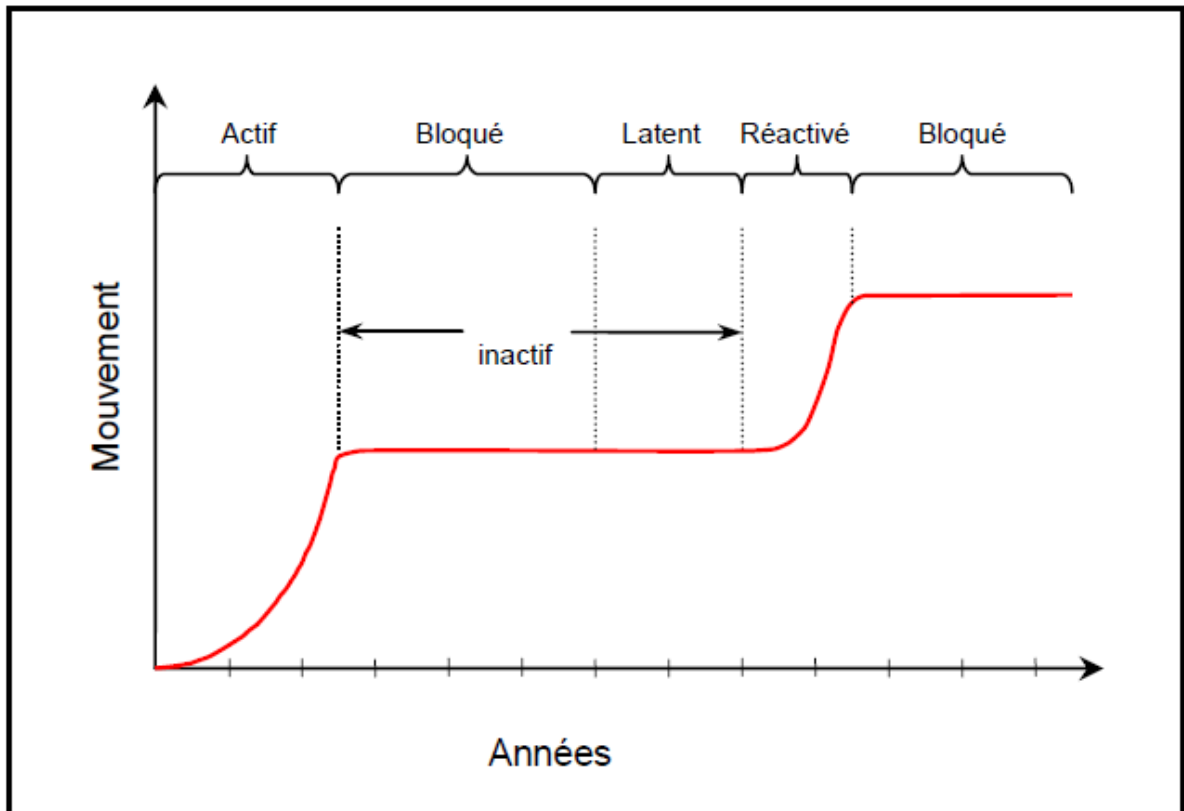


Figure 1.6 : Différentes phases de l'activité d'un glissement de terrain.

1.7.1. Glissements de terrain actifs

Un glissement de terrain est considéré comme actif si un mouvement peut être constaté. Le déplacement peut être minime, les déformations de moins d'un millimètre étant toutefois difficilement détectables. Les glissements actifs comprennent les glissements présentant des vitesses plus ou moins constantes à long terme tout comme les glissements avec phases successives d'accélération.

1.7.2. Glissements de terrain réactifs

Ce mouvement désigne les glissements de terrain qui quittent une phase inactive pour entrer dans une phase active. Habituellement, les glissements de terrain réactivés se déplacent le long d'une surface de glissement existante.

1.7.3. Glissements de terrain inactifs

Ce mouvement désigne les glissements de terrain restés immobiles pendant plusieurs années, comme les **Glissements stabilisés**, leurs facteurs déclencheurs ont été enrayerés grâce à des mesures d'assainissement.

1.8. Forme de la surface de rupture

La forme des surfaces de rupture dépend essentiellement des caractéristiques du matériau. Dans les terrains plutôt rocheux, les surfaces de glissement sont liées aux surfaces de discontinuité. Dans les terrains plus meubles et homogènes, les surfaces de rupture sont apparaissent sous forme de cercles en deux dimensions ou sous forme d'ellipsoïdes en trois dimensions. Dans des terrains hétérogènes, les surfaces de rupture peuvent former une combinaison de surfaces circulaires et planaires, ou une forme quelconque. La surface de rupture, d'une manière générale, passe par les zones de terrain dont les caractéristiques sont les plus faibles.

1.9. Pentes naturelles et talus artificiels

Nous pouvons classer les types de rupture en deux groupes, ceux qu'on observe dans les pentes naturelles et ceux relatif aux talus artificiels :

1.9.1. Pentes naturelles

Ce sont des talus peu homogènes et présentant des variations géologiques et éventuellement des discontinuités (figure 1.7). Les accidents observés dans ce cas montrent qu'il est possible de classer les instabilités en glissement, écoulement, coulée boueuses et éboulement.

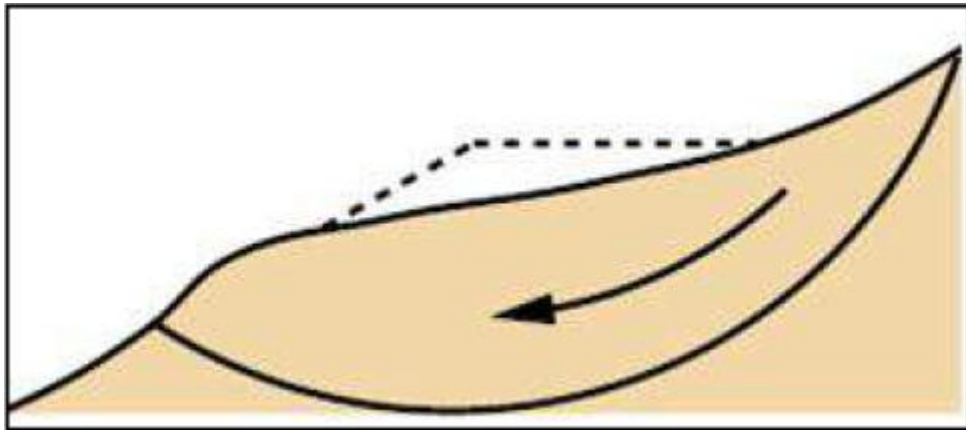


Figure 1.7 : Rupture d'une pente naturelle.

1.9.2. Talus artificiels

Ils sont essentiellement affectés par des glissements et parfois par des phénomènes de fluage. On peut les classer en fonction des types d'ouvrages (figure 1.8).

- talus en déblai ;
- talus en remblai sur sol non compressible ;
- talus en remblai sur sol compressible ;
- digues et barrages en terre.

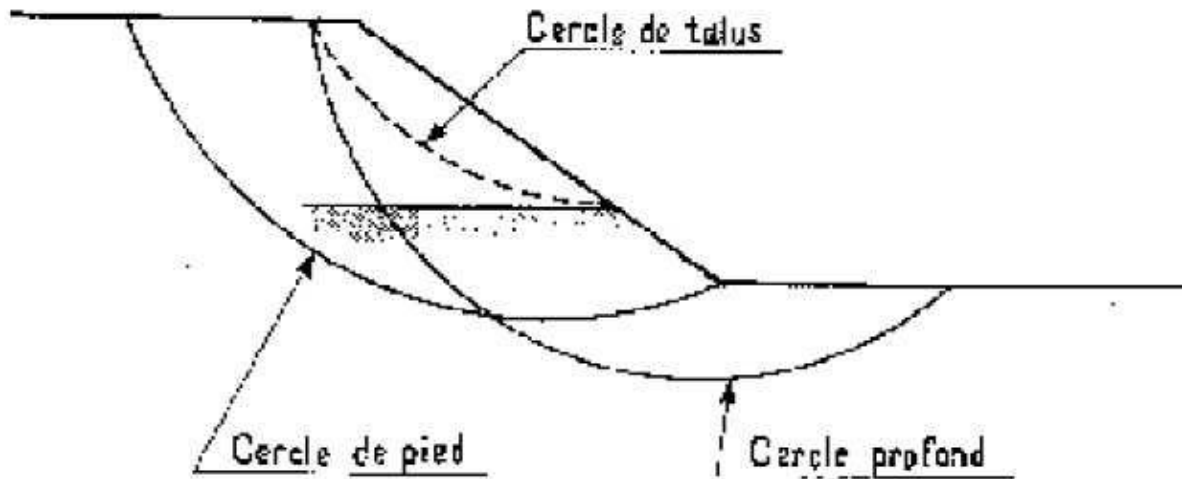


Figure 1.8 : Rupture d'un talus artificiel.

1.10. Les facteurs intervenant dans les processus de glissement

1.10.1. Les facteurs géométriques

Les facteurs géométriques ont une influence sur la stabilité des talus, soit ils augmentent ou ils diminuent le risque de glissement. Citons quelques paramètres qui sont liés directement à la géométrie du talus : la dénivellation et l'inclinaison.

1.10.2. Les facteurs géologiques

Les principaux facteurs géologiques qui affectent la stabilité des talus sont :

- ✓ la nature des matériaux formant le talus ;
- ✓ la discontinuité dans la formation des couches, le pendage des couches et la direction du pendage ;
- ✓ les fissurations des substratums qui sont dues aux mouvements des plaques tectoniques.

1.10.3. Les facteurs climatiques

Les principaux facteurs climatiques sont :

- ✓ l'altération qui est due aux changements climatiques brusques : la température élevée, la pluie, le vent...etc ;
- ✓ l'augmentation des pressions interstitielles par infiltration d'eau ;
- ✓ l'accumulation des précipitations qui fragilisent les substratums ;
- ✓ l'intensité des orages.

Prenons l'exemple des eaux de pluie qui s'infiltrent dans le sol et engendrent l'augmentation du niveau de la nappe. L'augmentation du niveau de la nappe induit à son tour

une augmentation de la contrainte de cisaillement dans le sol qui provoque le glissement de terrain.

1.11. Caractéristiques des sols

Les glissements de terrain sont des déformations souples qui se produisent principalement sous l'effet des contraintes dans un sol saturé, affaibli par la présence d'eau, moins dense et qui perd progressivement sa cohésion. Les matériaux affectés par ce phénomène sont très variés (roches marneuses ou schisteuses, colluvions fins, flysch,.. etc). Globalement la présence d'argiles en forte proportion est toujours un élément défavorable à la stabilité des talus compte tenu de leurs mauvaises caractéristiques mécaniques (paramètres de résistance au cisaillement). En outre le sol peut être fragilisé par l'activité anthropique qui engendre des surcharges en amont et une diminution des appuis en pied de pente lors de terrassements pour aménager des espaces à bâtir.

1.12. Méthodes de calcul de stabilité

La stabilité des talus consiste à déterminer le facteur de sécurité **FS** par lequel il faut diviser la résistance de la surface de glissement pour que la masse potentiellement stable soit à la limite de l'équilibre. Ce facteur peut être écrit de la façon suivante:

$$FS = \tau_{lim} / \tau$$

(1.1)

τ : contrainte de cisaillement s'exerçant le long de la surface ;

τ_{lim} : Résistance au cisaillement du sol.

Le coefficient de sécurité est lié :

- ✓ à l'approche adoptée pour calculer ce coefficient ;
- ✓ à l'état de contraintes dans le milieu (Méthode adoptée) ;
- ✓ aux propriétés du milieu ;
- ✓ à l'hypothèse de la forme de la surface de rupture.

Le coefficient de sécurité FS peut être aussi déterminé en fonction des forces ou des moments des forces résistantes et motrices comme suit :

- Dans le cas des glissements plans

$$FS = \frac{\sum \text{des forces résistantes}}{\sum \text{des forces motrices}} \quad (1.2)$$

- Dans le cas des glissements circulaires

$$FS = \frac{\sum \text{des moments de forces résistantes}}{\sum \text{des moments de forces motrices}} \quad (1.3)$$

Le tableau ci-dessous, nous donne les valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage et des conditions particulières qui l'entourent.

Tableau .1.4 : FS en fonction de l'importance de l'ouvrage.

FS	Etat de l'ouvrage
<1	danger
1.0-1.25	Sécurité contestable
1.25-1.4	Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants. Sécurité contestable pour les barrages
>1.4	Satisfaisante pour les barrages

CONCLUSION

Les glissements de terrain sont des processus géologiques et géomorphologiques naturels qui s'avèrent dangereux à partir du moment où ils interfèrent avec les activités humaines. Les processus à l'origine des glissements sont très complexes et dépendent rarement d'une seule cause. Les matériaux affectés par l'instabilité sont très variés mais globalement la présence d'eau en forte proportion est toujours un élément défavorable à la stabilité des talus.

Annexe 2

Fiches technique des équipements

2.1. Summit x stream pro

Le SUMMIT X flux Pro est la meilleure qualité de valeur tout en un sismographe pour l'application de l'ingénierie. L'unité 24 de canal robuste avec un ordinateur portable intégré et écran intégré à haute résolution peut être utilisé dans n'importe quel environnement de production à grande vitesse. Le sismographe est conçu en tant que système autonome sans avoir besoin de matériel supplémentaire. Le SUMMIT X flux Pro est idéal pour toutes les études techniques dans presque n'importe quel environnement.

Le SUMMIT X flux Pro est idéal pour toutes les études techniques dans presque n'importe quel environnement.

2.2. Ingénierie de summit X flux

- ✓ Meilleure valeur tout en un sismographe ;
- ✓ Meilleure productivité ;
- ✓ Pour les applications spécialisées telles que LVL, MASW et études techniques ;
- ✓ Extrêmement robuste, boîtier léger ;
- ✓ Service rapide suprême via hotline de support de réaction.

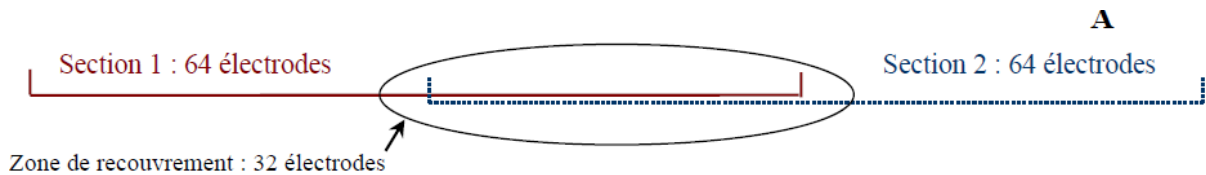


Figure 2.1: Appareil Summit x stream pro.

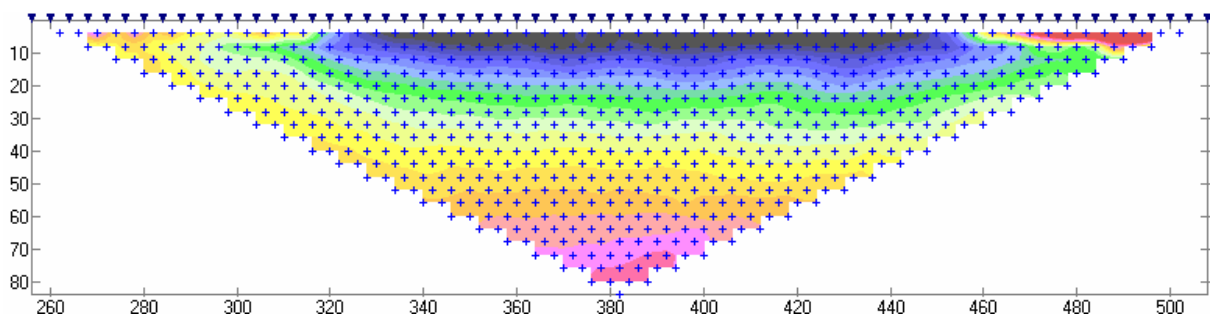
2.3. SYSCAL JUNIOR Switch-48

Le commutateur-48 SYSCAL JUNIOR est un système d'imagerie de la résistivité du noeud à plusieurs tout-en-un. Il dispose d'une carte de commutation interne pour 48 électrodes et une source d'alimentation de 200W interne. Le courant de sortie est automatiquement ajusté (allant automatique) pour optimiser les valeurs de tension d'entrée et de garantir une qualité de mesure. Le système est conçu pour effectuer automatiquement des ensembles prédéfinis de mesures de résistivité avec le rouleau le long de-capacité. Quatre câbles multi-core avec 12 électrodes sont reliés à emporter chaque sur le dos de l'appareil de résistivité. Ces câbles lourds sont disponibles avec la norme espacements 5 ou 10 m électrodes. Câbles personnalisés peuvent également être assemblés pour les tableaux ou des applications non standard.

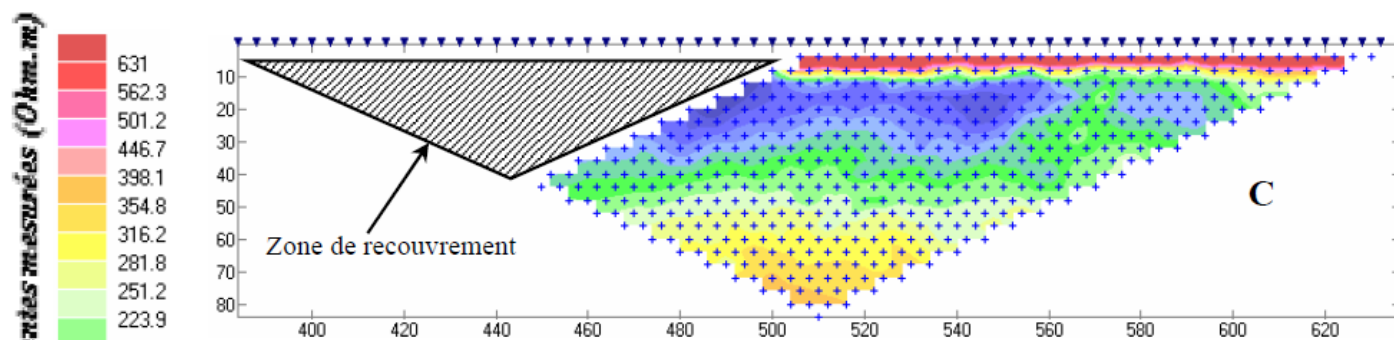
2.3. Notions sur le traitement des données en imagerie électrique 2D



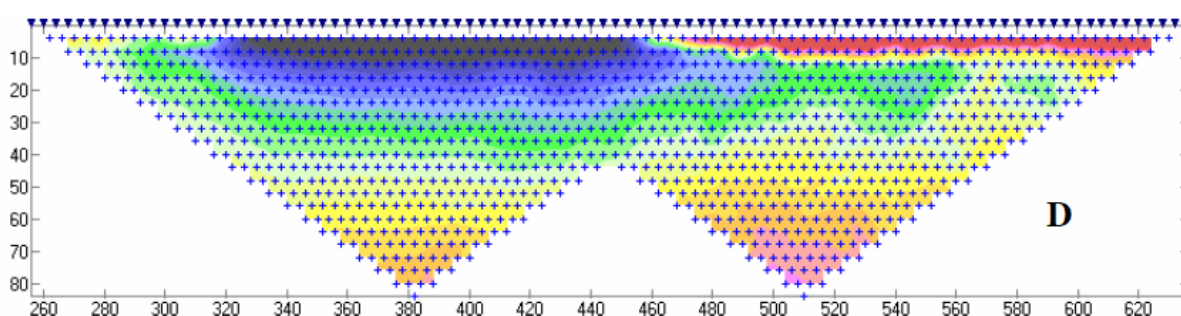
A : La mise en place du dispositif du panneau électrique se fait par section de 64 électrodes que l'on déplace le long d'un profil, en assurant à chaque fois un recouvrement de 32 électrodes sur la précédente.



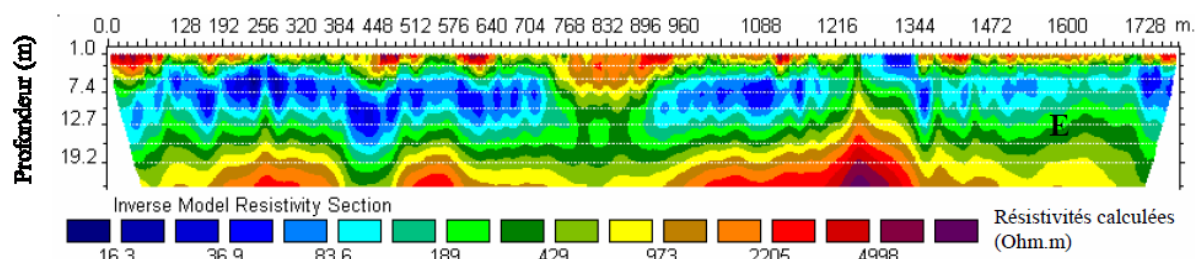
B : L'acquisition des mesures sur la première section du panneau utilise toutes les 64 électrodes. Il est possible ensuite à l'aide du programme X2IPI, de visionner la géométrie des points de la section, la distribution en fond des résistivités apparentes mesurées (voir également l'échelle des résistivités à gauche) et de traiter éventuellement les données (filtrage, suppressions).



C : L'acquisition des mesures à partir de la deuxième section utilise 64 électrodes mais la mesure n'est pas faite dans la zone de recouvrement (cette partie existe déjà dans la première).





D : Sous X2IPI, les sections sont concaténées (jointes) en indiquant pour chaque section la position sur le profil (distance en m par rapport à la toute première électrode) des électrodes de début et de fin. Le jeu de données obtenu est enregistré sous format RES2DINV.



E : L'inversion à l'aide du programme RES2DINV des données du fichier précédemment obtenu, permet d'obtenir l'image d'une distribution de résistivités calculées, sensée correspondre au modèle du terrain qui a été prospecté. L'image ci-dessus est le résultat de 13 sections concaténées qui, contrairement à ce qui a été présenté dans les autres pages du document, ne contiennent pas de données topographiques.

Annexe 3

Fiche signalétique du repère de rattachement géodésique

FICHE SIGNALÉTIQUE		
Pays : Algérie	Lieu : Kherrata	Date :
Point Nature Système de référence Projection	ST69 Borne en béton UTM/WGS 84 UTM 31 NORD	Coordonnées :
Latitude	<input type="text" value="5° 16.273' E"/>	Est : <input type="text" value="703420.38"/>
Longitude	<input type="text" value="36° 29.896' N"/>	Nord : <input type="text" value="4041615.59"/>
		Alt ortho : <input type="text" value="444.14"/>
		
		

Annexe 4

Coordonnées des points de détails pour le site d'Ouled Ali et Echetel

N° Points	X (WGS 84), m	Y (WGS 84), m	Z (NGA), m
Profil PE1 =ps1, ps2, ps3, ps4			
C.1	700628.850	4045404.903	559.760
C.2	700626.960	4045408.243	559.650
C.3	700625.170	4045411.743	559.650
C.4	700623.120	4045415.403	559.760
C.5	700621.010	4045418.693	559.700
C.6	700618.840	4045422.023	559.770
C.7	700616.620	4045425.353	559.890
C.8	700614.570	4045428.753	560.030
C.9	700612.690	4045432.283	560.190
C.10	700610.740	4045435.683	560.500
C.11	700608.680	4045439.193	560.820
C.12	700606.440	4045442.363	561.270
C.13	700604.200	4045445.653	561.660
C.14	700602.060	4045449.033	562.170
C.15	700599.660	4045452.143	562.810
C.16	700597.350	4045455.353	562.830
C.17	700594.960	4045458.483	562.990
C.18	700592.640	4045461.763	562.990
C.19	700590.470	4045465.043	562.650
C.20	700588.180	4045468.293	562.430
C.21	700585.800	4045471.583	562.170
C.22	700583.640	4045474.883	561.810
C.23	700581.500	4045478.143	561.370
C.24	700579.130	4045481.363	560.880
C.25	700576.700	4045484.423	560.340

N° Points	X (WGS 84), m	Y (WGS 84), m	Z (NGA), m
Profil PE1 = PS1 à PS4			
A.1	699221.565	4047414.809	749.052
A.2	699226.061	4047416.704	748.122
A.3	699230.280	4047418.730	747.250
A.4	699235.087	4047417.894	746.552
A.5	699239.372	4047415.519	745.982
A.6	699243.468	4047412.853	745.372
A.7	699247.746	4047410.199	744.782
A.8	699251.746	4047407.767	743.612
A.9	699256.145	4047406.527	741.762
A.10	699260.886	4047405.841	740.672
A.11	699265.756	4047405.616	739.722
A.12	699270.621	4047405.718	739.012
A.13	699275.780	4047406.053	738.782
A.14	699280.722	4047406.266	737.352
A.15	699284.992	4047407.811	736.292
A.16	699288.304	4047411.082	734.592
A.17	699292.580	4047412.731	733.052
A.18	699297.127	4047411.691	731.072
A.19	699301.177	4047409.137	730.142
A.20	699304.565	4047405.678	729.102
A.21	699307.452	4047401.682	728.852
A.22	699311.145	4047398.325	728.402
A.23	699314.801	4047395.084	727.412
A.24	699318.348	4047392.084	725.522
A.25	699322.501	4047389.000	723.072

Annexe 4

C.26	700574.390	4045487.583	559.860
C.27	700571.820	4045490.443	559.140
C.28	700568.910	4045493.233	558.790
C.29	700565.930	4045495.953	558.030
C.30	700562.980	4045498.533	557.840
C.31	700559.970	4045501.143	557.820
C.32	700557.060	4045503.803	557.370
C.33	700553.970	4045506.333	556.900
C.34	700550.900	4045508.833	556.520
C.35	700547.910	4045511.403	556.400
C.36	700544.920	4045513.923	556.100
C.37	700541.900	4045516.503	555.660
C.38	700538.960	4045519.053	555.300
C.39	700536.250	4045521.743	554.010
C.40	700533.980	4045524.153	551.560
C.41	700531.510	4045526.903	549.510
C.42	700528.900	4045529.593	548.190
C.43	700526.350	4045532.243	546.660
C.44	700523.770	4045534.793	544.350
C.45	700521.700	4045537.153	542.600
C.46	700518.890	4045540.133	541.750
C.47	700516.330	4045543.023	541.760
C.48	700513.940	4045546.023	542.300
Profil PE2= ps5, ps6, ps7, ps8			
p	700694.150	4045551.893	533.602
D.2	700692.640	4045548.853	534.872
D.3	700690.300	4045545.853	535.872
D.4	700688.660	4045542.343	536.472
D.5	700686.330	4045539.523	537.792
D.6	700684.360	4045536.193	538.402
D.7	700682.720	4045532.603	539.012
D.8	700680.910	4045529.273	539.912

N° Points	X (WGS 84), m	Y (WGS 84), m	
N° Points	X (WGS 84), m	Y (WGS 84), m	
Profils PS12 et PS13			
1	699187	4047369	763
2	699175	4047264	734
3	699178	4047268	738
4	699180	4047272	743
5	699183	4047276	743
6	699186	4047279	745
7	699189	4047283	747
8	699192	4047287	748
9	699195	4047291	749
10	699199	4047294	750
11	699200	4047299	753
12	699202	4047302	753
13	699204	4047307	751
14	699206	4047310	753
15	699209	4047315	753
16	699212	4047318	753
17	699215	4047322	751
18	699219	4047326	751
19	699222	4047330	751
20	699225	4047334	752
21	699229	4047338	753
22	699232	4047341	751
23	699235	4047345	751

Annexe 4

D.9	700679.020	4045526.013	540.662
D.10	700677.160	4045522.983	541.952
D.11	700675.090	4045520.023	543.202
D.12	700672.860	4045516.873	544.242
D.13	700670.630	4045513.733	545.062
D.14	700668.590	4045510.703	546.542
D.15	700666.740	4045507.813	547.632
D.16	700664.300	4045504.783	548.732
D.17	700661.500	4045502.323	548.992
D.18	700658.650	4045499.543	549.382
D.19	700655.850	4045496.953	549.942
D.20	700653.100	4045494.393	550.982
D.21	700650.450	4045491.583	551.382
D.22	700647.660	4045488.823	551.922
D.23	700645.000	4045486.173	552.722
D.24	700642.290	4045483.443	553.562
D.25	700639.460	4045480.883	553.792
D.26	700636.530	4045478.613	554.442
D.27	700633.550	4045475.973	554.962
D.28	700630.610	4045473.683	555.952
D.29	700627.650	4045471.203	556.902
D.30	700624.580	4045468.773	557.432
D.31	700621.820	4045466.103	558.022
D.32	700619.220	4045463.163	558.152
D.33	700616.730	4045460.533	558.972
D.34	700613.730	4045457.753	559.692
D.35	700611.050	4045454.963	560.212
D.36	700608.280	4045452.223	560.842
D.37	700605.490	4045449.593	561.322
D.38	700602.700	4045446.853	561.872
D.39	700600.170	4045443.923	562.272
D.40	700597.770	4045440.843	562.792

N0 points	X (WGS 84) m	Y (WGS 84) m	Z (NGA)
Ps25 ps26			
Point de tire	700590.228	4045359.862	570.781
R1	700200.173	4045507.902	622.002
Point de tire	700198.375	4045506.995	622.338
R2	700203.905	4045510.501	620.321
R3	700207.628	4045513.611	619.201
R4	700211.415	4045516.603	618.767
R5	700215.310	4045519.627	618.403
R6	700218.662	4045522.550	618.257
R7	700222.172	4045525.002	616.745
R8	700226.226	4045527.771	616.322
R9	700230.074	4045531.088	616.065
R10	700233.995	4045534.142	615.914
R11	700238.086	4045536.675	614.952
R12	700242.326	4045539.003	614.691
R13	700246.695	4045541.634	613.927
R14	700250.957	4045544.045	613.493
R15	700255.254	4045546.671	613.103
R16	700259.094	4045548.874	613.308
R17	700263.092	4045552.365	610.923
R18	700266.740	4045555.371	610.239
R19	700270.439	4045558.582	609.715
R20	700274.411	4045561.324	607.882
R21	700279.008	4045563.006	606.626
R22	700283.072	4045565.522	605.506

Annexe 4

D.41	700595.030	4045438.353	563.352
D.42	700592.160	4045435.553	563.342
D.43	700589.390	4045432.813	563.832
D.44	700586.680	4045429.993	564.232
D.45	700583.940	4045427.293	564.972
D.46	700581.530	4045424.633	566.672
D.47	700579.020	4045421.873	567.072
D.48	700576.540	4045418.833	566.852
Stations Topo Profil 1et2			
IM.5	700587.880	4045398.393	562.490
IM.6	700574.140	4045417.543	567.352
Profil PE3 = ps9, ps10			
E.1	700248.465	4045322.306	657.940
E.2	700250.967	4045326.086	657.090
E.3	700253.473	4045329.820	656.930
E.4	700256.510	4045333.501	656.750
E.5	700258.534	4045337.673	656.570
E.6	700261.874	4045341.298	656.380
E.7	700263.845	4045344.301	656.010
E.8	700265.354	4045346.965	653.470
E.9	700267.165	4045349.637	651.870
E.10	700269.318	4045352.805	650.600
E.11	700270.232	4045356.257	648.800
E.12	700272.065	4045358.903	646.760
E.13	700274.177	4045362.162	645.370
E.14	700275.299	4045365.898	644.320
E.15	700276.206	4045369.354	642.260
E.16	700278.182	4045372.113	640.760
E.17	700279.400	4045375.430	638.340
E.18	700281.206	4045378.305	636.420
E.19	700283.059	4045381.279	634.570
E.20	700284.744	4045383.604	632.080

N° Points	X (WGS 84), m	Y (WGS 84), m	
N° Points	X (WGS 84), m	Y (WGS 84), m	
Profils PS12 et PS13			
1	699187	4047369	763
2	699175	4047264	734
3	699178	4047268	738
4	699180	4047272	743
5	699183	4047276	743
6	699186	4047279	745
7	699189	4047283	747
8	699192	4047287	748
9	699195	4047291	749
10	699199	4047294	750
11	699200	4047299	753
12	699202	4047302	753
13	699204	4047307	751
14	699206	4047310	753
15	699209	4047315	753
16	699212	4047318	753
17	699215	4047322	751
18	699219	4047326	751
19	699222	4047330	751
20	699225	4047334	752
21	699229	4047338	753
22	699232	4047341	751
23	699235	4047345	751

Annexe 4

E.21	700287.021	4045386.321	630.150
E.22	700289.399	4045388.782	627.930
E.23	700291.376	4045391.332	625.760
E.24	700293.151	4045394.399	623.420
E.25	700295.206	4045397.132	621.730
E.26	700297.051	4045399.769	619.550
E.27	700298.802	4045402.892	618.340
E.28	700299.903	4045405.242	615.410
E.29	700301.337	4045407.468	612.680
E.30	700303.442	4045410.960	611.390
E.31	700305.291	4045414.043	610.060
E.32	700307.712	4045416.803	609.190
E.33	700310.191	4045420.111	608.710
E.34	700311.874	4045423.704	607.750
E.35	700314.071	4045426.227	606.490
E.36	700316.872	4045428.919	605.590
E.37	700319.693	4045431.650	604.670
E.38	700322.165	4045434.498	603.760
E.39	700324.595	4045437.140	603.120
E.40	700327.077	4045439.185	600.440
E.41	700329.180	4045441.699	598.440
Profil PE4= ps11, ps12			
F.1	700234.920	4045419.473	625.480
F.2	700239.547	4045417.464	626.420
F.3	700243.879	4045415.330	627.480
F.4	700248.037	4045412.739	628.550
F.5	700252.002	4045409.818	629.430
F.6	700255.566	4045406.436	630.250
F.7	700258.923	4045402.828	631.040
F.8	700262.074	4045399.097	632.090
F.9	700265.279	4045395.374	633.130
F.10	700268.681	4045391.932	634.070

N° Points	X (WGS 84), m	Y (WGS 84), m	Z (NGA), m
Profil PE1 = PS1 à PS4			
A.1	699221.565	4047414.809	749.052
A.2	699226.061	4047416.704	748.122
A.3	699230.280	4047418.730	747.250
A.4	699235.087	4047417.894	746.552
A.5	699239.372	4047415.519	745.982
A.6	699243.468	4047412.853	745.372
A.7	699247.746	4047410.199	744.782
A.8	699251.746	4047407.767	743.612
A.9	699256.145	4047406.527	741.762
A.10	699260.886	4047405.841	740.672
A.11	699265.756	4047405.616	739.722
A.12	699270.621	4047405.718	739.012
A.13	699275.780	4047406.053	738.782
A.14	699280.722	4047406.266	737.352
A.15	699284.992	4047407.811	736.292
A.16	699288.304	4047411.082	734.592
A.17	699292.580	4047412.731	733.052
A.18	699297.127	4047411.691	731.072
A.19	699301.177	4047409.137	730.142
A.20	699304.565	4047405.678	729.102
A.21	699307.452	4047401.682	728.852
A.22	699311.145	4047398.325	728.402
A.23	699314.801	4047395.084	727.412
A.24	699318.348	4047392.084	725.522
A.25	699322.501	4047389.000	723.072
A.26	699325.707	4047385.529	721.922
A.27	699328.739	4047381.792	720.682
A.28	699330.641	4047377.185	719.912
A.29	699332.560	4047372.848	718.392

Annexe 4

F.11	700272.342	4045388.566	634.850
F.12	700276.337	4045385.666	634.890
F.13	700280.746	4045383.246	634.920
F.14	700284.981	4045380.729	634.280
F.15	700292.995	4045375.416	631.880
F.16	700296.693	4045372.088	631.190
F.17	700300.443	4045368.879	630.570
F.18	700304.672	4045366.254	629.180
F.19	700308.788	4045364.856	628.570
F.20	700313.056	4045362.060	627.620
F.21	700317.590	4045360.213	627.580
F.22	700321.573	4045357.682	625.990
F.23	700325.086	4045354.713	624.120
F.24	700328.551	4045351.628	622.510
F.25	700331.912	4045347.972	621.970
F.26	700335.216	4045344.304	621.390
F.27	700338.636	4045340.667	621.220
F.28	700341.943	4045337.007	621.260
F.29	700345.718	4045333.760	621.640
F.30	700349.395	4045330.255	621.620
F.31	700351.815	4045325.943	621.230
F.32	700354.170	4045321.574	621.270
F.33	700356.507	4045317.212	621.570
F.34	700358.482	4045312.782	621.820
F.35	700360.623	4045308.354	622.580
F.36	700362.838	4045303.918	622.310
F.37	700365.148	4045299.536	621.930
F.38	700367.678	4045295.369	621.560
F.39	700370.480	4045291.363	622.130
F.40	700372.966	4045287.496	623.730
F.41	700375.953	4045283.791	624.890
F.42	700379.030	4045280.076	625.890

N0 points	X (WGS 84) m	Y (WGS 84) m	Z (NGA)
Ps 32			
V1	700315.974	4045513.141	580.319
V2	700315.596	4045509.255	583.345
V3	700314.853	4045505.442	586.484
V4	700314.526	4045501.542	589.594
V5	700314.043	4045497.987	593.003
V6	700313.754	4045494.334	596.404
V7	700313.540	4045490.674	599.804
V8	700312.810	4045486.945	602.991
V9	700312.020	4045483.511	606.418
V10	700311.286	4045479.567	609.401
V11	700310.975	4045475.743	612.189
N0 points	X (WGS 84) m	Y (WGS 84) m	Z (NGA)
Ps24			
Point de tire	700590.228	4045359.862	570.781
Q1	700577.101	4045396.398	566.056
Q2	700572.373	4045396.479	566.340
Q3	700567.179	4045396.515	567.001
Q4	700562.713	4045396.577	568.032
Q5	700557.595	4045396.567	569.452
Q6	700552.762	4045396.533	570.442
Q7	700547.794	4045396.612	571.226
Q8	700542.961	4045397.214	571.468
Q9	700538.186	4045398.300	572.002
Q10	700534.127	4045396.674	573.703

Annexe 4

F.43	700381.489	4045275.819	626.520
F.44	700383.834	4045272.455	623.720
F.45	700386.190	4045269.093	621.220
F.46	700386.258	4045264.578	619.930
F.47	700385.734	4045260.562	617.890
Profil PE5 = ps13, ps14			
G.1	700206.881	4045388.487	650.150
G.2	700210.533	4045384.988	650.290
G.3	700213.901	4045381.362	649.880
G.4	700217.815	4045378.268	649.900
G.5	700221.740	4045375.136	650.150
G.6	700225.932	4045372.558	650.100
G.7	700230.454	4045370.383	650.320
G.8	700234.816	4045368.137	650.720
G.9	700239.333	4045365.844	650.270
G.10	700243.761	4045363.653	650.370
G.11	700248.427	4045361.854	650.490
G.12	700252.983	4045359.800	650.160
G.13	700257.625	4045357.914	650.130
G.14	700262.233	4045356.038	649.970
G.15	700266.788	4045353.907	649.820
G.16	700271.153	4045351.195	650.390
G.17	700275.336	4045348.481	650.290
G.18	700279.178	4045345.260	649.730
G.19	700282.781	4045342.066	649.160
G.20	700286.189	4045338.445	649.020
G.21	700288.734	4045335.391	649.750
G.22	700291.632	4045331.372	649.550
G.23	700294.080	4045327.119	649.020
G.24	700296.813	4045322.992	647.520
Profil PE6 = ps25, ps26			
H.1	700291.160	4045568.497	602.820

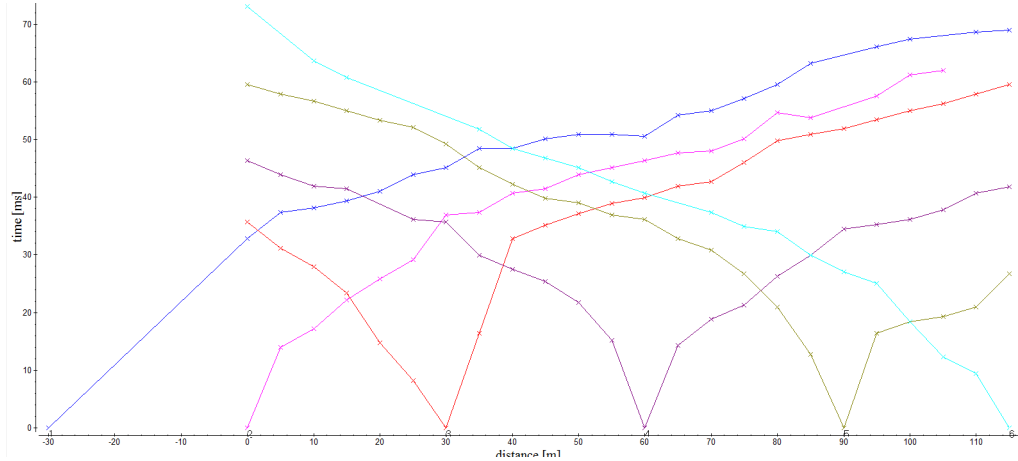
Annexe 4

H.2	700287.193	4045565.865	604.110
H.3	700283.140	4045563.107	605.190
H.4	700279.366	4045560.274	606.960
H.5	700275.407	4045557.386	607.550
H.6	700271.883	4045554.123	608.090
H.7	700267.811	4045552.326	610.630
H.8	700263.865	4045550.146	610.600
H.9	700259.468	4045547.887	610.750
H.10	700255.479	4045545.424	611.190
H.11	700250.970	4045542.962	611.640
H.12	700246.533	4045540.952	612.400
H.13	700242.453	4045537.964	613.220
H.14	700238.088	4045535.681	613.350
H.15	700233.649	4045533.278	613.640
H.16	700229.628	4045530.459	613.950
H.17	700226.067	4045527.936	614.210
H.18	700222.456	4045525.154	615.660
H.19	700218.548	4045522.213	616.000
H.20	700214.370	4045519.555	616.470
H.21	700210.498	4045516.286	617.390
H.22	700206.490	4045514.385	619.100
H.23	700204.062	4045510.261	620.660
H.24	700200.172	4045507.902	622.000
H.25	700199.659	4045505.591	625.020
H.26	700197.242	4045503.187	627.650
H.27	700195.026	4045499.868	629.820
H.28	700191.430	4045496.996	629.430
H.29	700188.317	4045493.556	629.830
H.30	700185.376	4045490.048	629.450
H.31	700182.119	4045487.006	630.460
H.32	700178.731	4045483.441	631.070

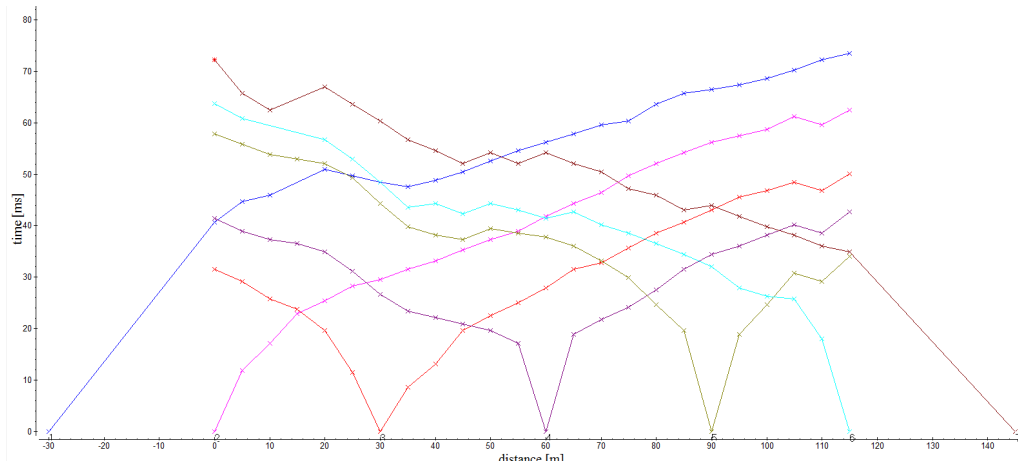
Annexe 5

Les hodochrones des deux sites Ouled Ali et Echetal

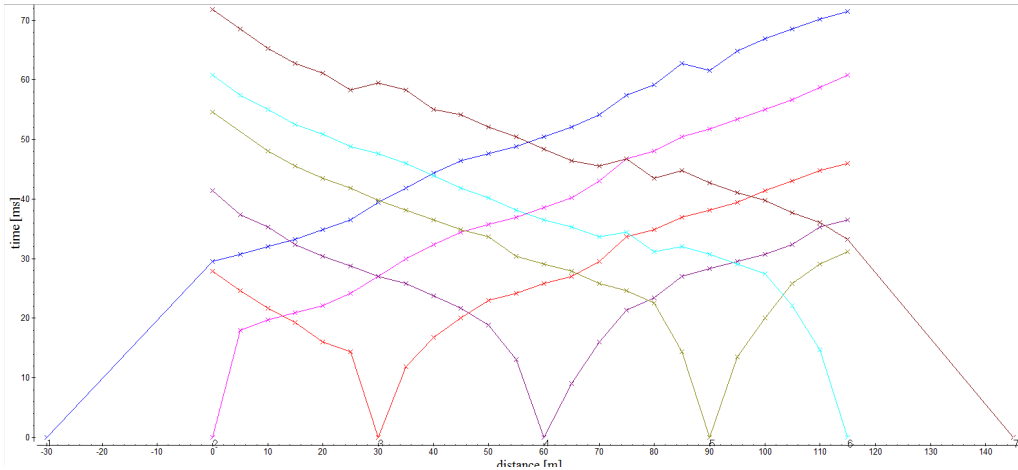
5.1. Hodochrones du site Ouled Ali



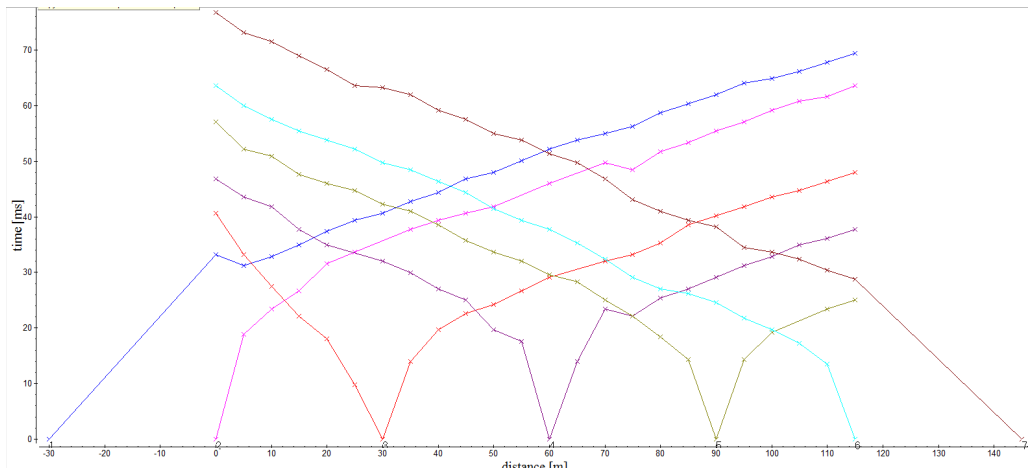
Hodochrones de PS1.



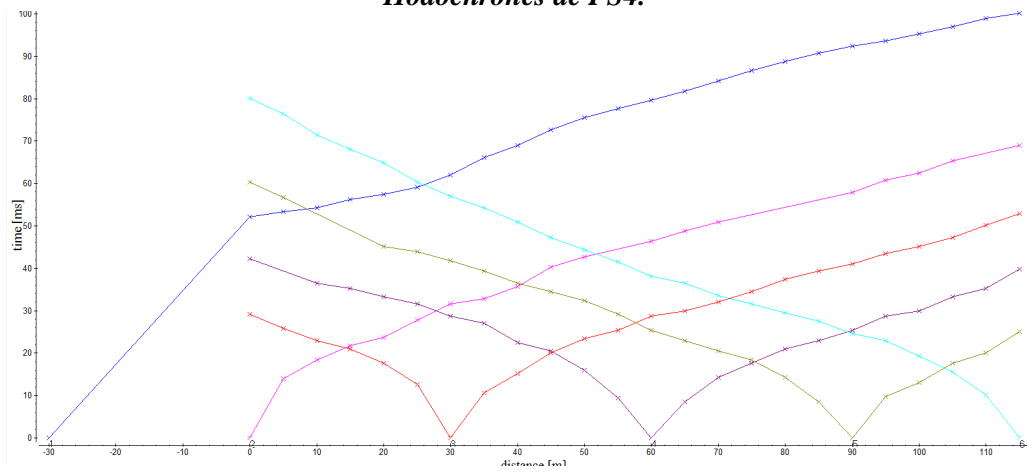
Hodochrones de PS2.



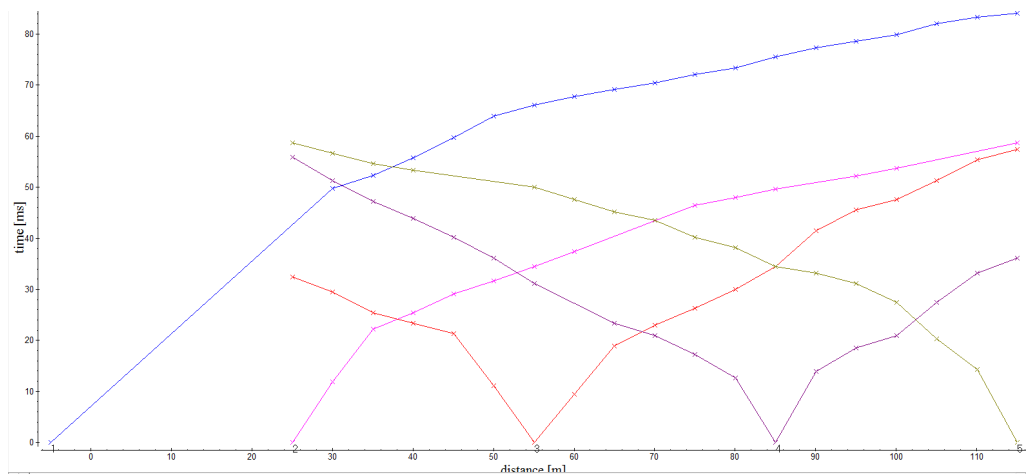
Hodochrones de PS3.



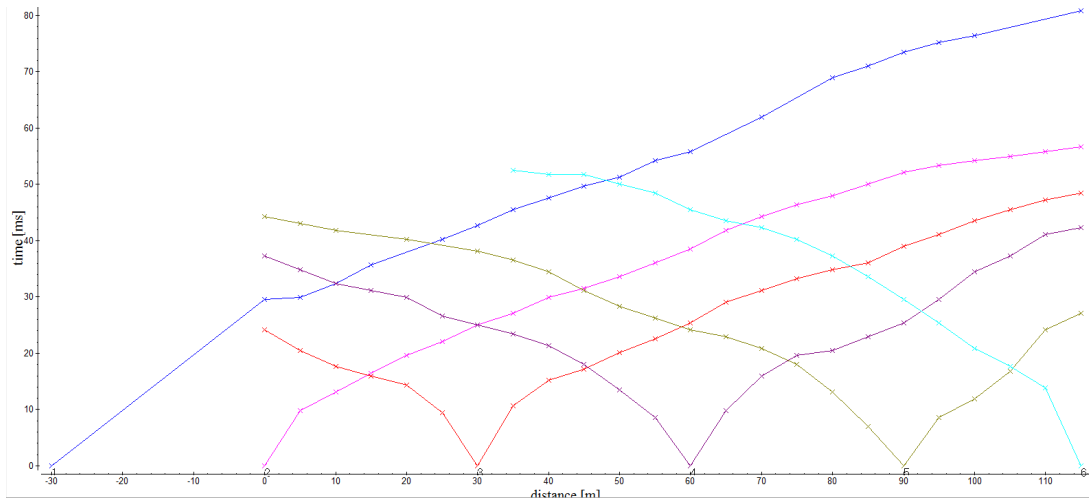
Hodochrones de PS4.



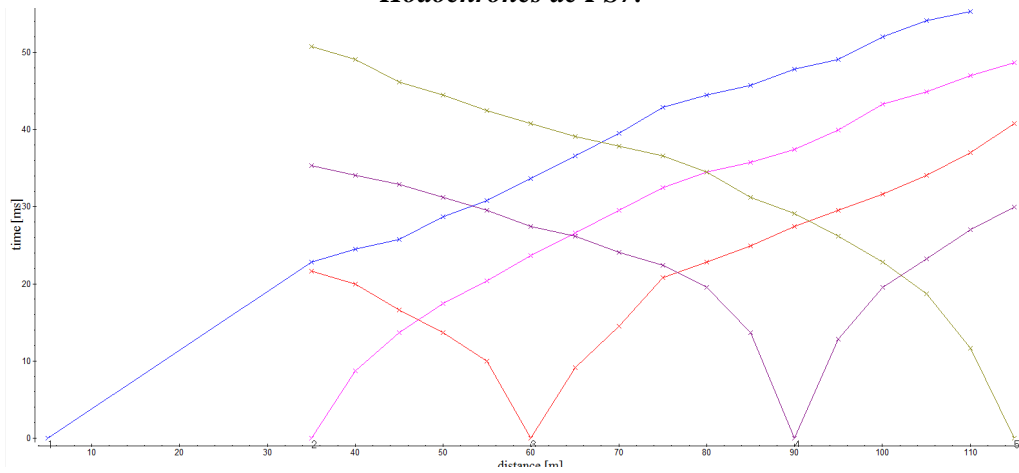
Hodochrones de PS5.



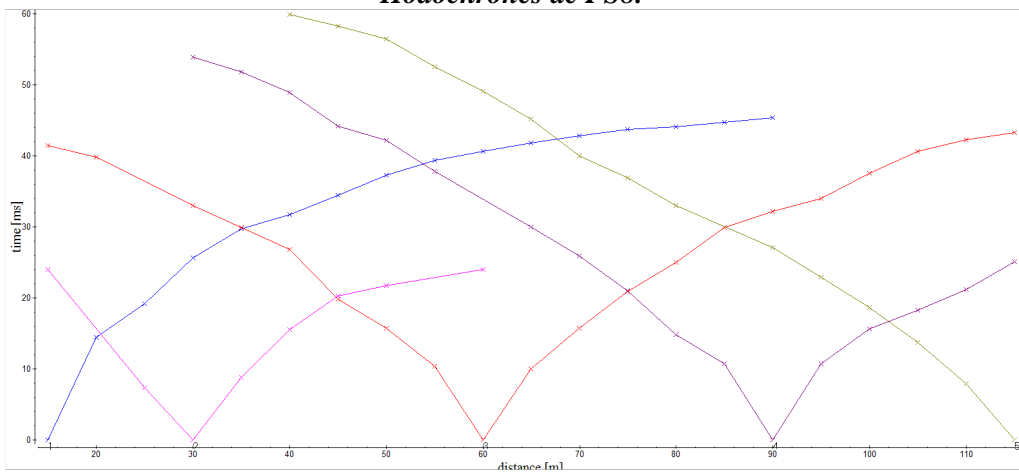
Hodochrones de PS6.



Hodochrones de PS7.

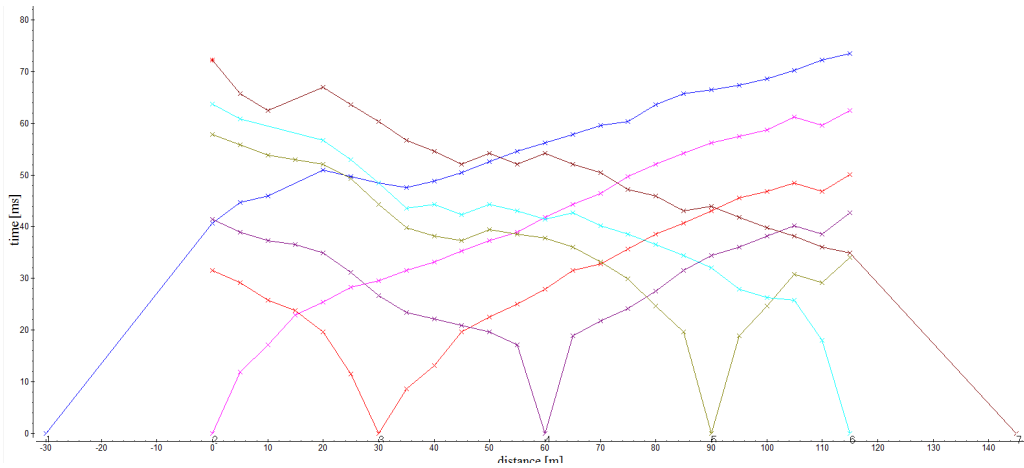


Hodochrones de PS8.

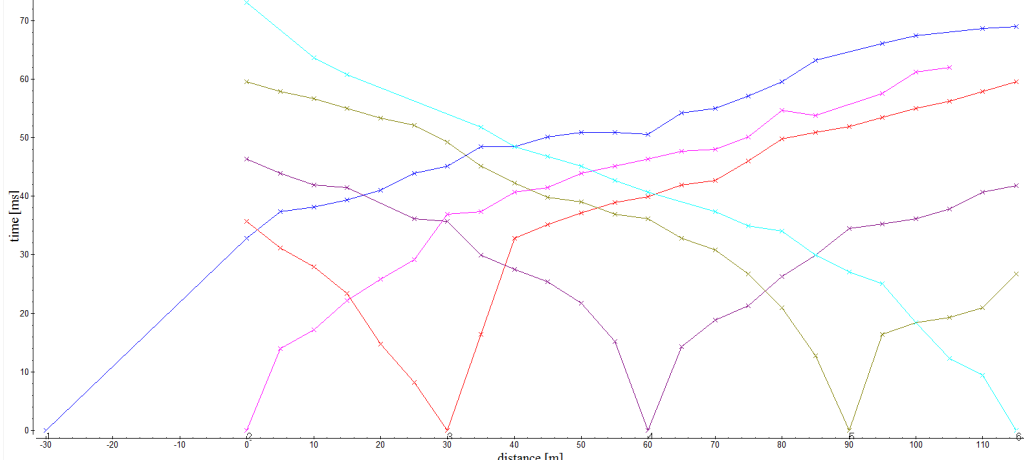


Hodochrones de PS9 et ps10.

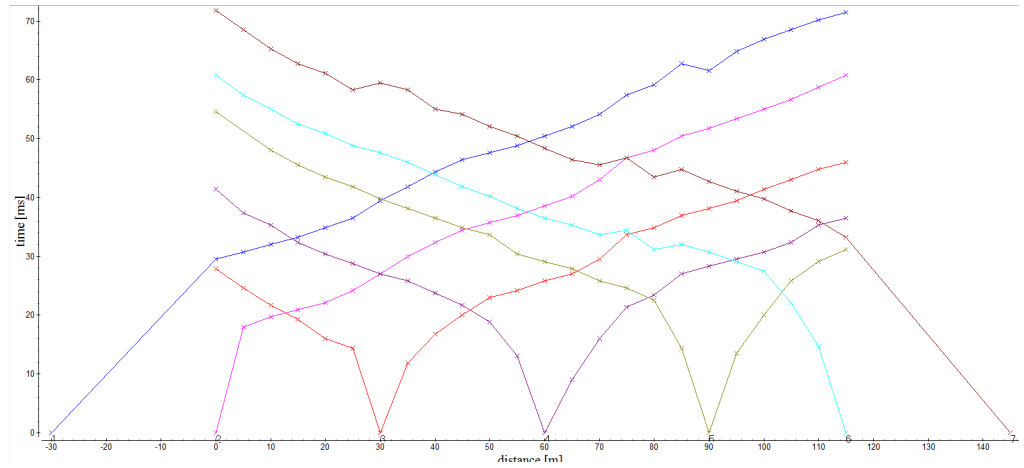
5.2. Hodochrone Site Echetal



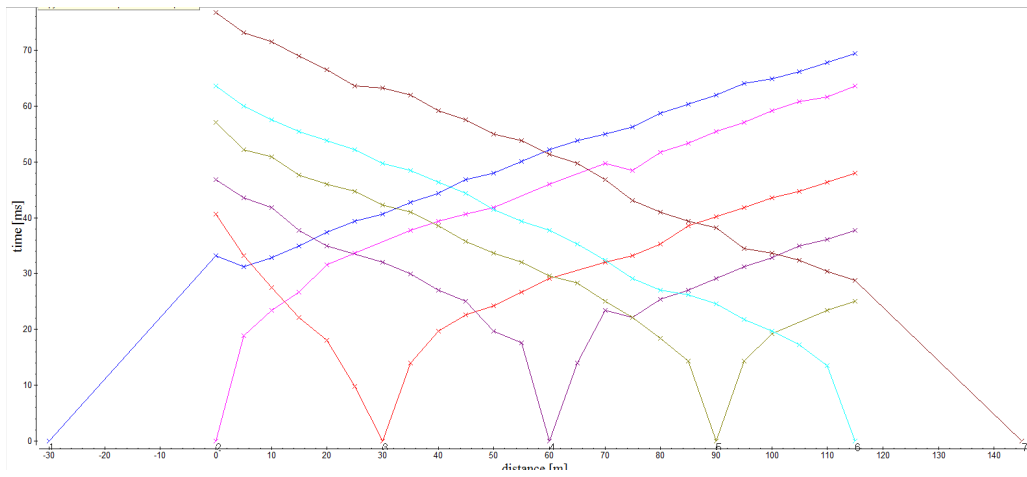
Hodochrones de PS1 et PS2.



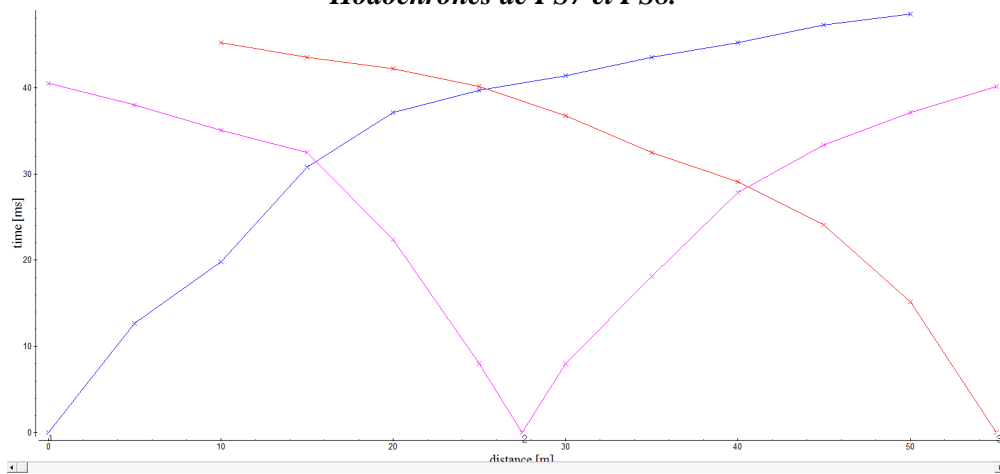
Hodochrones de PS3 et PS4.



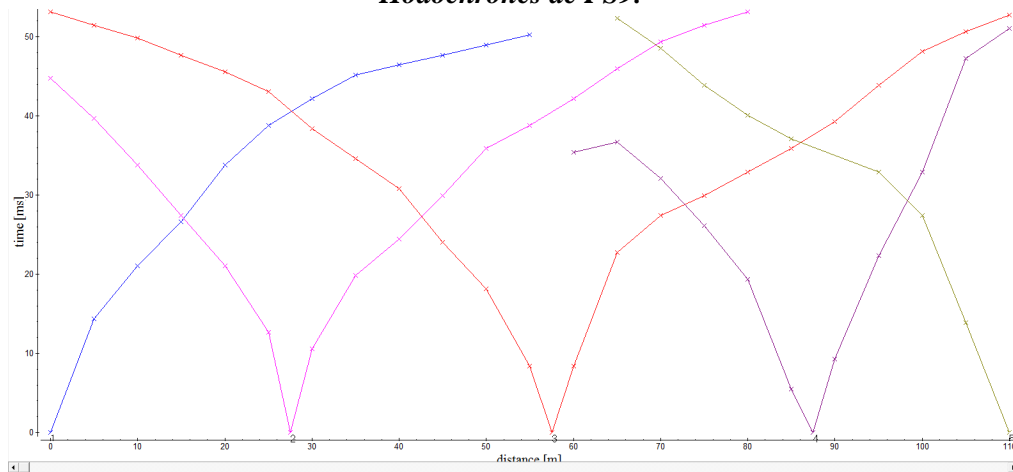
Hodochrones de PS5 Et PS6.



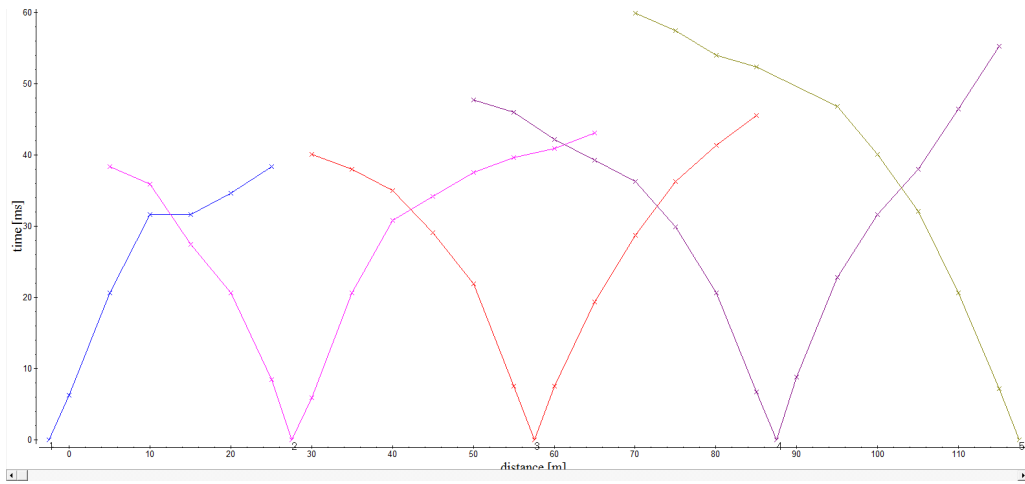
Hodochrones de PS7 et PS8.



Hodochrones de PS9.



Hodochrones de PS10 et PS11.

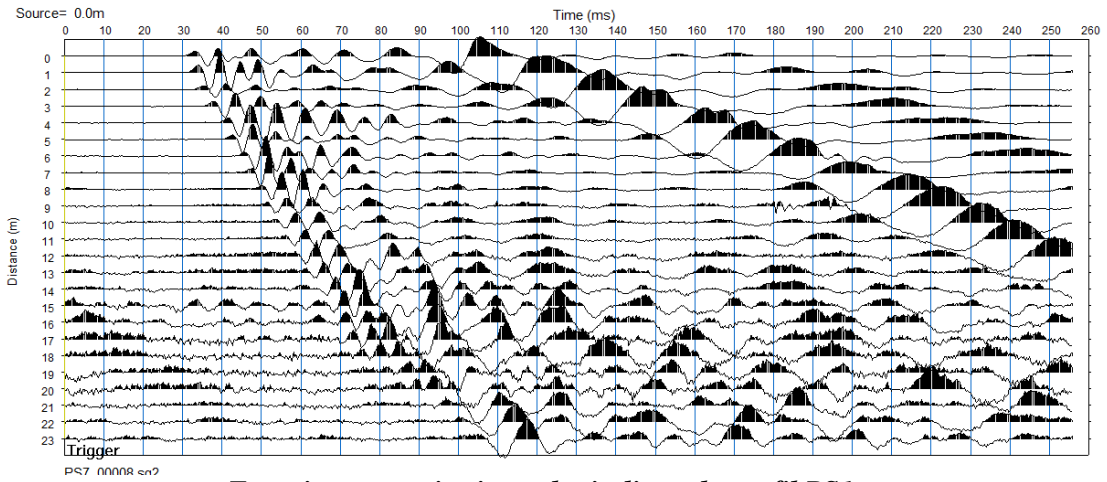


Hodochrones de PS12 et PS13.

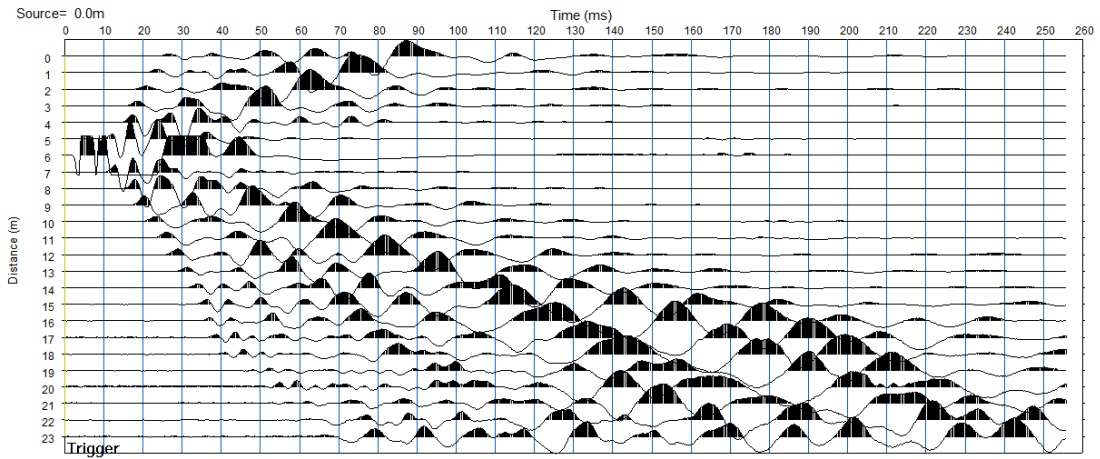
Annexe 6

Les enregistrements sismiques du site Ouled Ali et Echétel

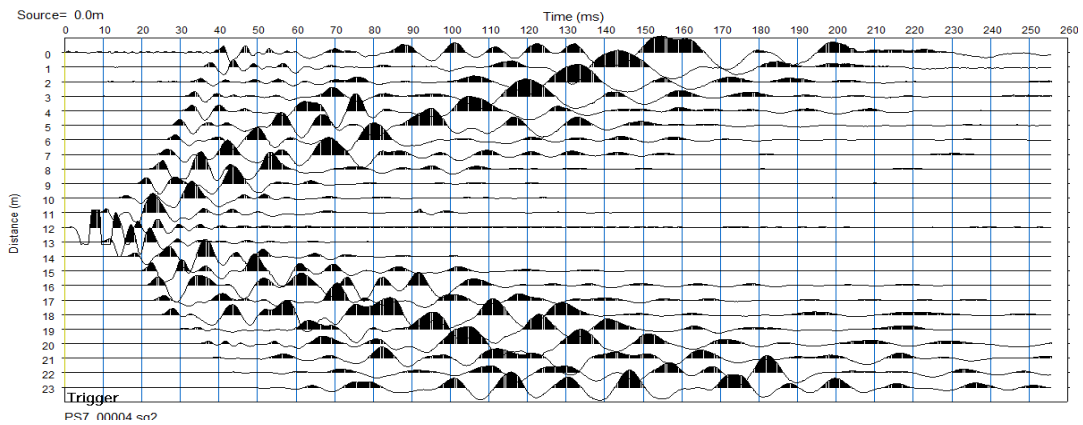
6.1. Enregistrement sismique Ouled Ali



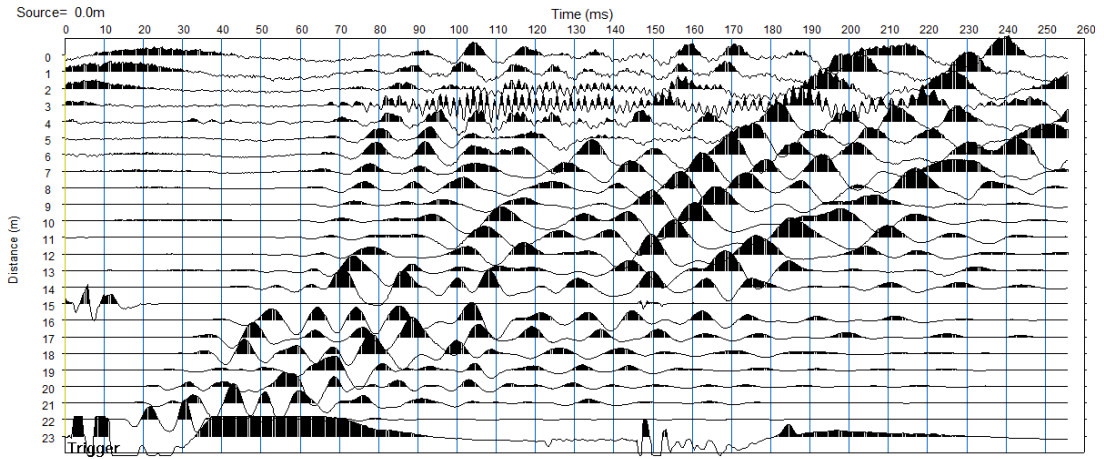
Enregistrement sismique du tir direct du profil PS1.



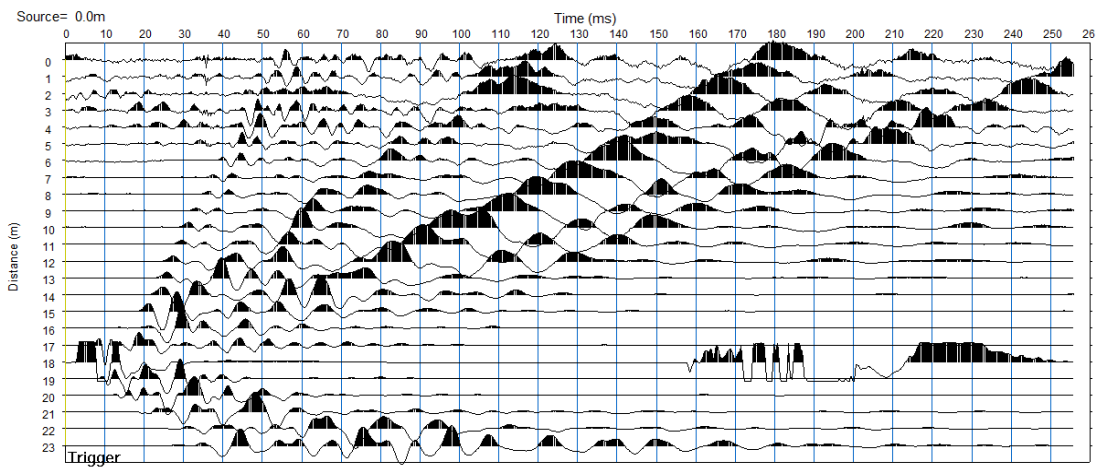
Enregistrement sismique du tir au centre du profil PS1.



Enregistrement sismique du tir au centre du profil PS1-PS2.

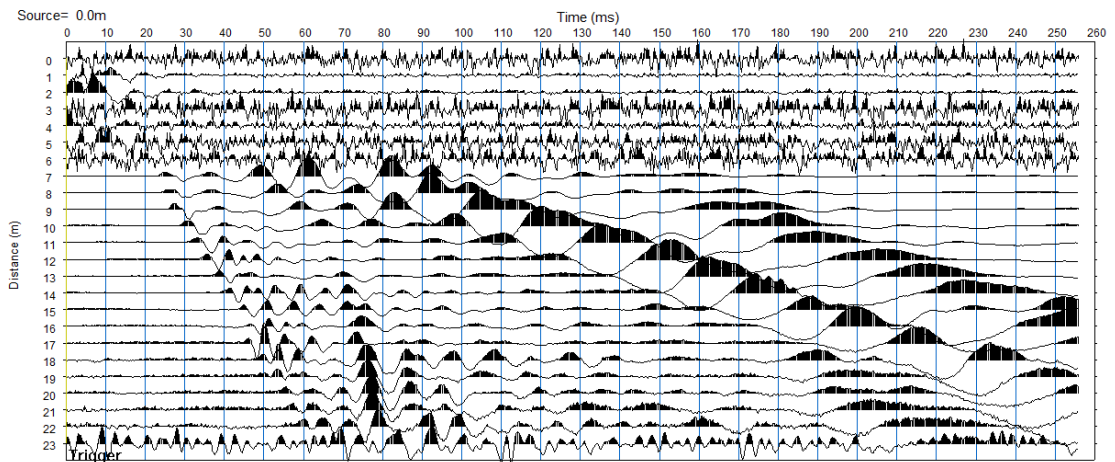


Enregistrement sismique du tir reverse du profil PS1-PS2.



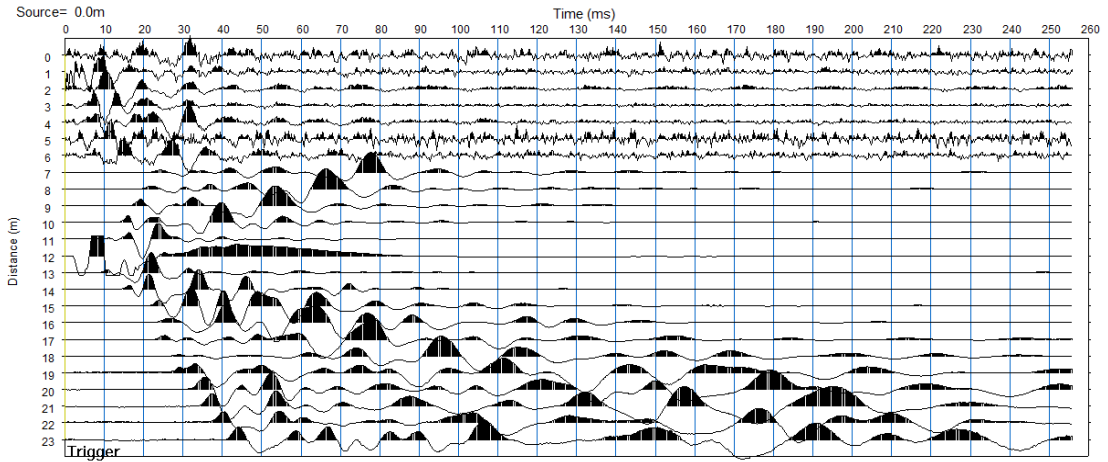
Enregistrement sismique du tir au centre du profil PS2.

Status : No editing



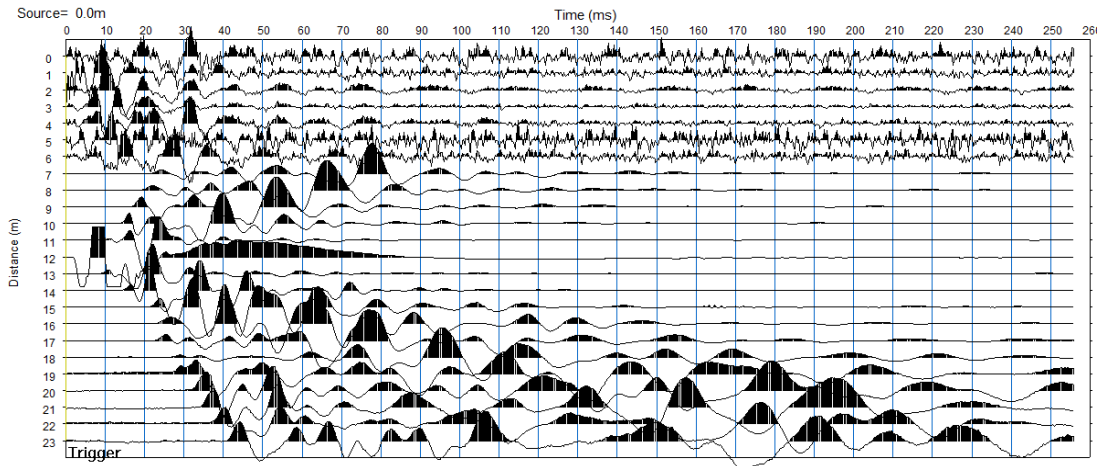
Enregistrement sismique du tir direct du profil PS3.

Status : No editing



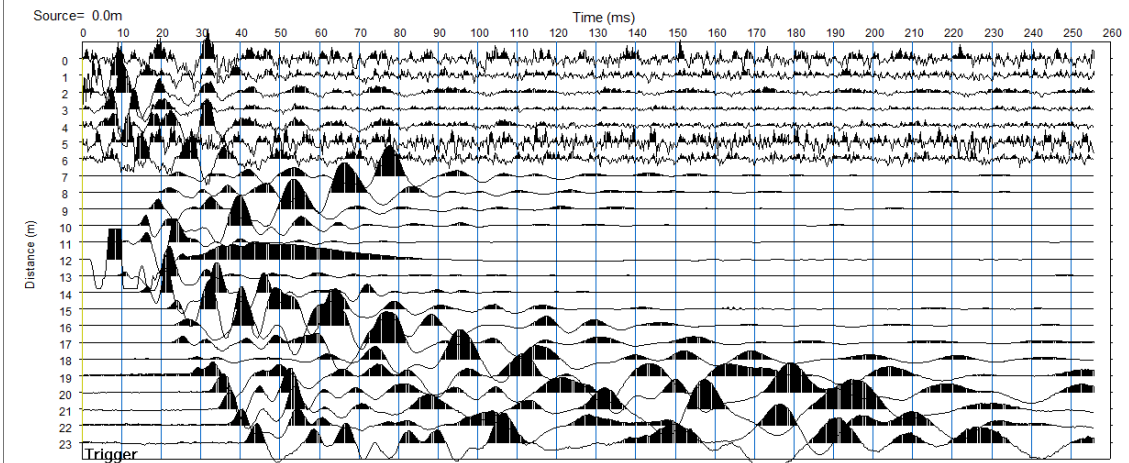
Enregistrement sismique du tir au centre du profil PS3.

Status : No editing



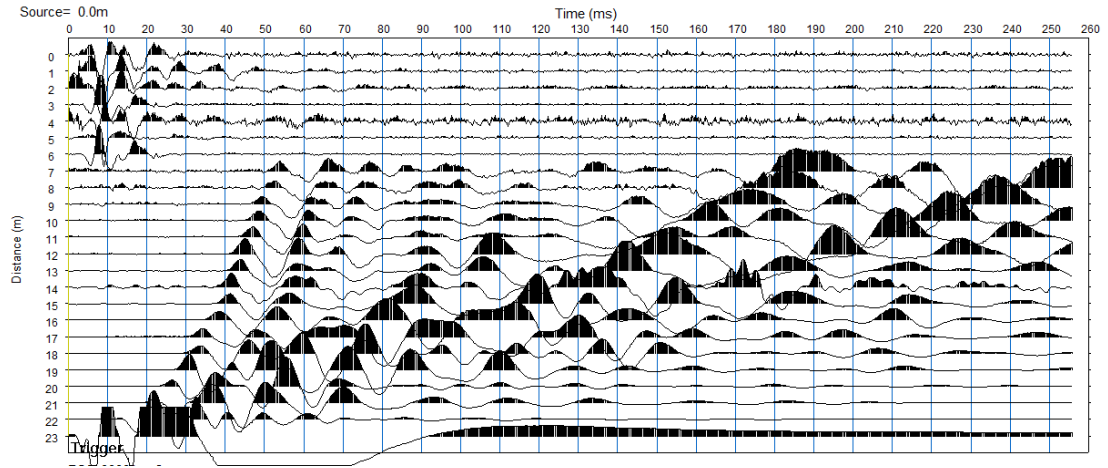
Enregistrement sismique des tirs au centre des profils PS3-PS4.

Status : No editing



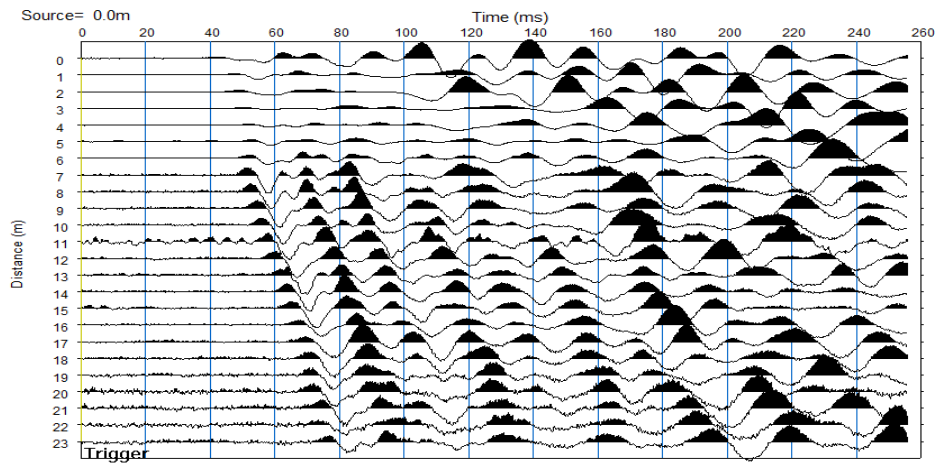
Enregistrement sismique du tir au centre du profil PS3.

atus - ro eunig

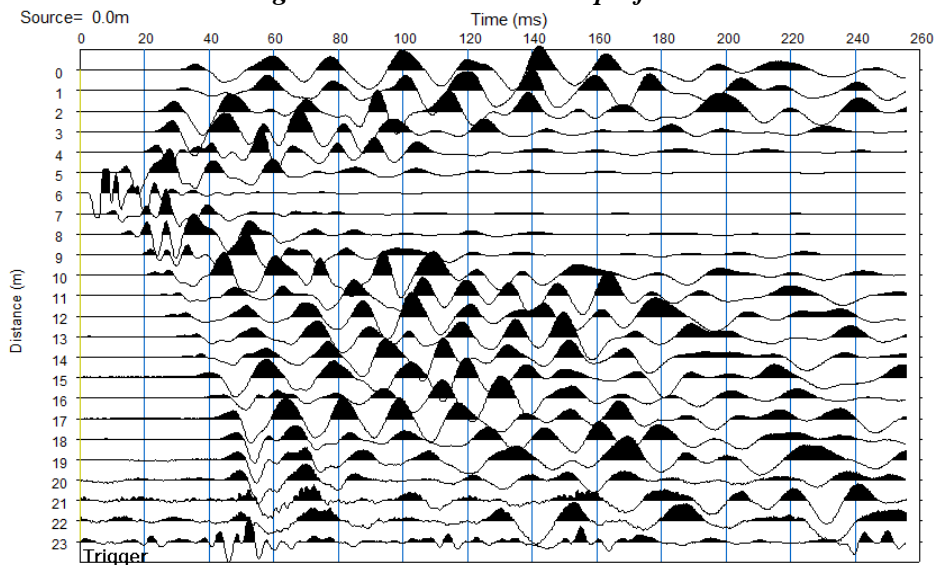


Enregistrement sismique du tir reverse du profil.

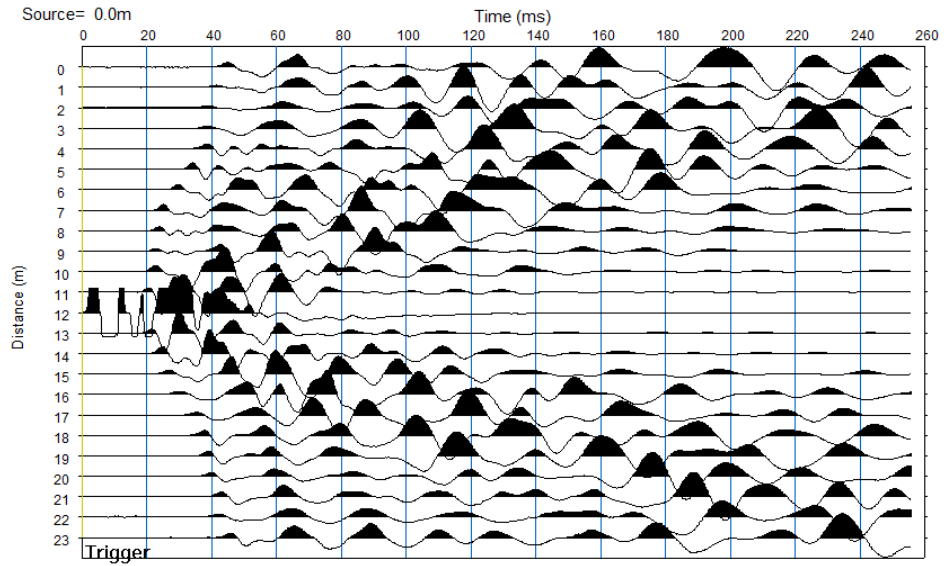
6.2. Enregistrement sismique site Echetal



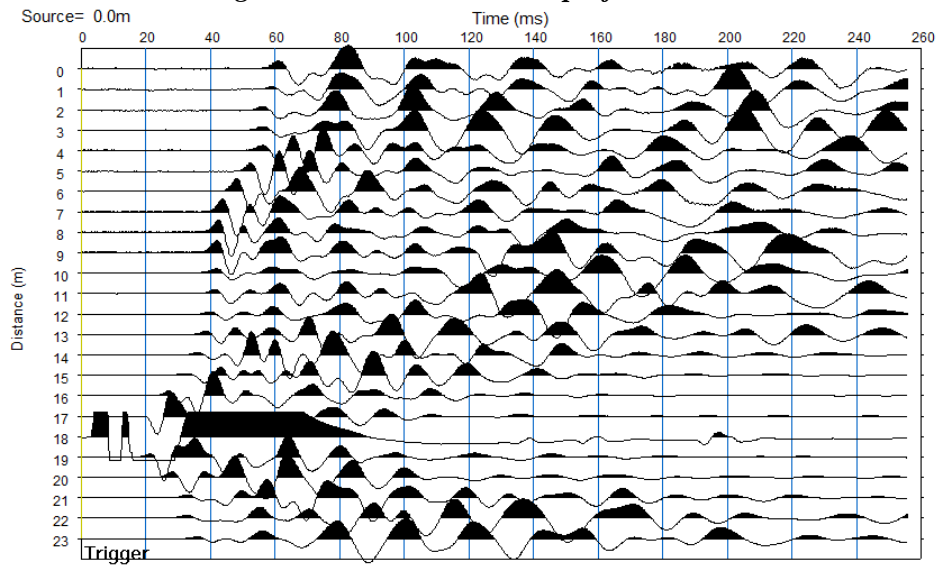
Enregistrement du tir direct du profil PS1.



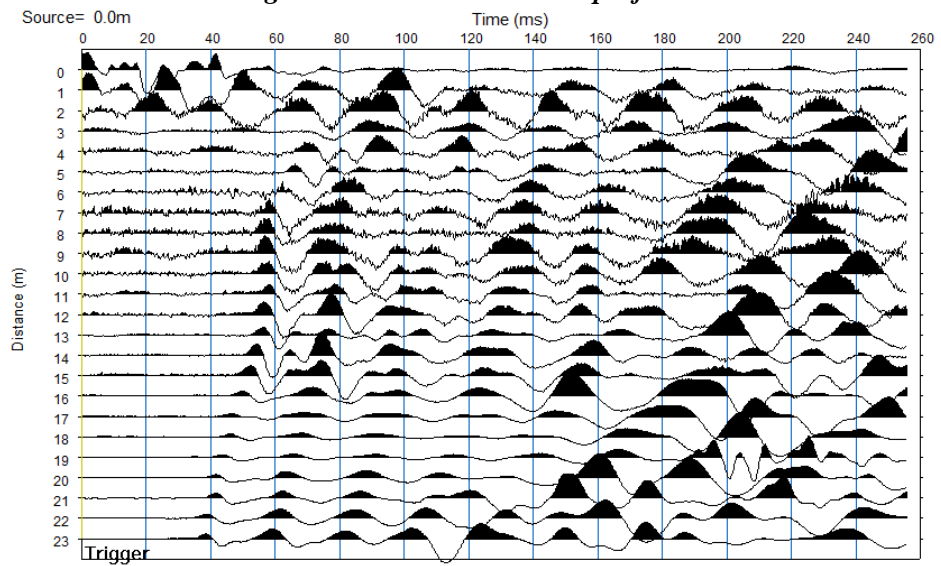
Enregistrement du tir centré du profil PS1.



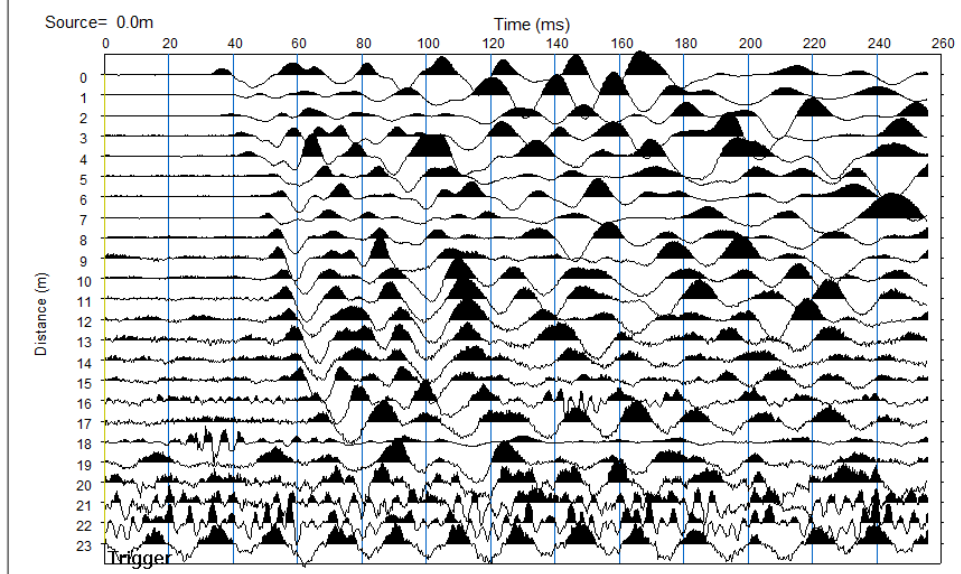
Enregistrement du tir centré du profil PS1-PS2.



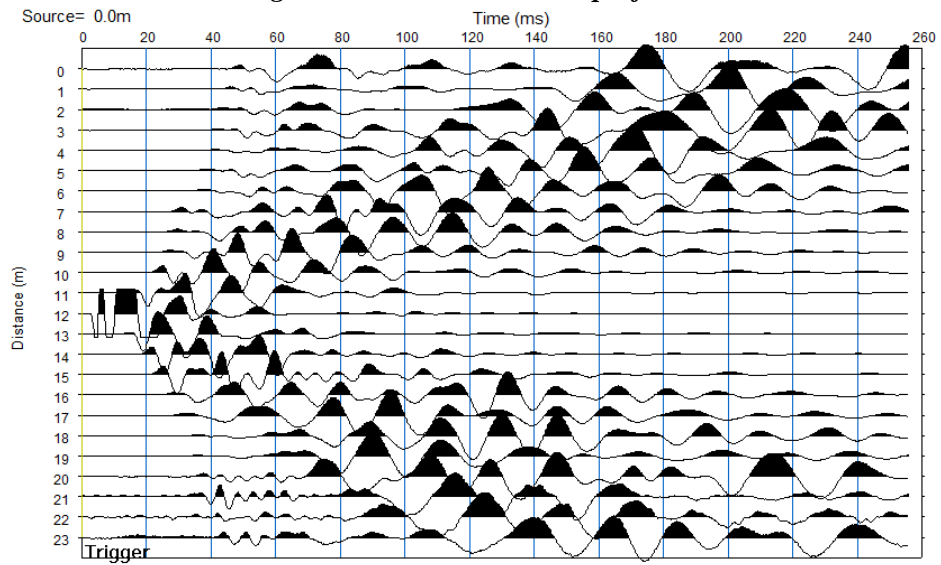
Enregistrement du tir centré du profil PS2.



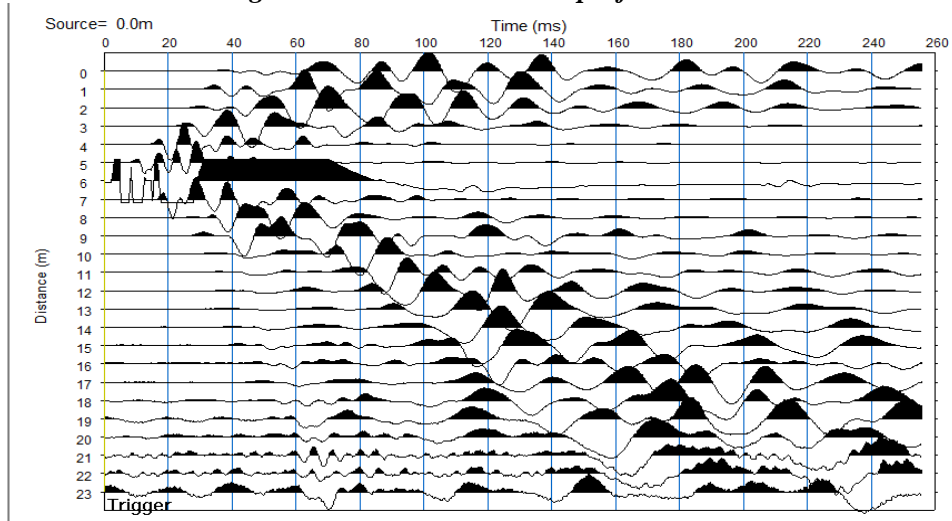
Enregistrement du tir reverse du profil PS2.



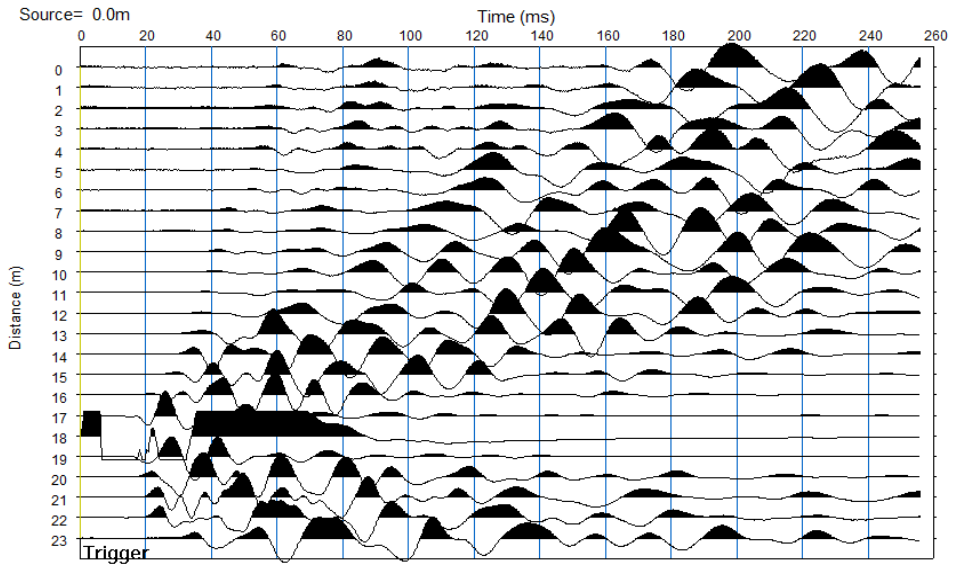
Enregistrement du tir direct du profil PS3.



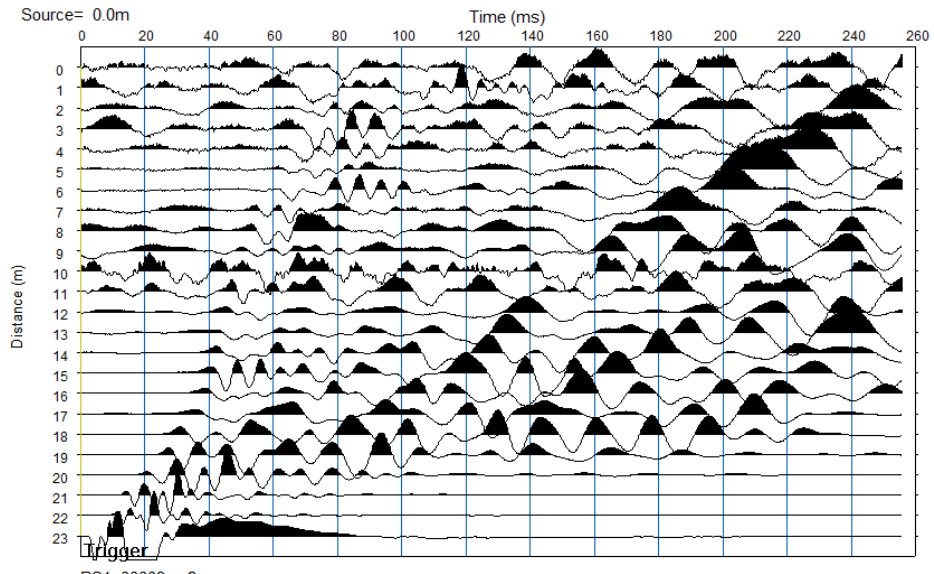
Enregistrement du tir centré du profil PS3-PS4.



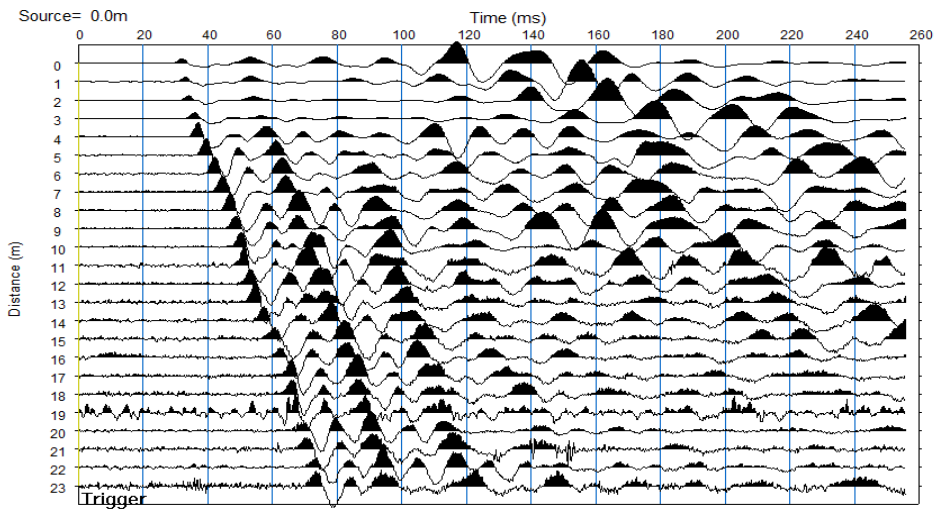
Enregistrement du tir centré du profil PS3.



Enregistrement du tir centré du profil PS4.



Enregistrement du tir reverse du profil PS4.



Enregistrement du tir direct du profil PS5.