

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : GEOPAC

Structure de Recherche : Laboratoire de Géophysique et Risques Naturels

Discipline : Sciences de la Terre

Spécialité : Risques naturels- Géotechnique- Géophysique

Présentée et soutenue le 08/02/2024 par :
Benyounes TAJ

Le titre de la thèse

**Synergie des outils géotechniques et géophysiques pour l'évaluation de la vulnérabilité
aux glissements de terrain dans le littoral du Rif interne entre Jebha et Oued Laou**

JURY

Jamal AL KARKOURI	PES	Doyen de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Université Ibn Tofail. Kénitra	Président
Mohammed ACHAB	PES	Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat	Examineur/Rapporteur
Adil ZABADI	PES	Directeur de l'Institut National d'Aménagement et d'Urbanisme, Rabat	Examineur/Rapporteur
Nordine NOUAYTI	PH	ENSA d'Al Hoceima, Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan	Examineur/Rapporteur
Said LAARIBYA	PH	Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Université Ibnou Tofail. Kénitra	Examineur
Amal SAIDI	PH	Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat	Examinatrice
Mohamed MASTERE	PES	Directeur de l'Institut Scientifique, Université Mohamed V, Rabat	Directeur de Thèse

Année Universitaire : 2023-2024

Dédicaces

A

La mémoire de mes parents que Dieu leur fasse miséricorde

A

Tous les membres de ma famille

A

Tous ceux qui m'ont encouragé et assisté de près ou de loin

Remerciements

Ce travail de recherche ne pouvait avoir le jour sans l'assistance et l'aide de plusieurs professeurs, doctorants, ingénieurs et techniciens. Il a été réalisé au sein du Laboratoire de Géophysique et Risques Naturels (LGRN), de l'Institut Scientifique, avec la collaboration de la Direction des Routes du Ministère de l'Équipement et de l'Eau.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, le Professeur **MASTERE Mohamed**, Directeur de l'Institut Scientifique pour sa confiance et son soutien durant mes cinq années de recherche. Son encouragement m'a permis de trouver chemin dans le monde de la recherche.

Je remercie tous les Professeurs et chercheurs du Département Géomorphologie et Géomatique (D2G) de l'Institut Scientifique qui m'ont beaucoup aidé durant toutes les phases de mes recherches doctorales.

Je remercie en particulier, le président de jury, Monsieur **AL KARKOURI Jamal**, Doyen de la Faculté des Sciences Sociales et Humaines à l'Université Ibn Tofail, Kénitra, d'avoir accepté de présider ma soutenance et juger mon travail.

Je remercie Monsieur **ACHAB Mohammed**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à l'Institut Scientifique, en tant que rapporteur examinateur, de cette thèse, pour avoir consacré de son précieux temps pour évaluer mon manuscrit et émettre ses précieuses remarques

Je remercie Monsieur **ZABADI Adil**, Directeur de l'Institut National d'Aménagement et d'Urbanisme ; en tant que rapporteur examinateur, de cette thèse, pour le soin qu'il a pris pour évaluer mon travail et émettre ses remarques très intéressantes.

Je remercie Monsieur **NOUAYTI Nordine**, Maître de Conférence Habilité à l'ENSA d'Al Hoceima, en tant que rapporteur examinateur, de cette thèse, pour avoir consacré de son temps pour juger mon travail et me faire part de ses précieuses recommandations.

Je remercie Madame **SAIDI Amal**, Maître de Conférence Habilité à l'Institut Scientifique de Rabat, en tant qu'examinatrice pour avoir accepté d'examiner et apprécier mon travail de thèse.

Je remercie Monsieur **LAARIBYA Said**, Maître de Conférence Habilité à la Faculté des Sciences Sociales et Humaines de Kénitra, en tant qu'examineur pour sa précieuse évaluation de cette thèse.

Je voudrais remercier Monsieur **EL FELLAH Bouchta** ancien professeur chercheur au département D2G de l'Institut Scientifique qui m'a souvent orienté dans mes recherches.

Je remercie les ingénieurs et techniciens de la Direction des Routes du Ministère de l'Équipement et de l'Eau, en particulier ceux du service infrastructure de Chefchaouen, pour leur assistance et leur aide considérable.

Je remercie tous les amis et collègues qui m'ont assisté dans mes travaux de recherche et collaborer avec moi dans les divers articles et publications. Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail. Je n'ai pas cité les noms de mes professeurs et collaborateurs de peur d'oublier quelques-uns. Ils méritent tous mes remerciements et ma reconnaissance.

Préface

En tant qu'ingénieur génie civil, j'ai toujours eu recours aux études géotechniques pour comprendre les caractéristiques mécaniques du sol des divers projets et aussi pour pouvoir proposer les dispositions constructives des fondations, des infrastructures et divers ouvrages de soutènements. Les résultats de ces études sont cruciaux, pour éviter tout dysfonctionnement dans la stabilité de l'ouvrage mais surtout pour assurer sa pérennité.

J'ai constaté alors, que les investigations faites par les laboratoires sont souvent ponctuelles et limitées à l'enceinte du projet. A tel point qu'on trouve parfois, que pour deux projets mitoyens, réalisés à des dates différentes ; l'étude récente ne fait aucune référence à l'ancienne, sans pour autant essayer d'exploiter les sondages et les résultats déjà obtenus. Aussi, les rapports géotechniques sont pauvres en données géologiques, morphologiques, hydrologiques et tectoniques. La plus part de ces documents contiennent une petite introduction qu'ils répètent à l'occasion de chaque mission. Les informations à caractère général donnant une analyse spatiale concernant la présentation géomorphologique du terrain sont quasi absentes, encore moins celles traitant l'aspect hydrologique, stratigraphique et lithologique du site.

Cette carence dans les informations et cette présentation machinale des rapports de sols a rendu les investigations géotechniques non exploitables à grande échelle. En plus, les résultats restent malheureusement non accessibles au public et non réutilisables par les opérateurs économiques et les chercheurs académiques.

Les résultats de la majorité des études géotechniques sont souvent classés à la fin du projet dans l'archive des oublis. Sachant que le coût de ces interventions, en particulier ceux liés à des sondages et essais sur site, restent très chers, il est donc important d'en faire profiter les divers intervenants et en particulier ceux qui opèrent dans le domaine de la recherche.

Les études géotechniques sont d'une grande utilité aux concepteurs de projets et cela pour éviter la réalisation d'ouvrages vulnérables aux risques naturels divers. La résilience des bâtiments et des infrastructures est conditionnée par une bonne étude du sol et une connaissance totale de ces performances mécaniques.

Le champ disciplinaire des risques naturels a besoin de la banque de données résultant des investigations de reconnaissance géotechniques faites antérieurement aux voisinages du site étudié. Et le géotechnicien a besoin aussi des résultats des recherches traitant les aspects structuraux, géomatique et géophysique dans la zone d'étude. Cette interaction entre géotechnicien, géophysicien, géologue, géomorphologue, hydraulicien et sismologue va ouvrir la porte vers de nouvelles horizons dans le domaine de la recherche scientifique, et va certainement enrichir le savoir-faire et l'engineering de bâtir et d'entretenir.

Dans cet esprit, et par le biais de cet humble travail, je tente de piocher dans le vaste terrain de recherche relatif aux aléas naturels, en espérant qu'il soit utile pour les chercheurs et les ingénieurs intervenant dans ce domaine.

Ce projet a vu le jour grâce à la contribution effective de l'équipe pluridisciplinaire du département D2G de l'institut scientifique, qui est motivée par la recherche et le partage des données et du savoir-faire. Je tiens à remercier en particulier mon Directeur de thèse le

Professeur Mastere Mohamed, qui m'a fait confiance et m'a aidé à trouver chemin dans le vaste monde de la recherche. Dans cette équipe, j'étais souvent l'ingénieur génie civil, parfois le géotechnicien qui ramenait les études et investigations dans les terrains très vastes du Rif interne, aux problèmes à petite échelle de notre zone d'étude et aux prospections à petites profondeurs du sous-sol.

Ce travail se veut une contribution d'ingénieur pour les chercheurs, où ils peuvent trouver un recueil des essais géotechniques exploitables dans les études des mouvements de terrain et en particulier les glissements de terrain. C'est aussi un rappel pratique de la prospection géophysique par la méthode de tomographie de la résistivité électrique appliquée aux études géologiques, hydrogéologiques et structurales.

Résumé

La rocade méditerranéenne ou la nationale N16, est un projet stratégique national. Cette route est indispensable pour désenclaver les villes et localités du Nord du Maroc, afin de promouvoir leur économie et permettre aux populations de se déplacer aisément et avec plus de sécurité. Les travaux d'aménagement ont débuté vers la fin du vingtième siècle et sont achevées en 2012. La réalisation de cette route a engendré des terrassements en déblai ou en remblai avec des volumes colossaux. Le paysage de la côte du Rif interne, donnant sur la mer de la Méditerranée, a été métamorphosé. Des talus qui étaient stables, sont devenus très actifs et menacent régulièrement les populations et bloquent la circulation routière suite à chaque période de pluie.

Les problèmes d'instabilité sont apparus dès les premiers jours de la mise en service de la rocade méditerranéenne. Il y a même des sections qui ont manifestées leurs activités en phase de chantier. Actuellement, l'entretien de cette route coûte très cher au budget de l'état et des sommes importantes sont engagées chaque année pour parer aux problèmes d'instabilité qui se manifestent dans plusieurs sections. Mener des études de recherche pour dresser un état des lieux de ces talus instables, d'essayer de comprendre leur dynamique et juger leur degré de risque, serait d'une grande utilité pour les chercheurs et les décideurs de l'état marocain. Dans la présente thèse, nous allons nous pencher sur la stabilité de onze sections de la route N16, situées entre Oued Laou et Jebha, en essayant de participer à cette campagne de reconnaissance et d'identification de zones instables.

Dans notre étude, nous avons suivi une nouvelle démarche scientifique de diagnostic englobant les analyses géomorphologiques et structurelles tout en faisant appel suivant les besoins, aux procédés de prospections géotechniques et géophysiques par tomographie électrique-2D. L'objectif est de comprendre la dynamique de ses versants actifs et juger les risques qu'ils présentent. Les résultats obtenus montrent l'efficacité des prospections géotechniques utilisées pour étudier localement les mouvements de terrain. Ils ont permis d'avoir des données précises sur la lithologie du terrain et les plans de faiblesse. Les analyses morphologiques et levées topographiques ont permis de comprendre le régime dynamique des talus instables. La technique de prospection par tomographie électrique qui est rarement utilisée dans l'étude des glissements de terrain du nord du Maroc ; s'est avérée très utile pour confirmer les présentations lithologiques, définir les surfaces de rupture et aussi détecter les zones à grande altération.

Parmi les onze sections étudiées, sept d'entre elles se trouvent dans un état très critique et présentent un risque important. Les instabilités constatées dans les talus, menacent directement les infrastructures routières, dégradent l'état des véhicules et mettent en danger les personnes qui empruntent cette route. Les solutions et remèdes doivent être plus radicaux tout en essayant de sortir du cadre d'intervention ordinaire d'entretien routier.

Mots clés : Rocade méditerranéenne, Rif interne, Risques, Glissement de terrain, Géotechnique, Tomographie Electrique, Maroc.

Abstract

The Mediterranean ring road, or N16, is a strategic national project. This road is essential for opening up the towns and cities of Northern Morocco, promoting their economy and enabling people to move around more easily and safely. Work on the road began towards the end of the twentieth century and was completed in 2012. The construction of this road has involved the excavation or backfilling of colossal volumes of material. The landscape of the internal Rif domain, overlooking the Mediterranean Sea, has been totally transformed. Slopes that used to be stable have become very active, regularly menacing people and blocking road traffic following each period of rain.

Problems of the instability appeared from the first days and the Mediterranean ring road was brought into service. Some sections even showed signs of activity during the construction phase. At the present, the maintenance of this road is costing the state a great deal of money, and large sums are spent every year to deal with the instability problems that are appearing in several sections.

Conducting research studies to draw up an inventory of these unstable slopes, trying to understand their dynamics and judging their degree of risk would be of great use for researchers and decision-makers in the Moroccan state. In this thesis, we are going to look at the stability of eleven sections of the N16 road, located between Oued Laou and Jebha cities, to address and identify the unstable areas.

In our study, we followed a new scientific diagnostic approach using geomorphological and structural analyses, through geotechnical and geophysical surveys using 2D electrical tomography as required. The aim is to understand the dynamics of these active slopes and assess the risks they present. The results obtained highlight the effectiveness of the geotechnical surveys used to study local landslide movements. They provided precise data on the lithology of the ground and the planes of weakness. Morphological analyses and topographic surveys have helped us to understand the dynamic regime of the unstable slopes. The electric tomography prospecting technique, which is rarely used in the study of landslides in Northern Morocco, has proved very useful in confirming lithological presentations, defining rupture surfaces and also detecting areas of major alteration.

Among the eleven sections studied, seven are in a very critical state, presenting a significant risk. The instabilities observed in the slopes directly threaten the road infrastructure, damage vehicles and put people using this road at risk. The solutions and remedies must be more radical, while trying to get out of the ordinary road maintenance framework.

Key words: Mediterranean ring road, Inner Rif, Risks, landslide, Geotechnical, Electrical Tomography, Morocco.

Liste des Acronymes

ADN : Agence de Développement du Nord

ADM : Autoroutes Du Maroc

CU: Consolidated Undrained

CD: Consolidated Drained

DDP: Différence De Potentiel

DMN: Direction de la Météorologie Nationale

EHTP : Ecole Hassania des Travaux Publics

IS: Image Satellitaire

JICA: Japanese for International Cooperation Agency

MEE: Ministère de l'Équipement et de l'Eau

N16 : Nationale n° 16

PK: Point Kilométrique

SIRT : Sols Indurés et Roches Tendres

TRE : Tomographie de la Résistivité Electrique

UE : Union Européenne

UU: Unconsolidated Undrained

Liste des figures

Figure 1: Tracé sommaire de la rocade méditerranéenne et zone d'étude	5
Figure 2 : Carte et coupes géologiques et structurales du Rif interne (Chalouan, 2008).	8
Figure 3: Carte Hypsométrique de la zone d'étude	10
Figure 4 : Carte de la tectonique active dans le nord du Maroc, la région d'Alboran.	12
Figure 5 : Fracture constatée dans un talus sis à l'entrée de la ville de Jebha, d'orientation NW /SE. 13	
Figure 6 : Faille type F2 observée avant Amter en venant d'Oued Laou.	13
Figure 7 : Rosace directionnelle des failles et fractures dans la zone d'étude (mesures de 2021 à 2023)	14
Figure 8 : Projection stéréographique des directions générales des failles et fractures dans la zone d'étude	14
Figure 9 : Carte reflétant le contexte structural général du nord du Maroc	15
Figure 10 : Pluies et températures maximales mesurées dans les stations de comptage.....	16
Figure 11 : Moyenne pluviométrique et de température de la zone d'étude entre 2009 à 2020 (DMN).	16
Figure 12 : Catégorie des mouvements de terrain dans le secteur d'étude	17
Figure 13 : Procédure et méthodologie générale	19
Figure 14 : Schéma du protocole d'essai granulométrique par tamisage (Riheb, 2020)	23
Figure 15 : Courbes type de résistance au cisaillement.	25
Figure 16 : Principe général de l'essai à la boîte de cisaillement ou boîte de Casagrande.....	26
Figure 17 : Exemple de dispositif d'essai à la boîte de cisaillement.....	27
Figure 18 : Droite du critère de Mohr- Coulomb.	27
Figure 19 : Schéma de principe simplifié de l'essai triaxial	29
Figure 20 : Enveloppe de rupture de Mohr- Coulomb	29
Figure 21 : Principe de l'essai pressiométrique de Menard	31
Figure 22 : Sonde tri-cellulaire pour effectuer l'essai pressiométriques de Menard.....	31
Figure 23 : Courbe type de l'essai pressiométrique.....	32
Figure 24 : Profil pressiométrique de Ménard	33
Figure 25 : Schéma de principe de l'essai à l'inclinomètre	34
Figure 26 : Description de la sonde de l'essai à l'inclinomètre.	34
Figure 27 : Exemple d'appareil de mesure (GK604D)	35
Figure 28 : Principe de mesure de la résistivité électrique au centre de AB- MN	37
Figure 29 : Gamme de résistivités des matériaux rencontrés en géophysique	38

Figure 30 : Principe simplifié de trois montages courant dans la prospection électrique appliquée dans les études lithologiques et glissements de terrain	39
Figure 31 : Equipement de mesure de la résistivité électrique utilisé dans notre étude	41
Figure 32 : Géolocalisation des sections instables dans notre zone d'étude sur image satellitaire	43
Figure 33 : Carte géologique de la zone d'étude.....	44
Figure 34 : Repérage des sections instables S1, S2 et S3 sur image satellitaire	45
Figure 35 : Premier talus instable observé en amont de la section S1 (mars 2023)	46
Figure 36 : Deuxième talus instable observé en aval de la section S1 (mars 2023).....	47
Figure 37 : Fissures constatées dans la plateforme de la chaussée dans la zone de la section S1 (mars 2023).....	47
Figure 38 : Images satellitaires de la section S1 durant les mois 1-2008 et 12-2011 (Google Earth) ...	48
Figure 39 : Images satellitaires de la section S1 durant les mois 2-2014 et 3-2021 (Google Earth)	48
Figure 40 : Etat des lieux dans la section S2 (mai 2022)	49
Figure 41 : Image reflétant les grandes dimensions du glissement qui se trouve au centre de la section S2 (aout 2022).....	50
Figure 42 : Images satellitaires de la section S2 durant les mois 1-2008 et 9-2010 (Google Earth)	51
Figure 43 : Images satellitaires de la section S2 durant les mois 8-2019 et 3-2021 (Google Earth)	52
Figure 44 : Etat de la section instable S3 (aout 2022)	53
Figure 45 : Images rapprochées de quelques dégradations dans la section S3 (mars 2023)	53
Figure 46 : Vue d'ensemble du versant reflétant l'ampleur de la zone active. Les surfaces de schiste exposées à l'air sont très lisse et provoque un effet miroir (mars 2023)	54
Figure 47 : Images satellitaires de la section S3 durant les mois 8-2003 et 1-2008 (Google Earth)	55
Figure 48 : Images satellitaires de la section S3 durant les mois 9-2010 et 12-2011 (Google Earth) ...	55
Figure 49 : Images satellitaires de la section S3 durant les mois 2-2014 et 12-2017 (Google Earth) ...	56
Figure 50 : Images satellitaires de la section S3 durant les mois 9-2019 et 3-2021 (Google Earth)	56
Figure 51 : Repérage des sections instables S4 et S5 sur image satellitaire (Google Earth 2023)	57
Figure 52 : Etat des lieux de la section instable S4 (juin 2021).	59
Figure 53 : Repérage de la faille observée sur site (C) et matérialisation des plans de schistosité (D)	59
Figure 54 : Images satellitaires de la section S4 durant les mois 12-2011 et 1-2013 (Google Earth) ...	60
Figure 55 : Images satellitaires de la section S4 durant les mois 11-2018 et 1-2023 (Google Earth) ...	60
Figure 56 : Etat des lieux de la section S5 (aout 2023).....	61
Figure 57 : Images satellitaires de la section S5 durant les mois 12-2011 et 1-2013 (Google Earth) ...	62
Figure 58 : Images satellitaires de la section S5 durant les mois 2-2014 et 1-2023 (Google Earth).	63
Figure 59 : Repérage des sections instables S6 et S7 sur image satellitaire (Google Earth 2023)	63
Figure 60 : Etat des lieux de la section instable S7 (juin 2021)	64

Figure 61 : Images satellitaires de la section S5 durant les mois 2-2016, 8-2019 et 8-2020 (Google Earth).....	65
Figure 62 : Repérage des sections instables S8, S9 et S10 sur image satellitaire (Google Earth 2023)	66
Figure 63 : Etat des lieux de la section S8 dans la zone du PK 190+600 (aout 2022).....	67
Figure 64 : Etat des lieux de la section S8 dans la zone du PK 190+200 (aout 2022).....	67
Figure 65 : Exemple de mouvement de masse qui touche les versants de la section S8 (aout 2022)..	68
Figure 66 : Images satellitaires de la section S8 durant les mois 6-2012 et 2-2016 (Google Earth).	69
Figure 67 : Images satellitaires de la section S8 durant les mois 8-2019 et 8-2020 (Google Earth).	70
Figure 68 : Affleurement dans le talus, de masses rocheuses de nature graphiteuse (mai 2022)	71
Figure 69 : Images satellitaires de la section S9 durant les mois 2-2016 et 8-2020 (Google Earth).	72
Figure 70 : Etat des lieux de la section instable S10 (mars 2023)	73
Figure 71 : Images satellitaires de la section S10 durant les mois 2-2016 et 8-2019 (Google Earth)...	74
Figure 72 : Carte géologique de la zone d'étude de la section S6.....	77
Figure 73 : Déformations et fractures observées dans le talus étudié (aout 2022).....	78
Figure 74 : Etat des lieux général de la zone d'étude de la section S6 (aout 2022).....	79
Figure 75 : Présentation des instabilités dans la zone d'étude (IS Google Earth 2023).....	80
Figure 76 : Etat des dégradations dans la zone 2 de la section S6 (aout 2022)	81
Figure 77 : Procédure et méthodologie d'étude de la section S6.....	82
Figure 78 : Localisation des forages et du profile TRE dans la section S6	83
Figure 79 : Les deux premières planches des forages SCP 1 & SCP 2.....	85
Figure 80 : Planche du sondage SCP4 entre 12 & 15 m de profondeur	86
Figure 81 : Les deux premières et les deux dernières planches du sondage SCP5	86
Figure 82 : Présentation lithologique des 5 sondages effectués dans la section S6.....	87
Figure 84 : Profils de l'essai au pressiomètre de Ménard dans le forage SCP4.	88
Figure 84 : Mesures de l'inclinomètre au niveau du forage SCP4.....	89
Figure 85 : Mesure de la déformée au niveau du forage SCP4.	90
Figure 86 : Model TRE obtenu au niveau de la section S6	91
Figure 87 : Répartition spatiale de la pluie journalière survenue le 24 mars 2020 (Direction de la Météorologie Nationale).....	94
Figure 88 : Cadre structural du Rif et de la marge sud de la Mer d'Alboran (Chalouan et al. 2008). ...	95
Figure 89 : Carte géologique locale avec indication de la zone d'étude de la section S11.	96
Figure 90 : Extrait de la carte des mouvements récents du Rif au 1/500 000.	97
Figure 91 : Présentation schématique des formations structurales et géologiques de la zone d'étude.	98
Figure 92 : Levée topographique à l'échelle 1/500 effectué en septembre 2020.	99

Figure 93 : Plans des deux failles suivant des directions différentes (juin 2021).....	99
Figure 94 : Limites des surfaces instables, sens de glissement et état des dégradations (juin 2021)	100
Figure 95 : Implantation des cinq points de forage sur le site d'étude de la section S11.....	101
Figure 96 : Exemple de carotte : Première planche des sondages SP1 & SP3 (Profondeur 0 à 7 mètres).	101
Figure 97 : Implantation du profile parallèlement à la topographie et perpendiculairement au sens de glissement et passant par le sondage carotté SCP 02.....	103
Figure 98 : Photo aérienne de la région de Jebha en 1986 (Source: service cadastral).....	104
Figure 99 : Photo amateur montrant l'état des lieux avant l'élargissement de la voie et les travaux de déblais et remodelage du talus (2005).....	104
Figure 100 : Modèle de la TRE obtenu dans la section S11 et localisation des zones altérées.	105
Figure 101 : Modèle TRE simplifié de la zone d'étude.	105
Figure 102 : Schéma analytique des carottes obtenues au niveau des sondages de la section S11. .	106
Figure 103 : Résultats de l'essai pressiométriques de Ménard au niveau du sondage SCP 02.....	107
Figure 104 : Etats de stabilité des sections étudiées avant l'aménagement de la rocade méditerranéenne	114
Figure 105 : Début de l'instabilité dans les sections étudiées	115
Figure 106 : Tracé du profil et model TRE obtenu à la section S11.....	116
Figure 107 : Tracé du profil et model TRE obtenu à la section S6.....	117
Figure 108 : Tracé du profil et model TRE obtenu à la section S3.....	118
Figure 109 : Route N16 bloquée par un important éboulement rocheux au PK 158+000 (S3)	121

Liste des tableaux

Tableau 1: Liste des agglomérations traversées par la route N16 entre Oued Laou et Jebha	4
Tableau 2: Date de mise en service des divers tronçons de la rocade et sources de financement (MEE).....	6
Tableau 3: Recueil des essais d'identification du sol au laboratoire	24
Tableau 4:Repérage des sections instables dans notre zone d'étude	43
Tableau 5 : Liste des forages et destination	82
Tableau 6 : Synthèse récapitulative de l'état des sections instables.....	109
Tableau 7 : Evaluation des risques dans les sections instables étudiées	112
Tableau 8 : Etat des sections instables avant l'aménagement de la rocade méditerranéenne	113

Sommaire

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Préface	iii
Résumé	v
Abstract	vi
Liste des Acronymes	vii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xi
Sommaire	xii
Introduction générale	1
Chapitre I : Présentation générale de la zone d'étude, problématique et méthodologie générale	4
1. Présentation générale de la zone d'étude	4
1.1 Données géographiques	4
2.1 Présentation de la rocade méditerranéenne.....	4
3.1 Caractéristiques géométriques et techniques de la N16 entre Oued Laou- Jebha	6
1.3.1. Caractéristiques géométriques.....	6
1.3.2. Caractéristiques techniques	6
2. Données géologiques, géomorphologiques et structurels de la zone d'étude.....	6
2.1 Données géologiques	6
2.2 Aspect géomorphologique	9
2.3 Contexte tectonique	10
2.4 Activité sismique	15
2.5 Données climatiques	16
3. Nature des glissements de terrains dans notre zone d'étude.....	17
4. Méthodologie générale utilisée pour étudier les versants instables	19
Chapitre II : Méthodes de prospection géotechniques et géophysiques	21
1. Essais géotechniques.....	21
1.1 Généralités sur la géotechnique et la mécanique des sols	21
1.2 Identification des sols	22
2. Essais au laboratoire	23

2.1	Essais d'identification au laboratoire	23
2.2	Essais de résistance mécanique au laboratoire	25
2.3	Essai à la boîte de cisaillement ou boîte de Casagrande.....	26
2.4	Essai Triaxial	28
3.	Essais in situ.....	30
3.1	Les sondages carottés	30
3.2	L'essai pressiométriques.....	31
3.3	L'essai à l'inclinomètre	33
4.	Quel essai choisir pour étudier les versants instables et les mouvements de terrain	35
5.	Méthodes géophysiques	35
5.1	Généralité sur la géophysique.....	35
5.2	Quelle méthode géophysique choisir pour étudier les mouvements de terrain	36
5.2.1	Principe de la tomographie électrique	36
6.	Application de la tomographie électrique à notre étude	39
Chapitre III : Etude générale des sections instables entre Oued Laou et Jebha		42
1.	Données générales	42
2.	Aperçu sur la géologie locale de notre zone d'étude	44
3.	Etude des sections instables	45
3.1.	Sections S1, S2 et S3 de part et d'autres de Stehat.....	45
3.1.1.	Section S1 située au PK 140+000	46
3.1.2.	Section S2 située au PK 156+500	49
3.1.3.	Section 3 située au PK 158+000	52
3.2.	Sections S4 et S5 à l'entrée de Jnane Ennich	57
3.2.1.	Section 4 située au PK 168+800	58
3.2.2.	Section 5 située au PK 169+100	61
3.3.	Sections S6 et S7 à côté de Amtar	63
3.3.1.	Section 6 située au PK 176+800	64
3.3.2.	Section 7 située au PK 188+300	64
3.4.	Sections S8, S9 et S10 entre Taghassa et Jebha	66
3.4.1.	Section 8 située au PK 190+200	66
3.4.2.	Section S9 située au PK 191+600	70
3.4.3.	Section instable S10	72
3.4.4.	Section instable S11	74

Chapitre IV Etude détaillée de la section instable S6	75
1. Introduction du chapitre IV	75
2. Contexte géographique de la zone d'étude de la section S6.....	76
3. Analyse géologique, tectonique et géomorphologique de la section S6.....	77
4. Contexte sismique	79
5. Aspect climatique.....	79
6. Etat des lieux de la section S6.....	79
7. Matériels et Méthodes d'investigation	81
7.1. Investigations géotechniques	82
7.2. Etude géophysique de la section S6	83
8. Résultats de l'étude de la section S6 & Discussions.....	85
8.1. Synthèse des résultats géotechniques de la section S6	85
8.2. Synthèse des résultats géophysiques de la section S6	90
9. Conclusion de l'étude de la section S6	91
Chapitre V Etude détaillée de la section instable S11	92
1. Introduction du chapitre V	92
2. Situation géographique de la zone d'étude de la section S11 et problématique	92
3. Objectifs et méthodologie pour étudier la section S11	93
4. Données climatiques locales	94
5. Données géologiques, structurelles et géomorphologiques de la section S11	94
5.1. Données géologiques	94
5.2. Géologie locale du secteur étudié de la section S11	96
5.3. Contexte structural et sismique.....	97
5.4. Contexte géomorphologique.....	97
6. Étude des mouvements de terrain dans le secteur de Jebha.....	100
6.1. Etude géotechnique de la section S11	101
6.2. Etude géophysique de la section S11	102
7. Résultats de l'étude de la section S11 et discussion	103
8. Conclusions de l'étude de la section S11	107
Chapitre VI Résultats et discussions.....	109
1. Synthèse et évaluation des risques pour les sections étudiées	109
1.1. Synthèse des analyses et diagnostics des sections instables	109
1.2. Les facteurs d'évaluation des risques pour les sections étudiés	110

1.2.1.	Les aléas	110
1.2.2.	Les vulnérabilités	110
1.2.3.	Les risques	111
1.3.	Evaluation des risques dans les sections étudiées	111
1.4.	Résultats de l'évaluation des risques et discussions	111
2.	Evaluation de l'apport de la Tomographie de la Résistivité Electrique dans l'étude des mouvements de terrain	115
3.	Définition de la surface de rupture par TRE	116
4.	Définition de la limite de la surface de glissement par TRE	116
5.	Vérification de l'activité d'un volume de terres instable par TRE	117
6.	Performances et limites de la TRE pour étudier les mouvements de terrain	118
	Conclusion générale	119
	Bibliographie	122

Introduction générale

Les études et publications traitant les risques liés aux glissements de terrain dans le Rif Marocain, se sont intéressées souvent aux mouvements de terrain classiques et qui ont été déclenchés plus au moins naturellement dans le passé. (Maurer 1968) (El Fellah et al., 1996) (Azzouz et al., 2002a) (Fellah and Mastere, 2015) (Mastere et al., 2020) (Boukhres et al., 2022), sont des exemples parmi d'autres. Leur dynamique est actuellement connue et leurs risques associés sont relativement cernés.

L'aménagement de la Rcade méditerranéenne (la Nationale 16 ou N16), le long du littoral nord du Maroc a débuté vers la fin du vingtième siècle et s'est achevé en 2012 (Ministère de l'Équipement et de l'Eau). Les travaux de terrassement en pleine masse ont mobilisés des quantités colossales de déblais et remblais. Le paysage de la côte du Rif interne donnant sur la mer d'Alboran, a été métamorphosé. Le remodelage des talus et le décaissement des collines pour suivre le tracé routier ont causé la création de plusieurs zones d'instabilité, où des versants naturellement stables sont devenus très actifs et menacent régulièrement les populations et bloquent la circulation routière. Ce risque menace directement les personnes, conditionne la circulation des véhicules et entrave le développement durable de la région. Cette intervention anthropique a donné naissance à de nouveaux glissements de terrain d'importance non négligeable et qui méritent d'être étudié et répertorié dans les futures cartes à risque de la région.

Ces instabilités mobilisent actuellement en permanence les services de la direction des routes et coutent très cher au budget de l'état. Mener des études de recherche pour dresser un état de ces nouveaux glissements de terrain, d'essayer de comprendre leur dynamique et juger leur degré de risque, serait d'une grande utilité pour les chercheurs et les décideurs, mais surtout très bénéfiques pour l'état marocain. Dans la présente thèse, nous allons se pencher sur la stabilité de quelques sections de la route, situées dans notre zone d'étude, en essayant de participer à cette campagne de reconnaissance et d'identification de ces talus instables.

Les quelques tentatives d'étude de ces nouveaux mouvements de terrain se sont basés sur les techniques d'investigations basé sur les méthodes statistiques, bibliographiques et cartographiques. (Harmouzi et al., 2019) ; (Tribak et al. 2023) sont deux exemples récents de ces publications.

Une méthodologie scientifique de diagnostic englobant les analyses géomatiques et structurelles tout en faisant appel suivant les besoins, aux procédés de prospections géotechniques et géophysiques (par TRE), est la nouvelle démarche de recherche que nous avons suivi (Taj et al., 2023a, 2023b), pour comprendre la dynamique du versant actif et juger le risque qu'il présente pour la population, les infrastructures et la circulation routière.

Les techniques d'investigations que nous avons utilisés sont géotechniques (forages, essais de Ménard, inclinomètre...) et géophysiques, enrichie par une analyse géomorphologique, géologique et tectonique du site.

La rocade méditerranéenne est longue de 527 km, une seule étude ne peut prétendre contenir l'ensemble des sections instables. Nous avons donc focalisé notre étude au tronçon se situant entre Oued Laou et Jebha. Le choix de cette partie de la route est justifié par la concentration des zones actives, la diversité des mouvements de terrain et la morphologie

conséquente des versants. Dans notre zone d'étude, nous avons recensés onze sections instables le long de la rocade. Ces sections ont été repérées par leur point kilométrique au niveau de la route et aussi avec leurs coordonnées GPS. Les onze tronçons ont été diagnostiqués suivant leur état actuel et aussi en puisant dans leur historique via les images satellitaires et les rapports des missions antérieures et expertises. Deux sections ont été étudiées en détails suivant la méthodologie instaurée et ont fait l'objet de publication dans des journaux scientifiques (Taj et al., 2023a; 2023b). Les talus étudiés sont dans des états d'instabilité variables. Et le degré du risque diffère d'un versant à un autre. Nous avons alors effectué un diagnostic de chaque section et un tableau d'évaluation a été dressé dans ce sens. Il en ressort que 7 sections présentent des risques importants et nécessitent des interventions urgentes et un traitement dans le court terme. Trois sections sont à risque moyen et le traitement de ces points instables est moins urgent que les précédentes, mais reste prioritaire et dépend de l'évolution des conditions hydrauliques du site. Enfin, une seule section est jugée à risque faible et son traitement dans l'immédiat n'est pas obligatoire.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité des prospections géotechniques utilisés pour étudier localement les mouvements de terrain et en particulier les glissements de terrain (Giraud et al., 1981; Habib, 1984; Baziz et al., 2009; Tima et al., 2018). Ils ont permis d'avoir des données précises sur la lithologie du terrain et les plans de faiblesse. Les analyses morphologiques et levées topographiques ont permis de définir le régime dynamique (Bégin and Filion, 1987; Pathier et al., 2010. Mastere et al., 2013). La technique de prospection géophysique ERT- 2D est rarement utilisée dans l'étude des glissements de terrain du nord du Maroc. Dans notre étude, elle s'est avérée très utile pour définir les aspects géométriques, les présentations lithologiques et aussi détecter les zones à grande altération (Frappa and Lebourg, 2001. Abdel-Ilah et al., 2022).

Nous espérons que ce travail va orienter les études futures et inciter les chercheurs à s'intéresser aux risques liés à ces « nouveaux » mouvement de terrain. Le but escompté est de dresser une liste exhaustive des sections instables sur la rocade méditerranéenne et aussi étudier chaque versant d'une façon détaillée. Les résultats de ces recherches seront d'une grande utilité pour les autorités compétentes. Ils vont leur permettre de prendre les décisions adéquates pour engager les opérations nécessaires afin de protéger les populations, les infrastructures et assurer une fluidité permanente de la circulation routière le long de cette importante route.

Contexte générale et plan de thèse

Ce travail de thèse concerne le problème des risques naturels liés aux mouvements de masse et glissements de terrain, qui menacent la route nationale N16, dans la zone du Rif interne, se situant entre Oued Laou et Jebha. La première phase de notre étude consiste à arrêter une liste des sections à risque majeur, pour ensuite dresser un diagnostic analytique de l'état des lieux et un suivi chronologiques de l'évolution des instabilités de chaque section. Dans la deuxième étape, on va effectuer une étude détaillée de deux sections instables bien choisies, en appliquant notre méthodologie prédéfinie.

Dans le **chapitre 1**, nous allons définir notre zone d'étude et présenter ses caractéristiques, géomatiques, climatiques, géologiques et structurales.

Dans le **chapitre 2**, Un rappel des méthodes de prospections géotechniques et géophysiques par TRE- 2D, va nous aider à comprendre le choix des divers essais en fonction des résultats escomptés.

Le **chapitre 3**, concerne l'étude générale des sections instables de notre zone d'étude.

Dans le **chapitre 4**, on va se pencher sur l'étude détaillée de la section instable S6 située au PK 176+800.

Le **chapitre 5**, est consacré à l'étude détaillée de la section instable S11 située à l'entrée de Jebha au PK 198+600

Enfin dans le **chapitre 6**, on va effectuer une évaluation du risque au niveau de chaque section, pour pouvoir juger le degré du risque et l'urgence des interventions afin de parer à ces instabilités. Les résultats obtenues seront exploités statistiquement et feront la base de notre discussion.

La dernière partie de cette thèse concernera, la conclusion qui synthétise les résultats obtenues et dresse un état des données acquises.

Chapitre I : Présentation générale de la zone d'étude, problématique et méthodologie générale

1. Présentation générale de la zone d'étude

1.1 Données géographiques

Notre zone d'étude longe la rocade méditerranéenne à partir d'Oued Laou et se termine à l'entrée de la ville de Jebha. Elle se situe dans la province de Chefchaouen, aux limites du Rif avec la mer méditerranéenne. Le paysage est marqué par des terrains très accidentés avec des versants à grand pendage dirigés vers la mer (Fellah and Mastere, 2015). Plusieurs localités sont traversées par la rocade dans cette zone (Tableau 1). Les activités principales des habitants se limitent à l'agriculture, l'élevage, la pêche et le tourisme (Joumady, 1999; O'Neill, 2009).

Tableau 1: Liste des agglomérations traversées par la route N16 entre Oued Laou et Jebha

Agglomérations traversées	PK d'entrée à la localité (km+m)	PK de sortie de la localité (km +m)	Longueur de traversée de la rocade méditerranéenne (m)
<i>Oued Laou</i>		122+000	<i>Début de notre zone d'étude</i>
<i>Kaa Asrass</i>	124+000	126+000	2000
<i>Targha</i>	131+000	134+000	3000
<i>Azenti</i>	136+500	138+000	1500
<i>Stihat</i>	142+500	145+000	2500
<i>Bouhmed</i>	148+500	150+000	1500
<i>Chmaala</i>	152+500	153+400	900
<i>Sidi Yahya Arrab</i>	162+500	164+500	2000
<i>Jnane Niche</i>	169+000	170+000	1000
<i>Argoub</i>	173+000	174+000	1000
<i>Amter</i>	179+500	180+500	1000
<i>Tahgassa</i>	187+000	188+000	1000
<i>Jebha</i>	198+600		<i>Fin de notre zone d'étude</i>

2.1 Présentation de la rocade méditerranéenne

La route nationale 16 appelée aussi rocade méditerranéenne ou rocade du Rif (Fig.1), est une route nationale qui sillonne tout le Nord du Maroc, en longeant la méditerranée sur 527 Km, depuis Tanger à Saidia, traversant plusieurs villes et villages, comme Ksar Seghir, Fnideq, Tétouan, Jebha, Al Hoceïma et Nador. C'est un projet stratégique qui a permis de réduire le temps de ce trajet de 11 à 7 heures tout en améliorant les conditions de confort et de sécurité de plus de 3 millions d'usagers annuels. Son tracé est composé de 112 km d'autoroutes ou de voies rapides, 115 km de routes existantes qui ont été réaménagées et 300 km de routes nouvellement créées (MEE).

La rocade du Rif s'intègre dans un plan d'aménagement du territoire, en contribuant aux développements socio-économique et touristique, tout en préservant l'environnement. Cette route a permis de développer le système de transport dans toutes les zones desservies. Elle a aussi facilité l'accès de la population aux équipements sociaux, à la scolarité, aux services et

aux marchandises tout en impulsant la création de nouveaux centres urbains et sites touristiques.



Figure 1: Tracé sommaire de la rocade méditerranéenne et zone d'étude
(Source de la carte : MEE)

Côté chiffre, la nationale 16 a permis d'améliorer les conditions de vie d'environ 3 millions d'habitants; de relier 3 régions, 9 provinces et préfectures et 8 grandes villes ; de permettre l'accès à plus de 200 km de plages et de desservir 4 ports et plusieurs sites touristiques.

La rocade méditerranéenne a été réalisée en huit tranches. La première a été mise en service en juin 2000 (tableau 2). Le financement a été assuré par les organismes étatiques marocains avec le concours de partenaires étrangers divers (tableau 2).

La tranche de Tétouan- Jebha est la dernière à être mise en service, en juin 2012. Elle est longue de 120 km, empruntant un terrain plat au départ de Tétouan pour aborder très rapidement les reliefs montagneux à partir d'Oued Laou. Le tronçon Oued Laou- Jebha, de 74 km (MEE), s'inscrit dans un relief difficile et traverse des zones instables caractérisées par des glissements de terrain, des éboulements et des sapements de la plate-forme par la mer.

Tableau 2: Date de mise en service des divers tronçons de la rocade et sources de financement (MEE)

MEE : Ministère de l'Équipement et du transport (Actuellement MEE). ADN : Agence de Développement du Nord. ADM : Autoroutes du Maroc. JICA : Agence Japonaise de Coopération Internationale. UE : l'Union Européenne.

Sections	Longueur (Km)	Bailleur de fond	Montants (Mdh)	Situation actuelle
Tanger - Ksar Sghir	30	METL	100	Mise en service en Mars 2002
Ksar Sghir - Fnideq	30	ADN	120	Mise en service en Août 2002
Autoroute Fnideq - Tetouan	28	ADM	1 350	Mise en service en 2008
Tétouan - Jebha	120	JICA	1 929	Mise en service en Juin 2012
Jebha - Ajdir	103	UE et METL	1 657	Mise en service en Juillet 2009
Ajdir – Ras Afrou	84	Gouvernement Italien	832	Mise en service en Septembre 2006
Ras Afrou - Ras Kebdana	92	Fonds Abu Dhabi	600	Mise en service en Juin 2005
Ras Kebdana - Saidia	20	METL et ADN	60	Mise en service en Juin 2000

3.1 Caractéristiques géométriques et techniques de la N16 entre Oued Laou-Jebha

1.3.1. Caractéristiques géométriques

- Largeur de chaussée normale de 7 m, avec une troisième voie en rampe pour les poids lourds sur 16 km; Les parties en voie express et autoroute à quatre voies sont inexistantes dans ce tronçon
- Largeur d'accotement pour la chaussée de 5 m : 2,5 m pour chaque rive

1.3.2. Caractéristiques techniques

- Le tracé routier existant a connu 24 ripages et 2 modifications de tracé
- Ouvrage hydrauliques : 222 par dalots pour une longueur de 6 411 ML et 137 en buses pour une longueur de 3 249 ML
- Ouvrages de soutènement : 116 ouvrages avec une longueur totale de 9 221 ML
- Ouvrages d'art : 10 ponts pour une longueur totale de 1 478 ML
- La hauteur maximale de déblai est 126,83 m. Elle se trouve à l'entrée de Jebha

2. Données géologiques, géomorphologiques et structurels de la zone d'étude

2.1 Données géologiques

La chaîne rifaine fait partie de l'arc Bético-Rifain (Andrieux et al., 1971), située au nord-ouest du Maroc à la marge sud de la méditerranée occidentale. Cet ensemble géologique est relativement récent, datant du début du tertiaire (Fallot, 1937, Durand-Delga et al., 1960;

Michard et al., 2008a). La chaîne rifaine est structurée par les divers mouvements tectoniques résultant de la collision des deux plaques Eurasie et Africaine, de l'effondrement de la mer d'Alboran et des grands charriages qui s'étalent sur plusieurs kilomètres le long du littoral (Milliard, 1959; Olivet et al., 1973). Le domaine rifain est formé de structures géologiques très complexes (Durand-Delga et al., 1960). Il est réparti en trois groupes d'unités paléogéographiques : les unités externes, les nappes de flysch et les unités internes (Fallot, 1937; Durand-Delga et al., 1960, Michard et al., 2008a).

Le Rif externe est constitué par une ceinture de plis et de chevauchements composé des lits de roches évaporites du Trias supérieur au Miocène, ayant pour origine la croûte continentale nord-africaine. Les structures actuelles sont le résultat des phases tectoniques du Miocène supérieur (Ait Brahim et al., 2002).

Les nappes des flyschs surplombent les zones externes du Rif. Ces flyschs d'âge créacé-Paléogène (Durand-Delga et al., 2000), Elles sont orientées Est-Ouest sous forme d'une bande (Durand-Delga et al., 1999). Ces flyschs se sont accumulés dans un bassin dont la formation, amorcée dès le Lias, assurait la liaison entre les domaines océaniques de l'Atlantique central et de la Téthys ligure (Durand-Delga et al., 1999; Alilouch et al., 2017). Les flyschs caractérisées par des séquences silico-clastique qui datent du Jurassique au début du Miocène (Burdigalien inférieur). L'origine de ces dépôts est le bassin Néotéthys qui séparaient les côtes ibériques et africaines (Olivet et al., 1973). Les dépôts des nappes de flyschs sont alimentés par des sédiments d'origine de la Dorsale calcaire et des Ghomarides (Burdigalien supérieur) (De Capoa et al. 2007).

Les nappes de Flysch Tisirène sont limitées dans leur partie Orientale du Rif par la faille majeure de Nekkour (Durand-Delga et al., 1999) ; et elles sont séparées du domaine interne, à l'Ouest, par la faille de Jebha. Aussi, les nappes de Flysch apparaissent parfois dans la morphologie du Rif sous forme de klippen au sommet des hauts reliefs (Michard, 2011).

Le Rif interne fait partie de la plaque paléogéographique d'Alboran (Fig.2). Il est composé de zones à matériel d'âge essentiellement paléozoïque et triasique avec localement une mince couverture mésozoïque à cénozoïque (Abdelkhaleq et al., 2009; Gueydan et al., 2014; Milliard, 1959). Deux grands ensembles y sont distingués d'après l'existence ou non de métamorphisme : Les Sebides et les Ghomarides (Durand Delga and Kornprobst, 1963). Ces formations sont entourées (Côté NW et SE) par une dorsale calcaire marquée par ses hauteurs altimétriques et la présence de sources aquifères. A la limite de cette chaîne on peut distinguer aussi des formations du Pré- Dorsalien (El Maz, 1989).

Les Sebides sont connus par les formations cristallines et cristallophylliennes plus au moins métamorphiques (Farah et al., 2021; Reuber et al., 1982). Elles se sont constituées de roches métamorphiques de kinzigites et de gneiss entourées de matériaux de périodotites (Gysi et al., 2011; Farah et al., 2021). Ces dépôts sont recouverts par les dépôts de matériaux quaternaires affectés par le métamorphisme (El Maz, 1989). Les Sebides sont constituées de plusieurs unités : unité du Jbel Sidi-Mohammed-El-Filali (Fallot, 1937.; Kornprobst and Vielzeuf, 1984; André Michard et al., 2008b) . unités ou nappes de Federico (Milliard, 1960-62) à degrés de métamorphisme différents (faciès granulite de haute pression ancien, faciès schistes verts "alpin") reposent, notamment dans les Beni Bousera, sur des kinzigites et des périodotites de haute pression (Reuber et al., 1982; Abdelkhaleq et al., 2009).

Les Ghomarides se présentent sous forme de schistes et grès ordovicien et silurien ; de roches volcaniques, des terrains triasiques et une zone de minéralisation dans la région de Beni Mzala (Chalouan and Michard, 1990). Les Ghomarides sont constituées de trois nappes définies par (Durand Delga and Kornprobst, 1963; Michard, 2011): La nappe d'Akaili, à la base, celle intermédiaire de Koudiat Tizian et enfin celle des Beni Hozmar au sommet (André Michard et al., 2008b). Elles sont toutes à matériel pas ou peu métamorphique.

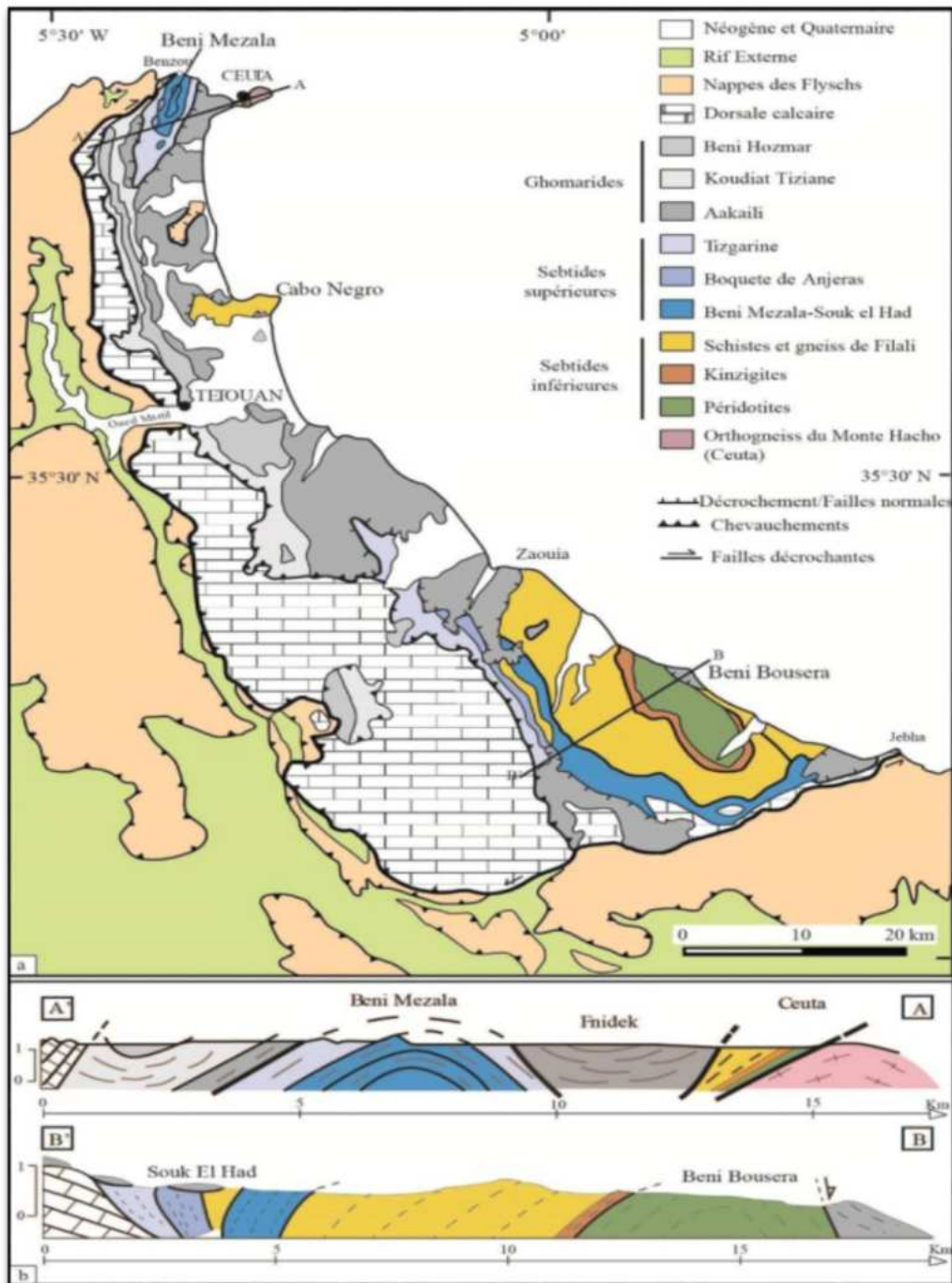


Figure 2 : Carte et coupes géologiques et structurales du Rif interne (Chalouan, 2008).

a) Carte géologique et structurale du Rif interne. b) Coupe géologique, montrant les relations structurales entre les unités du Rif Interne (d'après Chalouan et al. 2008).

La chaîne calcaire est divisée en "chaîne du Haouz" au Nord de Tétouan (Hlila et al., 1994; Leikine, 1969). Et la dorsale qui est formée de différents types de calcaires et dolomies datant du Jurassique et Crétacé (Durand-Delga et al., 1960; André Michard et al., 2008b; Farah et al., 2021). Sa série stratigraphique va du Permien à l'Oligocène mais les terrains triasico-liasiques sont les mieux représentés (Maate and Didon, 1989; Hlila et al., 1994; André Michard et al., 2008a). Cette chaîne est découpée en nappes et écailles Elle est composée de formations massives et dures dessinant une structure arquée d'orientation Nord-Ouest à Sud-Est (Leikine, 1969; Michard, 2011). Cette dorsale est très fracturée et contient parfois des karstes ; présentant un terrain favorable pour les formations aquifères à potentiel non négligeable.

Les unités prédorsaliennes (Durand-Delga et al., 1960) sont à matériel marno-gréseux du Jurassique à l'Oligocène supérieur, dont les caractéristiques sont parfois semblables à la chaîne calcaire et tantôt celles des flyschs (Maate and Didon, 1989; Durand-Delga et al., 1999).

Le secteur étudié dans la présente thèse se trouve dans le Rif interne entre Oued Laou et Jebha. Il traverse les trois grands ensembles structuraux allochtones de ce domaine (les Sebtides, les Ghomarides et la Dorsale calcaire). On peut observer parfois dans quelques sections instables, des affleurements de la nappe de Flysch (Durand-Delga et al., 1999; Michard, 2011).

2.2 Aspect géomorphologique

Notre zone d'étude est située au nord du Maroc, sur le littoral de la mer méditerranéenne. Elle traverse une bonne partie des retombées du rif interne suivant une orientation NW-SE, d'Oued Laou à Jebha. Cette zone du Rif interne est très connue par ses hauts reliefs et sa topographie très accidentée (Maurer, 1968; Gabert and Maurer, 1970; Fellah and Mastere, 2015;).

La nature du relief à grand pendage et les formes géologies vulnérables ont rendu cette région fortement enclavée et soumise à une érosion différentielle et des mouvements de terrain d'importance non négligeable (Antoine et al., 1971; Alcántara-Ayala, 2002; Fellah and Mastere, 2015). Elle est en plus parcourue par un réseau hydrographique assez dense (Gabert and Maurer, 1970; Alilouch et al., 2017), avec des talwegs et des châabas très profonds mais aussi des oueds qui ont des cours d'eau très profonds qui déversent dans la mer avec des terrasses alluviales très étendues (Benyaich, 1991). L'aspect physiographique de la zone d'étude montre l'existence d'une zone de relief en bande qui atteint un maximum d'altitude de plus de 2000 m (Fig. 3) et une zone des bassins (les bas-reliefs) formée du point de vue géologique par les marnes et correspond aux formations post-nappes (Pliocène et Quaternaire) (de Capoa et al., 2007).

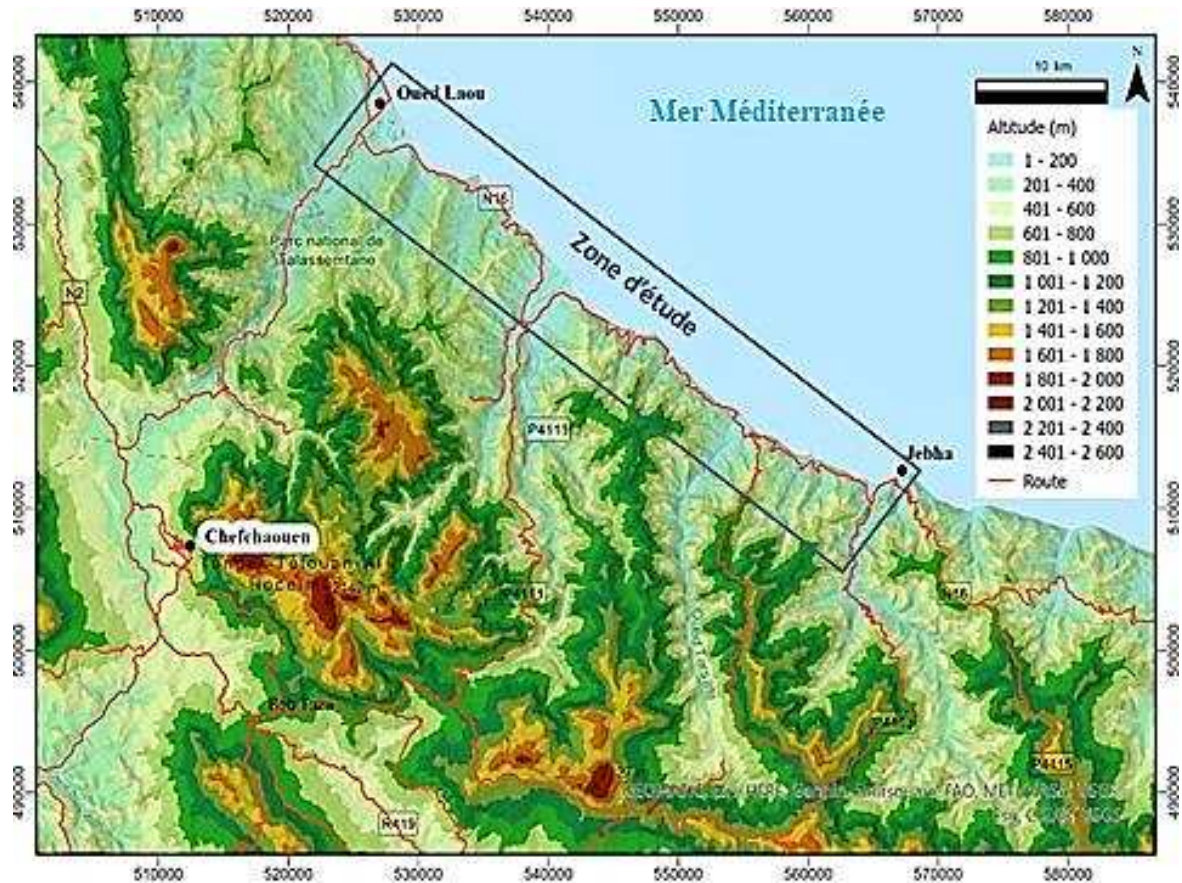


Figure 3: Carte Hypsométrique de la zone d'étude

2.3 Contexte tectonique

Le nord du Maroc forme la bordure sud de la méditerranée occidentale. C'est une zone complexe de convergence entre les plaques Africaine et Eurasiatique (Andrieux et al., 1971; Chalouan et al., 2001). La structure actuelle des différents domaines de l'arc Bético-Rifain est le résultat d'une tectonique polyphasée (Maurer, 1989; A. Michard et al., 2008; Benmakhlof et al., 2012; El Bakili et al., 2020). L'orogénèse des chaînes montagneuses de l'Atlas et du Rif sont les résultats de la longue histoire d'interactions entre ces deux plaques tectoniques (Bakili, 1989; Chalouan et al., 2001). Plusieurs blocs structuraux ont été pris dans les processus géodynamiques qui ont affecté cette région.

Certes les mouvements actuels dans la région de l'arc Bético-Rifain sont le résultat du jeu combiné de la compression due à la convergence Afrique-Eurasie, mais ils sont aussi accommodés par les trois processus essentiels : (1) la rotation antihoraire de l'Afrique, (2) l'extension syncollisionnelle au niveau de la mer d'Alboran, et (3) les contraintes déviatoriques liées à l'hétérogénéité géologique des blocs impliqués dans cette région. La coexistence de ces trois processus a élargi la zone de déformations entre les plaques dans la région (Chalouan et al., 2001; Tahayt, 2008).

L'arc Bético-Rifain, structuré pendant le cycle alpin (Chalouan et al., 2001; André Michard et al., 2008b), est découpé en de nombreuses écailles tectoniques très fracturées, avec un grand contraste rhéologique entre ses unités. Les nappes du Rif provenant des charriages de la mer d'Alboran, chevauchent la marge de la plaque africaine (Olivet et al., 1973). Elles sont soumises à des contraintes liées à la convergence oblique de direction NW-SE entre

l'Afrique et l'Eurasie (Meghraoui, 2018). Les zones frontières de plaques sont caractérisées par des activités tectoniques et sismiques importantes. Les mouvements tectoniques actuels ont été évalués dans la Méditerranée occidentale (zones d'articulation des plaques Afrique--Ibérie--Eurasie) par trois techniques de la géodésie spatiale, GPS (Stich et al., 2006; Koulali et al., 2011), InSAR (ENVISAT) et Imagerie Optique (SPOT5). Cette évaluation a été réalisée sur différentes échelles spatio-temporelles, en tenant compte des connaissances géologiques et géophysiques dans la région (Tahayt, 2008; Poujol, 2014). Le GPS a été utilisé, d'une part, pour estimer le champ de vitesses des déformations dans les Pyrénées orientales et au Maroc septentrional ainsi que la partie sud de l'Ibérie (Tahayt et al., 2008), d'autre part pour le calcul des déplacements cosismiques dans la région d'Al Hoceima (Talhaoui et al., 2005; Arioua, 2009; Koulali et al., 2011; Poujol, 2014; Romagny, 2016). L'InSAR et l'Imagerie Optique ont été mis à profit dans l'étude détaillée du séisme d'Al Hoceima ($M_w = 6.5$) du 24 février 2004. Le potentiel de chacune des techniques reste intéressant dans la quantification des déformations dans les limites de plaques tectoniques. Il y a aussi une approche de combinaison des jeux de données disponibles. Cette dernière approche a permis de suggérer deux nouveaux modèles (Villaseñor et al., 2015; Meghraoui, 2018): (1) Un modèle sur les mouvements de blocs à l'échelle régionale de la zone de convergence Afrique--Ibérie, où il est mis en évidence l'individualisation dans le Rif de trois blocs cinématiquement distincts; (2) Un modèle sur les paramètres sources du séisme à l'échelle locale de la région d'Al Hoceima, suggérant le jeu de deux failles conjuguées (Asebriy et al., 1993; Cherkaoui et al., 1990). Ce dernier modèle peut être intégré dans le premier puisqu'il concerne une limite sismogène des blocs individualisés au niveau du domaine d'Alboran (Chalouan et al., 2001; Fadil et al., 2006; Tahayt, 2008). Ces contraintes sont gérées par les structures actives de cette zone qui sont dans la majorité des décrochements et des failles à faible pendage préexistant entre les nappes (Ait Brahim et al., 2002). La vitesse de cette convergence dans cette région a été estimée entre 3 et 5 mm/an (Gabert and Maurer, 1970; Demets, 1995; Tahayt, 2008; Romagny, 2016).

Les études récentes qui se sont intéressées à l'interprétation de données GPS, associées aux données gravimétriques et sismologiques (Fig.4), ainsi que leur comparaison avec des résultats antérieurs permettent de confirmer que le Rif marocain est séparé en trois blocs, de caractéristiques cinématiques différentes (Ait Brahim et al., 2002; Arab et al., 2020; Tahayt, 2008) : (1) Le bloc de Tanger, qui se trouve au cœur de l'arc de Gibraltar, présente un mouvement vers le Sud-Est. (2) Le bloc du Rif central se déplace vers le SSW avec une vitesse apparemment plus élevée que celle des autres blocs. Il est soumis, d'une part, à la compression due à la convergence des deux plaques Afrique- Eurasie et d'autre part, à l'extension au centre de la mer d'Alboran (bassin occidental). (3) Le bloc oriental du Rif est en rotation horaire. Il est délimité par la faille d'Al Hoceima, qui le sépare du Rif central, et par la faille de Gareb–Kebdana, qui le sépare de l'avant-pays (Stich et al., 2006).

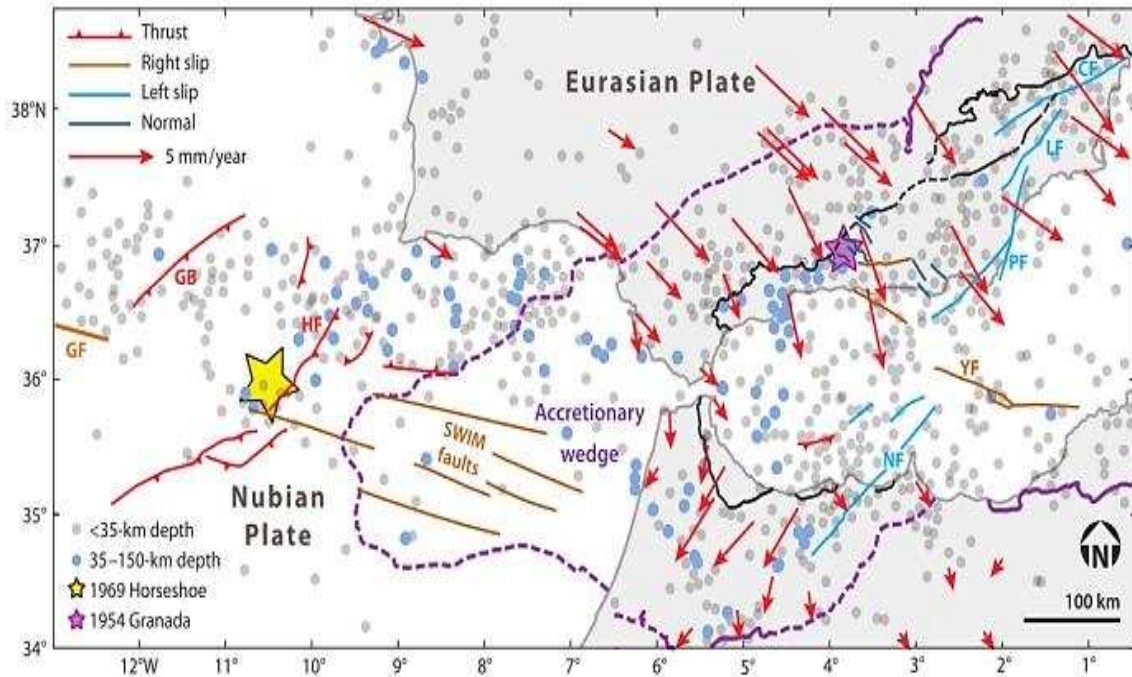


Figure 4 : Carte de la tectonique active dans le nord du Maroc, la région d'Alboran.

Abréviations: CF, Crevillente fault ; GB, Gorringe Bank; GF, Gloria Fault; HF, Horseshoe fault; LF, Lorca fault; NF, Nekkor fault; PF, Palomares fault; YF, Yussuf fault.

Cette carte montre la localisation des épicentres des séismes > M4 de 1901 à 1969. (Modifiée d'après Serpelloni et al. 2007 et Platt et al. 2013),

Dans notre zone d'étude, les unités Sebtides, Ghomarides, Dorsal, Predorsal et Flysch sont séparées par des réseaux de failles qui mettent en avant l'existence de plusieurs régimes tectoniques majeurs et successifs (Chalouan et al., 1995; Comas et al., 1999; Stich et al., 2006). Les failles en échelon avec un régime transtensionnel sénestre (Stich et al., 2006) sont les plus anciennes et ont une extension N/S à NE/SW. Elles sont recoupées par d'autres, correspondant à une extension E/W à ENE/WSW dans les niveaux crustaux peu profonds (Benmakhlouf et al., 2012). Une dernière phase de compression N/S à NW/SE (Fig.5), plus récente et affecte l'ensemble (Reuber et al., 1982; Hernandez and Bellon, 1985; Martínez-Martínez et al., 2006).

La rosace des directions (Fig.7) et la projection stéréographique (Fig.8) effectuées sur la base des relevés que nous avons effectués sur les divers sites le long de la route N16, confirment ces directions variables de failles. L'extension NE-SW (Fig.6 et 7), qui correspond au régime de la faille Jebha-Chrafate reste la plus dominante (Benmakhlouf et al., 2012).

Les failles sinistres, plus anciennes et sont totalement obturées par les dépôts récents. Les failles dextres sont plus exposées et ne sont pas totalement colmatées (Ait Brahim and Chotin, 2013). Il faut noter aussi que le régime de faille n'affecte pas les sédiments quaternaires de la région.

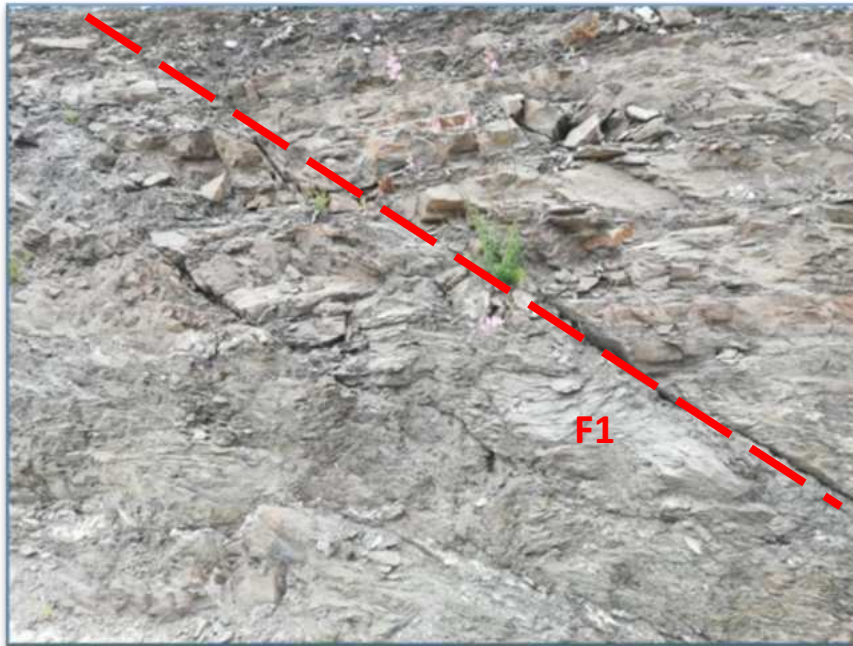


Figure 5 : Fracture constatée dans un talus sis à l'entrée de la ville de Jebha, d'orientation NW /SE



Figure 6 : Faille type F2 observée avant Amter en venant d'Oued Laou.
F2 est orientée dans le sens de l'extension de la faille de Jebha. Le schiste est très fracturé dans ce talus

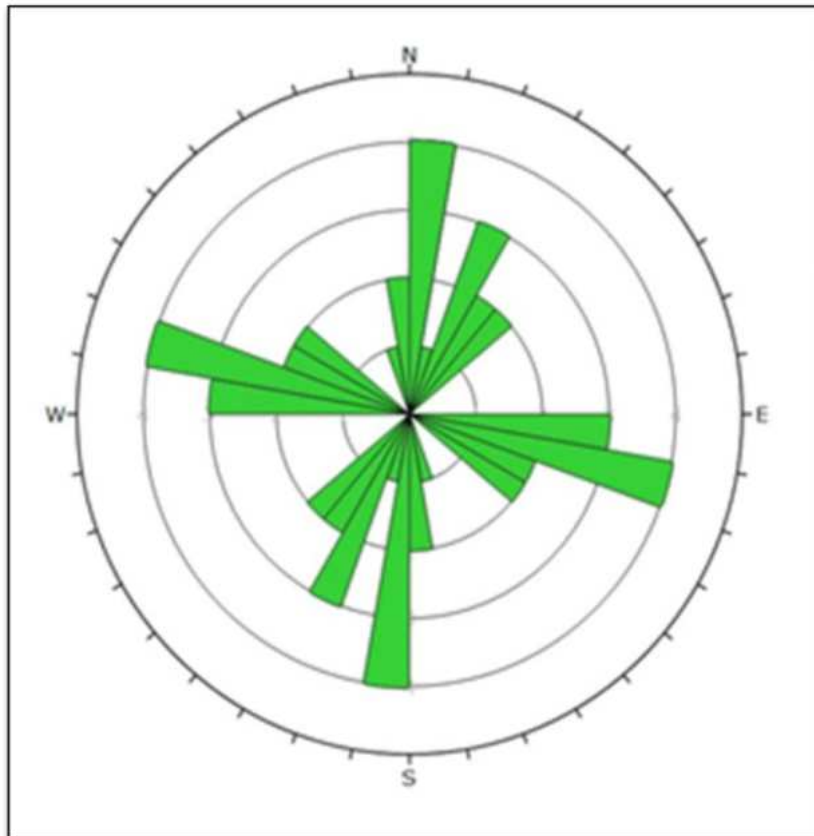


Figure 7 : Rosace directionnelle des failles et fractures dans la zone d'étude (mesures de 2021 à 2023)

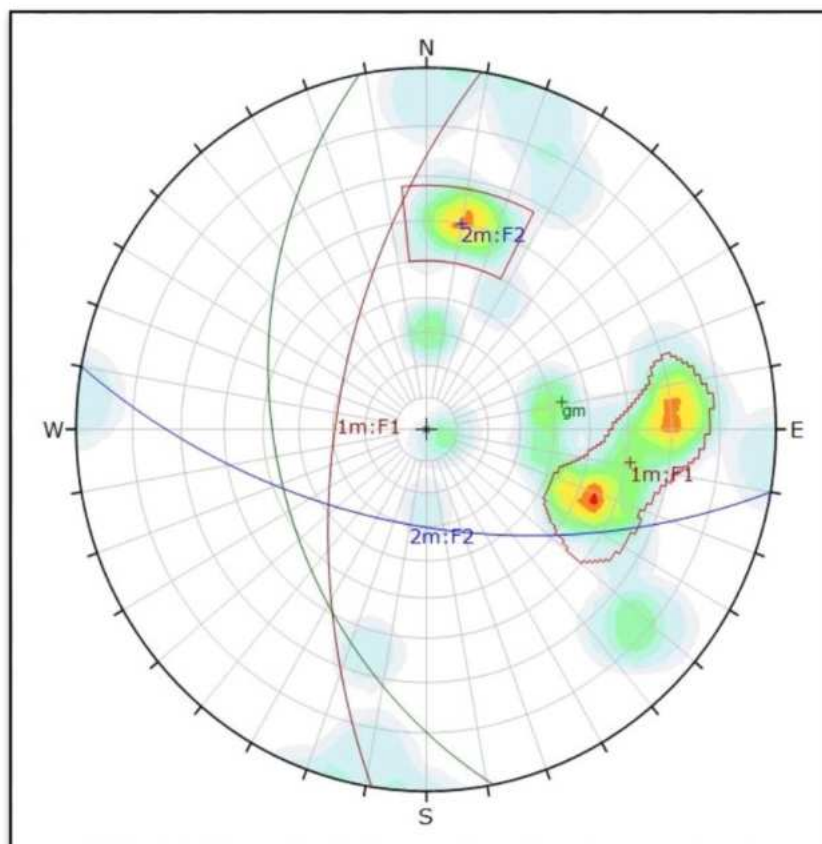


Figure 8 : Projection stéréographique des directions générales des failles et fractures dans la zone d'étude

2.4 Activité sismique

L'activité sismique au nord du Maroc est liée à l'activité des failles et des linéaments tectoniques localisés au niveau de la région (Fig. 7, 8 & 9). Elle reste cependant modérée par rapport aux autres pays voisins ou ceux de la méditerranée en général. Les cartes de l'activité sismique montrent l'existence au moins de trois zones d'activité sismique : Rifain Occidental, Rifain oriental et mer d'Alboran. Le danger sismique peut être lié aux failles néotectoniques et aux structures principales actives des régions avoisinantes (Medina and Cherkaoui, 1992; Koulali et al., 2011).

L'activité sismique dans le Nord du Maroc est liée à l'activité néotectonique du Plio-Quaternaire et Actuel (Chalouan et al., 2001; Cherkaoui and El Hassani, 2012). Elle est engendrée par le rapprochement des deux plaques lithosphériques Afrique-Eurasie et dont la vitesse de rapprochement est de l'ordre de 0.5 cm/an au niveau du détroit de Gibraltar.

Depuis l'installation des stations sismiques au Maroc (à partir du début du 20ème siècle), la majorité des séismes ayant secoués le pays, le littoral méditerranéen et les localités se trouvant sur la côte sud d'Espagne ont été enregistré. Ainsi, le catalogue sismique du Maroc (CNRST) enrichi avec celui d'Espagne (IGN), montre que le domaine rifain est une région sismique marquée par une forte concentration d'épicentres et que la plus forte activité sismique du domaine rifain se manifeste dans la région d'Al Hoceima comme le prouve les deux tremblements de terre destructeurs de 1994 et 2004 (Talhaoui et al., 2005; Cherkaoui and El Hassani, 2012).

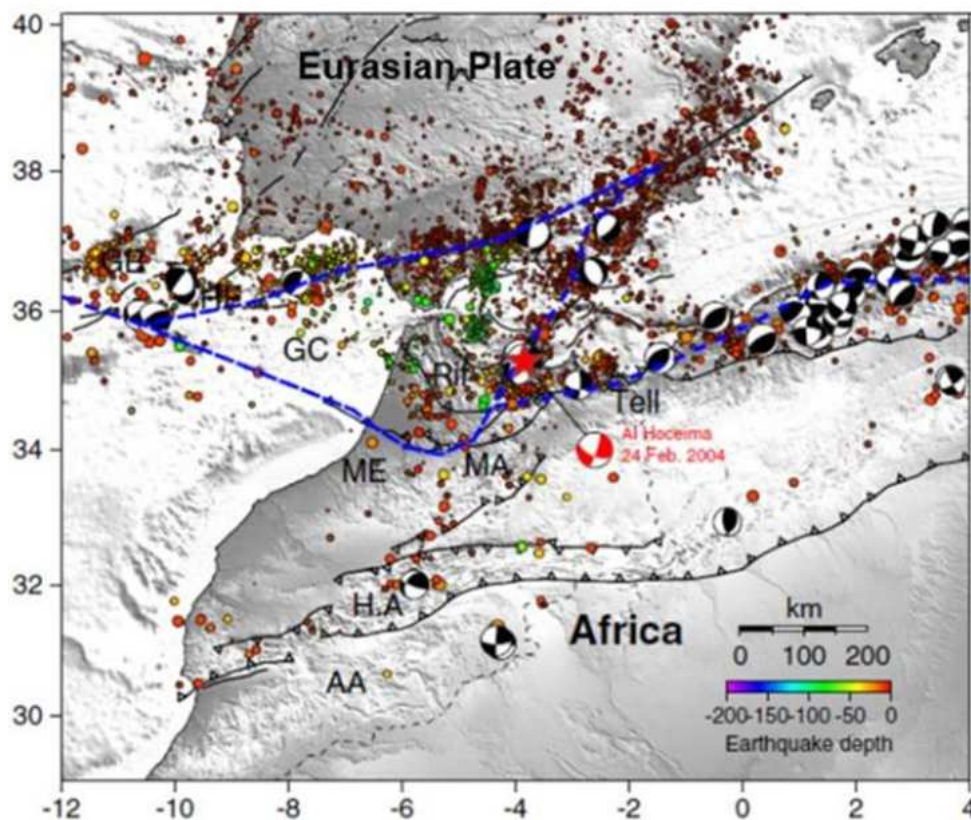


Figure 9 : Carte reflétant le contexte structurel général du nord du Maroc
Failles importante et sismicité dans la région Maghrébine – Ibérique (Koulali et al. 2011).

2.5 Données climatiques

Le climat de la région est de type méditerranéen (Arraji, 1995; El Alami, 1993; Antoine, 2009), c'est un climat semi-aride caractérisé par un hiver humide et frais, et un été sec et chaud (Barathon, 1987; Maurer, 1989). La pluviométrie varie avec l'altitude et l'exposition des reliefs. Les températures moyennes sont généralement comprises entre 20 et 34 °C en été et 7 et 22 °C en hiver (Fig.11). Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 500 mm pour une année à forte pluie. La région est aussi connue par des averses marquant des pics journaliers pouvant atteindre parfois 140 mm (Fig. 10).

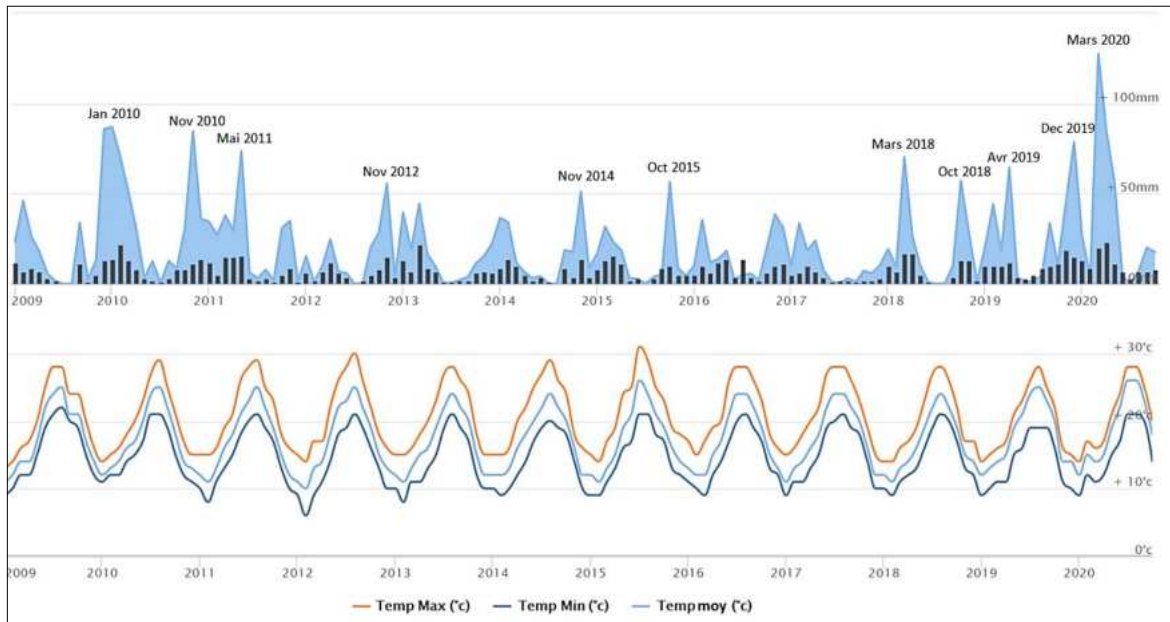


Figure 10 : Pluies et températures maximales mesurées dans les stations de comptage Stations d'Afghan, de Koudiat Kourirene et Jebha de 2009 à 2020. (Direction de la Météorologie Nationale – DMN-)

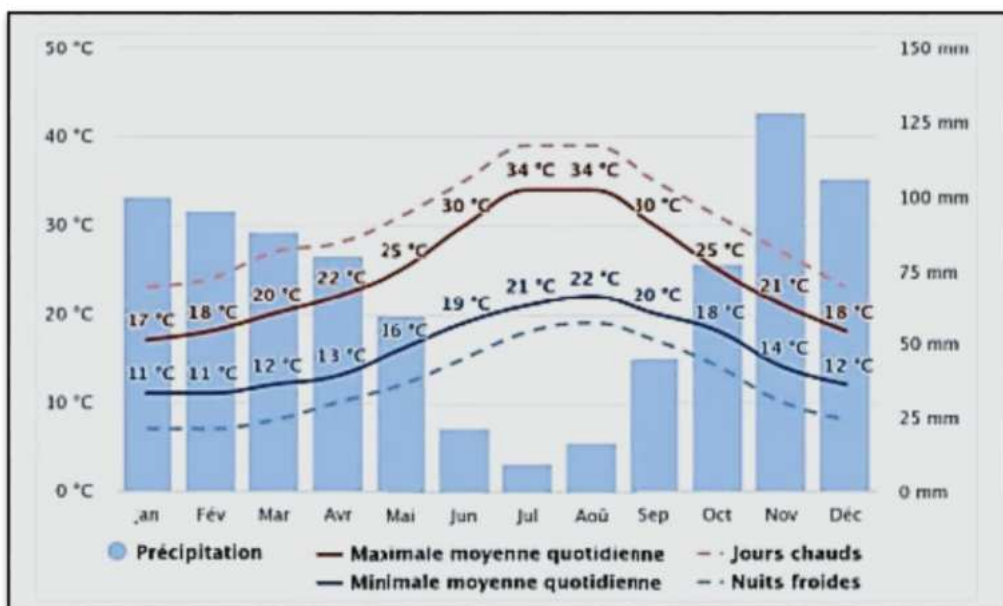


Figure 11 : Moyenne pluviométrique et de température de la zone d'étude entre 2009 à 2020 (DMN).

Le 24 mars 2020, notre zone d'étude comme tout le nord du Maroc a connu des précipitations très importantes marquant un record journalier de 136 mm (Fig. 10). A cause de ces averses exceptionnelles, plusieurs glissements de terrain ont été activés et en particulier le talus objet de notre présente étude.

3. Nature des glissements de terrains dans notre zone d'étude

Un glissement de terrain est le déplacement gravitaire d'une masse de matériaux formé de terrains meubles, rocheux ou mixte, le long d'une surface de rupture. Il est généralement causé par les modifications des conditions de stabilité limites (Alcántara-Ayala, 2002; Thiery et al., 2005). La surface de rupture est souvent une zone de faiblesse préexistante naturellement ou sous l'effet des facteurs extérieurs (Habib, 1984; Biguenet and Sirieys, 1990; Thiery et al., 2005; Prokešová et al., 2014; Desodt et al., 2017).

La genèse d'un mouvement de terrain résulte de l'action simultanée de plusieurs facteurs (Thiery et al., 2005; Lebourg et al., 2010). Certains sont permanents et forment le cadre propice qui créent les conditions favorables à l'existence d'un mouvement de masse. Les plus courants sont la topographie, la lithologie et la géomorphologie (Niini, 1977; Pincet, 1977; Popescu, 1994; Besson and Barnier, 1996; Harmouzi et al., 2018). Les autres sont des facteurs dynamiques et ont un rôle déclenchant. On peut citer en particulier les précipitations (Aleotti, 2004; Miller et al., 2009; Mathlouthi et al., 2014), l'écoulement hydrique, l'action anthropique et aussi l'aléa sismique (Lebourg et al., 2010; Prokešová et al., 2014; Fellah and Mastere, 2015).

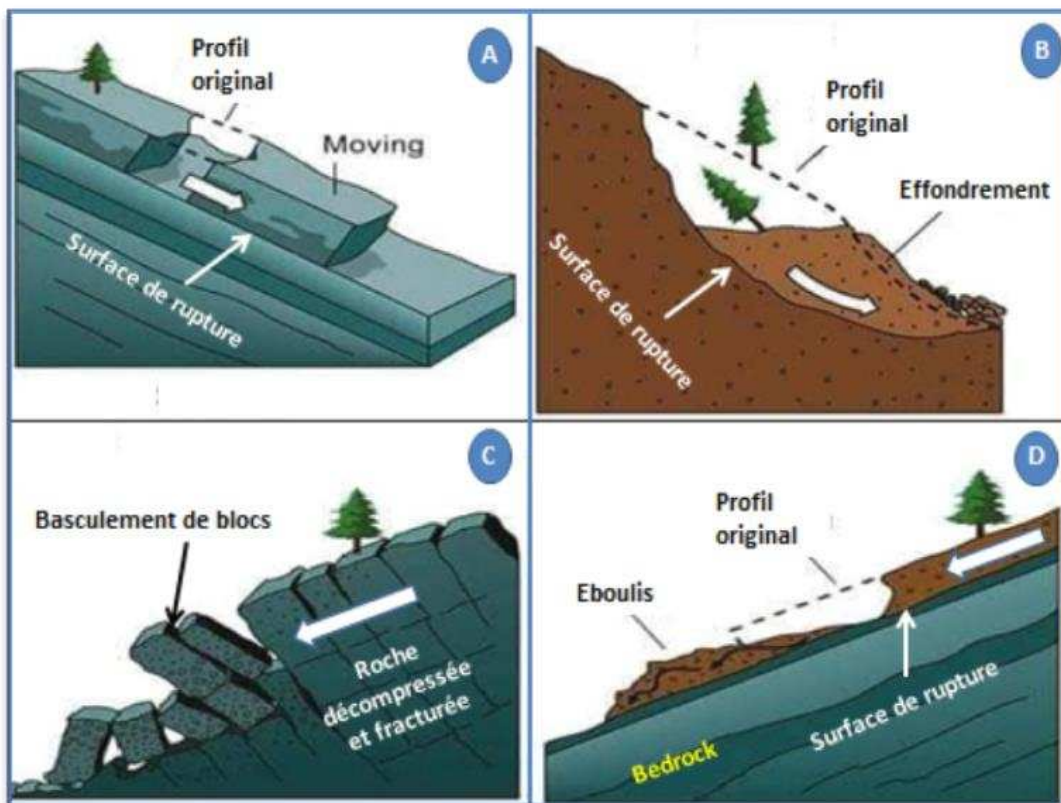


Figure 12 : Catégorie des mouvements de terrain dans le secteur d'étude

Il existe plusieurs types de glissement de terrain dans les versants. Chacun d'eux possède ses propres caractéristiques qui dépendent étroitement de sa morphologie (Mastere et al., 2013; Pathier et al., 2010), de la géologie du site et aussi l'état des matériaux glissés (Fressard, 2013; Brahim et al., 2021). Depuis le milieu du vingtième siècle (Terzaghi, 1950), plusieurs chercheurs et ingénieurs ont essayé de dresser une liste englobant les différents types de glissement (Colas and Pilot, 1976; Nemčok et al., 1972; Pašek, 1975). Mais on peut dire que la première classification effective a été proposée par Varnes en 1978 (Varnes, 1978). Depuis cette date, plusieurs publications ont traité ce sujet, en particulier dans des conférences internationales qui traitent régulièrement la question de classement des glissements de terrain dans les versants (Mora C and Vahrson, 1994; Dikau et al., 1996; Soldati, 1996; Fabre et al., 2002; Cruden and Couture, 2011; Petschko et al., 2013; Bouhrar et al., 2015; Housni, 2019;).

Dans notre zone d'étude, nous avons rencontré en général, quatre types de glissement de terrain (Fig.12), à savoir :

- **Les glissements rotationnels (Fig.12.B)** : ce type de glissement de terrain se produit lorsque le sol se détache d'un point d'appui et se met en rotation autour de ce point. Les glissements de terrain rotationnels ont souvent lieu dans des terrains meubles ou roches très altérés (Bégin and Fillion, 1987; Mateso and Dewitte, 2014). Aussi, la forte pente des talus est un facteur favorable pour ce type d'instabilité (Maquaire, 2002).

Ce sont des glissements à surface de rupture plus ou moins arquée, caractérisé en général par l'existence d'une zone de départ nette et par un bourrelet frontal plus ou moins marqué (Biguenet and Sirieys, 1990; Faleh and Sadiki, 2002; Lissak, 2012). Le remaniement interne dépend de la nature des terrains et de l'importance du déplacement.

- **Les glissements en bloc (Fig.12. A & C)** : ce type de glissement de terrain appelé aussi chute de bloc, se produit lorsque des blocs de sol se détachent d'un versant et se déplacent vers le bas de la pente sous l'effet de la force gravitaire due au poids propre du bloc détaché (Kamenov et al., 1977; Azimi et al., 1982; Vengeon et al., 1999; Akhssas et al., 2011). Les glissements de terrain en bloc sont souvent liés à la nature de la roche qui est fracturée, décompressée ou ductile comme le cas du schiste dans notre zone d'étude (Duveau and Henry, 1995; Lamontagne et al., 2007; Baziz et al., 2009;). Les grandes pentes favorisent ce type de mouvement de masse (Azzouz et al., 2002b; Obda et al., 2022).
- **Les glissements en débris (Fig.12.D)** : ce type de glissement de terrain appelé aussi éboulement (Jail and Vivian, 1971; Somson and Baudiere, 1986; Hétu et al., 1995), se produit lorsque des débris qui émanent de l'altération de la roche, se mêlent à de la terre meuble de la croute pour former un amas qui glisse sur la surface lisse du substratum rocheux, vers le pied du talus. les précipitations intenses sont le facteur déclenchant principal de ce type de mouvement de terrain (Malet et al., 2005; Fellah and Mastere, 2015;).
- **Les glissements de translation (Fig.12.A)** : ce type de glissement de terrain appelé aussi glissement plan (Belliere, 1956; Giraud et al., 1981; Bovis and Evans, 1995) ; se produit

lorsque la couche de sol en surface se détache et glisse sur une couche plus profonde, le long d'un plan de rupture parallèle aux couches lithologiques. On trouve souvent ce type de glissement dans les schistes et les micascistes lorsque les plans de clivage sont parallèles au pendage du talus. La grande pente, les infiltrations d'eau et les séismes sont les principaux facteurs de déclenchement pour ce type de mouvement de terrain (Fellah et al., 1996; Fellah and Mastere, 2015).

Les mouvements de terrain qui combine deux ou plusieurs types de glissement sont appelés glissements de terrain mixtes ou complexes (Bouzid, 1985; Azzouz et al., 2002b; Lamontagne et al., 2007; Tima et al., 2018).

On peut aussi classer les glissements de terrain suivant la profondeur de la surface de rupture. Ainsi, on peut en distinguer entre un glissement superficiel, lorsque la surface de rupture n'est pas profonde (ne dépasse pas 2 m) ; et un glissement profond, dans le cas contraire (Fabre et al., 2002, Eichenberger et al., 2013) .

Dans notre zone d'étude, les glissements de terrain sont dans la majorité de type superficielle. Ceci est expliqué par leur jeune âge et aussi la nature du substratum qui est souvent rocheux ; ce qui limite l'évolution rapide en profondeur (Dumas et al., 1984; Pathier et al., 2010).

4. Méthodologie générale utilisée pour étudier les versants instables

Notre méthodologie pour étudier en détails les versants instables (Fig. 13) peut être répartie en trois phases :

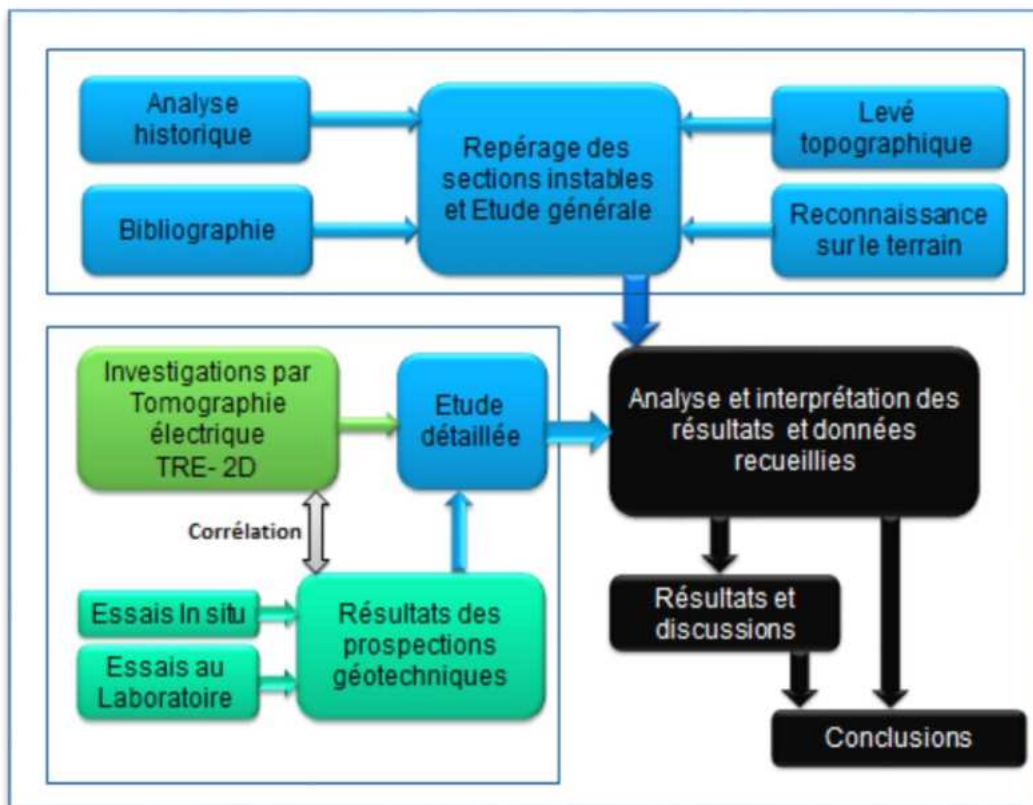


Figure 13 : Procédure et méthodologie générale

La première est consacrée aux études préliminaires comprenant des recherches historiques et bibliographiques complétées par des visites de terrain et un relevé topographique à grande échelle (1/500). Après cette première phase, nous avons listé les essais de reconnaissance géotechnique à réaliser in situ ou au laboratoire. Nous avons ensuite défini le tracé de notre profil ERT, en fonction des besoins de notre étude mais aussi en tenant compte des contraintes topographiques du terrain. Dans la dernière étape les résultats géotechniques et géophysiques ont été analysés et corrélés afin d'émettre des jugements corrects.

1. Essais géotechniques

1.1 Généralités sur la géotechnique et la mécanique des sols

La géotechnique est une science qui étudie le comportement du sol et sa performance en tant que matériaux de construction ou support des ouvrages de bâtiment et génie civil (Schlosser, 1983; Plumelle et al., 2017).

Elle est souvent confondue avec la mécanique des sols, vu qu'elle utilise les résultats et les lois de cette dernière. On dit souvent que la géotechnique est la mécanique des sols appliquée. En respectant cette doctrine, aucune distinction ne sera faite dans notre manuscrit entre la géotechnique et la mécanique des sols, ainsi qu'entre géotechnicien et spécialiste dans la mécanique du sol.

La mécanique des sols est une science relativement jeune qui applique les lois mécaniques et hydrauliques au matériau sol. Elle s'est imposée en tant que discipline reconnue qu'en 1925, grâce au chercheur Charles TERZAGHI, qui est l'auteur du premier recueil de la mécanique des sols apparu en 1936 (Germanov, 1991; Bordes, 2000). Il faut noter que d'autres scientifiques ont abordé avant cette date, les problèmes liés au comportement des sols. COULOMB, DARSY et ATTERBERG sont les plus populaires (Kerisel, 1956; Germanov, 1991). Cette science a connu beaucoup de progrès grâce aux nouveaux appareils de mesures et de prospections, qui sont les résultats du développement scientifique de par le monde. Plusieurs livres et publications sont apparus, rendant l'enseignement de cette discipline plus facile et plus accessible (Holtz and Kovacs, 1981; Anagnostopoulos et al., 2013; Plumelle et al., 2017).

Dans certains aspects, la mécanique des sols est proche de la mécanique des milieux continus, dans d'autres, elle puise dans le savoir de la géologie et de l'hydrogéologie. C'est pourquoi, un géotechnicien doit avoir de bonne connaissance dans ces domaines. Cela lui permettra d'interpréter les résultats obtenus et prévoir le comportement du sol étudié.

Le sol est un milieu très complexe de par son hétérogénéité et son comportement mécanique très variable (Holtz and Kovacs, 1981; Plumelle et al., 2017). C'est un matériau qui est composé des trois phases de la matière : grains solides, eau et air. Les phases fluides jouent un rôle fondamental dans le comportement d'un sol (silvan, 1977; Abou Bekr, 1995; Maquaire et al., 2002).

Les domaines d'intervention de la mécanique des sols sont nombreux et variés. Ils concernent tous les projets des travaux publics et celle du bâtiment (Crooks and Graham, 1976; Aubertin et al., 2002; Plumelle et al., 2017). Il comprend également l'étude des milieux naturels tels que les versants ayant des problèmes de glissement de terrain (Antoine et al., 1988; Meziane et al., 2019; Bardhi, 2020) et les berges de cours d'eau ou de retenues (Plumelle et al., 2017; Abdel-Ilah et al., 2022; Bouafia, 2022).

En mécanique des sols et particulièrement en géotechnique, les sols sont classés suivant deux grandes familles : les sols et les roches (Holtz and Kovacs, 1981; Anagnostopoulos et al., 2013)

- Le sol est un agrégat formé de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère. L'aspect meuble reste son caractère fondamental (Campus, 1945; silvan, 1977). Il est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. Mais certains matériaux produits par l'homme présentent aussi le caractère meuble. Par exemple les sous-produits miniers et les granulats concassés (sable, gravier, ballast...). Le géotechnicien étudie donc aussi bien les sols naturels que des matériaux fabriqués artificiellement à partir de sols ou de roches à condition de présenter un caractère meuble (Romana, 1995).
- Les Roches : Contrairement à la géologie, qui considère comme roche tout élément naturel constitutif de l'écorce terrestre, la mécanique des sols et la géotechnique ne considère dans cette famille que les massifs ou agrégats naturels non meubles qui présentent une bonne cohésion et une résistance mécanique aux contraintes extérieures (Schlosser, 1983; Guilloux, 2005; Anagnostopoulos et al., 2013). Les roches altérées représentent donc la limite confuse entre les sols et les roches (Guilloux, 2005). La mécanique des roches est une spécialité de la mécanique des sols qui s'intéresse particulièrement aux comportements des roches (Duffaut, 2004; CFMR, 2015). C'est une science encore plus jeune dont on peut dater les réels débuts dans les années soixante, en particulier suite à la catastrophe de Fréjus dans la nuit du 2 décembre 1959, suite à l'effondrement du barrage de MALPASSET (Valenti and Bertini, 2003; Larouzee et al., 2014).
- Il y a cependant des terrains qui sont dans un état qui est ni celui d'un sol, ni d'une roche stricto sensu. Cette famille intermédiaire englobe les Sols Indurés et les Roches Tendres. Les sols de ce type sont classés en géotechnique dans la catégorie des SIRT (Guilloux, 2005). Les talus formés de SIRT sont souvent assujettis aux instabilités et aux glissements de terrain. D'où l'importance de l'étude de la stabilité des pentes en terrain formé de SIRT. Dans notre zone d'étude, plusieurs sections possèdent des talus avec des sols type SIRT.

1.2 Identification des sols

Identifier un sol consiste à définir ses caractéristiques physiques et mécaniques. En géotechnique, il existe plusieurs essais d'identification des sols (Holtz and Kovacs, 1981; Plumelle et al., 2017). Ils sont normalisés et doivent être réalisés suivant un protocole bien défini.

Les essais d'identification permettent de classer le sol dans une famille de qualification bien précise (argile, sable, limon argileux, calcaire, grès...) (Campus, 1945). Une telle appellation est très utile quand elle est rigoureuse car le mécanicien des sols définit, pour chaque type de sol, quelles sont les propriétés à étudier, quels sont les risques possibles et quelles sont les aptitudes principales.

L'un des éléments essentiels dans le domaine de génie civil est le choix des essais à utiliser pour la reconnaissance du terrain, puis pour le dimensionnement des ouvrages (Anagnostopoulos et al., 2013; Monnet, 2016; Thorel and Jenck, 2021). Certains ingénieurs et chercheurs sont essentiellement orientés vers les essais de laboratoire, d'autres préconisent les essais en place. Pourtant chaque essai de mécanique des sols a ses avantages, ses

inconvénients et aussi ses limites. Si aucun n'est à rejeter, aucun n'est universel, et pour chaque problème on peut trouver le type d'essai le plus approprié à utiliser (Saïghi, 1998).

Dans notre présente thèse nous allons présenter la panoplie des principaux essais utilisés en mécanique des sols pour étudier les mouvements de terrain et les glissements de terrain.

2. Essais au laboratoire

2.1 Essais d'identification au laboratoire

Ce sont des essais qui s'intéressent aux caractéristiques naturelles d'un sol (Atlan, 1978; D.Holtz and Kovacs, 1981), tel que son squelette par l'essai granulométrique (Fig.14), sa teneur en eau, sa masse volumique.... D'autres essais nous renseignent sur les relations inter-granulaires et leur cohésion (limites d'Atterberg par exemple).

Nous avons regroupé dans le tableau ci-dessous (Tableau 3), les principaux essais d'identification des sols effectués au laboratoire et qui sont nécessaires pour l'étude des mouvements de terrain. D'autres essais peuvent être ajoutés en fonction de la nature du sol et les formations géologiques observées sur site.

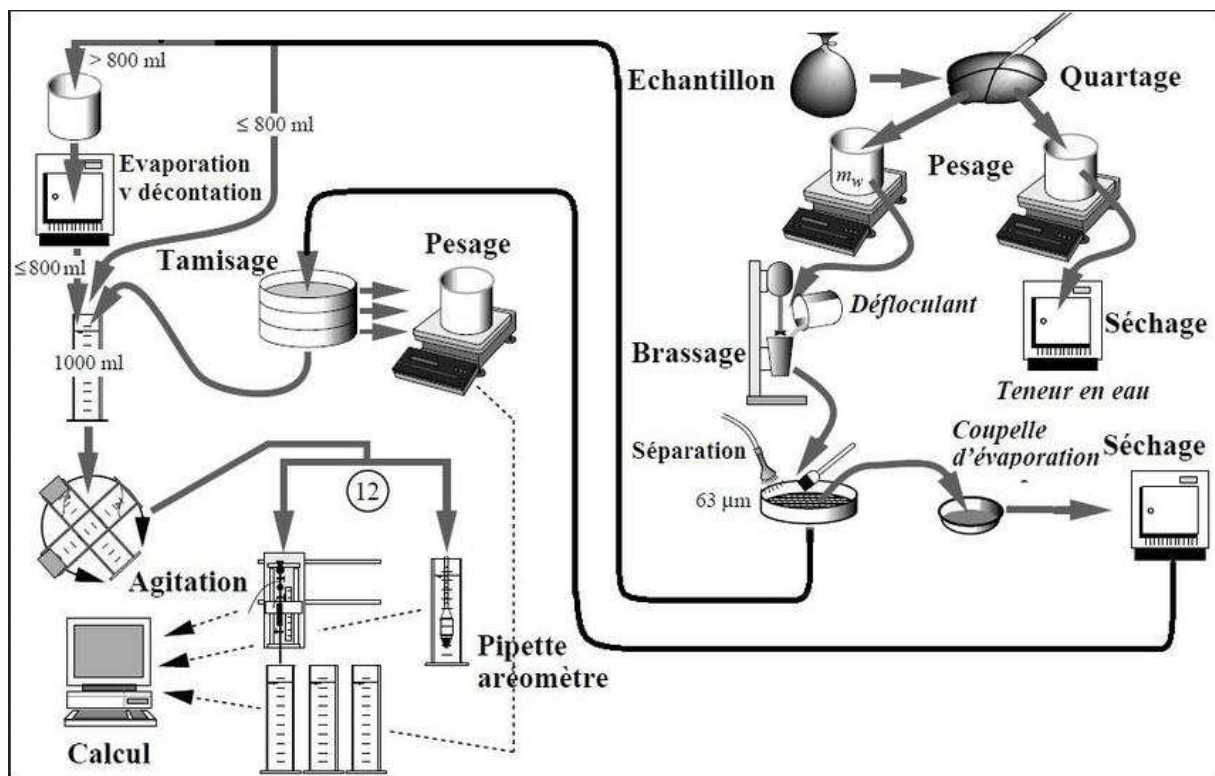


Figure 14 : Schéma du protocole d'essai granulométrique par tamisage (Riheb, 2020)

Tableau 3: Recueil des essais d'identification du sol au laboratoire

Désignation de l'essai	Caractéristiques recherchées et formules	Définition sommaire	Observations et précisions
Calcul de la teneur en eau naturelle	teneur en eau naturelle: W	C'est le rapport du poids d'eau que le sol contient rapporté au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105 °C (60 °C dans le cas le sol contenant des éléments organiques).	La connaissance de la teneur en eau d'un sol est très importante car elle permet, avec d'autres caractéristiques, d'apprécier l'état dans lequel se trouve le sol
Calcul du degré de saturation	degré de saturation d'un sol: S	C'est le rapport du volume de l'eau rapporté au volume des vides d'un sol.	La saturation d'un sol est un facteur déclenchant des glissements de terrain
Calcul des poids spécifiques	Poids spécifique du sol humide: γ	C'est le rapport du poids total d'une certaine quantité de sol rapporté à son volume apparent.	C'est une caractéristique importante pour le calcul du poids total d'un volume des terres actives
	Poids spécifique du sol sec: γ_d	C'est le rapport du poids de matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol rapporté au volume de ce même sol.	Le poids spécifique sec définit l'état dans lequel se trouve le sol: suivant la valeur de γ_d , un matériau sera très dense, dense, lâche ou très lâche
	Poids spécifique des grains du sol: γ_s	C'est le rapport de matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol rapporté au volume des grains du sol.	Pour les sols courants, γ_s est compris entre 2,6 et 2,7
Calcul des limites d'Atterberg (Note: Les limites d'Atterberg sont toutes des limites de la teneur en eau)	Limite de liquidité: W_L	C'est la limite entre l'état liquide et l'état plastique	<i>Appareil de Casagrande pour calculer les limites d'Atterberg</i>
	Limite de plasticité: W_p	C'est la limite entre l'état plastique et l'état solide avec retrait. Dans l'essai, c'est la teneur en eau au-dessous de laquelle il n'est plus possible de confectionner avec le sol des rouleaux de 3 mm de diamètre sans qu'ils se rompent	
	Limite de retrait W_R	C'est la teneur en eau limite pour remplir les vides du sol au moment où il atteint par séchage son volume minimal.	La limite de retrait est peu utilisée en mécanique des sols
	Indice de plasticité $Ip = W_L - W_p$	C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité,	Il donne l'étendue, en teneur en eau, de la plage de plasticité du sol.
	Indice de consistance $Ic = (W_L - W) / Ip$	C'est le rapport de la différence entre la limite de liquidité et la teneur en eau du sol rapportée à l'indice Ip	L'indice de consistance permet d'apprécier l'état dans lequel se trouve le sol (liquide, pâteux, ferme ou dur)
Analyse granulométrique	Définir Le pourcentages de chaque quantité de particules passants par un diamètre de tamis donné	L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un sol. Une courbe granulométrique est dressé après l'essai	L'essai comprend deux opérations: Le tamisage et la sédimentométrie (pour les particules inférieures à 80 microns)
Calcul de la teneur en carbonate de calcium	Définir le pourcentage de CaCO ₃ dans un échantillon de sol	L'essai consiste à mesurer le volume de gaz carbonique dégagé, après attaque par l'acide chlorhydrique d'une certaine quantité de matériau sec.	Suivant la teneur en CaCO ₃ et après analyse granulométrique et étude de plasticité, on peut distinguer les type de sols: argile, limons, marne ou calcaire
Calcul du dosage des matières organiques	Définir le taux de présence dans les sols de matières organiques	les matières organiques sont à l'origine de textures lâches et d'une importante rétention d'eau dans un sol	Il y a la méthode classique par oxydation des matières organiques par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique concentré. Et la méthode thermique qui fait appel à l'analyse thermique différentielle(ATO), méthode plus longue

2.2 Essais de résistance mécanique au laboratoire

Ce sont des essais effectués au laboratoire et qui s'intéressent aux caractéristiques mécaniques d'un sol (Seif eddine, 2007.). Dans ces essais, l'échantillon de sol souvent soumis aux contraintes extérieures pour voir son comportement et sa résistance.

La résistance des sols mesurée expérimentalement et les théories de rupture permettent d'étudier la stabilité des talus, des remblais et la nature des ouvrages de soutènement à envisager. La contrainte de cisaillement et les déformations correspondantes restent des caractéristiques d'importance majeure pour l'étude des glissements de terrain et les mouvements de terrain en général (Baziz et al., 2009; TIMA et al., 2018).

Ils existent plusieurs essais plus ou moins complexes pour déterminer la résistance au cisaillement des sols : compression simple, cisaillement à la boîte, compression triaxiale, etc.... L'essai de cisaillement direct et celui de compression triaxiale sont les plus utilisés. Chaque essai comporte deux phases : la première est l'application des contraintes normales, la deuxième le cisaillement proprement dit. Suivant que pendant l'une ou l'autre de ces deux phases, on empêche tout drainage ou au contraire on laisse l'eau s'évacuer sans aucune pression, on distingue alors trois types d'essais : Essai non consolidé- non drainés (UU), Essai consolidés- non drainés (CU), Essai consolidé- drainés (CD).

▪ Critère de rupture

Lorsqu' un système de forces est appliqué à un volume déterminé d'un sol, il se développe en général des contraintes de cisaillement qui entraînent des déformations du sol. Celles-ci peuvent être importantes le long de certaines surfaces que l'on appelle surfaces de glissement ou surfaces de rupture. La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement maximale dans le plan de la rupture, juste avant la rupture (Atlan, 1978; Afriani, 2003). C'est le pic de résistance. Dans des cas particuliers de sol lâche et remanié, on prend comme résistance au cisaillement, le maximum de la contrainte de cisaillement qu'on peut atteindre (Fig. 15). C'est le début du comportement asymptotique du sol.

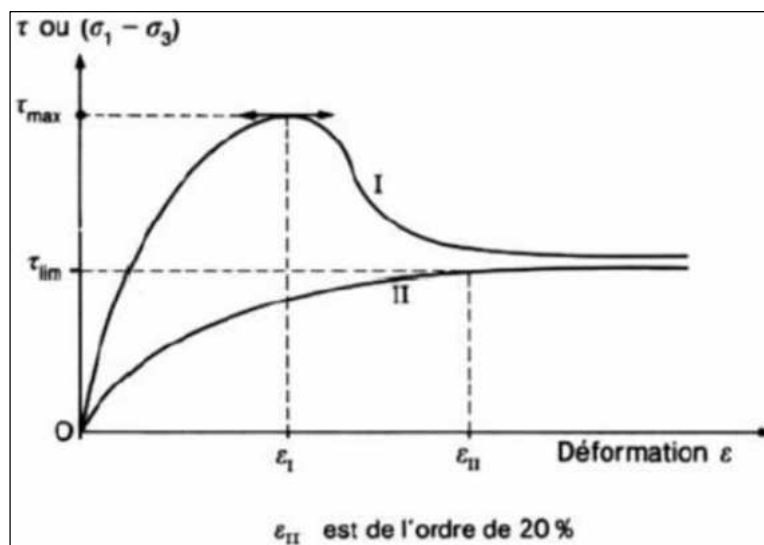


Figure 15 : Courbes type de résistance au cisaillement.

Courbe I, pour les sols denses et consolidés. Courbe II, pour les sols remaniés.

2.3 Essai à la boîte de cisaillement ou boîte de Casagrande

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement, l'une par rapport à l'autre. Un piston permet d'exercer sur le sol une contrainte σ donnée (Fig.16). La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse de déplacement constante. L'échantillon est donc cisailé suivant un plan imposé, sur lequel on exerce une contrainte normale et une contrainte tangentielle déterminées (Haigh, 2012; Bernard et al., 2016). On mesure à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure la force totale de cisaillement (Fig.17). En répétant plusieurs fois l'essai avec des valeurs différentes de la contrainte normale (généralement trois ou quatre fois), on peut définir la cohésion C et l'angle de frottement φ du sol. Pour les sols cohérents, les valeurs de C et φ obtenues dépendent essentiellement de la vitesse de l'essai et de la perméabilité du sol : car la pression interstitielle de l'eau qui, commandant la résistance au cisaillement d'un sol, est elle-même directement liée aux conditions de drainage de l'essai (Afriani, 2003).

Dans la pratique, les contraintes σ appliquées sur l'échantillon sont des contraintes totales (D.Holtz and Kovacs, 1981), mais les caractéristiques de cisaillement du sol cohérent dépendent essentiellement des contraintes inter-granulaires ou effectives σ' supportées par le squelette solide du sol. Les composantes normales des contraintes totales σ et inter-granulaires σ' et la pression interstitielle u de l'eau sont liées par la relation : $\sigma = \sigma' + u$

La résistance de cisaillement τ et les valeurs de σ , φ' , C' sont liées par la loi de Mohr-Coulomb : $\tau = C' + \sigma \operatorname{tg} \varphi'$ (fig. 18).

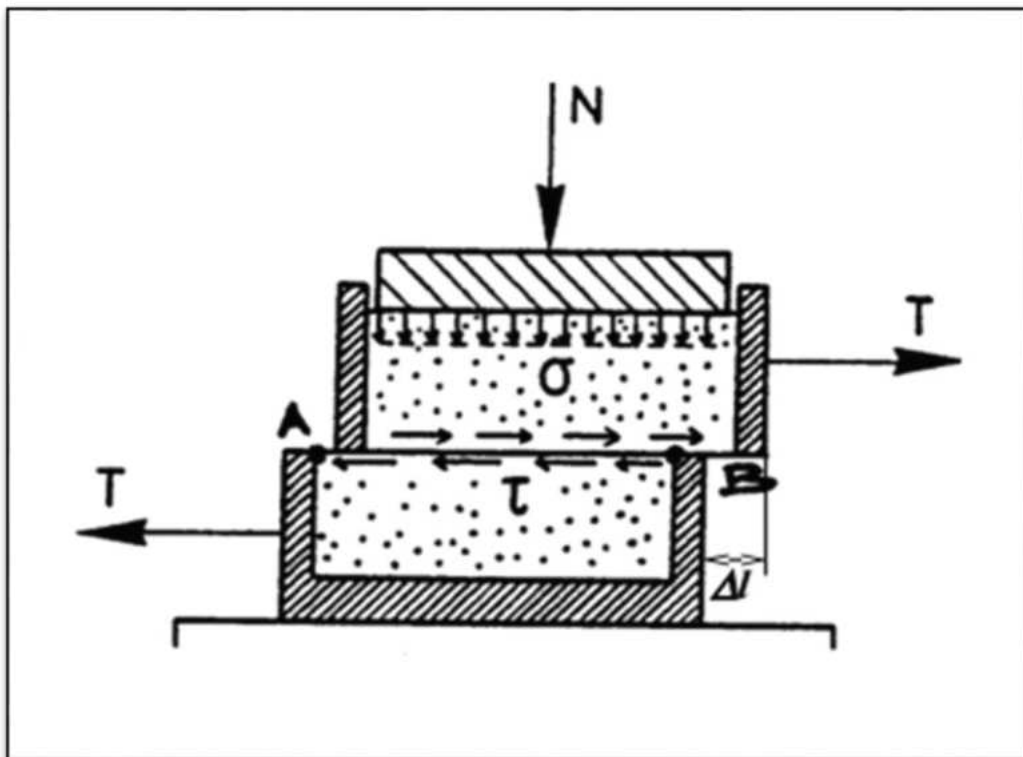


Figure 16 : Principe général de l'essai à la boîte de cisaillement ou boîte de Casagrande

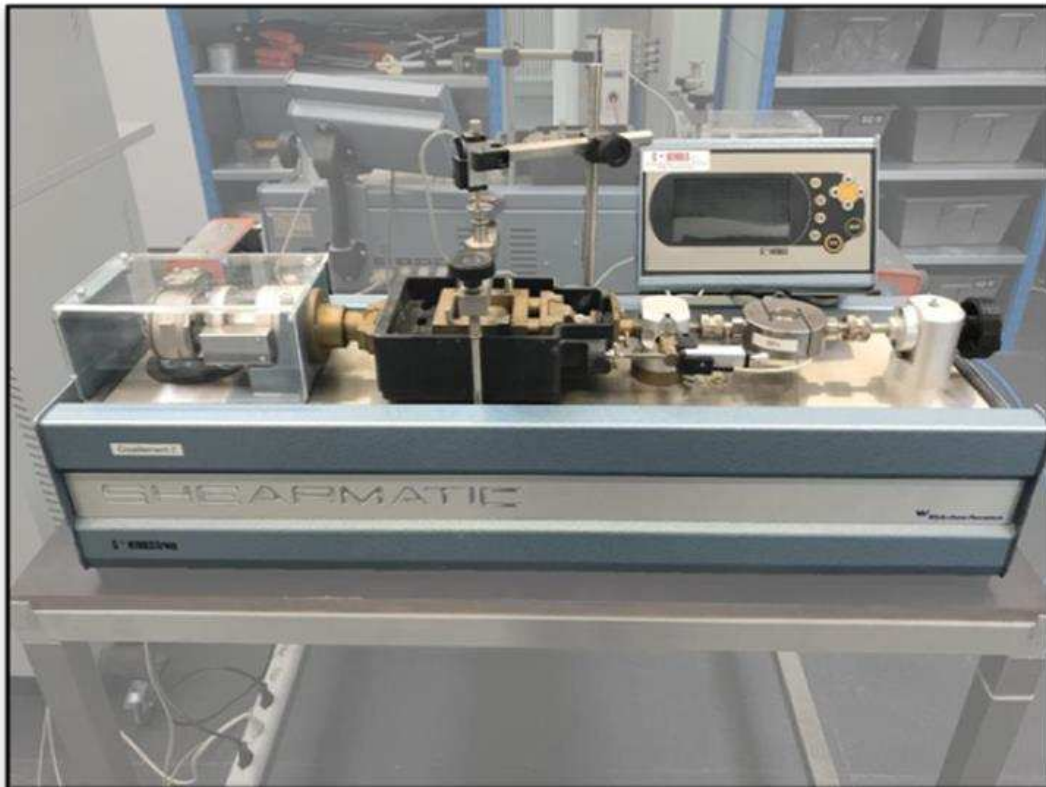


Figure 17 : Exemple de dispositif d'essai à la boîte de cisaillement

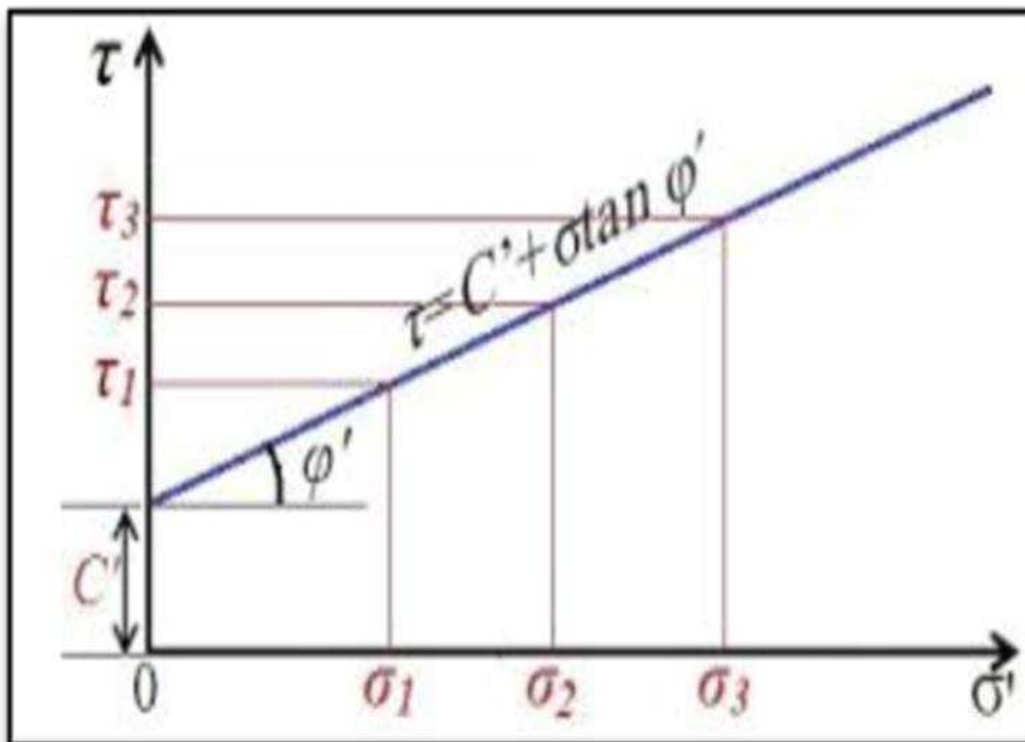


Figure 18 : Droite du critère de Mohr- Coulomb.

2.4 Essai Triaxial

L'essai triaxial, comme l'essai à la boîte de cisaillement, permet de déterminer la résistance au cisaillement du sol (Atlan, 1978; Gidel et al., 2001; Afriani, 2003). L'essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de sol, d'élancement voisin de deux fois la base, à un champ de contraintes uniforme qui a pour composantes : Une pression hydrostatique σ_3 , appliquée par l'intermédiaire d'un fluide (généralement de l'eau) remplissant la cellule (Fig.19).

- Une contrainte axiale ou déviatrice ($\sigma_1 - \sigma_3$), appliquée par l'intermédiaire d'un piston. L'essai classique consiste à faire croître le déviateur jusqu'à rupture de l'éprouvette, la pression hydrostatique restant constante. On détermine les valeurs du déviateur à la rupture de trois ou quatre éprouvettes identiques pour des pressions hydrostatiques différentes et on trace les cercles de Mohr correspondants (Fig.20) Leur enveloppe est généralement une droite appelée droite intrinsèque, que l'on caractérise par les paramètres C (ordonnée à l'origine) et ϕ (angle avec l'horizontale) (Fig.20).

Comme dans l'essai à la boîte de cisaillement, la pression de l'eau dans l'espace inter-granulaire ou pression interstitielle u , a une influence déterminante sur les paramètres C et ϕ . la résistance au cisaillement d'un sol dépendant essentiellement de la contrainte inter-granulaire.

L'appareil triaxial permet de mesurer la pression interstitielle u au cours de l'essai et par suite de connaître, grâce à la relation $\sigma' = \sigma - u$, la pression inter-granulaire à chaque instant.

Les trois types d'essais effectués au triaxial sont détaillés ci-dessous (Juarez and Rico, 1974; Deveaux et al., 1981):

- Essai non consolidé et non drainé UU : Cet essai correspond au comportement à court terme du sol (Bouassida, 1996). L'application de la pression hydrostatique σ_3 , et le cisaillement sont effectués à drainage fermé. La résistance au cisaillement du sol est généralement constante ($\phi = 0$). Elle est appelée «cohésion non drainée» et notée C_u . Elle traduit la résistance du sol dans son état actuel et permet de déterminer la capacité portante immédiate d'une fondation (Reiffsteck, 2002), d'étudier la stabilité immédiate d'un talus, d'un mur de soutènement, etc.....
- Essai consolidé non drainé CU : Dans cet essai, chaque éprouvette est consolidée, donc à drainage ouvert, sous une pression hydrostatique σ_3 , puis cisailée à volume constant, donc à drainage fermé sous cette même pression (Konrad et al., 1991; Serratrice, 2013; Andrianatrehina et al., 2015). L'essai permet d'étudier la variation de la résistance au cisaillement non drainé du sol, en fonction de la pression de consolidation à partir des caractéristiques C_u et ϕ_u . En outre, en mesurant la pression interstitielle, on détermine en cours de cisaillement les caractéristiques inter-granulaires ou effectives C' et ϕ' des sols saturés, sans avoir recours à l'essai CD ci-après, toujours très long lorsque le sol est peu perméable.

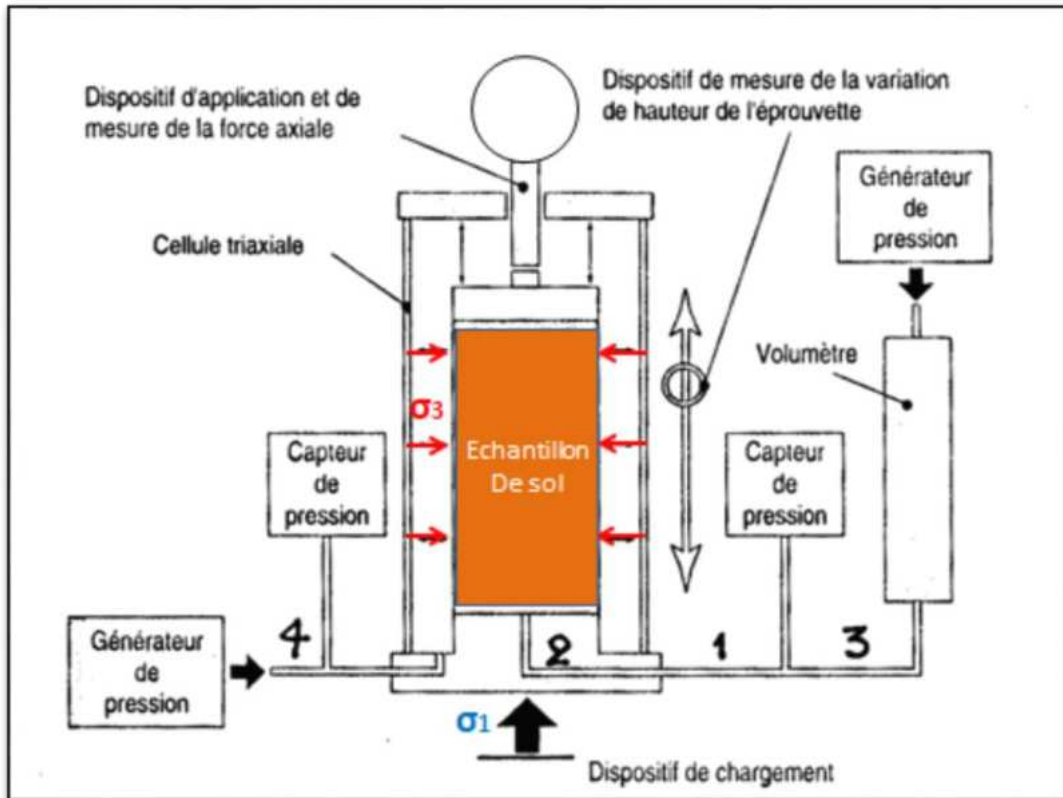


Figure 19 : Schéma de principe simplifié de l'essai triaxial
(Ali BOUAFIA, 2019 ; modifié)

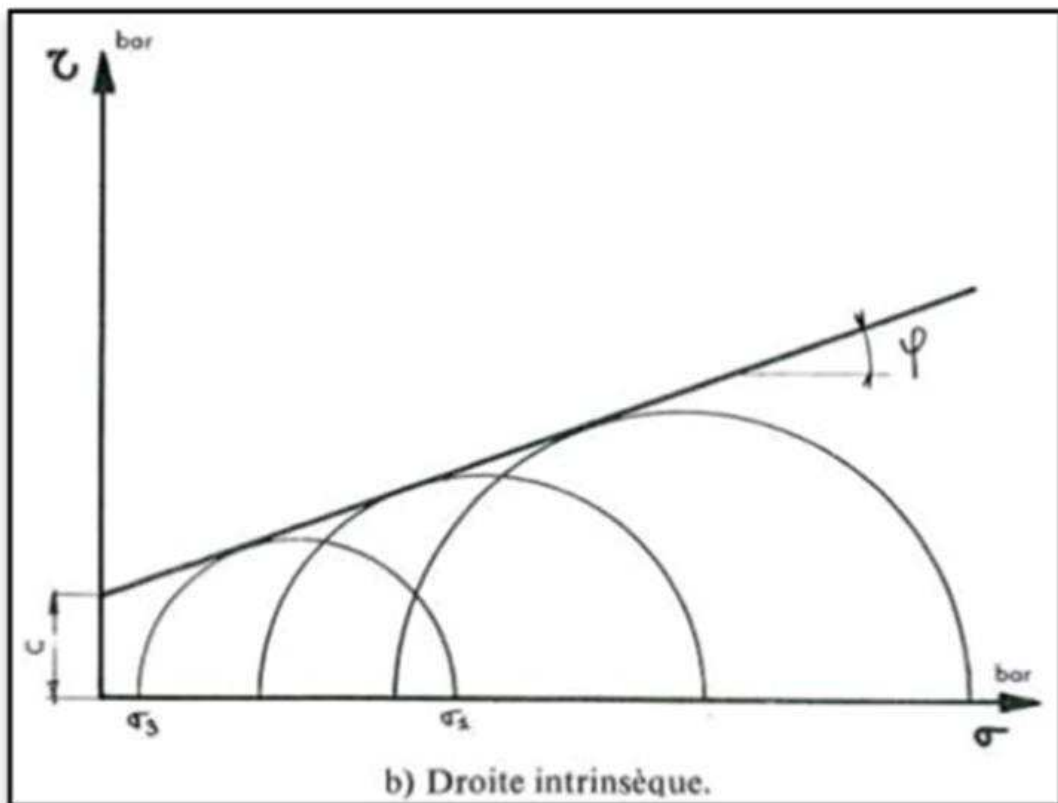


Figure 20 : Enveloppe de rupture de Mohr- Coulomb

- Essai consolidé drainé CD : Dans cet essai, chaque éprouvette est consolidée, donc à drainage ouvert sous une pression hydrostatique σ_3 , et cisailée à drainage ouvert sous cette même pression (Jrad et al., 1995; Rahardjo et al., 1995; Rahadjo et al., 2004). Le déviateur doit toutefois être appliqué de manière à obtenir - une vitesse de déformation suffisamment lente pour que la pression interstitielle soit nulle à chaque instant. L'essai donne donc les caractéristiques inter-granulaires du sol. Les paramètres Cd et ϕd permettent d'effectuer les études de stabilité à long terme (talus, murs de soutènement, barrage en terre, etc.).

Ordre de grandeur des caractéristiques mécaniques pour quelques types de sols :

Pour les sols formés d'enrochement, de gravier, de sable ou limons non plastiques (Schellart, 2000; Pedro et al., 2005) :

Le coefficient de cohésion $C' = 0$

Pour l'angle de frottement interne, on distingue entre :

- Les enrochements : ϕ' est compris entre 40 et 45°
- Le sable ou gravier à granulométrie étalée : ϕ' est compris entre 30 et 40°
- Le sable à granulométrie uniforme ou limon non plastique : ϕ' est compris entre 20 et 30°

Pour les argiles, on en distingue entre les argiles saturées, les argiles humides non saturées et les argiles sèches (Juarez and Rico, 1974; Atkinson et al., 1991; Nguyen Pham, 2008) :

- Le coefficient de cohésion C' et C_u sont variables et dépendent des conditions de drainage et de consolidation. Pour les argiles sèche on a $C' = C_u$.
- ϕ' et ϕ_u sont égales dans le cas des argiles sèches et différents pour les autres cas. Leur valeur est comprise entre 0 et 20°, et varie en fonction des conditions d'essai.

3. Essais in situ

Tous les essais d'identification au laboratoire sont effectués en remaniant le sol. Ils ne sont donc pas suffisants pour étudier un sol dans ses conditions naturelles (Duca, 2001; Monnet, 2016; Saïghi, 1998). Aussi, ils ne peuvent pas nous renseigner sur l'histoire du sol et sa lithologie. Ce sont les essais in situ qui comblent ces lacunes (Monnet, 2016).

Ils existent plusieurs essais in situ pour compléter ceux effectués aux laboratoires (Saïghi, 1998). L'ingénieur ou le chercheur peut choisir les essais qui conviennent le mieux aux problèmes étudiés. Dans le cas de prospection géotechnique pour étudier un glissement de terrain, trois essais répondent bien aux attentes des chercheurs et ingénieurs (Monnet, 2016; TIMA et al., 2018; Brahim et al., 2021) :

3.1 Les sondages carottés

Ils sont effectués avec une perforeuse suivant des diamètres bien définis et en respectant les normes. Ces sondages permettent de définir correctement la lithologie du terrain et la

présence ou non de cavité ou nappe phréatique (G. Bigot, 1997; Mouslim et al., 2018). Aussi, les carottes obtenues sont analysées et serviront à d'autres essais d'identification au laboratoire.

3.2 L'essai pressiométriques

Cet essai dû à Louis Menard, est réalisé à l'aide d'une sonde cylindrique tri-cellulaire, dilatable qu'on fait descendre dans un forage à la profondeur voulue (JACQUARD and RISPAL, 2020). La cellule de mesure et les deux cellules de garde (Fig.21 & 22) sont gonflées par paliers successifs. Grâce aux cellules de garde, la pression exercée sur la tranche de sol investiguée peut être considérée comme uniforme (Norme NF P 94- 110).

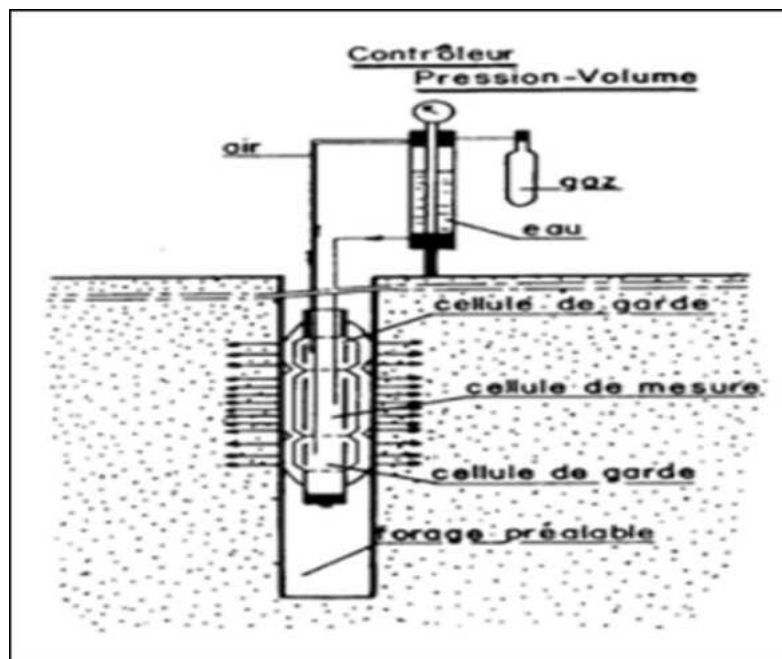


Figure 21 : Principe de l'essai pressiométrique de Menard



Figure 22 : Sonde tri-cellulaire pour effectuer l'essai pressiométriques de Menard.

Le graphe de l'essai trace le volume d'eau injecté dans la cellule de mesure en fonction de la pression appliquée sur le sol (Fig.23 & 24). Lorsque la pression augmente, le sol est dans une phase pseudo-plastique au sein de laquelle est calculé le module pressiométrique (G. Bigot, 1997; dos Santos, 2022).

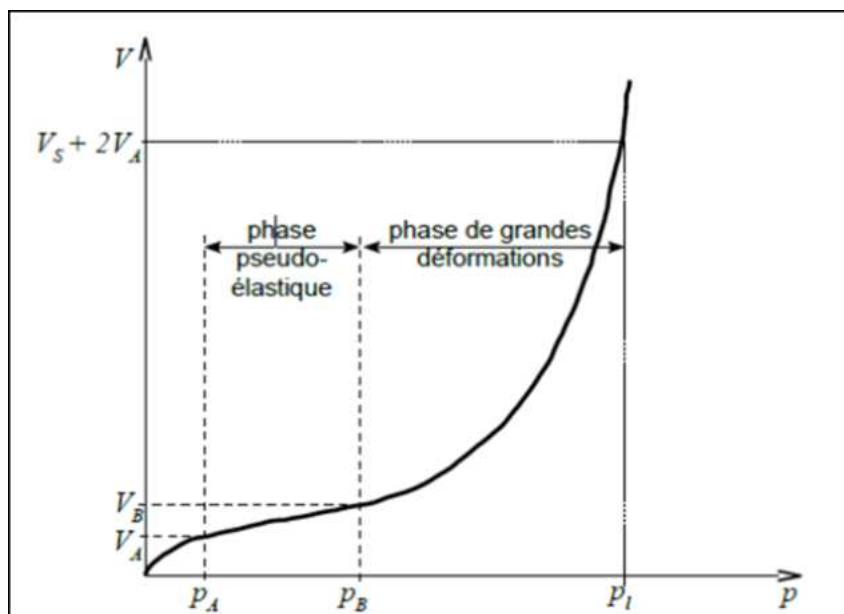


Figure 23 : Courbe type de l'essai pressiométrique.

A partir de cette courbe pressiométrique (Fig.23) trois phases sont identifiables:

- Phase de mise en contact de la sonde avec le sol,
- Phase pseudo-élastique
- Phase de grandes déformations et de développement de la rupture.

La phase pseudo-élastique correspond à une droite qui démarre du point de coordonnées (V_a, ρ_a) et se termine au point (V_b, ρ_b) . Le module pressiométrique E_M est déterminé dans cette phase. Il est calculé en considérant le sol en élasticité linéaire, en déformation plane, suivant la formule :

$$E_M = 2(1 + \nu) \left[V_s + \frac{V_a + V_b}{2} \right] \frac{\rho_b - \rho_a}{V_b - V_a}$$

Où :

V_s : Le volume de la cellule centrale de mesure de la sonde

V_a : Le volume correspondant à l'origine de la plage pseudo-élastique de la courbe

V_b : Le Volume correspondant à l'extrémité de la plage pseudo-élastique de la courbe

P_a : La Pression correspondant à l'origine de la plage pseudo-élastique de la courbe

P_b : La Pression correspondant à l'extrémité de la plage pseudo-élastique de la courbe

ν : Le Coefficient de Poisson

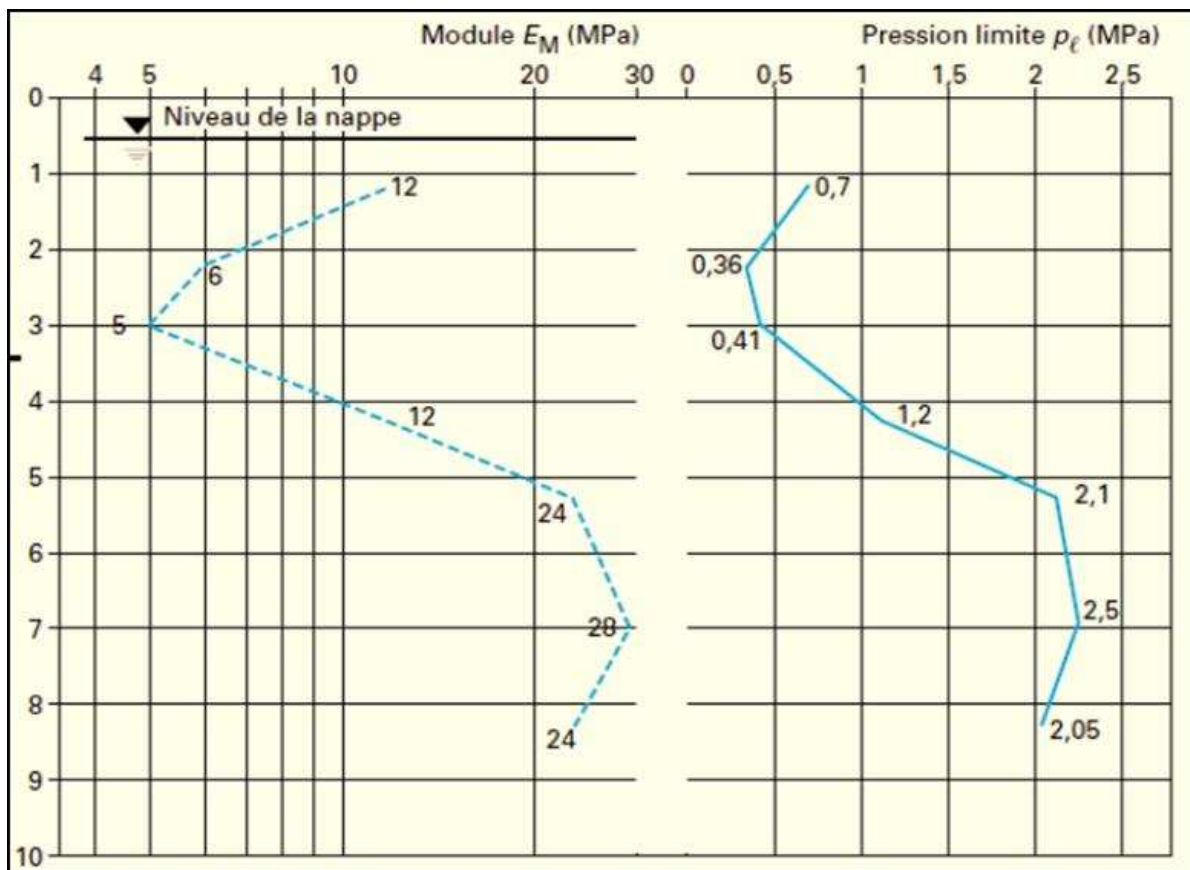


Figure 24 : Profil pressiométrique de Ménard

Au-delà de la pression de fluage (P_f), le sol entre dans le domaine plastique, jusqu'à ce que la déformation augmente très rapidement, jusqu'à une pression limite (P_l). Les deux paramètres E_M et P_l (Fig.24) sont très importants pour calculer le tassement (Cambou and Bahar, 1993), ainsi que la contrainte de rupture d'une fondation superficielle ou profonde. Le pressiomètre est également utilisé pour contrôler in situ la qualité du sous-sol (Monnet, 2016). Les valeurs du coefficient E_M/P_l permettent de juger l'état de consolidation des sols cohérents (Baud and Gambin, 2013; Jolivet and Kteich, 2022), suivant le classement suivant ;

- $E_M/P_l < 5$: Formations remaniées ou triturées.
- $5 < E_M/P_l < 8$: Formations sous-consolidées.
- $8 < E_M/P_l < 12$: Formations normalement consolidées.
- $12 < E_M/P_l < 15$: Formations légèrement sur-consolidées.
- $E_M/P_l > 15$: Formations fortement sur-consolidées.

3.3 L'essai à l'inclinomètre

L'inclinomètre est constitué d'une sonde mobile étanche de 50 cm de long, reliée à un câble inextensible par un connecteur étanche. Le contact entre la sonde et le tube se fait en quatre points au moins (Fig.25 & 26). Un système de mesure et de stockage des données enregistre la position du niveau bas de la tige de guidage de la sonde par rapport au repère de

surface situé au sommet du tube. Il mesure également l'inclinaison de la sonde par rapport à la verticale. L'inclinomètre utilisé dans notre étude est un GEOKON modèle GK 604 D (Fig.27), avec un système numérique. L'installation et le suivi des résultats sont réalisés selon la norme NF P94-156. L'essai à l'inclinomètre a prouvé son efficacité pour juger à long terme le déplacement de masse et l'évolution dynamique des versants (Gérard Bigot, 1997).

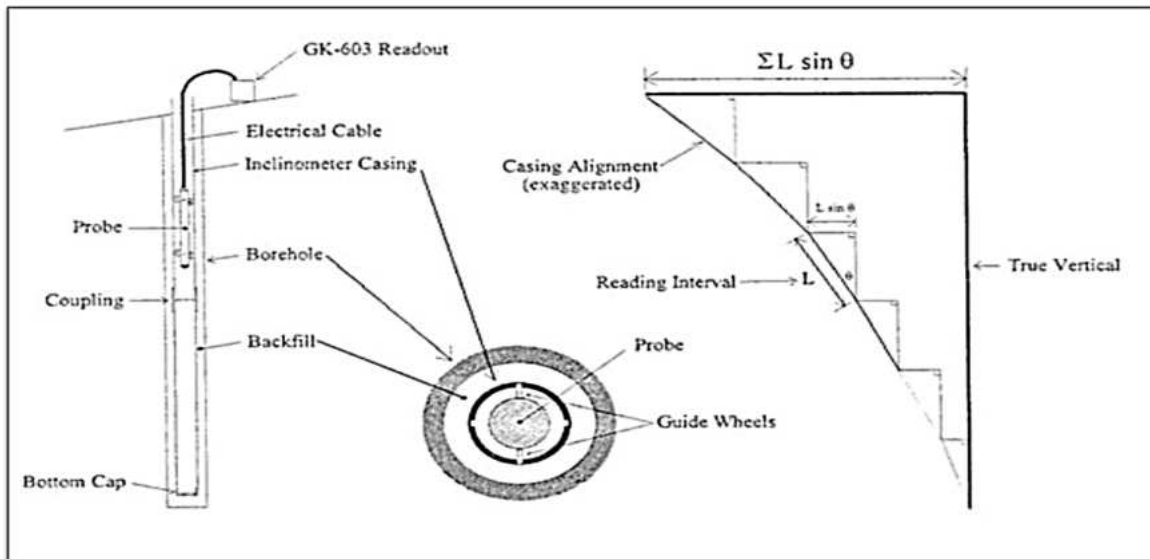


Figure 25 : Schéma de principe de l'essai à l'inclinomètre

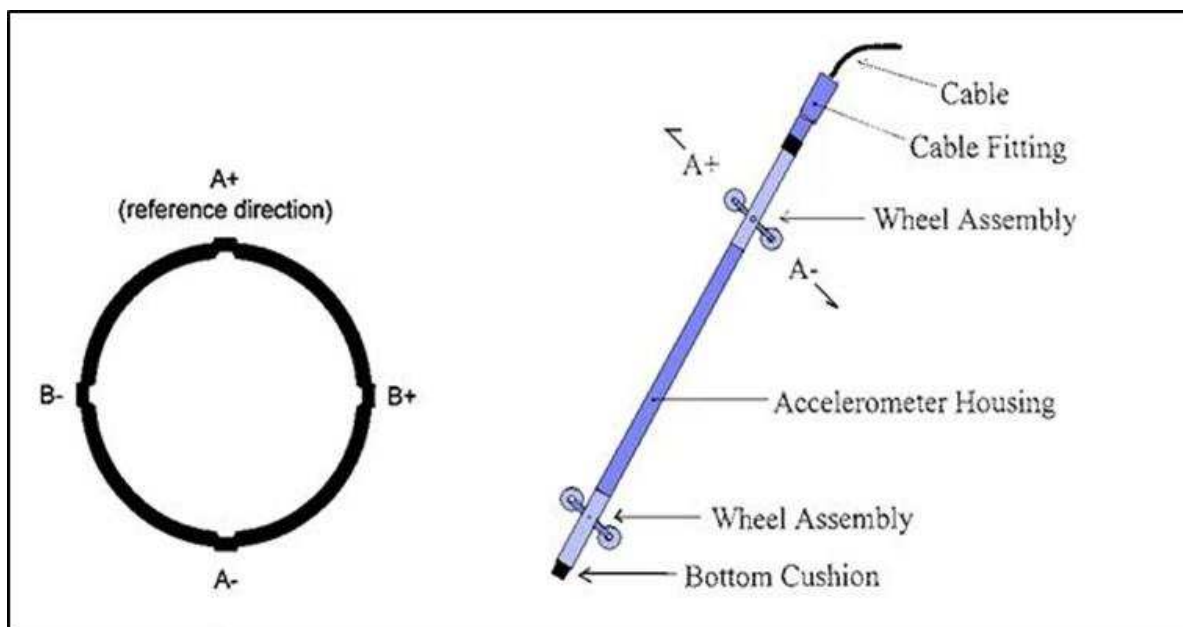


Figure 26 : Description de la sonde de l'essai à l'inclinomètre.



Figure 27 : Exemple d'appareil de mesure (GK604D)

4. Quel essai choisir pour étudier les versants instables et les mouvements de terrain

Le chercheur doit en premier lieu définir les caractéristiques et les propriétés qu'il désire connaître. Suivant les besoins prédéfinis (D.Holtz and Kovacs, 1981; Anagnostopoulos et al., 2013), la liste des essais sera alors dressée, en programmant ceux à effectuer in situ et les autres à opérer dans le laboratoire.

En général, les essais commencent par une reconnaissance du sol et une prise d'échantillons des matériaux situés dans l'enceinte de la zone d'étude. En exploitant, les données géologiques du site, la topographie et la morphologie du terrain et aussi en observant les failles et diaclases visibles en surface. Après, on peut définir, le nombre et l'emplacement des sondages carottés tout en prenant en considération les contraintes du terrain qui parfois rendent très difficile la mise en place de la machine de perforation (Baziz et al., 2009; Monnet, 2016).

5. Méthodes géophysiques

5.1 Généralité sur la géophysique

On peut dire que la géophysique est l'application des lois de la physique pour étudier les formations géologiques, la présentation structurelle et lithologique du sous-sol et aussi l'aspect hydrogéologique (Astier, 1971). Dès le début du 17ème siècle, des recherches de minerais de fer ont été effectuées en suède par l'étude des anomalies du champ magnétique terrestre. La méthode magnétique est ainsi la plus ancienne technique de prospection géophysique. Ce n'est toutefois qu'après la mise au point en 1915, par Adolf Schmidt, d'un instrument de mesure précis, que cette méthode a pu être utilisée dans d'autres disciplines en particulier les études structurelles.

Au début du vingtième siècle la prospection géophysique se limitait généralement à la détermination des meilleurs emplacements des forages dans des zones assez restreintes dans des gisements ou carrières. Aujourd'hui, le rôle du géophysicien est devenu indispensable pour dresser des bilans détaillés dans le domaine minier (Deliac and Valla, 1980; Théophile

and Gérard, 2010), des hydrocarbures (Camacho Ortegon, 2009; Nicaise et al., 2019), de l'hydrologie et aussi de la géologie (Elfakih et al., 2020). Aussi, les prospections géophysiques ont donné preuve de leur efficacité dans l'étude des glissements de terrain (Frappa and Lebourg, 2001; Lebourg et al., 2003; Jongmans and Garambois, 2007), la détermination des failles et diaclases et le repérage des cavités et karsts (Descloitres and Ritz, 1994; Aouka et al., 2012). Il faut noter aussi que la géophysique à trouver sa place dans le domaine des recherches archéologiques (Tabbagh, 1992; Dabas, 2018).

L'avènement de l'informatique et les technologies de pointe, a provoqué un progrès considérable dans les techniques de prospection géophysiques et les outils de traitement des résultats. La géophysique se situe actuellement au premier plan dans les études minières, pétrolières et hydrauliques. Elle est devenue aussi un outil incontournable pour compléter les prospections géotechniques.

La géophysique comporte plusieurs méthodes distinctes, qui sont utilisées suivant les besoins spécifiques de chaque projet. Parmi ces méthodes, les plus connues sont :

- Les méthodes Gravimétriques
- Les méthodes magnétiques
- Les méthodes sismiques
- Les méthodes de prospection électriques

5.2 Quelle méthode géophysique choisir pour étudier les mouvements de terrain

Dans notre étude, nous avons choisi les méthodes de prospection électrique et plus précisément la méthode de Tomographie de Résistivité Electrique (TRE). Ce choix, s'est imposé de par les avantages qu'elle offre cette méthode (Zhdanov and Portniaguine, 1999; Perrone et al., 2014; Nacira and Bachir, 2015) et la disponibilité du matériel de prospection dans le département qui m'a accueilli. Parmi les avantages que nous pouvons attribuer à la méthode choisie, on peut citer :

- Le coût de l'essai qui reste relativement abordable par les chercheurs académiques
- Les résultats obtenus (profils) sont directement exploitables
- Les profils de tomographie résistivité électrique (TRE) restent faciles à interpréter par les chercheurs et les ingénieurs qui ont une connaissance modeste dans le domaine de la géophysique
- Les résultats erronés sont facilement détectables sur site et des contrôles peuvent être faits séance tenante pour améliorer le rendu
- Le matériel de prospection ne demande pas des moyens de manutention spéciales et peut être transporté dans une voiture ou des véhicules utilitaires

5.2.1 Principe de la tomographie électrique

La méthode de la tomographie de résistivité électrique (TRE) est fondée sur la mesure des résistivités électriques apparente du sous-sol, au moyen d'un quadripôle : deux d'injection de courant et deux de mesure de la différence de potentiel (Fig.28), cela est effectué en se déplaçant le long du profile sur toutes les électrodes, en constituant ainsi une série de mesures.

Après chaque série de mesures la géométrie du quadripôle change et en augmentant l'espace entre électrodes (selon la configuration choisie), on peut atteindre des profondeurs plus importantes. Et ainsi de suite jusqu'à la réalisation de toutes les combinaisons possibles (Zhdanov and Portniaguine, 1999). Cette opération est effectuée au moyen d'une flûte de multiconducteur automatiquement géré par un résistivimètre.

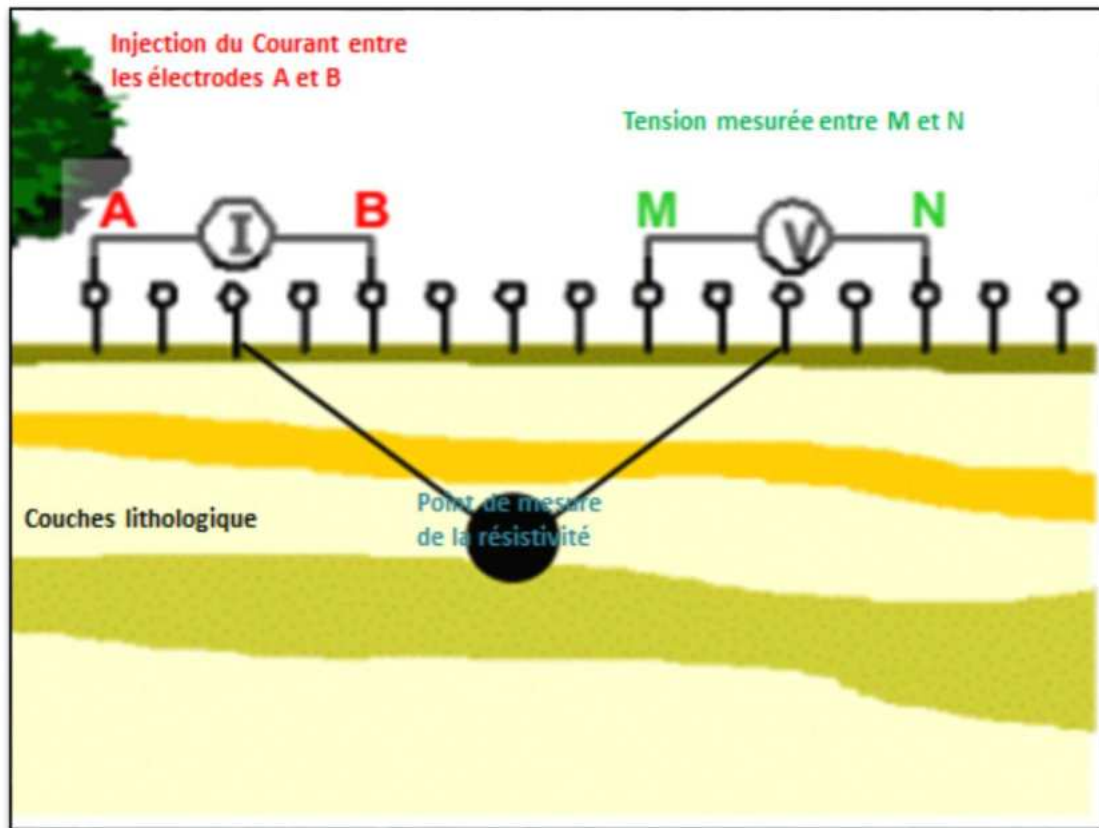


Figure 28 : Principe de mesure de la résistivité électrique au centre de AB- MN

Si I est le courant électrique injecté entre les électrodes A et B et ΔV la différence de potentiel (DDP) mesurée entre les électrodes M et N ; ces deux valeurs sont liées par l'équation empirique :

$$\rho_{\text{app}} = k \frac{\Delta v}{I}$$

Où :

ρ : est la résistivité calculée en (Ωm)

k : est un facteur qui dépend de la géométrie du dispositif

Chaque roche possède une résistivité bien spécifique qui peut être caractérisée par rapport aux autres matériaux (Fig.29). Ainsi, en mesurant les diverses valeurs de ρ dans un sous-sol, on peut conclure la nature de la roche qui constitue une couche bien définie dans la lithologie du terrain étudié.

Plusieurs montages entre les électrodes de courant et ceux de DDP existent, ils sont choisis par le géophysicien en fonction de la nature du terrain investigué et aussi suivant la

profondeur du profil souhaitée. Les montages les plus courants utilisés pour étudier la lithologie d'un terrain et les mouvements de terrain sont schématisés dans la figure 30 de ce paragraphe.

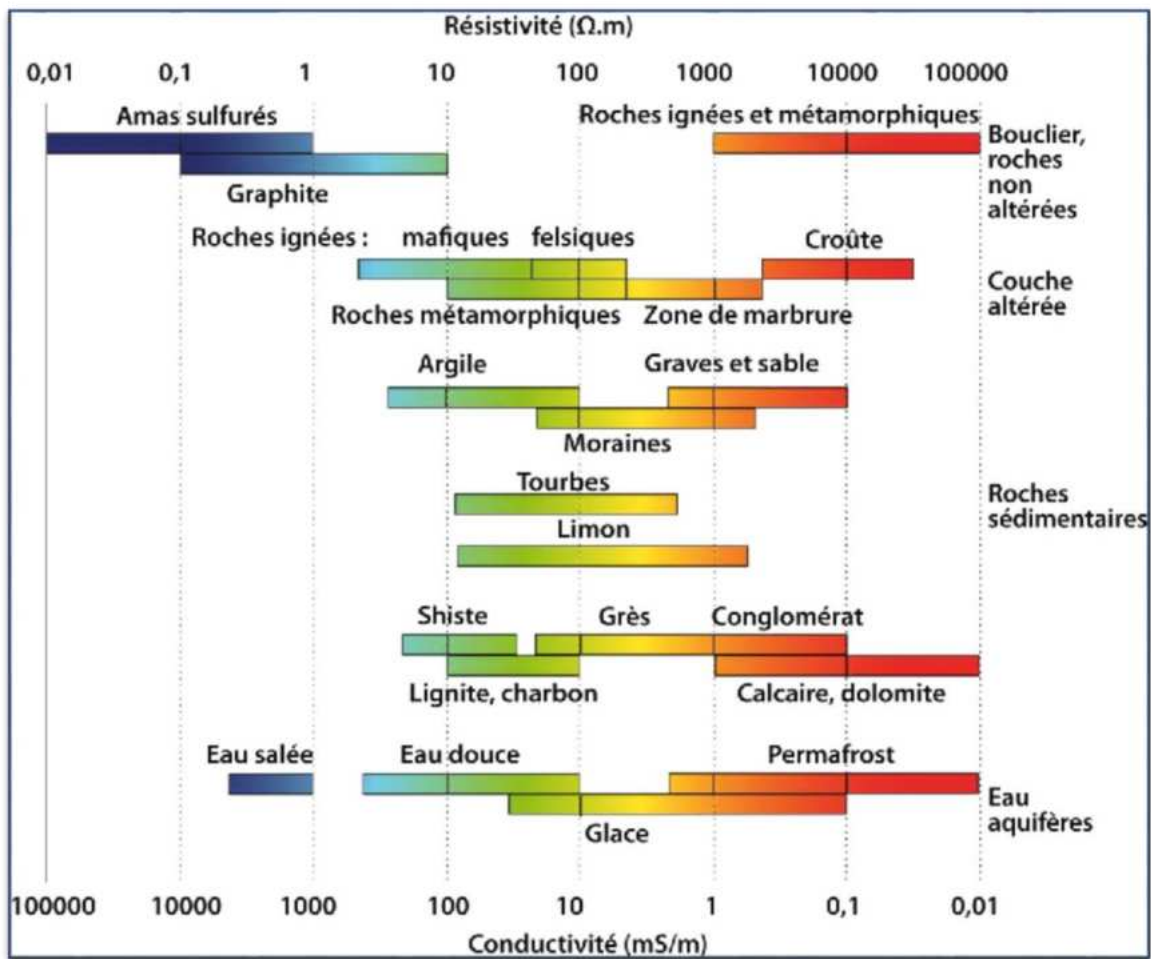


Figure 29 : Gamme de résistivités des matériaux rencontrés en géophysique
adapté d'après (Palacky, 1988)

Il est important de souligner que les montages schématisés dans la figure 30, ne représentent qu'une sélection parmi de nombreux types de montages utilisés en tomographie électrique. Le choix du montage dépendra des objectifs spécifiques de l'étude, de la configuration géométrique de l'objet ou du milieu à imager, ainsi que des contraintes expérimentales auxquelles on fait face. En fonction de ces facteurs, d'autres montages et configurations peuvent être adaptés pour répondre aux besoins particuliers de chaque situation.

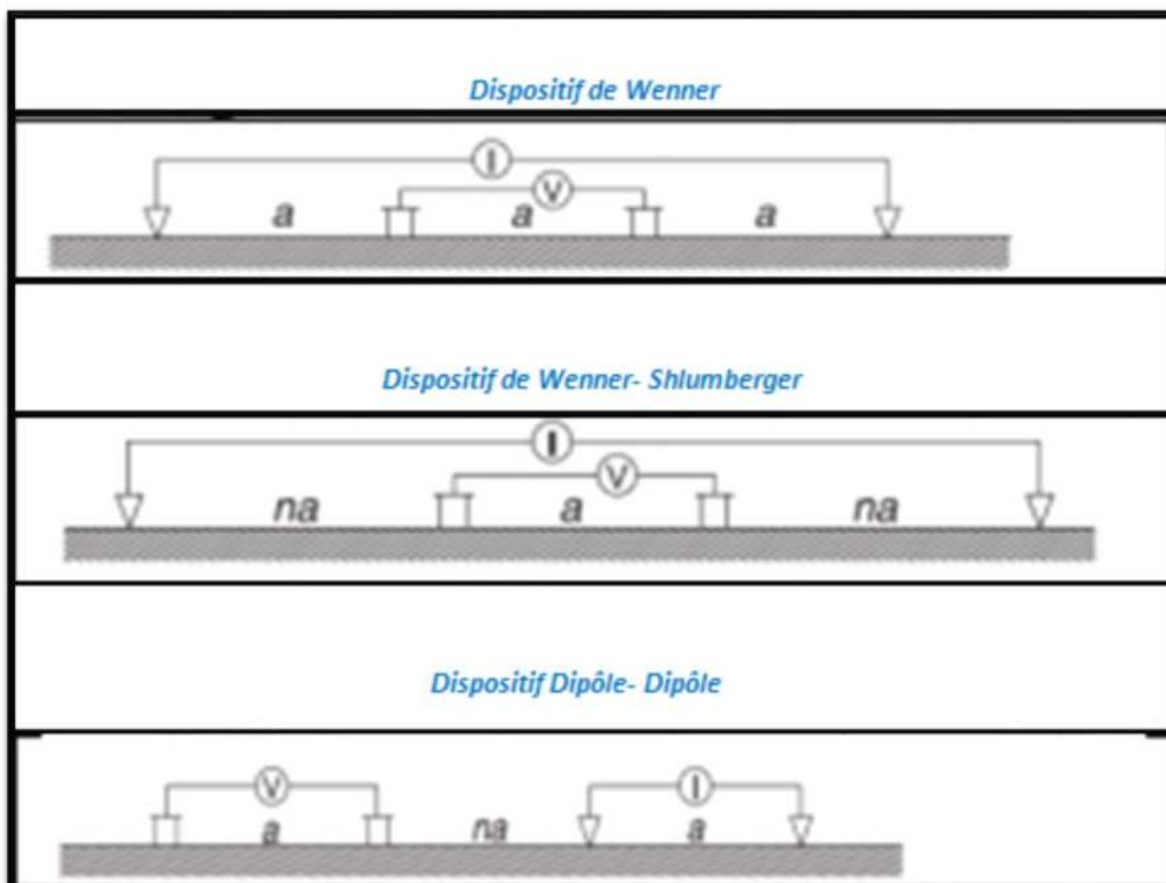


Figure 30 : Principe simplifié de trois montages courant dans la prospection électrique appliquée dans les études lithologiques et glissements de terrain

Il faut noter que la tomographie électrique est une technique de prospection géophysique qui nécessite certaines conditions de terrain et un environnement spécifique pour être efficace (Perrone et al., 2014; Villaseñor et al., 2015; Abdel-Ilah et al., 2022). En particulier le sol doit avoir une conductivité électrique suffisamment faible pour permettre la propagation du courant électrique sans atténuation significative. Aussi, les conditions météorologiques peuvent également affecter la qualité des mesures. Car les sols humides où des précipitations intenses ont eu lieu récemment, peuvent influencer sur la résistivité électrique du sol et nécessiter des ajustements ou des corrections supplémentaires.

6. Application de la tomographie électrique à notre étude

L'acquisition des données géo-électriques a été effectuée avec le résistivimètre « X612EM+ » de chez MAE (Fig.31). Pour avoir un compromis entre la résolution spatial et la profondeur d'investigation nous avons opté pour le dispositif combiner Wegener – Schlumberger (Fig.30), la distance inter-électrodes étant fixée préalablement. Pour le calcul des profils, nous avons utilisé la méthode d'inversion des moindres carrés régularisée (Zhdanov & Portniaguine 1999) qui est une technique d'inversion au sens de moindre carré, en utilisant un facteur de lissage permettant de donner un modèle à distribution lisse par blocks à résistivité constante.

L'équation en forme matricielle de cette inversion est comme suit :

$$(A^T W^T W A + \mu C^T R C) \Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T R C m$$

Avec :

A : Matrice des dérivées partielles de la résistivité apparente (le Jacobien)

C : Operateur de lissage

W : Matrice des erreurs relatives des mesures

m : Vecteur des paramètres du modèle

μ : Paramètre de régularisation

Δf : Vecteur d'écart entre les valeurs calculées et mesurées

R : Facteur de mise au point.

Cette méthode d'inversion est mieux adaptée au cas où la distribution de la résistivité du sol est très contrastée (cas de limites bien définies entre les éléments ou couches géologiques) elle permet de donner un modèle qui montre clairement les limites des différentes couches ou contacts ce qui correspond parfaitement à notre cas puisque on explore dans notre zone d'étude les formations de schiste et micaschiste traversées par des failles et diaclases (Frappa and Lebourg, 2001). L'inversion s'est effectuée au moyen du logiciel Zondres2D.

L'acquisition des données de la TRE a été effectuée selon des profils rectilignes en choisissant la direction qui a le minimum de variation topographique. Ces profils ont été posés aussi de façon à imager en profondeur les éléments morfo-structuraux observés à la surface, et qui peuvent contrôler la dynamique des mouvements de terrain.

Selon les cas et la profondeur d'investigation voulue, plusieurs configurations en tomographie électrique ont été utilisées (Fig.30). Pour tous les profils l'espace inter-électrodes a été fixé à 10m. Plusieurs profils de différentes longueurs ont été implantés selon l'étendu du MT et l'accessibilité du terrain. On dispose de 72 électrodes (Fig.31), soit une longueur maximum de profile de 710 m. tous ces éléments ont influencé sur la durée et la méthode de travail pour chaque section.

La variation de la résistivité dans le modèle a pour cause plusieurs origines. En se basant sur la géologie du site, la cartographie structurale et les résultats des sondages géotechniques, l'interprétation devient facile et les ambiguïtés sont éliminées. Le modèle montre aussi le contact entre les divers types de sol, ce qui permet d'avoir une idée claire sur les limites des différentes couches lithologiques. Au niveau des failles identifiées en surface le modèle peut montrer des variations brusques de la résistivité réelle, ce qui confirme la continuation des failles vers le bas qui peuvent parfois toucher le substratum. La zone à faible résistivité (environ 40 Ohm.m) au niveau du profile est interprétée comme zone à risque de glissement. En effet, la faible résistivité témoigne d'une zone dont la lithologie est constituée essentiellement de matériaux altérés. Cette lithologie est moins dure et moins cohésive donc facile à glisser si un facteur externe déclenchant agit, tel que la pluviométrie.



Figure 31 : Equipement de mesure de la résistivité électrique utilisé dans notre étude

En conclusion le tomogramme résultant de l'inversion des données de la tomographie de la résistivité électrique est une image très utile du sous-sol qui permis d'identifier les parties à grande altération, la géométrie des couches en sous-sol et la structure de la masse glissante ainsi que la zone à risque potentiel.

1. Données générales

Entre Oued Laou et Jebha, le tracé de la route nationale N16 longe la mer méditerranéenne dans un paysage montagneux très accidenté, traversé par des cours d'eau sous forme de Chaâba, Talweg et oueds très profonds. Elles existent cependant des rivières à lit relativement large au niveau de leur zone d'embouchure dans la mer et La topographie s'adoucit relativement dans ces espaces. L'aménagement de cette partie de la route dans des terrains où la roche est souvent de nature ductile, décompressée et broyée par les diverses contraintes tectoniques connus dans le rif interne (Chalouan et al., 1995; Tahayt, 2008) ; n'a pas été une tâche facile. Beaucoup de mouvements de terrain ont eu lieu même pendant la phase de chantier.

La réalisation de la rocade méditerranéenne a engendré des mouvements des terres importants. Des collines ont été rasées, des versants ont été taillés pour pouvoir suivre le tracé routier ; et des grands remblais ont été exécutés pour franchir les cours d'eau et châabas. Parmi les conséquences désastreuses de cette intervention anthropique, le déclenchement des instabilités de plusieurs versants. Ainsi, des talus et collines qui étaient dans un état stable avant la réalisation de la rocade sont devenues très actifs et menacent actuellement les populations et bloquent la circulation des véhicules à l'occasion de chaque précipitation intense.

Les sections de routes menacées sont très nombreuses et une liste exhaustive ne peut être dressée avec fidélité. Néanmoins, ils existent des tronçons très vulnérables qui mobilisent régulièrement les services d'entretien de la route. Des moyens et des budgets importants sont engagés pour parer à ces mouvements de terrain et glissement très menaçant.

La lecture des rapports et expertises établis par les divers organismes étatiques et privés, confirme l'existence d'un certain nombre de sections de route à risque potentiel. Ces zones très instables perturbent régulièrement la circulation routière et les dégradations des infrastructures dans ces tronçons de route sont très remarquables.

Dans notre étude, nous avons essayé de dresser un inventaire des sections à risque majeur et où le mouvement de terrain est activé dans le talus naturel et non pas dans les remblais d'apport. Cette liste est loin d'être exhaustive, des versants peuvent être ajoutés à ce bilan, d'autres par contre peuvent être retirés, en fonction des critères de choix et l'objectif de l'étude.

Onze sections ont été recensées dans notre étude. Il s'agit des versants qui ont causés des dégâts suites aux pluies des trois dernières années ; en particulier, après le pique de précipitation du mois de mars 2020 (Fig.10). Dans nos visites des lieux, nous avons été témoins des dégâts causés et de l'ampleur des surfaces des talus instables. Ces points actifs ont été répertoriés et repérés suivant leur point kilométrique dans la N16, tout en indiquant la localité la plus proche, mais aussi géolocalisées suivant leurs coordonnées GPS que nous avons relevés sur place lors de nos visites (Fig.32, Tableau 4).

Tableau 4: Repérage des sections instables dans notre zone d'étude

Section instable	Agglomération la plus proche	Point Kilométrique dans la rocade Méditerranéenne	Coordonnées GPS de la section instable	
			X	Y
	Targha	134+000		
	Azenti	138+000		
Section 1		140+000	35°22'13" N	4°59'09" W
	Stihat	145+000		
	Chmaala	153+900		
Section 2		156+500	35°18'54" N	4°55'31" W
Section 3		158+000	35°18'34" N	4°54'42" W
	Sidi Yahya Arrab	164+500		
Section 4		168+800	35°17'31" N	4°51'38" W
Section 5		169+100	35°17'24" N	4°51'27" W
	Jnane Niche	170+000		
	Argoub	174+000		
Section 6		176+800	35°15'19" N	4°49'02" W
	Amter	180+500		
	Tahgassa	188+000		
Section 7		188+300	35°13'08" N	4°44'06" W
Section 8		190+200	35°12'47" N	4°43'49" W
Section 9		191+600	35°12'58" N	4°43'37" W
Section 10		192+200	35°12'30" N	4°42'12" W
Section 11	Jebha	198+600	35°12'20" N	4°40'19" W

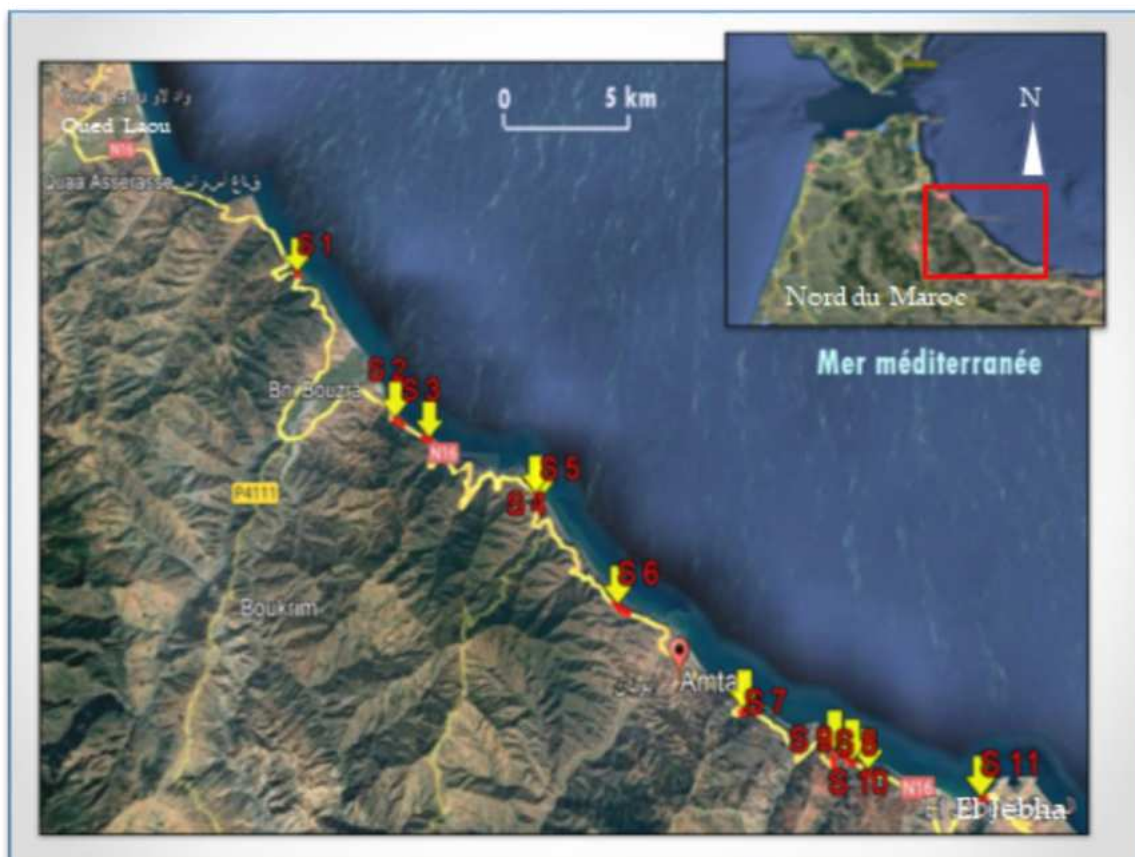


Figure 32 : Géolocalisation des sections instables dans notre zone d'étude sur image satellitaire (Google earth- 2023)

Les versants instables seront présentés suivant leurs caractéristiques géologiques et géomorphologiques. Et pour les divers glissements de terrain, on va analyser leur géométrie et définir les facteurs géotechniques et mécaniques qui favorisent leur instabilité (Fabre et al., 2002). Une étude chronologique des sections instables va permettre de définir les premières causes du désordre et l'évolution des instabilités dans le temps (Schoeneich, 1991; Cote, 2011;).

Deux tronçons des onze sections ont été étudiés profondément suivant notre méthodologie. Elles ont aussi fait l'objet de publication par nos soins dans des journaux scientifiques indexés. Il s'agit de la section S6, sise au PK 176+800 et la section S11 située à l'entrée de Jebha au PK 198+600.

Dans le présent chapitre, nous allons dresser un état des lieux de chacune des neuf autres sections listées, en mettant en évidence le début, les causes et l'évolution des instabilités. Un aperçu sur la géologie locale et la morphologie du terrain vont nous permettre de comprendre la nature des mouvements de terrain étudié (Jorda, 1970, Bégin and Filion, 1987).

2. Aperçu sur la géologie locale de notre zone d'étude

Notre zone d'étude se trouve dans le Rif interne entre Oued Laou et Jebha. Il traverse les unités de beni Bousera, Filali et Akaili (Abdelkhaleq et al., 2009; Michard, 2011). Dans cette partie de la thèse, on se limitera au cadre géologique local qui permet la description des formations superficielles affectées par les désordres constatés.

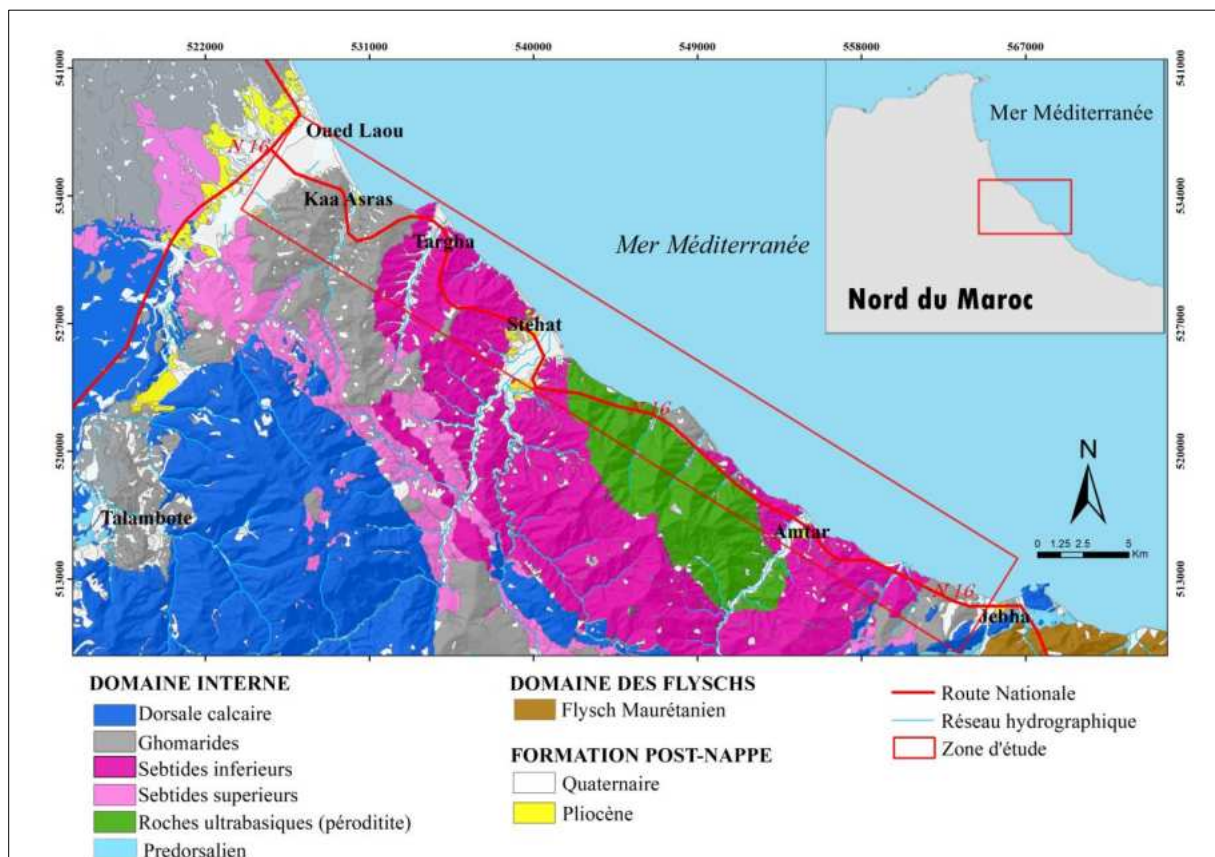


Figure 33 : Carte géologique de la zone d'étude

Dans cette partie du Rif interne, la nationale 16 traverse des terrains appartenant souvent aux domaines Sebides et Ghomarides (Chalouan and Michard, 1990; André Michard et al., 2008b). Aussi, dans un tronçon non négligeable entre Stehat et Amtar, la route scie la masse rocheuse ultrabasique du rif interne (Reuber et al., 1982; Abdelkhaleq et al., 2009; Gysi et al., 2011). Au niveau des oueds, la route est soutenue par des ouvrages d'art qui sont fondés dans des terrains quaternaires ou des dépôts récents (Fig.33).

Les mouvements de terrain constatés sur sites affectent principalement les croutes et les roches métamorphiques (Bakili, 1989; Fellah and Mastere, 2015). Les formations géologiques sont de nature schisteuse au niveau des sections S1 (PK 140+000), S2 (PK 156+500), S3 (PK 158+000), S4 (168+800), S5 (169+100), S6(176+800), S7 (PK 188+300), S8 (PK 190+200) et S9 (PK 191+600) et au niveau de la section S10 (PK 190+500) et S11 (PK198+600), on trouve aussi des formations de nature Pélito-graphiteuse (Fallot, 1937; Durand Delga and Kornprobst, 1963; André Michard et al., 2008b; Michard, 2011).

3. Etude des sections instables

3.1. Sections S1, S2 et S3 de part et d'autres de Stehat

Les sections S1, S2 et S3 sont les premières sections repérées en prenant la route N16 depuis Oued Laou vers Jebha. Elles sont situées de part et d'autres de Stehat.



Figure 34 : Repérage des sections instables S1, S2 et S3 sur image satellitaire (Google Earth 2023)

3.1.1. Section S1 située au PK 140+000

3.1.1.1. Repérage et situation de la section S1

Cette section se trouve après deux kilomètres d’Azenti et à cinq kilomètres de Stehat en venant d’Oued Laou, au point kilométrique 140+000 de la route N16 (Fig.34.A et B). Elle est dressée face à la mer dans sa totalité.

3.1.1.2. Etat des lieux de la section S1

La section S1 est affectée par des mouvements de terrain qui longe la voie sur une longueur d’environ 500 m. On peut observer sur site que la roche est très décompressée et a subi une altération importante. Cette section est marquée par deux versants instables. Dans le premier versant les débris de schiste gréseux sont noyés dans une matrice argileuse rougeâtre (Fig.35). Dans le deuxième talus la matrice est formée de limons gris à verdâtre (Fig.36). La croute végétale est très mince (50 cm en moyenne) ; des bandes de cette couche ont tendance à se détacher aux limites du glissement de terrain.

3.1.1.3. Diagnostic et analyse chronologique

Le glissement de terrain est superficiel et touche seulement la croute et la partie altérée de la roche. Aussi, on peut observer une faille dans le sens du pendage. Elle est colmatée avec des détriments et des apports récents. Des fissures sont visibles dans le remblai de la chaussée, côté mer (Fig.37). Les mouvements de terrain sont superficiels et ont tendance à s’approfondir vue la présence de roche très altérée et broyée (Eichenberger et al., 2013). Le risque actuel semble être gérable par les services d’entretien. Mais dans l’absence de solution radicale la situation risque de s’aggraver (Dumas et al., 1984; Hugonie, 1999; Gruzelle and Lebaut, 2022).

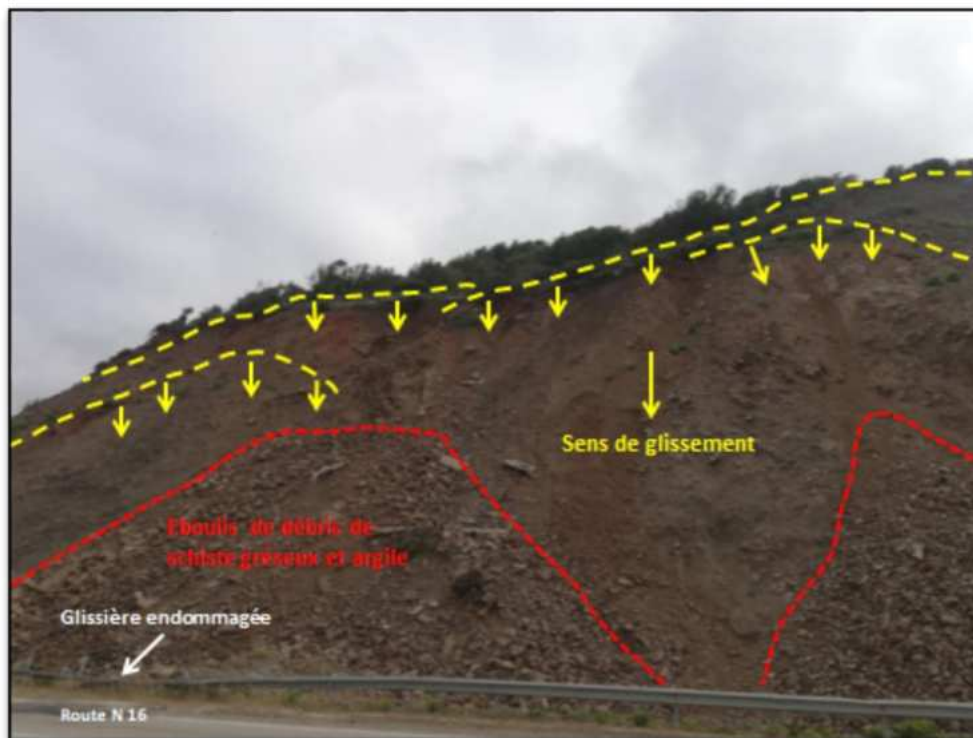


Figure 35 : Premier talus instable observé en amont de la section S1 (mars 2023)

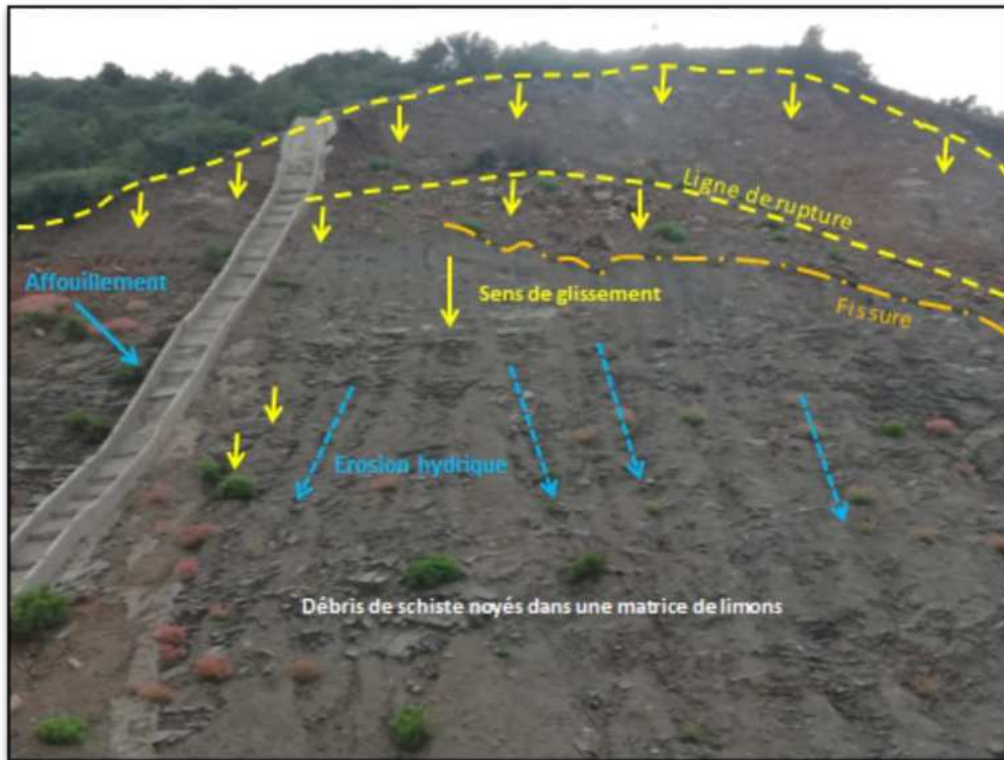


Figure 36 : Deuxième talus instable observé en aval de la section S1 (mars 2023)



Figure 37 : Fissures constatées dans la plateforme de la chaussée dans la zone de la section S1 (mars 2023)

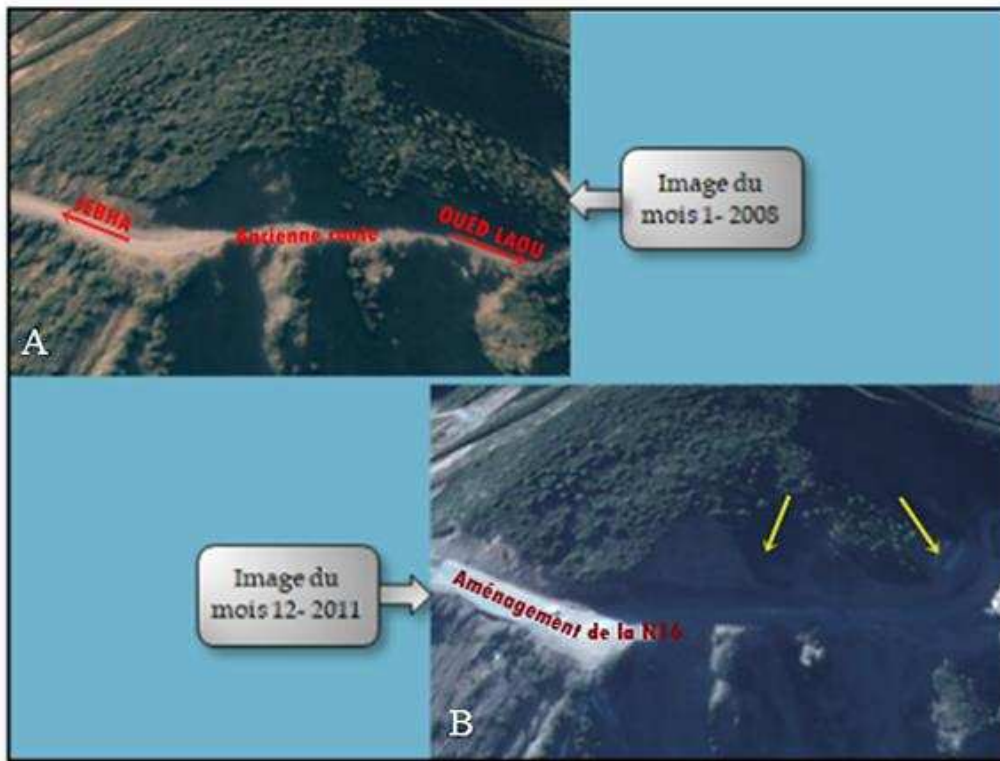


Figure 38 : Images satellitaires de la section S1 durant les mois 1-2008 et 12-2011 (Google Earth)

A) Etat du talus avant l'aménagement de la rocade méditerranéenne. B) Phase chantier de la route N16

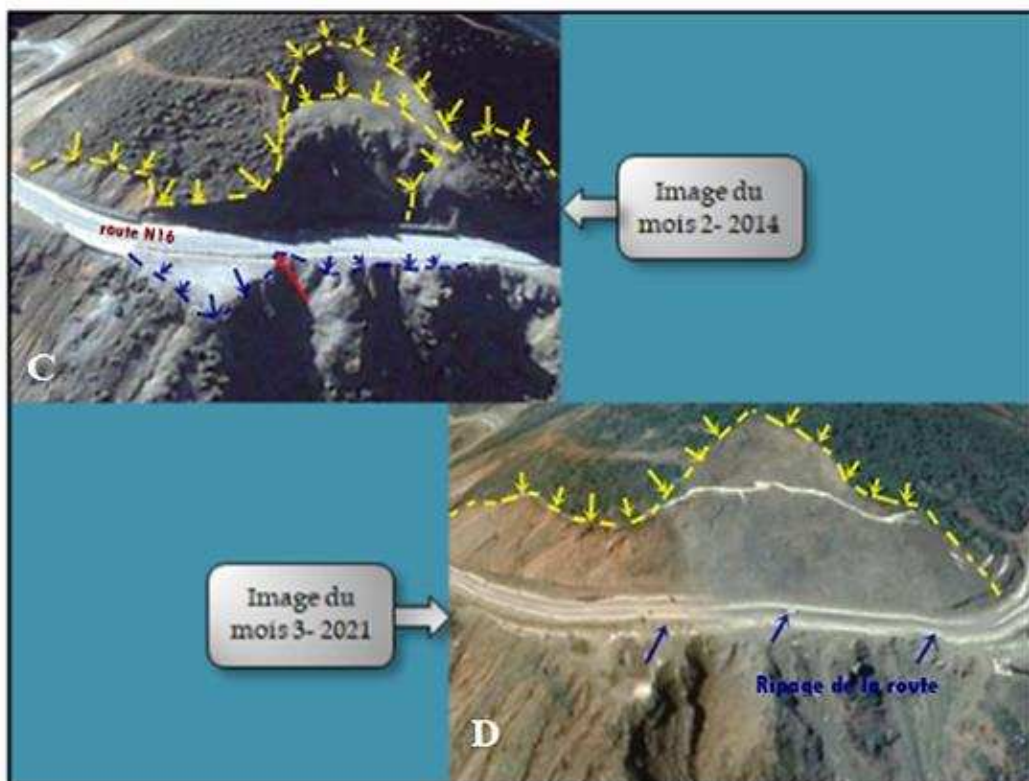


Figure 39 : Images satellitaires de la section S1 durant les mois 2-2014 et 3-2021 (Google Earth)

B) Activation de plusieurs surfaces instables de part et d'autre de la voie. D) Elargissement remarquable de la surface instable du talus

Le suivi et l'analyse des images satellitaires montrent que le talus était déjà instable avant l'aménagement de la rocade méditerranéenne (Fig.38.A). Mais l'intervention anthropique pour élargir la chaussée (2010 à 2012) et les actions de stabilisation du talus ont augmenté la surface des zones instables (Fig.39.C et D). A la suite des pluies exceptionnelles du mois de mars 2020, le glissement s'est réactivé en bloquant une partie de la voie.

3.1.2. Section S2 située au PK 156+500

3.1.2.1. Repérage et situation de la section S2

En quittant Chmaala d'un peu plus de deux kilomètres, dans le sens de Jebha, cette section instable se dresse dans le virage au point kilométrique 156+500 de la route nationale N16 (Fig.32.A.C). Le versant instable est entièrement exposé face à la mer.

3.1.2.2. Etat des lieux de la section S2

Deux zones actives peuvent être observées. Un grand glissement de terrain et une zone de dégradation des risbermes. Le désordre majeur reste le glissement de terrain qui prend des dimensions remarquables dans son milieu (Fig.41). Dans la partie supérieure du talus, des bandes d'une épaisseur de dizaine de centimètre à quelques mètres ont tendance à se déliter et glisser dans le sens du pendage qui dépasse 45° par endroit.

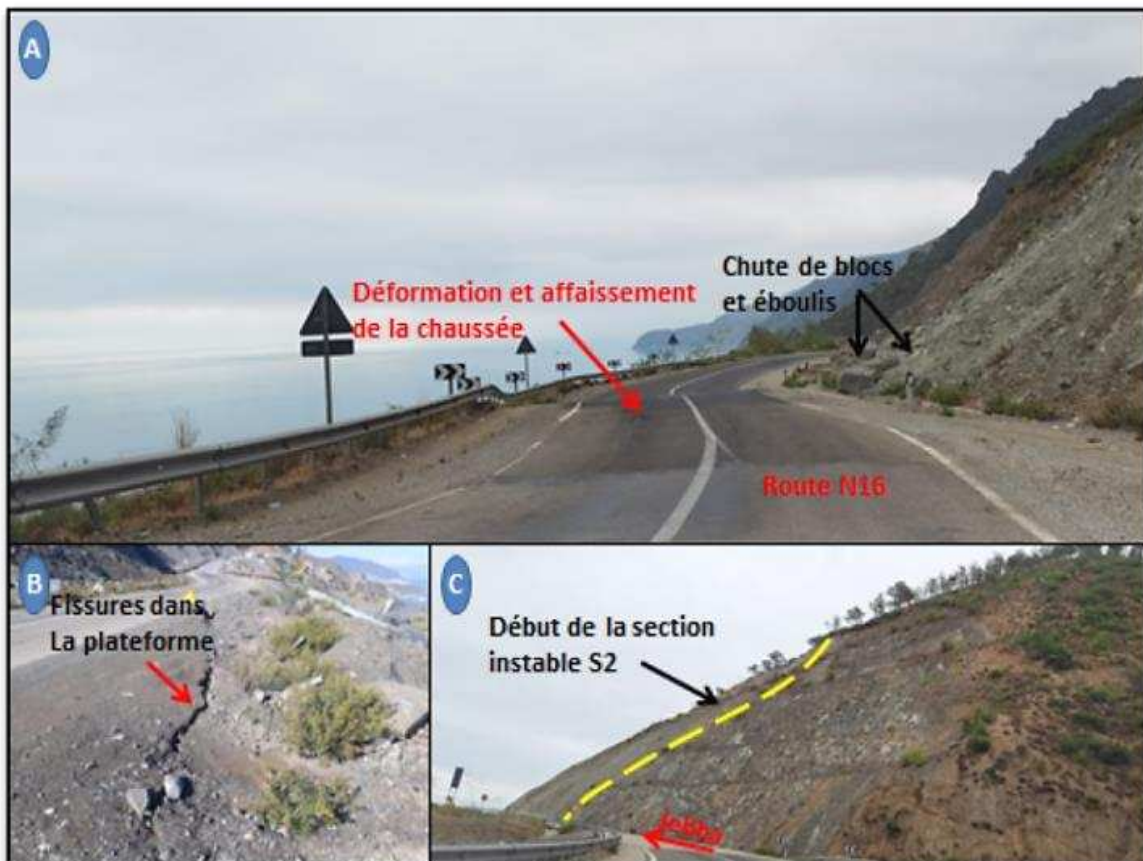


Figure 40 : Etat des lieux dans la section S2 (mai 2022)

- A) Déformation et affaissement remarquable de la voie. La voie est menacée directement par les chutes de pierres et éboulis. B) Fissuration de la plateforme de la chaussée. C) Début des instabilités dans la section S2 en venant de Oued Laou

Les instabilités dans le talus s'étendent sur une extension de 600 m environ. Les désordres se manifestent sous forme de fissures au niveau de la plateforme sur 200 m de longueur à partir du PK 156+800 (Fig.40.B). Un affaissement de la plateforme est visible au PK 156+900 (Fig.40.A), créant un point bas d'accumulation des eaux de ruissellement. La route est déviée entre le PK 156+500 et le PK 156+700.

3.1.2.3. Diagnostic et analyse chronologique

Au niveau de cette section, on retrouve deux formations : des colluvions de nature SIRT (Guilloux, 2005), recouvrant les granulites qui ceinturent les péridotites de Beni Bousera (Reuber et al., 1982; Gysi et al., 2011). En bord de route, un affleurement au pied de la zone de glissement révèle une schistosité orientée N100-30NE ; et en avançant de 300 m vers Jebha, cette schistosité a tendance à se réorienter jusqu'à atteindre une direction parallèle au contact granulites-péridotites.

Les observations sur site ont montré que la roche superficielle est très décompressée et très altérée avec une altération pénétrante. De ce fait, la lithologie de la partie superficielle est dominée par deux formations qui ont été reconnues sur place : à savoir les colluvions et les granulites fracturées. De point de vue géotechnique, on trouve deux types de sols: les matériaux granulaires sensibles à l'eau et une masse rocheuse (Campus, 1945; Habib, 1973; Guilloux, 2005).

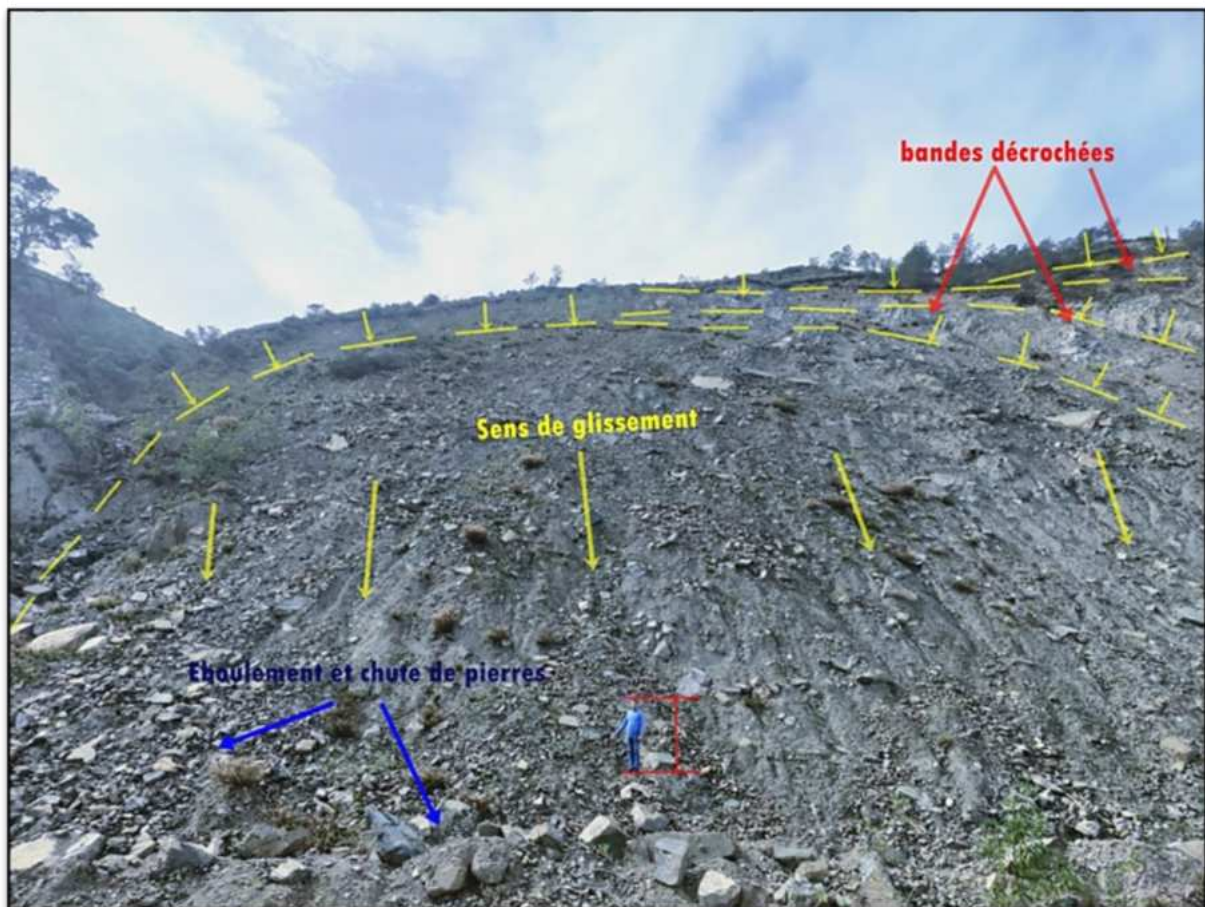


Figure 41 : Image reflétant les grandes dimensions du glissement qui se trouve au centre de la section S2 (aout 2022).

La combinaison des caractéristiques géologiques et morphologiques permet de classer cette section comme zone à risque avec une association glissement- éboulement (Dikau et al., 1996; Malet et al., 2005; Cruden and Couture, 2011). Comme on peut le voir sur l'image de la figure 41, le mouvement de masse qui touche la zone est un glissement de terrain semi profond (Colas and Pilot, 1976; Varnes, 1978) qui déplace les terrains de couverture et la partie décompressée de la masse rocheuse.

L'état actuel du talus montre des signes de vulnérabilité et prouve que le risque de glissement de terrain est imminent lors d'un éventuel épisode pluvieux intense.

Les images satellitaires informent que le talus était stable avant l'aménagement de la rocade méditerranéenne (Fig.42.A). Une première instabilité est apparue en 2010 pendant la phase du chantier (Fig.42.B). Des travaux de stabilisation ont été effectués et le talus est resté stable jusqu'à 2015 (source MEE), où le glissement s'est réactivé sans causer des dégâts importants ; jusqu'en mars 2020 où des précipitations intenses ont déclenché deux grands glissements de terrain (Fig.43.C et D).

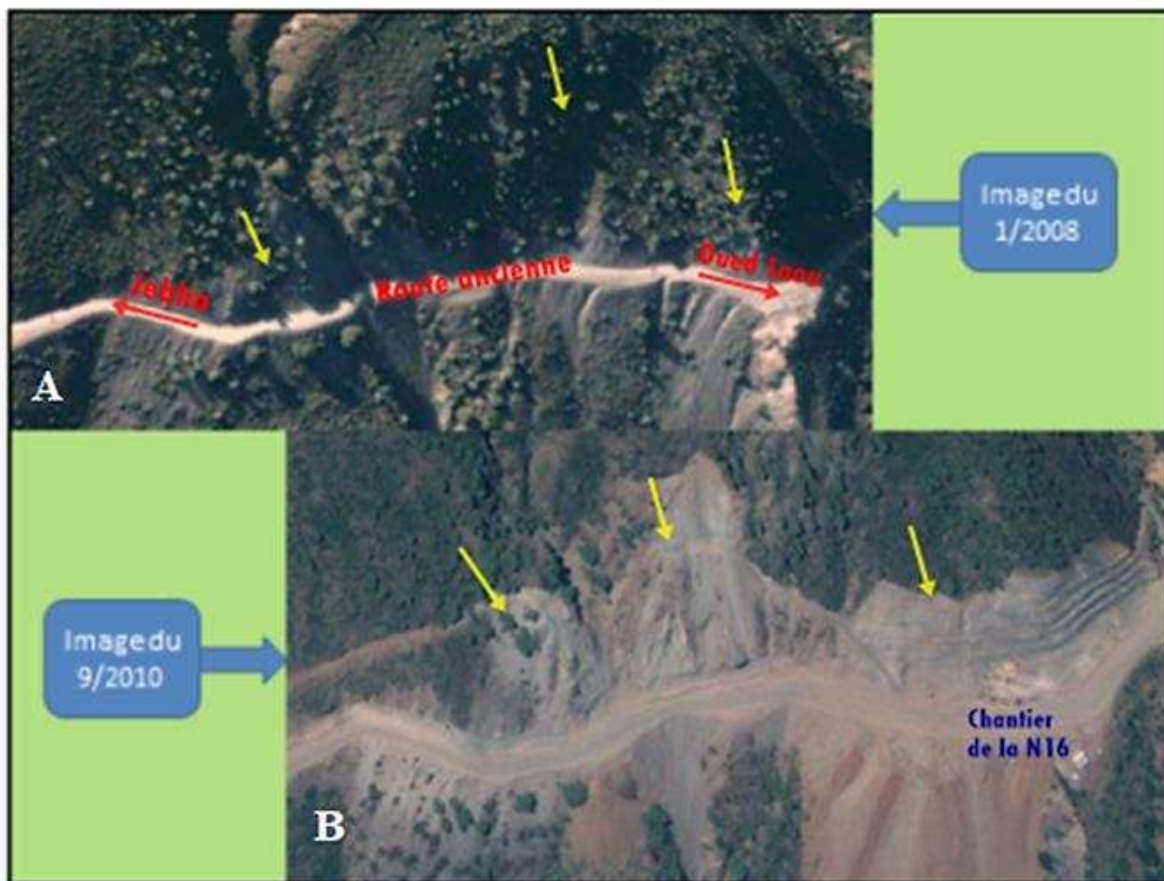


Figure 42 : Images satellitaires de la section S2 durant les mois 1-2008 et 9-2010 (Google Earth)
A) Etat relativement stable du talus avant l'aménagement de la route N16. B) Début des instabilités en phase chantier de la rocade méditerranéenne

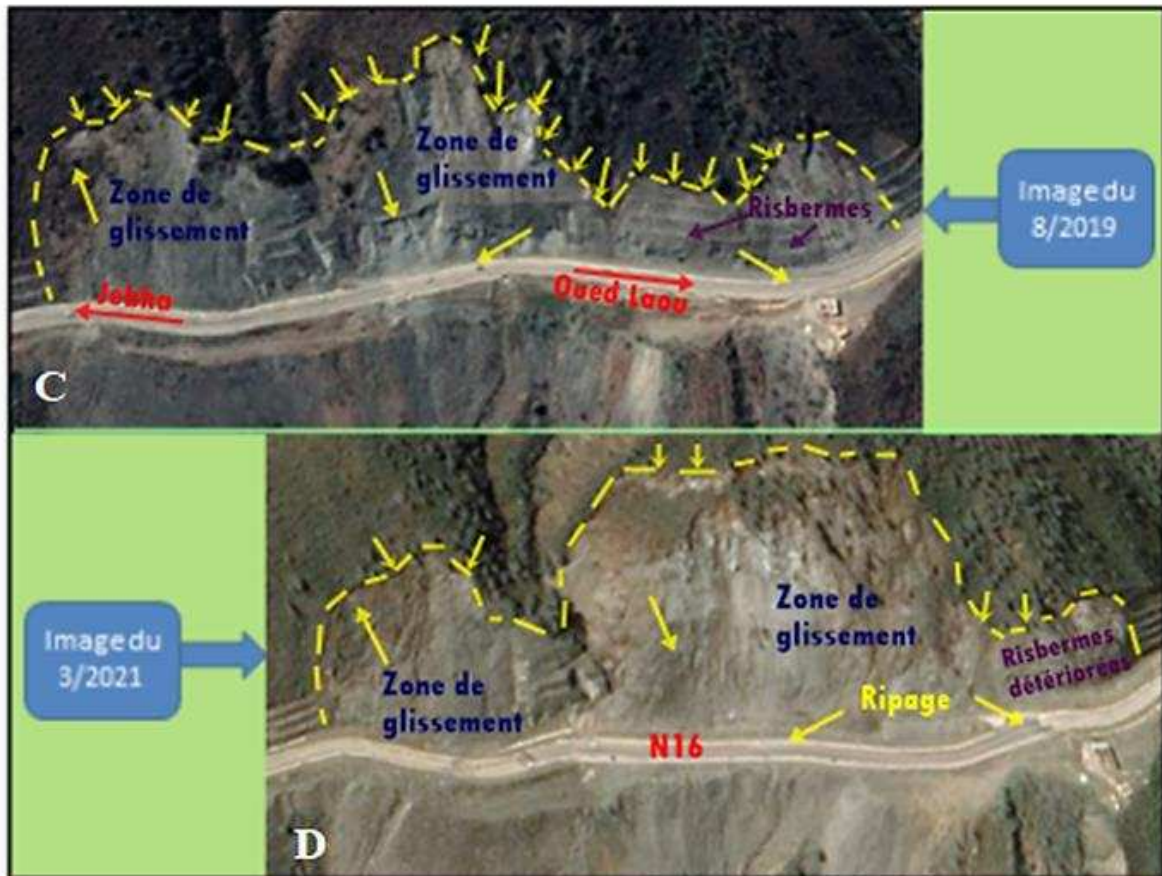


Figure 43 : Images satellitaires de la section S2 durant les mois 8-2019 et 3-2021 (Google Earth)
 C et D. Développement de deux zones de glissement et détérioration des risbermes. Plusieurs déviations de la route sont réalisées dans cette section instable

3.1.3. Section 3 située au PK 158+000

3.1.3.1. Repérage et situation de la section S3

Cette section se trouve à moins de deux kilomètres de la section précédente, dans le sens de Jebha, aux points kilométriques 158+000, et avant Sidi Yaya Arrab (Fig.34.A et C). Le versant de cette section est entièrement orienté face à la mer.

3.1.3.2. Etat des lieux de la section S3

La surface du talus instable est très importante (Fig.44.A et 47). La chaussée a été remarquablement ripée vers la mer pour éviter les éventuels glissements de terrain. La partie du terrain se situant entre le talus et le nouveau tracé de la voie connaît un affaissement important, qui dépassent 1,5 m par endroit (Fig.45.D). La continuité de cet effondrement est marquée par une fissure de quelques centimètres de largeur (Fig.45.E et F), qui atteint la chaussée de part et d'autres. Aussi, des petites fissures peuvent être observées de l'autre côté de la voie (côté mer).



Figure 44 : Etat de la section instable S3 (aout 2022)

A) Vue d'ensemble reflétant la dégradation de la chaussée et l'état du talus. B) Le schiste gréseux observé présente un plan de clivage parallèle au sens du pendage. C) Extension du glissement au début de la section S3 en venant de Oued Laou

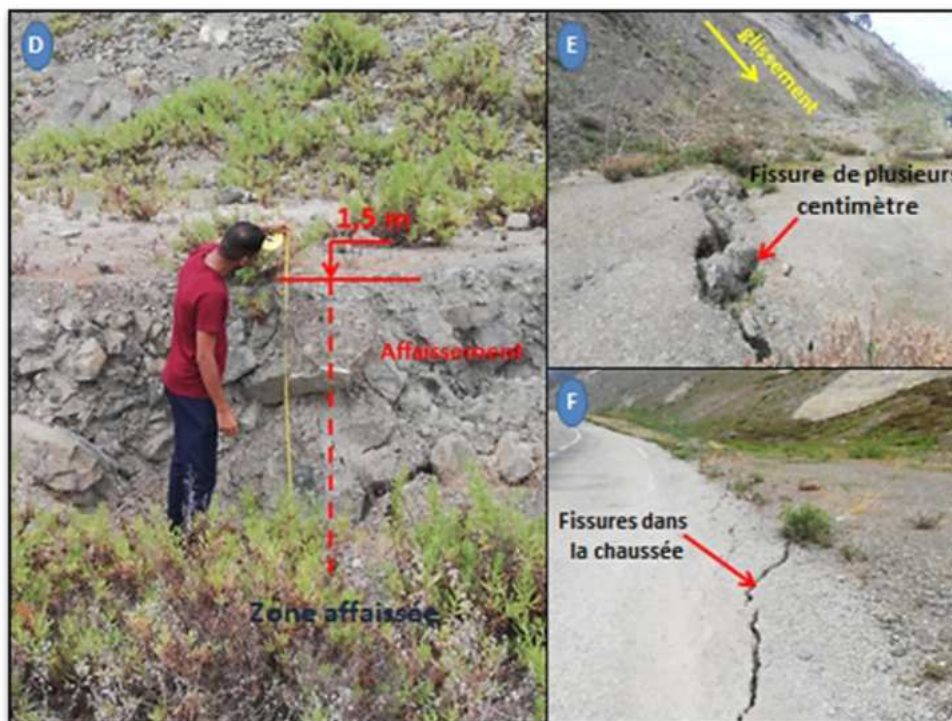


Figure 45 : Images rapprochées de quelques dégradations dans la section S3 (mars 2023)

D) Image reflétant l'ampleur de l'affaissement qui atteint 1,50 m par endroit. E) Fissure au pied du talus de plusieurs centimètres. F) Fissure dans l'accotement droit de la chaussée (côté mer)

Les services du ministère de l'équipement et de l'eau, chargés de l'entretien de la route nous ont informé que des travaux de correction ont été débutés dans cette section, mais le chantier s'est arrêté suite à l'apparition de ces affaissements et fissurations. Chose qui témoigne que ces disfonctionnements sont relativement récents (Après l'année 2019).

3.1.3.3. Diagnostic et analyse chronologique

Ils existent trois formations dominantes dans ce talus : Le schiste gréseux qui présente des plans de clivage parallèles à la pente du versant (Fig.44.B). Il est exposé directement aux intempéries et à l'agression de la salinité marine. Un effet miroir s'est formé (Fig.46), facilitant ainsi le glissement des blocs et débris qui émanent de la dégradation de la roche (Azimi and Desvarreux, 1996; Abdelkhaleq et al., 2009; Martins-Campina, 2005; Fort and Cossart, 2011). On peut constater aussi des grands blocs de schiste qui s'apprêtent à se détacher du talus.

En tête de la colline, une grande bande de grès vient rappeler les affleurements des Flyschs dans cette zone du Rif interne (Maate and Didon, 1989; Durand-Delga et al., 1999; André Michard et al., 2008b). Cette roche est relativement moins altérée et ne présente pas de signes d'instabilité.

Au début de cette section en venant d'Oued Laou, une nouvelle zone d'instabilité est en train de se développer (Fig.44.C). Les matériaux glissés contiennent les fragments de la croute et les débris du schiste.



Figure 46 : Vue d'ensemble du versant reflétant l'ampleur de la zone active. Les surfaces de schiste exposées à l'air sont très lisse et provoquent un effet miroir (mars 2023)



Figure 47 : Images satellitaires de la section S3 durant les mois 8-2003 et 1-2008 (Google Earth)
 Ces deux images reflètent l'état stable du talus avant l'aménagement de la rocade méditerranéenne



Figure 48 : Images satellitaires de la section S3 durant les mois 9-2010 et 12-2011 (Google Earth)
 C) Chantier des travaux d'aménagement de la rocade méditerranéenne. D) Effondrement d'une partie du talus en phase de chantier durant le mois de décembre 2011.



Figure 49 : Images satellitaires de la section S3 durant les mois 2-2014 et 12-2017 (Google Earth)
 E) Ripage de la route vers le sens de la colline pour éviter le glissement du remblai de la plateforme. F) Effondrement du talus en décembre 2017 au même endroit du glissement de l'année 2011 provoquant le blocage de la circulation



Figure 50 : Images satellitaires de la section S3 durant les mois 9-2019 et 3-2021 (Google Earth)
 G) Elargissement de la surface de glissement et déviation de la voie. H) Apparition de nouvelles zones instables à l'aval en venant de Oued Laou. Développement des instabilités de la plateforme.

Les images satellitaires A et B de la figure 47 ci-dessus, témoignent de la stabilité du talus avant l'élargissement de la chaussée de la rocade méditerranéenne. On constate dans l'image C de la figure 48, la phase de chantier et les mouvements des terres en cours. L'image D de la figure 48, illustre les problèmes d'effondrement du talus même pendant les travaux d'aménagement routiers. Après, des instabilités sont apparues dans les remblais de la plateforme de la chaussée durant l'année 2011 (Source MEE). Chose qui a poussé vers la solution de ripage de la voie dans le sens de la colline au début de l'année 2014 (Fig.49.E). Le grand effondrement du talus après la période pluviale du mois de décembre 2017, a prouvé que cette solution de déviation n'était une bonne idée. Une correction du tracé s'est alors imposée pour s'éloigner de ce versant très instable. Ce dernier tracé routier est maintenu à nos jours.

Il existe actuellement une importante surface plane entre la voie et le pied du talus. Cette zone connaît un affaissement important (Fig.50.H), pouvant atteindre 1,5 m par endroit (Fig.45.D). Ce désordre se prolonge de part et d'autre par des fissures très larges, qui peuvent même être repérées dans les accotements de la chaussée (Fig.45.E et F). Ce désordre est certainement causé par le poids des grands volumes de remblai au niveau de la plateforme (Litvinenko et al., 1990; Romana, 1995; Triek et al., 2018).

En résumé, cette section est soumise à deux instabilités majeures : le glissement de terrain dans le talus qui s'élargit d'avantage et l'affaissement de la plateforme de la chaussée qui va certainement subir un effondrement engendrant un glissement important dans les matériaux de remblai (Bescond et al., 2003). Les précipitations seront certainement le facteur déclenchant de ce désordre (Gervreau and Seve, 1992).

3.2. Sections S4 et S5 à l'entrée de Jnane Ennich



Figure 51 : Repérage des sections instables S4 et S5 sur image satellitaire (Google Earth 2023)

3.2.1. Section 4 située au PK 168+800

3.2.1.1. Repérage et situation de la section S4

La section instable S4 se trouve à 2 km avant Jnane Ennich, en venant d'Oued Laou, au point kilométrique 168+800 sur la route nationale N16 (Fig.51). Cette section est exposée à la mer dans sa totalité.

3.2.1.2. Etat des lieux de la section S4

Plusieurs zones d'instabilité affectent cette section. La partie centrale de cette section présente un glissement de terrain important (Fig.55), qui longe la route sur environ 300 m et de hauteur dépassant 45 mètre, avec un pendage moyen de 45°.

On peut observer sur les lieux une grande déviation de la voie vers le talus pour parer au problème d'affaissement de la chaussée et le glissement des remblais de la plateforme. Les gabions qui soutenaient une partie des remblais ont été emportés par les crues et les matériaux qui glissent vers la mer.

3.2.1.3. Diagnostic et analyse chronologique

Le terrain sur place est formé de débris de schiste très broyé (Abdelkhaleq et al., 2009; Michard, 2011), noyé dans une matrice à dominance marneux-argileuse (Fig.52A et B). Le remblai de la plateforme est de même nature. Ce qui laisserait penser que la chaussée de cette section repose sur un sol formée par d'anciens dépôts prévenant des terrains de couverture qui avaient glissés avant l'aménagement de la nouvelle route. Cette information a été bien confirmée par les représentants du ministère de l'Équipement et de l'Eau. Le substratum rocheux étant très profond au-dessous la chaussée. La hauteur de remblai peut atteindre par endroit 60 m de hauteur.

La voie est déviée dans le sens du talus pour parer aux instabilités des remblais de la plateforme (Fig.52.A). Un caniveau relativement récent est réalisé au pied du talus. Il est rempli par les éboulis par endroit.

Les mouvements de terrain observés sur place sont de deux types: d'une part le glissement d'une bonne partie du talus favorisé par la présence de plans de schistosités à pendage défavorable (Fig.53.D) (Autran et al., 1975) et d'autre part les chutes de blocs de tailles centimétrique à métrique par endroits.

Aussi, nous avons constaté la présence d'une faille avec remplissage marneux verdâtre à grisâtre orientée dans le sens du pendage des talus (45° environ) comme présenté sur l'image C de la figure 53.

L'état actuel du talus montre des signes de vulnérabilité et prouve que le risque de glissement de terrain est imminent lors d'un éventuel épisode pluvieux intense.



Figure 52 : Etat des lieux de la section instable S4 (juin 2021).
 A) Déviation de la voie dans le sens du talus. B) Roche très altérée et décompressée



Figure 53 : Repérage de la faille observée sur site (C) et matérialisation des plans de schistosité (D)

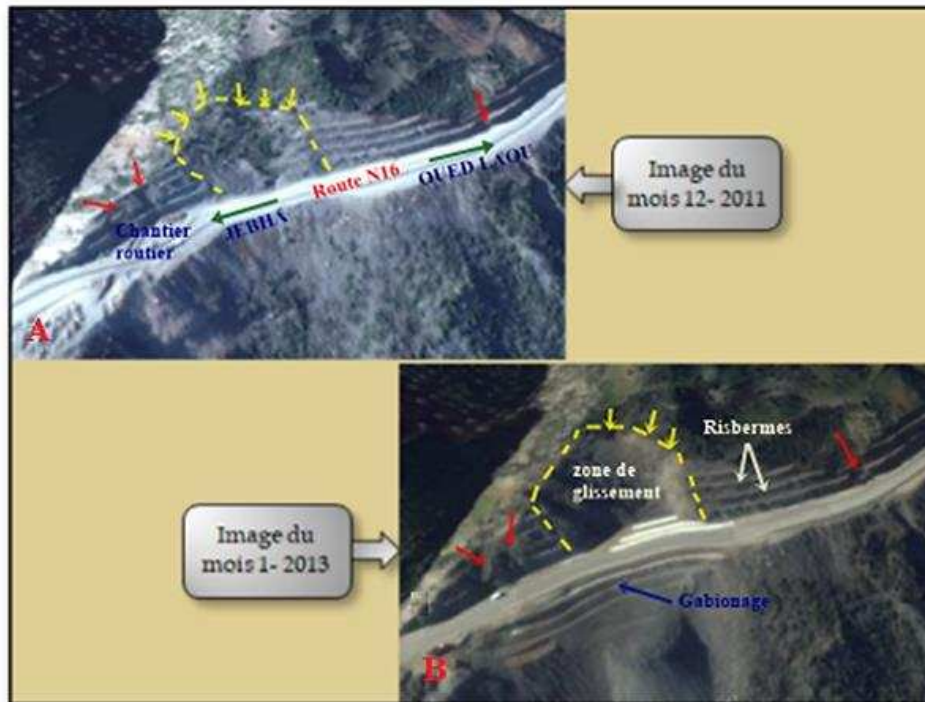


Figure 54 : Images satellitaires de la section S4 durant les mois 12-2011 et 1-2013 (Google Earth)
 A) Phase chantier de la rocade méditerranéenne au niveau de la section S4. B) Instabilités du talus au début de la mise en service de la rocade méditerranéenne

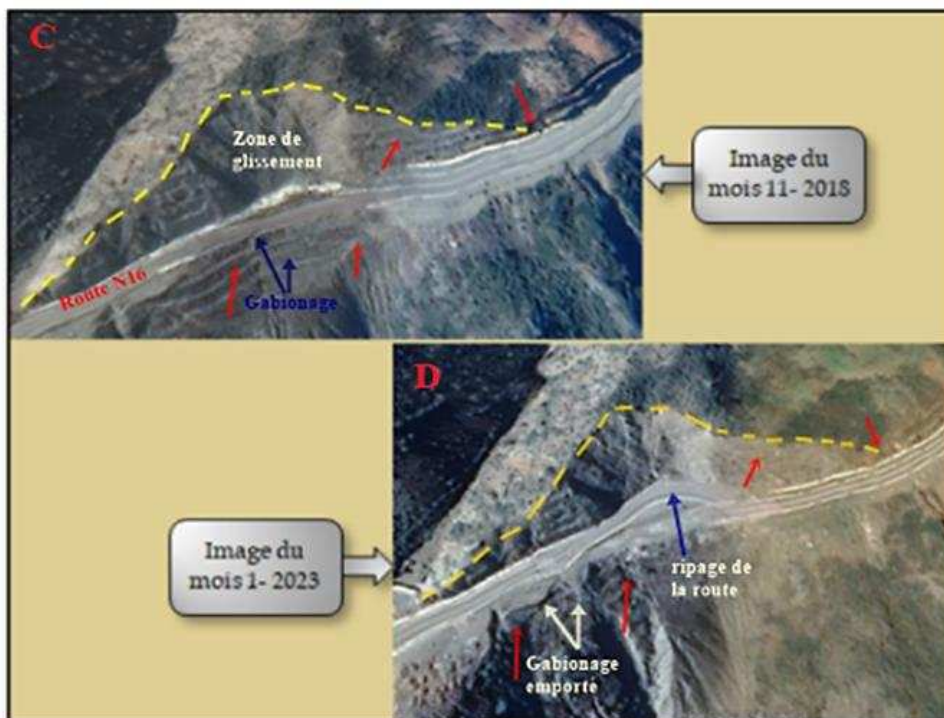


Figure 55 : Images satellitaires de la section S4 durant les mois 11-2018 et 1-2023 (Google Earth)
 C) Elargissement de la zone de glissement et apparition de nouvelles zones d'instabilité. D) Ripage de la voie dans le sens du talus pour parer aux instabilités constatées dans la plateforme de la chaussée

L'analyse des images satellitaires montre que le talus était instable bien avant l'aménagement de la rocade méditerranéenne (Fig.54.A). L'instabilité est restée active

pendant toute la durée du chantier et aussi après la mise en service de la nouvelle route (Fig.54.B) et (Fig.55C et D). Plusieurs interventions ont été engagées par les services de maintenance (Source MEE) pour parer au blocage de la circulation à ce point. En 2020, suite à la pluie exceptionnelle du mois de mars, le glissement de terrain a pris de l'ampleur en bloquant la route et empêchant la circulation des véhicules.

3.2.2. Section 5 située au PK 169+100

3.2.2.1. Repérage et situation de la section S5

Cette section se trouve au dernier virage avant d'arriver à Jnane Ennich en venant d'Oued Laou, au point kilométrique 169+100, juste après la section S4 (Fig.51).

3.2.2.2. Etat des lieux de la section S5

Cette zone est reconnue instable dans les rapports que nous avons consulté, mais lors de la visite des lieux, aucun signe d'instabilité majeur n'a été relevé, les seuls signes d'instabilités observés dans l'amont de la plateforme sont ceux relatif à la décompression de la roche qui affleure en cet endroit.

Les désordres concernent principalement l'ouvrage hydraulique côté remblai qui a subi une érosion hydrique au niveau de son pied, constitué d'une protection en gabion (Fig.56.A) ; ce qui a causé le départ des matériaux de cette structure à l'aval immédiat de la route et leur entrainement sur plusieurs mètres vers la mer. Le mouvement évolutif au niveau de cet ouvrage a engendré des fissures plus au moins ouvertes au niveau de la plateforme (Fig.56.B).



Figure 56 : Etat des lieux de la section S5 (aout 2023)

A) dégradation de l'ouvrage hydraulique et départ des gabions qui le protègent. B) Fissuration dans la chaussée. C) Repérage de la zone la plus active au niveau du virage de la section S5.

3.2.2.3. Diagnostic et analyse chronologique

La formation affleurant à ce niveau est de type schiste luisant orienté N140-80NE qui appartient aux Ghomarides de l'unité d'Akaili (Chalouan and Michard, 1990; Durand Delga and Kornprobst, 1963; Fallot, 1937). Des bancs schisteux dépassant une épaisseur moyenne d'une dizaine de centimètres, en tendance à se débiter en blocs de tailles variables suite à une combinaison des plans de la schistosité avec ceux de la décompression (perpendiculaire au premier).

La pointe du talus qui marque le virage situé dans la section S5, reste la zone la plus active du versant (Fig.56.C). En cas de précipitation intense, un glissement des terres et blocs de roches vers la chaussée va certainement perturber la circulation des véhicules en ce point.

L'analyse chronologique des images satellitaires montre que l'instabilité de la colline du côté droit n'est devenue remarquable qu'après l'année 2014 (Fig.58.C).

L'élément déclencheur et aggravant de l'instabilité est l'érosion hydrique impliquant un ravinement intense à l'extrémité de l'ouvrage hydraulique. L'instabilité s'est aggravée en 2018 et l'épisode pluvieux de mars 2020 est venu intensifier et accélérer le phénomène d'affouillement dans une zone déjà fragilisée (Nicollet, 1982). Ceci risque de déclencher un glissement au niveau du talus et aussi bien de l'autre côté de la voie au niveau du remblai (Fig.58.D).



Figure 57 : Images satellitaires de la section S5 durant les mois 12-2011 et 1-2013 (Google Earth).

A) Phase chantier d'aménagement de la rocade méditerranéenne. B) Indication des zones instables majeures



Figure 58 : Images satellitaires de la section S5 durant les mois 2-2014 et 1-2023 (Google Earth).

A) Définition de la surface du talus instable et constatation du ripage de la voie. B) Dégradation dans l'ouvrage hydraulique et constations du développement des instabilités dans le talus

3.3. Sections S6 et S7 à côté de Amtar



Figure 59 : Repérage des sections instables S6 et S7 sur image satellitaire (Google Earth 2023)

3.3.1. Section 6 située au PK 176+800

Cette section a fait l'objet d'une étude détaillée suivant notre méthodologie (Voir chapitre IV). Les résultats de cette étude ont été publiés dans le journal scientifique «Ecological Engineering & Environmental Technology», Volume 25(1), 2024. Pages 138-151. ISSN 2719-7050. La traduction intégrale de l'article se trouve dans le chapitre IV de cette thèse.

3.3.2. Section 7 située au PK 188+300

3.3.2.1. Repérage et situation de la section S7

Cette section est située à 8 km après Amter, en venant d'Oued Laou. Il se trouve à la sortie de Taghassa, au point kilométrique 188+300 de la rocade méditerranéenne (Fig.59).

3.3.2.2. Etat des lieux de la section S7

Trois zones de glissement ont été distinguées dans cette section : les deux premières sont dans les rives latérales des deux châteaux. Une troisième zone instable a été observée au niveau des risbermes (Fig.60.B et C), mais elle reste limitée. On peut distinguer aussi quelques petites fissures au niveau de la plateforme.



Figure 60 : Etat des lieux de la section instable S7 (juin 2021)

3.3.2.3. Diagnostique et analyse chronologique

Vu l'absence de gabions ou piège à cailloux, tous les matériaux et éboulis qui glisse depuis le talus envahissent directement la chaussée et bloque la circulation (Villain and Foulter, 1992. Durville et al., 2010).

Les risbermes ne sont pas protégées par du béton et sont dans un état très dégradés (Fig.60.A et B). On note aussi l'absence de caniveau bétonné entre la chaussée et le pied du talus.

La formation affleurant à ce niveau est de type micaschistes de l'unité de Filali (Abdelkhaleq et al., 2009; El Maz, 1989; Mourabit et al., 2017), présentant par endroit des micros filons granitiques. Le degré d'altération est assez prononcé (Fig.60C). L'orientation préférentielle de la schistosité est N140-40NE. Les écoulements superficiels, l'exposition du talus et la décompression de la roche sont les principaux facteurs qui favorisent l'apparition ponctuelle de mouvement de terrains sur ce site (Fig.60A). Cependant, l'instabilité reste superficielle et touche uniquement la formation schisteuse altérée (Bégin and Filion, 1987; Eichenberger et al., 2013; Maurer, 1968).

L'analyse chronologique et le suivi de l'évolution via des images satellitaires des années 2012, 2016, 2019 et 2020, montre que l'instabilité du versant s'est déclenché depuis l'année 2012, juste après la mise en service de ce tronçon routier.



Figure 61 : Images satellitaires de la section S5 durant les mois 2-2016, 8-2019 et 8-2020 (Google Earth).

A) et B) Evolution des dégradations du talus de la berge des châabas. C) Elargissement des surfaces de dégradations. Augmentation de la surface de dépôt des matériaux transportés par Oued Taghassa Amter

Trois zones de glissement ont été distinguées : les deux premières concernent les côtés latéraux des châabas et l'autre au niveau des risbermes (Fig.61A). L'image C de la figure 61, montre l'élargissement de la surface de dépôt des matériaux transportés dans le lit d'Oued Taghassa et ses châabas ; témoignant le degré important de l'érosion hydrique dans cette zone.

L'altération hétérogène et l'érosion différentielle sont les éléments majeurs qui contrôlent cette instabilité. Les facteurs déclenchant sont les précipitations et l'écoulement des eaux de ruissèlement.

3.4.Sections S8, S9 et S10 entre Taghassa et Jebha



Figure 62 : Repérage des sections instables S8, S9 et S10 sur image satellitaire (Google Earth 2023)

3.4.1. Section 8 située au PK 190+200

3.4.1.1. Repérage et situation de la section S8

Cette section est située à deux kilomètres après l'agglomération de Taghassa en se dirigeant vers Jebha. Elle se dresse le long de la route N16 sur un Kilomètre environ ; depuis le PK 190+200 jusqu'au PK 191+200 (Fig.62).

3.4.1.2. Etat des lieux de la section S8

Les désordres concernent des grandes surfaces de glissement. Trois déviations de la voie de circulation ont été réalisées pour s'éloigner des matériaux glissés depuis le talus : une première au PK 190+200 (Fig. 64 B), une deuxième au PK 190+400 et une troisième au PK 190+ 600 (Fig.63). L'ouvrage hydraulique sous la chaussée est très endommagé (Fig. 64 A). Les risbermes sont détériorées en totalité et sont difficilement visible sur site. La plateforme présente des fissures très ouvertes côté mer (Fig.64 C et D).



Figure 63 : Etat des lieux de la section S8 dans la zone du PK 190+600 (aout 2022)

- A) Vue d'ensemble de la section S8 reflétant l'ampleur des surfaces instables. B) Chute de pierres et éboulis vers la chaussée. C) Déviation de la chaussée au PK 190+600.



Figure 64 : Etat des lieux de la section S8 dans la zone du PK 190+200 (aout 2022)

- A) Déviation de la chaussée au PK 190+200. B) Dégradation de l'ouvrage hydraulique. C) et D) Fissures très prononcées dans la plateforme

3.4.1.3. Diagnostic et analyse chronologique

Au niveau de cette section on trouve deux formations principales : des colluvions de nature SIRT (Anagnostopoulos et al., 2013; Campus, 1945; Guilloux, 2005) couvrant les micaschistes de Filali (Abdelkhaleq et al., 2009). En bord de route, un affleurement révèle une schistosité orientée N140-42NE; mais il faut toutefois noter que cette direction est variable par endroit. On peut observer aussi au niveau de la surface du talus au PK 190+500, des affleurements ponctuels de masse rocheuse irrégulières de nature graphiteuse (Kornprobst, 1966; El Atrassi et al., 2011).

Les observations sur site ont montré que la roche superficielle est très décompressée et très altérée avec une altération pénétrante. La partie superficielle présente une lithologie dominée par deux formations qui ont été reconnues : les colluvions et les granulites fractures. De point de vue géotechnique, il faut en distinguer entre deux types de sol : les matériaux granulaires sensibles à l'eau et une masse rocheuse (Campus, 1945). En tête de la colline, des bandes dépassants une épaisseur moyenne d'une dizaine de centimètres, en tendance à se déliter en blocs de tailles variables suite à une combinaison des plans de la schistosité avec ceux de la décompression (perpendiculaire au premier). La combinaison des caractéristiques géologiques et morphologiques permet de classer la zone comme zone à risque avec une association glissement- éboulement (Giraud et al., 1981; Eichenberger et al., 2013; Gruzelle and Lebaut, 2022).



Figure 65 : Exemple de mouvement de masse qui touche les versants de la section S8 (aout 2022)
Les bandes de la croûte qui se détachent et les débris de la roche altérée et décompressée forment des grands volumes de colluvions qui glissent suivant la pente du talus

Comme on peut le voir sur les images (Fig.63A et Fig.65), le mouvement de masse qui touche cette section est un glissement superficiel qui a tendance à s'approfondir sur une grande surface. Il déplace les terrains de couverture et la partie décompressée de la masse rocheuse.

L'analyse chronologique des images satellitaires des années 2012 à 2020, montre que les premiers désordres ont eu lieu dès l'année 2012 juste après la mise en service de ce tronçon de la rocade (Fig.66A). Pendant cette année des travaux de retalutage et de stabilisation du talus ont été effectués par les services d'entretien (source MEE). Et le versant est resté relativement stable jusqu'à l'année 2016 (source MEE) ; où au début de cette année, le talus a montré des signes avant-coureurs (Fig.66B) dans sa partie sud ; et en 2018, cette même zone a subi un glissement de terrain limite dans l'espace. En mars 2020, un épisode pluvieux intense a déclenché des mouvements de masse affectant respectivement le nord et le sud des talus de cette section. Ils se sont activés à partir des niches existantes (Fig.67C et D).

Aussi, de nouveaux signes d'instabilité sont apparus en mars 2020, dans la partie nord en tête du talus situé à l'aval de cette section (Fig.67D), ce qui prouve qu'il y a toujours un risque imminent de glissement lors d'un éventuel épisode pluvieux intense.

Il est certain que l'instabilité de cette section est liée au retalutage de la colline pendant l'aménagement de la route nationale N16. Les talus de cette section sont dans un état très instable et le risque de glissement est imminent lors d'un éventuel épisode de pluie intense (Billard et al., 1992).



Figure 66 : Images satellitaires de la section S8 durant les mois 6-2012 et 2-2016 (Google Earth).

A) Début des instabilités à partir de l'année 2012. B) Elargissement des surfaces de glissement et apparition de nouvelles zones d'instabilité



Figure 67 : Images satellitaires de la section S8 durant les mois 8-2019 et 8-2020 (Google Earth).

C) Activation des instabilités dans plusieurs parties du talus. D) Réalisation de ripage au PK 191+100 et au PK 190+400 pour éloigner la voie des éboulis et chutes de pierres.

3.4.2. Section S9 située au PK 191+600

3.4.2.1. Repérage et situation de la section S9

Cette section se trouve à sept kilomètre de la ville de Jebha en venant d'Oued Laou. Elle est située au PK 191+600 de la route nationale N16. Elle est entièrement exposée à la mer méditerranéenne (Fig.62).

3.4.2.2. Etat des lieux de la section S9

Cette section longe la chaussée sur une longueur de 700 m. Deux glissement actifs peuvent être constatés. Une première zone instable au début de la section en venant d'Oued Laou et une seconde sous forme de décrochement rocheux se trouvant au milieu de la section étudiée. Cependant, on peut observer une nouvelle zone d'instabilité qui se développe après le virage en allant vers Jebha (Fig.69).

Les risbermes sont dégradées et une bonne partie est totalement détériorée. Les désordres majeurs sont visibles au niveau *des* gabions et le soutènement en terre armé où on peut observer la déformation de quelques écailles (Corte et al., 1987; Jafrane et al., 2004). Aussi, la plateforme en remblai présente des fissures qui se propagent jusqu'à la limite du profil mixte déblai-remblai. On note aussi, une accumulation au niveau des cunettes des débris qui glissent du talus.

3.4.2.3. Diagnostic et analyse Chronologique

Les roches affleurant dans le talus sont les micaschistes de l'unité de Filali orientés N127-50NE (Abdelkhaleq et al., 2009; Mourabit et al., 2017), Elles connaissent une intrusion locale par des masses irrégulières majoritairement graphiteuse, dont la taille varie de quelques centimètres à quelques mètres d'épaisseur, où le graphite a un aspect noduleux est associée aux oxydes et hydroxydes de fer (Fig.68) (El Atrassi et al., 2011; Michard, 2011). Il est aussi important de signaler l'état d'altération avancé et peu pénétrant de la formation graphitique.



Figure 68 : Affleurement dans le talus, de masses rocheuses de nature graphiteuse (mai 2022)

Les mouvements de masses observés à ce niveau ne concernent que certaines parties décompressées à altération avancée de la formation graphitique, et sont limités dans l'espace.

Le suivi chronologique via des images satellitaires de 2012 à 2020, nous informe que l'élargissement des zones instables est plutôt lent et les dégâts dans les infrastructures sont limités (Fig.69.A et B).

La dégradation constatée au niveau des gabions qui soutenaient une partie de la plateforme de la chaussée et les fissures constatées dans la voie au niveau de la jonction déblais- remblais ; laissent conclure que le désordre le plus important à craindre est celui au niveau des remblais d'apport.

La surcharge de la plateforme par du remblai est probablement l'élément qui a mené au déplacement du mur de soutènement et a l'apparition de désordres constatés sur la plateforme. Le mauvais drainage au niveau de la plateforme et les infiltrations progressives dans les fissures apparues au niveau de la jonction déblai-remblai sont les causes principales des désordres.

Du côté talus, à part quelques mouvements de masses superficielles liées à l'altération et à l'érosion de la roche, le talus n'est pas dans une situation menaçante.

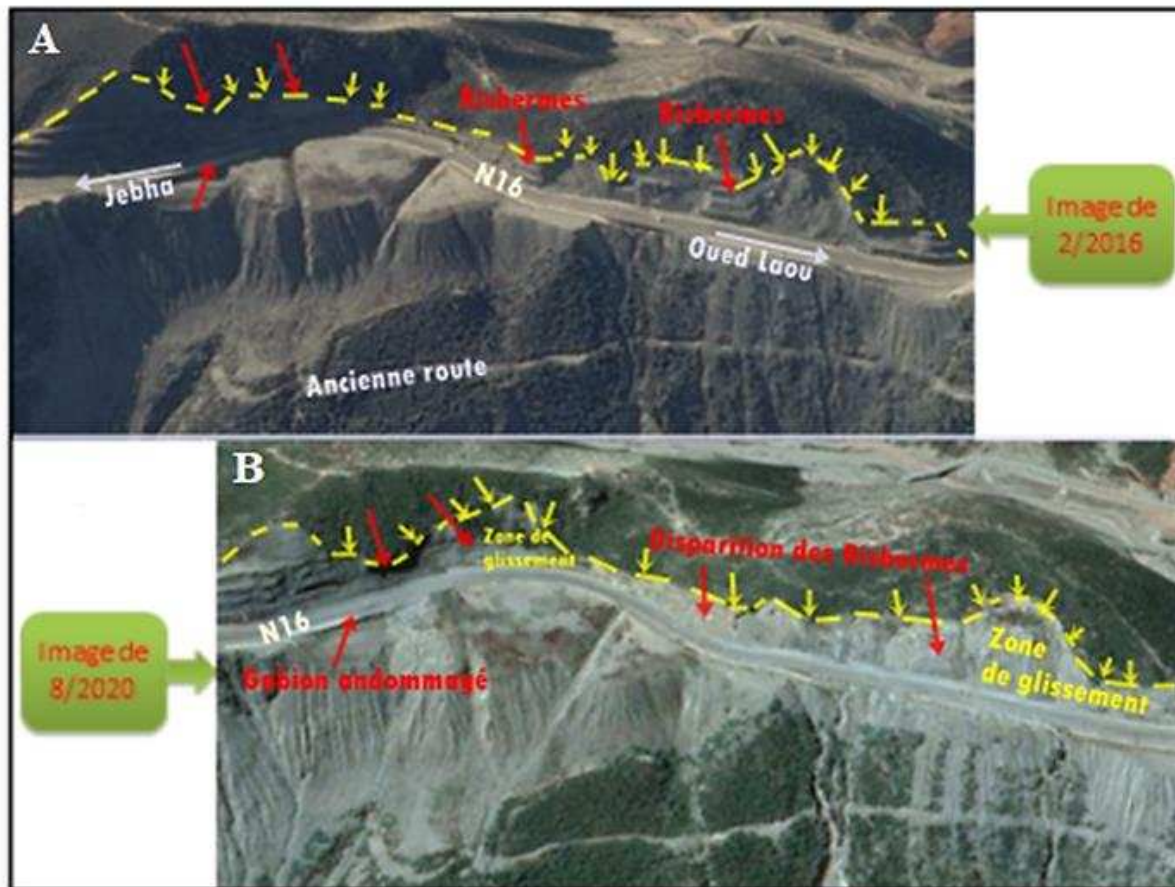


Figure 69 : Images satellitaires de la section S9 durant les mois 2-2016 et 8-2020 (Google Earth).
A) et B) Elargissement limité dans les surfaces instables du talus. Dégradations des risbermes au début de la section. Désordre au niveau des gabions et soutènement protégeant la plateforme de la chaussée

3.4.3. Section instable S10

3.4.3.1. Repérage et situation de la section S10

Cette section se trouve à 5,5 km de la ville de Jebha en venant de Oued Laou, au PK 192+200. La zone instable est entièrement exposée à la mer méditerranéenne, sur une longueur de 300 m environ (Fig.62).

3.4.3.2. Etat des lieux de la section S10

Les mouvements de terrain dans le talus concernent la partie superficielle qui est composé de débris de roche décompressée et altérée (Eichenberger et al., 2013; Fellah and Mastere, 2015). C'est le milieu de la section qui est le plus instable (Fig.70C). Les risbermes sont détériorées et parfois elles ont disparues en totalité (Fig.70B).

De l'autre côté de la voie un ravinement important, érode la base de l'ouvrage hydraulique. Des grandes fissures ouvertes peuvent être observées dans le remblai de la plateforme (Fig.70A et B), sur une longueur de 120 m, au droit de l'ouvrage de soutènement en béton armé. Ce dernier présente un défaut d'alignement et des fissurations, reflétant sa

souffrance vis-à-vis de la poussée des terres de remblai et la contrainte hydrostatique (Gnanapragasam, 2000; Allain, 2021). Un affaissement de la plateforme pouvant atteindre 1m par endroit, est constaté à côté du mur de soutènement (Fig.70A). Les matériaux de butée en pied du mur de soutènement sont emportés vers la mer.



Figure 70 : Etat des lieux de la section instable S10 (mars 2023)

A) Fissures ouvertes dans la plateforme. Affaissement important de la plateforme pouvant atteindre 1m par endroit. B) Repérage de la zone de fissuration de la plateforme (IS- Google Earth 2023). Risbermes détériorées et parfois disparues. C) Limitation de la zone la plus instable dans La section S10 (IS -Google Earth 2023).

3.4.3.3. Diagnostic et analyse chronologique

Les roches qui affleurent sur le côté déblai sont des micaschistes de l'unité Filali (El Maz, 1989; Abdelkhaleq et al., 2009) ayant la même direction préférentielle N127- 50NE, identique à celle relevée dans la section S9 au PK 191+600.

L'analyse des images satellitaires de la période 2012 à 2020 et les informations recueillies auprès des services d'entretien du MEE, confirment que les premiers signes d'instabilité ne sont apparus qu'au début de 2016 (Fig. 71A). Actuellement les désordres se sont accentués côté remblai et on peut constater une rupture importante de la plateforme (Fig.70A) avec une activation d'un glissement dans le remblai côté mur de soutènement. L'élément déclenchant et aggravant de cette instabilité est certainement la présence d'une poussée hydrostatique sur le mur de soutènement et l'érosion hydrique impliquant un ravinement intense à la sortie de l'ouvrage hydraulique.

Le versant déblayé reste relativement stable et l'instabilité dans le talus touche seulement une zone limitée en allant dans le sens d'Oued Laou (Fig.71B).

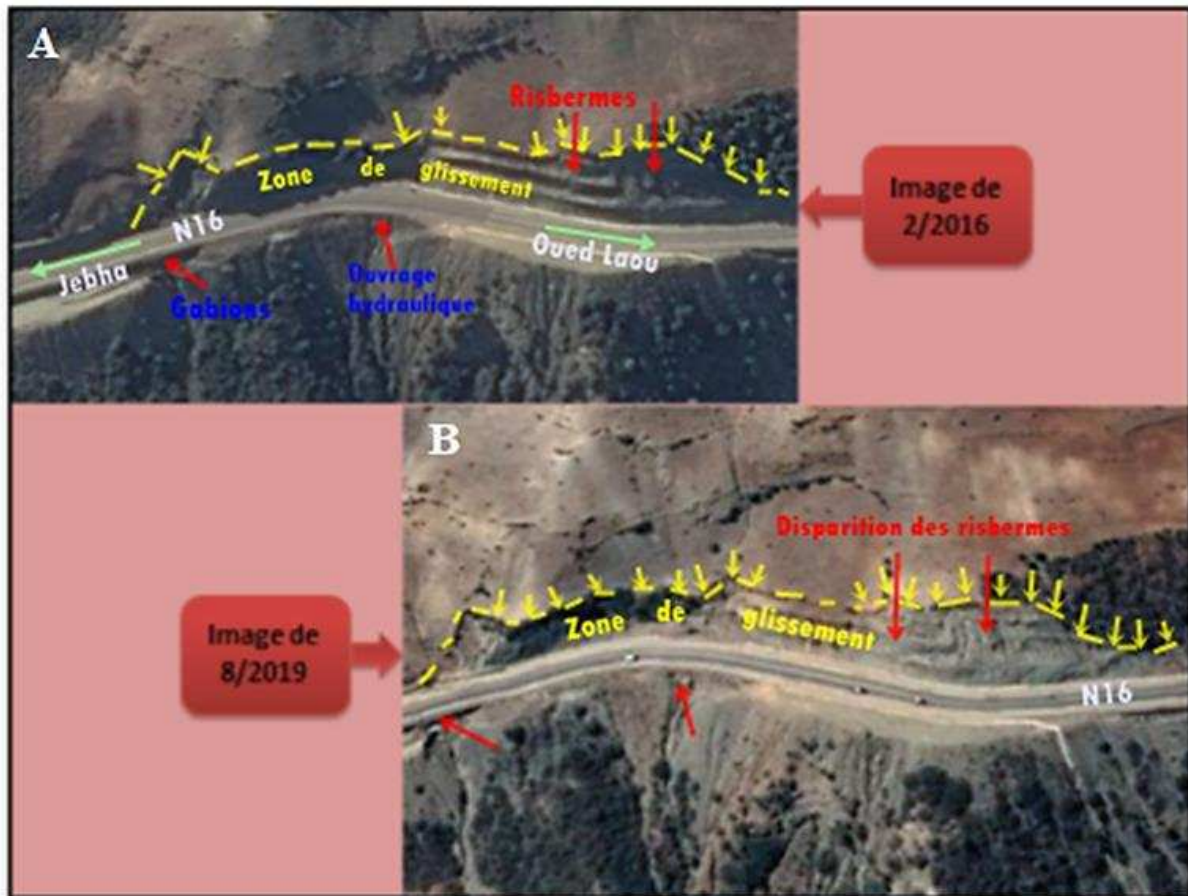


Figure 71 : Images satellitaires de la section S10 durant les mois 2-2016 et 8-2019 (Google Earth).

A) Premiers signes d'instabilité dans la section S10. B) Elargissement limitée de la surface instable du talus. Disparition des risbermes et désordres constatés au niveau du mur de soutènement et de l'ouvrage hydraulique.

3.4.4. Section instable S11

Cette section se situe au PK 198+600, à l'entrée de la ville de Jebha, en venant de Oued Laou. Elle a fait l'objet d'une étude détaillée suivant notre méthodologie (Voir chapitre V). Les résultats de cette étude ont été publiés dans le Bulletin de l'Institut Scientifique (BIS - Rabat, Section Sciences de la Terre, 2023, n° 45, 45–59, e-ISSN : 2458-7184). L'article intégral se trouve dans le chapitre IV de cette thèse.

Chapitre IV Etude détaillée de la section instable S6

La section S6, située au PK 176+800, se trouve à moins de 4 km d'Amter, en venant de Oued Laou. Elle a fait l'objet d'une étude détaillée suivant notre méthodologie (Chapitre I, 2). Les résultats de cette étude ont été publiés dans le Journal Scientifique « Ecological Engineering & Environmental Technologie » Volume 25, Issue 1, pages 138- 151, ISSN 2719- 7050. (Taj et al., 2023a).

Titre de l'article : « Geotechnical Prospects and Electrical Tomography (ERT) to study slope instability in the Rif Alboran Sea shoreline on the Mediterranean By-Road (Northern Morocco)»

Ci-dessous la traduction intégrale de l'article en langue française :

1. Introduction du chapitre IV

Les études et publications traitant les risques liés aux glissements de terrain dans le Rif Marocain, se sont intéressées souvent aux mouvements de terrain classiques et qui ont été déclenchés plus au moins naturellement dans le passé. (Gabert and Maurer, 1970; El Fellah et al., 1996; Azzouz et al., 2002b; El Fellah and Mastere, 2015; Mastere et al., 2020; Boukhres et al., 2022), sont des exemples parmi d'autres. Leur dynamique est actuellement connue et leurs risques associés sont relativement cernés.

L'aménagement de la Rocade méditerranéenne (la Nationale 16 ou N16), le long du littoral nord du Maroc a débuté vers la fin du vingtième siècle et achevé en 2012 (Ministère de l'équipement et de l'Eau). Les travaux de terrassement en pleine masse ont mobilisés des quantités colossales de déblais et remblais. Le paysage de la côte du Rif interne donnant sur la mer d'Alboran, a été métamorphosé. Le remodelage des talus et le décaissement des collines pour suivre le tracé routier ont causé la création de plusieurs zones d'instabilité, où des versants naturellement stables sont devenus très actifs et menacent régulièrement les populations et bloquent la circulation routière. Ce risque menace directement les personnes, conditionne la circulation des moyens de transport et entrave le développement durable de la région.

Cette intervention anthropique a donné naissance à de nouveaux glissements de terrain d'importance non négligeable et qui méritent d'être étudié et répertorié dans les futures cartes à risque de la région.

Mener des études de recherche pour dresser un état de ces nouveaux glissements de terrain, d'essayer de comprendre leur dynamique et juger leur degré de risque, serait d'une grande utilité pour les chercheurs et les décideurs, mais surtout très bénéfiques pour l'état marocain. Dans la présente étude, nous allons se pencher sur la stabilité d'une section de cette route, en essayant de participer à cette campagne de reconnaissance de ces nouveaux glissements de terrain.

Notre zone d'étude se situe dans le domaine du Rif interne, au point kilométrique PK 176+800 de la rocade méditerranéenne. Le choix de ce tronçon de route est justifié par l'importance de la surface instable du versant, la morphologie conséquente de l'escarpement et la diversité des mouvements de terrain. Aussi, la disponibilité de données géotechniques récentes a appuyé notre choix. Cette partie de la route est très dégradée, les ouvrages

hydrauliques sont endommagés et la majorité de la chaussée a été emportée par les mouvements de terrain (Fig.75, 76).

Les quelques tentatives d'étude de ces nouveaux mouvements de terrain se sont basés sur les techniques d'investigations anciennes basées sur la théorie et les analyses bibliographiques. (Ait Brahim et al. 2018 ; Elmoulat and Ait Brahim, 2018 ; Kassou et al. 2020 ; Es-smairi et al. 2021) sont des exemples récents de ces études.

Une méthodologie scientifique de diagnostic englobant les analyses géomatiques et structurales tout en faisant appel suivant les besoins, aux procédés de prospections géotechniques et géophysiques, est la nouvelle démarche de recherche suivie par notre équipe pour comprendre la dynamique du versant actif et juger le risque qu'ils présentent pour la population et la circulation.

La présente étude a pour objet de définir les causes d'instabilité, définir la mécanique et la géométrie des mouvements de terrain dans la zone étudiée, de juger leur évolution pour pouvoir conclure sur la vulnérabilité de la route face à ces risques. Les techniques d'investigations que nous avons utilisées sont géotechniques (forages, essais de Ménard et inclinomètre) (BOUAFIA, 2022; Brahim et al., 2021; Plumelle et al., 2017) et géophysiques (Tomographie Résistivité Electrique) (Bouaziz and Melbouci, 2015; Huntley et al., 2019; Lebourg et al., 2003; Taj et al., 2023b), enrichie par une analyse géomorphologique et géologique du site.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité des prospections géotechniques utilisées pour étudier localement les glissements de terrain. Ils ont permis d'avoir des données précises sur la lithologie du terrain et les lignes de faiblesse. Les analyses morphologiques et le levé topographique ont permis de définir le régime dynamique, les volumes instables et l'ampleur du risque. La technique de prospection géophysique ERT- 2D est rarement utilisée dans l'étude des glissements de terrain du nord du Maroc. Dans notre étude, elle s'est avérée très utile pour définir les aspects géométriques, les présentations lithologiques et aussi détecter les zones à grande altération.

Les résultats obtenus dans notre étude montrent que ce versant reste menaçant. Plusieurs parties dans cette section sont instables et le glissement principale au point kilométrique PK 176+800 se développe en glissement complexe se déplaçant actuellement de 2 cm vers la mère chaque année. Son risque mérite une mobilisation plus importante de la part des autorités de la région. Notre présente étude est un document important pour les décideurs pour la mise en œuvre d'un programme global de renforcement et d'entretien des infrastructures routières dans cette section.

2. Contexte géographique de la zone d'étude de la section S6

La section de route étudiée se trouve sur la nationale 16, dans la province de Chefchaouen, entre Jnan Annich et Amtar, à 22 km de Jebha (Fig.72). Elle est limitée d'une part par la mer méditerranéenne (côté Nord) et du côté Sud on trouve une imposante colline qui marque le paysage par un escarpement à pente très raide et qui longe la voie sur plusieurs kilomètres.

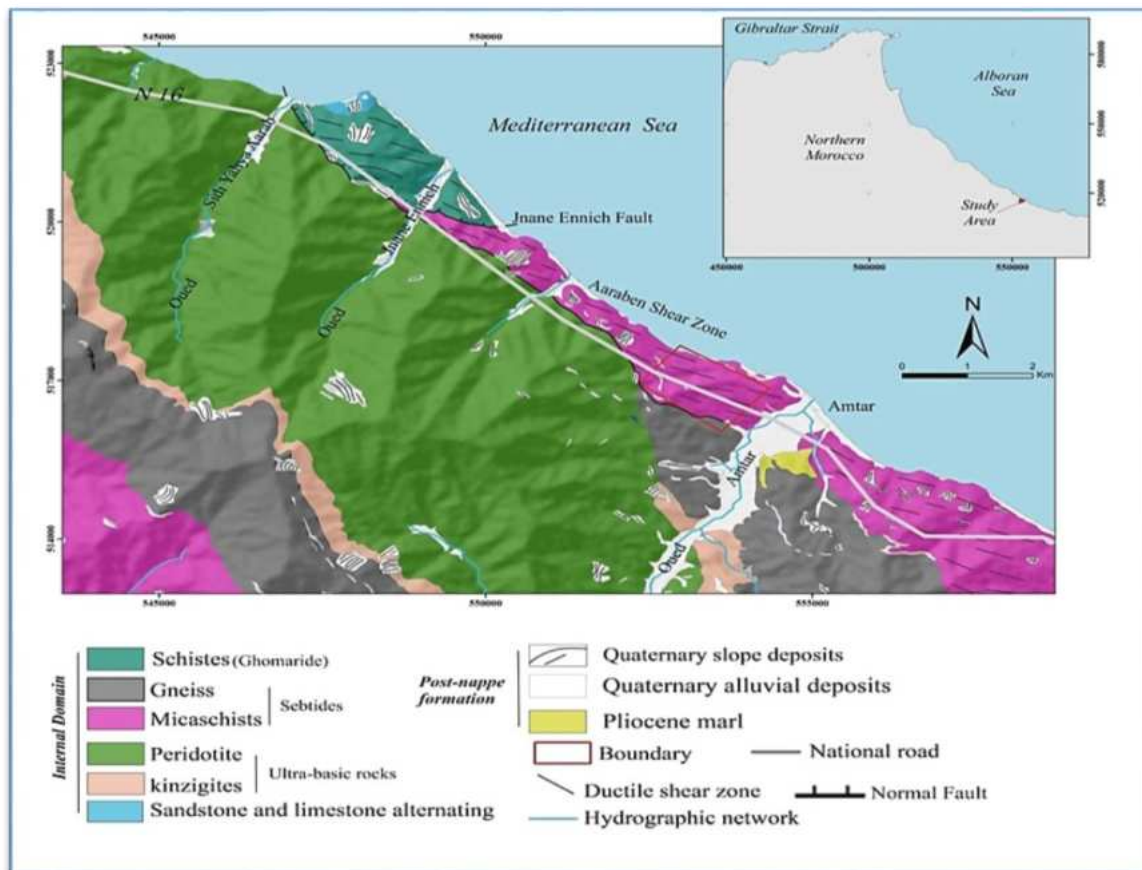


Figure 72 : Carte géologique de la zone d'étude de la section S6

3. Analyse géologique, tectonique et géomorphologique de la section S6

Le Rif marocain est une chaîne montagneuse récente de l'arc Bétique-Rifain, datant du début de l'ère tertiaire (Bakili, 1989; Feinberg, 1978; Michard, 2011), située dans le nord du Maroc sur la côte occidentale de la Méditerranée. La chaîne du Rif est divisée en trois domaines (Durand-Delga et al., 1960) : le domaine interne, les nappes du flysch et le domaine externe. Notre zone d'étude appartient au domaine interne formé de terrains Paléozoïques couverts de couches Mésozoïques. Le Rif interne comprend trois domaines : les Sebtides, les Ghomarides et la dorsale calcaire (Fig.72). Aux limites de cette dernière, on peut distinguer aussi des formations de la Pré- Dorsale (Michard et al., 2008; Romagny, 2016). Les Sebtides sont constituées de roches métamorphiques de kinzigites et de gneiss entourées de péridotites. Ces dépôts sont recouverts par les dépôts de matériaux quaternaires affectés par le métamorphisme (El Maz, 1989). Plusieurs contacts majeurs caractérisent les nappes d'empilement dans les zones internes, et qui recoupent les unités des Ghomarides et des Sebtides. La plus importante est la faille d'Araben dans le massif de Beni Bousera, qui oriente les péridotites avec les micaschistes de Filali vers le SE (Abdelkhaleq et al., 2009; Marrone et al., 2021), et les Ghomarides vers le NW avec un chevauchement vertical. Néanmoins, ce contact est souvent réactivé par de petites failles fracturées accompagnées d'une forte serpentinisation (Frets et al., 2014; Mourabit et al., 2017). Néanmoins, les unités de Ghomarides affleurent à proximité de notre zone d'étude par des schistes avec des alternances de grès et de calcaires. Ces formations sont généralement imperméables et ne présentent pas

de formes aquifères étendues (El Bakili et al., 2020; Gueydan et al., 2015). De plus, ces formations lithologiques sont fracturées et présentent plusieurs zones de faiblesse.

L'étude de l'instabilité des pentes est délicate en raison des mouvements gravitaires du sol, qui sont influencés par de nombreux facteurs tels que les structures géologiques et hydrogéologiques du sol ainsi que l'évolution des propriétés mécaniques de ses couches (Azzouz et al., 2002b; Bordoni et al., 2015; El Fellah and Mastere, 2015). L'importance de l'instabilité du talus étudié est définie par ses caractéristiques géométriques significatives. En effet, le versant longe la route sur une distance d'environ 1 km. La différence d'altitude de cet escarpement est de 230 m entre le point le plus haut et le niveau de la mer. La chaussée est située à 180 m. Le pendage moyen est de 45°. La surface de la zone affectée par les mouvements de terrain est d'environ 2 Ha. Le relevé topographique réalisé en septembre 2020, à l'échelle 1/500, illustre cette situation et donne une présentation précise du relief.

L'analyse structurale des plans de discontinuité observés sur ce site permet de conclure que les formations géologiques de cette zone d'étude sont affectées par une fracturation intense caractérisée par différentes familles de failles locales (fissures et diaclases) avec une orientation variable. Les déformations observées sur la zone d'étude sont liées à la nature ductile de la roche. Elles sont soit sous forme de plis anticlinaux (Fig.73B), soit sous forme de fractures associées aux failles (Fig.73A et C).



Figure 73 : Déformations et fractures observées dans le talus étudié (aout 2022)

A) Présentation lithologique du sommet de la colline. B) Exemple de plis anticlinal observé dans la zone d'étude. C) fracture marquant la limite de surface de glissement du talus

4. Contexte sismique

Le catalogue des tremblements de terre fourni par l'Institut géographique national d'Espagne (IGN), montre que la péninsule de Tanger est marquée par une activité sismique modérée. Cependant, la plupart des hypocentres sont concentrés dans la mer d'Alboran (Comas et al., 1999; DeMets, 1995; Grevemeyer et al., 2015; Vernant et al., 2010), mais ces événements sismiques sont susceptibles d'induire des effets de site significatifs, tels que des glissements de terrain et des tremblements de terre (El Hilali et al., 2023; Hilali et al., 2021).

A l'échelle régionale, le catalogue des séismes fourni par l'institution marocaine (CNRST), indique des séismes préférentiels, qui se concentrent dans la partie NW de la région de l'Oued Laou. Cette activité sismique s'est propagée d'Est en Ouest et semble témoigner du néo-fonctionnement actuel des deux accidents majeurs responsables de la structuration de la région durant l'ère Oligo-miocène (Cherkaoui and El Hassani, 2012) .

5. Aspect climatique

Le climat de la région est de type méditerranéen, caractérisé par un hiver humide et frais, et un été sec et chaud. La pluviométrie varie avec l'altitude et l'exposition des reliefs. Les températures moyennes sont généralement comprises entre 20 et 32 °C en été ; et 7 et 22 °C en hiver. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 500 mm pour une année à forte pluie. La région est aussi connue par des averses marquant des pics journaliers pouvant atteindre parfois 140 mm (Fig.10).

6. Etat des lieux de la section S6



Figure 74 : Etat des lieux général de la zone d'étude de la section S6 (aout 2022)

Le versant a été visiblement modelé par des travaux de déblais en créant 4 risbermes qui jouent le rôle de paliers de stabilité. Les deux paliers supérieurs sont non drainés et non protégés par du béton. Actuellement ces plates forme de stabilité sont très dégradées et effondrées. On note l'absence des pièges à cailloux pour protéger la chaussée contre les éboulis. La croute et la couche végétale qui couvraient le substratum schisteux se sont effondrées, laissant la roche exposée aux dégradations externes (Fig.74.A & B).

Cette situation a accéléré la dégradation en surface du versant et une accentuation des instabilités. Ainsi, les schistes et micaschistes autrefois couverts par la croute protectrice, sont actuellement exposés aux intempéries et températures extrêmes, sans oublier l'air marin connu par sa salinité agressive. L'altération de la roche a facilité sa dégradation répétée dans chaque période d'hivers ou suite à des averses importantes.



Figure 75 : Présentation des instabilités dans la zone d'étude (IS Google Earth 2023)

Les mouvements de terrain dans le versant étudié peuvent être répartis en deux zones (Fig.75) : Une grande partie (Zone 1) où l'escarpement connaît des dégradations relativement récentes et locales, qui reste pour le moment non préjudiciable à la route (Fig.74). Le pied du talus dans cette zone connaît une érosion remarquable (Fig.75). On peut observer une deuxième surface (Zone 2) où les risbermes sont nettement courbées vers le bas avec des dégradations et des éboulis plus importants. Cette dernière zone est limitée par des fissures et des affaissements, laissant réfléchir à la formation d'un glissement complexe dont les limites sont clairement définies (Fig.75) (Fig.76B). La chaussée et les accotements qui traversent la zone du glissement sont marquées par des affaissements et une fissuration intense, les glissières sont détachés et endommagés (Fig.76), Ce qui explique que le mouvement de terrain constaté est toujours en activité et se déplace vers la mère.



Figure 76 : Etat des dégradations dans la zone 2 de la section S6 (aout 2022)

A) Fissures importante dans la plateforme B) Limite et sens du glissement de terrain. C) Fissure très ouverte dans la maisonnette. D) Effondrement de la chaussée et dommages dans les infrastructures

La chaussée dans cette zone de glissement est effondrée et l'ouvrage hydraulique est endommagé (Fig. 76). La couche végétale encore visible par endroit en crête, a une épaisseur très mince et elle est ravinée par les ruissèlements à l'occasion de chaque averse. Ce qui active d'avantage la dégradation du versant et l'exposition du substratum schisteux.

7. Matériels et Méthodes d'investigation

Notre méthodologie (Fig.77) est basée sur une étude préliminaire comportant une recherche historique et bibliographique complétée par des reconnaissances sur le terrain et un levé topographique à l'échelle 1/500. Après cette première phase nous avons défini les essais de reconnaissance géotechniques à effectuer soit in situ ou au laboratoire. Ensuite, nous avons dressé notre profil TRE, suivant les besoins de l'étude mais en prenant en compte des contraintes topographiques du terrain.

L'ensemble des résultats de prospection géotechnique et géophysique ont été analysés et corrélés pour pouvoir donner des jugements corrects.

METHODOLOGIE

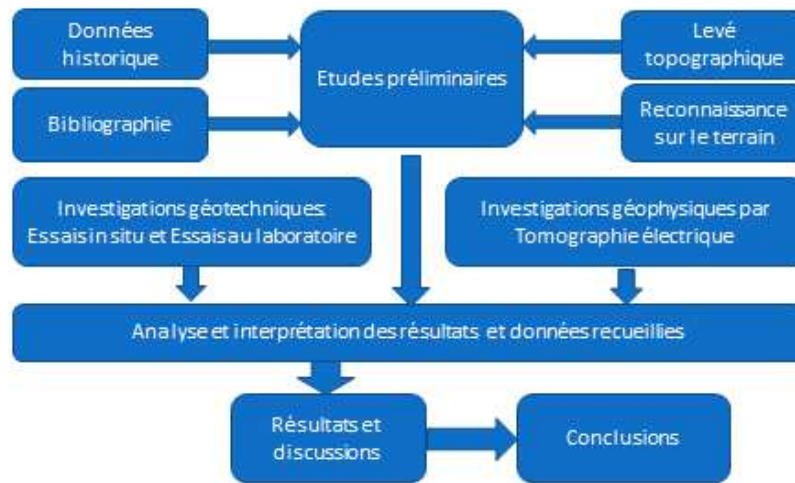


Figure 77 : Procédure et méthodologie d'étude de la section S6

7.1. Investigations géotechniques

Pour cerner les divers mécanismes d'instabilité de la zone d'étude et aussi afin d'avoir une vision plus claire sur les formations du sous-sol, Les investigations géotechniques sont d'une grande utilité (Abdel-Ilah et al., 2022; Bouafia, 2022). Dans ce cadre, 4 forages carottés sont répartis de part et d'autre de la chaussée dans la zone du glissement, avec un cinquième au niveau de la crête du versant (Fig.78) et (Tableau 5)

Tableau 5 : Liste des forages et destination

Numéro de forage	Profondeur (m)	Essai de Ménard	Mesures à l'inclinomètre
SCP 1	20	Oui	Oui
SCP 2	20	Oui	Oui
SCP 3	15	Oui	Non
SCP 4	30	Oui	Oui
SCP 5	60	Oui	Non

Le forage et l'échantillonnage sont réalisés selon la norme EN ISO22475-1. Les carottes obtenues ont été analysées visuellement et également en laboratoire pour définir la lithologie à chaque profondeur. Les 5 forages ont été utilisés pour réaliser des essais pressiométriques de Ménard afin de pouvoir juger les performances mécaniques des différentes couches et détecter les éventuels niveaux de faiblesse (Baud and Gambin, 2013; dos Santos, 2022). Les essais ont été réalisés à l'aide d'une sonde tri-cellulaire introduite le long du forage ; selon la norme NF P94-110-1(2015).



Figure 78 : Localisation des forages et du profile TRE dans la section S6

Pour pouvoir juger l'activité du talus et l'évolution du mouvement du glissement repéré, les sondages carottés SCP1, SCP2 et SCP4, ont été utilisés pour réaliser des mesures à l'inclinomètre (Fig.78) (Tableau.5).

L'inclinomètre est composé d'une sonde mobile étanche de longueur 50 cm, raccordée au câble inextensible par un connecteur étanche. Le contact entre la sonde et le tube se fait en quatre points au moins. Un système de mesure et de stockage des données enregistre la position du niveau bas de l'axe du dispositif de guidage de la sonde par rapport au repère de référence placé en surface au sommet du tube. Il mesure aussi l'inclinaison de la sonde par rapport à la verticale. L'inclinomètre utilisé est de marque GEOKON, modèle GK 604 D, à système digital. L'installation et le suivi des résultats sont réalisés selon la norme NF P94-156.

7.2. Etude géophysique de la section S6

Les investigations et les essais géotechniques ont permis d'avoir beaucoup d'information sur la nature des matériaux qui forment le corps de l'escarpement étudié. Ils nous ont permis aussi de comprendre sa présentation structurale, lithologique et géologique. Mais ces résultats restent relativement ponctuels et ne peuvent être appliqués sur l'ensemble du versant. L'étude géologique et géomorphologiques ont permis d'exploiter les résultats géotechniques et faire une interprétation complète de la façon dont sont dressées les diverses formations et aussi leur comportement dynamique. L'usage des moyens de prospection géophysique va permettre d'affiner les données obtenues et comprendre d'avantage les structures du sous-sol.

L'objectif escompté des prospections géophysiques est de confirmer la continuité et la consolidation du substratum schisteux dans le sous-sol, avoir une idée claire sur l'épaisseur de la couche superficielle altérée, vérifier s'il existe des points d'altération intense et enfin essayer de comprendre les dispositions des fracturations et fissures constatées en surface.

La méthode de prospection géophysique utilisée est celle de la tomographie de résistivité électrique (TRE- 2D). Elle est fondée sur la mesure des résistivités électriques apparente du sous-sol, le long d'un ensemble de câbles rectilignes connectés à un nombre d'électrodes défini, pour un grand nombre de position et d'espacement des électrodes d'injection de courant électrique et ceux de calcul de la différence de potentiel. Cette technique de prospection géophysique permet d'aboutir à une description géologique et géométrique de sous-sol sur la base de contraste de résistivité des formations (Bouaziz and Melbouci, 2015; Günther and Rücker, 2012; Jongmans and Garambois, 2007; Sassioui et al., 2022).

L'acquisition des données géo-électriques a été effectuée avec le résistivimètre « X612EM+ » de chez MAE. Pour avoir un compromis entre la résolution spatial et la profondeur d'investigation nous avons opté pour le dispositif combiné Wegener - Schlumberger, la distance entre les électrodes était fixée à 10 m. Les résultats ont été exploités en faisant usage du logiciel ZondRes2D, avec une RMS < 5% après la cinquième itération.

Le profile a été implanté à droite de la chaussée en allant vers Oued Laou suivant l'orientation ENE-WSW, parallèlement à la topographie et perpendiculairement au sens de glissement. Il passe aussi à côté du sondage carotté SCP1 (Fig.78). La longueur du profil est 220 m, le nombre d'électrodes utilisé est de 23.

Nous avons utilisé la méthode d'inversion des moindres carrées régularisée (Zhdanov and Portniaguine, 1999) qui est une version d'inversion au sens de moindre carré utilisant un facteur de lissage permettant de donner un modèle à distribution lisse par blocks à résistivité constante.

L'équation en forme matricielle de cette inversion est comme suit :

$$(A^T W^T W A + \mu C^T R C) \Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T R C m$$

Avec :

A: Matrice des dérivées partielles de la résistivité apparente (le Jacobien);

C: Operateur de lissage :

W: Matrice des erreurs relatives des mesures ;

m: Vecteur des paramètres du modèle ;

μ : Paramètre de régularisation ;

Δf : Vecteur d'écarts entre les valeurs calculées et mesurées

R: Facteur de mise au point.

Cette méthode d'inversion est mieux adaptée au cas où la distribution de la résistivité du sou sol est très contrastée (cas de limites bien définies entre les éléments ou couches géologiques) elle permet de donner un modèle qui montre clairement les limites des différentes couches ou contacts ce qui correspond parfaitement à notre cas puisque on explore les formations de schiste traversées par des failles ou diaclase.

8. Résultats de l'étude de la section S6 & Discussions

La croûte qui couvrirait la colline a une mince épaisseur de (50 à 100 cm). Cette couche est toujours visible au niveau de la crête. Elle est formée de brèches et débris de schiste noyés dans une matrice argileuse brunâtre (Fig.73A et Fig.82). Pendant les travaux d'aménagement de la rocade méditerranéenne, le versant a subi des travaux de décaissement et de talutage pour faire passer la route suivant le tracé projeté. Pour stabiliser la nouvelle morphologie du talus, 4 risbermes ont été réalisés. Seulement une partie de ces paliers de stabilité est protégée par du béton. Un seul ouvrage hydraulique sous dimensionné a été observé dans cette section, Il est réalisé avec une buse en béton de DN 1000 (Section 1m). Actuellement, cette conduite est obturée au pied du talus, de l'autre côté, une bonne partie est cassée et emporté par les éboulements (Fig.75).

La dominance de formation de micaschiste de Filali, altérée, plissée et fracturée suivant des plans de clivages défavorables (Fig.69.A), a facilité l'infiltration des eaux et l'accélération de l'altération de la roche.

8.1. Synthèse des résultats géotechniques de la section S6

L'analyse des carottes des sondages SCP1 et SCP2 (Fig.79 et Fig.82), montre qu'au niveau de la chaussée, le substratum schisteux est atteint après 5 mètre de profondeur environ. La couche superficielle est formée par un mélange de débris de schiste et des matériaux de remblais formant le corps de chaussée. Le schiste grisâtre en sous-sol est très fracturé et contient des filons calciques blanchâtres.

Pour le sondage SCP3, situé sur la chaussée à côté de l'ouvrage hydraulique (Fig.78), on constate que les matériaux extraits des carottes sont formés de remblais d'apport sur une profondeur de 9 m environ (Fig.82). Le schiste peut être identifié après cette côte, mais il est très broyé et il est noyé dans une matrice limono- marneuse verdâtre ou grisâtre.



Figure 79 : Les deux premières planches des forages SCP 1 & SCP 2.

- A) Carotte du sondage SCP1 entre 0 et 6m. B) Carotte du sondage SCP1 entre 6 et 14m.
C) Carotte du sondage SCP2 entre 0 et 9m. D) Carotte du sondage SCP2 entre 9 to 15m

Le sondage SCP4, situé dans l'emprise du glissement, présente une stratification désordonnée, confirmant le désordre structural dans cette zone dû au glissement de terrain et l'activité dynamique du versant à cet endroit. Entre 12 m et 15 m de profondeur, on constate une couche épaisse de 2 m environ formée de marne limoneuse (Fig.80) (Fig.82). Cette couche matérialise certainement la surface de glissement et son épaisseur.



Figure 80 : Planche du sondage SCP4 entre 12 & 15 m de profondeur

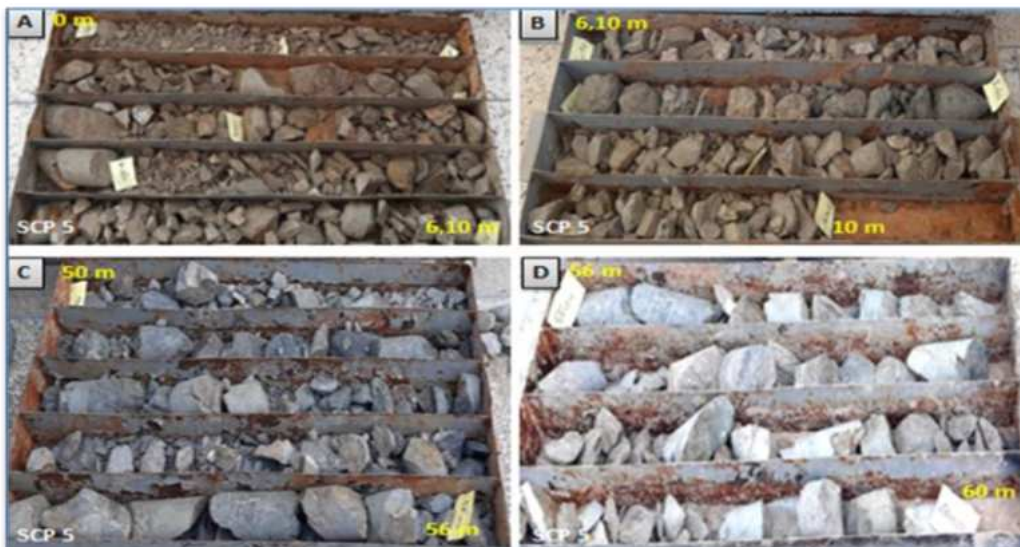


Figure 81 : Les deux premières et les deux dernières planches du sondage SCP5

Le sondage SCP5 (Fig.81) (Fig.82), se trouvant au niveau de la crête de la colline, confirme la petite épaisseur de la croute, ne dépassant pas un mètre d'épaisseur. Au-dessous, on peut constater une alternance de couches schisteuses fracturées, séparées par des joints de clivage marneux et argileux de couleur verdâtre ou grisâtre, parfois traversées par des filons calciques de couleur blanche. Après une profondeur de 20 mètre environ, le schiste est relativement dur avec une diminution du taux de fracturation avec la profondeur (Fig.82).

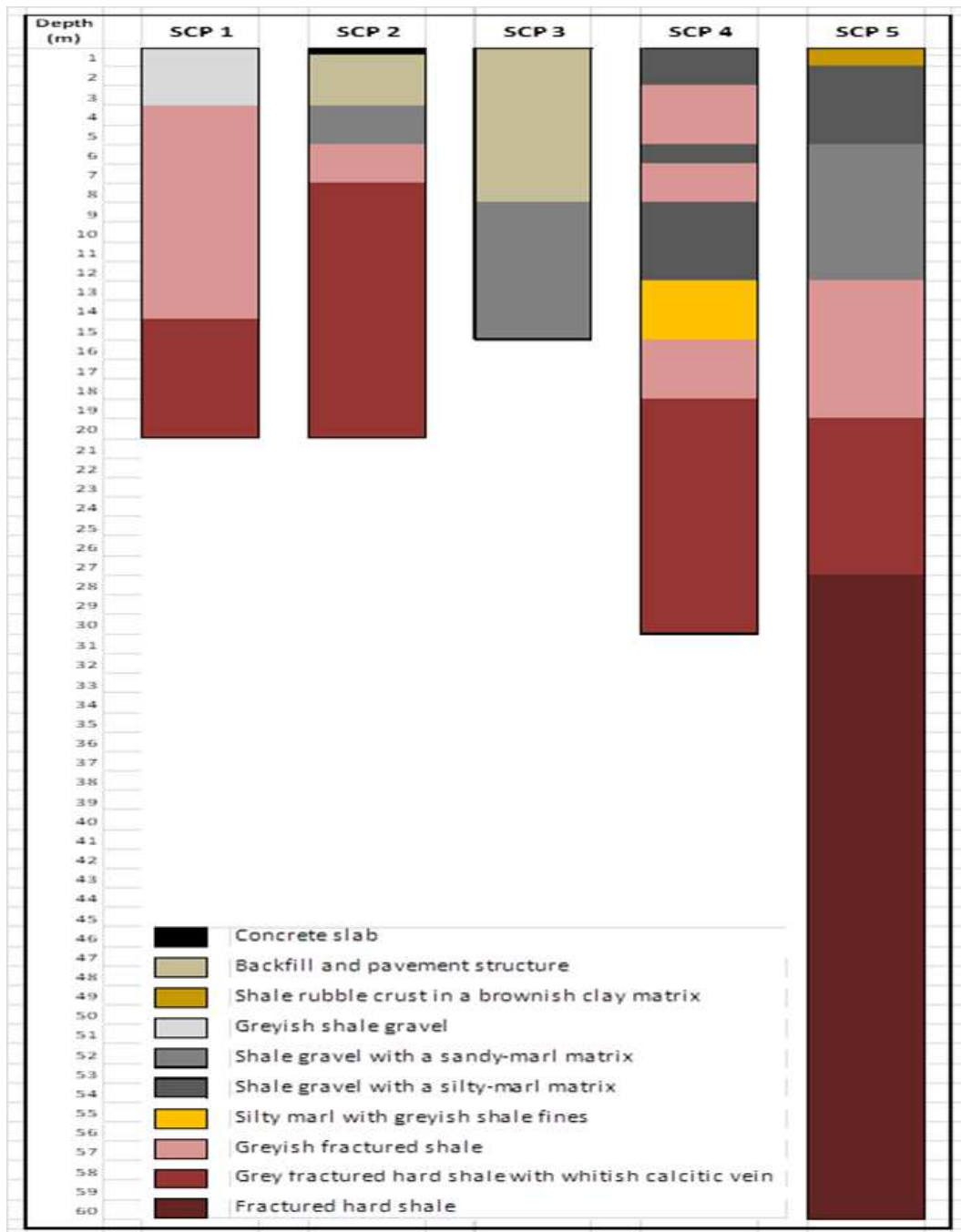


Figure 82 : Présentation lithologique des 5 sondages effectués dans la section S6

L'analyse des résultats des essais de pressiomètre de Ménard (suivant la Norme NF P 94-110-1) effectués dans les cinq forages montre que le substratum schisteux est consolidé à sur-consolidé, mais il existe des zones de faiblesse altérées et fragiles au niveau supérieur du forage SCP4 (Fig.84), reflétant ainsi le développement des phénomènes de ruptures progressives affectant le versant dans la zone de glissement. Les couches profondes sont beaucoup plus saines. Ceci s'explique par le fait que les schistes en profondeur sont relativement peu altérés et non remaniés par des mouvements de terrain superficiels.

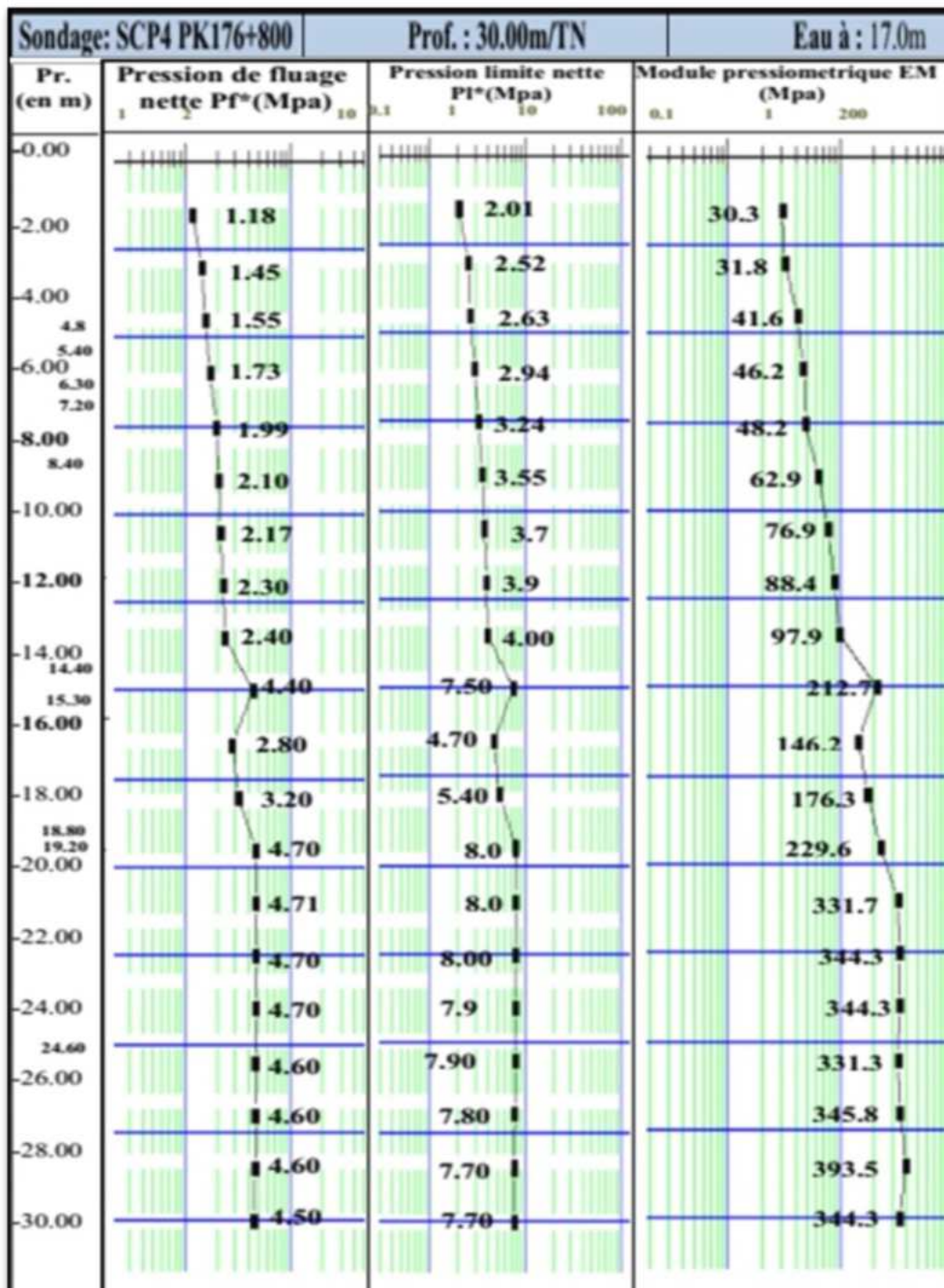


Figure 83 : Profiles de l'essai au pressiomètre de Ménard dans le forage SCP4.

Pour pouvoir juger l'activité du glissement de terrain observé, nous avons réalisé des essais à l'inclinomètre au niveau des forages SCP1, SCP2 et SCP4. Les essais sont réalisés conformément à la norme NF P 94- 156. Les prises de mesure sont effectuées du 17/12/2021 au 06/06/2022. L'analyse des résultats montre un déplacement de l'ensemble dans le sens de la mer. Ce déplacement est plus important au niveau de l'inclinomètre du forage SCP4, il est

de l'ordre de 10 mm pour une période de 6 mois, la ligne de glissement est situé à une profondeur de 10 m environ (Fig.84). La déformée est de l'ordre de 1,02 ° (Fig.85).

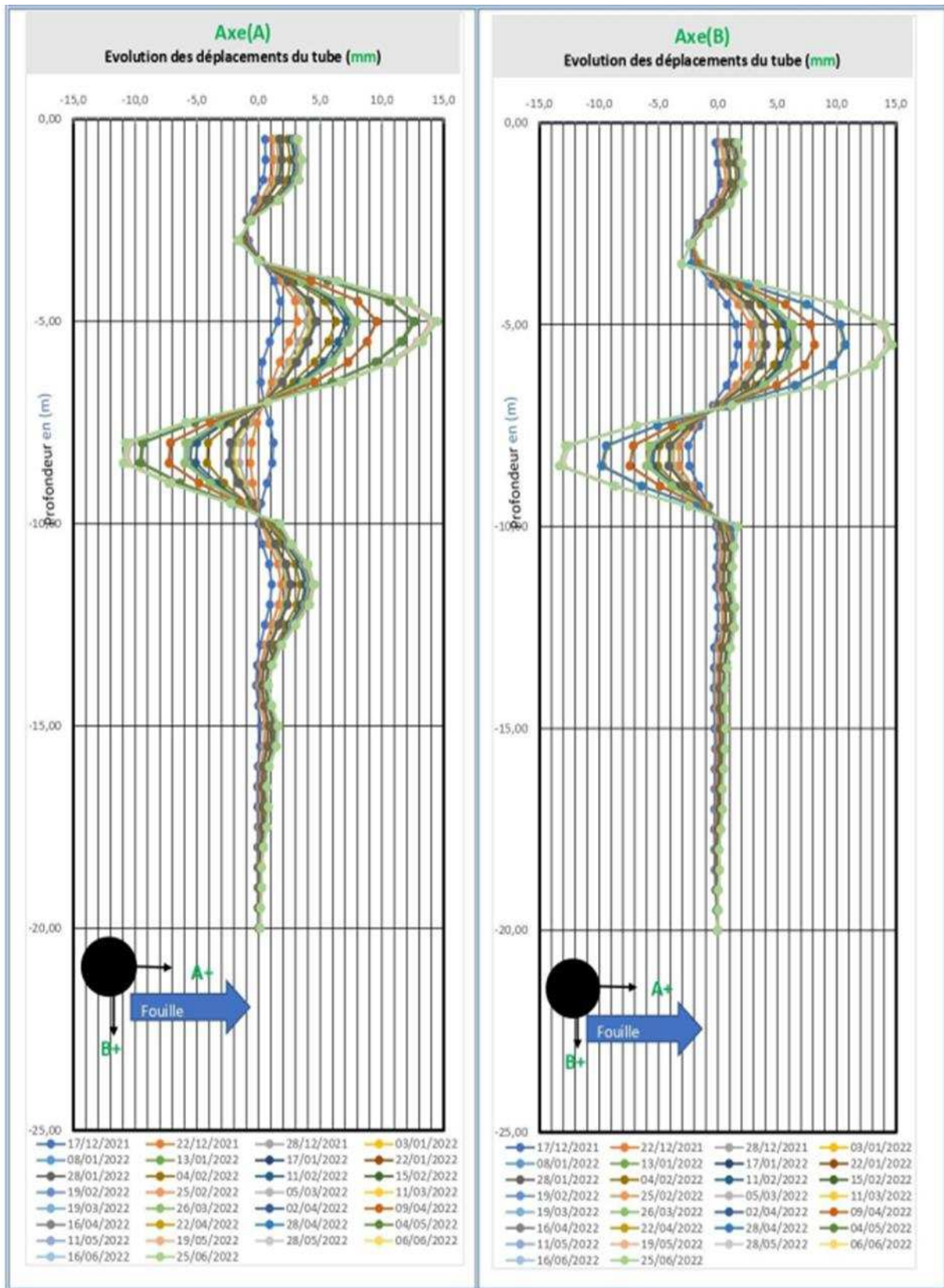


Figure 84 : Mesures de l'inclinomètre au niveau du forage SCP4.

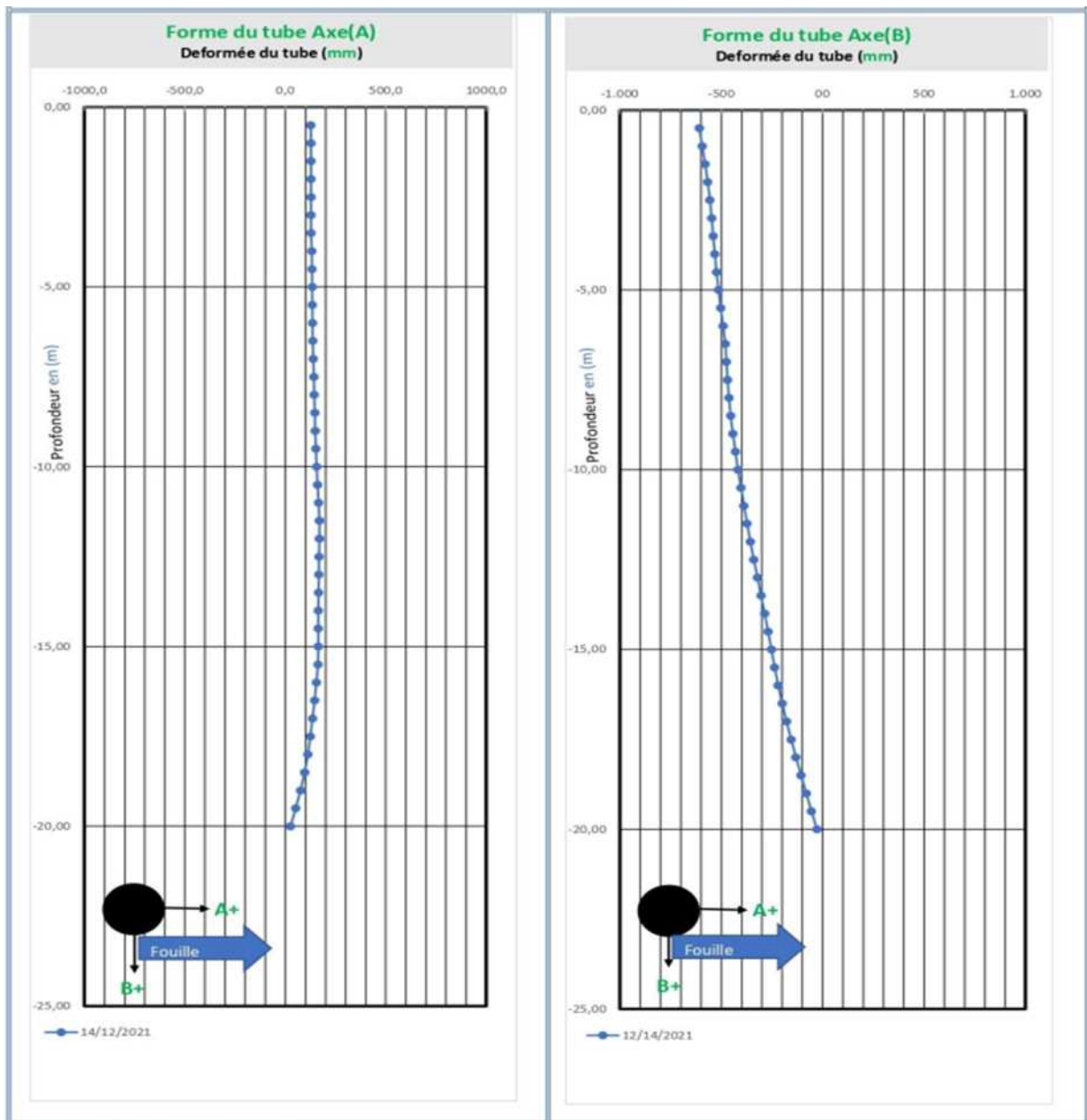


Figure 85 : Mesure de la déformée au niveau du forage SCP4.

8.2.Synthèse des résultats géophysiques de la section S6

Le modèle du TRE obtenu (Fig.86) confirme les résultats des sondages SCP1 et SCP2. Il indique que le massif du schiste qui forme la structure du sous-sol est homogène et forme la totalité du substratum du versant. Aussi, aucun vide ni nappe souterraine n'ont été détectés. Après une dizaine de mètre de profondeur, la résistivité dans le profil varie entre 300 et 800 ohm-m, ces valeurs ont été corrélées avec les formations autochtones du site, et confirme l'homogénéité du substratum schisteux qui rappelle que nous sommes dans une zone des micaschistes de l'unité Filali. Le sous-sol rocheux a une compacité variable à cause de sa fracturation intense, ce qui explique cette variation dans la résistivité. Le profil montre aussi des parties en surface très humides et altérés correspondant aux zones très dégradées, en particulier au début du profil, correspondant aux limites du glissement de terrain.

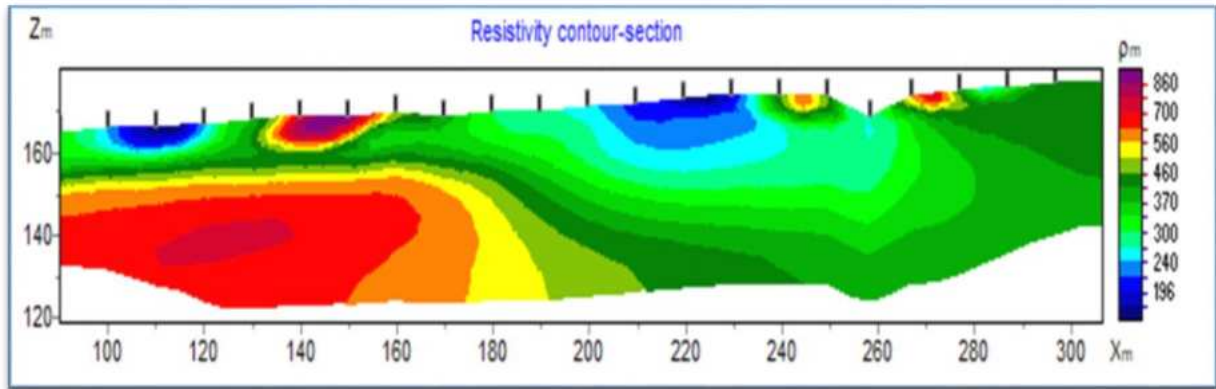


Figure 86 : Model TRE obtenu au niveau de la section S6

9. Conclusion de l'étude de la section S6

L'escarpement étudié présente plusieurs risques de mouvements de terrain, qu'on peut différencier suivant deux catégories : Un danger périodique lié aux mouvements de terrain qui perturbent la circulation routière à l'occasion de chaque averse ou période d'hiver, à cause des débris et blocs de roches qui glissent le long du talus, envahissant la route en absence de butée ou piège à cailloux. Un autre risque éminent qui proviendrait du volume des terres broyées et se situant dans l'emprise du glissement de terrain et qui sont actuellement en équilibre précoce et la rupture peut se déclencher à tout moment. Ce glissement de terrain est important de par le volume des matériaux glissés, estimé à 3800 m³, et avec une masse volumique moyenne calculée au laboratoire de 2,66 Tonne /m³; la masse totale sera de 10 000 Tonne environ. La pente du glissement se rapproche dangereusement de l'angle de frottement calculé à l'essai triaxial. Enfin, cet escarpement est scié par des failles locales et fractures qui favorisent l'infiltration des eaux en profondeur. Ce qui fragilise davantage le substratum schisteux et crée des nouvelles zones de faiblesses.

La section de la route se situant au PK 176+800, est dans un état d'instabilité menaçant, en particulier au niveau du glissement de terrain. L'intervention des autorités compétentes pour parer à ce problème doit prendre en considération ces instabilités dans leur globalité. Les solutions et structures de protection à mettre en application doivent prendre en considération l'ensemble des instabilités listées ci-avant.

Chapitre V Etude détaillée de la section instable S11

La section S11, située au PK 198+600, se trouve à l'entrée de la ville de Jebha, en venant de Oued Laou. Elle a fait l'objet d'une étude détaillée suivant notre méthodologie. Les résultats de cette étude ont été publiés dans le Bulletin de l'Institut Scientifique (*BIS - Rabat, Section Sciences de la Terre, 2023, n° 45, 45–59, e-ISSN : 2458-7184*). (Taj et al., 2023b).

Titre de l'article : « Apport de la tomographie de la résistivité électrique (TRE) et approche géotechnique pour la caractérisation des instabilités de terrain : Cas du versant de Jebha, Rif, Nord du Maroc »

Ci-dessous, l'article intégral de cette publication :

1. Introduction du chapitre V

Le Nord du Maroc correspond à la chaîne de montagne du Rif, qui se dresse suivant une courbure à convexité sud et sud-ouest. La structure de cette chaîne est très complexe et présente de grands décrochements NE/SW (dextres) et NW/ SE (sénestres), qui auraient joué le rôle de rampes latérales. Ces décrochements ont repris (au Miocène supérieur) les plans des chevauchements majeurs, durant la mise en place des zones internes sur les zones externes survenue au Miocène inférieur. Les failles de Jebha au sud et du Jbel Fahiès au nord (Romagny, 2016) sont des témoins de cette dynamique. La chaîne rifaine peut être décomposée en trois domaines structuraux : Le domaine interne, les nappes de Flysch et le domaine externe.

Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à l'étude des glissements de terrain dans le Rif marocain. Une bonne partie de ces études était axées sur les aspects géomorphologique, géologique et structurale (El Fellah et al., 1996; Azzouz et al., 2002a; Mastere et al., 2013; Fellah and Mastere, 2015; Elmoulat et al., 2021) ; d'autres auteurs ont essayé de dresser un inventaire et une cartographie des différents mouvements de terrain dans le Rif (Harmouzi et al., 2019; Elmoulat et al., 2021; Boukhres et al., 2022). Les glissements de terrain sont aussi étudiés suivant le risque qu'ils présentent pour les populations et le développement durable des agglomérations (El Gharbaoui, 1982; Mastere et al., 2020; Elmoulat et al., 2021).

2. Situation géographique de la zone d'étude de la section S11 et problématique

La route venant de Chefchaouen (P 4113) se rencontre avec la rocade méditerranéenne (N16) pour rejoindre le seul accès de la ville de Jebha du côté ouest. Notre zone d'étude se situe dans ce tronçon de la route, au niveau de Kodiat Timzourga. Cette entrée de la ville est prise en sandwich d'une part par la mer méditerranéenne (côté nord-est) et du côté sud-ouest se trouve une imposante colline qui surplombe la corniche de la ville par un escarpement à pente très raide, longeant cette voie sur une longueur d'environ 1 km. Cette route de 20 mètres d'emprise environ, est constamment menacée, parfois bloquée par les gravois et blocs de pierres émanant des mouvements de terrain de ce talus instable. Ce risque naturel menace directement les personnes, conditionne la circulation des moyens de transport sur ce tronçon de la rocade méditerranéenne et entrave le développement durable des villes desservies par cette route et en particulier Jebha.

Cette ville portuaire de 4 500 habitants donnant sur la Méditerranée est située au centre du district de Mtiwa et fait partie de la province de Chefchaouen (Région de Tanger- Tétouan-Al Hoceima). Les activités principales de la ville se limitent à la pêche, au tourisme et quelques services divers. La rocade méditerranéenne qui la traverse (N 16), reste la principale route la desservant. Les autres routes qui mènent à Jebha sont en nombre très limité et restent très difficiles à emprunter et cela malgré le fait que la ville est connue par son littoral propre et naturel, qui peut la rendre une destination touristique par excellence.

La route (N16) appelée aussi rocade méditerranéenne ou rocade du Rif, est une route nationale qui sillonne tout le nord en longeant la méditerranée sur 507 Km, depuis Tanger à Saida, traversant plusieurs villes et villages, comme Ksar Seghir, Fnideq, Tétouan, Jebha, Al Hoceima et Nador. C'est un projet stratégique qui a permis de réduire le temps de trajet de 11 à 7 heures tout en améliorant les conditions de confort et de sécurité de plus de 3 millions d'usagers.

La N16 s'intègre dans un plan d'aménagement du territoire, en contribuant aux développements socio-économique et touristique, tout en préservant l'environnement. Cette route a permis de développer le système de transport dans toutes les zones desservies. Elle a aussi facilité l'accès de la population, aux équipements sociaux, à la scolarité, aux services et aux marchandises tout en impulsant la création de nouveaux centres urbains et sites touristiques.

La rocade méditerranéenne a été réalisée en huit tranches. La première a été mise en service en juin 2000. La tranche de Tétouan- Jebha est la dernière à être mise en service, en août 2012. Elle est longue de 120 km, empruntant un terrain plat au départ de Tétouan pour aborder très rapidement les reliefs montagneux à partir d'Oued Laou. Le tronçon Oued Laou-Jebha, de 74 km, s'inscrit dans un relief difficile et traverse des zones instables caractérisées par des glissements de terrain, des éboulements et des sapements de la plate-forme par la mer.

Notre étude concerne une zone à topographie très accidentée, se trouvant sur la retombée de l'unité interne du domaine rifain. Son paysage est marqué par les formations Ghomarides et parfois Sebtides, Ses terrains sont aussi le début des nappes de Flysch du Crétacé en majorité du Tisirène qui marque en particulier la grande falaise donnant sur le port. Aussi on peut observer des affleurements de la Dorsale calcaire ou Pré-Dorsale.

3. Objectifs et méthodologie pour étudier la section S11

L'étude de l'instabilité de ce versant s'avère délicate car les mouvements de terrain gravitaires sont influencés par de nombreux facteurs, tels que la structure géologique et hydrogéologique du terrain, ainsi que l'évolution des propriétés mécaniques de ses formations (El Fellah et al., 1996). Le présent travail a pour objectif de définir les facteurs influençant le processus d'instabilité de cet escarpement.

Notre méthodologie est basée sur une étude préliminaire comportant une recherche historique et bibliographique complétée par des reconnaissances sur le terrain et un levé topographique à l'échelle 1/5000. Après cette première phase nous avons défini les essais de reconnaissance géotechniques à effectuer soit in situ ou au laboratoire. Ensuite, nous avons dressé notre profil TRE, suivant les besoins de l'étude mais en prenant en compte des contraintes topographiques du terrain (voir chapitre I, paragraphe 2).

L'ensemble des résultats de prospection géotechnique et géophysique ont été analysés et corrélés pour pouvoir donner des jugements corrects.

4. Données climatiques locales

Le climat de la région de Jebha est de type méditerranéen, caractérisé par un hiver humide et frais, et un été sec et chaud. La pluviométrie varie avec l'altitude et l'exposition des reliefs. Les températures moyennes sont généralement comprises entre 20 et 32 °C en été et 7 et 22 °C en hiver. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 500 mm pour une année à forte pluie. La région est aussi connue par des averses marquant des pics journaliers pouvant atteindre parfois 140 mm (Fig.10).

Le 24 mars 2020, la région de Jebha comme tout le Nord du Maroc a connu des précipitations très importantes marquant un record journalier de 136 mm (Fig.87). A cause de ces averses exceptionnelles, plusieurs glissements de terrain ont été activés et en particulier le talus qui est l'objet de notre présente étude.

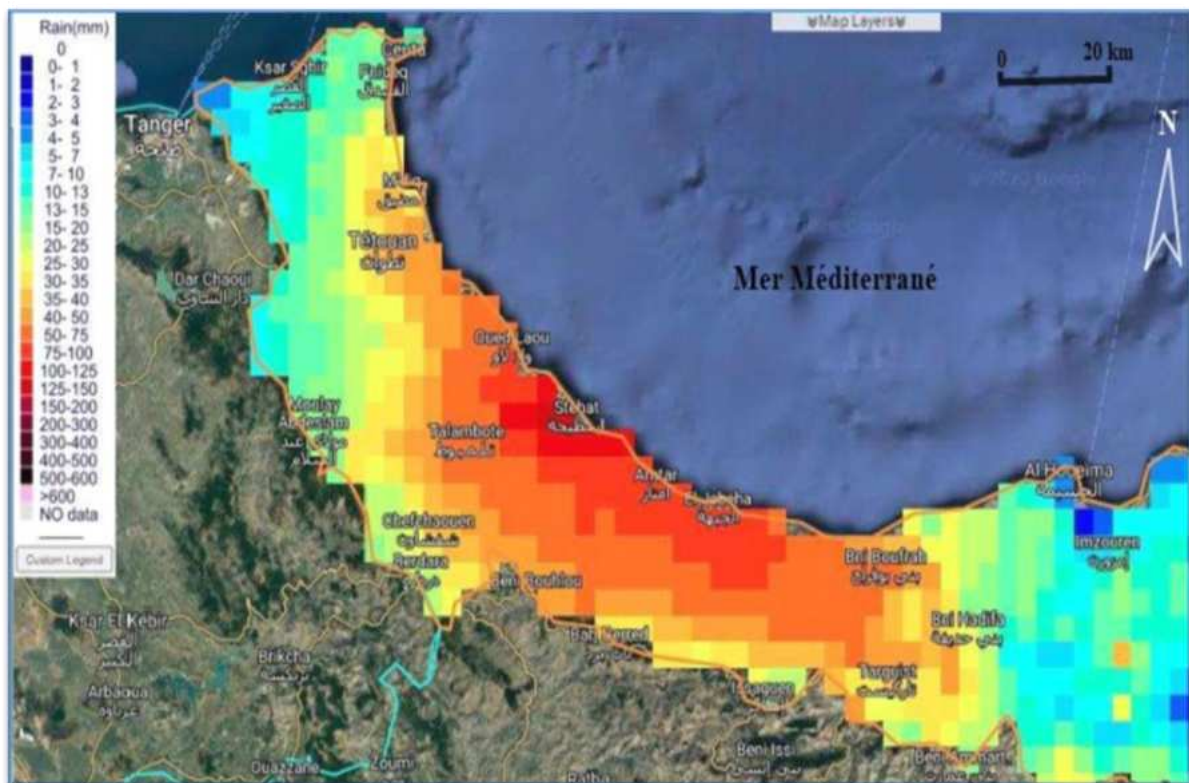


Figure 87 : Répartition spatiale de la pluie journalière survenue le 24 mars 2020 (Direction de la Météorologie Nationale).

5. Données géologiques, structurales et géomorphologiques de la section S11

5.1. Données géologiques

La chaîne rifaine fait partie de l'arc Bético-Rifain, située dans le Nord-Ouest du Maroc, à la marge sud de la méditerranée occidentale. Cet ensemble géologique est relativement récent, datant du début du Tertiaire (Durand-Delga et al., 1960; André Michard et al., 2008a). La chaîne rifaine est structurée par les divers mouvements tectoniques résultant de la collision

des deux plaques Eurasienne et Africaine, de l'effondrement de la Mer d'Alboran et des grands charriages qui s'étalent sur plusieurs kilomètres le long du littoral (Durand Delga and Kornprobst, 1963). Le domaine rifain est formé de structures géologiques très complexes, qui résultent des phases tectoniques allant du Miocène supérieur au Plio-Quaternaire. Il est réparti en trois groupes d'unités paléogéographiques : les unités externes, les nappes de flysch et les unités internes.

Les nappes de Flyschs, d'âge Crétacé-Paléocène, chevauchent les zones externes du Rif. Elles sont orientées est-ouest sous forme d'une bande (Durand-Delga et al., 1999). Ces flyschs se sont accumulés dans un bassin paléo- géographique, amorcée dès le Lias, et assurent la liaison entre les domaines océaniques de l'Atlantique central et de la Téthys (Durand-Delga et al., 1999. Alilouch et al., 2017). L'âge des Flyschs qui sont caractérisés par des séquences Silico- clastiques va du Jurassique supérieur au Miocène inférieur (Burdigalien inférieur). L'origine de ces dépôts est le bassin Néotéthys qui séparaient les côtes ibériques et africaines. Les dépôts des nappes des Flyschs sont alimentés par des sédiments provenant de la Dorsale calcaire et des Ghomarides (Burdigalien supérieur) (de Capoa et al., 2007).

Les nappes des Flysch Tisirène sont limitées dans leur partie orientale du Rif par la faille majeure de Nekor, et séparées du domaine interne, à l'est de la zone étudiée (Fig.88), par la faille de Jebha. Aussi, les nappes de Flysch apparaissent parfois dans la morphologie du Rif sous forme de klippes au sommet des hauts reliefs (Michard, 2011).

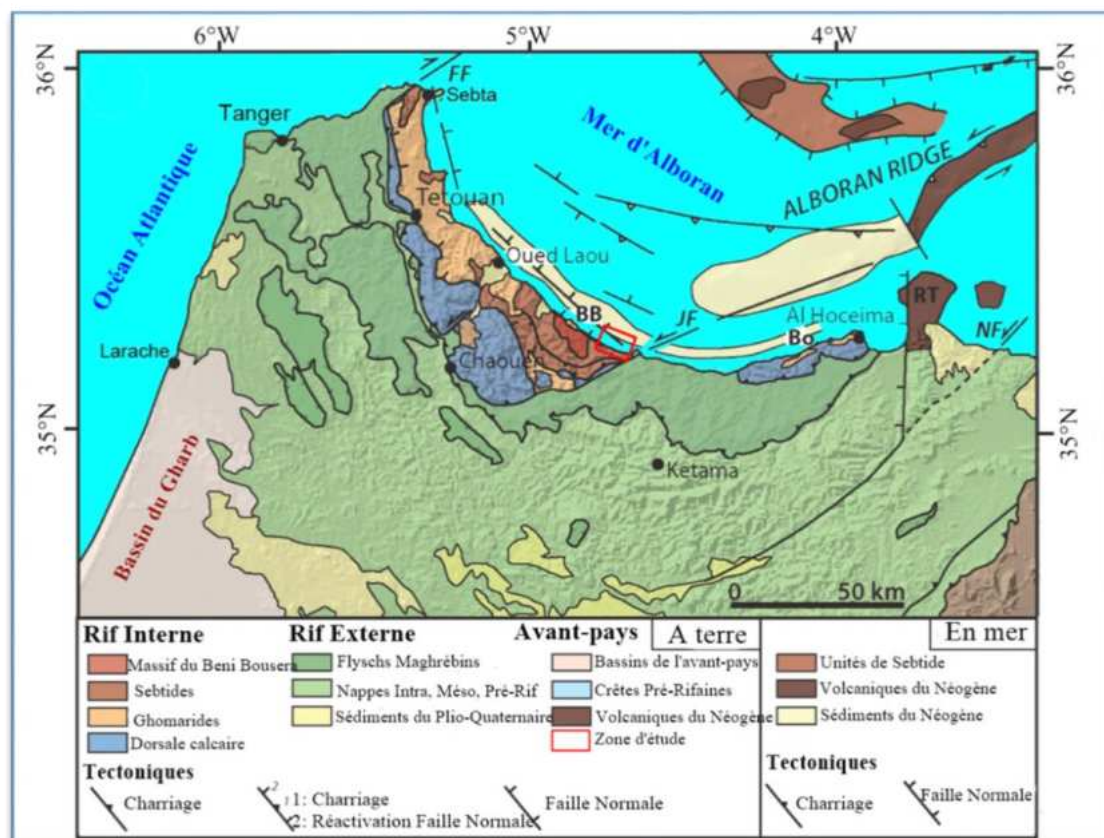


Figure 88 : Cadre structural du Rif et de la marge sud de la Mer d'Alboran (Chalouan et al. 2008).

BB: Beni Bousera massif; FF: Fahies Fault; JF: Jebhab Fault; NF: Nekor Fault and RT: Rasel Tarf.

Le Rif Interne (Fig.88) fait partie de la plaque paléogéographique d'Alboran, formée essentiellement de terrains Paléozoïques, couverts de couches mésozoïques, interposées entre les deux plaques Eurasie et Afrique. Le domaine du Rif Interne comprend trois unités majeures : les Sebtides, les Ghomarides et la Dorsale calcaire. Aux limites de cette dernière, on peut distinguer aussi des formations du Pré-Dorsalien (El Maz, 1989).

Les Sebtides sont connus par les formations cristallines et cristallophylliennes plus au moins métamorphiques. Les Ghomarides se présentent sous forme de schistes et grès ordoviciens et siluriens, de roches volcaniques, des terrains triasiques et une zone de minéralisation dans la région de Beni Mzala. La Dorsale calcaire est formée de différents types de calcaires et dolomies datant du Jurassique et Crétacé. Elle est composée de formations massives et dures dessinant une structure arquée d'orientation nord-ouest à sud-est. Cette dorsale est très fracturée et présente parfois des karstes, présentant un terrain favorable pour les formations aquifères à potentiel non négligeable.

5.2. Géologie locale du secteur étudié de la section S11

La zone d'étude se situe à la limite ouest de Jebha au PK198+800 (N 16), sur la partie est du Rif Interne, dans le domaine des Ghomarides (Fig.89). Cette position géographique très particulière explique la complexité géologique des formations qui composent le relief de cette région et en particulier celui de notre zone d'étude (El Fellah et al. 2015).

La morphologie et la lithologie du versant étudié sont prédominées par des affleurements de schistes pélitiques noirâtres provenant de la nappe inférieure des Ghomarides. Ce schiste est très altéré par endroit. On y trouve aussi du schiste marneux à intercalation de lits de grès, du schiste gréseux noirâtre, du schiste marneux altéré et une couverture de faible épaisseur formée d'alluvions et conglomérats noyés dans une matrice argileuse brunâtre (Fig. 91). Ces formations lithologiques sont fracturées et présentent plusieurs zones de faiblesse.

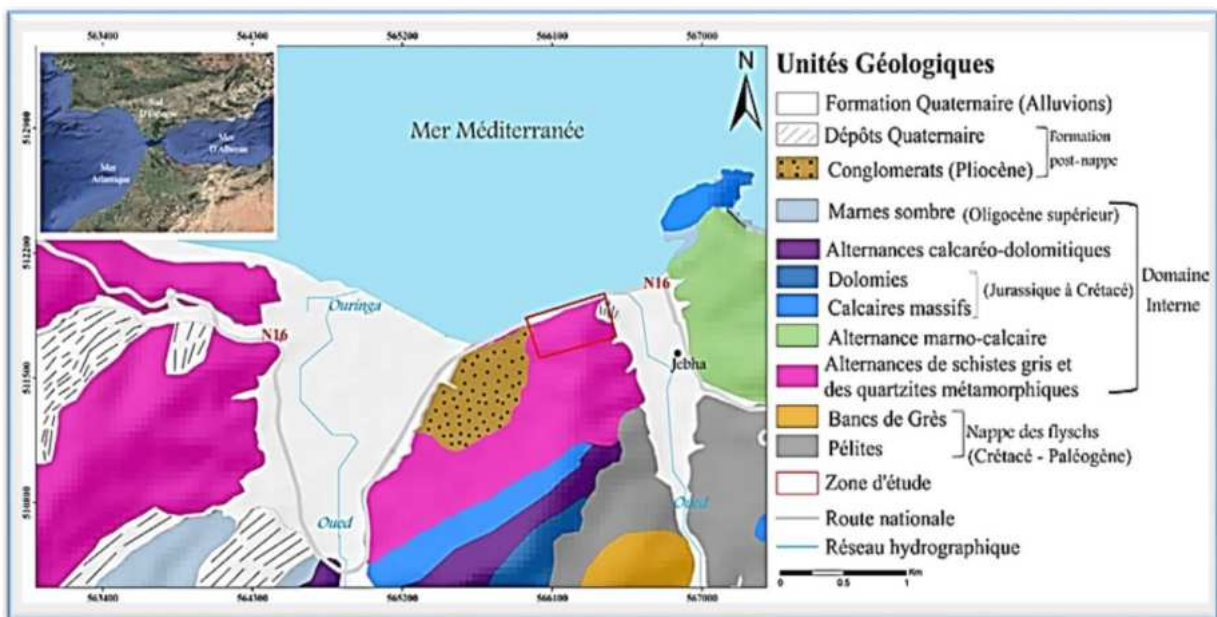


Figure 89 : Carte géologique locale avec indication de la zone d'étude de la section S11.

5.3. Contexte structural et sismique

La fameuse faille décrochante senestre de Jebha est largement étudiée pour figurer dans les cartes géologiques, néotectoniques et sismo-tectonique du Rif (Fig.90). Cette faille, ainsi que celles de Nekor et de Tétouan, sont le résultat des contraintes exercées sur l'arc Bético-Rifain en raison de la convergence des plaques Eurasie-Afrique. Cette convergence peut être divisée en trois processus principaux : (1) la rotation antihoraire de la plaque Afrique, (2) l'extension syncollisionnelle dans la Mer d'Alboran et (3) les contraintes déviatoriques liées à l'hétérogénéité géologique des blocs de la région (Tahayt, 2008; Benmakhlouf et al., 2012). La faille de Jebha continue de se développer vers Cherafate jusqu'aux alentours sud de la ville de Larache.

Elle se manifeste au niveau de la zone de Jebha par un système de décrochements, de fractures et de diaclases observés localement sur les surfaces de diverses structures et formations (Jean - Luc, 2015).

La localité de Jebha se trouve dans une zone à faible sismicité. Seulement 4 tremblements de terre de faible magnitude ont été enregistrés pendant les 20 dernières années (4,2mg le 08/02/2011 ressenti à 41,9 Km de la ville. 2,5mg le 23/07/2008 ressenti à 39,24 Km de la ville. 2,7mg le 04/04/2008 ressenti à 20,68 Km de la ville. 2,7mg le 01/01/2002 ressenti à 8,04 Km de la ville) (source Sismologue.com).

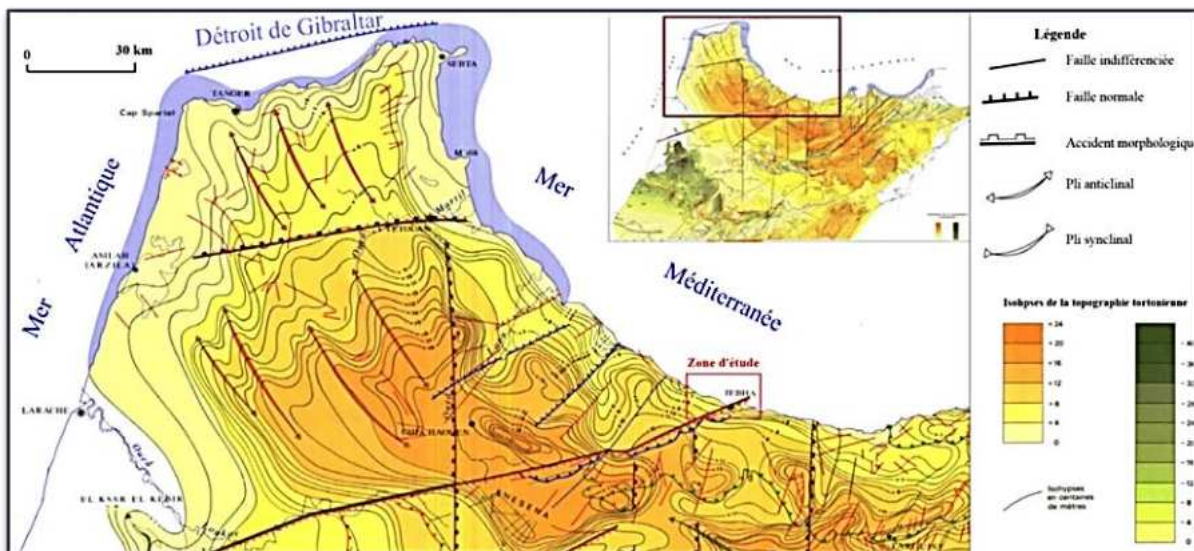


Figure 90 : Extrait de la carte des mouvements récents du Rif au 1/500 000.
Note et mémoire N° 365, Service géologique du Maroc (Morel & Julien 1992)

5.4. Contexte géomorphologique

L'ampleur du mouvement de terrain à l'entrée de Jebha est déterminée par ses caractéristiques géométriques imposantes. En effet, les glissements sont étalés sur une longueur de 1 km environ. Le dénivelé de cet escarpement est 132 m, avec une pente moyenne de plus de 45 %. La superficie du glissement est d'environ 6,5 Ha. Le levé topographique, effectué en septembre 2020, illustre cet état des lieux et donne avec précisions la présentation du relief (Fig.92).

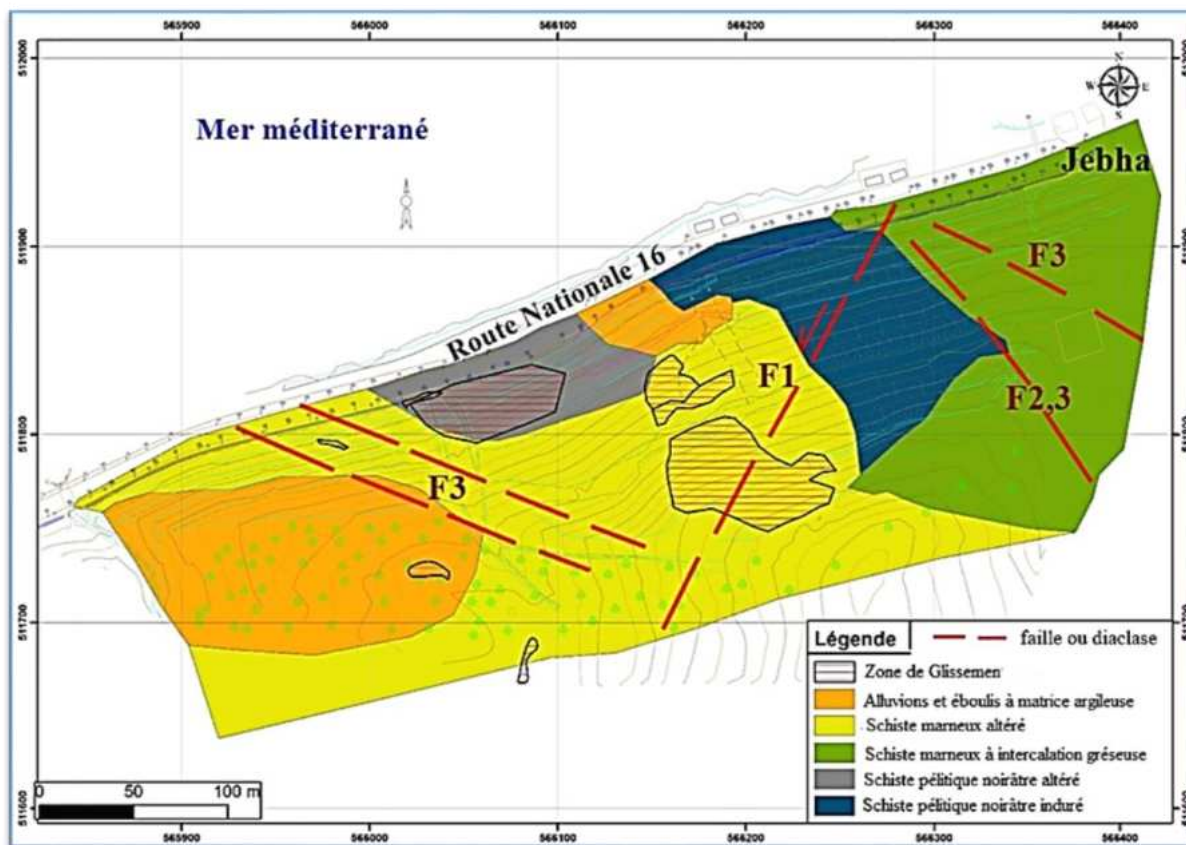


Figure 91 : Présentation schématique des formations structurales et géologiques de la zone d'étude.

Tout le talus a été visiblement modelé par des travaux de déblais en créant des paliers de stabilité non drainés, actuellement très dégradés et parfois effondrés.

L'analyse structurale des plans de discontinuité observés sur ce site, permet de conclure que les formations géologiques de cette coupe sont affectées par une fracturation intense présentée par des familles de failles locales ou des diaclases d'orientation variables (Fig.93.Photos 1, 2, 3 et 4). Les déformations relevées sur le site sont soit de nature ductile présentées sous forme d'un pli anticlinal associé à des plis ptygmiques au niveau des formations marneuses ou sous forme cassante associées aux failles constatées in situ. Les failles locales de type F1 (Fig.91), sont orientées dans la direction générale de la faille de Jebha.

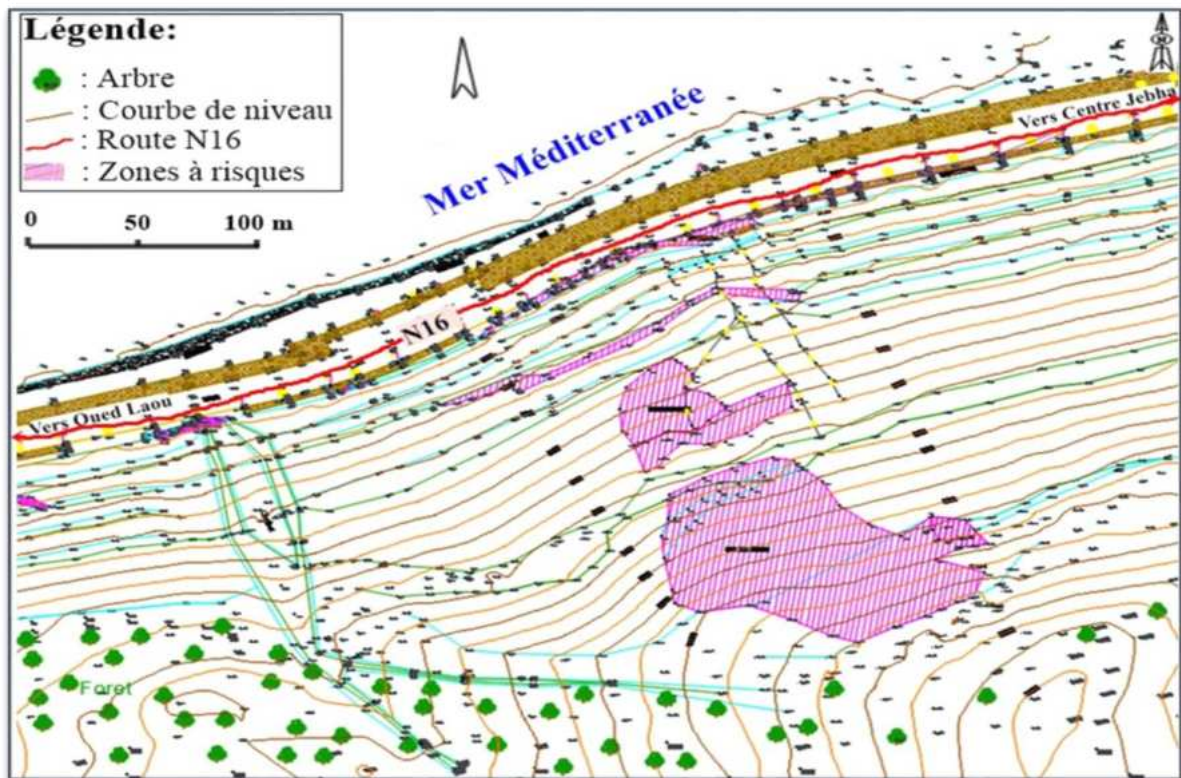


Figure 92 : Levée topographique à l'échelle 1/500 effectué en septembre 2020.

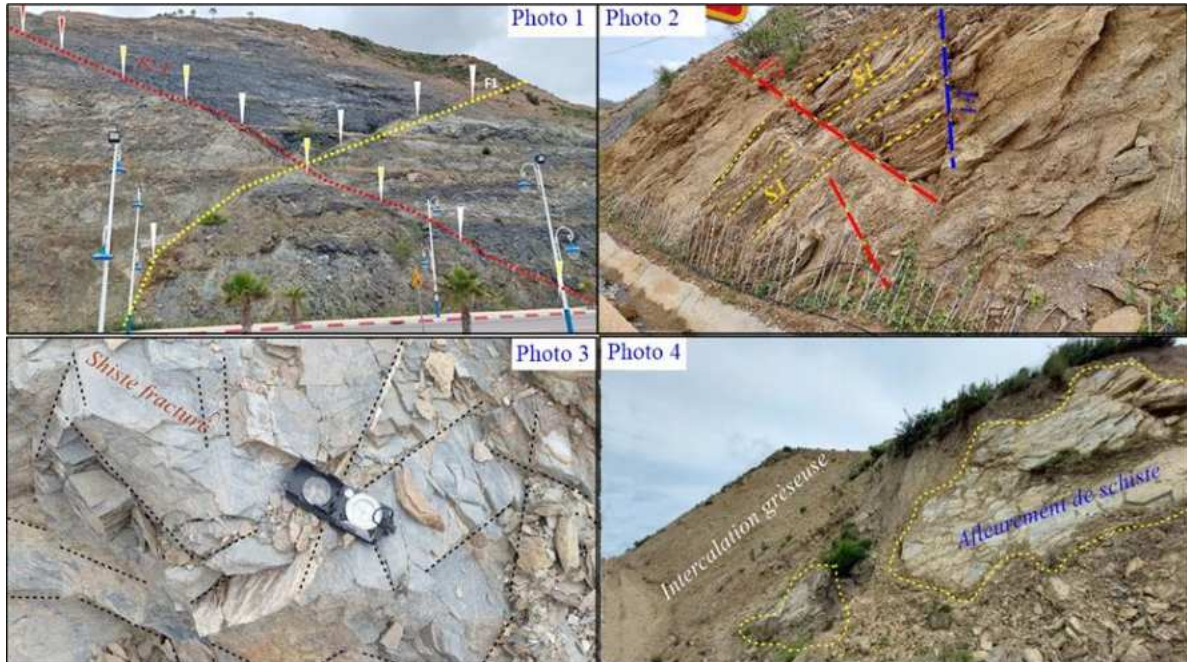


Figure 93 : Plans des deux failles suivant des directions différentes (juin 2021)

Photo 1. Trace s de deux failles suivant des plans variables. Photo 2. Schiste marneux. Les plans de schistosité S1 sont traversés par un plan de faille. Photo 3. Fractures observées sur le terrain dans les formations de schiste. Photo 4. Intercalation des formations de schiste marneux avec des lits de grès.

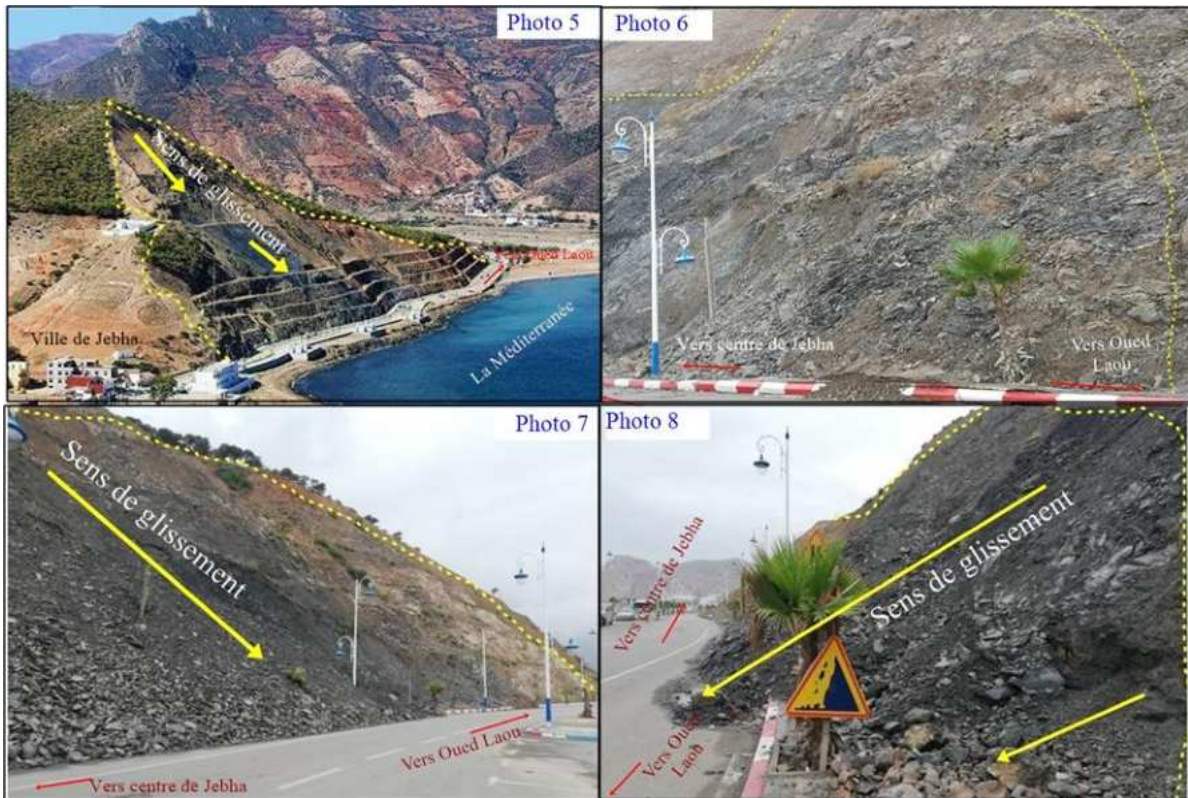


Figure 94 : Limites des surfaces instables, sens de glissement et état des dégradations (juin 2021)

6. Étude des mouvements de terrain dans le secteur de Jebha

Pendant les travaux d'aménagement de la rocade méditerranéenne (tranche Jebha vers la fin de l'année 2005), des travaux d'élargissement de la route ont été entamés. Et des fouilles en pleine masse en déblais, au pied du talus ont causé l'instabilité de la croute qui couvrait le substratum schisteux. L'effondrement de la couche superficielle a été imminent, causant ainsi les premiers glissements de terrain le long de cette voie.

Dans le but de stabiliser ce versant, la pente naturelle a été décaissée et modelée en risberme suivant cinq paliers (Fig.94, Photo.5). Dans un souci d'économie, aucun confortement supplémentaire n'a été réalisé. Aussi, aucune solution de drainage des eaux pluviales n'est constatée sur site.

Cette situation a accéléré la dégradation en surface du versant et l'accentuation des instabilités. Ainsi, les schistes autrefois couverts par la croute protectrice, sont actuellement exposés aux intempéries et températures extrêmes, sans oublier l'air marin connu par sa salinité agressive. L'altération des schistes a facilité sa dégradation répétée dans chaque période d'hivers ou suite à des averses importantes. Les débris et blocs issues de ce mécanisme d'usure glisse aisément vers la route aménagée, accélérés par la grande pente et la surface glissante de la roche mère (Fig.94.Photos. 6, 7 et 8). Au milieu de l'escarpement, où l'affleurement du schiste pélitique est dominant, on constate un grand défoncement arrivant jusqu'au pied du talus. Il est le résultat de l'usure de la roche et du transport de matériaux par les glissements de terrain causés par la masse des terres saturées et le plan de clivage favorable.

6.1. Etude géotechnique de la section S11

Pour cerner les divers mécanismes d'instabilité de la zone d'étude et aussi afin d'avoir une vision plus claire sur les formations du sous-sol, nous avons mené en collaboration avec le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes des investigations géotechniques, qui ont concerné la réalisation des 5 forages carottés (Fig.95), disposés géographiquement suivant nos besoins d'étude mais aussi en prenant en compte les conditions d'accès du terrain. En effet la grande pente du talus a rendu parfois impossible l'installation de la station de carottage (Sedidril 250/01/TTA). Le carottage est effectué suivant la verticale (angle 90°).

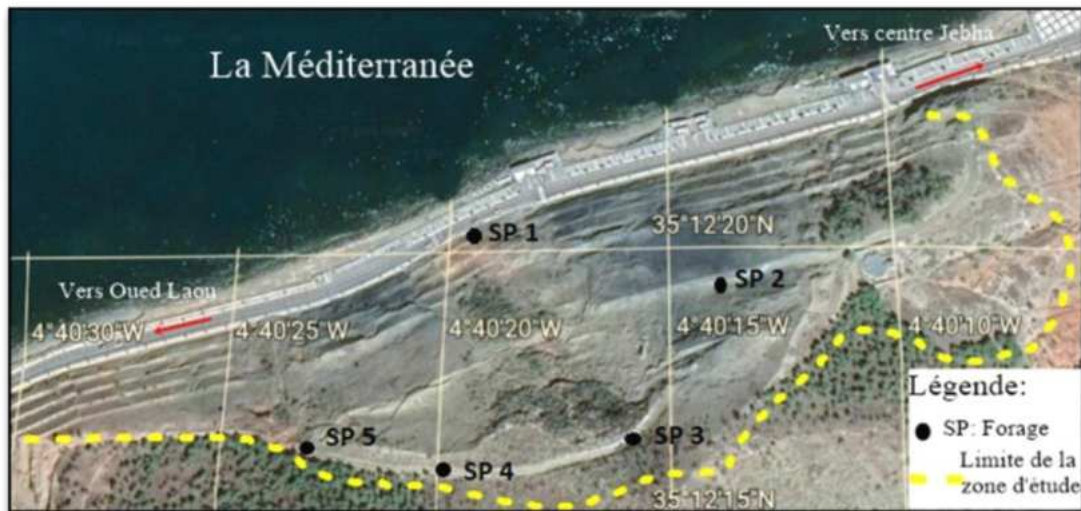


Figure 95 : Implantation des cinq points de forage sur le site d'étude de la section S11.



Figure 96 : Exemple de carotte : Première planche des sondages SP1 & SP3 (Profondeur 0 à 7 mètres).

Les carottes obtenues ont été analysées visuellement et aussi au laboratoire pour définir la lithologie à chaque profondeur (Fig.96). Les 5 forages ont servi à la réalisation des essais au pressiomètre de Ménard pour pouvoir juger les performances mécaniques des différentes couches et détecter les éventuels niveaux de faiblesse (Baud and Gambin, 2013) . Ces essais

nous ont permis de définir au niveau de chaque forage : la pression de fluage P_f , la pression limite P_l et le module pressiométriques de Ménard. Les essais ont été effectués à l'aide d'une sonde tri-cellulaire introduite le long du forage. Conformément à la norme NF EN ISO 22476-4 (2015), la sonde utilisée est de type G de 60 mm et la pression d'essai était limitée à 5 MPa.

6.2. Etude géophysique de la section S11

Les investigations et les essais géotechniques ont permis d'avoir beaucoup d'information sur la nature des matériaux qui forment le corps de l'escarpement étudié. Ils nous ont permis aussi de comprendre sa présentation structurale, lithologique et géologique. Mais ces résultats restent relativement ponctuels et ne peuvent être appliqués sur l'ensemble du versant. L'étude géologique et géomorphologiques ont permis d'exploiter les résultats géotechniques et faire une interprétation complète de la façon dont sont dressées les diverses formations et aussi leur comportement dynamique. L'usage de la prospection géophysique va permettre d'affiner les données obtenues et de comprendre les structures du sous-sol (Zaagane et al., 2020). L'objectif escompté est de déterminer la géométrie et la continuité du substratum schisteux sur l'ensemble du sous-sol, se prononcer sur l'existence ou non d'une nappe souterraine (Descloîtres and Ritz, 1994; Abdel-Ilah et al., 2022), définir l'épaisseur de la couche superficielle altérée et la surface de rupture, vérifier s'il existe des vides et enfin essayer de comprendre les dispositions des fracturations et failles locales constatées en surface (Gupta et al., 2019).

La méthode de prospection géophysique utilisée est celle de la tomographie de résistivité électrique (TRE). Elle est fondée sur la mesure des résistivités électriques apparente du sous-sol, au moyen d'un quadripôle : deux d'injection de courant et deux de mesure de la différence de potentiel. Cela est effectué en se déplaçant le long du profil sur toutes les électrodes constituant ainsi une série de mesures. Après chaque série de mesures la géométrie du quadripôle change en augmentant l'espace entre les électrodes (selon la configuration choisie) pour atteindre des profondeurs plus importantes, et ainsi de suite jusqu'à la réalisation de toutes les combinaisons possibles. Cette opération est effectuée au moyen d'une flûte multiconducteur, automatiquement gérée par un résistivimètre.

L'acquisition des données géo-électriques a été effectuée avec le résistivimètre « X612EM+ » de chez MAE. Pour avoir un compromis entre la résolution spatiale et la profondeur d'investigation, nous avons opté pour le dispositif combiner Wegener-Schlumberger, la distance inter-électrodes était fixée à 10 m.

Le profil a été implanté parallèlement à la topographie et perpendiculairement au sens de glissement et passant par le sondage carotté SCP 02 au niveau du 5^{ème} palier des risbermes (Fig.97). La longueur du profil est de 350 m, le nombre d'électrodes utilisé est de 36.

Nous avons utilisé la méthode d'inversion des moindres carrés régularisée (Zhdanov and Portniaguine, 1999) qui est une technique d'inversion au sens de moindre carré, utilisant un facteur de lissage permettant de donner un modèle à distribution lisse par blocks à résistivité constante. L'équation en forme matricielle de cette inversion est celle détaillée au chapitre II (Paragraphe 3).

Cette méthode d'inversion est mieux adaptée au cas où la distribution de la résistivité du sous-sol est très contrastée (cas de limites bien définies entre les éléments ou couches

géologiques). Elle permet de donner un modèle qui montre clairement les limites des différentes couches ou contacts ce qui correspond parfaitement à notre cas, puisque on explore les formations de schistes traversées par des failles. L'inversion s'est effectuée au moyen du logiciel Zondres 2D, avec une erreur RMS= 6.3% après la cinquième itération.

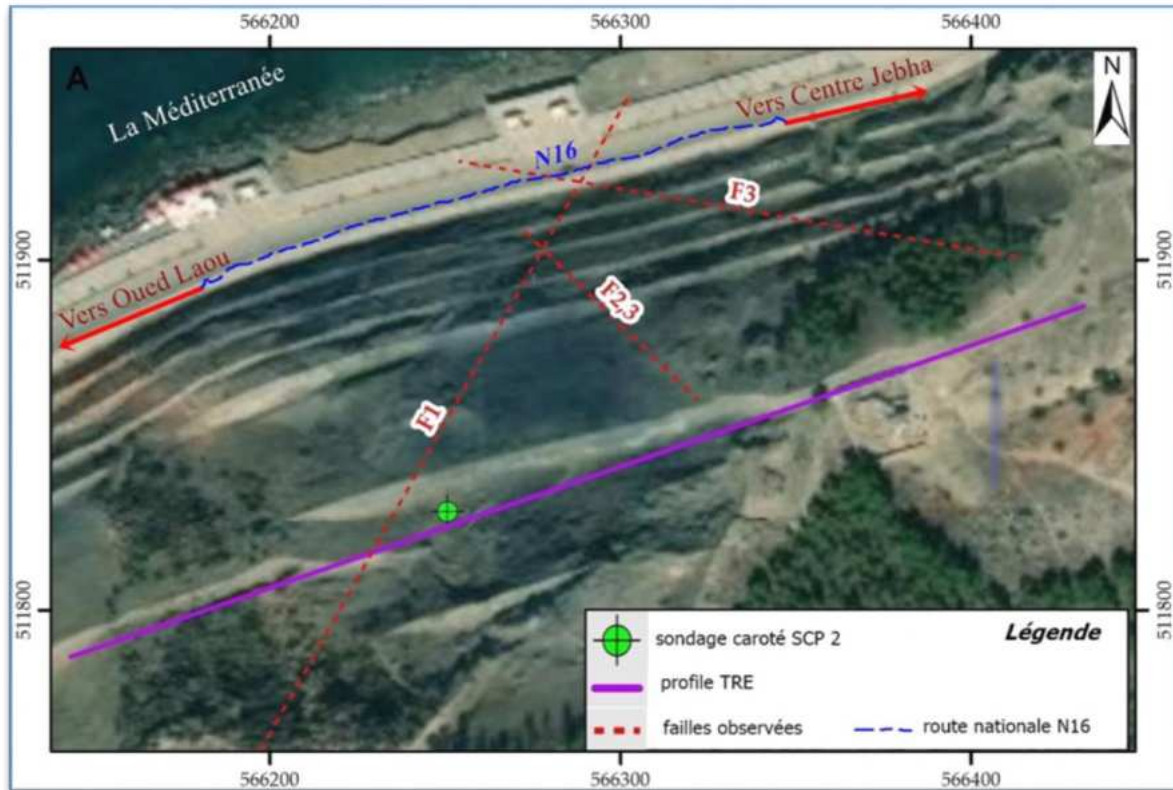


Figure 97 : Implantation du profil parallèlement à la topographie et perpendiculairement au sens de glissement et passant par le sondage caroté SCP 02.

7. Résultats de l'étude de la section S11 et discussion

Les photos aériennes, datant de 1986, montrent l'absence de modelage ou autre intervention anthropique et indiquent que la présente voie de 20 m de largeur était une simple piste ou voie secondaire qui suivait la ligne du littorale (Fig.98). Des photos anciennes montrent que la colline était couverte par une végétation assez dense (Fig.99), ce qui permet de conclure que les schistes qui affleurent actuellement étaient couverts par une croute formée de terre végétale, de grès et calcaires. Les restes de cette couche sont toujours visibles au niveau de la crête et aussi de part et d'autre de l'affleurement des schistes.

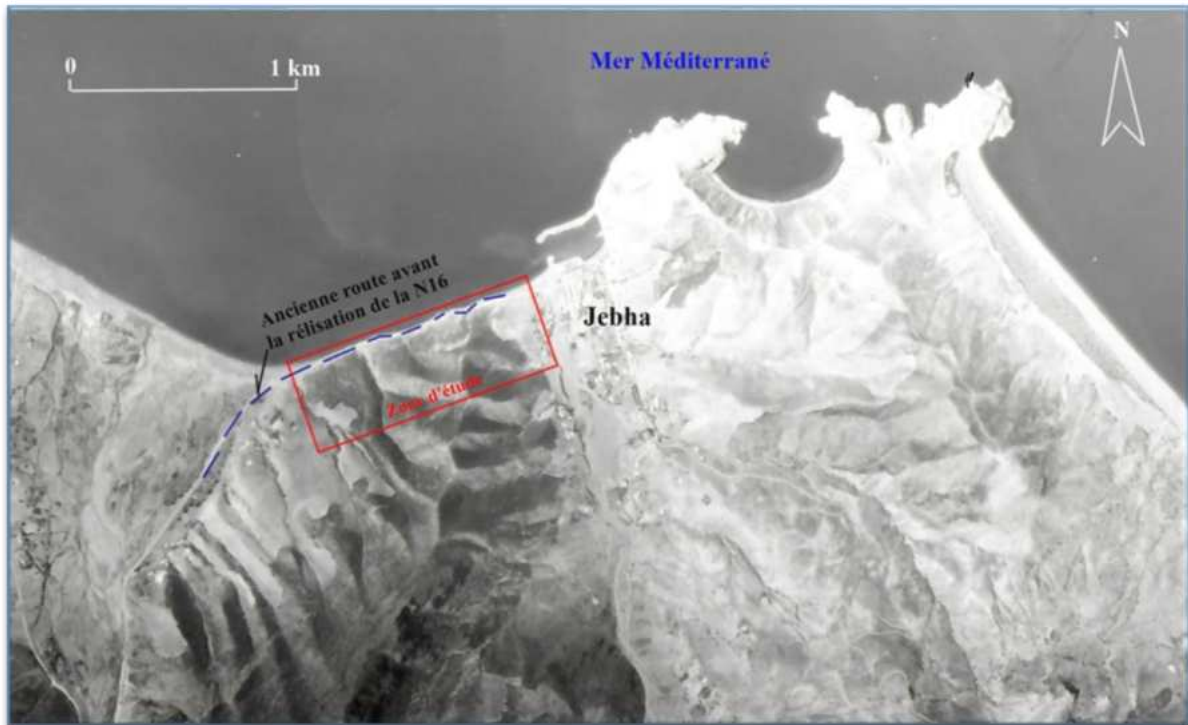


Figure 98 : Photo aérienne de la région de Jebha en 1986 (Source: service cadastral).



Figure 99 : Photo amateur montrant l'état des lieux avant l'élargissement de la voie et les travaux de déblais et remodelage du talus (2005).

L'analyse géomorphologique et l'historique de ces mouvements de terrain confirment bien que les aménagements routiers de la N16, entamés au pied du talus et les déblais effectués dans le versant sont les causes directes qui ont déclenché son instabilité. La dominance de formation de schistes marneux et pélitiques souvent altérés, plissés et fracturés suivant des plans clivages défavorables, a facilité l'infiltration des eaux. L'escarpement est

aussi exposé à l'air marin connu par sa salinité agressive. L'analyse des échantillons de schistes pélitiques prélevés sur les lieux indique une composition à grain très fin, friable, très sensible à l'eau et à la chaleur. Tous ces facteurs défavorables ont accéléré la cadence des cycles altération-usure des couches superficielles et peu profondes (Fig.102). Les glissements de terrain sont ensuite activés par les eaux de pluies qui causent la saturation des éboulis et leur mouvement est facilité par une forte pente du talus.

La tomographie de résistivité électrique (TRE) est une méthode géophysique active qui peut fournir des images en 2D ou 3D de la distribution de la résistivité électrique dans le sous-sol. L'analyse et l'interprétation de ces images électriques permettent d'identifier des contrastes de résistivité qui peuvent être principalement dus à la nature lithologique des terrains et à la variation de la teneur en eau. Le modèle de TRE obtenu (Fig.100) confirme les résultats des sondages (Fig.102) et les analyses géologiques et géomorphologiques du site. Ils indiquent que le massif du schiste pélitique induré qui forme la structure du sous-sol est homogène et forme la totalité du substratum de la colline. Aussi, aucun vide ni nappe souterraine, n'ont été détectés. La couche superficielle est entièrement altérée sur une épaisseur variable pouvant atteindre 30 m (Fig.101).

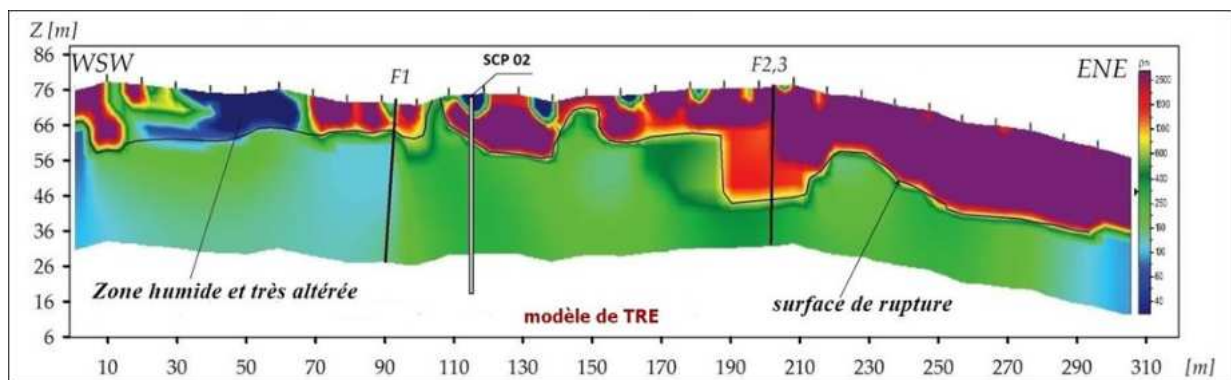


Figure 100 : Modèle de la TRE obtenu dans la section S11 et localisation des zones altérées.

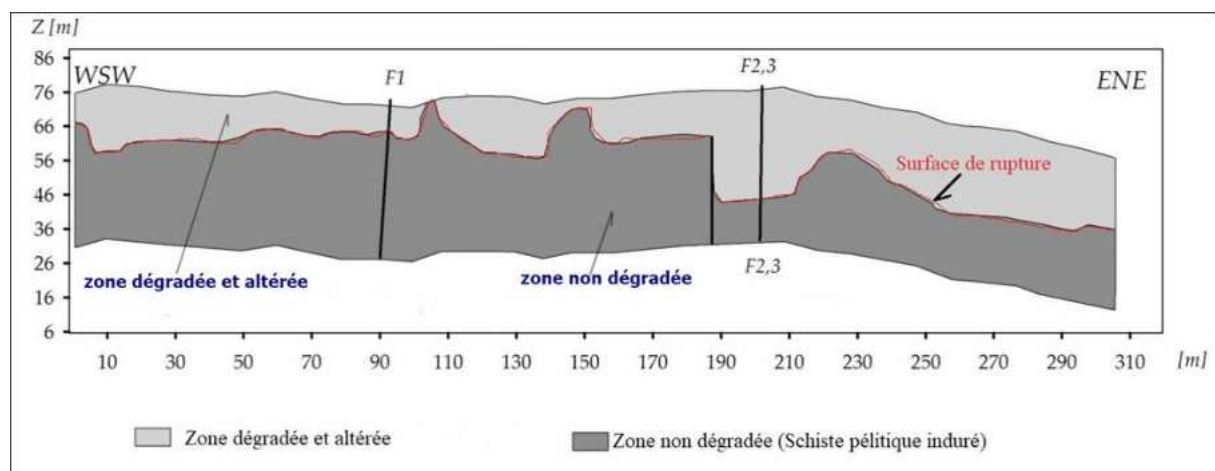


Figure 101 : Modèle TRE simplifié de la zone d'étude.

Ce versant présente plusieurs familles de failles et de fractures d'orientation variables. Ces cassures ont perturbé la stabilité mécanique de la structure des formations lithologiques en favorisant les infiltrations des eaux de pluie, créant ainsi des zones de faiblesse et des couloirs de dégradations, notamment dans le secteur WSW marquée par une faible résistivité électrique, d'environ 40 Ohm.m (Fig.100). La partie ENE du profil montre une couche électrique d'une résistivité de 2500 Ohm.m que nous avons interprétée comme une couche altérée. Ainsi, elle est moins vulnérable à l'effet des eaux de pluie que la partie WSW.

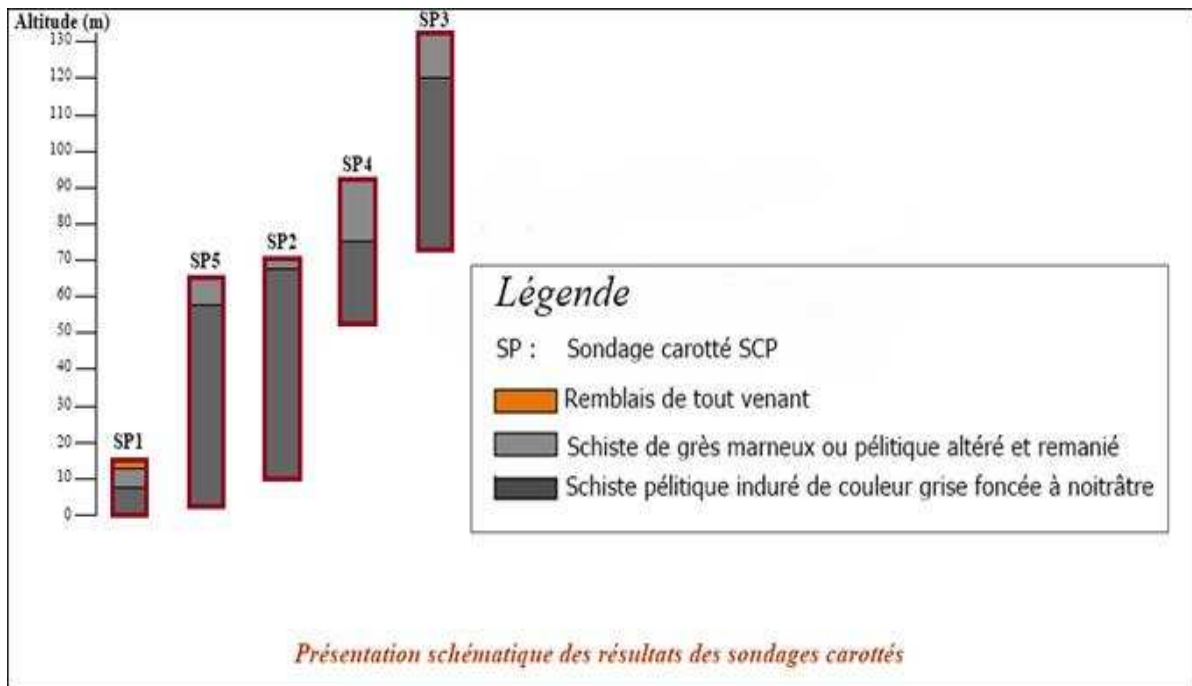


Figure 102 : Schéma analytique des carottes obtenues au niveau des sondages de la section S11.

L'analyse des résultats des essais de pressiomètre de Ménard (Norme NF P 94-110-1), effectués dans les cinq forages, montre que le substratum schisteux est consolidé, mais il existe des zones de faiblesse altérées et fragiles, reflétant ainsi le développement des phénomènes de ruptures progressives qui affectent le versant. Les couches profondes sont beaucoup plus saines. Ceci s'explique par le fait que les schistes en profondeur sont relativement peu altérés et non remaniés par des mouvements de terrain superficiels (Fig.103).

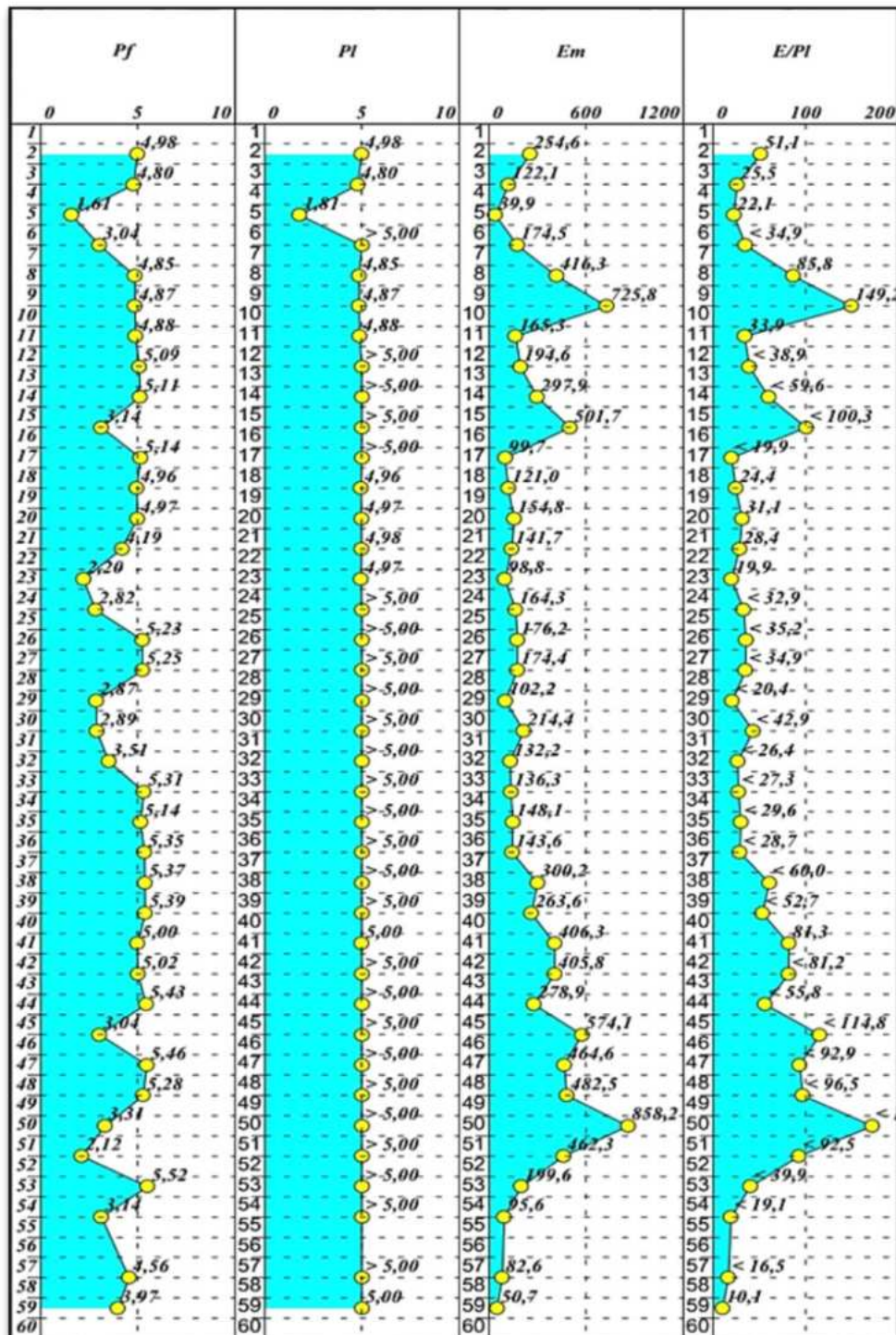


Figure 103 : Résultats de l'essai pressiométriques de Ménard au niveau du sondage SCP 02.

8. Conclusions de l'étude de la section S11

L'escarpement étudié présente plusieurs risques de glissements de terrain, qu'on peut différencier suivant trois catégories. Un danger périodique lié aux mouvements de terrain constatés actuellement et qui perturbe la circulation à l'occasion de chaque averse ou période hivernale, à cause des débris et blocs de roches qui glissent le long du talus, envahissant la

route en absence de butée ou piège à cailloux. Un autre risque éminent qui proviendrait du volume des terres situées en tête de la colline et qui sont actuellement dans un état d'équilibre précoce et la rupture peut lâcher à tout moment. Ce glissement de terrain est important de par sa hauteur, sa pente et aussi le volume des terres qu'il pourrait transporter. Enfin, cet escarpement est scié par des failles locales et fractures qui favorisent l'infiltration des eaux en profondeur. Ce qui fragilise davantage le substratum schisteux et crée des zones de faiblesses. Les failles transversales par rapport à la pente du talus sont les plus dangereuses car elles vont permettre la constitution de masses importantes disloquées et instables.

Le versant, situé à l'entrée de la ville de Jebha et qui a fait l'objet de la présente étude, est dans un état d'instabilité menaçante. L'intervention des autorités compétentes pour parer à ce problème devient très urgente. Les solutions à mettre en application doivent prendre en considération les trois types d'instabilité listés ci-avant.

Une étude approfondie doit être menée pour étudier l'ensemble de la colline, élargir la surface d'investigation et aussi définir avec précisions les orientations et les profondeurs des failles et fractures observées en surface. Cela va permettre de cerner le problème dans sa globalité et trouver les solutions adéquates qui peuvent se manifester soit par la réalisation d'ouvrage de stabilisation et de protection ou trouver des solutions radicales par des corrections de tracés de la route N 16.

Les résultats de la géophysique complètent ceux de la géotechnique. En effet la zone vulnérable à traiter en premier ordre est la zone altérée humide identifiée dans le profil de la TRE. L'usage de la TRE a permis de confirmer l'existence d'une surface de rupture suivant une profondeur variable. Ce qui nous a permis de juger l'existence du risque. Des études futures peuvent être effectuées pour quantifier les volumes des terres et la masse glissée. Pour cela il est nécessaire d'avoir une présentation géométrique en trois dimensions, fidèle à l'état des lieux et définissant les parties altérées et dégradées susceptibles de déclencher le glissement de terrain. Cette image spatiale nécessite la réalisation des profils TRE dans le sens perpendiculaire à notre premier profile, et aussi l'exécution d'autres sondages carottés.

Chapitre VI Résultats et discussions

1. Synthèse et évaluation des risques pour les sections étudiées

1.1. Synthèse des analyses et diagnostics des sections instables

Les onze sections étudiées se trouvent dans des états instables de degrés variables. Les dégradations et les désordres constatés, diffèrent d'une zone à une autre. Un état de synthèse peut être dressé pour pouvoir juger l'importance des mouvements de terrain dans chaque section de notre zone d'étude. Un tableau récapitulatif a été dressé dans ce sens (Tableau 6).

Tableau 6 : Synthèse récapitulative de l'état des sections instables

Section instable	PK de repère de la section	Longueur de la section instable	Nature des instabilités	Désordres et anomalies
Section 1	140+000	500 m	Glissement de terrain superficiel dans le talus. Erosion	Fissures dans la plateforme. Chaussée dégradée
Section 2	156+500	600 m	Glissement de terrain profond et superficiel dans le talus.	Chaussée endommagée. Ouvrage hydraulique détérioré. Déviation de la voie
Section 3	158+000	600 m	Glissement de terrain superficiel dans le talus. Affaissement de la plateforme	Chaussée très endommagée. Plateforme affaissée et fissurée
Section 4	168+800	300 m	Glissement de terrain superficiel dans le talus.	Gabions emportés. Déviation de la voie
Section 5	169+100	500 m	Glissement de terrain superficiel à profond dans le talus	Dégradation des risbermes. Début de dégradation de l'ouvrage hydraulique (départ des gabions de protection). Chaussée peu fissurée
Section 6	176+800	1 km	Glissement de terrain profond et superficiel dans le talus. Erosion	Dégradation des risbermes. Ouvrage hydraulique endommagé. Equipements de sécurité emportés. Chaussée effondrée
Section 7	188+300	1 km	Glissement de terrain superficiel dans le talus. Erosion	Chaussée peu dégradée. Début de dégradation des risbermes
Section 8	190+200	1 km	Glissements et mouvements de terrain de grande surface dans le talus	Dégradation des risbermes. Ouvrage hydraulique endommagé. Chaussée endommagée et déviée à plusieurs points.
Section 9	191+600	700 m	Glissement de terrain superficiel dans le talus. Plateforme instable	Fissuration de la plateforme. Dégradations dans le soutènement en terre armé et cunette remplie par les éboulis
Section 10	192+200	300 m	Glissement de terrain superficiel dans le talus. Plateforme instable. Erosion	Fissuration de la plateforme. Dégradations dans l'ouvrage de soutènement. Ravinement de la base de l'ouvrage hydraulique
Section 11	198+600	1 km	Glissement de terrain profond et superficiel. Chute de pierres. Erosion	Dégradation des risbermes. Chaussée envahie par les éboulis. Caniveaux et trottoirs endommagés

1.2. Les facteurs d'évaluation des risques pour les sections étudiés

1.2.1. Les aléas

Un risque naturel peut se produire brusquement comme les séismes et les éruptions volcaniques, mais il peut aussi se manifester par des signes indicateurs avant de se déclencher (Cote, 2011; Dauphiné and Provitolo, 2007; Dumas et al., 1984), comme il est le cas des inondations et les glissements de terrain. Dans les deux scénarios, le calcul de la probabilité pour qu'un évènement se produit est complètement différent. L'aléa est défini comme étant la possibilité qu'un phénomène se produit au cours d'une période de référence donnée et avec une intensité donnée (Garnier et al., 2011; Leone et al., 2021). L'aléa naturel désigne la probabilité qu'un évènement naturel d'intensité donnée survient sur un secteur géographique donné et dans une période de temps donnée (Bobrowsky, 2013; Garnier et al., 2011; Richer, 2021). L'aléa pour un risque, est défini en prenant en compte les facteurs de prédisposition et les facteurs de déclenchement (Aleotti and Chowdhury, 1999; Saez, 2011). Dans le cas de glissement de terrain, l'aléa peut être induit par les analyses statistiques en particulier ceux des données pluviométriques en prenant en compte le seuil de déclenchement (Baeza and Corominas, 2001; Corominas et al., 2013).

Dans notre étude, les aléas sont de natures géologiques, climatiques, hydrogéologiques et morphologiques (Alcántara-Ayala, 2002; Aleotti and Chowdhury, 1999; Carrara and Merenda, 1974; Thiery et al., 2005). Dans les sections étudiées, ils peuvent être classés suivant trois catégories :

- Les glissements de terrain sont dans le talus naturel : Aléa fort de type A1
- Les glissements sont dans les remblais d'apport : Aléa moyen de type A2
- Les érosions hydriques : Aléas faible de type A3

1.2.2. Les vulnérabilités

Les vulnérabilités sont les degrés de pertes résultant d'un phénomène susceptible d'engendrer des dommages sur des enjeux exposés. La vulnérabilité d'un milieu, d'un bien ou d'une personne, c'est son aptitude à subir un dommage à la suite d'un accident. Il est très difficile de définir la vulnérabilité face à un risque, car elle dépend de plusieurs facteurs et aléas (Leone, 2007; Leone and Vinet, 2006). On peut considérer que la vulnérabilité à un évènement redouté est une estimation de ce que sera la gravité de cet évènement s'il se produit (Bouramtane et al., 2021; Gilbert, 2009; Leone, 2007; Manche, 1997). Il faut aussi adapter la définition des enjeux pour chaque type de risque et aussi l'environnement dans lequel il se produit (Veyret et al., 2005). Aussi, la vulnérabilité d'un phénomène dépend des enjeux économiques, sociaux et politiques qui sont pris en compte (Dauphiné and Provitolo, 2007).

D'un autre côté les impacts d'un risque peuvent être à petites échelle (local ou régionale), mais ils peuvent être aussi constatés à grandes échelle (national ou même international). C'est une autre base d'évaluation de la vulnérabilité d'un risque (d'Ercole et al., 2000; Dauphiné and Provitolo, 2001; Rufat, 2007). Enfin, la vulnérabilité dépend de la capacité d'une

population ou un écosystème à absorber les perturbations et les changements causés par un risque naturel donné.

Dans notre diagnostic des zones à risque étudiées, nous avons analysé les degrés de dégradation des infrastructures et équipements de protection. Par la suite, nous avons classé l'enjeu de chaque section instable suivant l'état de dégradation éventuel, en particulier celle de la plateforme en fonction de l'évolution possible des mouvements de terrain dans la section étudiée. Trois types d'enjeux ont été répertoriés :

- Enjeu majeur (E1) : il concerne la mise en danger de la circulation dans toute l'emprise de la chaussée, et la dégradation concerne la totalité de la plateforme dans le tronçon étudié.
- Enjeu modéré (E2) : le danger de circulation existe dans une partie de la chaussée, la circulation des véhicules peut continuer.
- Enjeu faible (E3) : les dégradations concernent une zone locale de la plateforme sans impact considérable sur la circulation des véhicules.

1.2.3. Les risques

Le risque est une mesure du danger : pertes en vies humaines, blessés, dommages aux biens, et atteinte à l'activité économique résultant d'un aléa particulier (Cutter et al., 2015; Leone et al., 2021; Lissak, 2013). D'une manière générale, le risque naturel est une combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité (l'enjeux) (Leone, 2007; Richer, 2021; Weiss et al., 2011).

Le risque associé à l'aléa et à l'enjeu au niveau de chaque section étudiée, est mesuré par son impact sur les infrastructures installées et surtout sur les utilisateurs de la route (Leone et al., 2011; Leone and Vinet, 2006). On peut alors classer les risques suivants leur nature et leurs impacts :

Risque 1 (R1) : Dégradation de la plateforme.

Risque 2 (R2) : Dommages dans les murs de soutènements et les ouvrages de stabilité.

Risque 3 (R3) : Dégradations dans les ouvrages hydrauliques.

Risque 4 (R4) : Dégâts matériels sur les véhicules qui empruntent la voie.

Risque 5 (R5) : Dégâts humains dont les usagers de la route et les riverains.

1.3. Évaluation des risques dans les sections étudiées

L'évaluation des risques dans les sections étudiées est basée sur la combinaison des trois facteurs Aléa- Vulnérabilité- Risque (De Vanssay, 1988; Ercole et al., 2000; Fumey, 2001). Les résultats sont dressés dans le tableau 7 ci-dessous.

1.4. Résultats de l'évaluation des risques et discussions

Ainsi, on peut classer les sections instables en trois classes (Tableau 7) :

Classe C1 (risque important) : le traitement des points instables de cette classe est urgent dans le court terme. Il s'agit des sections S2 (PK 156+500), S3 (PK 158+000), S6 (PK 176+800), S8 (PK 190+200), S9 (PK 191+600), S10 (192+200) et S11 (PK 198+600).

Classe C2 (risque moyen) : le traitement des points instables de cette classe est moins urgent dans le court terme mais reste prioritaire, et dépend de l'évolution des conditions hydrauliques du site. Cela concerne les sections S1 (PK 140+000), S4 (PK 168+800) et S5 (PK 169+100).

Classe C3 (risque faible) : le traitement des points instables de cette classe est moins urgent dans le court terme, il concerne la section S7 (PK 188+300), mais des actions d'entretien reste obligatoire.

Tableau 7 : Evaluation des risques dans les sections instables étudiées

SECTIONS ETUDIÉES		ALEAS	ENJEUX	RISQUES	EVALUATION ET CLASSIFICATION
Sections instables	Point kilométrique				
S1	140+000	A1	E2	R1	C2
		A3		R2	
S2	156+500	A1	E1	R1	C1
		A2		R2	
				R3	
S3	158+000	A1	E1	R1	C1
		A2		R4	
				R5	
S4	168+800	A1	E2	R1	C2
		A2		R2	
S5	169+100	A1	E3	R1	C2
		A3		R3	
S6	176+800	A1	E1	R1	C1
		A2		R3	
		A3		R4	
				R5	
S7	188+300	A1	E3	R1	C3
		A3			
S8	190+200	A1	E2	R1	C1
		A2		R3	
				R4	
				R5	
S9	191+600	A1		R1	C1
		A2	E2	R2	
				R3	
S10	192+200	A1		R1	C1
		A2	E2	R2	
		A3		R3	
S11	198+600	A1		R1	C1
		A3	E2	R4	
				R5	

Des études approfondies doivent être engagés d'urgence pour les sections de classe C1. Les compagnes de prospections géotechniques in situ doivent prévoir le positionnement des

inclinomètres aux endroits appropriés pour pouvoir suivre l'évolution des glissements constatés et aussi avoir des idées claires sur la profondeur des surfaces de rupture des glissements (Gérard Bigot, 1997; Richer, 2021). Les investigations géophysiques par tomographie électrique doivent être dressées dans la direction du glissement et aussi dans le sens transversal pour avoir la possibilité d'avoir des modèles 3D de la masse glissée et aussi de la lithologie du terrain (Batayneh and Al Diabat, 2002; Bouaziz and Melbouci, 2015; Nacira and Bachir, 2015).

Dans notre recherche bibliographique au sein du ministère de l'équipement et de l'eau, nous avons constaté que les études géotechniques sont bien avancées pour quelques sections. En particulier les sections S3, S4, S6 et S11. Pour cette dernière, des travaux de stabilisation du talus ont déjà démarrés et le marché des travaux est arrêté à 20 MDH (MEE).

Malheureusement ; aucune prospections géophysique n'a été réalisée, ni programmée. Les seuls profils TRE réalisés sont ceux effectués par nos équipes au niveau des sections S3, S6 et S11. Ils nous ont permis de détecter avec efficacité les surfaces de rupture et les zones de grande altération. Mais ils restent très insuffisants pour mener une étude approfondie de quantification et de dimensionnement.

Dans le Rif interne, 80 à 100 jours de pluies sont recensés en moyenne chaque année. Ces pluies peuvent être intenses et continues pendant plusieurs jours. Ce phénomène météorologique est considéré comme la cause principale de la réactivation des glissements de terrain dans notre zone d'étude.

D'un point de vue géologique, le socle des versants est formé de roches métamorphiques à schistosité assez développée. Dans la partie sommitale, la roche s'est presque transformée en sol meuble suite à l'action de l'altération. L'ensemble est recouvert par des matériaux résiduels (colluvions) probablement de nature sablo-argileuse avec des fragments de roches. En plus, le relief est très accidenté et les pentes sont très abruptes. Cette combinaison des effets de l'altération, de la lithologie et de la morphologie est un élément majeur qui contrôle le mode de rupture de ces talus (Maurer, 1989; Zaagane et al., 2020; Lissak, 2013).

Tableau 8 : Etat des sections instables avant l'aménagement de la rocade méditerranéenne

Sections	Section stable avant L'aménagement de la rocade	Section instable avant L'aménagement de la rocade
S1		1
S2	1	
S3	1	
S4		1
S5	1	
S6	1	
S7	1	
S8	1	
S9	1	
S10	1	
S11	1	
Total	9	2

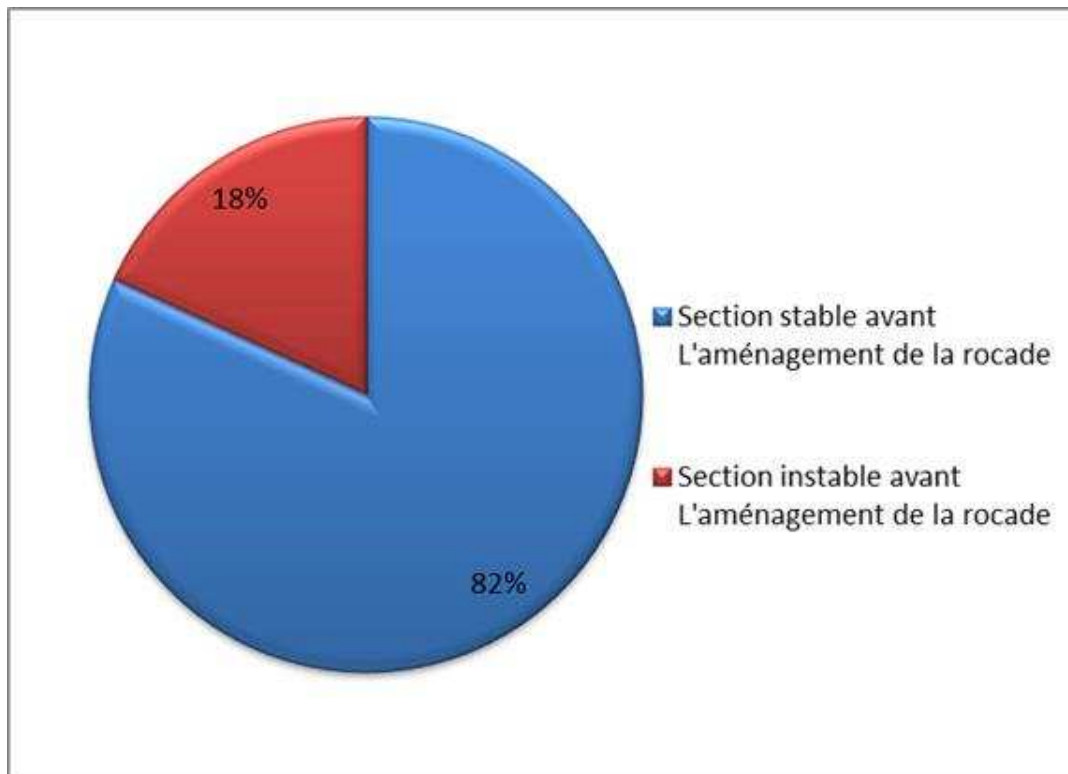


Figure 104 : Etats de stabilité des sections étudiées avant l'aménagement de la rocade méditerranéenne

L'analyse chronologique des sections instables a montré que parmi les onze sections étudiées, seulement deux d'entre elle, étaient actives avant l'intervention des travaux d'aménagement de la rocade méditerranéenne, soit 82 % des instabilités sont causées par l'intervention anthropique (Fig.104).

Aussi, cette étude historique a fait ressortir les informations suivantes (Fig.105) :

- 2 sections ont été instables avant l'aménagement de la route, soit 18 % des sections actives.
- 2 sections sont devenues instables pendant la phase de chantier d'aménagement, soit 18 % des sections.
- 3 sections sont devenues instables juste après la mise en service de la rocade (la première année), soit 27 % des sections.
- 4 sections sont devenues instables après plusieurs années de la mise en service (3 à 5 années), soit 37 % des sections.

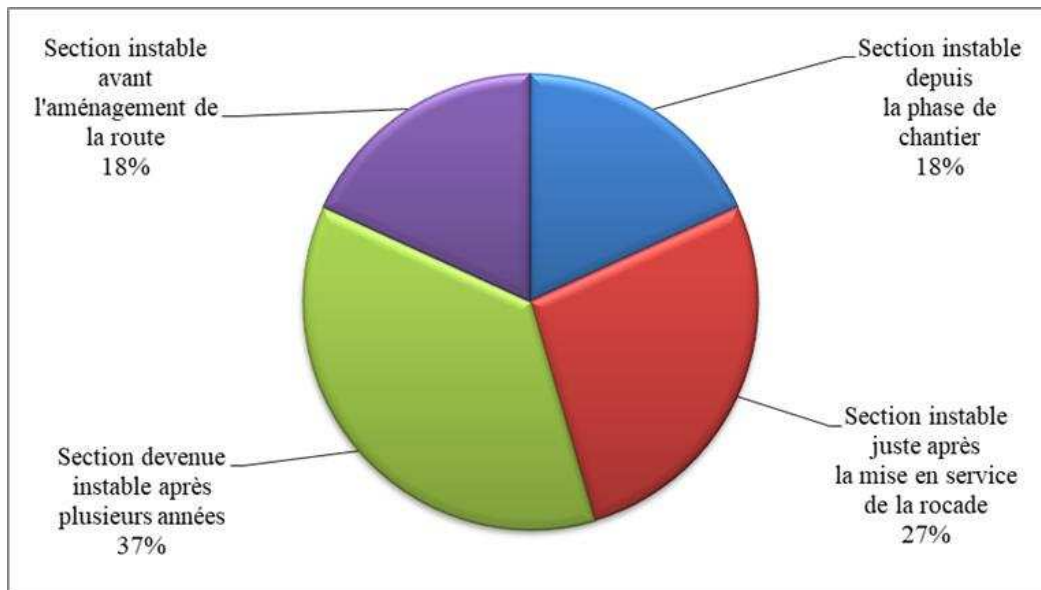


Figure 105 : Début de l'instabilité dans les sections étudiées

Les glissements de terrain sont parmi les risques naturels les plus dangereux au monde. Leurs occurrences menacent directement la sécurité et la stabilité de la population et des infrastructures. La conjoncture des mouvements de terrain dans la rocade méditerranéenne provoque des dommages importants, voir compromettre le développement socio-économique des régions et provinces reliés par cette route.

La rocade méditerranéenne a été aménagée dans l'objectif d'aider la réactivation économique du littoral et la création d'emploi grâce au développement des activités économiques locales. Elle devrait améliorer l'accessibilité des zones marginales telle que le littoral méditerranéen en facilitant l'accès de la population aux divers services et aussi en améliorant les conditions de vie de l'ensemble des habitants de la région. Au-delà du volet économique, la dimension sociale de la route est considérable. En effet, elle permet un accroissement de la scolarisation des enfants et facilite également l'accès de la population locale aux différents services administratif et hospitalier.

Les activités menaçantes des versants dans plusieurs sections de la rocade, risquent de compromettre les objectifs et les rôles escomptés pour cette route stratégique. Il est donc très urgent d'agir pour trouver des solutions efficaces pour parer aux problèmes des instabilités des talus et assurer une circulation fluide, sécuritaire et permanente.

2. Evaluation de l'apport de la Tomographie de la Résistivité Electrique dans l'étude des mouvements de terrain

Les sondages et prospections géotechniques sont ponctuels. L'usage de la tomographie de la résistivité électrique (TRE) nous a permis de faire les corrélations nécessaires et interpréter la présentation du sous-sol et sa lithologie sur une grande longueur (200 à 400 m). Aussi, le repérage des zones à grande altération a été rendu facile. Mais, l'utilité la plus importante des profils de TRE était sans doute le repérage, la limitation et la présentation des surfaces de rupture. En effet, dans notre étude, nous avons utilisé la TRE suivant trois objectifs :

3. Définition de la surface de rupture par TRE

Dans l'étude de la section 11 à l'entrée de Jebha, certes l'usage de la TRE avait permis d'avoir une idée claire sur la présentation lithologique du sous-sol, mais l'objectif essentiel de notre investigation géophysique était la définition du tracé de la surface de rupture et sa profondeur aux différents points du profil. Les résultats obtenus sont très satisfaisants (Fig.106). Elles montrent bien que cette zone de faiblesse se situe à des profondeurs variables suivant le degré d'altération de chaque partie du terrain et aussi la profondeur de cette anomalie.

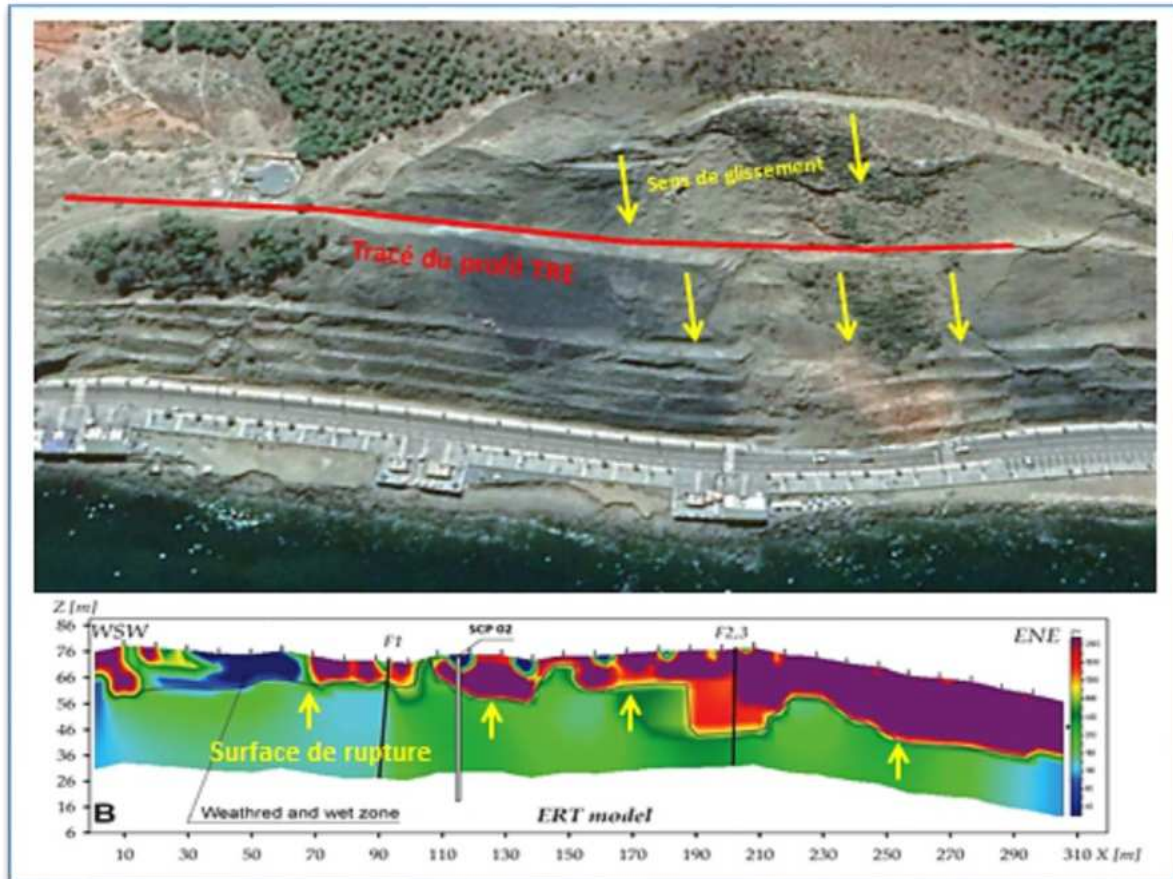


Figure 106 : Tracé du profil et modèle TRE obtenu à la section S11

4. Définition de la limite de la surface de glissement par TRE

Dans la section S6, nous avons constaté le développement d'un glissement de terrain qui prenait de l'ampleur. Notre objectif était de juger si l'emprise de cette zone à risque a tendance à s'élargir ou il est relativement aux limites stables. Nous avons dressé alors notre profil TRE à la limite de ce mouvement de terrain avec une extension vers le pied du versant relativement stable en surface (Fig.107). Le modèle du profil TRE obtenu montre avec efficacité que dans la limite du glissement du terrain, le sol est très hétérogène et la résistivité dans cette zone connaît un grand écart (Fig.107). Ce qui explique que ce glissement de terrain est en train de s'élargir en profondeur et l'emprise de ce mouvement de terrain va certainement prendre de l'ampleur.

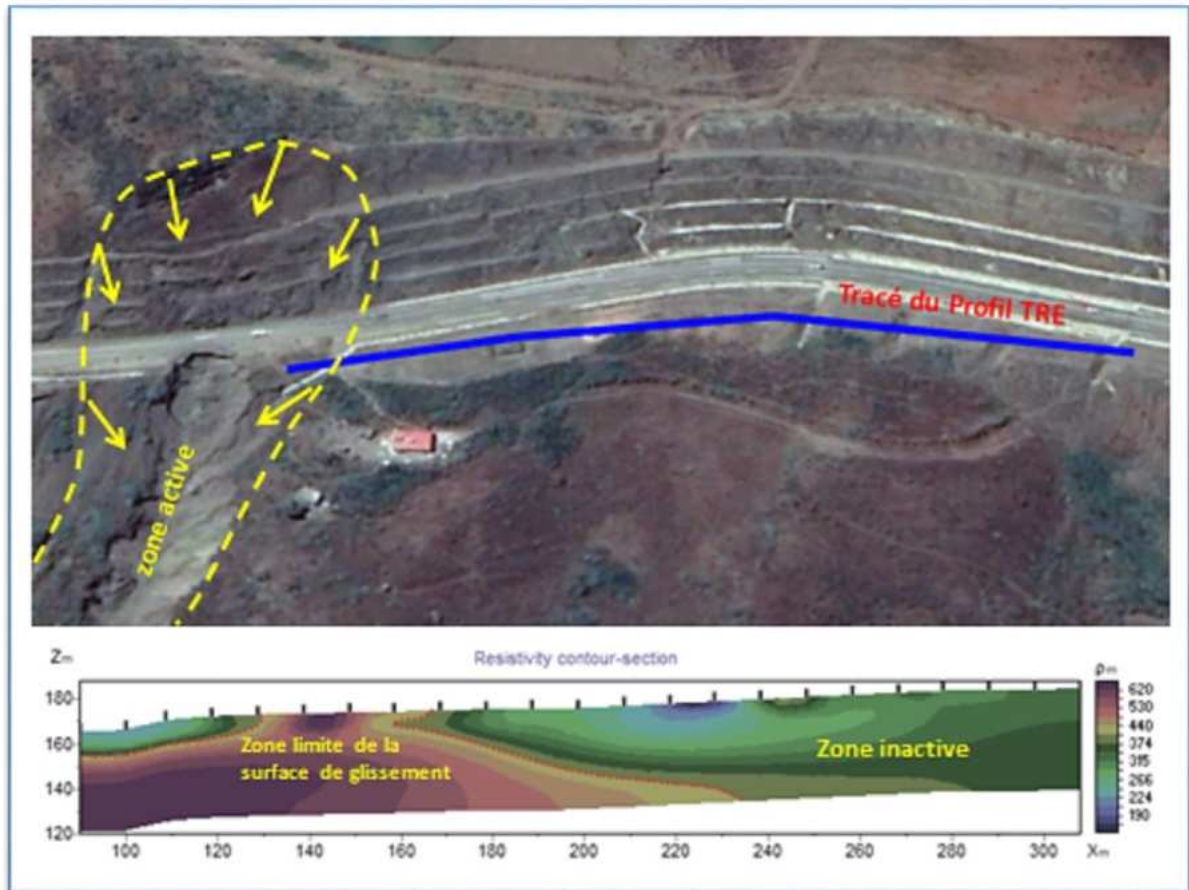


Figure 107 : Tracé du profil et model TRE obtenu à la section S6

5. Vérification de l'activité d'un volume de terres instable par TRE

Dans le cas de la section S3, située au point kilométrique PK 158, nous avons constaté en surface que la plateforme de la chaussée présente des fissures ouvertes, avec la présence d'un grand affaissement au pied du talus. On se demandait alors si les anomalies constatées sont superficielles ou ils ont tendance à se propager en profondeur. Est-ce que l'affaissement du remblai de la plateforme observé est en train de se développer en glissement de terrain, si oui la surface de rupture se trouve à quelle profondeur ?

Le profil TRE a été dressé à quelques mètres du pied du talus, parallèlement à l'affaissement et les fissures de la plateforme constatés. Le modèle obtenu montre clairement une surface de rupture qui se développe sur une profondeur allant de 12 à 35 mètre (Fig.108). L'instabilité du remblai de cette plateforme va certainement donner lieu à un important glissement de terrain qui va emporter toute la chaussée sur une bonne longueur (400 mètre environ).

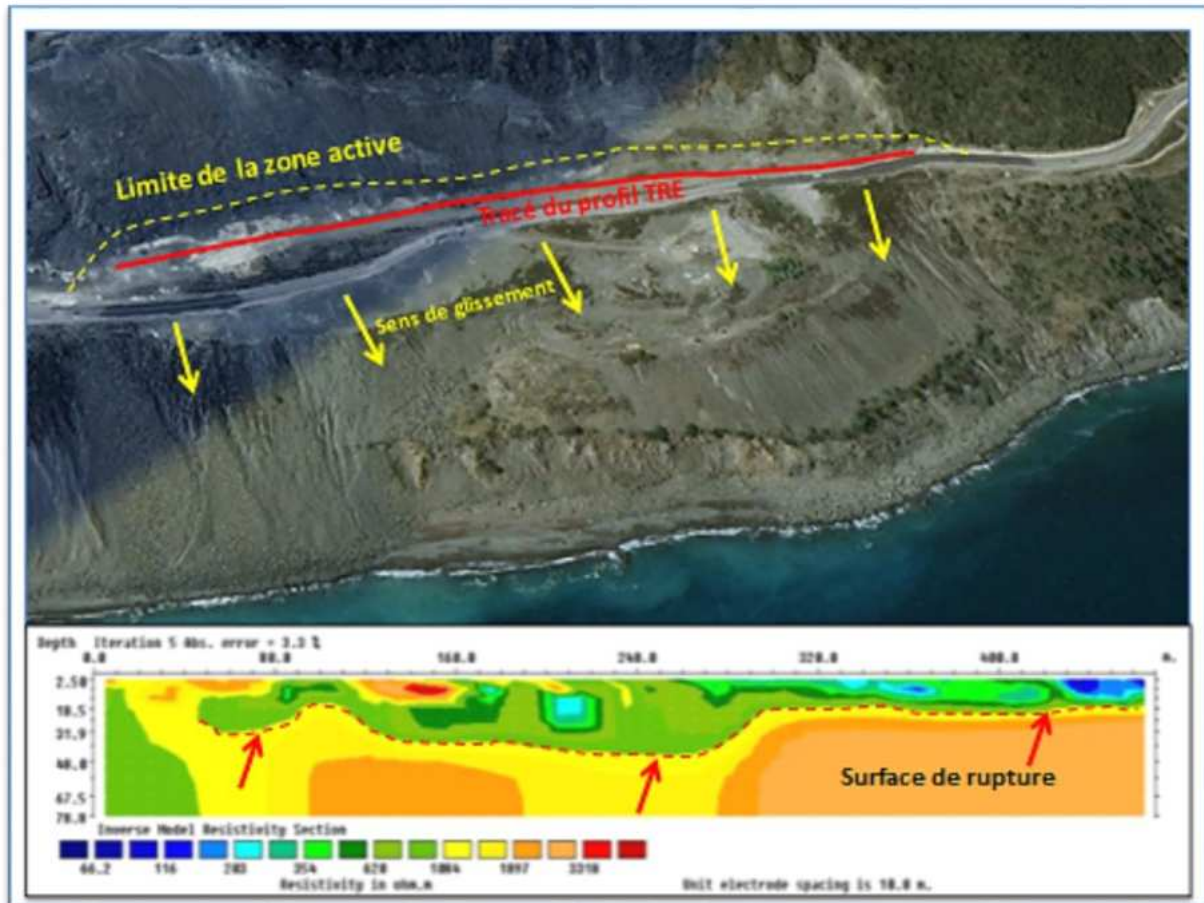


Figure 108 : Tracé du profil et model TRE obtenu à la section S3

6. Performances et limites de la TRE pour étudier les mouvements de terrain

La TRE a prouvé son efficacité pour étudier les mouvements de terrain. Elle nous a permis de compléter et ajuster les résultats de la prospection géotechnique. Les modèles obtenus nous ont donnés beaucoup d'information sur la présentation lithologique du sous-sol, la délimitation des zones à grandes altération et les parties humides. Nous avons aussi pu dans le cas du profil à l'entrée de Jebha suivre en profondeur les failles et diaclases constatées en surface.

Mais, cette technique de prospection connaît bien des limites qui doivent être connues par l'opérateur pour pouvoir les prendre en considération dans ses campagnes et investigations géophysiques. En premier lieu, on peut citer la difficulté de dresser les profils TRE dans les terrains très accidentés et aussi ceux à grande pente. Aussi, le Modèle TRE peut donner des fausses informations si le sol est saturé. Il est donc déconseillé de dresser des profils après une période de pluie.

En outre, le matériel d'acquisition des données géo-électriques utilisé dans notre étude, à savoir le résistivimètre « X612EM+ » de chez MAE, reste très lourd en particulier la batterie et les bobines et il est très difficile à une équipe réduite (de deux ou trois personne) de réaliser des profils à grandes distance. Sans oublier que le lancement du signal dans le câble coaxial demande une batterie bien chargée, chose qu'il faut vérifier avant d'entamer la campagne de prospection qui se déroule souvent loin des villes et en absence des points de recharge. Il faut

noter cependant que l'usage des nouveaux instruments portatifs comme le «ADMT – Detector » permet efficacement de parer à ces problèmes de manutention et d'exécution.

Conclusion générale

La rocade méditerranéenne est un projet stratégique national. Elle a été réalisée suite aux directives des plus hautes instances de l'état Marocain. Cette route était indispensable pour désenclaver les villes et localités du Nord du Maroc, afin de promouvoir leur économie et permettre aux populations de se déplacer aisément et avec plus de sécurité.

Les objectifs fixés par les autorités compétentes, étaient de réaliser la totalité de la route nationale de Tanger à Saidia, et avec le moindre coût. Il fallait donc minimiser les infrastructures à grand budget comme les ponts et les murs de soutènements. Aussi, les ouvrages hydrauliques étaient dimensionnés pour des crues à courte période de retour, afin de limiter leurs sections et leur coût. La solution de stabilisation des talus était dans la majorité des cas limitée à la réalisation des risbermes, souvent non protégées par des bétons et parfois même sans drainage.

Les travaux d'aménagement de la voie ont engendrés des terrassements en déblai ou en remblai avec des volumes colossaux. Des talus qui étaient stables, sont devenus très actifs et menaçant suite à cette intervention anthropique. Les opérateurs étatiques économiques et techniques savaient bien que vues les économies faites dans la conception de cette route ; après sa mise en service ; il va falloir s'attendre à des problèmes de stabilité de la plateforme et surtout des talus. Mais, nul ne pouvait estimer les frais d'entretien de la rocade ni prévoir les enjeux à encourir.

Les premiers problèmes d'instabilité ont apparus dès les premiers jours de la mise en service de la rocade méditerranéenne. Il y a même des sections qui ont manifestées leurs activités en phase de chantier. Actuellement, l'entretien de cette route coûte très cher au budget de l'état et des sommes importantes sont engagées chaque année pour parer aux problèmes d'instabilité qui se manifestent dans plusieurs sections. La totalité des interventions sont effectuées après constat du problème et aucune action préventive n'est programmée.

Cette façon de gérer les risques d'instabilité des tronçons de la route N16, a fait entrer les services d'entretien dans un labyrinthe sans issue. Plusieurs sections ont connu des interventions répétitives, après chaque période de pluie; d'autres sont actuellement dans un état de dégradation très avancée. Les sections S6 et S11 étudiées en détail par nos soins sont deux exemples vivants de cet état des lieux. Pour sortir de ce cycle vicieux, il est temps de prendre un peu de recul et d'essayer de trouver des solutions radicales. Pour se faire, il faut dresser un inventaire exhaustif de toutes les sections instables ou qui présentent des signes d'instabilité. Chaque section doit faire l'objet d'une étude détaillée, suivant la méthodologie que nous avons proposée dans la présente thèse, à savoir :

- Dresser un diagnostic détaillé sur l'état des lieux, les types d'instabilité et aussi la nature des dégradations constatées. Le chapitre III de notre présente thèse est un exemple de ce type d'étude générale
- Faire un relevé topographique à grande échelle dans les talus instables, pour avoir une idée claire sur la morphologie de la zone étudiée.
- Chaque section doit faire l'objet d'une étude géotechnique détaillée. Il faut prévoir en particulier des forages pour sondages carottés, réutilisables pour des essais de Menard et aussi des inclinomètres.

- Des profils géophysiques par tomographie électrique doivent être effectués dans plusieurs directions, pour compléter les résultats des essais géotechniques et aussi pour avoir une présentation claire des sous-sols, en particulier les zones à risque.

A l'issue de chaque campagne de prospection, les ingénieurs et experts seront en mesure de cerner l'activité des talus étudiés, définir les surfaces de rupture, dresser des modèles 3D pour calculer les volumes instables et d'autres informations très utiles. Les résultats de ces études vont permettre aux concepteurs de proposer des solutions adéquates pour remédier définitivement aux problèmes d'instabilité tout en estimant leurs budgets.

Dans les chapitre IV et V de notre thèse, nous avons essayé de pousser au détail, suivant la méthodologie proposée, l'étude des sections instables S6 sise au PK 176+800 et S11 situé au PK 198+600 de la route N16. Les résultats obtenues sont satisfaisants et montrent l'efficacité de l'usage des essais géotechniques complété par des profils de tomographie électriques. Il serait intéressant d'appliquer cette méthodologie dans d'autres sections, mais en réalisant plusieurs profils TRE dans le sens transversal du talus mais aussi dans le sens parallèle au pendage du versant. L'idéal est de dresser des modèles lithologiques tridimensionnelles, tout en mettant en évidence les failles et diaclases, les zones d'altération et les éventuelles cavités.

En résumé, les onze sections étudiées dans le tronçon de route entre Oued Laou et Jebha sont dans un état d'instabilité variable. Les sections S2, S3, S6, S8, S9, S10 et S11 sont un état très critique et le risque reste très important. Les sections S1, S4 et S5 sont dans un état critique avec un risque modéré. La section S7 présentent des signe d'instabilité mais sans risque important pour le moment. Elle mérite cependant, des actions de préventions pour limiter les dégradations.

Les causes de ces instabilités sont anthropiques dans le cas de 9 sections étudiées. Les deux autres sections ont été actives bien avant l'aménagement de la rocade nationale N16. Les facteurs aggravant sont la pente du talus et la nature ductile de la roche qui est dans un état très altérée et décompressée. Les facteurs déclenchant sont en premier lieu les précipitations auxquelles s'ajoutent l'érosion hydrique et les séismes.

La rocade méditerranéenne est une route névralgique, qui assure la liaison entre plusieurs villes et localité du nord du Maroc. Nous attirons l'attention qu'en cas de catastrophes naturelles liés aux fortes précipitations ou aux séismes, les talus instables dans leur état actuel, vont certainement s'activer en causant des glissements de terrain. Les éboulis et blocs de roches vont envahir la chaussée en causant le blocage de la route et rendront impossible l'évacuation des sinistrés et l'acheminement des aides humanitaires aux populations.



Figure 109 : Route N16 bloquée par un important éboulement rocheux au PK 158+000 (S3)
L'évènement s'est produit le 17 mai 2017 à 22H30 (Source MEE)

Bibliographie

- Abdel-Ilah, M., El Kharim, Y., Essaidi, A., Fatima, B., Bazi, A., Bounab, A., 2022. ERT survey and geotechnical characterization of underground cavities: a case study of Amouni coastal cliff, Safi, Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*. 15. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10964-z>
- Abdelkhaleq, A., Pitra, P., Gueydan, F., Essaifi, A., 2009. Etude métamorphique des micaschistes et gneiss de l'unité de Filali du Massif de Beni Bousera (Rif interne, Maroc). 6e Colloq. Int. 3MA Magmat. Métamorphisme Minéralisations Assoc.
- Abou Bekr, N., 1995. Modélisation du comportement mécanique et hydraulique des sols partiellement saturés (PhD Thesis). Ecole Centrale Paris.
- Afriani, L., 2003. Essais de cisaillement direct des sols grossiers : incidence des procédures d'essai et effets d'échelle (These de doctorat). Caen.
- Ait Brahim, L., Bousta, M., Jemmah, I.A., El Hamdouni, I., El Mahsani, A., Abdelouafi, A., Sossey alaoui, F., Lallout, I., 2018. Landslide susceptibility mapping using AHP method and GIS in the peninsula of Tangier (Rif-northern morocco). *MATEC Web Conf*. 149, 02084. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902084>
- AIT Brahim, L., Chotin, P., 2013. Mise en evidence d'un changement de direction de compression dans l'avant-pays rifain (Maroc) au cours du Tertiaire et du Quaternaire. *Bull. Soc. Geol. Fr.* S7-XXVI, 681–691. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XXVI.4.681>
- AIT Brahim, L., Chotin, P., Hinaje, S, Abdelouafi, A., Adraoui, A., Nakcha, C., Mohammed, C., Alaoui, F., Mostafa, A., Bouaza, A., Hassan, T., Chaouni, A.-A., 2002. Paleostress evolution in the Moroccan African margin from Triassic to Present. *Tectonophysics* 357. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00368-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00368-2)
- Akhssas, A., Bahi, L., Lahmili, A., & Ouadif, L. 2011. Study of the stability of rock slope. *Canadian Journal on Scientific and Industrial Research*, 2(2), 35-39.
- Alcántara-Ayala, I., 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47, 107–124.
- Aleotti, P. 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering geology*, 73(3-4), 247-265.
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 58, 21-44.
- Bounib, A., 2019. Chapitre du livre Résistance au cisaillement des sols, Page 145-171. ISBN 978- 9947- 10- 17
- Alilouch, R., Morabiti, K.E., Mrihi, A.E., 2017. Contribution A La Connaissance Hydrogéologique Et Hydrogéochimique Des Aquifères De La Région De Beni-Hassan (Rif Septentrional, Maroc). *Eur. Sci. J. ESJ* 13, 441. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n30p441>
- Allain, M. (2021). Analyse des contraintes in situ dans les structures en béton armé. Doctoral dissertation, Université Savoie Mont Blanc.
- Anagnostopoulos, A., Pachakis, M., Tsatsanifos, C., 2013. *Comptes Rendus Du 15ème Congrès Européen de Mécanique Des Sols & de Géotechnique : la Géotechnique Des Sols Indurés, Roches Tendres*. IOS Press.

- Andrianatrehina, N.L., Souli, H., Fry, J.-J., Fleureau, J.-M., Rech, J., 2015. Effet des fines sur les paramètres mécaniques consolidés non drainés de matériaux granulaires, in: CFM 2015-22ème Congrès Français de Mécanique. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
- Andrieux, J., Fontbote, J.-M., Mattauer, M., 1971. Sur un modèle explicatif de l'arc de Gibraltar. *Earth Planet. Sci. Lett.* 12, 191–198. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(71\)90077-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(71)90077-X)
- Antoine, J.-M., 2009. L'histoire du climat par ses extrêmes. Sources géohistoriques et inondations dans les Pyrénées depuis le Petit Age Glaciaire. *Archéologie Midi Médiév.* 27, 143–155.
- Antoine, P., Biarez, J., Desvarreux, P., Mouglin, J.P., 1971. Les problèmes posés par la stabilité des pentes dans les régions montagneuses. *Géologie Alpine.* 47, 5–24.
- Antoine, P., Fabre, D., Giraud, A., AL Ayari, M., 1988. Propriétés géotechniques de quelques ensembles géologiques propices aux glissements de terrains, in: *International Symposium on Landslides.* 5. pp. 1301–1306.
- Aouka, M.T., Khelifi Khalfa, N., & Kherrouba, H. 2012. Etude géologique, géophysique, géotechnique et modélisation numérique du site du P.O.S. N°01 de la région de Texenna wilaya de Jijel. Thèse de Doctorat, Université de Jijel.
- Arab, O., Azguet, R., Ouchen, I., El Fellah, Y., Harnafi, M., Sebbani, J., Villaseñor, A., 2020. Attenuation of seismic coda waves in the Rif area, northern Morocco. *J. Afr. Earth Sci.* 165, 103815. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103815>
- Romagny, A. 2014. Évolution des mouvements verticaux néogènes de la chaîne du Rif (nord-maroc): apports d'une analyse structurale et thermo-chronologique. Thèse Doctorat, Université Nice Sophia Antipolis.
- Arraji, M., 1995. Le climat du versant méditerranéen du Rif central (Maroc): une géographie de la pluie, mécanismes pluvio-gènes et temps pluvieux. Thèse de Doctorat, Toulouse 2.
- Asebriy, L., Bourgois, J., Cherkaoui, T.E., Azdimousa, A., 1993. Evolution tectonique récente de la zone de faille du Nékor : importance paléogéographique et structurale dans le Rif externe, Maroc. *J. Afr. Earth Sci. Middle East* 17, 65–74.
- Astier, J.-L., 1971. *Géophysique appliquée à l'hydrogéologie*, livre. Edition Masson.
- Atkinson, J.H., Lau, W.H.W., Powell, J.J.M., 1991. Measurement of soil strength in simple shear tests. *Can. Geotech. J.* 28, 255–262. <https://doi.org/10.1139/t91-031>
- Atlan, Y. 1978. Catalogue des essais géotechniques exécutés au laboratoire géotechnique d'Orléans. Département géologie du Bureau de recherche Biologique et Minière. Service géologique Nationale du Ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat-78 SGN, 178.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jolette, D., Bussière, B., Chapuis, R.P., James, M., Riffon, O., 2002. Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers : problèmes persistants et méthodes de contrôle, in : *Défis & Perspectives : Symposium.*
- Autran, A., Fonteilles, M., Goguel, J., & Guitard, G. 1975. Sur le mécanisme de la schistosité. *Annales de la Société géologique de Belgique.*
- Azimi, C., & Desvarreux, P. 1996. Quelques aspects de la prévision des mouvements de terrain. *Revue française de géotechnique*, (76), 63-75.

- Azimi, C., Desvarreux, P., Giraud, A., Martin-Cocher, J., 1982. Méthode de calcul de la dynamique des chutes de blocs-Application à l'étude du versant de la montagne de La Pale (Vercors). Bull Liaison Lab Ponts Chauss.
- Azzouz, O., El Fellah, B., & Chalouan, A. 2002. Processus de glissement dans le Massif de Bokoya (Rif interne, Maroc): exemple de Cala Bonita. Bulletin de l'Institut scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, 24, 33-40.
- Baeza, C., & Corominas, J. 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 26(12), 1251-1263.
- El Bakili, A. 2021. Evolution tectono-metamorphique et chronologique des unités métamorphiques du Rif interne (Beni Bousera, Nord du Maroc). Thèse de Doctorat, Université Côte d'Azur; Université Mohammed V. Faculté des science de Rabat.
- Barathon, J.-J., 1987. Bassins et littoraux du Rif oriental (Maroc): évolution morphoclimatique et tectonique depuis le néogène supérieur. Thèse de Doctorat. Poitiers.
- Bardhi, D. 2020. Slopes Analyses-Case Study, Slope Stability of Bypass Project. European Journal of Engineering and Formal Sciences, 3(1), 25-37.
- Batayneh, A. T., & Al-Diabat, A. A. 2002. Application of a two-dimensional electrical tomography technique for investigating landslides along the Amman–Dead Sea highway, Jordan. Environmental Geology, 42(4), 399-403.
- Baud, J.P., Gambin, M., 2013. Détermination du coefficient rhéologique α de Ménard dans le diagramme Pressiorama®, in: Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.
- Baziz, W., Zeghmar, N., Boukaoud, H. (Encadreur), Kherouba, (Encadreur), 2009. Etude géologique et géotechnique du glissement de terrain au niveau du PK 207 à Djebel el-Ouahch wilaya de Constantine (Thesis). Université de Jijel.
- Bégin, C., Filion, L., 1987. Morphologie et interprétation des glissements de terrain de la région de Poste-de-la-Baleine, Québec subarctique. Géographie Phys. Quat. 41, 19–32. <https://doi.org/10.7202/032662ar>
- Belliere, J., 1956. Caractere de la déformation Alpine dans les schistes cristallins du massif du Mont-Blanc. Bull. Soc. Geol. Fr. 6, 691–698.
- Benmakhlof, M., Galindo-Zaldívar, J., Chalouan, A., Sanz de Galdeano, C., Ahmamou, M., López-Garrido, A.C., 2012. Inversion of transfer faults: The Jebha–Chrafate fault (Rif, Morocco). J. Afr. Earth Sci. 73–74, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.07.003>
- Benyaich, A., 1991. Evolution tectono-sédimentaire du Rif externe centro-occidental (régions de M'sila et Ouezzane, Maroc) : La marge africaine du Jurassique au Crétacé : Les bassins néogènes d'avant-fosse (These de doctorat). Pau.
- Bernard, A., Peyras, L., Royet, P., 2016. L'essai de cisaillement à la grande boîte de Casagrande: un banc expérimental pour évaluer les propriétés des sols grossiers et pour d'autres applications en géomécanique. Rev. Fr. Géotechnique 4.
- Bescond, B., Havard, H., & Mieussens, C. 2003. Conception et exécution des grands remblais : Synthèse du seminaire de Nantes. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, (243).

- Besson, L., Barnier, M., 1996. Les risques naturels en montagne : traitement, prévention, surveillance. Artès-publiaalp.
- Bigot, G. 1997. Les essais et sondages de pénétration. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, (207).
- Bigot, Gérard, 1997. Les mesures à l'inclinomètre. Bull.-Lab. Ponts Chaussées 127–131.
- Biguenet, G., Sirieys, P., 1990. Caractéristiques géométriques et cinématiques de glissements de terrain de faible volume. Géologie Alpine. Mém HS 15 3-14 Grenoble.
- Billard, A., Muxart, T., Derbyshire, E., Egels, Y., Kasser, M., Wang, J., 1992. Glissements de terrain induits par les pluies dans les loess de la Province de Gansou, Chine, in : *Annales de Géographie*. JSTOR, pp. 520–540.
- Bobrowsky, P. T. 2013. *Encyclopedia of natural hazards*. Dordrecht, Springer, (Vol. 1135).
- Bordes, J.-L., 2000. Regard sur le passé de la géotechnique. *Rev. Fr. Géotechnique* 13–26.
- Bordoni, M., Meisina, C., Valentino, R., Lu, N., Bittelli, M., Chersich, S., 2015. Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: from the field monitoring to a simplified slope stability analysis. *Eng. Geol.* 193, 19–37.
- Bouafia, A., 2022. *Introduction to Penetration Testing in Geotechnical Engineering*, Book.
- Bouassida, M., 1996. Etude expérimentale du renforcement de la vase de Tunis par colonnes de sable-Application pour la validation de la résistance en compression théorique d'une cellule composite confinée. *Rev. Fr. Géotechnique* 3–12.
- Bouaziz, N., Melbouci, B., 2015. Apport de la tomographie électrique à l'étude des glissements de terrains en Grande Kabylie, Algérie, in : *Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Bayonne, France.
- Bouhrrar, H., Aidoud, Y., Ferkous, H., 2015. Les problèmes des glissements de terrain et leur impact sur les infrastructures routières dans la région de Guelma.
- Boukhres, N., Mastere, M., Thiery, Y., Maquaire, O., El Fellah, B., Costa, S., 2022. A comparative modeling of landslides susceptibility at a meso-scale using frequency ratio and analytic hierarchy process models in geographic information system: the case of African Alpine Mountains (Rif, Morocco). *Model. Earth Syst. Environ.* <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01605-1>
- Bouramtane, T., Kacimi, I., Bouramtane, K., Aziz, M., Abraham, S., Omari, K., Valles, V., Bahaj, T., Moad, M., Yameogo, S., Barbiero, L., 2021. Multivariate Analysis and Machine Learning Approach for Mapping the Variability and Vulnerability of Urban Flooding: The Case of Tangier City, Morocco. *Hydrology* 8. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040182>
- Bouزيد, R., 1985. Contribution à l'étude des glissements de terrain. Thèse de Doctorat, Alger, Ecole Nationale Polytechnique.
- Bovis, M.J., Evans, S.G., 1995. Rock slope movements along the Mount Currie "fault scarp," southern Coast Mountains, British Columbia. *Can. J. Earth Sci.* 32, 2015–2020. <https://doi.org/10.1139/e95-154>
- Brahim, M., Mohammed Hemza, A., Gadouri, H., 2021. Étude des glissements de terrain à l'aide des données géologiques et géotechniques : une étude de cas sur le glissement de terrain de Boufharma (Tizi-Ouzou, Algérie).

- Camacho Ortegon, L.F., 2009. Origine-évolution-migration et stockage des hydrocarbures dans le bassin de Sabinas, NE Mexique : Etude intégrée de pétrographie, géochimie, géophysique et modélisation numérique 1D-2D et 3D. Thèse de Doctorat, Nancy 1.
- Cambou, B., Bahar, R., 1993. Utilisation de l'essai pressiométrique pour l'identification de paramètres intrinsèques du comportement d'un sol. *Rev. Fr. Géotechnique* 39–50.
- Campus, F., 1945. Classification et dénomination des sols. 95ème séance de l'ABEM ABEM.
- Carrara, A., Merenda, L., 1974. Metodologia per un censimento degli eventi franosi in Calabria.
- CFMR, 2015. Avancées récentes sur les approches multi-échelles en mécanique des roches. Séance Tech. CNAM.
- Chalouan, A., & Michard, A. 1990. The Ghomarides nappes, Rif coastal range, Morocco: a variscan chip in the Alpine belt. *Tectonics*, 9(6), 1565-1583.
- Chalouan, A., Michard, A., Feinberg, H., Montigny, R., Saddiqi, O., 2001. The Rif mountain building (Morocco); a new tectonic scenario. *Bull. Société Géologique Fr.* 172, 603–616.
- Chalouan, A., Ouazani-Touhami, A., Mouhir, L., Saji, R., Benmakhlouf, M., 1995. Les failles normales à faible pendage du Rif interne (Maroc) et leur effet sur l'amincissement crustal du domaine d'Alboran. *Geogaceta* 17, 107–109.
- Cherkaoui, T. E., & El Hassani, A. 2012. Seismicity and Seismic hazard in Morocco. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 34, 45-55.
- Cherkaoui, T.-E., Hatzfeld, D., Jebli, H., Medina, F., Caillot, V., 1990. Etude microsismique de la région d'Al Hoceima. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 12, 25–34.
- Colas, G., & Pilot, G. 1976. Description et classification des glissements de terrain. *Bull. Liaison Lab. Ponts Chauss.*; FR.; 1976, P. 21 A 30
- Comas, M.C., Platt, J.P., Soto, J.I., Watts, A.B., 1999. 44. The origin and tectonic history of the Alboran Basin: insights from Leg 161 results, in: *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*. pp. 555–580.
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., & et al. 2013. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull. Eng. Geol. Environ.* <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Corte, J., Marchal, J., Garnier, P., 1987. Comportement d'ouvrages de soutènement sur versants montagneux instables, in : *Interactions sols-structures-actes du colloque organisé par l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 5-7 mai 1987*.
- Cote, M., 2011. Dynamique d'un glissement de terrain et la reconstruction de sa chronologie près de la ville de Fort McPherson, Territoires-du-Nord-Ouest. University of Ottawa, Canada.
- Crooks, J. H. A., & Graham, J. 1976. Geotechnical properties of the Belfast estuarine deposits. *Geotechnique*, 26(2), 293-315.
- Cruden, D.M., Couture, R., 2011. The working classification of landslides: material matters, in: *Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Toronto, Ontario, Canada*. p. 7.
- Cutter, S.L., Ismail-Zadeh, A., Alcántara-Ayala, I., & et al. 2015. Global risks : Pool knowledge to stem losses from disasters. *Nature* 522, 277–279.

- Dabas, M. (2018). L'archéo-géophysique ou la détection et la cartographie des sites archéologiques. *Annales des Rencontres archéologiques de Saint-Céré*, (25), 117-124.
- Dauphiné, A., Provitolo, D., 2007. La résilience : un concept pour la gestion des risques, in : *Annales de Géographie*. Armand Colin, pp. 115–125.
- Dauphiné, A., Provitolo, D., 2001. Risques et catastrophes en Méditerranée.
- De Capoa, P., Di Staso, A., Perrone, V., Zaghloul, M.N., 2007. The age of the foredeep sedimentation in the Betic–Rifian Mauretanian Units: A major constraint for the reconstruction of the tectonic evolution of the Gibraltar Arc. *Comptes Rendus Geosci.* 339, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.01.003>.
- De Vanssay, B., 1988. L'évaluation des risques naturels. Association pour les espaces naturels, Paris, France. *Aménagement. Nat.* N°90 10–11.
- Deliac, E., Valla, P., 1980. La géophysique d'exploration minière. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- De Mets, C., 1995. Plate motions and crustal deformation. *Rev. Geophys.* 33, 365–369. <https://doi.org/10.1029/95RG00120>
- Descloîtres, M., Ritz, M., 1994. Prospection géophysique par la méthode TDEM des aquifères de la Caldeira du volcan Fogo (archipel des îles du Cap-Vert) : rapport de mission 27.
- Launay, C. D. J., & Molinaro, H. H. 2017. Les glissements de terrain, modélisation et prévision. Ecole Normale Supérieure, France, Saclay.
- Deveaux, D., Vuez, A., Amoros, D., Mieussens, C., Ducasse, P., 1981. Essais triaxiaux a chargement controle. *Bulletin de liaison laboratoires des ponts et chaussées*.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. 1991. Introduction à la géotechnique. Presses inter Polytechnique.
- Dikau, R., Cavallin, A., Jäger, S., 1996. Databases and GIS for landslide research in Europe. *Geomorphology* 15, 227–239.
- Dos Santos, A.L., 2022. Louis Menard et l'essai pressiométrique. Cfms, simsg-issmge 5.
- Duca, V., 2001. Etude expérimentale des composantes normales des contraintes totales en laboratoire et in situ. Thèse de Doctorat, Ecole des Ponts Paris, Tech.
- Duffaut, P., 2004. Manuel de mécanique des roches. Presses des MINES.
- Dumas, B., Guérémy, P., Lhénaff, R., Raffy, J., 1984. Glissements de terrain et évolution des versants. *Méditerranée* 52, 27–41. <https://doi.org/10.3406/medit.1984.2253>
- Durand Delga, M., Kornprobst, J., 1963. Esquisse géologique de la région de Ceuta (Maroc). *Bull. Société Géologique Fr.* S7-V, 1049–1057. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-V.7.1049>
- Durand-Delga, M., Gardin, S., Olivier, P., 1999. Datation des flyschs éocènes maurétaniens des Maghrébides: la formation du Jbel Tisirène (Rif, Maroc). *Comptes Rendus Académie Sci. - Ser. IIA - Earth Planet. Sci.* 328, 701–709. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(99\)80180-3](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(99)80180-3)
- Durand-Delga, M., Hottinger, L., Marçais, J., Mattauer, M., Milliard, Y., Suter, G., 1960. Données actuelles sur la structure du Rif. *Livre mém. P. Fallot. Mém H-Sér Soc Géol Fr.* 1, 339–422.

- Durand-Delga, M., Rossi, P., Olivier, P., Puglisi, D., 2000. Situation structurale et nature ophiolitique de roches basiques jurassiques associées aux flyschs maghrébins du Rif (Maroc) et de Sicile (Italie). *Comptes Rendus Académie Sci.-Ser. IIA-Earth Planet. Sci.* 331, 29–38.
- Durville, J.-L., Guillemin, P., Berthet-Rambaud, P., Subrin, D., 2010. Etat de l'art sur le dimensionnement des dispositifs de protection contre les chutes de blocs. *Collect. Etudes Rech. LCPC—série Géotechnique Risques Nat.* Paris 84 Pp.
- Duveau, G., Henry, J.P., 1995. Approche incrémentale du comportement d'un schiste. Craies schistes. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR). PP, 58-67.
- Eichenberger, J., Ferrari, A., Laloui, L., 2013. 22. Analyses géo-mécaniques des glissements de terrain superficiels. *Mém. Soc. vaud. Sc. nat.* 25: 279-293.
- El Alami, R., 1993. *Phytoclimatologie de la montagne Marocaine: le Rif Central* (PhD Thesis). Paris 7.
- El Atrassi, F., Brunet, F., Bouybaouene, M., Chopin, C., Chazot, G., 2011. Melting textures and microdiamonds preserved in graphite pseudomorphs from the Beni Bousera peridotite massif, Morocco. *Eur. J. Mineral.* 23, 157–168.
- El Bakili, A., Corsini, M., Chalouan, A., Münch, P., Romagny, A., Lardeaux, J.M., Azdimousa, A., 2020. Neogene polyphase deformation related to the Alboran Basin evolution: new insights for the Beni Bousera massif (Internal Rif, Morocco). *BSGF - Earth Sci. Bull.* 191, 10. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2020008>
- El Fellah, B, Azzouz, O., Asebriy, L., 1996. Sikha Asfalou : exemple de glissement sur la côte méditerranéenne des Bokoya entre Torrès et Badis,(Rif septentrional, Maroc). *Bull.-Réseau Eros.* 16, 222–231.
- El Fellah, B., Azzouz, O., Asebriy, L., 1996. Exemple de glissement de terrain littoral sur la cote méditerranéenne des Bokoya entre Torrès et Badis, Rif, Maroc. *ORSTOM Réseau Érosion* 16.
- El Fellah, B., Mastere, M., 2015. Les côtiers méditerranéens du Rif central : Facteurs induisant l'instabilité des versants The central Rif Méditerranéen Coast : Slope failures causative factors. *Bull. Inst. Sci. Rabat* 35–43.
- El Gharbaoui, A. 1981. *La terre et l'homme dans la péninsule tingitane: étude sur l'homme et le milieu naturel dans le Rif Occidental* (Vol. 15). Rabat, Morocco: Institut scientifique.
- EL Hilali, M., Timoulali, Y., Benyounes, T., Ahniche, M., Bardai, R., Yattara, S., 2021. Earthquake-induced liquefaction in the coastal zone, Case of Martil city, Morocco. *E3S Web Conf.* 298, 01002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129801002>
- El Hilali, M., Timoulali, Y., Sassioui, S., Taj, B., 2023. Seismic vulnerability assessment of existing buildings in the Tetouan city, northern Morocco. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 2023, n° 45, 01–13.
- EL Hilali, M., Bounab, A., Timoulali, Y., El Messari, J. E. S., & Ahniche, M. 2023. Seismic site-effects assessment in a fluvial sedimentary environment: case of Oued Martil floodplain, Northern Morocco. *Natural Hazards*, 1-23.

- El Maz, A., 1989. Le Métamorphisme régional meso-catazonal de la serie metapelitique de Jbel-Sid-Mohamed-El Filali, et l'unité granulitique de Beni Bousera (rif interne), Maroc : étude pétrologique. Thèse de doctorat, Paris 6.
- Elfakih, T.A., Bahi, L., Akhssas, A., Ouadif, L., Benkmil, R., 2020. Electrical resistivity tomography contribution to the characterization of underground cavities in the region of Safi, Morocco, in: E3S Web of Conferences. EDP Sciences, p. 03023.
- Elmoulat, M., Ait Brahim, L., 2018. Landslides susceptibility mapping using GIS and weights of evidence model in Tetouan-Ras-Mazari area (Northern Morocco). *Geomat. Nat. Hazards Risk* 9, 1306–1325. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1505666>
- Elmoulat, M., AIT Brahim, L., Elmahsani, A., Abdelouafi, A., Mastere, M., 2021. Mass movements susceptibility mapping by using heuristic approach. Case study: province of Tétouan (North of Morocco). *Geoenvironmental Disasters* 8. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00192-0>
- Es-smairi, A., El Moutchou, B., Touhami, A.E.O., 2021. Landslide susceptibility assessment using analytic hierarchy process and weight of evidence methods in parts of the Rif chain (northernmost Morocco). *Arab. J. Geosci.* 14, 1346. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07660-9>
- Fabre, R., Lebourg, T., Clément, B., 2002. Typologie et modèles de glissements de terrain : exemples de sites des Pyrénées occidentales et centrales. *Rev. Fr. Géotechnique* 35–48. <https://doi.org/10.1051/geotech/2002099035>
- Fadil, A., Vernant, P., McClusky, S., Reilinger, R., Gomez, F., Ben Sari, D., & Barazangi, M. 2006. Active tectonics of the western Mediterranean: Geodetic evidence for rollback of a delaminated subcontinental lithospheric slab beneath the Rif Mountains, Morocco. *Geology*, 34(7), 529-532.
- Faleh, A., Sadiki, A., 2002. Glissement rotationnel de Dhar El Harrag: exemple d'instabilité de terrain dans le Prérif central (Maroc). *Bull. L'Institut Sci. Rabat* 41–48.
- Fallot, P., 1937. Essai sur la géologie du Rif septentrional. Protectorat de la République Française au Maroc direction générale de travaux publics service des Mines et de la carte géologique, France.
- Farah, A., Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., Chopin, C., Montero, P., Corsini, M., Bea, F., 2021. The Beni Bousera marbles, record of a Triassic-Early Jurassic hyperextended margin in the Alpujarrides-Sebtides units (Rif belt, Morocco). *BSGF-Earth Sci. Bull.* 192, 26.
- Feinberg, H., 1978. Les séries tertiaires du Prérif et des dépendances post-tectoniques du Rif (Maroc). Thèse de Doctorat, Toulouse, France.
- El Fellah, B., & Mastere, M. 2015. Les côtières méditerranéens du Rif central : Facteurs induisant l'instabilité des versants The central Rif Mediterranean coast: Slope failures causative factors. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, (37), 35-43.
- Fort, M., Cossart, M.É., 2011. Aléas naturels et menaces sur les axes de communication en Himalaya du Népal : la vallée de la moyenne Kali Gandaki (Natural risks and threats on circulation axes in the Nepalase Himalayas: the middle Kali Gandaki valley).
- Frappa, M., Lebourg, T., 2001. Mesures géophysiques pour l'analyse des glissements de terrain. *Rev. Fr. Géotechnique* 33–39. <https://doi.org/10.1051/geotech/2001095033>

- Fressard, M., 2013. Les glissements de terrain du Pays d’Auge continental (Normandie, France) Caractérisation, cartographie, analyse spatiale et modélisation. Thèse de Doctorat, Université de Caen.
- Frets, E.C., Tommasi, A., Garrido, C.J., Vauchez, A., Mainprice, D., Targuisti, K., Amri, I., 2014. The Beni Bousera Peridotite (Rif Belt, Morocco): an Oblique-slip Low-angle Shear Zone Thinning the Subcontinental Mantle Lithosphere. *J. Petrol.* 55, 283–313. <https://doi.org/10.1093/petrology/egt067>
- Fumey, M., 2001. Méthode d’Evaluation des Risques Agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d’installations. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- Gabert, P., Maurer, 1970. G. Maurer, Les montagnes du Rif marocain. Etude géomorphologique. *Méditerranée* 89–91.
- Garnier, P., Moles, O., Caimi, A., Gandreau, D., Hofmann, M., 2011. Aléas naturels, catastrophes et développement local. *CRA terre éditions*, 59 p., 2011, 978-2-906901-67-4.
- Germanov, T., 1991. Histoire et aspects généraux de la géotechnique. *Annu. Inst. Archit. GENIE Civ.-Fasc. IV Mec. SOLS Trav. Fond. Geol. Appl.* 36.
- Gervreau, E., Seve, G., 1992. Relations entre précipitations et cinématique des glissements de terrain déduites du suivi de sites instables, in : *landslides/glissements de terrain-proceedings of the 6th international symposium, 10-14 february 1992, christchurch, New Zealand.*
- Gidel, G., Hornych, P., Chauvin, J.-J., Breyse, D., Denis, A., 2001. Nouvelle approche pour l’étude des déformations permanentes des graves non traitées à l’appareil triaxial à chargements répétés. *Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussées* 233, 5–21.
- Gilbert, C., 2009. La vulnérabilité : une notion vulnérable. À propos des risques naturels. *Becerra Sylvia, Peltier Anne. Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés, Le Harmattan, pp.23-40, 2009.*
- Giraud, A., Gourc, J.P., Besson, L., Fabre, D., 1981. Approche pluridisciplinaire des problèmes posés par un glissement de terrain sur faible pente. *Rev. Fr. Géotechnique* 57–66. <https://doi.org/10.1051/geotech/1981014057>
- Gnanapragasam, N., 2000. Active earth pressure in cohesive soils with an inclined ground surface. *Can. Geotech. J.* 37, 171–177. <https://doi.org/10.1139/t99-091>
- Grevemeyer, I., Gràcia, E., Villaseñor, A., Leuchters, W., & Watts, A. B. 2015. Seismicity and active tectonics in the Alboran Sea, Western Mediterranean: Constraints from an offshore-onshore seismological network and swath bathymetry data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(12), 8348-8365.
- Gruzelle, A., Lebaut, S., 2022. Démarche d’analyse et de diagnostic du risque de glissement de terrain : de l’identification à une mesure proactive. *Physio-Géo Géographie Phys. Environ.* 167–192.
- Gueydan, F., Pitra, P., Afiri, A., Poujol, M., Essaifi, A., Paquette, J.-L., 2015. Oligo-Miocene thinning of the Beni Bousera peridotites and their Variscan crustal host rocks, Internal Rif, Morocco. *Tectonics* 34, 1244–1268.
- Gueydan, F., Précigout, J., Montesi, L., 2014. Strain weakening enables continental plate tectonics. *Tectonophysics* 631. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.02.005>

- Guilloux, A., 2005. Note sur la définition des « Sols Indurés Roches Tendres » (SIRT). *Rev. Fr. Géotechnique* 59–66. <https://doi.org/10.1051/geotech/2005111059>
- Günther, T., Rücker, C., 2012. Electrical Resistivity Tomography (ERT) in geophysical applications-state of the art and future challenges, in: Schlumberger Symposium–100 Years of Electrical Imaging, Paris.
- Gupta, R.K., Agrawal, M., Pal, S.K., Kumar, R., Srivastava, S., 2019. Site characterization through combined analysis of seismic and electrical resistivity data at a site of Dhanbad, Jharkhand, India. *Environ. Earth Sci.* 78, 226. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8231-2>
- Gysi, A.P., Jagoutz, O., Schmidt, M.W., Targuisti, K., 2011. Petrogenesis of pyroxenites and melt infiltrations in the ultramafic complex of Beni Bousera, northern Morocco. *J. Petrol.* 52, 1679–1735.
- Habib, P., 1984. Les surfaces de glissement en mécanique des sols. *Rev. Fr. Géotechnique* 7–21. <https://doi.org/10.1051/geotech/1984027007>
- Habib, P., 1973. *Précis de Géotechnique*. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Paris, France.
- Haigh, S.K., 2012. Mechanics of the Casagrande liquid limit test. *Can. Geotech. J.* 49, 1015–1023. <https://doi.org/10.1139/t2012-066>
- Harmouzi, H., Dekayir, A., Rouai, M., Afechkar, M., 2018. Analyse géomorphologique et géologique du glissement de terrain d'Akchour (Rif, Maroc). *Geo-Eco-Trop* 42, 19–32.
- Harmouzi, H., Nefeslioglu, H.A., Rouai, M., Sezer, E.A., Dekayir, A., Gokceoglu, C., 2019. Landslide susceptibility mapping of the Mediterranean coastal zone of Morocco between Oued Laou and El Jebha using artificial neural networks (ANN). *Arab. J. Geosci.* 12, 696. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4892-0>
- Hernandez, J., Bellon, H., 1985. Chronologie K-Ar du volcanisme miocène du Rif oriental (Maroc) : implications tectoniques et magmatologiques. *Rev. Géologie Dyn. Géographie Phys.* 26, 85–94.
- Hétu, B., Van Steijn, H., Bertran, P., 1995. Le Rôle des Coulées de Pierres Sèches dans la Genèse d'un Certain Type d'Éboulis Stratifiés. *Permafr. Periglac. Process.* 6, 173–194. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430060212>
- Hlila, R., Sanz de Galdeano, C. 1994. Structure, cinématique et chronologie des déformations dans la dorsale du Haouz (Rif, Maroc). *Geogaceta* 17: 95-97
- Housni, A., 2019. *Généralité sur les glissements des terrains*. Livre.
- Hugonie, G., 1999. L'aggravation des problèmes d'environnement dans les pays méditerranéens : l'exemple de la Sicile. *Inf. Géographique* 63, 207–218.
- Huntley, D., Bobrowsky, P., Hendry, M., Macciotta, R., Elwood, D., Sattler, K., Best, M., Chambers, J., Meldrum, P., 2019. Application of multi-dimensional electrical resistivity tomography datasets to investigate a very slow-moving landslide near Ashcroft, British Columbia, Canada. *Landslides* 16, 1033–1042. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01147-1>
- Jacquard, C., Rispal, M., 2020. Essais préssiométriques Ménard–réflexion sur les matériels et protocoles. JNGG2020.

- Jafrane, S., Abdellaoui, K., Brahim, L.A., 2004. Préalables d'utilisation de la technique de la terre armée au cas de la rocade méditerranéenne.
- Jail, M., Vivian, R., 1971. Les glissements de terrain et les éboulements dans les Alpes françaises du Nord en 1970. Étude physique et problèmes posés par ces phénomènes. *Rev. Géographie Alp.* 59, 473–502.
- Morel, J. L. 1989. Etats de contrainte et cinématique de la chaîne rifaine (Maroc) du Tortonien à l'actuel. *Geodynamica acta*, 3(4), 283-294.
- Jolivet, A., Kteich, Z., 2022. Le coefficient rhéologique de A à Z: choix et conséquences, in: 11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur.
- Jongmans, D., Garambois, S., 2007. Geophysical investigation of landslides: a review. *Bull. Société Géologique Fr.* 178, 101–112.
- Jorda, M., 1970. Le glissement de terrain de Prads (novembre 1968) et ses enseignements morphologiques. *Rev. Géographie Alp.* 58, 193–209.
- Joumady, K., 1999. Urbanisation et disparités spatiales au Maroc. *Méditerranée* 91, 93–100.
- Jrad, M., Masrouri, F., Monnet, J., 1995. Utilisation d'équations constitutives du comportement du sol pour la prédiction d'essais triaxiaux sur des granulats calcaires. *Can. Geotech. J.* 32, 156–166. <https://doi.org/10.1139/t95-012>
- Juarez, E., Rico, A., 1974. Comportement mécanique des sols dans l'essai triaxial. *Limusa - Mex.* 495–573.
- Kamenov, B., Iliev, I., Avramova-Tacheva, E., 1977. Conditions for the origin, mechanism and dynamics of block landslides in Bulgaria. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 16, 98–101. <https://doi.org/10.1007/BF02591459>
- Kassou, F., Bouziyane, J.B., Ghafiri, A., Sabihi, A., 2020. Slope stability of embankments on soft soil improved with vertical drains. *Civ. Eng. J.* 6, 164–173.
- Kerisel, J., 1956. Historique de la Mécanique des Sols en France Jusqu'au 20^{ème} Siècle. *Géotechnique* 6, 151–166. <https://doi.org/10.1680/geot.1956.6.4.151>
- Konrad, J. M., Flavigny, E., & Meghachou, M. 1991. Comportement non drainé du sable d'Hostun lâche. *Revue française de géotechnique*, 54(1), 53-63.
- Kornprobst, J., 1966. A propos des péridotites du massif des Beni- Bouchera (Rif septentrional, Maroc). *Bull. Minéralogie* 89, 399–404.
- Kornprobst, J., Vielzeuf, D., 1984. Transcurrent Crustal Thinning: A Mechanism for the Uplift of Deep Continental Crust / Upper Mantle Associations., in: Kornprobst, J. (Ed.), *Developments in Petrology, Kimberlites*. Elsevier, pp. 347–359. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42274-3.50035-4>
- Koulali, A., Ouazar, D., Tahayt, A., King, R.W., Vernant, P., Reilinger, R.E., McClusky, S., Mourabit, T., Davila, J.M., Amraoui, N., 2011. New GPS constraints on active deformation along the Africa–Iberia plate boundary. *Earth Planet. Sci. Lett.* 308, 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.05.048>
- Lamontagne, M., Demers, D., Savopoul, F., 2007. Description et analyse du glissement de terrain meurtrier du 25 octobre 1870 dans le rang des Lahaie, Sainte-Geneviève-de-Batiscan, Québec. *Can. J. Earth Sci.* 44, 947–960. <https://doi.org/10.1139/e07-001>

- Larouzzée, J., Duffaut, P., Guarnieri, F., 2014. La catastrophe du barrage de Malpasset à l'épreuve des facteurs organisationnel et humain, in: Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014. pp. 10-pages.
- Lebourg, T., Hernandez, M., Zerathe, S., El Bedoui, S., Jomard, H., Fresia, B., 2010. Landslides triggered factors analysed by time lapse electrical survey and multidimensional statistical approach. *Eng. Geol.* 114, 238–250.
- Lebourg, T., Tric, E., Guglielmi, Y., Cappa, F., Charmoille, A., Bouissou, S., 2003. Geophysical Survey To Understand Failure Mechanisms Involved On Deep Seated Landslides 1, 1043.
- Leikine, M. (1969). La chaîne du Haouz au nord de Tétouan (Jbl Dersa). Éd. du Service Géologique du Maroc.
- Leone, F., 2007. Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes "naturelles": contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones). Thèse de Doctorat. Université Paul Valéry-Montpellier III.
- Leone, F., de Richemond, N.M., Freddy, V. 2021. Aléas naturels et gestion des risques. Presses Universitaires de France, 288 p., 978-2-13-057432-3.
- Leone, F., Deymier, J., Laurent, C., Jomelli, V., 2011. Risques naturels et accessibilité territoriale: le cas des debris flows dans les Alpes, in: CIST2011 - Fonder Les Sciences Du Territoire. Collège international des sciences du territoire (CIST), Paris, France, pp. 290–296.
- Leone, F., Vinet, F., 2006. La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels. *Vulnérabilité Sociétés Territ. Face Aux Menaces Nat. Anal. Géographiques–Géorisques* 1, 9–25.
- Lissak, C., 2013. Les glissements de terrain des versants côtiers du Pays d'Auge (Calvados): Morphologie, fonctionnement et gestion du risque. 317.
- Lissak, C., 2012. Les glissements de terrain des versants côtiers du Pays d'Auge (Calvados): Morphologie, fonctionnement et gestion du risque. (PhD Thesis). Université de Caen.
- Litvinenko, A.S., Zavoritskij, V.I., Artemenko, A.V., 1990. Fiabilité des méthodes de calcul des remblais de grande hauteur. *Avtomobil'nye dorogi*.
- Maate, M., & Didon, J. 1989. Evolution sédimentologique du flysch Oligocène supérieur méridien : la coupe de Louharna (Rif nord-occidental, Maroc). *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 84(1), 95-105.
- Malet, J.-P., Laigle, D., Remaître, A., Maquaire, O., 2005. Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows. *Geomorphology, Geomorphological hazard and human impact in mountain environments* 66, 215–235. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.014>
- Manche, Y., 1997. Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles. A proposal for taking into consideration vulnerability in the mapping of natural risk forecasts. *Rev. Géographie Alp.* 85, 49–62.
- Maquaire, O., Ritzenthaler, A., Fabre, D., Ambroise, B., Thiery, Y., Truchet, E., Malet, J.-P., Monnet, J., 2002. Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable : application aux marnes noires de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Comptes Rendus Geosci.* 334, 835–841.

- Marrone, S., Monié, P., Rossetti, F., Lucci, F., Theye, T., Bouybaouene, M.L., Zaghoul, M.N., 2021. The pressure–temperature–time–deformation history of the Beni Mzala unit (Upper Sebtides, Rif belt, Morocco): Refining the Alpine tectono-metamorphic evolution of the Alboran Domain of the western Mediterranean. *J. Metamorph. Geol.* 39, 591–615. <https://doi.org/10.1111/jmg.12587>
- Martínez-Martínez, J.M., Booth-Rea, G., Azañón, J.M., Torcal, F., 2006. Active transfer fault zone linking a segmented extensional system (Betics, southern Spain): Insight into heterogeneous extension driven by edge delamination. *Tectonophysics* 422, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.06.001>
- Martins-Campina, B., 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). (PhD Thesis). Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- Mastere, M., Brahim, B., Najia, F., Others, 2022. Quantification of Soil Sensitivity to Water Erosion by the RUSLE Model in the Oued Amter Watershed, NorthWestern Morocco. *Iraqi Geol. J.* 41–56.
- Mastere, M., El Fellah, B., Olivier, M., 2020. Landslides inventory map as a first step for hazard and risk assessment: Rif Mountains, Morocco. *Bull. Inst. Sci.* 42, 14.
- Mastere, M., Van Vliet-Lanoë, B., Ait Brahim, L., 2013. Land use mapping and its relation to mass wasting and gullyng in North-Western Rif (Morocco). *Géomorphologie Relief Process. Environ.* 3, 335–352.
- Mateso, J.-C.M., Dewitte, O. 2014. Vers un inventaire des glissements de terrain et des éléments à risque sur les versants du Rift à l’ouest du lac Kivu (RDC). *Geo-Eco-Trop* 38, 137–154.
- Mathlouthi, M., Ghali, A., Lebdi, F. 2014. Impact des pluies extrêmes sur la genèse et l’amplification des glissements de terrain dans le nord de la Tunisie. *Rev. LJEE* (19).
- Maurer, G., 1989. Le Rif oriental, une morphologie de pays semi-aride : Bassins et littoraux du Rif Oriental (Maroc) : Évolution morpho-climatique et tectonique depuis le Néogène supérieur. *JJ Barathon. Méditerranée* 68, 87–88.
- Maurer, G., 1968. Les montagnes du Rif central ; étude géomorphologique. *Trav. Inst Sci Sér. Géol Géogr Phys* 14.
- Medina, F., Cherkaoui, T.E., 1992. Mécanismes au foyer des séismes du Maroc et des régions voisines (1959-1986). *Conséquences tectoniques. Eclogae Geol Helv* 85, 433–457.
- Meghraoui, M., 2018. La Tectonique Inter plaque Transgressive : Une caractéristique de la chaîne des Maghrébides. *CIGCM*, 3.
- Meziane, S., Bahi, L., & Ouadif, L. 2019. Study of landslides in méditerranéen bypass road, case of Jebha. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(21), 3688-93.
- Michard, A., 2011. Nouveaux guides géologiques et miniers du Maroc/New Geological and Mining Guidebooks of Morocco, volume 1 : Présentation des circuits - Introduction à la géologie du Maroc.
- Michard, A., Frizon de Lamotte, D., Saddiqi, O., & Chalouan, A. 2008. An outline of the geology of Morocco. In *Continental Evolution: The Geology of Morocco: Structure, Stratigraphy, and Tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction* (pp. 1-31). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.

- Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., & de Lamotte, D. F. (Eds.). (2008). Continental evolution: The geology of Morocco: Structure, stratigraphy, and tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean triple junction (Vol. 116). Berlin: Springer.
- Michard, André, Saddiqi, O., Chalouan, A., Frizon de Lamotte, D., 2008b. Continental Evolution: The Geology of Morocco, Lecture Notes in Earth Sciences, Berlin Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77076-3>
- Miller, S., Brewer, T., Harris, N., 2009. Rainfall thresholding and susceptibility assessment of rainfall-induced landslides: application to landslide management in St Thomas, Jamaica. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 68, 539–550. <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0232-z>
- Milliard, Y. 1959. Sur l'existence du permien dans le massif paléozoïque interne du rif (Maroc). *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie des sciences*, 249(12), 1051-1052.
- Monnet, J., 2016. Les essais in situ en géotechnique, ISTE. ed. ISTE Group, England.
- Mora C, S., Vahrson, W.-G., 1994. Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bull. Assoc. Eng. Geol.* 31, 49–58.
- Mourabit, Z., Tabit, Garrido, C.J., Bodinier, J.-L., 2017. L'étude géochronologique de l'unité Filali (Rif interne, Maroc) : implication pour U-Th-Pb de Zircon, Monazite et Rutile dans les métapelites, les gneiss et les migmatites.
- Mousslim, M., & Arroussi, A. 2018. Etude d'une prospection géotechnique des sondages. Thèse de Doctorat, Université Ahmed Draïa-Adrar.
- Nacira, B., Bachir, M., 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. HALL, 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai 2015.
- Nemčok, A., Pašek, J., Rybář, J., 1972. Classification of landslides and other mass movements. *Rock Mech. Felsmech. Mécanique Roches* 4, 71–78. <https://doi.org/10.1007/BF01239137>
- Nguyen Pham, P.T., 2008. Etude en place et au laboratoire du comportement en petites déformations des sols argileux naturels. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts Chaussées Spec. Geotech.
- Nicaise, Y., Kounika, E., Daba, G.F.F., Kpeyi, T., Adjadji, C.A., 2019. Evaluation géophysique des réserves résiduelles d'hydrocarbure : Cas des grès du Turonien dans la structure pétrolifère Nord du champ de Sèmè au Bénin. *Sci. Vie Terre Agron.* 6.
- Nicollet, G., 1982. Hydraulique des ouvrages de franchissement des vallées fluviales. *Houille Blanche* 289–308.
- Niini, H., 1977. Main features and causes of landslides in Finland. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 16, 46–48. <https://doi.org/10.1007/BF02591444>
- Obda, O., Kharim, Y.E., Obda, I., Ahniche, M., Kouffi, A.E., 2022. Coastal rocky slopes instability analysis and landslide frequency-area distribution alongside the road network in west Mediterranean context (Northern of Morocco) (preprint). In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2196461/v1>
- Olivet, J.-L., Auzende, J.-M., Bonnin, J., 1973. Structure et évolution tectonique du bassin d'Alboran. *Bull. Société Géologique Fr.* 15, 491–495.

- O'Neill, M., 2009. Place à l'adaptation Action : protéger les collectivités côtières du Nord du Maroc. CRDI- DFID, CRDI.
- Palacky, G.J., 1988. Resistivity characteristics of geologic targets. *Electromagn. Methods Appl. Geophys.* 1, 52–129.
- Pašek, J., 1975. Landslides inventory. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 12, 73–74. <https://doi.org/10.1007/BF02635432>
- Pathier, E., Kniess, U., Villemin, T., 2010. Etude morphologique de l'évolution de glissements de terrain par techniques Lidar : Application au suivi des glissements d'Avignonet et de l'Harmalière (Trièves).
- Pedro, L.S., Dupla, J.C., Canou, J., Dormieux, L., Kazan, Y., 2005. Comportement mécanique d'un sol grossier à matrice sous cisaillement monotone. *Rev. Fr. Géotechnique* 35–42.
- Perrone, A., Lapenna, V., Piscitelli, S., 2014. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. *Earth-Sci. Rev.* 135, 65–82.
- Petschko, H., Bell, R., Leopold, P., Heiss, G., Glade, T., 2013. Landslide Inventories for Reliable Susceptibility Maps in Lower Austria, in: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (Eds.), *Landslide Science and Practice*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 281–286. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31325-7_37
- Pincet, B., 1977. Surveillance des glissements de terrain. *Rev. Fr. Géotechnique* 92–104.
- Plumelle, C., Fouché, O., Cui, Y., Tabbagh, A., 2017. Théorie et pratique de la géotechnique - Tome 1 - Outils pour la conception des ouvrages.
- Popescu, M.E., 1994. A suggested method for reporting landslide causes. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 50, 71–74. <https://doi.org/10.1007/BF02594958>
- Poujol, A., 2014. Analyse des déformations actuelles dans le Rif (Maroc) : Approche morpho tectonique. Thèse de Doctorat, Université Montpellier 2.
- Prokešová, R., Kardoš, M., Tábořík, P., Medved'ová, A., Stacke, V., & Chudý, F. 2014. Kinematic behaviour of a large earthflow defined by surface displacement monitoring, DEM differencing, and ERT imaging. *Geomorphology*, 224, 86-101.
- Leong, E. C., Rahardjo, H., & Ong, B. C. 2004. Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(3), 421-436.
- Rahardjo, H., Lim, T.T., Chang, M.F., Fredlund, D.G., 1995. Shear-strength characteristics of a residual soil. *Can. Geotech. J.* 32, 60–77. <https://doi.org/10.1139/t95-005>
- Reiffsteck, P., 2002. Nouvelles technologies d'essai en mécanique des sols - Etat de l'art. PARAM 2002 - Symp. Int. Identif. Determ. Parametr. Sols roches pour Calc. Geotech. PARIS 2-3 Sept. 2002.
- Reuber, I., Michard, A., Chalouan, A., Juteau, T., Jermoumi, B., 1982. Structure and emplacement of the Alpine-type peridotites from Beni Bousera, Rif, Morocco: A polyphase tectonic interpretation. *Tectonophysics* 82, 231–251.
- Richer, B., 2021. Analyse géotechnique des risques de glissement de terrain pour le secteur de Saint-Jean-Vianney en prévision des aménagements prévus par Ville de Saguenay (masters). Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi.

- Romagny, A., 2016. Évolution des mouvements verticaux néogènes de la chaîne du Rif (Nord-Maroc) : apports d'une analyse structurale et thermochronologique. Sciences de la Terre. Université Nice Sophia Antipolis, Français.
- Romana, M., 1995. Caractérisation de schiste pour utilisation dans les remblais autoroutiers. Craies schistes.
- Rufat, S., 2007. L'estimation de la vulnérabilité urbaine, un outil pour la gestion du risque. Approche à partir du cas de l'agglomération lyonnaise. *Géocarrefour* 82, 7–16.
- Pigeon, R., Misson, P., 2000. L'évaluation du risque à l'échelle internationale : méthodologie et application aux diagnostics préalables aux actions de préparation et de prévention des catastrophes. *Cah. Savoie. Géographie, La géographie des risques dits "naturels". Entre géographie fondamentale et géographie appliquée.* 1, 29–36.
- Saez, J.L., 2011. Reconstruction de l'activité des glissements de terrain au moyen d'une approche dendrogéomorphologique. (PhD Thesis). Université de Grenoble.
- Saïghi, A., 1998. Comparaison des essais au laboratoire et in situ : exemple du triaxial et du pressiomètre (These de doctorat). Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris.
- Sassioui, S., Aarab, A., Darbali, M., Ouchbani, A., Lakhloufi, A., El Hilali, M., Larabi, A., 2022. Contribution to the Mineralogical Study Using Electrical Tomography in Fom Tizza Area, Eastern Anti-Atlas, Morocco. *Iraqi Geol. J.* 1–13.
- Schellart, W.P., 2000. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling. *Tectonophysics* 324, 1–16.
- Schlosser, F., 1983. *Eléments de mécanique des sols*, presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- Schoeneich, P., 1991. La datation des glissements de terrain. *Landslides* Ed. Bell Balkema Rotterdam 205–212.
- Serratrice, J.F., 2013. Influence de la vitesse d'essai et de la consolidation anisotrope de l'éprouvette dans les essais triaxiaux cycliques. *Bull. Lab. Ponts Chaussées* pp-95.
- Andrei, P. S. 1977. Propriétés hydrauliques et mécaniques des sols non saturés. *Revue Française de Géotechnique*, (2), 49-78.
- Soldati, M., 1996. Landslides in the European Union. *Geomorphology* 15, pp 183-364.
- Somson, P., Baudiere, A., 1986. Les Milieux D'éboulis Oriento-Pyreneens : Analyse Critique. *Bull. Société Bot. Fr. Actual. Bot.* 133, 443–465. <https://doi.org/10.1080/01811789.1986.10826846>
- Stich, D., Serpelloni, E., de Lis Mancilla, F., Morales, J., 2006. Kinematics of the Iberia–Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations. *Tectonophysics* 426, 295–317. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.08.004>
- Tabbagh, A., 1992. Méthodes géophysiques appliquées à la prospection archéologique. *Mém Soc Géol Fr.* 161, 9–15.
- Tahayt, A. 2008. Apport des mesures de la géodésie spatiale dans l'étude des déformations tectoniques actuelles dans la Méditerranée occidentale. Thèse de doctorat. Toulouse 3.
- Tahayt, A., Mourabit, T., Rigo, A., & et al. 2008. Mouvements actuels des blocs tectoniques dans l'arc Bético-Rifain à partir des mesures GPS entre 1999 et 2005. *Comptes Rendus Géoscience*, 340(6), 400-413.

- Taj, B., Mastere, M., Benzougagh, B., El Hilali, M., Sassioui, S., Fellah, B.E., 2023a. Geotechnical Prospects and Electrical Tomography to study slope instability in the Rif Alboran Sea Shoreline on the Mediterranean By-Road (Northern Morocco). *Ecol. Eng. Environ. Technol.*
- Taj, B., Mastere, M., El Fellah, B., Brahim, B., El-Basri, M., Ouchen, I., 2023b. Apport de la tomographie de la résistivité électrique (TRE) et approche géotechnique pour la caractérisation des instabilités de terrain : Cas du versant de Jebha, Rif, Nord du Maroc. *Bull. Inst. Sci. Rabat* pp 45-59.
- Talhaoui, A., Aberkan, M., Brahim, I., & El Mouraouah, A. 2005. Risques géologiques et activité sismique dans la région d'Al Hoceima (Maroc) : Approche de la quantification des facteurs responsables du déclenchement des instabilités de terrain. *Pangea infos*, 43, 3-18.
- Terzaghi, K., 1950. Mechanism of landslides. <https://doi.org/10.1130/Berkey.1950.83>
- Théophile, N.Z., Gérard, M.R., 2010. Estimation par combinaison de la méthode Electrique et du MNT du volume de calcaire de la carrière d'Ankena. Université d'Antananarivo faculté des sciences département de physique
- Thiery, Y., Malet, J.-P., Sterlacchini, S., Puissant, A., Maquaire, O., 2005. Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. *Rev. Int. Géomat.* 15, 227–245.
- Thorel, L., Jenck, O., 2021. Modélisation physique en géotechnique, 1 re partie. *Rev. Fr. Géotechnique E1*. <https://doi.org/10.1051/geotech/2021002>
- Tima, Z.A., Rouai, M., Dekayir, A., 2018. Etude géologique, cartographique et géotechnique du glissement de terrain du Jbel Outka (Rif central, Maroc). *Geo-Eco-Trop* 42, 57–74.
- Tribak, H., Gasc-Barbier, M., & Garouani, A. E. 2023. A ground instabilities inventory between Tetouan and Jebha (Morocco) : mapping, description and analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(4), 143.
- Triek, A., Ayad, A., Lamara, M.E., 2018. Etude de stabilité des remblais de grande hauteur sur Sols compressibles (PhD Thesis). Université de Jijel.
- Valenti, V., Bertini, A., 2003. Malpasset dam: from its design to its burst; Barrage de Malpasset: de sa conception a sa rupture.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. *Spec. Rep.* 176, 11–33.
- Vengeon, J.-M., Giraud, A., Antoine, P., Rochet, L., 1999. Contribution à l'analyse de la déformation et de la rupture des grands versants rocheux en terrain cristallophyllien. *Can. Geotech. J.* 36, 1123–1136. <https://doi.org/10.1139/t99-066>
- Vernant, P., Fadil, A., Mourabit, T., Ouazar, D., Koulali, A., Davila, J. M., ... & Reilinger, R. 2010. Geodetic constraints on active tectonics of the Western Mediterranean: Implications for the kinematics and dynamics of the Nubia-Eurasia plate boundary zone. *Journal of Geodynamics*, 49(3-4), 123-129.
- Veyret, Y., Beucher, S., Bonnard, J.-Y., 2005. Risques naturels et territoires (Natural hazards and territories). *Bull. Assoc. Géographes Fr.* 82, 63–74.
- Villain, J., Foultier, A., 1992. Géotechnique : actions imposées aux ouvrages : exploitation des éboulis et protection contre les chutes de blocs. Un exemple en tarentaise. Monographie d'études et de recherches 1991 du réseau des laboratoires des ponts et chaussées.

- Villaseñor, A., Chevrot, S., Harnafi, M., Gallart, J., Pazos, A., Serrano, I., Córdoba, D., Pulgar, J.A., Ibarra, P., 2015. Subduction and volcanism in the Iberia-North Africa collision zone from tomographic images of the upper mantle. *Tectonophysics* 663, 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.08.042>
- Weiss, K., Girandola, F., & Colbeau-Justin, L. 2011. Les comportements de protection face au risque naturel : de la résistance à l'engagement. *Pratiques psychologiques*, 17(3), 251-262.
- 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*, 27, 227-251.
- Zhdanov, M., Portniaguine, O., 1999. Focusing geophysical inversion images. *Geophysics* 64. <https://doi.org/10.1190/1.1444596>

Résumé

La rocade méditerranéenne, projet stratégique à l'échelle du Maroc, joue un rôle crucial dans le désenclavement des villes et localités du Nord du Maroc, favorisant ainsi le développement économique et assurant une mobilité sécurisée pour les habitants. La mise en place de cette route a entraîné d'importants terrassements en déblai ou en remblai, transformant le paysage côtier du Rif interne donnant sur la mer Méditerranée. Cependant, des talus autrefois stables sont devenus très actifs, menaçant régulièrement les populations et perturbant la circulation routière après chaque période de pluie. Les problèmes d'instabilité ont été observés dès les premiers jours de la mise en service de la rocade méditerranéenne, certains tronçons manifestant leur activité même pendant la phase de construction. L'entretien et la maintenance de cette route représente un coût considérable pour le budget de l'État, avec des sommes importantes engagées chaque année pour faire face aux problèmes d'instabilités dans plusieurs sections.

Une étude approfondie de ces talus instables, visant à dresser un état des lieux, comprendre leur dynamique et évaluer leur niveau de risque, est extrêmement importante dans l'objectif d'une approche proactive de réduction des effets de catastrophes naturelles mais aussi dans le cadre d'aide à la prise de décision. La présente thèse se concentre spécifiquement sur la stabilité de onze sections de la route N16, situées entre Oued Laou et Jebha. L'originalité de l'approche réside dans la combinaison des analyses géomorphologiques et structurales, tout en utilisant, selon les besoins, des méthodes de prospection géotechnique et géophysique telles que la tomographie électrique-2D.

Mots-clefs : Rocade méditerranéenne, Rif interne, Risques, Talus instables, Géotechnique, Tomographie Electrique

Abstract

The Mediterranean Ring Road, a strategic project on a Moroccan scale, plays a crucial role in opening up the towns and cities of Northern Morocco, promoting economy development and ensuring safe mobility for residents. The construction of this road has involved the excavation or backfilling of colossal volumes of material, transforming the landscape of the inner Rif's coast overlooking the Mediterranean Sea. However, previously stable slopes have become very active, regularly menacing people and disrupting road traffic after each period of rain. Problems of the instability were observed from the first days the Mediterranean ring road was brought into service, with some sections showing signs of activity even during the construction phase. The upkeep and maintenance of this road represents a considerable cost for the state budget, with significant amounts committed each year to dealing with instability problems in several sections.

A detailed study of these unstable slopes, aimed at drawing up an overview, understanding their dynamics and assessing their level of risk, is extremely important in terms of a proactive approach to reducing the effects of natural hazards, but also as part of the decision-making process. This thesis focuses specifically on the stability of eleven sections of the N16 road, located between Oued Laou and Jebha. The originality of the approach resides in the combination of geomorphological and structural analyses, while using, as required, geotechnical and geophysical prospecting methods such as 2D electrical tomography.

Key Words: Mediterranean ring road, Internal Rif, Risks, Unstable slope, Geotechnical, Electrical Tomography.