



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Djillali Bounaama de Khemis Miliana
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre
Département des Sciences de la Terre
Filière : Géologie appliquée
Spécialité : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Mémoire présenté pour l'obtention d'un diplôme de Master
en Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Thème

Etat d'art sur l'apport des méthodes
géophysiques à l'évaluation et la
caractérisation des instabilités gravitaires
en Algérie, cas des glissements du Nord de
l'Algérie

Réalisé par :

Mlle. KADI NAWAL
Mlle. MEHALI SARA

Déposé le: 31/07/2021

Encadré par :

Dr. MEZIANI	Brahim	MCB	Université Khemis-Miliana	Promoteur
Dr. GADOURI	Hamid	MCB	Université Khemis-Miliana	Co-promoteur

Expertisé/examiné à distance par :

Dr. AISSA	Mohamed Hemza	MCB	Université Khemis-Miliana	Président
Dr. FILALI	Mira	MCB	Université Khemis-Miliana	Examinatrice

Année universitaire : 2020/2021

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

A ceux qui m'ont donné la vie, la tendresse, qui s'est sacrifiés pour mon bonheur et ma réussite, à ma chère mère Aicha et à mon cher père Abd El Kader.

A mes chères sœurs Naima, Djamilia, Leila et Lwiza

A mes chers frères Ahmed, Mohammed, Kamel, Toufik, Belkacem, et Elarbi.

A Les femmes de mes frères et les maris de mes sœurs

A mon grand père

A les fis de mes frères et les fils de mes sœurs

A tout ma famille KADI, SADOUNE et MEKAIDECHE

A mon binôme SARA

A mes chères amis : Hadjer, Amina, Kawther, Fatiha, Fatima Zohra, Safia, Khawla, Amal, Halima, Wafa, Somia, Souad, Samira, Imane et Mokhtaria.

A tous qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

A toutes mes chères collègues et amis sans exception de la promotion de géotechnique2020-2021.

A vous..... merci

NAWAL

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

A ceux qui m'ont donné la vie, la tendresse, qui s'est sacrifiés pour mon bonheur
et ma réussite, à ma chère mère Nacira et à mon cher père Serhane

A mes chères sœurs Asia, Fatma Zohra, Aicha et Saliha

A ma cher frère Hamza.

Aux les maris de mes
sœurs Aux les fils de
mes sœurs

A tout ma famille Mehali, et Zouggar

A mon binôme Nawal

A mes chères amis : Fatiha, Safia, Khawla, Ferial, et Amal

A tous qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

A toutes mes chères collègues et amis sans exception de la promotion de
géotechnique2020-2021.

A vous..... merci

SARA

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Je remercie tout les membres du jury qui me feront grand honneur d'examiner ce travail. Je les prie de croire à ma respectueuse reconnaissance.

J'exprime toute ma profonde gratitude et mes remerciements à notre promoteur de mémoire **Dr. MEZIANI Brahim**, Enseignant chercheur à l'université Djilali Bounaama Khemis Miliana et le co-directeur **Dr.**

GADOURI Hamid, pour l'aide qu'ils ont fournie et les connaissances qu'ils ont su nous transmettre. Nous les remercions également pour leurs disponibilités et la qualité de leurs conseils.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les enseignants que nous avons rencontrés, en particulier **Dr. AISSA Mohamed Hemza**, **Mme FILALI Mira** et **Mme HADJ MOHAMED Nacira**.

Enfin, nous remercions tous les géotechniciennes et les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Les phénomènes des instabilités gravitaires des pentes naturelles sont considérés comme dangers naturel rencontrés dans tous les pays du monde à cause de divers facteurs naturels ou anthropiques. Leurs déformations concernent approximativement tous les matériaux géologiques (roches naturelles, sol, ou combinaisons de ces matériaux) et peuvent se produire et se développer dans une grande variété de volumes et de formes. Dans ce travail nous avons présenté un état d'art sur les applications des méthodes géophysiques dans l'évaluation et la caractérisation des glissements de terrain depuis l'année 2005 à 2020 dont l'objectif principal est d'intérêt pour savoir la méthode géophysique applique pour bien caractériser et évaluer le glissement de terrain. Grâce à cela, nous avons découvert que les méthodes géophysiques les plus utilisés dans le Nord de l'Algérie sont les méthodes électriques surtout la tomographie électrique par résistivité, les méthodes sismiques et les méthodes d'électromagnétiques. En général, ce sont des méthodes simples et efficaces qui fournissent des résultats dont l'intérêt et la précision sont indiscutables particulièrement dans le Nord-est de l'Algérie.

Mots-clés: Instabilités gravitaires, Nord de l'Algérie, électriques, Tomographie électrique par résistivité, sismiques, électromagnétiques, glissements de terrain.

ملخص

تعتبر ظاهرة عدم استقرار المنحدرات الطبيعية بفعل الجاذبية من المخاطر الطبيعية التي تواجهها جميع دول العالم بسبب عوامل طبيعية أو بشرية. تؤثر تشوهاتها على جميع المواد الجيولوجية تقريباً (الصخور الطبيعية أو التربة أو سقوط الحجارة أو خليط من هذه المواد) ويمكن أن تنتج وتتطور في مجموعة متنوعة من الأحجام والأشكال. في هذا العمل قدمنا حالة من الفن على تطبيقات الأساليب الجيوفيزيائية في تقييم وتوصيف الانهيارات الأرضية من عام 2005 إلى 2020 ، والهدف الرئيسي هو تحليل جهود المجتمع الجيوفيزيائي للتغلب على قيود الجيوفيزيائية وأبرز التقنيات في فحص الجيوفيزياء والانهيارات الأرضية. وبفضل هذه الدراسة اكتشفنا أن الطرق الجيوفيزيائية الأكثر استخداماً في شمال الجزائر هي الطرق الكهربائية خاصة التصوير المقطعي الكهربائي بالمقاومة والطرق الزلزالية والطرق الكهرومغناطيسية. عموماً هي طرق بسيطة وفعالة توفر نتائج لا جدال فيها على اهتمامها ودقتها بشكل خاص في شمال شرق الجزائر.

الكلمات المفتاحية: الا استقرار الجاذبي ، شمال الجزائر ، الكهرباء ، التصوير المقطعي بالمقاومة الكهربائية ، الزلازل، الكهرومغناطيسية ، الانهيارات الأرضية..

Abstract

The phenomena of gravity instabilities of natural slopes are considered as natural dangers encountered in all countries of the world due to various natural or anthropogenic factors. Their deformations affect approximately all geological materials (natural rocks, soil, or combinations of these materials) and can occur and develop in a wide variety of volumes and shapes and their properties. In this work we have presented a state of the art on the applications of geophysical methods in the evaluation and characterization of landslides from the year 2005 to 2020 while the main objective of which is the interest in knowing the geophysical method applied to characterize and evaluate the ground of landslide. From to this, we have found out that the most widely used geophysical methods in the Northern Algeria are the electrical methods in particular, methods of electrical tomography by resistivity, and seismic resistance measurement and the electromagnetic methods. These methods are simple and effective methods which provide results of interest and precision are indisputable, particularly in the North-East of Algeria.

Key words: gravitational instability, northern Algeria, electricity, electrical resistance tomography, earthquakes, electromagnetism, landslides.

Didicace.....	
Remerciement.....	
Résumé.....	
ملخص.....	
Abstract.....	
Table de matières.....	
Liste des Figures.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des Abréviations et des symboles.....	
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les instabilités gravitaires	
1.1 Introduction	3
1.2 Les types des instabilités gravitaires	3
1.2.1 Les glissements	4
1.2.1.1 Glissement translatif (plan)	5
1.2.1.2 Glissement rotationnel (circulaire)	6
1.2.1.3 Glissement aléatoire (quelconque)	7
1.2.2 Fluage	8
1.2.3 Ecoulements et Eboulements	8
1.2.3.1 Chutes de pierres et de blocs	8
1.2.3.2 Eboulement	9
1.2.3.3 Ecoulement	10
1.2.4 Les effondrements	11
1.3 Facteurs et causes des instabilités gravitaires	12
1.3.1 Facteurs naturels	12
1.3.1.1 Les facteurs géologiques	12
1.3.1.2 Les séismes	13
Facteurs géomorphologiques	13
Les facteurs climatiques	13
1.3.2 Facteurs anthropiques	14
1.4 Techniques d'évaluation des instabilités gravitaires	14
1.4 .1 Recherche sur les catastrophes antérieures et reconnaissance du site	14
1.4 .1.1 Recherche sur les catastrophes antérieures	15

1.4 .1.2	Reconnaissance du terrain	16
1.4 .2	Utilisation des images satellites pour l'interprétation des pentes instables	16
1.4.3	Utilisation de système de positionnement global «GPS»	16
1.4.4	Dendro-géomorphologie	17
1.5	Renforcements des sols	18
1.5.1	Principe de base de renforcement des sols	18
1.5.2	Les techniques et les méthodes de renforcement	19
1.5.2.1	Renforcement du sol en place	20
1.5.2.2	Renforcement des sols de remblaiement	22
1.6	Conclusion	25
Chapitre 2 : Les méthodes géophysiques appliquées en géotechnique		
2.1	Introduction	26
2.2	Généralités sur la géophysique appliquée	26
2.2.1	Définition de la géophysique	26
2.2.2	Reconnaissance géophysique	27
2.3	Déroulement d'une campagne de géophysique	27
2.3.1	Méthodes électriques en courant continu	27
2.3.1.1	La définition de la résistivité	28
2.3.1.2	Principes de mesure des méthodes électriques en courant continu	28
2.3.2	Sondage électrique Vertical	31
2.3.2.1	Principe de la méthode	31
2.3.4	Trainé électrique	31
2.3.4.1	Principe de la méthode	32
2.3.5	Le panneau électrique (profil)	32
2.3.5.1	Principe de panneau électrique (profil)	32
2.3.6	La tomographie électrique en géophysique	33
2.3.6.1	Principe de la tomographie électrique	34
2.4	Les méthodes sismiques	35
2.4.1	Principe de base des méthodes sismiques	35
2.4.2	Sismique réfraction	35
2.4.2.1	Principe de base	36
2.4.2.2	Les matériels utilisés	36
2.4.3	Sismique réflexion	37
2.4.3.1	Principe de la méthode	37

2.4.3.2 Les matériels utilisés	38
2.4.4 Les matériels utilisés La méthode "H/V bruit de fond"	38
2.4.4.1 Principe de la méthode "H/V bruit de fond"	39
2.4.5 La méthode cross hole	40
2.4.5.1 Principe de la méthode cross hole	40
2.4.6 La méthode down hole	40
2.4.6.1 Principe de la méthode down hole	40
2.5 Gravimétrie	40
2.5.1 Principe de base	41
2.5.2 Microgravimétrie	43
2.5.2.1 Principe de base	43
2.6 Méthodes électromagnétiques	44
2.6.1 Principe de base	44
2.6.2 Les différentes méthodes électromagnétiques	45
2.6.2.1 RF-EM et VLF-EM GRAD	45
2.6.3 Radio-magnétotellurique	46
2.6.3.1 Principe de la méthode	46
2.6.4 Radar géologique	48
2.6.4.1 Principe physique	48
2.7 Choix des méthodes à adopter	50
2.8 Conclusion	50
Chapitre 3 : Recherche bibliographique sur la méthode géophysique appliquées pour la caractérisation des glissements de terrain au Nord de l'Algérie	
3.1 Introduction	52
3.2 La bibliographie utilisé	52
3.3 Situation géographique des différents cas des glissements de terrain	60
3.4 Analyse par méthode	62
3.4.1 La méthode électrique	64
3.4.1.1 La tomographie électrique par résistivité	65
3.4.1.2 Sondage électrique vertical	65
3.4.1.3 Le panneau électrique(Profil)	66
3.4.2 Méthode sismique	67
3.4.2.1 La méthode du Bruit de fond (H/V)	67
3.4.2.2 Sismique réfraction	68

3.4.3 La méthode électromagnétique	68
3.5 Analyse globale et discussion	69
3.6 La combinassent entre les méthodes géophysiques	70
3.7 Conclusion	70
Conclusion Générale	71
Références bibliographiques	

Liste des Figures

Figure 1- 1: Schéma représentatif des caractéristiques d'un glissement (Andrée, Laforest and Chantal, Rouleau ., 2017)	4
Figure 1- 2: Conséquence des glissements de terrains de Constantine ((Ilham Tir, 2003).....	5
Figure 1- 3: Schéma descriptif d'un glissement translatif (plan)	6
Figure 1- 4: Glissement plan survenu dans la commune de Luc en Diois dans le département de la Drôme suite à un séisme survenu en 1442 (Glissement plan classé en 2014), (Source :Géosciences et Archéologie en Pays d'Oc) (Meziani, 2018)	6
Figure 1- 5: Schématisation d'un glissement rotationnel (surface de rupture circulaire) avec ses principales caractéristiques	7
Figure 1- 6: Glissement rotationnel d'Oso survenu à Washington, USA le 22 mars 2014.....	7
Figure 1- 7: Schéma de glissement aléatoire (quelconque)	7
Figure 1- 8: Exemple de glissement quelconque (Australie)	7
Figure 1- 9: Schéma de fluage	8
Figure 1- 10: Chutes de pierres et blocs sur la route nationale n°09 liant les deux wilayas Bejaia et Sétif devant l'hôtel Safsaf à Souk El Tenine	9
Figure 1- 11: Eboulement rocheux s'est produit, le Mardi 23 Mars 2021, sur le site de Cap Carbon, non loin de la faille du séisme qui a ébranlé Béjaïa jeudi 18 Mars 2021, sans faire de victimes	10
Figure 1- 12: Le mécanisme de l'écroulement	11
Figure 1- 13: Ecoulement (RN 11, Damous, Algérie)	11
Figure 1- 14: Processus de formation d'un effondrement (Source : Bureau de recherches géologiques et minières BRGM, 2004)	12
Figure 1- 15: L'approche dendro-géomorphologique utilisée dans la reconstitution des évènements et le suivi des mouvements de terrain (Astrade et al. 2012)	17
Figure 1- 16: Renforcement du sol en place. a) Inclusions rigides (Source: Photothèque Keller) b et c) Renforcement des fondations du grand Palais (Photothèque Solétanche Bachy).	20
Figure 1- 17: Renforcement par des inclusions rigides (Source: Bousmaha Mohammed. « Le renforcement des sols compressibles par des inclusions rigides verticales»)	20
Figure 1- 18 : Système d'inclusions rigides flottantes et ancrées	21
Figure 1- 19: Principe de fonctionnement des inclusions rigides	22
Figure 1- 20: Exemples de géosynthétiques	23
Figure 1- 21: Evolution des murs de soutènement	24

Figure 1- 22: (a)Stabilisation d'un glissement de terrain (Source:Photothèque Hueske) ;(b)Mur de soutènement à parement rigide;(c) Mur de soutènement à parement souple (Source: Photothèque Huesker)	24
Figure 1- 23 : Protection d'un réservoir de gaz par un massif de sable renforcé par des continues- Procédé Texsol(3) (Source: Photothèque J.P.Gourc)	25
Figure 2- 1: Principe de la prospection électrique par courant continu	29
Figure 2- 2: Dispositifs et facteurs géométriques associés (Loke, 2002) ³⁰ Figure 2- 3: Schéma représenté du principe du sondage électrique vertical en le dispositif e Wenner (alpha) (Beddou., 2012).	31
Figure 2- 4: Principe du panneau électrique pour la configuration Wenner- α . A, B sont les électrodes d'injection et M, N les électrodes de potentiel. A chaque couleur du dispositif de mesure (AMNB) correspond une mesure	33
Figure 2- 5: Dispositif de mesures de tomographie électrique. Sur la ligne d'acquisition, deux électrodes permettent l'injection du courant électrique, tandis qu'au minimum deux autres électrodes mesurent la différence de potentiel électrique. L'image obtenue après	34
Figure 2- 6: Principe de la méthode sismique	35
Figure 2- 7: Schéma de principe de la méthode sismique réfraction(DocumentBRGM)	36
Figure 2- 8 : Flûte Sismique. (DocumentBRGM)	37
Figure 2- 9 : Enregistreur GEODE de Geometrics (DocumentBRGM)	37
Figure 2- 10 : Enregistreur STARTAVIEW de Geometrics (DocumentBRGM)	37
Figure 2- 11: Schéma de principe de la méthode sismique réflexion (DocumentBRGM).....	38
Figure 2- 12 : Enregistreur SERCELCX 508	38
Figure 2- 13 : (Boitier Sercel 508 et flûte sismique Document SERCEL)	38
Figure 2- 14 : Géophones DSU3 (Document SERCEL)	38
Figure 2- 15 : Camion vibreur Nomad 90(Document SERCEL)	38
Figure 2- 16:anomalie de Bouguer	42
Figure 2- 17:anomalie régionale	42
Figure 2- 18: anomalie résiduelle : différence entre l'anomalie de Bouguer et l'anomalie régionale	42
Figure 2- 19: Schéma représentatif du Principe des méthodes électromagnétiques.	45
Figure 2- 20: Principe des méthodes RF-EM et VLF-EM GRAD pour la mise en évidence d'une structure conductrice verticale (Bosch, 2002)	46

Figure 2- 21: Schéma représentatif du principe de la radio-magnétotellurique : un émetteur de radiodiffusion, lointain, émet une onde électromagnétique de fréquence f (Beddou ., 2012) .47	
Figure 2- 22: Schéma représentatif du principe de la radio-magnétotellurique (Bosch and Millier., 2007)	48
Figure 2- 23: Schéma représentatif d'un exemple de radar-gramme (Gexplore., 2021). 49	
Figure.3-1 Une carte de situation géographique des différents cas des glissements de terrain	62
Figure.3-2 Histogramme représentant de pourcentage (%) des trois régions des glissements des terrains	62
Figure.3-3 Histogramme montrent le pourcentage (%) des différentes méthodes géographique	64

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Champ et propriété physique (source : INSA; modifiée) 28

Tableau 3.1: Références bibliographique sur les différentes méthodes géophysiques appliquées pour la caractérisation des glissements de terrain au Nord de l'Algérie 54

Liste des Abréviations et des symboles**Les abréviations**

CBR: Résistance au cisaillement.

GPS: Le système de position global.

RF-EM : Utilise comme source d'énergie les antennes radio dans la gamme de fréquence.

LF et VLF: Les deux gammes de fréquence.

Les symboles

I : Le courant électrique.

V: La mesure du potentiel.

ρ_a : La résistivité apparente.

K : Le facteur géométrique.

A, B, M, N: les points des distances entre les électrodes.

π : Constante d'Archimède.

P : les ondes de Love.

S : Les ondes de Rayleigh.

H/V: Bruit de fond

m : Unité de mitre

V_S: La vitesse des ondes sismique.

g_o : La gravité au point courant.

g : Gravité à la base.

C : Constante.

Z : Différence d'altitude entre le point courant et la base.

T : La correction due au relief.

d : La masse volumique des terrains de surface.

G : La constante universelle de gravitation.

VP: Les vitesses des ondes de compression.

VS: Les ondes de cisaillement.

σ : La contrainte.

f_c : La fréquence par la conductivité.

C : est la conductivité du terrain.

ϵ : La permittivité du terrain.

ρ : la résistivité.

p : Profondeur de pénétration.

V: Vitesse de l'onde électromagnétique.

C: Célérité de la lumière dans le vide.

ϵ_r : Permittivité relative.

INTRODUCTION GENERALE

Les instabilités gravitaires sont des phénomènes géologiques présents dans plusieurs régions du monde. Ils constituent un grand danger pour les populations, à cause du dommage qu'ils peuvent engendrer qui peuvent toucher aux biens et provoquer dans certains cas des catastrophes. Ces phénomènes sont très variés en Algérie et par leur nature (glissements de terrains, fluage, écroulements et éboulements, coulées de boues, Chutes de pierres et de blocs, effondrements de vides souterrains, gonflement ou retrait des sols, ...) (**Bougdal et al., 2013 ; Bourenane et al., 2016 ; Meziani et al., 2019**). Ils sont difficilement prévisibles, et en particulier les glissements de terrains sont parmi les mouvements de masse les plus spectaculaires et les plus fréquents.

L'impact de ces phénomènes affectant les pentes naturelles ou artificielles (déblais et remblais), généralement causés par de fortes pluies, érosion de berge, séisme, etc., ou sous l'action de l'homme, tels les travaux de terrassements ou la déforestation (**Dikau., 1996 ; Martins-Campina., 2005 ; Djerbal L et Melbouci B., 2012 ; Ciabatta et al ., 2016**),. À travers cela, l'un des devoirs de l'ingénieur géologue et du géotechnicien est de s'assurer de la stabilité d'une pente ou d'un talus pour prévenir d'éventuels dégâts (D'une façon générale, il est nécessaire d'effectuer une étude approfondie et une recherche permettant l'évaluation de la stabilité des glissements de terrain.

❖ Objectif de travail

Le travail présenté dans ce mémoire est d'intérêt pour savoir la meilleure méthode géophysique appliquée pour bien caractériser et évaluer le glissement de terrain en Algérie, cas des glissements du Nord de l'Algérie.

❖ Plan de travail

Le travail que nous présentons s'est effectué suivant le plan ci-après :

- Introduction générale ;

✓ Le premier chapitre

Il consiste à établir une synthèse sur les instabilités gravitaires où nous avons pris des initiatives pour faire une approche théorique (terminologie, classification, facteur, processus et évaluation) et pratique pour mieux comprendre ce phénomène naturel. Nous présentons un

bref aperçu sur les différents types de glissements. Par ailleurs, nous avons introduit des études de cas pour chaque type d'instabilité.

✓ **Le deuxième chapitre**

Dans ce chapitre on a présenté la théorie qu'elle relie aux différentes méthodes géophysiques utilisées pour effectuer l'étude géotechnique.

✓ **Le troisième chapitre**

Pour cela, Nous présentons un état de l'art sur les applications des méthodes géophysiques de surface aux glissements de terrain à la caractérisation au Nord de l'Algérie et se concentre sur des articles.

Enfin, ce travail de thèse va se terminer par des conclusions générales en rappelant les principaux résultats obtenus ainsi que les recommandations et les perspectives pour de futurs travaux de recherche.

Chapitre 1

Généralités sur les instabilités gravitaires

1.1 Introduction

Les instabilités gravitaires regroupent un ensemble de déplacements, plus ou moins brutaux du sol ou du sous-sol, sous l'effet d'influence naturelle (agent d'érosion, pesanteur, tremblement de terre, etc.) ou anthropique (exploitation, déforestation, terrassement, etc.). Ce phénomène comprend divers manifestations : lentes et rapides, selon les mécanismes initiateurs, les matériaux considérés et leur structure (**Fella and Ammar., 2015**).

En effet, la morphologie du Nord Algérien, caractérisée principalement par des montagnes de pentes raides et abruptes, donne souvent lieu à des mouvements de terrains d'intensité variable. Les cas de troubles liés à ce hasard sont de plus en plus nombreux et leurs conséquences des plus en plus lourdes. Il existe divers types de mouvements gravitaires : glissements, fluage, écroulements, éboulements, effondrements, affaissements, etc. (**Bouaziz and Melbouci., 2014**).

L'objectif de ce chapitre est de définir en premier lieu les différents types des instabilités gravitaires selon leur vitesse et selon la morphologie de leur surface de rupture, d'envisager en second lieu les principales causes (les facteurs) qui peuvent mobiliser les instabilités gravitaires et de citer en dernier lieu les différentes techniques d'évaluation des instabilités gravitaires et les techniques et les méthodes de renforcement.

1.2 Les type des instabilités gravitaires

On regroupe sous l'appellation de "**instabilité gravitaire**" tous phénomènes affectant une masse de sols ou roches et le faire déplacer d'un état à un autre d'une manière lente et superficielle qui se résulte de l'effet des actions de gravité, l'alternance de "**gel/dégel** ", ou d'une manière rapide et profonde résultant de l'érosion favorisée par l'action de l'eau et de l'homme c'est pour cela qu'il y a une multitude de mouvement de terrain (**Aissa Mohamed and Haddouche., 2011**).

Il existe de nombreuses classifications des instabilités gravitaires ; Selon la vitesse de déplacement, deux ensembles peuvent être distingués :les mouvements lents et les mouvements rapides. Seuls les instabilités rapides sont directement dangereuses pour l'homme. Leurs conséquences sont d'autant plus graves que les masses déplacées sont importantes. Les conséquences des mouvements lents sont essentiellement socioéconomiques

ou d'intérêt public (Aissa Mohamed and Haddouche., 2011).

1.2.1 Les glissements

Un glissement de terrain est un déplacement généralement lent d'une masse de terrain cohérente le long d'une surface de rupture, (**Fig.1-1**) Cette surface a une profondeur qui varie de l'ordre du mètre à quelques dizaines de mètres voire quelques centaines de mètres dans des cas exceptionnels. Les vitesses de glissement du terrain restent variables mais peuvent atteindre décimètre par an. Lorsqu'il y a une rupture, les terrains peuvent glisser rapidement, surtout lorsqu'ils sont saturés en eau (**Florence., 2011**).



Figure .1- 1: Schéma représentatif des caractéristiques d'un glissement (Andrée and Chantal., 2017).

Ce type d'instabilité gravitaire se produit par exemple dans la région de Constantine, qu'elle est située dans un environnement géomorphologique complexe sur un des plus important axes sismique de Nord-Est Algérien. L'instabilité de terrain à Constantine a commencé à se manifester pour la première fois au début du 20ème siècle pendant et surtout après l'aménagement accru de la ville et la construction d'ouvrages d'art exemple du pont 'Sidi Rachad' dans la partie orientale. Depuis, la ville et ses environs n'ont cessé de connaître des dégradations (glissement de terrain et autres), qui ont touchées les quartiers les plus connus : La manifestation la plus récente qui a touché le quartier Aouinet El-Foul, date de 1972, année durant laquelle des désordres importants avaient affectés tout le quartier de KITOUNI. Après cette date et particulièrement depuis quelques années, la région de Constantine subie des modifications dans les plans d'aménagement hasardeux sur des terrains ne supportent plus les surcharges, (**fig.1-2**) (**Tir., 2003**).



Figure 1- 2 : Conséquence des glissements de terrains de Constantine (Tir., 2003).

Il existe des glissements de terrain de formes variées. Cette différence variété de forme est faite selon la forme de la surface de rupture et la nature des matériaux constituant le talus. En se basant sur la surface de rupture, distinguent trois principaux types de glissements (Robitaille and Tremblay., 1997).

1.2.1.1 Glissement translatif (plan)

En général, la ligne de rupture suit une couche mince ayant de mauvaises caractéristiques mécaniques, et sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée couche savon, (Fig.1-3) (Khelil and Senad, 2014).

Ce type de glissement se produit par exemple dans des roches de types marno-calcaire, où les bancs de calcaires solides pourront glisser sur les niveaux marneux tendres faisant office de plan de glissement. On cite par exemple le glissement plan survenu dans la commune de Luc en Diois dans le département de la Drôme suite à un séisme survenu en 1442 (Glissement plan classé en 2014) (Fig.1-4).

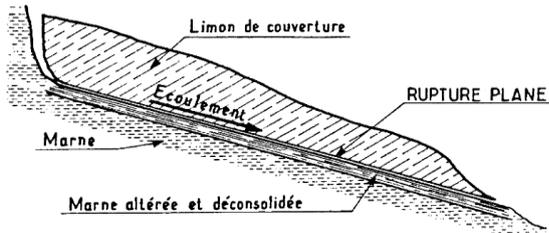


Figure 1- 3: Schéma descriptif d'un glissement translatif (plan)



Figure 1- 4: Glissement plan survenu dans la commune de Luc en Diois dans le département de la Drôme suite à un séisme survenu en 1442 (Glissement plan classé en 2014), (Source : Géosciences et Archéologie en Pays d'Oc) (Meziani, 2018).

1.2.1.2 Glissement rotationnel (circulaire)

Le glissement rotationnel est caractérisé par une surface de rupture de forme circulaire qui peut se propager à quelques mètres de profondeur, (Fig.1-5). Il est très souvent causé par l'érosion naturelle d'un cours d'eau à la base d'un talus. L'action de l'eau à la base des talus a ainsi pour effet d'entraîner de façon graduelle du matériel qui agit comme contre poids naturel. Petit à petit, cette érosion modifie les conditions d'équilibre de la pente. Ce type de glissement peut affecter une bande de terrain située au sommet du talus, dont le recul est généralement inférieur à une distance équivalant à une fois la hauteur du talus. Lors d'un glissement rotationnel, les éléments situés dans la bande de terrain en sommet de talus (routes, bâtiments, infrastructures, etc.) peuvent subir des dommages dont l'importance peut varier selon les situations (Andrée and Chantal., 2017). En outre, un cas réel d'un glissement rotationnel est survenu à l'Oso qui est un village de l'État de Washington aux Etats-Unis d'Amérique (Fig.1-5), du 22 mars 2014. Une étude d'expertise a été effectuée pour comprendre les mécanismes à l'œuvre pendant la phase d'étalement après que les roches se soient détachées de la pente, reste aujourd'hui encore un problème très largement ouvert. La variabilité des contextes géologiques, des matériaux impliqués ou encore des mécanismes de déclenchement rend difficile la prédiction et la compréhension des instabilités gravitaires. À titre d'exemple, il n'existe toujours pas de consensus sur la transition statique/fluide propre aux milieux granulaires, c'est-à-dire sur le moment où la rupture se fait et où les éboulis peuvent être assimilés à un fluide (Andréeand Chantal., 2017).

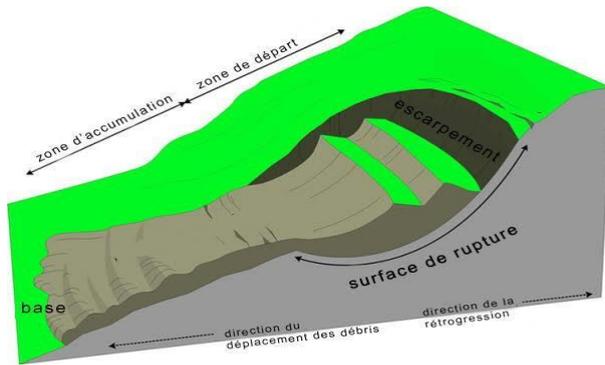


Figure 1- 5: Schématisation d'un glissement rotationnel (surface de rupture circulaire) avec ses principales caractéristiques.



Figure 1- 6: Glissement rotationnel d'Oso survenu à Washington, USA le 22 mars 2014.

1.2.1.3 Glissement aléatoire (quelconque)

Ce type de glissement est très semblable au précédent dans son allure externe, mais la section verticale de la surface de glissement est de forme irrégulière (Fig.1-7) et (Figure1-8). Il s'agit souvent d'une combinaison des deux cas précédents (BRGM, 2004). Les ruptures selon un plan de cisaillement aléatoire sont généralement causées par un mouvement de translation et se développent dans les dépôts hétérogènes. Le plus souvent, le plan de cisaillement rejoint une couche de faible résistance (Boudlal., 2013).

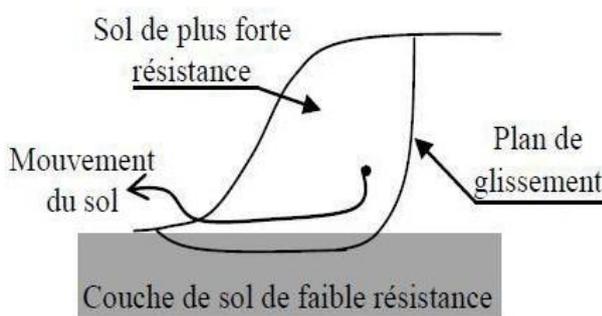


Figure 1- 7:Schéma de glissement aléatoire (quelconque)



Figure 1- 8:Exemple de glissement quelconque(Australie).

1.2.2 Fluage

Le fluage est caractérisé par des mouvements lents et continus, mais à des vitesses faibles. Dans le cas de fluage, il est difficile de mettre en évidence une surface de rupture. Le mouvement se produit généralement sans modification des efforts appliqués (contrairement aux glissements) : en fait, le matériau plus est sollicité à un état proche de la rupture. Ce type de mouvement peut : soit se stabiliser, soit évoluer vers une rupture, (Benouis., 2010) (Fig.1-9).

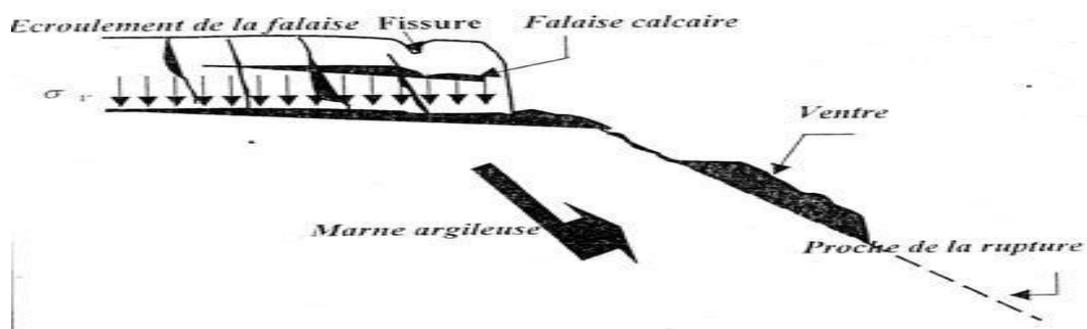


Figure 1- 9 : Schéma de fluage

1.2.3 Ecoulements et Eboulements

Les éboulements au sens large (phénomènes de chute) sont des mouvements rapides de masses (Fig.1-10) (Benouis., 2010). Le matériel éboulé, qui s'est détaché du massif rocheux selon des surfaces de discontinuité (pendage, schistosité, fissures ou fractures), parcourt la plus grande partie de son déplacement dans l'air. Ces phénomènes peuvent être classés en trois catégories : chutes de pierres et de blocs, éboulements (au sens strict) et écroulements. En général, on peut les subdiviser en trois domaines : la zone d'arrachement, la zone de transit et la zone de dépôt (Benouis.,2010).

1.2.3.1 Chutes de pierres et de blocs

Les chutes de pierres et de blocs sont caractérisées par la chute sporadique de blocs plus ou moins isolés (pierre : $\emptyset < 50\text{cm}$; bloc : $\emptyset > 50\text{cm}$).

Ce processus, répété ou soumis à des pointes saisonnières, caractérise la désagrégation continue d'une falaise rocheuse, déterminée par ses conditions géologiques, son exposition et son altération. L'estimation du volume des matériaux rocheux qui présente un danger potentiel de chute n'est possible qu'au moyen d'études détaillées de la roche (Benouis., 2010).



Figure 1- 10: Chutes de pierres et blocs sur la route nationale n°09 liant les deux wilayas Bejaia et Sétif devant l'hôtel Safsaf à Souk El Tenine.

1.2.3.2 Eboulement

Ce sont des phénomènes rapides et brutaux qui mobilisent des blocs de roches plus ou moins homogènes. Ils consistent en la chute libre ou le roulement au départ, après rupture, de blocs formés par fragmentation, le mouvement pouvant ensuite se poursuivre par une série de rebonds de hauteur décroissante (dans le cas d'une pente régulière). L'ampleur du phénomène est liée à la quantité et au volume de blocs mobilisables et à la surface et la topographie de l'aire de réception des blocs éboulés.

Ces phénomènes affectent des roches rigides et fracturées tels que calcaire, grès, roches cristallines etc. Dans le cas des roches sédimentaires, la stratification accroît le découpage de la roche et donc les prédispositions à l'instabilité (présence d'une formation sous-jacente plus meuble, déformable ou érodable).

Un éboulement est défini comme étant une chute de terre, des rochers.

Il y a un éboulement lorsque des rochers se détachent d'une montagne et glissent, déboulent le long de la pente. Les rochers roulent vers le bas à une très grande vitesse Les éboulements peuvent dévaler les montagnes très rapidement: Jusqu'à 360 km/h, soit à peu près la vitesse d'une voiture en une très grande vitesse (Changwi., 2012) (Fig.1-11).



Figure 1- 11: Eboulement rocheux s’est produit, le Mardi 23 Mars 2021, sur le site de Cap Carbone, non loin de la faille du séisme qui a ébranlé Béjaïa jeudi 18 Mars 2021, sans faire de victimes.

1.2.3.3 Ecoulement

Ce sont des chutes soudaines (quelques secondes) de masses rocheuses importantes. L’écroulement types est représenté par l’effondrement d’un pan de falaise vertical pour venir former au pied du versant des nappes de matériaux grossiers, nappes pouvant s’étendre sur plusieurs kilomètres.

L’existence d’une surface de faiblesse permettant le départ et limitant la masse de l’écroulement ne fait aucun doute de même que la forte déformation du matériau. Ceci se traduit par une zone de départ bien visible (roche de couleur différente du reste du versant) correspondant en général à des fissures préexistantes et un chaos de bloc de toutes tailles s’accumulant au pied du versant. Les matériaux sont beaucoup plus gros que les éboulis.

Les terrains donnant lieu à des écroulements sont exclusivement les roches massives pouvant former de hautes falaises (calcaire, roches cristallines et cristallophylliennes).

Les vitesses des écroulements sont très rapides, tous au moins dans les phases de rupture. Bien qu’aucun écroulements n’ait été mesuré avant la rupture, il est logique de penser que la vitesse d’ouverture des fissures doit être d’abord faible et constante puis tout à coup de façon beaucoup plus rapide que les matériaux donnant lieu à des écroulements sont en moyenne plus fragiles(dans leurs conditions naturelles)que ceux des glissements, **(Fig.1-12) (Benaissaa.,2008)**.

Un exemple de ce phénomène représenté sur la **figure. 1- 13** d'un cas d'étude d'un écoulement au niveau de la route national **RN11** à la commune de Damous (**Benyahia et al. 2010**).

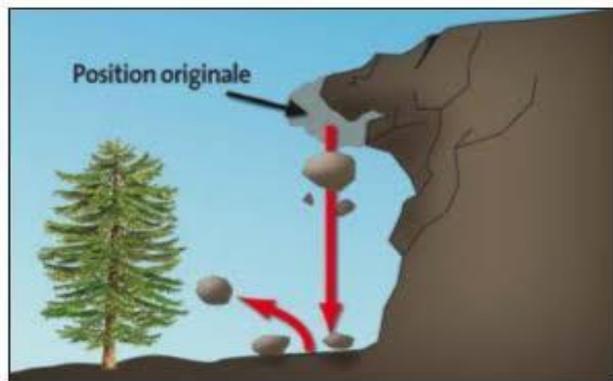


Figure 1- 12: Le mécanisme de l'écroulement



Figure 1- 13: Ecoulement (RN 11, Damous, Algérie)

1.2.4 Les effondrements

Les effondrements, se produisent de façon brutale. Ils résultent de la rupture des appuis ou du toit d'une cavité souterraine, rupture qui se propage jusqu'en surface de manière plus ou moins brutale, et qui détermine l'ouverture d'une excavation grossièrement cylindrique. Les dimensions de cette excavation dépendent des conditions géologiques, de la taille et de la profondeur de la cavité ainsi que du mode de rupture. Le phénomène peut être ponctuel (fontis, diamètre inférieur à 50 m, occasionnellement 100m) ou généralisé (plusieurs hectares).

La présence d'un banc raide dans les terrains recouvrant la cavité favorise les effondrements généralisés. Selon la profondeur de l'effondrement, un glissement de ses flancs peut se produire après l'événement, (**Fig.1-14**) (**ORRM, 2018**).

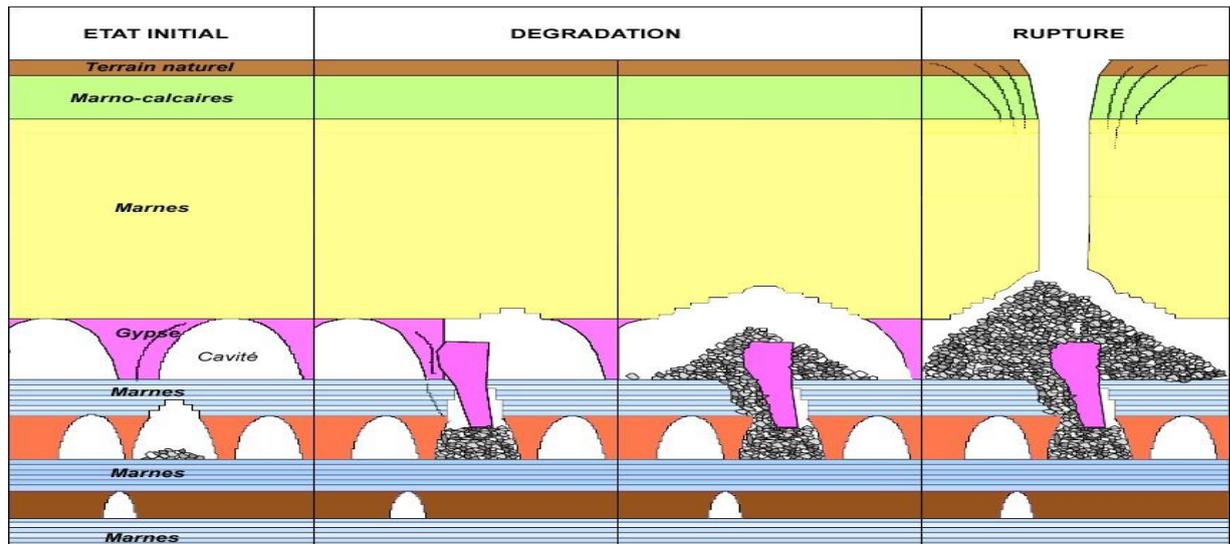


Figure 1- 14 : Processus de formation d'un effondrement (Source : Bureau de recherches géologiques et minières BRGM, 2004).

1.3 Facteurs et causes des instabilités gravitaires

Les instabilités gravitaires sont des phénomènes complexes, ils sont influencés par deux catégories des facteurs qui ont été proposées par des géologues, des mécaniciens ou des géotechniciens :

- Les facteurs naturels ;
- Les facteurs anthropiques.

1.3.1 Facteurs naturels

Généralement faciles à évaluer, on distingue :

1.3.1.1 Les facteurs géologiques

Les facteurs géologiques sont souvent intrinsèques aux massifs de sols ou de roches, ils affectent sa stabilité mais aussi sa résistance à la dégradation en fonction de la présence de matériaux fragiles, altérés, cisailés ou fissurés qui se nomment matériaux favorables à la rupture. L'altération est un processus lent qui dégrade les matériaux. La raison première de cette altération est les conditions climatiques en particulier le rôle de l'eau sous toutes se

formes. Par exemple, la production d'argile d'altération dans un massif rocheux a un impact négatif sur la stabilité de celui-ci (Pollet., 2004).

1.3.1.2 Les séismes

La stabilité d'un massif est fonction du rapport des forces stabilisatrices sur les forces déstabilisatrices. Rappelons, qu'en cas de séisme, il se produit une émission d'ondes sismiques ou ondes élastiques de deux types qui se propagent dans le sol : les ondes de volume dites ondes longitudinales et transversales et les ondes de surface dites ondes de Love et de Rayleigh. Ces ondes sismiques provoquent une sollicitation dynamique supplémentaire (Durville and SEVE., 1996 ; Durville., 2000). L'équilibre des forces est ainsi modifié, ce qui peut conduire à des mouvements de terrain. Les déstabilisations dues aux séismes peuvent se manifester de différentes façons. Elles peuvent provoquer immédiatement des glissements de terrain, des coulées, des chutes de blocs et d'importantes dégradations des infrastructures à cause de la thixotropie des sols. Cette déstabilisation peut aussi avoir des effets à plus long terme, par augmentation de la fissuration du massif rocheux et diminution de sa résistance mécanique. De plus, les fissures agrandies tendent à plus long terme à augmenter l'infiltration de l'eau dans le massif, à favoriser l'éclatement du matériau à partir des cycles de gel-dégel et, ainsi aboutir à la rupture du massif.

Facteurs géomorphologiques

La stabilité d'un versant montagneux est liée d'une part, à la nature géologique des formations le constituant et d'autre part, à sa morphologie (pente, escarpement.). En effet, il existe de nombreux éléments qui interviennent dans la modification de la morphologie d'un versant (érosion torrentielle, érosion glaciaire, érosion météorique, facteurs anthropiques,...). Par exemple, l'érosion glaciaire crée, dans un premier temps, des auges glaciaires qui favorisent l'augmentation de la pente et dans un deuxième temps engendre une diminution de la butée en pied de versant (Bruno M., 2005).

Les facteurs climatiques

La pluie, la neige, le gel, le vent sont des facteurs variables et incontrôlables pouvant déclencher ou accélérer le processus glissement de terrain par l'effet de l'érosion, altération du sol ou de la roche, circulation d'eau en surface, augmentation de la pression interstitielle, arrachement des arbres...) (Djerbal ., 2010).

Les facteurs de végétations

La couverture végétale joue un rôle très important dans la stabilité des talus qui peut être favorable (les racines augmentent la cohésion du sol), ou défavorable (l'effet du vent sur les arbres qui constitue un effort moteur, l'effet de levier qui peut arracher les arbres et laisser des vides dans le sol, l'érosion de la roche...), de plus, elle peut nous renseigner sur la position de la nappe (Djerbal., 2010).

1.3.2 Facteurs anthropiques

L'homme par ses nombreuses interventions lors de travaux d'aménagement, intervient surtout dans la modification morphologique du massif rocheux et des conditions hydrauliques initiales. Le cas le plus fréquent est l'excavation de la butée du massif lors de la construction d'une route et la modification des circulations d'eau par la construction d'un mur de soutènement (Chamley., 2002).

1.4 Techniques d'évaluation des instabilités gravitaires

Le processus d'un aléa est un processus physique impliquant l'occurrence temporelle d'événements ponctuels, l'intervalle de temps entre les événements étant généralement irrégulier (Dewitte, 2006). Il est très nécessaire d'évaluer le niveau d'aléas géologiques et climatiques vis-à-vis de grands risques des mouvements de terrain du fait qu'ils ont tous au moins une cause d'activation ou de réactivation d'un glissement de terrain (Crovelli.,2000). Par conséquent, vu les risques qui peuvent être causés par les mouvements de terrains dans différentes régions du territoire national (Algérie), plusieurs chercheurs ont mis en évidence l'étude de ces risques (ex. Bougdal et al. 2006 ; Djerbal and Melbouci 2012 ; Bougdal et al.2013 ; Guirous and Dubois 2014 ; Bourenane et al, 2015, 2016 ; Meziani et al, 2017). Afin de diminuer les risques associés aux mouvements de terrain, il est bien évident de l'évaluer avant le déclenchement de ces mouvements (lieu, étendu, volume, menace ...etc.).

1.4.1 Recherche sur les catastrophes antérieures et reconnaissance du site

La première étape consiste en une recherche sur les catastrophes antérieures et une reconnaissance de terrain pour essayer de déceler tous les indices pouvant nous renseigner sur l'existence d'instabilités antérieures (arbres penchés ou tordus, poteaux inclinés, fissures dans le sol et les structures, bourrelets...). Pour cela on doit essayer de récolter le maximum

d'informations et de documents concernant le site étudié (les dossiers géotechniques précédents, les levés topographiques...)

1.4 .1.1 Recherche sur les catastrophes antérieures

- Les cartes topographiques

Elles nous permettent de connaître toutes les actions naturelles et humaines exécutées sur la surface du versant (l'altération, l'érosion, les déblais, les remblais...) ; donc ces dernières peuvent être utilisées afin d'identifier les différentes formes géomorphologiques, hydrologiques, et les pentes du terrain.

- Les cartes géologiques

Elles peuvent être utilisées pour acquérir des informations sur les structures géologiques et les matériaux du site. Les informations géologiques nécessaires pour l'étude et l'évaluation des glissements de terrain que doit comporter une carte géologique peuvent se résumer ainsi : les discontinuités structurales, les failles et les fissures, pendages et directions des différentes couches géologiques, la nature des couches...

- Les documents sur le glissement

Il est très utile de réunir tous les documents disponibles concernant le site étudié car ils peuvent nous renseigner sur les mouvements de terrain antérieurs, on peut aussi avoir les détails des instabilités particulières qu'a connu le site, de plus, les informations collectées sur les anciens glissements peuvent être compilées sous forme d'inventaire (cartes d'aléas) donnant l'emplacement, le temps, le type, l'étendue, et l'intensité du glissement de terrain...

- Enregistrement des précipitations (pluviométrie)

A partir des documents de pluviométrie récoltés, on peut établir des corrélations entre la quantité de précipitation (journalière ou mensuelle...) et l'apparition des instabilités (glissements de terrain). Les études effectuées sur l'activité des glissements de terrain anciens et l'historique des précipitations (journalières par exemple) peuvent être exploités afin de déterminer les seuils de précipitation qui peuvent déclencher les différentes instabilités.

Il est utile de prendre aussi en considération les fréquences des événements importants qui se sont produits dans la région tels que les séismes, les ouragans, les inondations...

1.4 .1.2 Reconnaissance du terrain

En premier lieu on doit effectuer un examen visuel complet afin de déceler les indices de mouvements antérieurs et en cours d'activité. Les objectifs de cette reconnaissance consistent à vérifier et modifier les informations rassemblés dans la première phase (recherche des catastrophes antérieures) ; ensuite on doit opter pour une étude approfondie (reconnaissance géologique et topographique, étude de la végétation).

A partir de ces études on peut réaliser des cartes de risque de glissement de terrain.

1.4 .2 Utilisation des images satellites pour l'interprétation des pentes instables

C'est une méthode indirecte d'évaluation et de localisation des zones susceptibles aux glissements de terrain, les images satellites peuvent être utilisées dans l'étude de la structure géologique et hydrologique des versants, les données fournies par ces images constituent un moyen de localisation et d'évaluation des zones instables (zones de risques de glissements de terrain). Ces images sont utilisées pour lire la topographie du terrain, comme pour les photographies aériennes, par des images strioscopiques, de plus, les données multi spectrales fournissent des informations sur la température du sol, l'étude des couleurs, et nous permettons d'avoir la distribution de l'eau souterraine et des eaux superficielles, l'état de la végétation, les fissures.... Ainsi de toutes ces informations, on peut évaluer le potentiel du risque de glissement de terrain étudié.

De plus, le fait que les satellites peuvent contrôler la surface de la terre continuellement nous permet d'avoir des images des zones étudiées à n'importe quel moment et continuellement, ce qui nous permet donc de contrôler et d'évaluer l'évolution du mouvement de terrain, d'évaluer le changement du potentiel du risque, et d'identifier des zones instables non identifiées antérieurement. Cependant ces images peuvent être utilisées uniquement pour lire des topographies de glissements de terrain à grande échelle (**Comité technique AIPCR des terrassements.1997**).

1.4.3 Utilisation de système de positionnement global « GPS»

Le système de position global (Global Position System ; **GPS**) est une technique qu'il est utilisé pour la surveillance en continu des mouvements de terrain (**Malet et al. 2000 ; Malet et al. 2002 ; Yi et al. 2017**).

L'utilisation du GPS pour le suivi des mouvements de terrain offre un avantage plus important car il délivre un positionnement tridimensionnel de précision infra-kilomètre, ce qui améliore la précision des mesures.

1.4.4 Dendro-géomorphologie

La Dendro-géomorphologie permet d'utiliser les arbres comme marqueurs de l'instabilité du milieu par interprétation des modifications de croissance des individus (Schweingruber 1993 ; Fantucci and Mccord 1995 ; Fantucci and Sorriso-valvo 1999 ; Bachand 2010). Par ailleurs, Astrade et al. (2012) ont rapporté que la dendro-géomorphologie repose sur le concept de "Processus/Événement/Réponse" défini par Shroder (1980) qui, suite aux applications et aux développements récents (présentés dans cet article), peut être décliné en "Événement-Changement/Impact/Réponse », (Fig.1-15).

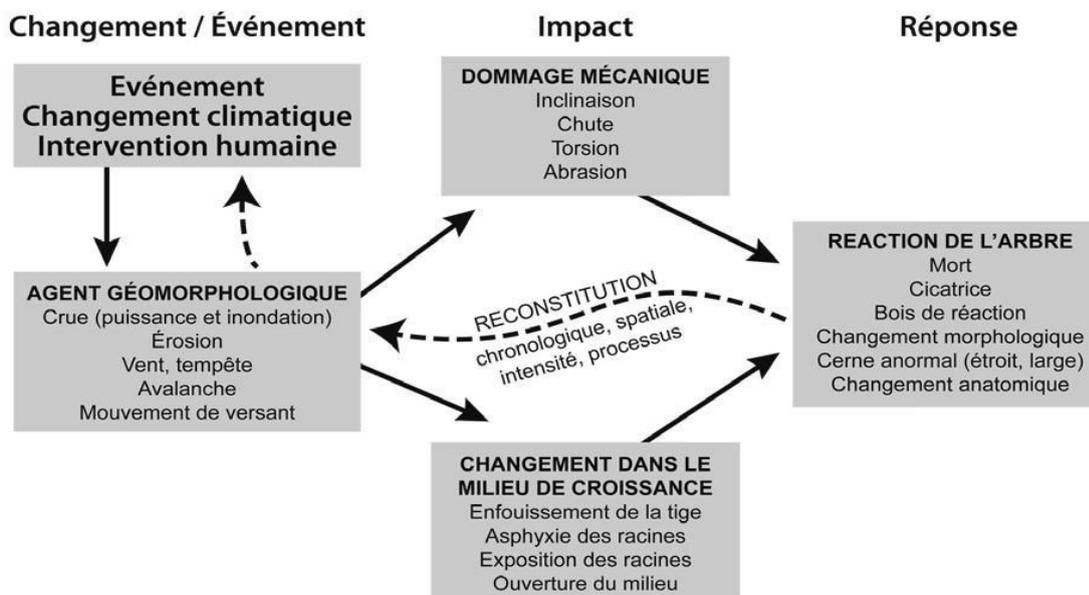


Figure 1- 15 : L'approche dendro-géomorphologique utilisée dans la reconstitution des évènements et le suivi des mouvements de terrain (Astrade et al. 2012).

L'Événement-Changement" regroupe les processus géomorphologiques (lave torrentielle, chute de pierre, avalanche, glissement de terrain, crue, tempête), et les changements naturels et/ou anthropiques du milieu suffisamment rapides et irréversibles à l'échelle de quelques années (érosion, sédimentation, mise en eau, intervention humaine, etc.).

L'Impact" correspond aux perturbations subies par l'arbre au moment où le processus ou le changement l'affecte. Il peut induire des dommages mécaniques directs (basculement, chute, torsion, abrasion, éêtage) et/ou une perturbation physique du milieu (sédimentation du tronc, asphyxie ou exposition des racines, ouverture du milieu, etc.). Le stress (mais aussi parfois l'amélioration des conditions de croissance) entraîne, à partir d'un certain seuil, une « Réponse » de l'arbre. Lorsque le stress est trop violent, il occasionne la mort de l'arbre. En cas de survie, les réponses peuvent concerner la croissance radiale de l'arbre (cerne ou série de cernes anormalement étroits ou larges), sa morphologie (cicatrice, reprise de croissance apicale, changement d'axe, courbure, racine adventive) ou son anatomie (formation de bois de réaction, de rangées tangentielles de canaux résinifères traumatiques, modifications de la structure cellulaire). L'identification de ces dommages et leur datation à partir des cernes permettent de reconstituer (Fig.1-15).

- La chronologie des événements ou des changements avec une précision annuelle (grâce aux cernes) à mensuelle (via l'étude de la position de marqueurs anatomiques à l'intérieur du cerne). Pour valider les résultats, les données peuvent être comparées aux archives historiques et aux données météorologiques (Stoffel et al., 2005 ; Stoffel., 2008 ; Corona et al.,2010).
- L'intensité (le processus doit dépasser un certain seuil pour entraîner un stress et une réponse);
- L'emprise délimitée en fonction de la répartition des arbres qui présentent une réponse ;
- Le type de processus déterminé grâce à la position de marqueurs anatomiques dans le cerne (parce biais, les processus d'origine torrentielle, qui se produisent plutôt pendant la période végétative, ont par exemple pu être distingués des processus avalancheux qui ont lieu pendant la période de dormance) ;(Szymczak et al ., 2010).

1.5 Renforcements des sols

1.5.1 Principe de base de renforcement des sols

Une structure en sol renforcé consiste en l'introduction d'éléments résistants à la traction correctement orientés, ce qui augmente la résistance du sol et diminue la déformation du massif. Dans cette méthode, le comportement global du massif est amélioré par la

transformation des efforts aux éléments résistants (renforts). Les sols ont généralement une haute résistance à la compression, mais une faible résistance à des contraintes de traction. Quand une masse de sol est chargée à la verticale, elle subit une déformation de compression et une déformation latérale verticale (traction) avec tout ce qui précède, si la masse de terre a été renforcée, les mouvements latéraux seront limités par la raideur du renfort. Cette restriction de déformation est obtenue par la résistance à la traction des éléments de renforcement (DJABRI., 2017).

1.5.2 Les techniques et les méthodes de renforcement

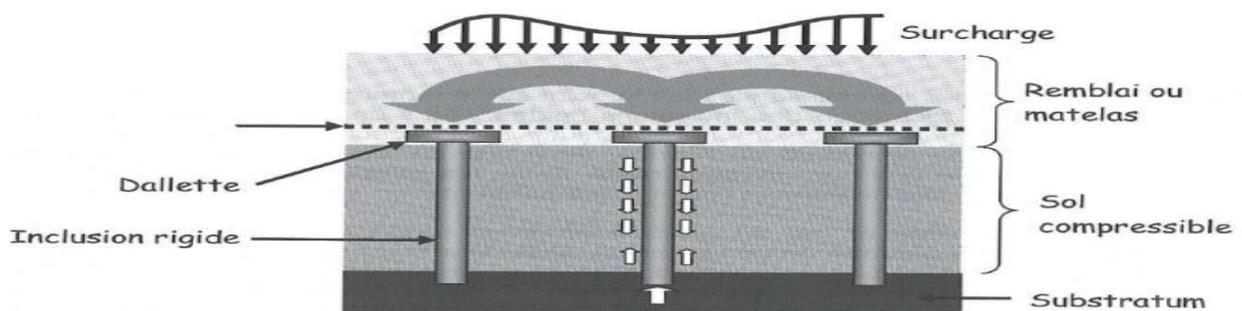
Suivant le type de sol considéré et le type d'ouvrage à réaliser, il convient de retenir **une solution de renforcement adaptée** qui s'accorde à la fois à la nature du sol en place et à son environnement. Le problème reste d'une grande complexité comme en témoigne les vestiges du passé (tour de Pise par exemple). **Deux techniques majeures** peuvent être utilisées pour accroître les caractéristiques mécaniques des sols : par **la modification de la structure interne du sol** en place et **le renforcement du sol** par ajout d'inclusions. Plus spécifiquement, les techniques d'amélioration des sols permettent d'accroître la compacité du sol en place, soit en réduisant le volume des vides, par exemple en appliquant une surcharge sur un sol saturé et en le laissant tasser par expulsion de l'eau en surpression, on parle dans ce cas de consolidation des sols, soit en imposant des vibrations dans le sol pour qu'il se densifie par réarrangement des grains (compactage dynamique). Les techniques de renforcement des sols proprement dites font intervenir des éléments de renfort verticaux ou horizontaux dans le sol. L'objectif de toutes ces techniques est de permettre la construction d'un ouvrage sans qu'il n'y ait de déformations excessives en surface ou des défauts de stabilité.

De tout temps les techniques de renforcement des sols ont été utilisées, que ce soit pour renforcer les sols en place (Fig.1-17) par **l'ajout d'inclusions** verticales battues ou foncées dans le sol, ou pour réaliser des massifs de soutènement (Fig.1-18) par utilisation de sols remaniés et renforcés par **des armatures horizontales** (bandes, nappes, structures alvéolaires, etc.) ou par des fibres courtes ou continues (Villard and Briancon., 2018).



Figure 1- 16: Renforcement du sol en place. a) Inclusions rigides (Source: Photothèque Keller) b et c) Renforcement des fondations du grand Palais (Photothèque Solétanche Bachy).

Figure 1- 17 : Renforcement par des inclusions rigides (Source : Bousmaha Mohammed. « Le



renforcement des sols compressibles par des inclusions rigides verticales »).

1.5.2.1 Renforcement du sol en place

Les plus anciennes techniques de renforcement des sols en place reposent sur l'utilisation de pieux en bois destinés à répartir ou à transmettre la charge apportée par l'ouvrage vers des zones de sols plus étendues ou plus résistantes. En France, des fouilles à proximité du village de Benais (Indre-et-Loire) ont permis de relever au travers d'une vallée humide, et sur une longueur d'environ 200 m, les vestiges d'une chaussée romaine datant de l'an 8 avant J.C. L'assise carrossable était faite d'un empierrement de « perrons » (pierres siliceuses) épais d'une trentaine de centimètres. Les pierres étaient disposées de chant, et entre celles-ci, des pieux profondément enfouis dans le substrat sableux ont été utilisés. Au total 27 pieux ont pu être dénombrés, dont certains étaient encore associés à l'empierrement. Ces pieux de chêne mesuraient en moyenne 1 m de long et 30 cm de diamètre. Leur pointe avait été biseautée afin de faciliter leur enfoncement. Il a même été retrouvé une concentration de 3 alignements de 2 pieux, espacés les uns des autres de 1,60 m à 1,70 m, qui témoigne des pratiques innovatrices de l'époque concernant l'emploi d'éléments verticaux rigides, fichés dans le sol selon un espacement régulier, et associé à une couche d'empierrement subjacente permettant une redistribution des charges appliquées à la chaussée sur la tête des éléments verticaux d'une part et sur le sol entre ceux-ci d'autre part. Cet exemple illustre le principe

actuel de tous les ouvrages sur sol renforcé associant un réseau régulier d'inclusions rigides verticales et une couche granulaire horizontale formant le matelas de répartition (Villard and Briancon., 2018).

Suivant l'épaisseur de la zone de sol compressible concernée, les pieux peuvent être soit ancrés en pied dans une couche de sol résistante lorsque l'épaisseur de sol de qualité médiocre est faible, auquel cas les efforts en tête de pieu sont directement transmis via le pieu vers la zone stable (pieux ancrés), soit de longueur suffisante pour transmettre par frottement sur toute sa longueur l'intégralité des charges appliquées en tête du pieu par l'ouvrage (Villard and Briancon., 2018)(Fig.1-18).

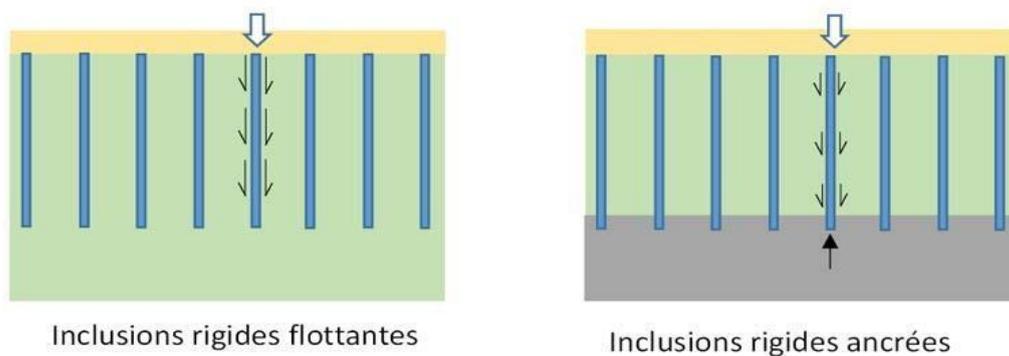


Figure 1- 18 : Système d'inclusions rigides flottantes et ancrées.

Ces techniques de base ont évolué vers de nombreuses variantes qui ont toutes comme objectif de réduire sensiblement les tassements de surface du sol en place, telles que :

- a. Inclusions rigides de béton, réalisées en insérant dans le sol une tarière refoulant (par rotation ouvibrofonçage) jusqu'à la couche de sol porteur et en injectant gravitairement par le pied de l'outil le béton lors de la remontée de l'outil,
- b. Colonnes ballastées, incontestablement les plus souples, constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactées par passes successives,
- c. Colonnes de Jet Grouting, réalisées en déstructurant le sol en profondeur à l'aide d'un jet haute pression dans un forage et en mélangeant le sol érodé avec un coulis auto-durcissant pour former des colonnes dans le terrain,

- d. Colonnes de Soil Mixing, réalisées par malaxage entre le sol en place et un liant (voie sèche) ou un coulis (voie humide) formant une colonne verticale cylindrique.

Enfin les techniques actuelles qui rencontrent un réel succès car économiques ou faciles de mise en œuvre sont les techniques dites **par inclusions rigides** dont l'efficacité est améliorée par la présence d'une plateforme granulaire renforcée ou non par des nappes de renforcement disposées sous l'ouvrage. Cette technique permet de limiter à des valeurs raisonnables les charges verticales transmises au sol compressible, de rediriger via des mécanismes de transfert de charge les charges verticales apportées par l'ouvrage vers les pieux tout en minimisant les composantes horizontales de la charge pouvant nuire à l'intégrité des pieux (**Fig.1-19**).

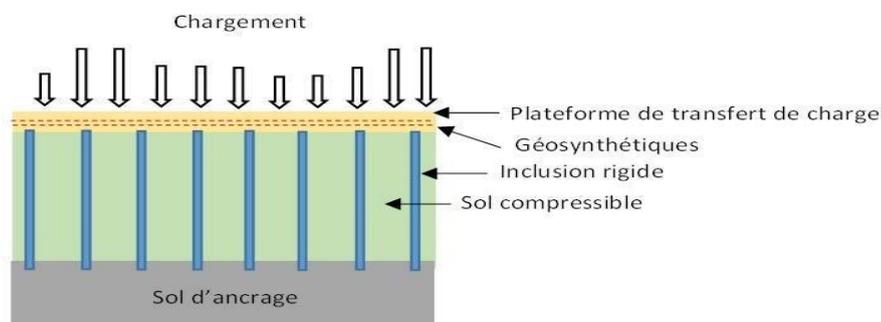


Figure 1- 19: Principe de fonctionnement des inclusions rigides.

D'un point de vue environnemental, ces solutions sont intéressantes car elles ne nécessitent pas d'excavation du sol en place réduisant ainsi la pollution liée au transport des matériaux et le risque de déplacer des sols pollués. L'apport de nappes géo synthétique dans les plateformes granulaires réduit leur épaisseur et donc le besoin en matériaux « nobles » (**Villard P and Briancon L., 2018**).

1.5.2.2 Renforcement des sols de remblaiement

Le renforcement des sols de remblaiement par des éléments intrusifs mixés au sol ou disposés en couches alternées, n'est pas nouvelle puisque déjà en -2100, en Mésopotamie, des constructions artificielles, les ziggourats, dont la réalisation requérait un énorme effort en matériau et en main-d'œuvre, étaient renforcées par des tissés de paille. La première ziggourat, construite à Ourouk, sert de modèle à toutes les tours à terrasses qui furent

élevées en Mésopotamie pendant des dizaines de siècles. La mieux conservée est celle d'Our (fin du IIIe millénaire). Depuis, il y a eu de nombreuses évolutions dans les techniques de renforcement notamment grâce à l'utilisation de nouveaux types de renfort (**Villard and Briancon., 2018**).

C'est sur une plage, en 1957, que l'inventeur français de la **Terre Armée**, Henri Vidal, fit une constatation : quand on marche sur un tas de sable, il s'affaisse et les grains s'éparpillent dans tous les sens, mais quand on y insère des rangées d'aiguilles de pin, l'ensemble reste stable même si on le sollicite fortement en marchant dessus par exemple. Henri Vidal développa cette idée pour mettre au point une nouvelle technique de construction de murs de soutènement qui s'est par la suite diversifiée sous la forme :

- e. D'un renforcement par armatures plates, métalliques (Terre Armée) ou synthétiques disposées horizontalement et à intervalles réguliers.
- f. D'un renforcement par nappes géosynthétiques (**Fig.1-20**).

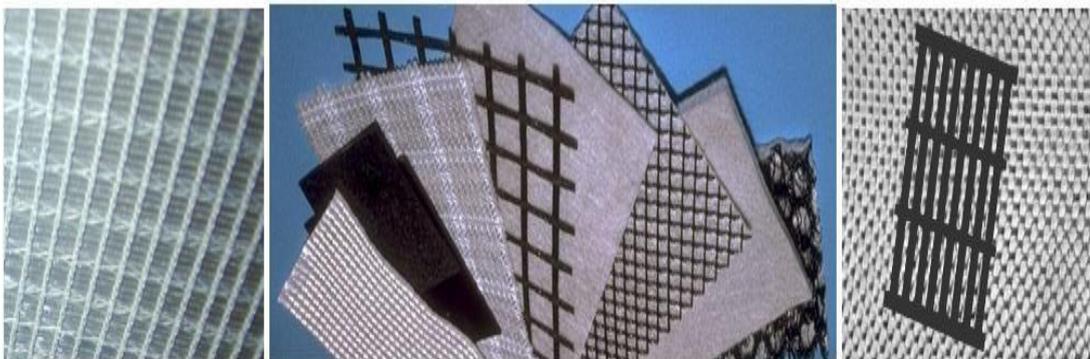


Figure 1- 20: Exemples de géo synthétiques

Dans les deux cas le parement vertical n'a pas de fonction de soutènement mais assure une protection vis-à-vis de l'érosion. Notons que la stabilité de l'ouvrage est assurée par les armatures qui s'opposent par traction à la déformation du massif du sol et que la mise en tension des armatures se fait grâce au frottement entre les éléments de renfort et le sol. Ce type de soutènement est en soit révolutionnaire de par sa conception puisque c'est le sol renforcé qui assure sa propre stabilité ;(**Fig.1-21**)il n'y a donc pas la nécessité de réaliser un mur de soutien qui sert de butée au massif de sol – Mur poids ou mur cantilever (**Villard and Brianco.,2018**).

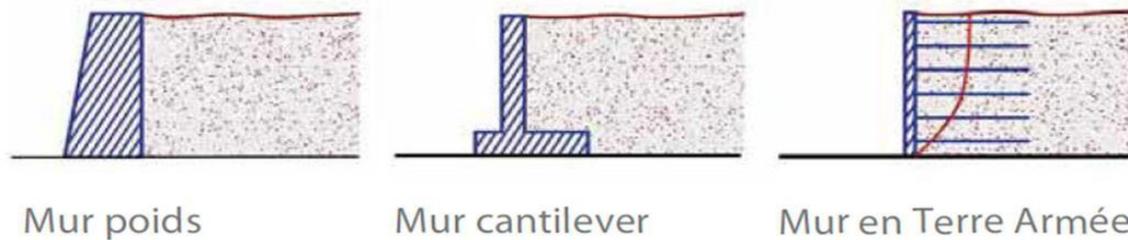


Figure 1- 21 : Evolution des murs de soutènement

Ces techniques sont largement employées car elles permettent de limiter l’emprise de l’ouvrage au sol et s’appliquent avantageusement aux terrains accidentés et difficiles d’accès (Fig.1-22). La géométrie modulaire de ces ouvrages leur permet de s’intégrer harmonieusement dans le paysage ; une végétalisation de certains parements est possible, rendant leur présence quasi-indéceltable (Villard and Briancon., 2018).

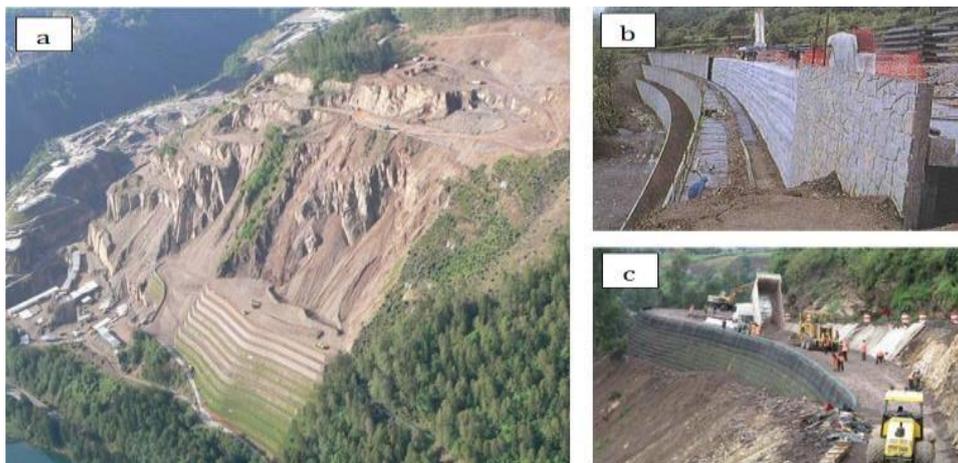


Figure 1- 22 : (a)Stabilisation d'un glissement de terrain (Source: Photothèque Hueske) ;(b) Mur de soutènement à parement rigide;(c) Mur de soutènement à parement souple (Source: Photothèque Huesker).

Par ailleurs, des fibres courtes ou continues sont parfois mais plus rarement utilisées pour renforcer les massifs de sol (Figure.1-23). Elles sont mélangées de façon homogène dans le sol et jouent localement le rôle de renfort. De par la capacité du mélange sol/fibre à dissiper de l’énergie, cette technique est utilisée, entre autre, pour limiter les dommages qui pourraient survenir suite à l’explosion d’un réservoir de gaz. Là encore la mise en tension des éléments de renforcement est possible grâce au frottement entre les fibres et les grains ou par enserrement des grains dans le cas des fibres longues (Villard and Briancon., 2018).

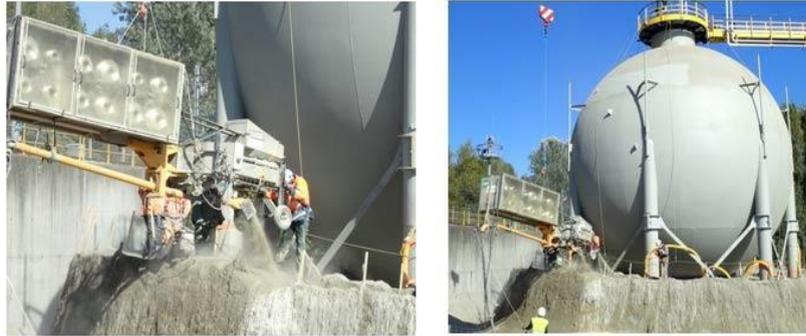


Figure 1- 23 : Protection d'un réservoir de gaz par un massif de sable renforcé par des continues- Procédé Texsol(3) (Source : Photothèque J.P.Goure).

1.6 Conclusion

Au regard de L'exposé des différentes familles des instabilités gravitaires (glissement, fluage, les chutes de pierres et de blocs, fluage, Écroulement, Éboulements, les effondrements) dans la région du Nord de l'Algérie, nous a permis de conclure qu'elles jouent un rôle primordial dans une perspective de gestion de l'aléa naturel.

IL été démontré que ces instabilités gravitaires constituent une menace pour la vie et les biens humains, et grâce à nos recherches sur ce phénomène, deux types de mouvements gravitaires ont été identifiés, qui sont lents et rapides. Les mouvements lents entraînent des changements progressifs et un peu à long terme qui peuvent entraîner des conséquences graves et des dommages directs.

D'autre part, les mouvements rapides sont caractérisés par un coup instantané qui survient soudainement très dangereux pour humains, il a également été mentionné dans ce chapitre les facteurs d'occurrence de ces mouvements de terrain où les causes sont nombreuses et variées divisées en deux groupes qui sont les facteurs naturels et les facteurs d'origine humaine.

C'est pour cela, nous devons prendre en compte ces phénomènes et de leurs dangers, et de prendre les précautions convenables pour détecter les zones instables afin de trouver les meilleures solutions de protections ou de traitements.

Chapitre 2

Les méthodes géophysiques appliquées à la géotechnique

2.1 Introduction

La géophysique appliquée consiste à étudier, observer et mesurer un champ physique à la surface du sol ou dans des cavités dans le sol. Ce champ physique est provoqué, il dépend d'un ou plusieurs paramètres caractéristiques des matériaux dont on cherche à déterminer la répartition dans le terrain (**Richard., 2007**).

La prospection géophysique est l'ensemble de méthodes indirectes où l'on cherche, à partir des propriétés physiques à déterminer la structure du milieu souterrain avec un échantillonnage spatial qui permettra de décrire la propriété et la méthode de mesures utilisées. La précision de la résolution avec le quelle sous propriété choisie et la méthode utilisée. Solva être décrit, varie selon les mesures sont réalisées à partir de la surface, de puits ou d'excavations déjà existantes (**Bièvreand Maurin., 2002**).

Certaines méthodes de grand rendement et capables de déterminer les grands traits de la structure géologique – sismique réfraction et méthodes électriques en particulier seront mises en œuvre dès les premiers stades de l'étude du projet (faisabilité géotechnique). Ces mesures seront réalisées quasi obligatoirement pour les études de tracés linéaires (routes, autoroutes, voies ferrées) (**Bièvre and Maurin., 2002**).

2.2 Généralités sur la géophysique appliquée

2.2.1 Définition de la géophysique

La géophysique est la science qui étudie les phénomènes physiques dont la terre et l'univers sont le siège. La géophysique est née de l'interaction de ces phénomènes Physiques avec les paramètres petro physiques liés à la roche ou caractéristiques des roches (**voir tableau 1.1**) (**Shout., 2012**).

Tableau 2.1 – Champ et propriété physique (source : INSA ; modifiée)

Méthode	Champ physique	Paramètre	Origine du champ
Gravimétrie	Champ de pesanteur	Densité	Naturelle
Sismique	Vibration	Vitesse d'ondes mécaniques	Provoquée
Électrique par courant injecté	Champ électrique	Résistivité	Provoquée
Magnétique	Champ magnétique	Susceptibilité magnétique	Naturelle
Electromagnétique	Champ électromagnétique	Résistivité et permittivité	Provoquée
Radioactivité	Champ radioactif	Radioactivité des	Naturelle ou Provoquée

2.2.2 Reconnaissance géophysique

La reconnaissance géophysique ou prospection géophysique, met en œuvre un ensemble de méthodes indirectes (voir tableau 2.1) où l'on cherche, à partir d'une ou plusieurs propriétés physiques à déterminer la structure du milieu souterrain de manière non destructive (non-invasive) et avec un échantillonnage spatial suffisamment dense pour que les variations latérales et verticales en soient décrites aussi complètement que le permettent la propriété et la méthode de mesure utilisées. La résolution, c'est à dire le degré de finesse avec lequel le sous-sol va être décrit, est en effet variable selon la propriété choisie et la méthode utilisée (Beddou, 2012).

2.3 Déroulement d'une campagne de géophysique

Pour réaliser des études géophysiques, différentes méthodes de mesures indirectes peuvent être utilisées les méthodes (électriques, géoélectrique, sismiques, gravimétriques, électromagnétiques, radar géologique ...). Ces méthodes, basées sur la mesure et l'analyse des paramètres physiques du sol sont dites non destructives.

2.3.1 Méthodes électriques en courant continu

Les méthodes de prospection électrique par courant continu consistent à déterminer les propriétés des sols par la mesure de leur résistivité. L'unité de mesure est l'Ohm mètre ($\Omega.m$) (Cyrille and Patrice., 2004). Il existe une grande variété de techniques utilisant les méthodes électriques. On peut mesurer par exemple:

- Une chute de potentiel
- Un courant
- Un champ électromagnétique

Par ailleurs, dans un domaine envisagé, il existe de nombreuses techniques de mesure. Les méthodes fondées sur la mesure du paramètre " résistivité " sont actuellement les plus répandues, plus développées et les plus diversifiées (méthodes imaginées en 1912 par les frères Schlumberger) (Richard., 2007).

2.3.1.1 La définition de la résistivité

La résistivité d'un matériau est l'inverse de la conductivité mesurée en siemens par mètre ($S.m^{-1}$). La résistivité ρ d'un milieu est la propriété physique qui détermine la capacité de milieu est laisser passer le courant électrique (Kunetz ., 1966).

2.3.1.2 Principes de mesure des méthodes électriques en courant continu

La nature hétérogène des terrains généralement rencontrés est telle que chaque hétérogénéité contribue à la valeur mesurée de la résistivité. La grandeur mesurée est une résistivité «globale», dite résistivité apparente. Rigoureusement, on peut définir la résistivité apparente comme « le rapport de la différence de potentiel mesurée sur le terrain à celle que l'on mesurerait avec le même dispositif et la même injection de courant sur un terrain homogène de résistivité $1 \Omega.m$ » (Cyrille and Patrice., 2004). Le principe de mesure est le suivant (Fig.2-1) : un courant continu I est injecté dans le sol par deux électrodes conductrices A et B. La différence de potentiel V est mesurée aux bornes de deux autres électrodes notée M et N. (Cyrille and Patrice.,2004).

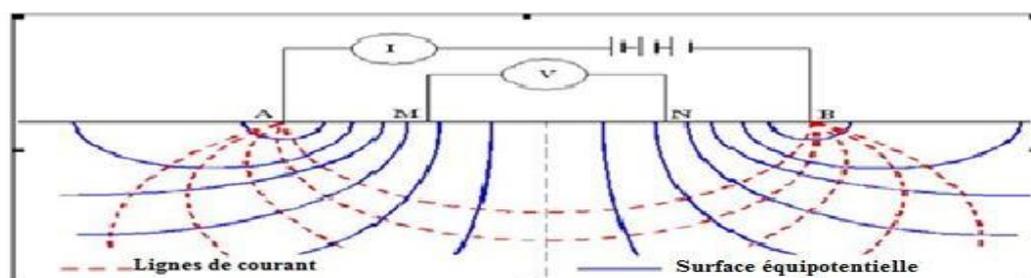


Figure 2- 1: Schéma représentatif du principe de la prospection électrique par courant continu.

La connaissance du courant I et la mesure du potentiel V permettent de déterminer la résistivité apparente du sol selon la formule suivante:

$$\Omega.m\rho_a = k \frac{V_M - V_N}{I} \dots\dots\dots (2-1).$$

Où k, le facteur géométrique est défini par:

$$k = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1} \dots\dots\dots (2-2).$$

K est déterminé par la position des électrodes, qui varie suivant les dispositifs employés (Cyrille F and Patrice M., 2004).

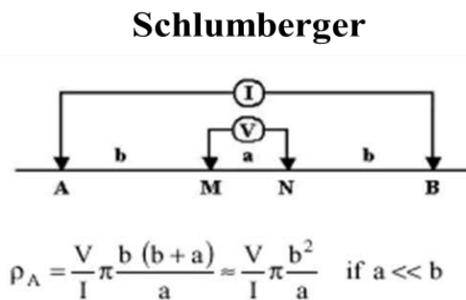
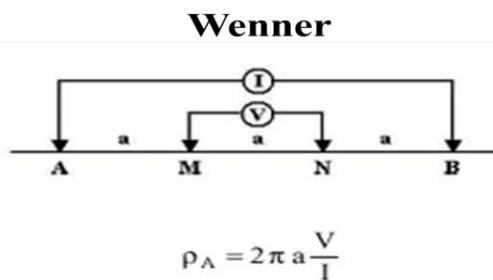
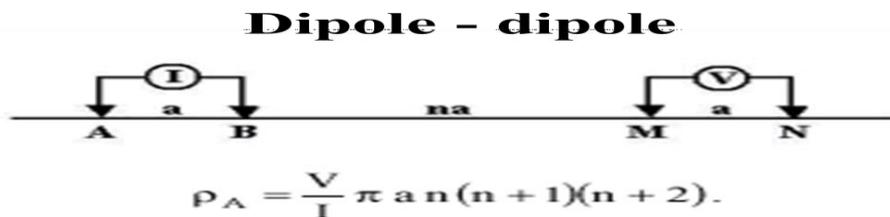
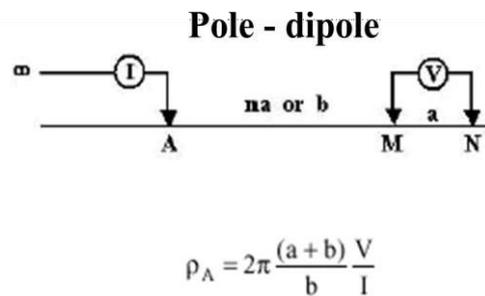
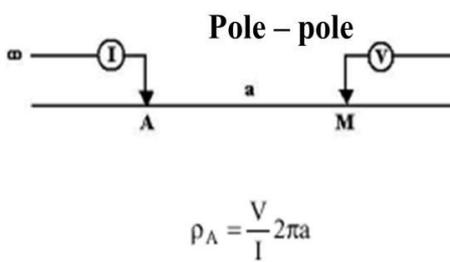


Figure 2- 2: Dispositifs et facteurs géométriques associés.

Les principaux dispositifs sont tous des quadripôles (**Fig.2-2**). Les plus utilisés sont les dispositifs Wenner, Schlumberger, et le dipôle-dipôle. Leur profondeur d'investigation est une fonction croissante de la longueur du dispositif. Pour tous les types de dispositifs, cette distance est définie comme la plus petite entre l'électrode d'injection et l'électrode de potentiel (**Cyrille F and Patrice M., 2004**). Si on prend comme référence cette distance AM, tous les dispositifs ont une profondeur d'investigation équivalente. Des auteurs comme (**Roy et Appareo, 1971**) et (**Militzer et al ., 1979**) ont étudié plus précisément les profondeurs d'investigation en fonction des dispositifs. Dans une première approximation, on peut considérer que la profondeur investiguée est de l'ordre de 1/6 à 1/8 de la longueur du dispositif. Il y a trois types de mise en œuvre de la prospection électrique par courant continu depuis la surface:

 Le sondage électrique: en un point fixe en surface, les électrodes sont écartées,

 Le traîné électrique: le dispositif est déplacé le long d'un profil. Les distances entre les électrodes sont fixes,

 Le panneau électrique qui est la combinaison des deux méthodes précédentes. C'est une méthode utilisée pour la détection des cavités souterraines, pour la localisation de structures conductrices (poches, fractures, failles). Elle est très utilisée en milieu karstique (**Cyrille and Patrice., 2004**).

2.1.1 Sondage électrique Vertical

Un sondage électrique est constitué par une série de mesures de résistivité apparente avec, entre chaque mesure, un accroissement de la séparation des électrodes d'injection (ou de courant), le centre du dispositif et sa direction demeurant constant. Plus la distance entre les électrodes de courant est grande, plus grande est la profondeur de pénétration des filets de courant participant utilement à la mesure (**Hamai., 2016**).

Un terrain constitué d'une succession, en profondeur, de couches présentant des caractéristiques électriques différentes se traduira donc par des variations de la résistivité apparente mesurée en surface lors de la réalisation du "sondage" (**Hamai., 2016**).

2.1.1.1 Principe de la méthode

Dans le dispositif du sondage électrique, le centre est fixe et les électrodes sont écartées pour

mesurer la résistivité apparente en fonction de la longueur du dispositif (Beddou., 2012).

Ce principe est illustré sur la Fig.2-3 pour un dispositif Wenner: les distances entre électrodes des points A, B, M et N varient d'un nombre entier deux fois l'écartement initial à (Beddou., 2012).

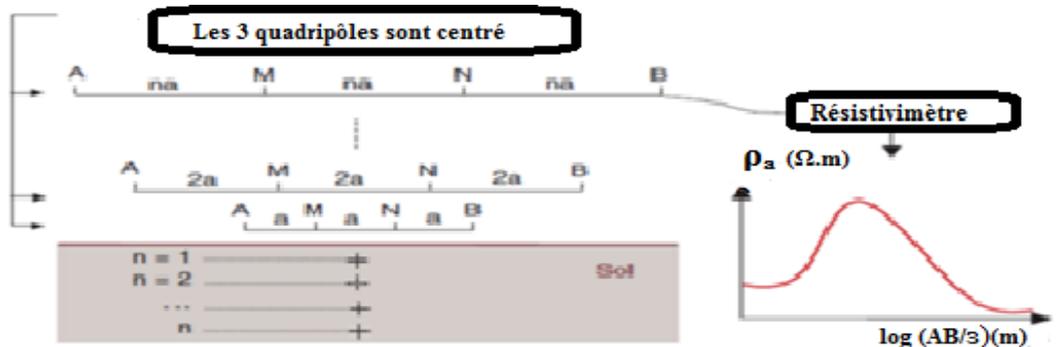


Figure 2- 3: Schéma représenté du principe du sondage électrique vertical en le dispositif e Wenner (alpha) (Beddou., 2012).

2.3.4 Traîné électrique

Le traîné électrique est la méthode préliminaire à toute étude géoélectrique et sert de base à l'implantation des autres mises en œuvre électriques (Chapellier, 1981). L'établissement d'une carte des résistivités apparentes permet de mettre rapidement en évidence les anomalies électriques d'un sous-sol initialement considéré homogène (Hacini., 2006).

Un quadripôle de dimension constante est « traîné » en surface afin de couvrir le terrain à étudier. Une carte de traîné électrique permet d'imager une tranche de sous-sol de profondeur plus ou moins constante et ainsi de mettre en évidence la répartition dans le plan horizontal de corps de résistivité électrique différentes (Hacini., 2006).

2.3.4.1 Principe de la méthode

On déplace un quadripôle de longueur fixe et en chaque point d'un profil, on mesure ρ_a . C'est la méthode dite des traînés de résistivité. Elle permet de mettre en évidence des variations horizontales de résistivité, par exemple liées à la présence de failles juxtaposant 2 terrains de résistivités différentes, ou révélant des structures archéologiques de type fondations enterrées, etc. En réalisant plusieurs traînés parallèles les uns aux autres, on peut obtenir une carte des résistivités mettant en évidence les variations latérales de ρ_a à une profondeur donnée, fonction de l'écartement constant entre les électrodes (Beddou., 2012).

2.3.5 Le panneau électrique (profil)

Cette méthode combine le traîné électrique et le sondage électrique. Elle consiste à implanter un grand nombre d'électrodes à intervalle constant le long d'un profil rectiligne. Toutes les électrodes sont reliées à un dispositif de mesure de potentiel et d'injection de courant. Le système (l'injection de courant et la mesure du potentiel) est piloté par ordinateur (Anrfachade., 2017).

Les électrodes jouent alternativement le rôle d'électrodes d'injection et d'électrodes de mesure du potentiel. On réalise automatiquement pour un quadripôle de longueur donnée un traîné électrique, et on fait varier la longueur du quadripôle pour le combiner au sondage : on réalise alors les mesures pour toutes les longueurs possibles du dispositif (Anrfachade., 2017).

2.3.5.1 Principe de panneau électrique (profil)

Nous avons vu précédemment qu'en écartant les électrodes, tout en gardant la symétrie du dispositif autour du point central, on obtient des mesures de résistivité apparente à des profondeurs croissantes, cela correspond au sondage électrique. Une des limitations des sondages électriques vient du fait qu'ils ne prennent pas en compte les variations latérales de la résistivité du sous-sol. En gardant l'écartement entre les électrodes constantes, le long d'un profil, et en déplaçant le dispositif de mesures à pas régulier, on obtient les variations latérales de la résistivité apparente à une profondeur quasi-constante, cela correspond au traîné électrique (Parasnis, 1986, Loke and Barker, 1996, Dahlin, 2001).

En fait, le panneau électrique correspond à la conjonction de ces deux dernières techniques. En effet, les méthodes d'imagerie électrique 2D et 3D ont été mises au point dans le but d'obtenir un modèle du sous-sol où la répartition de la résistivité varie verticalement et horizontalement le long d'un (2D) ou plusieurs (3D) profils (Parasnis, 1986, Loke and Barker, 1996, Dahlin, 2001) (Fig.2-4).

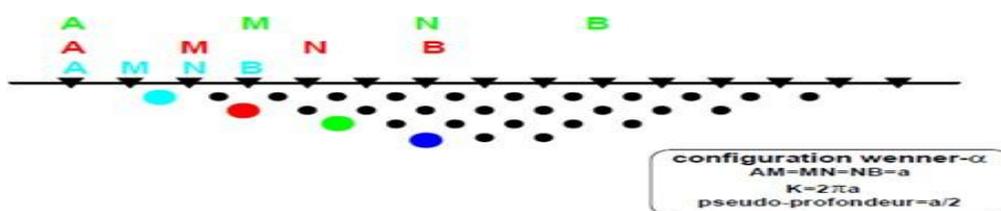


Figure.2- 4: Principe du panneau électrique pour la configuration Wenner- α . A, B sont les électrodes d'injection et M,N les électrodes de potentiel. A chaque couleur du dispositif de mesure (AMNB) correspond une mesure.

2.3.6 La tomographie électrique en géophysique

Cette méthode est relativement récente et doit son principal développement aux progrès effectués en informatique et en traitement mathématique (Laurent., 2008). Depuis trois ou quatre ans, la tomographie électrique tend à devenir l'outil indispensable de toute personne concernée par des problèmes d'environnement, d'hydrogéologie, de génie civil, de géologie, de recherche de matière première ou d'archéologie. Des applications se développent de plus actuellement dans le domaine de la recherche minière et pétrolière (Laurent., 2008). Les principaux atouts de cette méthode sont son faible coût de mise en œuvre ainsi que la rapidité du traitement. Les chapitres de cette partie du cours sont donc destinés à donner à l'ingénieur géologue, au géologue géophysicien ainsi qu'au spécialiste de l'environnement de solides bases lui permettant d'utiliser cette méthode et d'interpréter les résultats obtenus de manière correcte (Laurent., 2008).

2.3.6.1 Principe de la tomographie électrique

Pour la plupart des roches, la conductivité électrique est de nature électrolytique. En effet, les ions contenus dans l'eau porale transportent des charges sous l'effet du champ électrique et en conséquence la roche conduit le courant électrique (Véronique., 2004). D'autre part, la surface des minéraux est le siège de phénomènes électrochimiques connus sous le nom de double couche électrique. Celle-ci est responsable d'une conductivité électrique dite de surface au voisinage de l'interface entre l'eau porale et les minéraux. Cette conductivité joue un rôle majeur lorsque la surface spécifique de la roche est importante, comme dans le cas de minéraux argileux. Le passage du courant peut également se faire par déplacement d'électrons. On parle de conductibilité électronique ou métallique. Elle n'est réellement importante que pour certains gisements de minerai tels que les sulfures, les oxydes ou le graphite (Véronique., 2004).

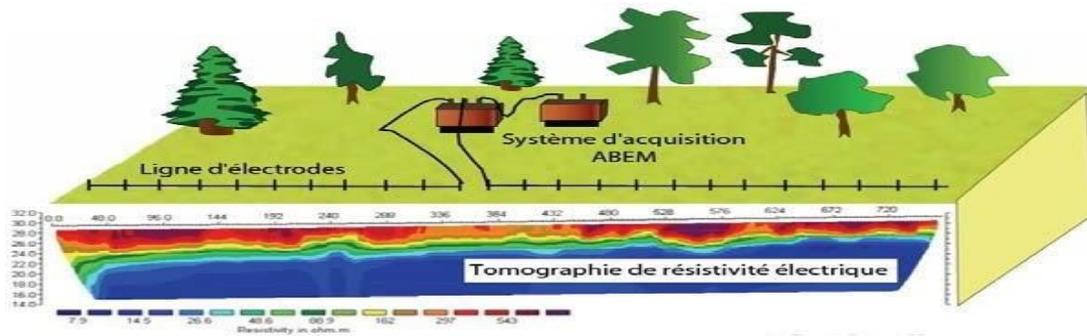


Figure 2- 5: Dispositif de mesures de tomographie électrique. Sur la ligne d’acquisition, deux électrodes permettent l’injection du courant électrique, tandis qu’au minimum deux autres électrodes mesurent la différence de potentiel électrique.

Le principe de la méthode repose sur la mesure de différences de potentiel électrique associées à l’injection d’un courant électrique (**Fig.2-5**). La loi d’Ohm permet de calculer la résistivité électrique dite apparente. Cette valeur résulte de la contribution de toutes les portions du milieu qui sont traversées par le courant émis en surface. Ainsi, la mesure représente une valeur qui intègre les résistivités sur un certain volume du sous-sol. La technique d’acquisition consiste à réaliser des profils en augmentant régulièrement l’espace entre les électrodes. Les mesures de terrain permettent ainsi d’obtenir une pseudo-section de la résistivité électrique apparente du sous-sol (**Véronique., 2004**).

2.4 Les méthodes sismiques

Le sismique est une technique de mesure indirecte qui consiste à enregistrer en surface des échos issus de la propagation dans le sous-sol d’une onde sismique provoquée. Ces échos sont générés par les hétérogénéités du sous-sol (**Hervé and Pierre., 1999**). Le passage par exemple d’une couche d’argile à une couche de sable dans une colonne sédimentaire va se traduire par la présence d’un réflecteur sur les enregistrements. Selon le mode de propagation de l’onde : réfléchi sur, ou transmise le long de cette interface, on parle de sismique réflexion (**Fig.2-4**) ou de sismique réfraction (**Fig.2-5**) (**Hervé and Pierre., 1999**).

2.4.1 Principe de base des méthodes sismiques

Les méthodes sismiques sont fondées sur l’étude de la propagation des ondes mécaniques dans le sol. La vitesse de propagation des ondes dépend des propriétés élastiques des matériaux (**Richard., 2007**). Plusieurs types d’ondes se propagent simultanément ; on distingue les ondes

de volume (longitudinales (**ondes P**) et transversales (**ondes S**)) (qui existent toujours), des ondes de surface (les [ondes de Love](#), les [ondes de Rayleigh](#)), qui n'existent et ne se propagent qu'au voisinage des interfaces séparant deux matériaux de propriétés élastiques différentes (**Richard., 2007**)(**Fig.2-6**).

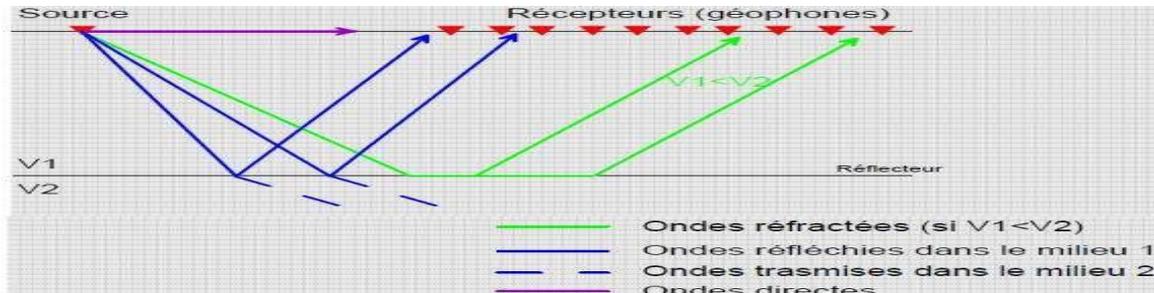


Figure .2- 6 : Principe de la méthode sismique

2.4.2 Sismique réfraction

La sismique réfraction est une méthode de reconnaissance géophysique du sous-sol fondée sur l'étude de la propagation des ondes sismiques élastiques, Elle appliquée à la solution des problèmes à faible profondeur rencontrés en génie géologique (**Soske ., 1959, Hawkins et Maggs 1961**), génie civil (), l'archéologie (**Osella et al., 2005, Martino et al .,2006**).Géotechnique(**Mezerreg and Bougadal.,2019**),et hydrogéologie (**Wyrobek, 1956**), est depuis quelques années l'outil géophysique le plus couramment employé. Le but est de présenter l'aperçu le plus détaillé possible de la théorie de base, de la méthode et de fournir les éléments essentiels, nécessaires pour l'interprétation des mesures. Ce guide met l'accent sur les méthodes d'interprétation utilisées au service de la Géotechnique du ministère de l'Énergie et des Ressources. Il couvre tous les aspects importants des différents cas qui peuvent être rencontrés lors des levés de terrain (**ELLIOT., 1967**).

2.4.2.1 Principe de base

La sismique réfraction consiste à provoquer un ébranlement artificiel à l'aide d'un marteau, l'ébranlement déforme le milieu traversé, ces déformations se propagent sous forme d'ondes réfractées sur les surfaces de discontinuité et enregistrées à l'aide des géophones. Les temps de propagation permettent de calculer les vitesses de propagation des ondes dans le sous-sol et de déterminer la géométrie, la structure et la configuration des couches géologiques (**Djebrou., 2007**)(**Fig.2-7**).

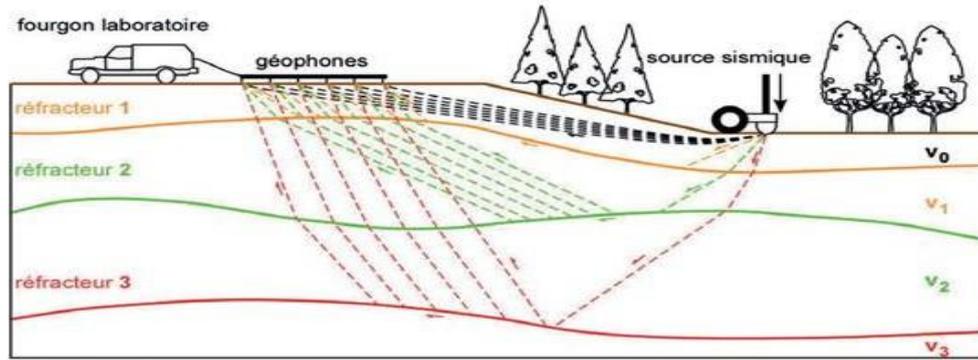


Figure 2- 7: Schéma de principe de la méthode sismique réfraction (Document BRGM).

2.4.2.2 Les matériels utilisés



Figure 2- 8 : Flûte Sismique. (Document BRGM).



Figure 2- 9 : Enregistreur GEODE de Geometrics (Document BRGM)

Figure 2- 10 : Enregistreur STARTAVIEW de Geometrics (Document BRGM).

2.4.3 Sismique réflexion

La sismique réflexion est une méthode d'exploration qui consiste à effectuer des ébranlements dans le sol et à observer en surface les ondes réfléchies. La profondeur de pénétration varie de quelques mètres à plusieurs dizaines de kilomètres et le pouvoir de résolution est généralement très satisfaisant (Bitri et al ., 1996).

Depuis une dizaine d'années, l'utilisation de la sismique haute résolution pour des faibles profondeurs fait l'objet d'un nombre de publications et de tests d'applications croissant d'année. Les succès de cette méthode génie civil, en hydrogéologie, en géotechnique et dans le domaine minier sont dus principalement aux développements de systèmes d'acquisition portables ayant une dynamique satisfaisante, c'est-à-dire capable de prendre en compte à la fois les signaux les plus forts et les signaux les plus faibles avec une précision suffisante (Bitri et al.,1996).

2.4.3.1 Principe de la méthode

La méthode consiste à provoquer un ébranlement du sol ou une onde de pression dans l'eau qui se transmet au sous-sol. La formation d'un ébranlement à proximité d'un tir de dynamite, que l'on peut considérer comme ponctuel, est souvent mal connue car les matériaux y sont soumis à des déformations non linéaires très complexes. Cependant, on peut admettre, qu'à une distance de l'ordre de quelques mètres du tir, les ondes émises ("signature" de la source) sont des ondes élastiques. Les principales discontinuités géologiques ou "marqueurs" réfléchissent ces ondes. Les signaux réfléchis sont captés à la surface du sol, traités puis analysés (Frédérique., 1990).

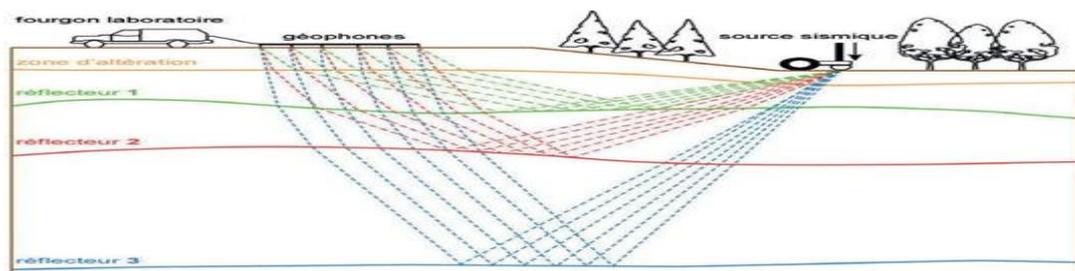


Figure .2- 11: Schéma de principe de la méthode sismique réflexion (Document BRGM).

2.4.3.2 Les matériels utilisés



Figure .2- 12 : Enregistreur SERCEL CX 508



Figure .2- 13 : (Boîtier Sercel 508 et flûte sismique Document SERCEL)



Figure .2- 14 : Géophones DSU3 (Document EL)



Figure. 2- 15 : Camion vibreur Nomad 90 (Document SERCEL)

2.4.4 Les matériels utilisés La méthode "H/V bruit de fond"

Le bruit de fond est constitué de bruits aléatoires et périodiques dus aux activités humaines et naturelles. Les niveaux d'accélération en jeu sont très faibles. Ils sont de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-3} m/s² à comparer à l'accélération des séismes réglementaires en France, comprises entre 1 à 4,5 m/s². L'origine du bruit de fond est aujourd'hui discutée par de nombreux auteurs qui l'attribuent en proportions variables aux ondes de volumes et/ou de surfaces (Nakamura, 1989 ; Bonnefoy Claudet, 2004). La mesure du bruit de fond sismique pratiquée avec un capteur unique montre son intérêt dans une démarche de pré-caractérisation des classes de sol dans le cadre des études sismiques quelle que soit la taille du projet. Cette méthode, introduite par Nakamura en 1989, permet de déterminer la fréquence (Nakamura, 1989 ; Bonnefoy Claudet, 2004).

2.4.4.1 Principe de la méthode "H/V bruit de fond"

Le bruit de fond est une vibration mécanique de faible amplitude ($<10^{-3}$ m/s²), engendrée par les sources locales, liées à l'activité courante (Bonnefoy-Claudet., 2004). Le bruit de fond sollicite les sols dont il est possible, avec du matériel adapté, de mesurer la réponse et d'en déduire un comportement dynamique. Cette méthode a plusieurs avantages :

- Ne pas avoir à créer de sollicitation (explosif, marteau vibreur) ;
- Ne nécessiter qu'un matériel d'enregistrement léger ; **H/V bruit de fond** m/s²
- Permettre de réaliser les mesures dans un intervalle de temps limité.

Le procédé utilisé est la méthode H/V bruit de fond, dite de (Nakamura., 1989 ; Bard. , 1995). A partir de l'enregistrement du bruit de fond, elle consiste à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale (H/V). Les composantes horizontales du bruit de fond sont amplifiées par les réflexions sur les interfaces des couches sur montant le

substratum, alors que la composante verticale, qui contient aussi la signature des sources de bruit, n'est pas affectée.

Le rapport spectral des composantes horizontales sur la composante verticale (H/V) permet d'obtenir un pseudo fonction de transfert au point de mesure. Il fournit une bonne mesure de la fréquence de résonance du sol, et une amplification relative à comparer aux autres sites de mesure (Nakamura., 1989 ; Bard. ,1995).

La typologie des rapports H/V permet de caractériser les zones du point de vue géotechnique. En ce sens, il s'agit d'un outil géophysique utile pour apprécier l'homogénéité d'un site. Dans le cas de zones différentes, leur extension géographique peut également être circonscrite par cette méthode (Nakamura., 1989 ; Bard. , 1995).

2.4.5 La méthode cross hole

2.4.5.1 Principe de la méthode cross hole

Principe de la méthode Cross-Hole est de déterminer les modules dynamiques des diverses couches du sous-sol. Pour cela, on doit déterminer les vitesses des ondes sismiques de compression, ou ondes P, et de cisaillement, ou ondes S, dans les différentes couches. La méthode consiste à exécuter des mesures de vitesses entre deux ou plusieurs forages. On émet un signal à un niveau déterminé dans un forage et on réceptionne ce signal au même niveau dans un ou plusieurs forages voisins. La détermination des temps de propagation des ondes P et S entre l'émission et la ou les réceptions permet de calculer les vitesses des ondes P et S, connaissant les distances séparant les points émission-réception (Beddou., 2012).

2.4.6 La méthode down hole

Cette méthode est basée sur l'évaluation de la vitesse des ondes sismique V_s à partir de l'essai Down Hole. Dans lequel la valeur de la vitesse V_s est introduite dans les formules de détermination du rapport de la résistance au cisaillement CBR.

Les mesures de V_s procurent une alternative prometteuse et/ou supplément aux approches basées sur les essais de pénétration. L'utilisation de V_s comme un indice de résistance à la liquéfaction est basée sur le fait que la résistance d'un sol à la liquéfaction et V_s sont influencées par les mêmes facteurs: l'indice des vides, l'état de contraintes, cimentation et l'âge géologique.

2.4.6.1 Principe de la méthode down hole

La méthode down-hole consiste à mesurer les vitesses des ondes de compression (VP) et des ondes de cisaillement (VS) d'une entité géologique entre la surface du sol et la position du capteur dans le sondage (Djebrou., 2007). Cette technique permet aussi la détermination des caractéristiques géodynamiques du terrain, lesquelles sont destinées le plus souvent à l'analyse dynamique des sols et procéder à la classification du site (Djebrou., 2007).

2.5 Gravimétrie

La gravimétrie est une méthode géophysique qui étudie les variations spatiales du champ de gravité. Localement, le champ de gravité mesurable sur la surface terrestre varie en raison de la distribution hétérogène de la densité du sol. Régionalement, elle est affectée par la topographie (montagnes, vallées, etc). Les variations dans la gravité peuvent aussi être temporelles à cause de la force de marée, de la tectonique des plaques ou de la fonte des glaciers (Charles., 2020).

2.5.1 Principe de base

La gravimétrie est l'étude des variations du champ de pesanteur à la surface du sol. Le champ de pesanteur se mesure au moyen d'un gravimètre. Le principe est de mesurer la force qui s'exerce sur une masse unitaire suspendue à un ressort (peson à ressort). Naturellement, un gravimètre comporte des raffinements qui lui confèrent une très grande sensibilité et qui rendent la mesure aussi peu dépendante que possible de la pression atmosphérique ou de la température. Les gravimètres utilisés pour la reconnaissance ne servent pas à mesurer la gravité absolue, mais ses variations dans l'espace et dans le temps, leurs précisions est de quelques microgals (Richard., 2007).

La force qui s'exerce sur la masse du gravimètre dépend du temps (phénomène de la marée terrestre due à l'influence sur la valeur de la gravité de la position de la lune et du soleil). Elle dépend aussi de la latitude et de l'altitude du point de mesure ainsi que du relief. On compare appelé base (Richard., 2007). Les mesures sont toutes ramenées à la même altitude, corrigées des variations temporelles, de l'effet de la latitude et du relief. On calcule ainsi « l'anomalie de Bouguer »:

$$A=g-(g_0-C.z-T)..... (2-3).$$

Avec :

g_0 : la gravité au point courant ; g : gravité à la base ; C : constante ; Z : différence d'altitude entre le point courant et la base ; T : est la correction due au relief.

La constante C vaut : $C = 3.10^{-5} - 2\pi G d$ (en unités SI).

Où d est la masse volumique des terrains de surface qu'il convient d'estimer au mieux ; G étant la constante universelle de gravitation ($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$).

Le terme indépendant de la densité correspond à la correction dite « à l'air libre » (la gravité diminue lorsque l'altitude augmente, parce que l'on s'éloigne des masses qui en sont la source). Le terme dépendant de la densité compense partiellement ce phénomène, il s'agit de la correction dite de « plateau », qui tient compte de la présence d'une lame de matière entre l'altitude de référence et celle du point courant (Nassamou and Elhor., 2020).

N T La correction T de relief corrige le fait que cette dernière lame de matière présente en réalité une épaisseur variable du relief. Son calcul est analytique et il existe des logiciels permettant de l'effectuer. Dans la formule précédente, les variations temporelles de g dues à la marée ou à la dérive de l'appareil sont déjà prises en compte et évaluées expérimentalement grâce à des mesures périodiques à la base avec une période inférieure à 1 h (Nassamou and Elhor., 2020).

La formule précédente de l'anomalie de Bouguer, avec la signification des termes que l'on vient de fournir, n'est pas la formule rigoureuse de la gravimétrie, en général mais celle qui est utilisée pour la reconnaissance en génie civil. Dans sa définition rigoureuse, g_0 est une valeur théorique sur un ellipsoïde de référence dont l'altitude est zéro par définition. Z est l'altitude du point de mesure par rapport à l'ellipsoïde de référence. En génie civil, la taille des surfaces explorées est suffisamment faible pour que l'effet des variations de l'altitude soit négligeable, il vaut mieux prendre l'altitude de référence à la base pour que les corrections soient faibles (Nassamou and Elhor., 2020).

On remarque que les mesures ne se résument pas à celle de la gravité, mais qu'il faut aussi connaître l'heure de passage aux différentes stations (avec une précision de l'ordre de la minute) et les altitudes relatives (avec une précision de l'ordre du centimètre) (Nassamou and Elhor., 2020).

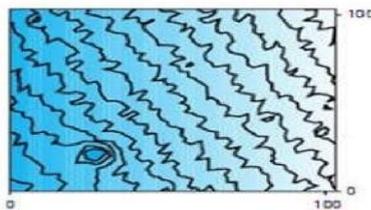


Figure .2- 16: anomalie de Bouguer.

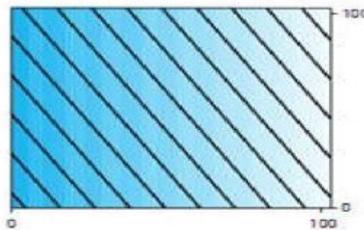


Figure .2- 17: anomalie régionale

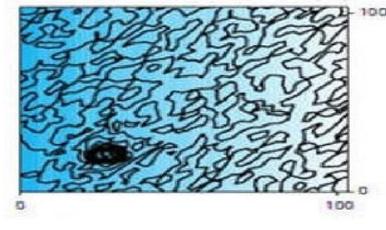


Figure .2- 18: anomalie résiduelle : différence entre l'anomalie de Bouguer et l'anomalie régionale.

L'anomalie de Bouguer (**Fig.2-16**) présente des variations de grandes longueurs d'ondes dues à des phénomènes géologiques régionaux et profondes et des variations à petites longueurs d'ondes dues à des phénomènes locaux et peu profonds. Le premier type de variation est l'anomalie régionale (**Fig.2-17**), elle n'intéresse pas en principe la reconnaissance en génie civil. L'anomalie résiduelle (**Fig.2-18**) est la différence entre l'anomalie de Bouguer et l'anomalie régionale ; c'est elle qu'il faut interpréter. Les courbes (en tracé ondulé) représentent les courbes d'égale valeur d'anomalie, correspondant aux variations relevées en surface. Les ondulations donnent une idée de l'erreur de mesure. La zone arrondie foncée résulte de la présence d'une cavité souterraine à son aplomb. Les différents grisés donnent les variations régionales liées à la géologie profonde (Nassamou and Elhor ., 2020).

2.5.2 Microgravimétrie

C'est la seule technique de gravimétrie utilisée en géotechnique. D'autres techniques existent pour d'autres domaines d'application de la géophysique. Cette méthode utilise un gravimètre (Lacoste et Romberg, modèle D) et mesure l'anomalie du champ de pesanteur le long de profils longitudinaux en plate-forme. Une cavité, associée à un déficit de masse, génère une anomalie gravimétrique négative. Les points de mesures peuvent être réalisés sur ou en dehors des voies. Quatre profils de mesures ont été réalisés, avec un maillage de 3 m par 3 m en quinconce (Bosch., 2002).

2.5.2.1 Principe de base

La méthode de prospection micro gravimétrique a pour objet de mesurer à l'aide d'un micro gravimètre, les variations relatives de la composante verticale de l'accélération de la

pesanteur. Elle consiste à mettre en évidence les déficits de masse existant dans le sol qui se traduisent en surface par une diminution locale de la valeur du champ de pesanteur. Le principe de la méthode de prospection gravimétrique repose sur l'application de la loi de Newton de l'attraction universelle :

$$F = (G \cdot m_1 m_2) / d^2 \dots\dots\dots (2-4)$$

Le champ de gravité terrestre g en un point donné, dépend de la répartition de la densité dans l'espace. Ainsi, la mesure de la valeur relative de la gravité à la surface du sol permet d'établir la répartition des densités dans le sous-sol (Bosch., 2002).

2.6 Méthodes électromagnétiques

Développées dès les années 60 pour l'exploration minière, les méthodes géophysiques électromagnétiques permettent de mesurer les variations de résistivité du sous-sol jusqu'à une profondeur de plusieurs dizaines de mètres. Ces méthodes utilisent les propriétés des ondes électromagnétiques de basses et très basses fréquences émises par différents émetteurs fixes (militaires, télex) situés à très grande distance du site d'étude ou par un émetteur portatif installé pour l'occasion. Lorsque ce signal électromagnétique primaire se propage dans le sous-sol, il induit des champs électriques et magnétiques secondaires qui vont varier en fonction de la nature de ce sous-sol (Bosch., 2002). L'appareillage géophysique électromagnétique utilisé a été développé, depuis les années 80, au Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Il peut fonctionner en mode **RMT**, **RF-EM** ou **VLF-EM GRAD**, dans une gamme de fréquences comprises entre 12 et 240 kHz (Bosch., 2002).

2.6.1 Principe de base

La prospection géophysique par méthodes électromagnétiques consiste à étudier les propriétés des ondes électromagnétiques et leur interaction avec le terrain. Elles se réfléchissent et se réfractent partiellement (**loi de Snell - Descartes**) lorsqu'elles rencontrent un contraste d'impédance électromagnétique (**Fig.2-19**). La propagation de ces ondes est décrite par les équations de Maxwell. Elle présente deux régimes : le régime de diffusion lié aux phénomènes de conduction et le régime de propagation lié aux phénomènes de polarisation. Ces deux phénomènes dépendent de la fréquence à laquelle ils sont sollicités et des paramètres physiques que sont la conductivité (inverse de la résistivité) et la permittivité du matériau. La frontière entre ces deux régimes est définie par une fréquence caractéristique dépendant des propriétés du sol (Bosch F., 2002). Elle est la limite en dessous de laquelle les phénomènes de

conduction dominant et au-dessus de laquelle les phénomènes de polarisation dominant :

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\rho \epsilon} \text{ [Hz]} \dots\dots\dots (2-5).$$

Où : c'est la conductivité du terrain et ϵ est sa permittivité, ρ la résistivité.

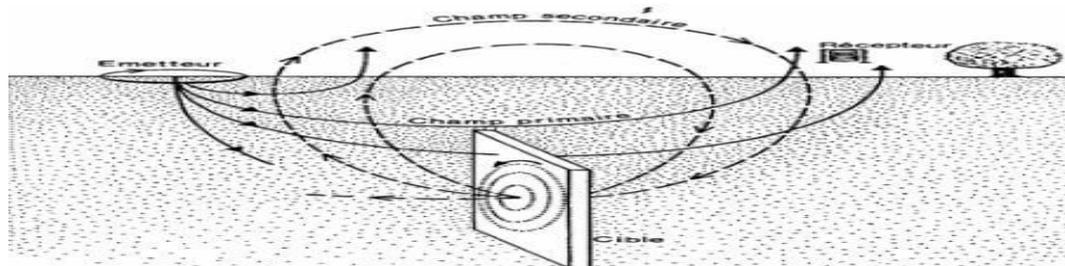


Figure .2- 19 : Schéma représentatif du Principe des méthodes électromagnétiques.

2.6.2 Les différentes méthodes électromagnétiques

Si l'on parle des fréquences utilisées pour la prospection et du mode de propagation, on distingue les méthodes à basse fréquence et les méthodes hautes fréquence. Si on parle de la distance qui sépare le récepteur de la source électromagnétique, on distingue les méthodes en champ lointain et les méthodes en champ proche. Si on parle de la nature du champ électromagnétique utilisé, on distingue les méthodes passives et les méthodes actives. Si on parle du mode de mesure envisagé, de son traitement et particulièrement du type de source utilisée, on distingue les méthodes fréquentielles et les méthodes temporelles (Bosch., 2002).

2.6.2.1 RF-EM et VLF-EMGRAD

2.6.2.1.1 Principe des méthodes

La méthode RF-EM utilise comme source d'énergie les antennes radio dans la gamme de fréquence LF et VLF et à l'aide de deux bobines orthogonales, elle compare le champ primaire de l'émetteur avec l'intensité d'un champ secondaire induit (en %) dans les fractures. Les courbes ainsi obtenues, par enregistrement en continu des paramètres de l'induction, grâce à un datalogger de 4 Hz, donnent une très bonne information sur la position et la dimension des fractures, mais ces hétérogénéités conductrices doivent encore être positionnées entre un pic positif et un pic négatif sur la courbe enregistrée. Théoriquement la fissure doit se trouver entre les deux pics, au milieu, mais sur des courbes complexes, cette interprétation n'est pas toujours aisée. Cette nouvelle antenne à gradient facilite la localisation des fractures par un pic

très net, juste à l'aplomb du conducteur, capable ainsi d'identifier et de séparer des fractures de faibles développements et très rapprochées l'une de l'autre (Bosch., 2002). L'antenne a été testée sur plusieurs sites déjà forts bien documentés dans le karst, notamment derrière la paroi d'une carrière aux Breuleux(JU), où il a été possible de contrôler sur les affleurements de la carrière que la méthode VLF-EM-Grad est particulièrement bien adaptée pour la cartographie extensive des milieux fissurés. (La Fig.2-20) ci-dessous donne une représentation schématique du fonctionnement de la méthode. Pour chaque fréquence, l'émetteur produit dans le sous-sol un champ magnétique (H_p) et électrique primaire (E_p). Si le sous-sol est électriquement homogène, le champ magnétique est horizontal et perpendiculaire à la direction de l'émetteur ; le champ électrique est aussi horizontal mais parallèle à cette direction (Bosch., 2002).

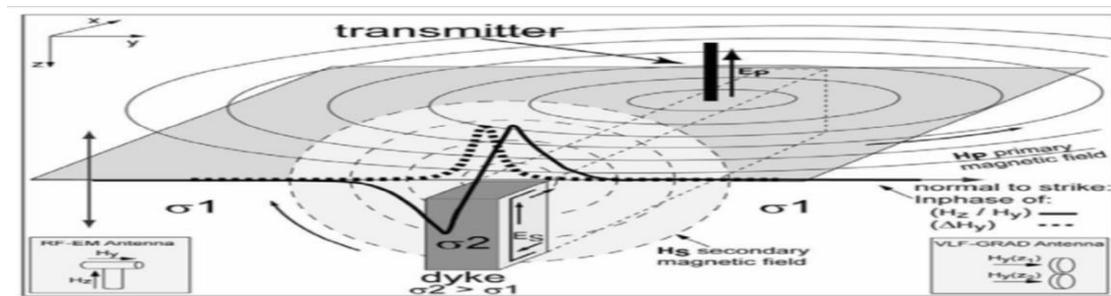


Figure .2- 20: Principe des méthodes RF-EM et VLF-EM GRAD pour la mise en évidence d'une structure conductrice verticale (Bosch, 2002).

2.6.2.2 Radio magnétotellurique

2.6.2.2.1 Principe de la méthode

Lorsqu'une onde électromagnétique plane (c'est-à-dire issue d'un émetteur lointain) se propage au-dessus du sol, elle est le siège de phénomènes dont on peut tirer parti pour connaître le sous-sol (Bosch and Millier., 2007) (Fig.2-21).

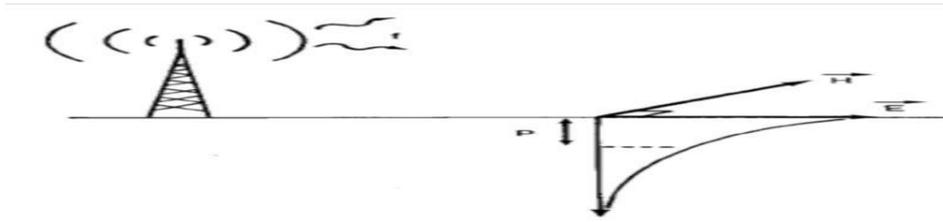


Figure .2- 21: Schéma représentatif du principe de la radio-magnétotellurique : un émetteur de radiodiffusion, lointain, émet une onde électromagnétique de fréquence f (Beddou ., 2012).

Dans cette figure on observe à la surface du sol les composantes électrique et magnétique du champ électromagnétique résultant. On en déduit la résistivité apparente du sous-sol sur une épaisseur inférieure à la profondeur de pénétration p de l'onde (qui dépend de la fréquence et de la résistivité) (Bosch and Millier., 2007).

- Le rapport entre le champ électrique est le champ magnétique ne dépend que de la résistivité du sous-sol et de la fréquence de l'onde. On définit ainsi la résistivité apparente du sous-sol : RF-EM utilise comme source d'énergie les antennes radio dans la gamme de fréquence LF et VLF

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi\mu_0 f} \frac{E^2}{H^2} \dots \dots \dots (2-6).$$

- L'onde électromagnétique pénètre dans le sous-sol en s'atténuant de manière exponentielle. On définit la profondeur de pénétration p (profondeur de peau) comme la profondeur à laquelle le module des champs est divisé par environ 3.

($e = 2,718$). Dans un sous-sol homogène de résistivité ρ :

$$p = \sqrt{\rho/\pi\mu_0 f} \approx 500\sqrt{\rho/f} \dots \dots \dots (2-7).$$

Un sol résistant (p) fort, par exemple un calcaire franc) est donc facilement pénétré par une onde électromagnétique ; un sol conducteur (p faible, par exemple une argile humide) est peu pénétré. Les ondes de fréquence élevée pénètrent difficilement (phénomène de la cage de Faraday). On conçoit que le résultat des mesures de champ électrique et de champ magnétique en surface ne dépende que très peu de propriétés du sous-sol situées à des profondeurs plus grandes que p . En pratique, l'expérience montre que la profondeur d'investigation de la R M T peut être évaluée à la moitié de la profondeur de pénétration. On n'est naturellement pas maître de la résistivité du sous-sol, mais on est maître de la fréquence de l'onde électromagnétique dont on observe les propriétés à la surface (Bosch and Millier., 2007).

Ainsi, une onde électromagnétique de fréquence 1 MHz donne sur un sol de résistivité 100 Om, une profondeur de pénétration de 5 m, soit une profondeur d'investigation de 2,5 m. Cela signifie que des hétérogénéités du sol à une profondeur plus grande n'ont pratiquement pas d'influence sur le résultat de la mesure. Le poids sur le résultat de la mesure des propriétés d'un élément de sous-sol est d'autant plus fort que sa profondeur est faible ((**Bosch and Millier., 2007**)).

Les émetteurs de radiodiffusion, qui émettent dans la gamme des petites ondes de 500 à 1,6 MHz, conviennent donc généralement à l'exploration des tracés de tranchées. Ils existent presque partout dans, le monde, et c'est l'interaction entre l'onde électromagnétique qu'ils émettent et le sous-sol qui est à la base de l'utilisation de la RMT. La deuxième formule semble indiquer que des fréquences plus élevées seraient utilisables ; malheureusement, la première formule n'est plus valable au-delà de 2 MHz environ. En effet, on a sous-entendu ici que les courants de déplacements étaient négligeables, ce qui n'est plus vrai pour des fréquences élevées (**Bosch and Millier., 2007**)(Fig.2-22).

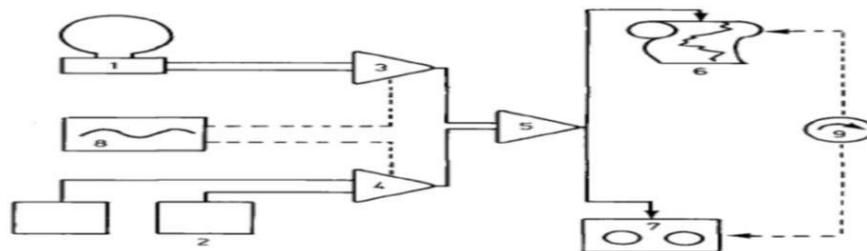


Figure .2- 22 : Schéma représentatif du principe de la radio-magnétotellurique (**Bosch and Millier., 2007**).

(1) Capteur de champ magnétique H (3) Voie H,(2) Capteur de champ électrique E (4) Voie E , (5) Calculateur analogique de la résistivité apparente, (6) Enregistreur graphique (7) Enregistreur numérique,(8) Générateur de fréquence (9) Capteur de déplacement. (**Bosch and Millier., 2007**).

2.6.2 Radar géologique

2.6.2.1 Principe physique

Le technique radar est employé pour obtenir une image de la sub-surface à haute résolution. Une impulsion électromagnétique est envoyée dans le sous-sol, par le biais d'une antenne, à

une fréquence centrale déterminée. Cette impulsion se propage en s'atténuant dans les matériaux ou les sols et, à chaque interface de deux matériaux différents, une partie de son énergie est réfléchiée vers la surface. Les échos successifs sont enregistrés en fonction du temps par l'antenne de réception (Daniels, 1996). La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permet d'obtenir une coupe-temps, ou radar-gramme, souvent représentée avec une échelle de couleur corrélée aux amplitudes des signaux et donnant des informations géométriques sur la structure auscultée (Stiefelhagen., 1998) (fig.2-23).

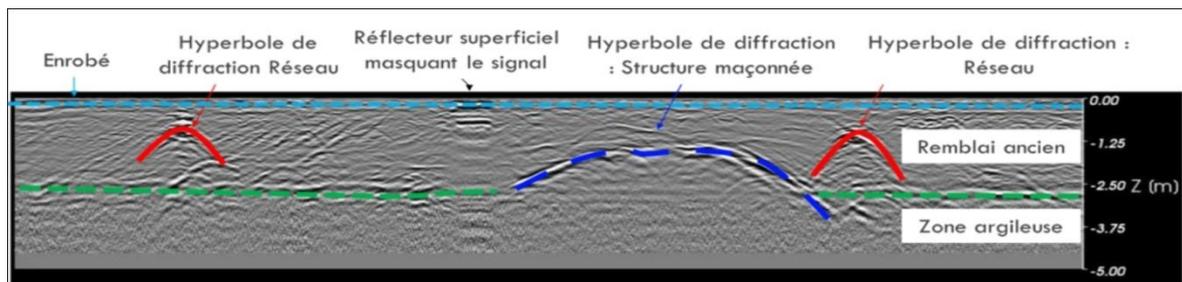


Figure .2- 23 : Schéma représentatif d'un exemple de radar-gramme (Gexplora., 2021).

La prospection présentée ici a été réalisée dans le bassin Parisien avec une antenne de fréquence centrale 400 MHz. Les niveaux supérieurs (couleurs vives) signent des paléo-chenaux conglomératiques carbonatés würmiens tandis qu'au-dessous, en teinte blanc-gris, les niveaux sans contraste correspondent à de la craie d'âge Santonien. Le temps de trajet correspondant à une figure est d'autant plus grand que la structure qui en est la cause est plus profonde. L'interprétation des coupes-temps consiste à identifier les structures (canalisations, fractures, couches géologiques, couches de chaussées, armatures dans le béton, cavités...), éventuellement à trouver leur profondeur, déterminer leur forme, etc (Stiefelhagen., 1998).

. La vitesse de propagation des ondes dépend principalement de la constante diélectrique (ou permittivité relative) du milieu environnant et peut être représentée en première approche sous la forme suivante : Avec : $V \approx C / (\epsilon_r)$ (2-8).

- V : vitesse de l'onde électromagnétique (m/s),
- C: célérité de la lumière dans le vide ($= 3 \times 10^{10} \text{ m/s}$),
- ϵ_r : permittivité relative (sans dimension).

• **2.7 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 physiques des roches du sous-sol la stabilité ou la linéarité des paramètres (Beddou., 2012).

En outre, les structures que l'on cherche à déceler ou à préciser s'écartent toujours plus ou moins des types simplifiés classiques (modèle théorique ou "expérimental"). A priori, il faudrait adopter la méthode pour laquelle la caractéristique physique est la plus différenciée d'une roche à l'autre ; la méthode gravimétrique devrait, réussir sur des formations de densités très différentes les unes des autres. Mais ce critère est trop vague pour être utilisable réellement (Beddou., 2012).

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 (Beddou., 2012).

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis en lumière les différentes méthodes géophysiques qui ont été appliquées dans géotechnique (électrique, sismique, électromagnétique et gravimétrie), grâce à nos recherches nous avons appris les différentes techniques utilisées dans ces méthodes en terme de leurs principales, domaines d'application.

Pour assurer le meilleur résultat, les interprétations géophysiques sont confrontées aux informations géologiques et géothermiques disponibles et les modèles géophysiques sont contraintes par les données provenant généralement de forages. En particulier, une bonne correspondance a pu être mise en évidence entre la résistivité et l'altération (minéralogie des argiles) liée à la température, entre les réflecteurs sismiques et des fractures productrices.

La combinaison de plusieurs méthodes géophysiques permettant d'apporter des informations différentes, qui sont confortées quand elles sont cohérentes entre elles, est la démarche la plus souvent utilisée. Le choix des méthodes et la conception de reconnaissance doit être réalisé par des spécialistes géophysiciens prenant en compte le contexte général (géothermique, géologique, hydrologique, topographique,...) ; il ne connaît pas de solution toute faite. Les applications des méthodes les plus couramment utilisées et ayant produit les résultats les plus probants présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Recherche

**bibliographique sur les
méthodes géophysiques
appliquées pour la
caractérisation des
glissements de terrain au
Nord de l'Algérie**

3.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter un état de l'art actuel sur l'application des méthodes géophysiques (La méthodes électriques, les méthodes sismiques, les méthodes gravimétriques, les méthodes électromagnétiques, radar géologique...), de la reconnaissance des instabilités gravitaires (cas des glissements de terrain de Nord de l'Algérie) et se concentre sur des articles récents qu'il a été publiés dans les derniers quinze- ans (2005-2020) dans les différents journaux international. Jusqu'à présent, par exemple les articles de **(Benaissaa et al., 2005 ; Khaldouï et al., 2020)**.

Les caractéristiques de ces phénomènes ne sont pas un problème simple qui nécessite beaucoup d'investigation, cette dernière s'appuie sur des techniques de télédétection, géologiques et la cartographie géomorphologique, et les techniques géophysiques et géotechniques doivent être adaptées aux les caractéristiques du glissement de terrain **(Beddou., 2012)**.

Au travers de ces expérimentations et applications, la prospection géophysique, au sens large, s'avère un excellent moyen d'investigation dans des secteurs à géologie complexe et difficile d'accès et elle permet d'obtenir des renseignements sur de nombreux facteurs conditionnant les glissements de terrain **(Frappa and Lebourg.,2001)**.

3.2 La bibliographique utilisé

L'ensemble des articles collectés à travers plusieurs sites d'internet pour différents journaux internationale (24 articles) **(Tab.3.1)** sur les applications des méthodes géophysiques pour la caractérisation et l'évaluation des glissements de terrain au Nord de l'Algérie. D'une façon générale, on peut dire que la position des glissements de terrain au Nord de l'Algérie a pris une grande ampleur, en particulier la partie orientale de celui-ci.

Le travail dans ce chapitre consacré uniquement sur la contribution des méthodes géophysiques (électriques (SEV et tomographie), sismiques et électromagnétiques) car il existe d'autres travaux de recherche (e.g **Fellali et al ., 2020**).

Tableau 3.1 Références bibliographique sur les différentes méthodes géophysiques appliquées pour la caractérisation des glissements de terrain au Nord de l'Algérie.

Article: Nom, Prénom et la Date	Titre de l'article	La méthode utilisée	Objectif
Benaissa et al. , 2005.	Apport de la prospection électrique à l'étude d'un glissement de terrain dans la ville de Constantine (Algérie).	La méthode électrique (sondage électrique).	Etudier l'évaluation de la fissuration en profondeur semble, et de confirmer cette profondeur du glissement.
Machane et al. , 2006.	Exemples d'aléas géomorphologiques et géologiques en Algérie.	La méthode électrique (Tomographie de résistivité). La méthode sismique (bruit de fond H/V).	Evaluer le volume et l'étendue du glissement de terrain (Constantine) et à identifier la menace potentielle.
Djafer Henni et al. , 2008.	Etude de la stabilité d'un Talus soumis à des sollicitations sismiques (étude d'un cas de Ténès Chlef.	Sondages électriques SEV.	Etudier la stabilité d'un talus dans la région de Ténès (Chlef).
Hellel ., 2009.	Utilisation de la méthode bruit de fond H/V pour l'estimation rapide de la géométrie d'une zone instable: cas du glissement d'une route à Lakhdaria (Algérie).	La méthode sismique (bruit de fond H/V).	Démontrer l'utilité du bruit de fond (H/V) dans la caractérisation géométrique des régions de glissements de terrain récents avec recadrage des terrains.
Machane et al., 2009.	le séisme ($m_w= 5$) de Laalam (Kabylie, Algérie) du 20 mars 2006 : prospections géologiques et géophysiques (bruit vibratoire ambiant) et corrélations avec les dommages.	La méthode sismique (bruit de fond H/V).	Conforte l'importance qui doit être accordée aux études sur les effets induits par les séismes modérés, et pose le problème important, des dommages que continuent de causer même les séismes faibles à modérés se produisant en Algérie, de la mise en évidence et de la cartographie des failles aveugles.
Fehdi et al., 2010.	Détection de dolines par imagerie de résistivité électrique 2D dans le bassin de Chéria (Nord-est de l'Algérie).	La méthode électrique (Tomographie de résistivité).	Découverte et exploration de dolines et caries par imagerie de résistivité électrique 2D dans le bassin de Chéria.

Martinez et al. , 2011.	Levés géophysiques pour identifier les géo- risques le long d'un viaduc planifié à Constantine, en Algérie.	La méthode électrique (Tomographie). La méthode sismique (sismique réfraction).	Cartographier les strates et de localiser les systèmes de failles et leur extension le long du tracé du pont prévu et de cartographier les zones potentielles à pentes instables.
Khaldouï. ,2013.	Identification des facteurs et de l'anisotropie directionnelle par méthodes électromagnétiques bases fréquences en milieu pseudo- Karstique dans le Nord est Algérie.	La méthode électromagnétique.	Tester les méthodes électromagnétiques pour la caractérisation de la géométrie et des propriétés des codions géologiques complexe ou la karstification.
Khaldouï et al., 2013.	Caractérisation d'un glissement de terrain par tomographie par résistivité électrique 2D: cas d'Akfadou à Béjaïa (NE de l'Algérie).	La méthode électrique (tomographie de résistivité électrique (ERT) en 2D et 3D).	Délimiter les résultats géologiques et géophysiques sur un site instable dans la région de l'Akfadou à Béjaïa.
Allek et al. , 2013.	Etude géophysique d'un glissement de terrain menaçant la route Nationale 43 dans la wilaya de Jijel.	La méthode électrique (tomographie de résistivité électrique).	Etudier l'éboulement d'un talus de bermes instables le long de la rive droite de la route nationale n°43 en direction de Ras el Afia (Jijel).
Nouioua et al. , 2015.	Cartographie des fissures souterraines par Tomographie à résistivité électrique 2D : cas des glissements de terrain du gisement de phosphate du Kef Essenoun, Djbel Onk (Nord- est de l'Algérie).	La méthode électrique (Tomographie).	Démontrer le potentiel de l'ERT pour la cartographie des cavités souterraines.
Kessasra., 2015.	Etude des glissements de terrain dans la wilaya de Mila par approche géophysique.	La méthode électrique (Tomographie électrique, profils d'imagerie électrique et un Sondage Electrique Vertical (SEV). panneaux électriques).	Comprendre l'ampleur des glissements de terrain en les caractérisant géométriquement afin que les géotechniciens puissent adapter leur solution à la réalité du sous-sol de la région et d'atteindre surtout des profondeurs intéressantes.

Bouaziz and Melbouci.,2015.	Apport de la tomographie	La méthode électrique (la tomographie	D'initier une base de données locales au niveau
Meziani et al. ,2017.	Caractérisation géotechnique et géophysique du glissement de terrain de l'autoroute Bouira- Alger (Ain turk, Algérie).	La méthode sismique (H/V bruit de fond) La méthode électrique (tomographie de résistivité électrique).	Détermination d'instabilité du sol dans la région d'Ain Turk, Bouira. Liée aux travaux de terrassement lors de la construction du Tronçon d'autoroute quelques.années plus tôt.
Mouici et al. ,2017.	Evaluation géophysique, géotechnique, et spéléologique de l'effort de Karst- Sink hole à Chéria plateau (NE Algérien)	Les méthodes électromagnétiques. La méthode électrique (tomographie de résistivité électrique).	Etudier l'évaluation géophysique (tomographie de résistivité électrique) et géotechnique de Karst- Sink hole à Chéria (NE Algérie).
Meziani et al. , 2018.	Contribution des méthodes géophysiques (HVSR et Down Hole) et géotechniques dans la caractérisation du Glissement d'Aomar (W. Bouira, Algérie).	La méthode Down hole et La méthode sismique: H/V bruit de fond (HVSR).	Application des méthodes géophysiques (HVSR et Down Hole) et géotechniques dans la caractérisation du Glissement d'Aomar (W. Bouira, Algérie).
Meziani et al. , 2018.	L'apport des méthodes géophysiques (Hvar, imagerie électrique et sismique réfraction) dans la caractérisation et la délimitation du glissement de la déviation de la ville d'Azazga (Tizi Ouzou, Algérie).	La méthode H / V bruit de fond, la sismique réfraction et l'imagerie électrique.	Description de l'un de ces glissements et de préciser l'apport des méthodes géophysiques dans la caractérisation et la délimitation du glissement de la déviation de la ville d'Azazga dans le domaine de géotechnique. Trois techniques géophysiques sont évaluées pour caractériser et délimiter l'extension de la zone instable à savoir : la méthode H / V bruit de fond, la sismique réfraction et l'imagerie électrique.
Aissaoui et al. , 2018.	Apport de la tomographie électrique à l'étude des glissements de terrain cas d'Ain	La méthode électrique tomographie de	L'identification de la surface de cisaillement entre une masse stable et une autre instable: la

	Torki (Ain defla).	résistivité électrique.	localisation de l'extension latérale et verticale des corps de glissement; et enfin, la détermination des proches d'accumulation des eaux souterraines qui conditionnent la mise en mouvement de la masse instable.
Mezerreg and Bougdal ., 2019.	Etudes géophysiques intégrées dans un site de glissement de terrain à Jijel (Algérie).	La méthode électrique (Tomographie de résistivité). La méthode sismique (sismique réfraction).	Caractériser la structure interne et les conditions hydrologiques des masses en mouvement. Déterminer la nature du mouvement du sol et les facteurs géologique et géotechnique qui régissent le mouvement.
Hallal et al ., 2019.	Evolution spatio- temporelle du glissement de terrain d'El Biar (Alger) : nouveau champ données d'observation contraintes par la pénétration du sol par investigations du la géo radar.	La méthode électromagnétique (géo radar)	Utilisation d'un géo radar avec deux antennes différentes qui se propagent sous les deux fréquences de 30 MHz et 100 MHz. E conséquence, nous avons examiné en détail cette zone de glissement de terrain et présenté une nouvelle carte de l'ensemble de la zone touchée. Nous avons également délimité la zone touchée en dessinant une nouvelle carte du glissement de terrain. En combinant les observations de terrain et le levé géophysique, nous avons mis en évidence les principales surfaces de discontinuité qui nous amènent à proposer des scénarios réalistes et plausibles concernant l'évolution du glissement de terrain

Kherrouba et al. , 2019.	Apport de la tomographie électrique à l'étude du glissement de terrain dans la région de Texenna (Nord-est Algérien).	La méthode électrique (Tomographie de résistivité).	Caractériser les zones touchées par les glissements de terrain.
Maameri and Tebboub ., 2019.	Apport de l'imagerie géophysique à l'étude des glissements de terrain sis au PK 42+260 et PK 43+050 pénétrante autoroutière 77 région de Tamenlout-Jijel (NE Algérie).	La méthode électrique (tomographie électrique).	Caractériser la structure interne, l'état hydrique de la masse en mouvement, et de profondeur de la rupture associée à ce glissement de terrain
Zaagane et al. , 2020.	Intégration des données multi source pour enquêter une morphologie 3D de glissement effectuant une zone Bordj Bou Naama (Algérie de l'ouest).	La méthode électrique (La méthode électrique (Tomographie par résistivité). La méthode sismique (sismique réfraction).	Comprendre le processus hydrodynamique dans le glissement de terrain. Estimer le volume de terrain
Khaldaoui et al. , 2020.	Utilisation des méthodes de tomographie par résistivité électrique (ERT) et d'induction électromagnétique (EMI) pour caractériser les aléas Karstiques dans le Nord-est d'Algérie.	La méthode électrique (Tomographie par résistivité). La méthode électromagnétique.	Identifier les zones à l'ensemble du site entourant le phénomène d'effondrement Karstique travers l'analyse géologique.

3. 3 Situation géographique des déferents cas des glissements de terrain

La Figure.3-1 présente la carte de risques de glissements de terrain et la situation géographique des déferents cas dans le Nord de l'Algérie, pendant les dernières quinze années.

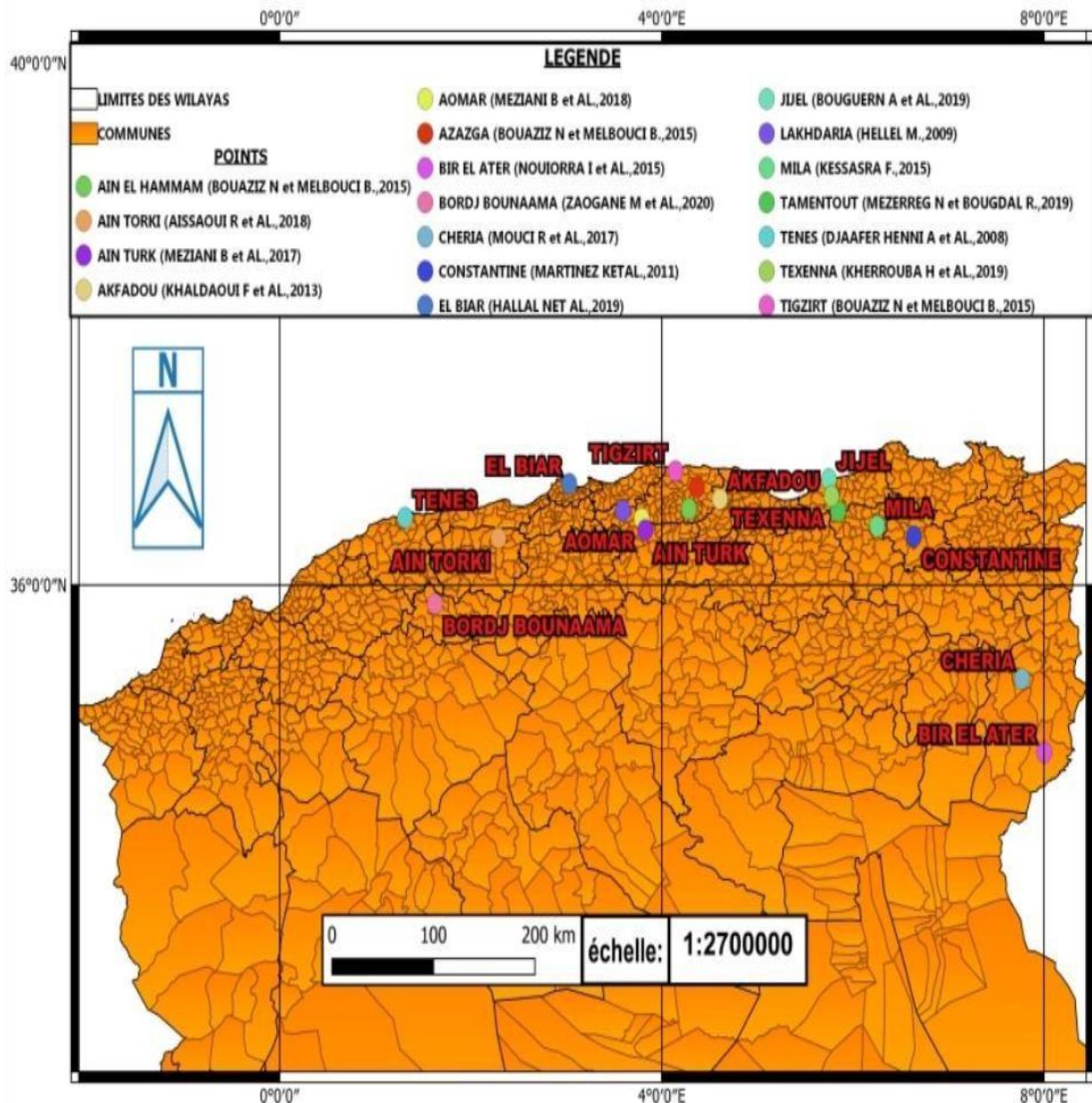


Figure.3-1 carte de situation géographique des cas des glissements de terrain dans le Nord de l'Algérie

Cette carte révèle que les majorités des glissements de terrain sont concentrées dans la partie NE(70,83%) c'est-à-dire la zone la plus active dans le Nord de l'Algérie à l'instar les régions de grande Kabylie (Tigzirt, Ain El hammam, Azazga, Tala Tgana, Tala Alam, Illilten...), Constantine, Lakhdaria, Béjaïa, Jijel, Kef Essenoun...), et la partie central(16,67%) (, Alger (El Biar...)) qu'elle est d'un risque élevé car leurs situations dans une zone urbain avec un effet séismique important qui peut activer ou réactivées instabilités gravitaires. La dernière région NO (12,5%) (Ain Defla, Chlef) est incluse dans un faible risque de glissement de terrain voire l'histogramme (Fig.3-2).

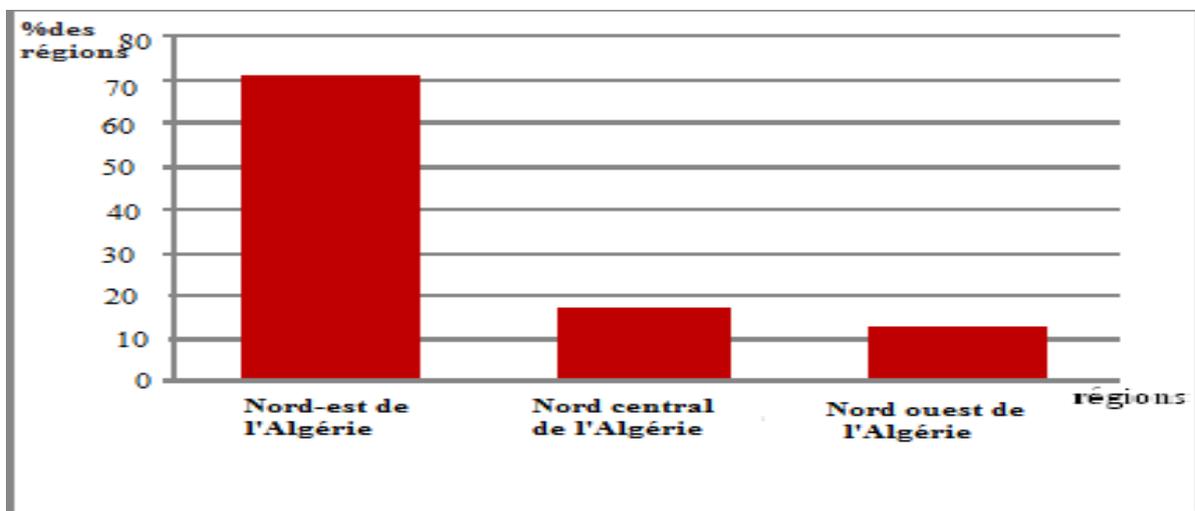


Figure.3-2 Histogramme représentant de pourcentage (%) des trois régions des glissements des terrains.

3.4 Analyse

La géophysique est basée sur l'acquisition de mesures physiques à partir desquelles des paramètres peuvent être déduits. Il n'entre pas dans le cadre de ce chapitre de détailler les différentes méthodes utilisés (électrique (79,16%), sismique (37,5%) et électromagnétique (12,5%)) pour l'étude des glissements de terrain et leurs caractéristiques voir la (Fig.3-3). Le principe de la plupart de ces méthodes peuvent être trouvées dans des déférentes articles [Machan et al., 2008 ;Kherrouba et al ., 2019; Zaagane et al. , 2020...]. Une revue des méthodes géophysiques appliquées au stade de la reconnaissance dans une enquête de glissement de terrain a été faite par les géotechniciennes qui sont illustrés avec plusieurs études de cas provenant de différents contextes géologiques et qu'ils sont présentés d'une manière générale

et discutés de diverses techniques géophysiques pour les analyses de stabilité des pentes, rapidement examiner leurs mérites et les illustrer.

Dans ce chapitre, Les principaux avantages de l'application des méthodes géophysiques sont les suivants : suit: (a) l'investigation rapide de vastes zones, par techniques de génie géologique et de la géotechnique; (b) la détermination des propriétés mécaniques des sols humides et secs basés sur les mesures de grands volumes de roche directement impliqués dans le processus; (c) les paramètres mesurés reflètent les caractéristiques géologiques, géotechniques et hydrologiques, qui parfois ne peuvent pas être identifiées séparément.

D'après la littérature et nos observations les causes principales des glissements de terrain dans le Nord de l'Algérie étaient diverses et peuvent être répertoriées comme suit: 1) Ces sites sont structurés de dépôts miocènes, néogènes, quaternaires, et les marnes, ces formations sont déposés de manière discordante sur le sol, sous-sol et sur les massifs rocheux sous leurs formes brutes ; l'accumulation des matériaux à caractéristiques mécaniques et zones chemins hydrauliques préférentiels du sol mouvements.2) Caractère lithologique représenté par un sol résiduel et des gisements de colluvions à haute hydraulique conductivité recouvrant le substratum ce qui augmente le poids de la masse humide.3) Pente topographique. 4) Les conditions météorologiques principalement des fortes précipitations ont joué un rôle essentiel dans le déclenchement des glissements de terrain.5) Infiltration des eaux de pluie au lessivage des particules d'argile et favorisant la roche (**Benaïssa et al., 2005 ; Djafer Henni et al. , 2008; Khaldouï .,2013; Mouïci et al ., 2017; Mezerreg and Bougdal R., 2019; Hallal et al., 2019; Zaagane et al. , 2020...**).

Les glissements de terrain étaient concentrés et prédominaient dans les régions de Nord-est de l'Algérie, où un pourcentage estimé de 70,83%. Car les structures des sols sont sismiquement active et représente nombreux tremblement de terre historiques destructeurs qui ont secoué (**Fehdi et al ., 2010 ; Nouioua et al.,2015 ; Meziani et al.,2018 ; Maameri and Tebboub. , 2019...**).

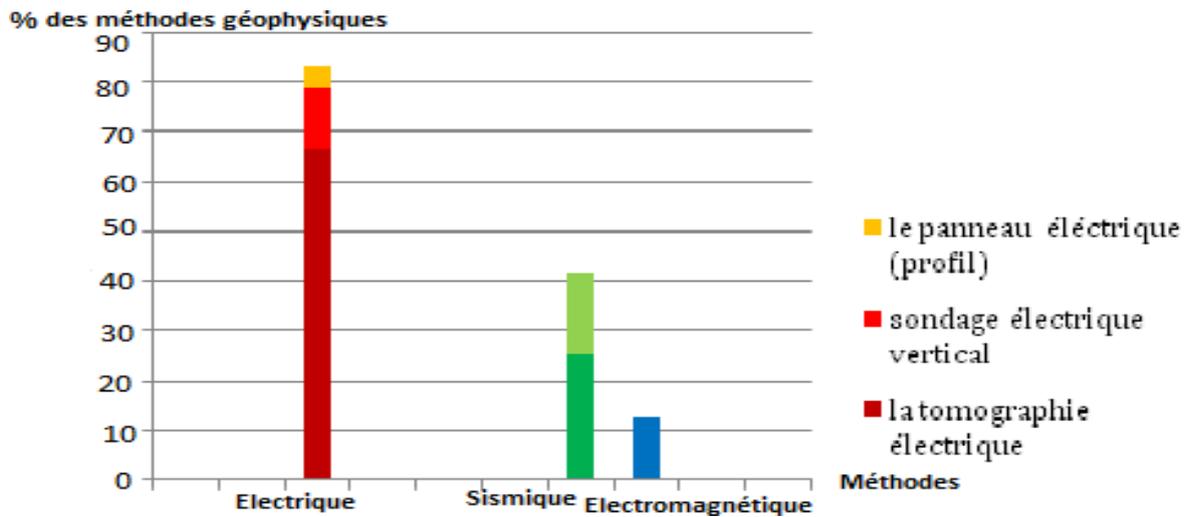


Figure.3-3 Histogramme montrant le pourcentage (%) des différentes méthodes géophysiques.

3.4.1 La méthode électrique

La prospection géophysique par méthode électrique est considérée comme une technique non destructive largement employée en géotechnique. Elle permet une investigation rapide et peu coûteuse d'un grand volume de sol. Elle se révèle adéquate d'une part, pour caractériser des sols et d'autre part, pour détecter des variations latérales à l'échelle du site étudié. Les géophysiciens et les géotechniciens en Algérie ont utilisé la méthode électrique dans un très grand pourcentage, estimé à 79,16% en raison de la géomorphologie des glissements de terrain et la précision de ses résultats. La méthode électrique dans nos études est divisée en trois techniques: la tomographie électrique par résistivité, le sondage électrique et le panneau électrique. La prospection géophysique, incluant toutes ses méthodes, devient alors un puissant outil pour optimiser les campagnes de forages et réduire leur coût (Mezzerreg et al., 2013).

Dans ces cas, les facteurs déclencheurs des glissements de terrain liés à la géologie, la géomorphologie et l'hydrogéologie du site, en plus, ils sont généralement liés à l'action de l'eau, des séismes ou de l'homme, et l'action climatique (Benaïssa et al., 2005 ; Machane et al., 2006 ; Allek et al., 2013 ; Meziani et al., 2017 ; Aïssaoui et al., 2018 ; Mezzerreg and Bougdal., 2019 ; Maameri and Tebboub., 2019 ; Khaldouï et al., 2020...).

3.4.1.1 La méthode tomographie électrique par résistivité

La tomographie électrique est une technique de prospection géophysique, qui permet d'imager en 2D ou 3D les variations de résistivité électrique du sous-sol en fonction de la profondeur. Elle a été beaucoup utilisée (66,66%) pour l'enquête sur les glissements de terrain par rapport d'autre technique dans le nord de l'Algérie qui il divisé sur la carte on trois situations : NS algérien (Constantine, le bassin de Chéria, Akfadou Béjaia, ras el Afia Jijel, Kef Essenoun Djbel Onk, Texenna, Tamenlout). Nord central de l'Algérie (Alger (Al Biar). Et le NO (Ain Turki Ain Defla).

La tomographie électrique est largement utilisée dans l'exploration des glissements de terrain à grande échelle. Les objectifs principaux sont de délimiter la surface instable et de déterminer les caractérisations des sols et des roches, aussi elles ont été menées pour déterminer à la fois la profondeur et l'orientation du pendage de la rupture (**Meziani et al.**

,2017; Mezerreg and Bougdal., 2019; Zaagane et al., 2020).

Cette technique peut être fréquemment utilisée pour l'étude du site dans les zones karstiques, surtout lorsque les morts terrain de sol est dominé par l'argile maintenant on parle sur l'étude de la stabilité d'un talus soumis à des sollicitations sismiques ; étude d'un cas de Ténès Chlef (**Djafer Henni et al., 2008**). Et le cas de cartographie des fissures souterraines par tomographie à la résistivité électrique 2D : cas des glissements de terrain du glissement de phosphate du Kef Essenoun, Djbel Onk Nord-est de l'Algérie (**Nouioua et al ., 2015**)

La méthode est basée sur la mesure du potentiel électrique entre une paire d'électrodes (M-N) lors de la transmission d'un courant continu entre une électrode paire (M N B). Cette méthode aussi détermine l'espace repartitions de la résistance du milieu (**Khaldoui et al., 2011 ; Bonaziz and Melbouci., 2015 ; Kessasra.,2015**).

3.4.1.2 Sondage électrique vertical

Le sondage électrique est une méthode d'investigation permettant de déterminer quantitativement les variations de la résistivité électrique des formations du sous-sol en fonction de la profondeur. Il est l'une des méthodes les moins utilisé de 12,5% pour savoir comment varie verticalement par à pour la technique de la tomographie électrique par résistivité. Pour caractériser les glissements survenus au niveau des trois sites :

Site 1 Apport de la prospection électrique à l'étude d'un glissement de terrain dans la ville de Constantine : La prospection a été effectuée par la méthode des sondages électriques les géophysiciens ont réalisés 39 sondages. Le quadripôle utilisé est un dispositif de Schlumberger ($AB_{max}=150$ m) (Djafer Henni et al ., 2008).

Site 2 Talus Soumis (étude d'un cas de Ténès la wilaya de Chlef) : Les sondages électriques dans cette étude réalisée sur la plateforme du glissement ont montré l'existence de quatre terrains successifs à savoir :

- **Pour le SEV1** : On constate des terrains formant des zones de faibles résistances, en surface (8Ω m) à de bonnes résistances en profondeur (80Ω m).
 - **b. Pour le SEV2** : les quatre terrains de résistivité variables sont composés comme suit :
- Deux terrains résistants avec des résistivités variant entre 50 et 200Ω m (épaisseur de 4.40m)
 - Un terrain conducteur d'épaisseur de 5.0 m et de résistivité supérieur à 10Ω m.
 - Un terrain formé de marne –calcaire et de résistivité faible de 4Ω m (Djafer Henni et al ., 2008).

Site 3 L'étude des glissements de terrain dans la wilaya de Mila par approche géophysique : La campagne géophysique réalisée par le système SARIS de SCINTREX comprend 11 profils d'imagerie électrique et 01 sondage électrique vertical avec $AB = 300$ m (Kessasra., 2015).

3.4.1.3 Le panneau électrique (Profil)

Le panneau électrique est une technique d'investigation à 2D du sous-sol car il est réalisé à la fois une investigation en profondeur comme les sondages électriques et une investigation en profil comme les sondages électriques les résultats obtenus sont une coupe géoélectrique caractérisant la distribution des résistivités du milieu. On peut dire que cette étude a été rarement utilisée (4,16%) dans les études des glissements de terrain par rapport à d'autres techniques de l'imagerie électrique, les résultats obtenus est une coupe géoélectrique caractérisant la distribution des résistivités du milieu.

A cet effet, il à été réalisés :

11 profils d'imagerie électrique sont réalisés qui ils sont appelés en général sondage d'imagerie dans l'étude des glissements de terrain dans la wilaya de Mila par approche géophysique (**Kessasra., 2015**).

3.4.2 Méthode sismique

Lorsque les glissements de terrain sont exacerbés par plusieurs facteurs, la raison principale est due à la nature et la structures du terrain et à la géologie de la zone effondrée, notamment la nature rocheuse des formations de surface et la présence de pentes en abondance et l'aspect structurel (régression de couches, joints, fractures et plis) lorsque le recul des couches est compatible avec la pente ce fait favorise l'instabilité (**Zaagane et al., 2020**).Ce phénomène s'accentue également à la suite du séisme et des fortes pluies entrainant des glissades (**Hellel ., 2009**),et le facteur humain a également un revenu seul qui provoque la croissance chaotique de la ville et le mauvais entretien des réseaux d'eaux souterraines, des glissades et des effondrements(**Machane et al.,2006**).

Grace à notre étude présentée précédemment, qui s'est limitée à l'application de méthodes géophysiques pour la caractérisation des glissements de terrain au Nord de l'Algérie (Tableau.3.1). On note que la méthode sismique a été appliquée et d'avantage utilisé (37,5%) avec ses différentes techniques qui sont :

3.4.2.1 La méthode du Bruit de fond (H/V)

Dans ces dernières années les mesures de la méthode du bruit de fond (H/V) ont été moins utilisées (25%) et appliquées pour étudier et identifier et caractériser les glissements de terrain dans le Nord de l'Algérie, en particulier la partie orientale (Nord-est Algérie), Ce terrain en raison d'une combinaison de facteurs naturels et humais. Comme la wilaya Constantine. Cette méthode à donner des résultats satisfaisants dans géométrie des formations géologiques (**Machane et al ., 2006 ; Machane et al., 2009., Meziani et al., 2017**). Cela nous permet d'évaluer rapidement et de manière satisfaisante l'étendue de la région instable ainsi que son épaisseur (**Meziani et al., 2018**).

Enfin, la technique du bruit de fond (H/V) est d'une grande utilité dans la caractérisation géométrique de zones de glissement de terrain récentes avec remaniement du sol (**Hellel., 2001 ; Meziani et al ., 2017**).

3.4.2.2 Sismique réfraction

La méthode de réfraction sismique est un outil efficace en géologie technique plus moins utilisé (16,67%) pour déterminer la profondeur du substratum rocheuse (**Mezerreg and Bougdal., 2019**). Cette méthode s'est prouvée applicable pour l'étude des glissements de terrain dans le Nord de l'Algérie, notamment dans Constantine, Jijel, Tizi-Ouzou et Tessemsilt. La sismique réfraction classe les formations en fonction de la vitesse de propagation des ondes sismique, cette méthode construire un modèle géométrique 3D de la zone de glissement de terrain pour estimer le volume de terres glissés (**Zaagane et al ., 2020 ; Martimez et al., 2011**). A la fin les résultats de cette technique peuvent aider les communautés locales à prendre la bonne décision.

3.4.3 La méthode électromagnétique

Le tableau.3-1 montre qu'une méthode est rarement utilisée de (12,5%) et appliquée pour identifier et étudier les glissements de terrain dans le nord de l'Algérie par rapport à deux méthodes (électrique et sismique). Cette méthode est efficace et un bon outil pour l'étude des glissements de terrain principalement pour déterminer les limites géométriques de la masse instable et la caractérisation de la géométrie et des propriétés des discontinuités majeures (fractures) dans des conditions géologiques complexe ou la karstification (**Khaldouai et al.,2013**).Il aide également les résultats de la méthode électromagnétique à étudier plus rapidement et mieux la complexité du glissement de terrain à évaluer sa menace et à surveiller en personne ce son évaluation (**Mouici R et al.,2017;Hellel N et al.,2019**).

Les principales causes des glissements dans ces cas sont les structures de terrain : Pseudokarsts dans des formations quaternaires du Thyrrhéen résultent d'une forme érosion (**Khaldouai et al ., 2013**). Les fractures majeures, le modèle de drainage du bassin n'est pas bien développé et contrôlé par ces fractures. Dans le bassin de Chérea, des zones ou préexistent des réseaux de fractures tectoniques permis la circulation de l'eau. Cela a conduit à la formation de corides qui constitueront des drains favorables aux eaux souterraines. Le journal de forage confirme que les calcaires éocènes sont affectés par la fracturation et la kartification, le cadre climatique de la région étude (**Mouici et al. ,2017**). L'action sismique (**Hellel et al ., 2019**).

3.5 Analyse globale et discussion

Les glissements de terrain sont des structures complexes présentant une grande variété de facteurs géologiques, géomorphologiques et les propriétés hydrogéologiques. L'étude de ces structures hétérogènes est l'une des thèmes plus difficiles pour la géophysique près de la surface. La méthode la plus couramment utilisée est la méthode d'électrique et leur développement a suscité un intérêt croissant pour l'évaluation du volume des glissements de terrain caractériser les propriétés physiques du matériau du glissement de terrain et localiser les eaux souterraines (Kessasra., 2015 ; Bouaziz and Melbouci., 2015 ; Aissaoui et al ., 2018; Zaagane et al., 2020;Khaldouai et al. , 2020). La conception d'un levé géophysique pour glissement de terrain la reconnaissance est encore une question très débattue et aucune stratégie unique n'est ressortie de cette revue. Dans de telles structures hétérogènes, la combinaison de différente technique géophysique cependant apparaissait comme une condition nécessaire pour obtenir des résultats fiables. Le choix des techniques est clairement guidé par les contrastes attendus des paramètres physiques, ainsi que le volume et la morphologie de glissement de terrain, peut également avoir un effet significatif sur la stratégie d'enquête, y compris pour raisons économiques. Cette revue a provisoirement souligné les potentiels et les limites des méthodes géophysiques pour l'étude des glissements de terrain. Parmi ces derniers, la grande difficulté d'appliquer les techniques géophysiques aux glissements de terrain est probablement la relation entre les paramètres géophysiques mesurés et les paramètres géotechniques et propriétés hydrogéologiques, ce qui empêche de donner une interprétation directe dans termes de propriétés d'ingénierie. En dehors des zones de glissement de terrain, effectuer des tentatives de comptage en géologie technique pour dériver les propriétés des sols. Tentatives en géologie technique pour dériver les propriétés des sols.

En plus de la technique électrique, le mimétisme sismique joue un rôle important dans la caractérisation des sites de fissures en enquêtant sur les glissements de terrain (Machane et al. , 2006; Hellel., 2009;Martimez et al. , 2011;Meziani et al. ,2017 ; Meziani et al., 2018).

Finalement, n'oublions pas la nécessité des méthodes électromagnétiques qu'elles sont bien que peu utilisé dans certaines études (Khaldouai et al., 2020 ; Khaldouai. ,2013 ; Mouici et al. ,2017 ; Hallal et al., 2019). La méthode électromagnétique fait partie efficace pour l'étude des glissements de terrain principalement pour déterminer les limites géométriques de la masse des zones instables et les caractérisations des propriétés des discontinuités majeures.

3.6 La combinassent entre les méthodes géophysiques

Le tableau.3-1 montre qu'il est possible de combiner des méthodes géophysiques entre elles pour évaluer et étudier et caractériser uniquement les glissements de terrain. De nombreux géophysiciens et géotechniciens ont combiné ces méthodes dans le nombreux cas de glissement de terrain étudiés dans le nord de l'Algérie, notamment dans le nord-est (Bouira , Tizi Ouzou , Constantine , ...) , Où les méthodes électriques et sismiques ont été appliquées l'une à l'autre à plusieurs reprises [**Meziani et al ., 2017 , Machane et al ., 2006 , Martimez et al ., 2011**] , Dans d'autres cas , plus de deux méthodes ont été combinées [**Mouici et al., 2017**]. Cette fusion est réalisés dans des zones de terrain difficile, ainsi que dans des sites où le taux de glissements de terrain est très élevé, et ils sont généralement complexes et présentent une menace importante pour la nature et la population. Cette combinaison vise à accélérer et faciliter l'évaluation et la caractérisation du phénomène de glissement de terrain et réaliser des études approfondies et intensives. En plus d'obtenir des informations et des résultats précieux qui aident à prendre les bonnes décisions et à trouver des solutions idéales pour réduire le problème résoudre.

3.7 Conclusion

Au début de ce chapitre nous avons souligné les études réalisées sur les différents glissements de terrain dans le Nord de l'Algérie qui a été étudiée par l'application des méthodes géophysiques et leurs différents techniques (électrique (79,16%), sismique (37,5%), électromagnétique (12,5%) ce qui a permis de bien caractériser et évaluer ces glissements de terrain. A travers nos recherches,

Nous avons remarqué que le Nord de l'Algérie est fortement exposé au risque de glissements de terrain par rapport à l'ensemble du territoire national, notamment le Nord-est (Tizi Ouzou, Jijel, Béjaia et Constantine) de (70,83%) et pour d'évaluer ce phénomène les méthodes géophysiques a été appliqué pour le traitement et pour obtenir les solutions approchantes. Nous notons qu'il existe un écart et une différence dans l'utilisation de ces méthodes uniquement.

La méthode électrique a eu la plus grande part dans son utilisation estime de (79,16%) par rapport aux autres méthodes. Au terme de ce chapitre, nous avons conclure que les méthodes géophysiques ont prouvé leur efficacité dans l'étude du phénomène des glissements de terrain dans le Nord de l'Algérie ces dernières années.

Conclusions générales

Ce travail vise à étudier et analyser l'intérêt des méthodes géophysiques pour évaluer et caractériser les instabilités gravitaires, en particulier le cas des glissements de terrain dans le Nord de l'Algérie.

En premier lieu, nous avons connu et identifié les différents types des instabilités gravitaires, et en particulier les glissements de terrain qu'il a été prouvé que ces phénomènes présentent un grand danger pour la vie humaine et les biens du fait de plusieurs facteurs naturels et humains, afin d'aborder ces phénomènes en obtenant des solutions idéales, des méthodes géophysiques ont été appliquées pour évaluer et caractériser ces instabilités. En second lieu, nous avons mis en lumière la connaître de ces différents méthodes géophysiques en termes de leurs principes, domaines d'application, avantages et inconvénients. Parmi eux, la méthode électrique, la méthode sismique, la méthode électromagnétique et la méthode gravimétrie.

Dans ce travail, nous avons constaté que les méthodes géophysiques et leurs différentes techniques appliquées à leur approche technique dans le nord de l'Algérie. Particulièrement le nord-est de l'Algérie, étaient utilisés et reposaient fortement sur la méthode électrique (la méthode tomographie) et la méthode sismique (la méthode du bruit de fond). Après l'analyse et interprétation du les références bibliographique (les articles sur l'application des méthodes géophysiques pour caractérisation des glissements de terrain dans le nord de l'Algérie), nous avons trouvé que les objectifs de ces méthodes sont :

- La méthode tomographie est utilisé pour délimiter la surface instable et de déterminer les caractérisations du sol et pour déterminer le profondeur et l'orientation du pendage de la rupture.
- La méthode du bruit de fond H/V est pour objectif est donné des résultats satisfaisants dans géométrie des formations géologiques et pour la caractérisation géométrique de zones de glissements de terrain récents avec remaniement du sol.

Au terme de ce travail, on peut dire que les méthodes géophysiques sont d'un grand intérêt pour l'évaluation et la caractérisation des glissements de terrain, seule cette dernière s'est avérée être un outil très efficace dans le domaine de l'instabilité gravitaire en Algérie,

contribue à prendre des décisions appropriée et correctes pour traiter et réduire ce phénomène et réduire ses risques pour la nature et l'humaine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aissa Mohamed H., Haddouche Kh., **2011.** Analyse et modélisation d'un glissement de terrain. Cas de Sidi Youcef (Béni Messous, Alger). Universitaire Khemis Miliana Algérie Master géotechnique.

Aissaoui R., Messaoudi S-A., Sadou O., Ahmed Zaid I., **2018.** Apport de la tomographie électrique à l'étude des glissements de terrain, cas d'Ain Torki. 7^{ème} Colloque Maghrébin de géophysique Appliquée Alger, 20-22 février 2018. At : Alger-Algérie.

Allek K., **2013.** Geophysics study of a landslide threatening the main road 43 in the Wilaya of Jijel, Algeria. Conference Proceedings, 9th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and mining Geophysics, Apr 2013, cp-346-00001 ISBN:978-90-73834-47-7. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142528>.

Andrée L., Chantal Rouleau., **2017.** Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire « Glissement de terrain dans les dépôts meubles types et causes », Consulté le 2017. (Fichier pdf, 04p.).

Anrfachade M., **2017.** Contribution à la caractérisation des aquifères par les méthodes électriques et électromagnétique Au Nord de L'île de grande comore. Mémoire de fin d'études. Université d'Antananarivo.

Astrade L., Stoffel M., Corona C., Saez, J. L., **2012.** L'utilisation des cernes de croissance des arbres pour l'étude des événements et des changements morphologiques : intérêts, méthodes et apports des recherches alpines à la dendrogéomorphologie. Géomorphologie : relief, processus, environnement, (3), p-295.

Bachand É., **2010.** Datation dendro-chronologique des mouvements de masse de grande ampleur en milieu côtier (Doctoral dissertation, Université du Québec à Rimouski).

Bard P.Y., **1995.** Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues. 10th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam.

Beddou A., **2012.** Apport des méthodes géophysiques dans la caractérisation des sols. Mémoire de fin d'étude. Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen.

Beddou A., 2012. Apport des méthodes géophysiques dans la caractérisation des sols. Mémoire de fin d'étude. Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen.

Benaissa A., 2005. Apport de la prospection électrique à l'étude d'un glissement de terrain dans la ville de Constantine(Algérie), PANGEA n 43 / 44 Juin / Décembre 2005.

Benaissaa A., 2008. Glissements de terrain-calcul de Stabilité.

Benouis Dj.E., 2010. étude d'un glissement de terrain par différentes méthodes'' ; mémoire d'ingénieur ; ingénieure d'état en génie civil option construction civil et industriel ; université de Saida ; (Algérie).

Bièvre G Maurin P., 2002. Evaluation d'un radar géologique sur le site – test géophysique du LCPC à Nantes (France). Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées.pp.73-85.

Bitri A., Perrin j., Beauce A., 1996. La sismique réflexion haute résolution : principes et applications. Rap. BRGM R 39220, 59 p., 28 fig., 0 Ann.

Bonnefoy-Claudet S. 2004. Nature du bruit de fond sismique : implications pour les études des effets de site. Thèse pour obtenir le titre de Docteur de l'université Joseph Fourier – Grenoble I, Spécialité : Science de la Terre et de l'Univers, 241 p.

Bonnefoy-Claudet S., 2004. Modélisation du bruit de fond sismique et application à l'interprétation des mesures H/V et en réseau. Thèse UJF, 08/12/2004, 241 pages.

Bosch F., Millier I., 2007. Nouveau développement dans la prospection géophysique électromagnétique. Le Very Low Frequency Electromagnetics - Gradient (VLF-EMGrad), facilitant la cartographie des zones sensibles dans l'Epikarst et dans les aquifères fissurés.

Bosch F., 2002. Shallow depth karst structure imaging with the Very Low Frequency – Electromagnetics Gradient Method (VLF EM GRAD). Thèse Université de Neuchâtel, Centre D'hydrogéologie.

Bouaziz N., Melbouci B., 2015. Apport de la tomographie électrique à l'étude des glissements de terrain en Grande Kabylie, Algérie The supply of electrical tomography in the study of the landslides in Great Kabylia, Algeria, HAL Id : hal-01167743.

Bouaziz N., Melbouci B., 2014. Caractérisation de l'aléa glissement de terrain en Kabylie (Tizi-Ouzou) Algérie.

Boudlal O., 2013. Étude expérimentale du comportement mécanique. Des fines dans la stabilité des talus et des fondations. Thèse de doctorat.

Bougdal R., Belhai D., Antoine P., 2006. Géologie de la ville de Constantine et de ses environs. Bull Serv Geol Algerian 18:3–23.

Bougdal R., Larriere A., Pincet B., Panet M., Bentabet A., 2013. Les glissements de terrain du quartier Belouizdad, Constantine, Algérie. Bull Eng Geol Environ 72 :189–202.

Bourenane H., Bouhadad Y., Guettouche., M.S., Braham M., 2015. GIS based landslide Susceptibility zonation using vicariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria). Bull Eng Geol Environ 74(2) :337–355. Doi : 10.1007/s10064-014-0616-6.

Bourenane H., Guettouche M S., Bouhadad Y., 2016. Landslide hazard mapping in the Constantine city, Northeast Algeria using frequency ratio, weighting factor, logistic regression, weights of evidence, and analytical hierarchy process methods Arab J Geosci (2016) 9: 154 DOI 10.1007/s12517-015-2222-8.

BRGM., 2004. Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Ceysac (43)., Glissement de terrain sur la route des Vignaux Hauts, commune de Ceysac (43)., Avis et recommandations. Document public, BRGM/RP -53610-FR.

Bruno M C., 2005, Le rôle des facteurs géologiques et mécaniques dans le déclenchement des instabilités gravitaires : exemple de deux glissements de terrain des Pyrénées Atlantiques (Vallée d'Ossau et Vallée d'Aspe). Thèse de doctorat. L'Université Bordeaux, 49p.

Chamley H., 2002. – Environnements géologiques et activités humaines. – Vuibert, 512 p. C'est le cas de figure du site de Gouet soule où la suppression partielle de la butée en pied de talus peut induire un déséquilibre dans le massif.

Changwi N., 2012. Méthodes des risques dues aux éboulements des roches dans les mines souterraines. Université officielle de Bukavu.

Chapellier D., 1981. De l'importance des cartes de résistivités. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 74, 651-660.

Charles L., 2020, Géophysique appliqué 1 à Bérubé Polytechnique Montréal, la gravimétrie, <https://glq2200.clberube.org/chapitres/docs/gravi-concepts-champsterrestre#gravim%C3%A9trie>

Ciabatta L., Camici S., Brocca L., Ponziani F., Stelluti F., Berni N., Moramarco T., 2016. Assessing the impact of climate-change scenarios on landslide occurrence in Umbria Region, Italy. *J. Hydrol.*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.007.

Comité technique AIPCR des terrassements. 1997 drainage, couches de forme (C12) glissement de terrain technique d'évaluation du risque – 129 pages. Constantine city, Northeast Algeria using frequency ratio, weighting factor, 163 logistic regression, weights of evidence, and analytical hierarchy process methods *Arab J Geosci* (2016) 9: 154 DOI 10.1007/s12517-015-2222-8.

Cyrille F., Patrice M., 2004. Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues. Paris: cemagref, page 72.

Dahlin T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers &*

Dewitte O., 2006. Cinématique de glissements de terrain et prédiction de leur réactivation : approche probabiliste dans la région d'OUDENAARDE. Thèse de doctorat, Université de Liège, Canada. 221p.

Dikau, R., Brunsten D., Schrott L., Ibsen ML., 1996. Landslide recognition: Identification, movement, and causes. Wiley, New York.

Djaafer henni A., Saed hamoudi A., Khelifi H., 2008. Etude de la stabilité d'un talus soumis à des sollicitations sismiques (étude d'un cas pathologique des Abattoirs Ténès) , Séminaire national de génie civil "SNGC08" Chlef .

DJABRI M., 2017. Analyse numérique du comportement dynamique des remblais d'accès en sol renforcé. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra (Algérie).

Djebrou B., 2007. Traitement du sol par colonne basaltées. Mémoire de fin d'étude. Université Saad dehleb Blida Algérie.

Djerbal L., 2010. Dynamique d'évolution du glissement de terrain d'Ain El Hammam. Mémoire de fin d'étude. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Algérie).

Djerbal L., Melbouci B., 2012. Le glissement de terrain d'Ain El Hammam (Algérie) : causes et évolution. Bull Eng Geol Environ 71 :587–597. Doi: 10.1007/s10064-012-0423-x.

Durvillej L., SEVEG., 1996. - Stabilité des pentes, glissements en terrain meuble. - Techniques de l'Ingénieur, traité construction C254, 1 – 16 p.

Durvillej L., 2000. - Cours de mécanique des roches appliquée au génie civil du DEA de mécanique des sols et des ouvrages dans leur environnement, - Ecole Centrale de Paris, 87 p.

Editions, London, New-York, 236 p.

ELLIOT C.L., 1967. Some applications of seismic refraction techniques in mining exploration; In Seismic Refraction Prospecting, Soc. Expl. Geoph. Ed. A.W. Musgrave, p. 522-538.

Fantucci R., Sorriso-Valvo, M. 1999. Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago, Calabria (Italy). Geomorphology 30, pp.165–174.

Fantucci R., McCord A., 1995. Reconstruction of Landslide dynamic with Dendrochronological methods. Dendrochronologia 13, pp. 43–57.

Fehdi ch., Baali F., Boubaya DJ., Rouabhia A., 2010. Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging in the Cheria Basin (north–east of Algeria), Arab J Geosci (2011) 4:181–187 DOI 10.1007/s12517-009-0117-2.

Fella A., Ammar B., 2015. Les mouvements de terrain dans la région de sigus. (Caractérisation et mesure de prévention. Mémoire de fin d'étude. Université l'Arbi Ben Mhidi Oum Bouaghi(Algérie).

Filali M., Nechneg A., De Rosa J., Gadouri H., Meziani B., 2020. Geotechnical characterization and back analysis of a landslide in marl deposit: a case study of Algiers Sahel (coast), Algeria Journal of the South African institution of civil engineering. ISSN 1021-2019 Vol 62 No 4, December 2020, Pages 2–10, Paper0948.

Florence Ch., 2011. « Collection Prévention des risques naturels ».

Frappa M., Lebourg T., 2001. Mesures géophysiques pour l'analyse des glissements de N°9596.

Frédique F., 1990. Application de l'analyse des données à l'exploration pétrolière caractérisation des facies sismiques par analyses statistiques multivariées. Thèse de doctorat. L'institut national polytechnique de Lorraine. Geosciences 27, 1019-1029.

Guirous L., Dubois L., Melbouci B., 2014. Contribution to the study of the landslide of the city of Tigzirt (Algeria). Bull Eng Geol Environ 73: 971–986. Doi: 10.1007/s10064-014-0624-6.

Hallal N., Chaouche A., Hamai L., Lamali A., Dubois L., Mohammedi Y., Hamidatou M., Djadia L., Abtout A., 2019. Spatiotemporal evolution of the El Biar landslide (Algiers): new field observation data constrained by ground-penetrating radar investigations, Bulletin of Engineering Geology and the Environment.

Hamai L., 2016. Cours d'études d'électricité. Master 1, physique du globe, UKM.

Hellel M., Chatelain L., Cheikh Louis G, Machane DJ, Guillier B, Haddoud H., 2009. Utilisation de la méthode h/v bruit de fond pour l'estimation rapide de la géométrie d'une zone instable : cas du glissement d'une route à Lakhdaria (Algérie). Bulletin du service géologique national vol, 22, n 1, pp 69-80. 8 fig.

Hervé Nouzé GM., Pierre Ch. D., 1999, Ifremer, Géosciences marines, <https://wwz.ifremer.fr/gm/Comprendre/Nos-moyens/La-sismique-reflexion/Lessismiquesheader>, Vol: 21, pp: 25-29, nov 1999, Dernière modification le 28/06/2016. https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/glissements_terrains_types_causes.pdf.

Ilham T., 2003. Conséquence des glissements de terrains de Constantine. Le Soir.

Kessasra F 2015. Etude des glissements de terrain dans la wilaya de Mila par approche géophysique.

Khaldaoui F., Djeddi M., Djediat Y., Ydri A., 2013. Identification des fractures et de l'anisotropie directionnelle par méthodes électromagnétiques basses fréquences en milieu pseudo-karstique, Le Séminaire International sur L'Hydrogéologie et l'Environnement 5-7 Novembre 2013, Ouargla (Algérie).

Khaldaoui F., Djeddi M., Djediat Y., Ydri A ., Baker H ., Hamadou K ., Bouzar A ., 2020. Use of electrical Resistivity tomography (ERT) and electromagnetic induction (EMI) methods to Characterize Karst Hazards in north-eastern of Algeria, *abian Journal of Geosciences* (2020) 13: 1204 .

Khelil S., 2014. Etude de stabilité, modélisation et confortement du glissement de terrain de la cité des 50 logements Mezghitane (Jijel), université Abderrahmane.

Kherrouba H., Lamara M., Benzaid R., 2019. Contribution of Electrical Tomography to the Study of Landslides in Texenna Region (Northeast Algeria), Significant Applications of Geophysical Methods, *Advances in Science, Technology & Innovation*.

Kunetz G., 1966. Principles of direct current resistivity prospecting, *Monor., SER. NO2.* Geopubl.assoc.geoexplor. electricite.

Laurent M., 2008. Imagerie électrique pour géologues. Page73.

Loke M.H., Barker R.D., 1996. Rapid least-square inversion of apparent resistivity

Maameri R., Tebboub M., 2019. Apport de l'imagerie géophysique à l'étude des glissements de terrain sis au PK 42+260 et PK 43+050 pénétrante autoroutière 77 région de Tamenlout-Jijel (NE Algérie).

Machane DJ., Bouhadad Y., Cheikh Louis G., Chatelain L ., Oubaiche H., Abbas K ., Guillier B ., Bensalem R ., 2006 ,Examples of geomorphological and geological hazards in Algeria , *Nat hazards* (2008) 45:295-308 DOI 10.1007/s11069- 9167-5 .

Machane Dj, Guillier B, Chatelain J.L, Bouillin J.P, Haddoum H, Guemache M.A, Zetoutou, Aourari S, S, Djadia L, Benelhadj Z., 2009. Le séisme (mw 5) de Laalam (Kabylie, Algérie) du 20 mars 2006 : prospections géologiques et géophysiques (bruit vibratoire ambiant) et corrélations avec les dommages. *Bulletin du service géologique national* vol. 20, n° 3, pp.357-373, 10 fig., 1 tabl., 2009.

Malet J.P., Hartig S., Calais E., Maquaire O., 2000. Apport du GPS au suivi en continu des

Malet J.P., Maquaire O., Calais E., 2002. The use of Global Positioning System Techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super- Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology* 43, 33-54.

Marescot, L, Régis M, Dominique Ch., 2008. Resistivity and induced polarization surveys

for slope instability studies in the Swiss Alps. *Engineering Geology* 98.1- 2 (2008): 18-28.

Martinez K., 2011, geophysical survey to identify geohazards Along a planned viaduct in Constantine, Algeria, Conference Proceedings, 73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011, May 2011, cp-238-00349.

Mezerreg N, Bougdal R., 2019. Intergrated geotechnical and geophysical investigations in a landslide sitebat Jijel, Algeria. *Journal of African Earth sciences*. Vol 160, 103633.

Meziani B, Machane DJ, Bendaoud A , Cheikh Louis Gh , Oubaiche H , Chabane S , Bensalem R , Moulouel H ., 2017 . Geotechnical and geophysical characterization of the Bouira - Algiers highway (Aintuck, Algeria) landslide, *Arab J Geosci* (2017)10: 117 DOI 10.1007/s12517-017-2926-z.

Meziani B., Machane D., 2017. Bendaoud, A., Cheikh Lounis, G.H., Oubaiche, E.L.H, Chabane, S., Bensalem, R., Moulouel, H., 2017. Geotechnical and geophysical Characterization of the Bouira-Algiers Highway (Ain Turck, Algeria) landslide. *Arab J Geosci* 10:117. Doi10.1007/s12517-017-2926-z.

Meziani B., Gadouri H, Bouderbala AEK, Itatahine AEF, Ouad M., 2019. Contribution of geophysical and geotechnical to the evaluation of the landslide appeared along the road of the AEP pipe from Acerdoune in Djebahia (W.Bouira). 1International Congress on Advances in Geotechnical Engineering and Construction Management (ICAGECM'2019) à l'université 20 about 1955, Skikida (Algerie). *Mouvements de terrain Application au glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. C.R.Acad.Sci.Paris, Sciences de la terre et des planètes, 331, pp.175-182.

Mouici R, Baali F, Hadji R, Boubaya DJ, Fehdi ch , Didier C , Bruno A ., 2017, Geophysical, geotechnical, and speleologic assessment for karst-sinkhole collapse genesis in Chéria plateau (ne Algeria) , *Mining Science*, vol. 24 , 2017 , 59 –71.

Nakamura Y., (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micro tremor on the ground surface. *QR of R.T.R.*, 30-1.

Nassamou y, Elhor s ., 2020. Les essais géophysiques appliqués dans la connaissance des différentes couches et la recherche des gisements. (Étude d'un cas réel). *Mémoire de fin d'étude*. Université Ahmed Draia Adrar).

Nouioua I , Fehdi ch , Boubaya DJ , Brahmi S , Djellali A ., 2015 , Mapping underground cracks using 2D electrical resistivity tomography: the case of the landslide of Kef Essenoun phosphate deposit, Djebel Onk (northeast of Algeria). Arab J Geosci (2015) 8:7731–7738 DOI10.1007/s12517-014-1769-0.

ORRM., 2018. Observatoire régional des risques majeurs, les effondrements et les affaissements.

Parasnis D.S., 1986. Principles of applied geophysics, Fourth Edition. Chapman and Hall

Pollet N., 2004. Mouvements gravitaires rapides de grandes masses rocheuses : Apports des observations de terrain à la compréhension des processus de propagation et dépôt. Application aux cas de La Madeleine (Savoie, France), Flims (Grisons, Suisse) et Köfels (Tyrol, Autriche). – Thèse ENPC, 252p. Pseudo-sections by a quasi-newton method. Geophysical Prospecting 44, 131-152.

Richard L., 2007. Géophysique appliquée au génie civil. Rapports des Laboratoires des ponts ET chaussées.

Robitaille V., Tremblay, D., 1997. Mécanique des sols théorie et pratique, Modulo éditeur.

Schweingruber F.H., 1993. Trees and wood in dendrochronology. Morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology. 402 p.

SELLAMI S., BELAMRI, S., 2014. Etude de stabilité et de confortement du glissement de terrain CW16 Ait Idriss Bejaia, Université Abderrahmane MIRA- Bejaia Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur Département de Génie Civil

Shout H., 2012. La géophysique, Université Constantine, Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du territoire.

Stiefelwagen W., 1998. Radio Frequency Electromagnetics (RF-EM): Kontinuierlich messendes Breitband-VLF, erweitert auf hydrogeologische Problemstellungen. Thèse Université de Neuchâtel, Centre d'hydrogéologie.

Stoffel M., Lievré I, Conus D., Grichting M.A., Raetzo H., Gartner H.W., Monbaron M., 2005. 400 Years of debris-flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland. Arctic Antarctic Alpine Research, 37 (3), 387–395.

Stoffel M., Bollschweiler, M., 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research an overview. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 8, 187–202.

Szymczak S, Bollschweiler M., Stoffel M., Dikau R., 2010. Debris-flow activity and snow avalanches in a steep watershed of the Valais Alps (Switzerland): dendrogeomorphic event reconstruction and identification of triggers. Geomorphology, 116(1-2), 107-114.

Véronique N., 2004. Les méthodes de résistivité électrique et de potentiel spontané appliquées aux sites contaminés. Géophysique [physics.geo-ph]. Université de droit, d'économie et des sciences - Aix-Marseille III, Français. Fftel-00007727.

Villard P., Briançon L. ; 2018. Le renforcement des sols techniques devenues indispensables.

Wathelet M., 2005. Array recordings of ambient vibrations: surface wave inversion. Ph.D. thesis, Liège University, May 12, 2005, 161 pages.

Yi L, Xu C, Zhang X, Wen Y, Jiang G, Li M., Wang Y., 2017. Joint inversion of GPS, InSAR and teleseismic data sets for the rupture process of the 2015 Gorkha, Nepal, earthquake using a generalized ABIC method. Journal of Asian Earth Sciences. 148, 121-130. Doi, 10.1016/j.jseaes.2017.08.029.

Youcef H., 2006. Application des méthodes géophysiques à l'étude de deux sites (Kapellen et Grenchen) de l'aquifère poreux complexe du Seeland. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar - Annaba (Algérie).

Zaagane M , Refas S, Abbache A , Mouassa S , Khaldi A ., 2020 . Multisource data integration to investigate a 3d landslide morphology affecting an urban area: case of Bordj Bou Naama (west Algeria), mining science, vol. 27, 2020, 227–251.