

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

Landslides characterization using electrical resistivity tomography (ERT) and geotechnical approach: the case of the Jebha Cliff, Rif, northern Morocco

**Benyounes TAJ¹, Mohamed MASTERE¹, Bouchta EL FELLAH¹, Brahim BENZOUAGH¹,
Mohamed EL BASRI¹ & Ibrahim OUCHEN¹**

¹. Geophysics and Natural Hazards Laboratory, Department of Geomorphology and Geomatics, Scientific Institute, Mohammed V University in Rabat, Avenue Ibn Batouta, Agdal, PO Box 703, 10106, Rabat-Agdal, Morocco (taj_benyounes@yahoo.fr).

Résumé. Notre zone d'étude se trouve à l'entrée ouest de la ville de Jebha, sur la rocade méditerranéenne. Elle est caractérisée par une morphologie marquée par des terrains très accidentés. Son réseau hydrographique et son fonctionnement hydrodynamique sont largement influencés par la topographie du terrain, la lithologie soumise à un réseau dense d'accidents tectoniques, les précipitations souvent orageuses, auquel s'ajoutent l'érosion marine qui abrase le littoral. Jebha est une petite ville portuaire qui se trouve dans le domaine rifain, entre le domaine interne et les nappes de Flysch. Elle est traversée par la rocade méditerranéenne (N 16), à mi-chemin entre Tétouan et Al Hoceima. Le réseau routier desservant la ville du côté ouest se limite au seul accès de cette route. En plus, cette entrée est constamment menacée par l'instabilité du versant qui marque cette issue. La chaussée est souvent envahie par les gravois et les blocs de roche qui glissent le long des pentes et suivant les divers plans des mouvements de terrain. Au cours de cette recherche, nous avons étudié de près l'instabilité de la colline se trouvant entre la ville et la baie d'Oringa. Notre travail consiste à évaluer la gravité de la situation par la réalisation de la carte de vulnérabilité au risque du glissement de terrain à travers des investigations géotechniques et géophysiques, enrichie par une analyse géomorphologique et géologique du site. Les résultats obtenus mettent en évidence la relation des facteurs influençant le processus du glissement de terrain et la mise en place d'état des lieux de ce fléau qui montre une situation alarmante. Ce qui offre aux décideurs une feuille de route pour faciliter la prise de décisions relatives à l'aménagement de cette zone à risque.

Mots-clés: Jebha, rocade méditerranéenne, glissements de terrain, vulnérabilité, géotechnique, géophysique, Rif.

Abstract. Our study area is located at the western entrance of the city of Jebha, on the Mediterranean ring road. It is characterized by a morphology marked by very uneven terrain. Its hydrographic network and its hydrodynamic functioning are largely influenced by the topography of the land, the lithology subjected to a dense network of tectonic accidents, the often-stormy precipitations, which are added to the marine erosion abrading the littoral. Jebha is a small port city located in the Rifian domain, between the internal zones and the Flysch nappes. It is crossed by the Mediterranean ring road (N 16), halfway between Tetouan and Al Hoceima. The road network serving the city on the west side is limited to the only access of this road. In addition, this entrance is constantly threatened by the instability of the slope that marks this exit. Rubble and boulders that slide down the slopes and along the various planes of land movement often invade the roadway. During this study, we have studied the instability closely of the hill between the city and the bay of Oringa. This work consists in evaluating the gravity of the situation by the realization of the vulnerability map to the risk of the landslide through geotechnical and geophysical investigations, enriched by a geomorphological and geological analysis of the site. The results obtained highlight the relationship of factors influencing the process of the landslide and the establishment of a state of the art of this scourge that shows an alarming situation. This provides decision-makers with a roadmap to facilitate decision-making on the development of this risk area.

Keywords: Landslides, Mediterranean ring road, Vulnerability, Geotechnics, Geophysics, Jebha, Rif.

Abridged English version

Several scientific studies and research show that landslides currently cause an average of \$500 billion worth of damage per year, more than double what was previously thought. Adding to these costs are the millions of people who die each year trying to escape the rapid flooding caused by landslides, a tragedy that can occur very quickly and without much warning due to rainstorms. Landslides occur when a layer of rock or sediment is suddenly undercut causing it to break off and fall down the face of a slope, in other words they are surfaces that fall. There are four main types of landslides: rock slides, debris flows, creep or slow-motion landslides and mudslide, which occur when water reacts with volcanic ash

or loose soil and mud. Debris flow is the most widespread type of landslide which can happen in any climate, but usually beneath thunderstorms during flash floods. There are a number of causes of landslides, which vary depending on the situation and geography. Morocco is not safe from this phenomenon that affects countries around the world. We note the serious presence of this type of natural hazard in the northern region of Morocco. The Rif Mountain range, which rises up along a South and South-West convexity. The structure of this chain is very complex and presents large NE/SW and E/W decays, respectively dextral and essential known and which would have played the role of lateral ramps, synchronous with the play of major thrusts during the setting of the internal zones on the external zones. The study area is located at the western

boundary of Jebha at PK198+800 (N 16), on the eastern spur of the Internal Rif, in a terrain belonging to the Ghomarides domain (Fig. 1). The climate of the region of Jebha is of Mediterranean type, characterized by a wet and fresh winter, and a dry and hot summer. The rainfall varies with the altitude and the exposure of the reliefs. Average temperatures generally range between 20 and 32°C in summer and 7 and 22°C in winter. The average annual precipitation is around 500 mm in a year of heavy rainfall. The climatic context of the region is also known for showers with daily peaks of up to 140 mm (Fig. 2). The Jebha fault marks the state of the structures in this region and naturally defines the western limits of the Flysch sheets. This very particular geographical position contributes to the geological complexity of the formations in the landscape, especially in our study area. The shape and lithology of the slope studied are dominated by outcrops of blackish pyelitic shale from the lower Ghomarides nappe. There is also marly shale with intercalated beds of sandstone, blackish sandstone shale and a thin cover formed by alluvium and conglomerates embedded in a brownish clay matrix (Fig. 5). These lithological formations are fractured and present zones of weakness. The geomorphological context of the study area shows, and the magnitude of the land movement at the entrance of Jebha is determined by its imposing geometric characteristics. Indeed, the slides are spread over a length of about 1 km, and the drop of this escarpment is 132 m, with an average slope of over 45%. The area of the landslide is about 6.5 Ha. The topographic survey carried out in September 2020 illustrates this state of affairs and gives a precise presentation of the relief (Fig. 6). In order to identify the various instability mechanisms in the study area and also to have a clearer vision of the subsoil formations, we conducted geotechnical investigations in collaboration with the public laboratory for tests and studies (LPEE), which involved the realization of 5 core drillings (Fig. 7), geographically arranged according to our study needs but also taking into account the constraints of the terrain. Indeed, the great slope of the terrain sometimes made it impossible to install the drilling station. The drilling machine used is Sedi drill 250/01/TTA. The coring was done vertically (90° angle). The cores obtained were analyzed visually and also in the laboratory to define the rock type at each depth (Fig. 8). Five drillings were used to carry out tests with the Menard pressure meter in order to judge the mechanical performance of the different layers and to detect possible weaknesses. The tests were carried out with a tri-cellular probe introduced along the borehole. In accordance with NF EN ISO 22476-4 (2015), the probe used is 60 mm G type and the test pressure was limited to 5 MPa. The use of geophysical prospection means will allow to refine the data obtained and to understand the subsoil structures. The expected objective is to confirm the continuity of the schistose

substratum on the whole subsoil, to decide on the existence or not of an underground water table, to define the thickness of the altered surface layer, to verify if there are cavities and finally to try to understand the dispositions of the local fractures and faults noted on the surface. The geophysical prospecting method used is that of electrical resistivity tomography (ERT). It is based on the measurement of the apparent electrical resistivity of the subsurface, along a set of straight cables connected to a number of defined electrodes, for a large number of positions and spacing of the electrodes for the injection of electrical current and those for the calculation of the potential difference. The acquisition of the geoelectric data was carried out with the "X612EM+" resistivity meter from MAE. To have a compromise between spatial resolution and depth of investigation we opted for the Wegener-Schlumberger combiner device, the distance between the electrodes was fixed at 10 m. The profile was laid out parallel to the topography and perpendicular to the direction of the slide, passing through the core hole SCP 02 at the level of the 5th reef bearing (Fig. 9). The length of the profile is 350 m, the number of electrodes used is 36. The results obtained by the TRE model (Fig. 9) confirm the results of the boreholes (Fig. 11) and the geological and geomorphological analyses of the site. They indicate that the indurated pyelitic schist massif that forms the structure of the subsoil is homogeneous and forms the entire bedrock of the hill. Also, no cavities or underground water table have been detected. The surface layer is entirely weathered over a variable thickness of up to 30 m (Fig. 10). The analysis of the results of the Menard pressure meter tests carried out in the five boreholes shows the existence of altered and fragile zones of weakness, reflecting the development of progressive fractures affecting the slope. On the other hand, the values obtained for the deep layers are much higher. This is explained by the fact that the shales at depth are relatively unaltered and not reworked by surface movements (Fig. 12). The slope located at the entrance of the city of Jebha and which was the subject of this study, is in a state of instability threatening. The intervention of the competent authorities to address this problem becomes very urgent. The solutions to be implemented must take into consideration the three types of instability listed above. A thorough study must be carried out to study the whole hill, to widen the surface of investigation and also to define with precision the orientations and depths of the faults and fractures observed on the surface. This will make it possible to identify the problem in its entirety and to find adequate solutions, which can be manifested either by the realization of stabilization and protection works or to find radical solutions by corrections of the layout of the road N 16.

INTRODUCTION

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.* 2002, Mastere *et al.* 2013, Mastere *et al.* 2020, Elmoulat *et al.* 2021), d'autres auteurs ont essayé de dresser un inventaire et une cartographie des différents mouvements de terrain dans le Rif (Mastere *et al.* 2017, Harmouzi *et al.* 2019). Les glissements de terrain sont aussi étudiés suivant le risque qu'ils présentent pour les populations et le développement durable des agglomérations (El Gharbaoui 1981, Mastere 2020).

SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE ET PROBLEMATIQUE

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 Kodiât 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 gravais 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.

Jebha, 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 Hoceïma). 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 (Fig. 1). 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) (Fig. 1) 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 Saïdia, 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 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 Sebtiides, 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.

OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

L'étude de l'instabilité de ce versant (Fig. 1) 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.

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

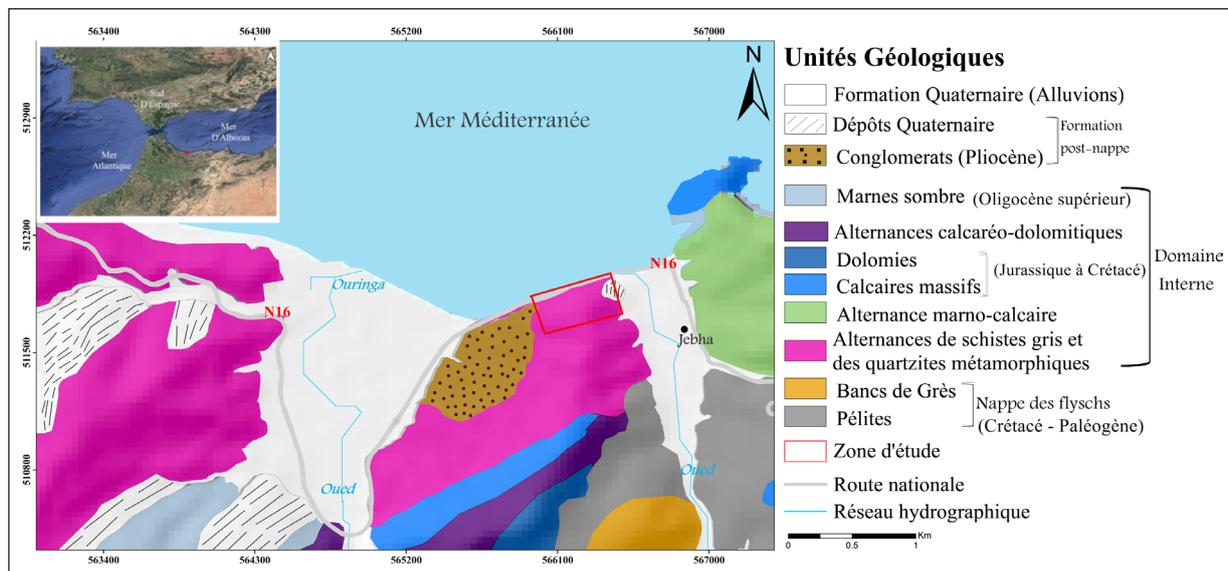


Figure 1. Carte géologique avec indication de la zone d'étude.
Figure 1. Geological map with indication of the study area.

DONNEES CLIMATIQUES

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. 2).

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. 3). 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.

DONNEES GEOLOGIQUES ET GEOMORPHOLOGIQUES

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 1960, Michard *et al.* 2008). 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 (Kornprobst 1974). 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 Nekkour, et séparées du domaine interne, à l'est de la zone étudiée (Fig. 1), 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).

Le Rif Interne (Fig. 4) 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 Sebides, les Ghomarides et la Dorsale calcaire. Aux limites de cette dernière, 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.

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.

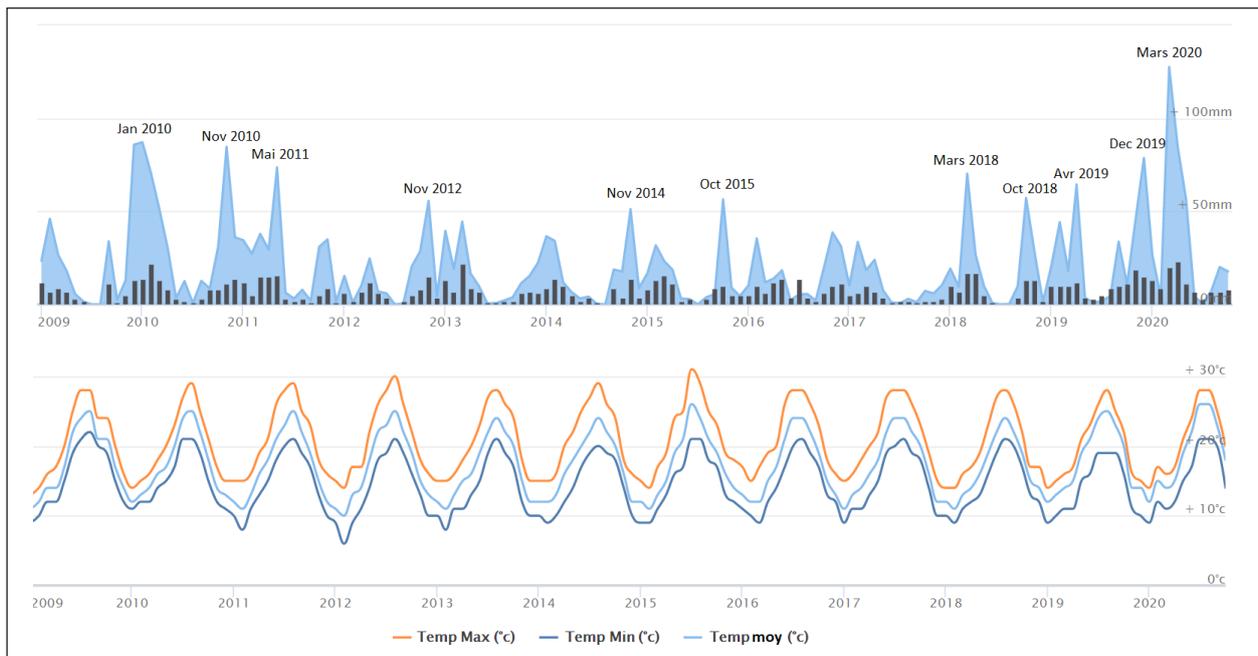


Figure 2. Pluies et températures maximales mesurées dans les stations de comptage d'Afghan, de Koudiat Kourirene et Jebha de 2009 à 2020 (Direction de la Météorologie Nationale).

Figure 2. Rainfall and maximum temperatures measured in the counting stations of Afghan, Koudiat Kourirene and Jebha from 2009 to 2020 (National Direction of Meteorology).

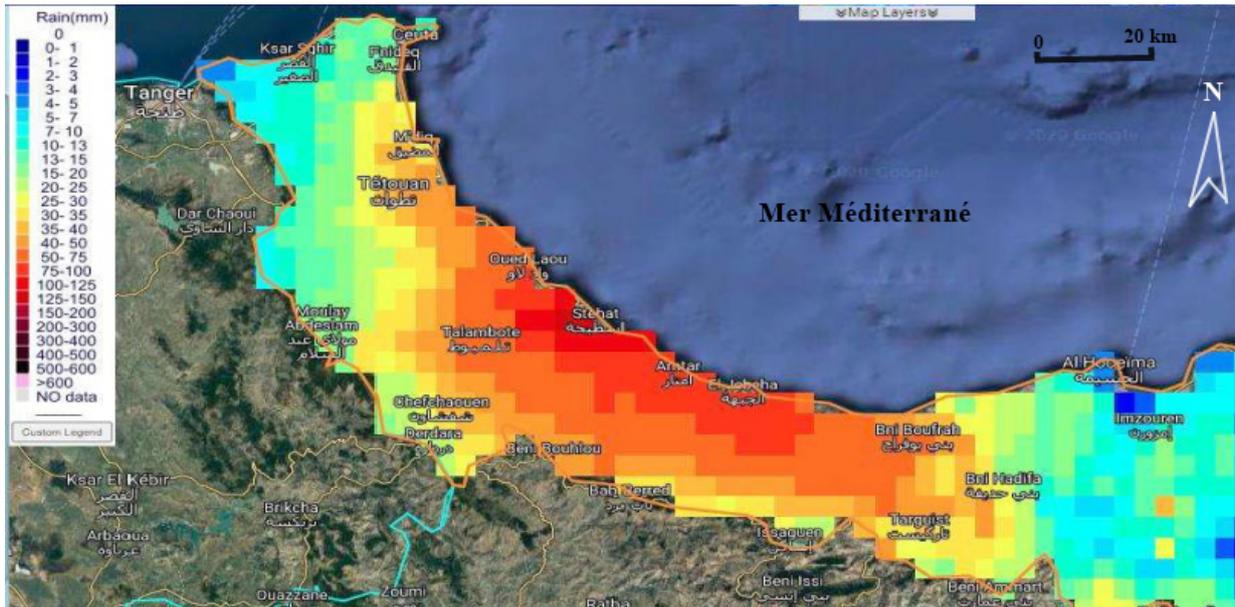


Figure 3. Répartition spatiale de la pluie journalière survenue le 24 mars 2004 (Direction de la Météorologie Nationale).
 Figure 3. Spatial distribution of daily rainfall on March 24, 2004 (National Direction of Meteorology).

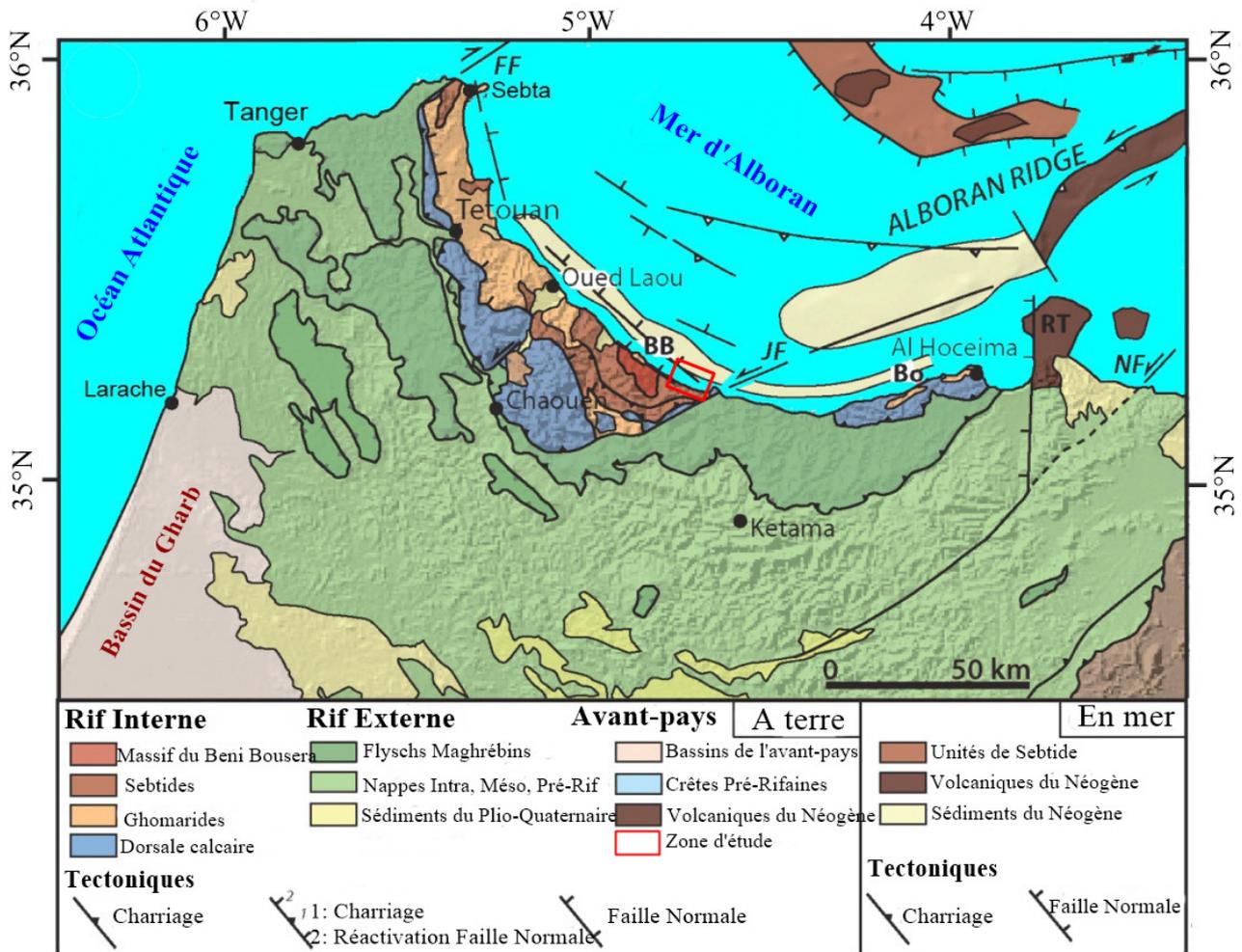


Figure 4. Cadre structural du Rif et de la marge sud de la Mer d'Alboran (Chalouan *et al.* 2008).
 Figure 4. Geological and structural settings of the Rif and south Alboran Sea (Chalouan *et al.* 2008).
 BB: Beni Bousera massif; FF: Fahies Fault; JF: Jebhab Fault; NF: Nekor Fault and RT: Rasel Tarf.

Géologie du secteur étudié

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. 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 grés, 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. 5). Ces formations lithologiques sont fracturées et présentent plusieurs zones de faiblesse.

Contexte structural

La fameuse faille décrochante senestre de Jebha est largement étudiée pour figurer dans les cartes géologiques, néotectoniques et sismo-tectonique du Rif (Fig. 6). 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, Benmakhoulouf *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 (Morel 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).

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 dénivellé 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. 7).

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 (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 pytygmiques au niveau des formations marneuses ou sous forme cassante associées aux failles constatées in situ. Les failles locales de type F1 (Fig. 5), sont orientées dans la direction générale de la faille de Jebha.

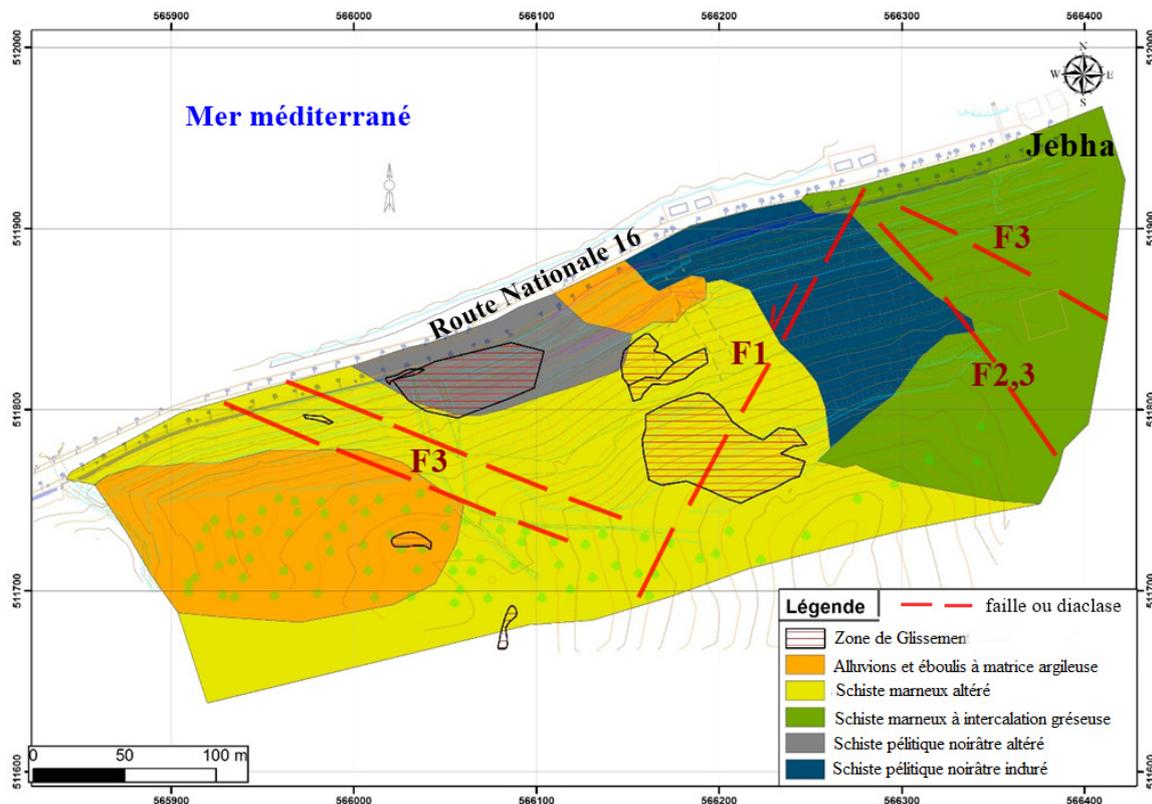


Figure 5. Présentation schématique des formations structurales et géologiques de la zone d'étude.
 Figure 5. Schematic presentation of the structural and geological formations of the study area.

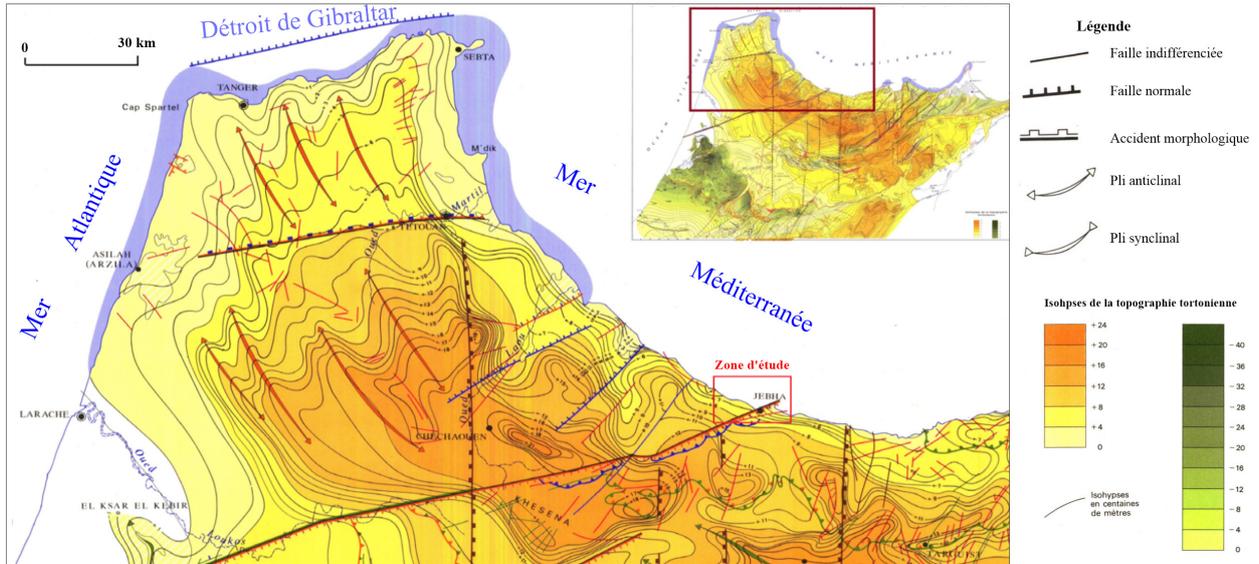


Figure 6. Extrait de la carte des mouvements récents du Rif au 1/500 000. Note et mémoire N° 365, Service géologique du Maroc (Morel & Julien 1992)

Figure 6. Extract from the Map of recent movements in the Rif at 1:500,000. Note and memory N° 365, Geological Service of Morocco (Morel & Julien 1992)

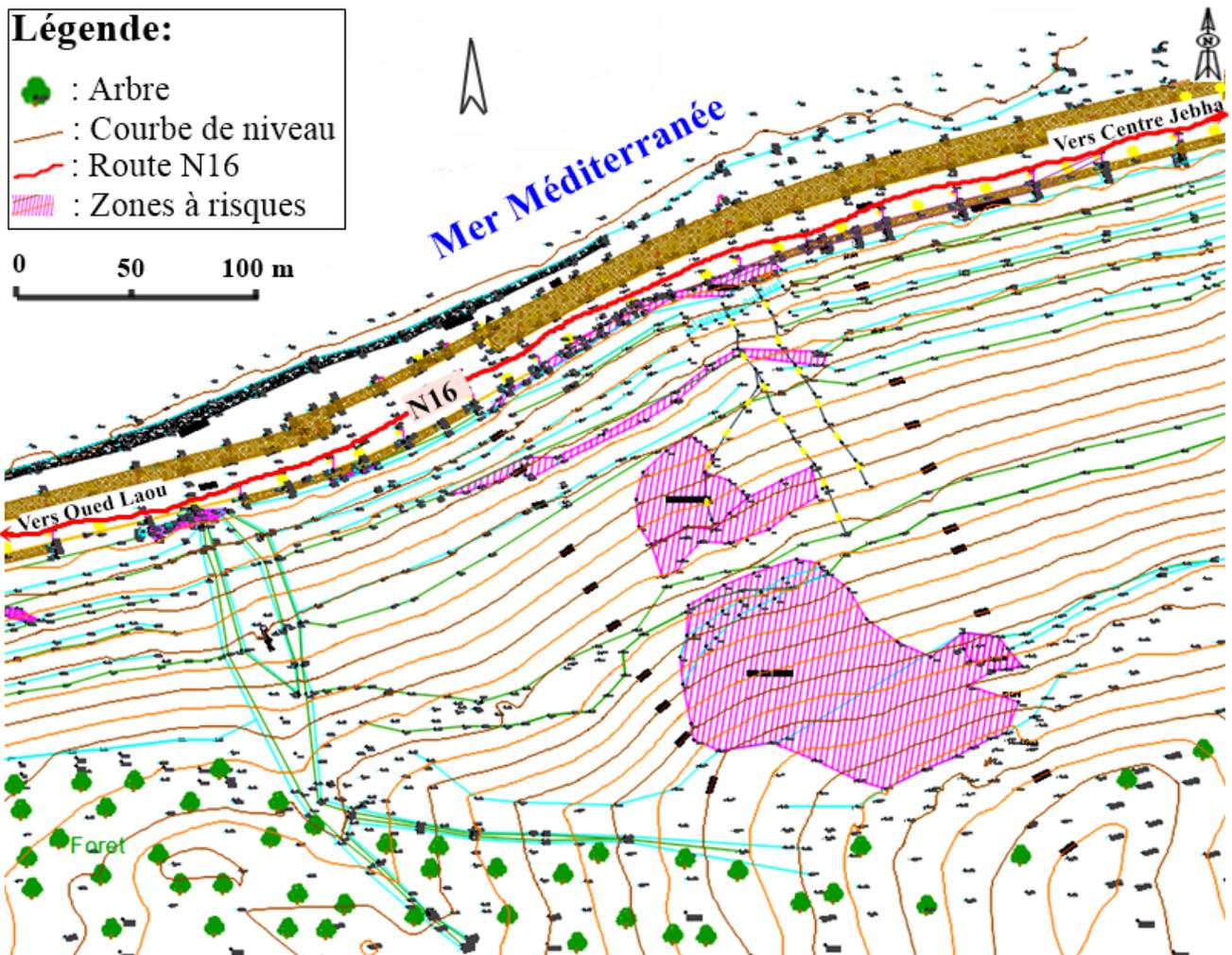


Figure 7. Levée topographique au 1/500 effectué en septembre 2020.
Figure 7. Topographic survey at 1/500 carried out in September 2020.

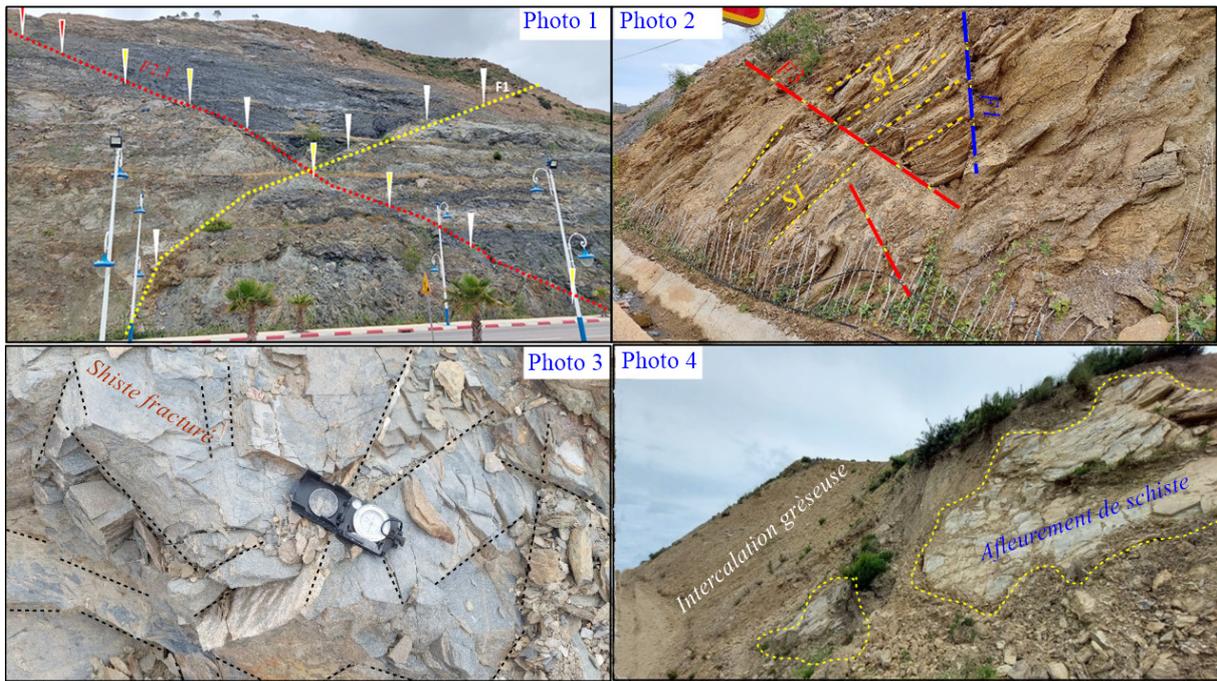


Photo 1. Plans des deux failles suivant des directions différentes.

Photo 1. Traces of two faults following different planes.

Photo 2. Schiste marneux. Les plans de schistosité S1 sont traversés par un plan de faille.

Photo 2. Marly schist. The S1 schistosity planes are crossed by a fault plan.

Photo 3. Fractures observées sur le terrain dans les formations de schiste.

Photo 3. Fractures observed in the field in shale formations.

Photo 4. Intercalation des formations de schiste marneux avec des lits de grès.

Photo 4. Intercalation of marly shale formations with sandstone beds.

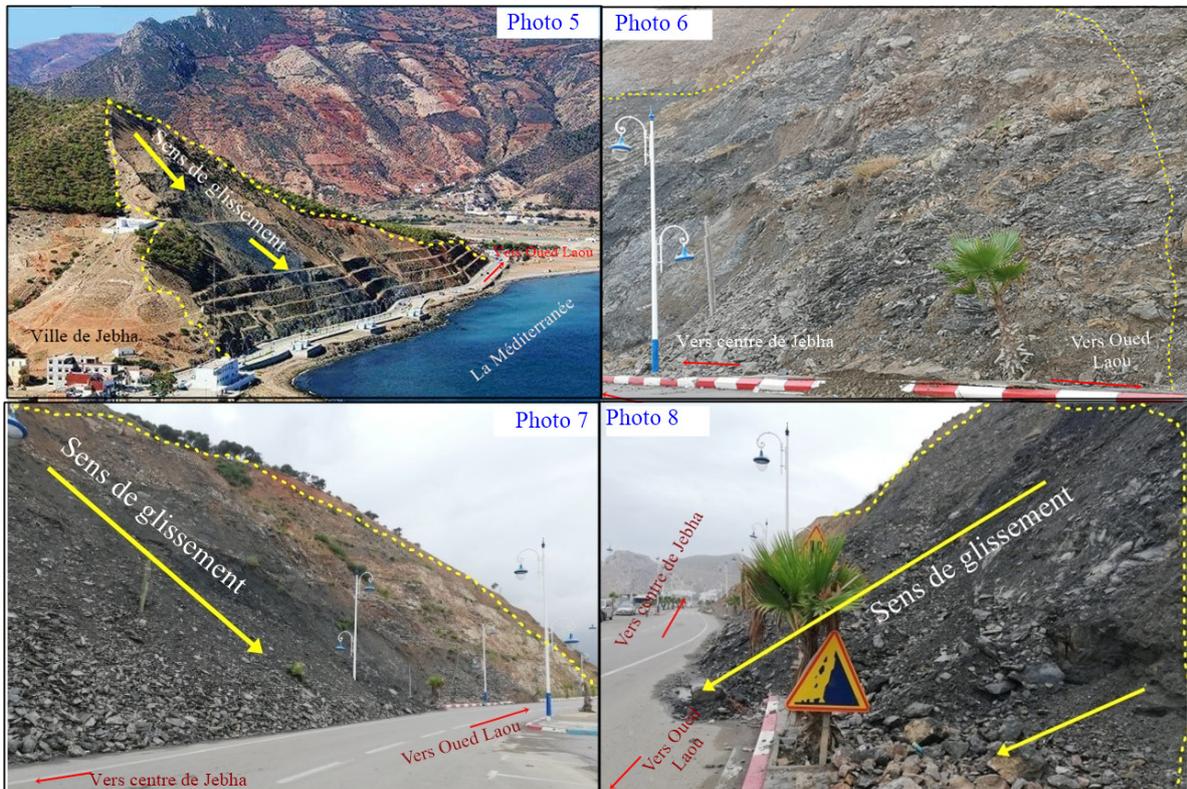


Photo 5, 6, 7, 8. Sens de glissement et état de dégradation.

Photo 5, 6, 7, 8. Slip direction and state of degradation.

ETUDE 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 (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 (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.

Etude géotechnique

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. 8), 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°).

Les carottes obtenues ont été analysées visuellement et aussi au laboratoire pour définir la lithologie à chaque profondeur (Fig. 9). 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 2022). Ces essais nous ont permis de définir au niveau de chaque forage : la pression de fluage Pf, la pression limite Pl 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.

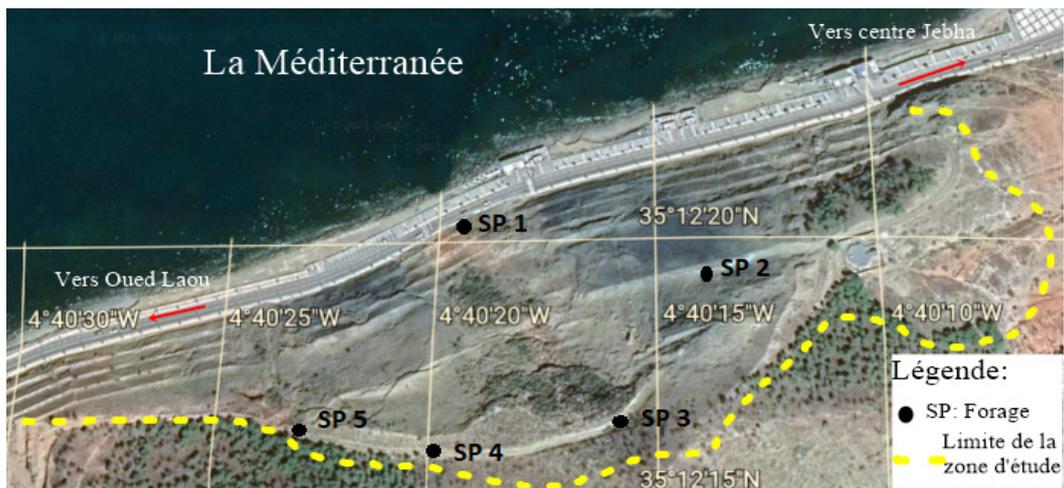


Figure 8. Implantation des cinq points de forage sur le site d'étude.

Figure 8. Location of the five drilling points on the study site.



Figure 9. Exemple de carotte. Première planche des sondages SP1 & SP3 (Profondeur 0 à 7 mètres).

Figure 9. Example of a core sample. First plate of holes SP1 & SP3 (Depth 0 to 7 meters).

Etude géophysique

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 (Descloitres & Ritz 1994), 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 flute 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 spatial et la profondeur d'investigation, nous avons opté pour le dispositif combiner Wegener-Schlumberger, la distance inter-électrodes était fixée à 10 m.

Le profile a été implanté parallèlement à la topographie et perpendiculairement au sens de glissement et passant par le sondage carotté SCP 02 au niveau du 5ème palier des risbermes (Fig. 10). 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 carrées régularisée (Zhdanov & 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 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 :

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

$C C$: Operateur de lissage ;

$W W$: Matrice des erreurs relatives des mesures ;

$m m$: Vecteur des paramètres du modèle ;

$\mu \mu$: Paramètre de régularisation ;

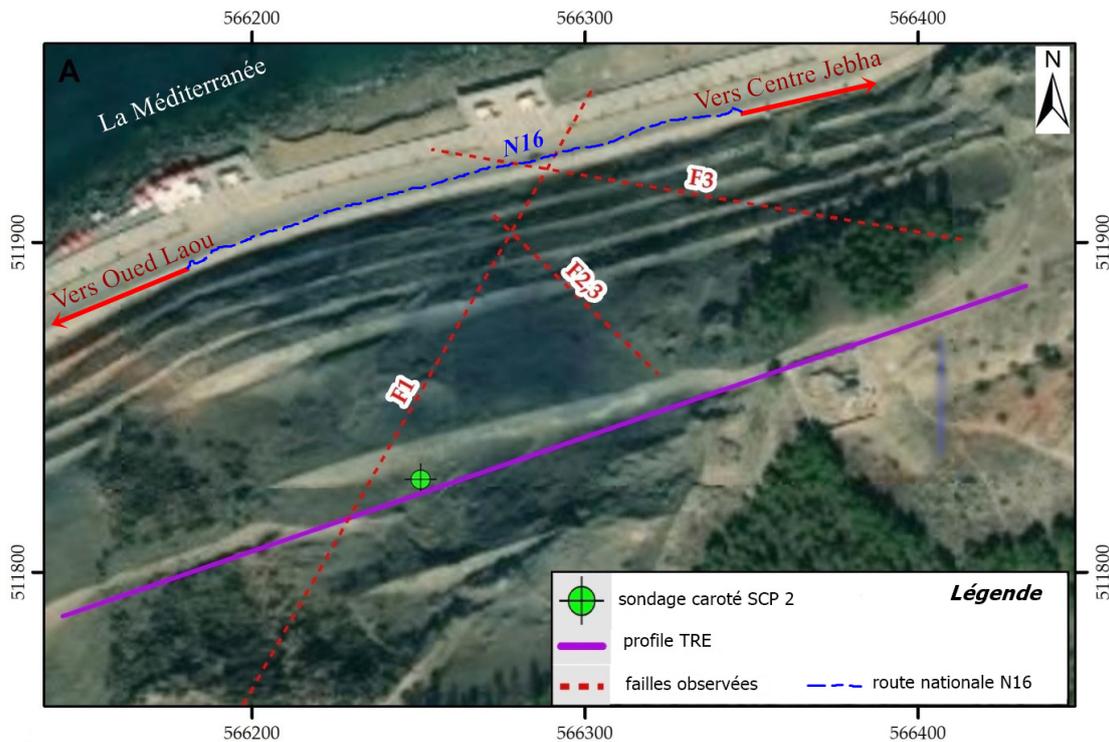


Figure 10. Implantation du profil parallèlement à la topographie et perpendiculairement au sens de glissement et passant par le sondage carotté SCP 02.

Figure 10. Layout of the profile parallel to the topography and perpendicular to the direction of the slide and passing through the SCP 02 core hole.

$\Delta f \Delta f$: Vecteur d'écart entre les valeurs calculées et mesurées ;

RR : Facteur de mise au point.

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.

RESULTATS 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 littoral (Photo. 9). Des photos anciennes montrent que la colline était couverte par une végétation assez dense (Photo. 10), ce qui permet de conclure que les schistes qui affleurent actuellement étaient couverts par une croûte 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.

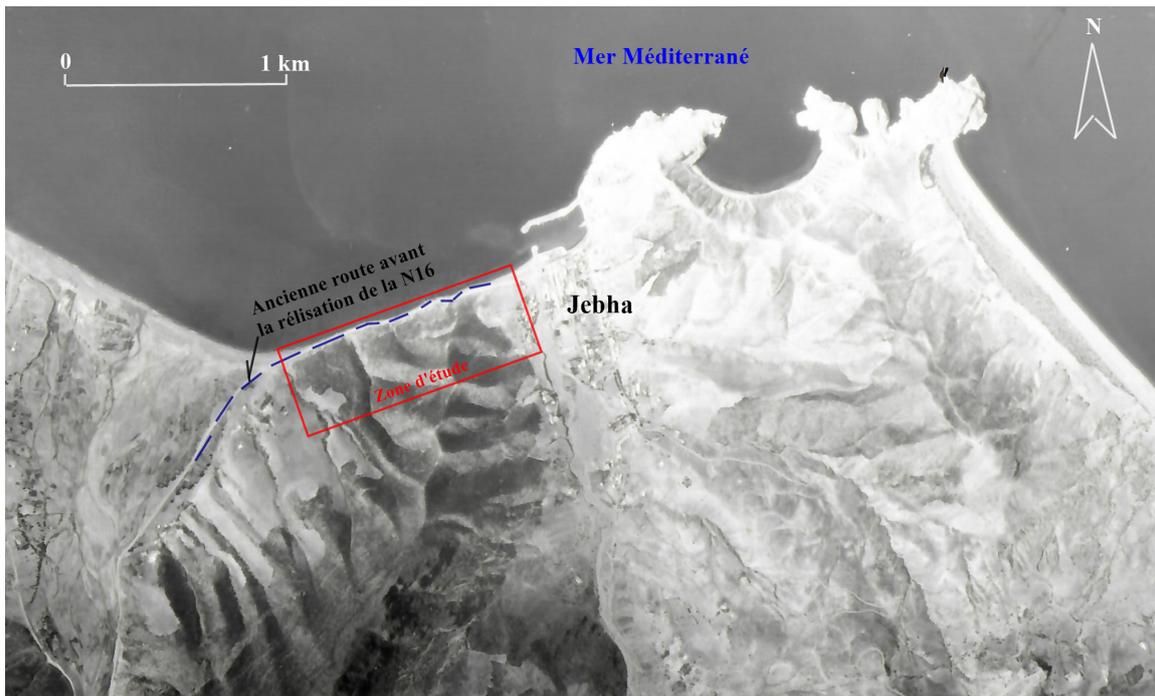


Photo 9. Photo aérienne de la région de Jebha en 1986 (Source: service cadastral).
Photo 9. Aerial photo of the region of Jebha in 1986 (Source: cadastral service).



Photo 10. Photo amateur montrant l'état des lieux avant l'élargissement de la voie et les travaux de déblais et remodelage du talus (2005).
Photo 10. Amateur photo showing the condition of the site prior to the track widening and the cut and reshape of the embankment (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. 13). 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. 11) confirme les résultats des sondages (Fig. 13) 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. 12).

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 marqué par une faible résistivité électrique, d'environ 40 Ohm.m (Fig. 11). 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.

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. 14).

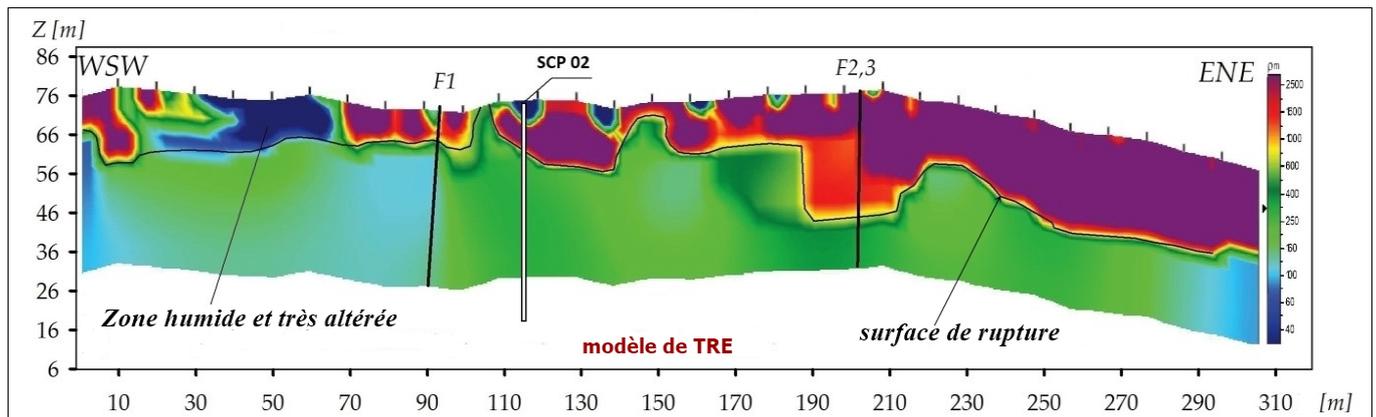


Figure 11. Modèle de la TRE obtenu et localisation des zones altérées.

Figure 11. TRE model obtained and identification of weathered area.

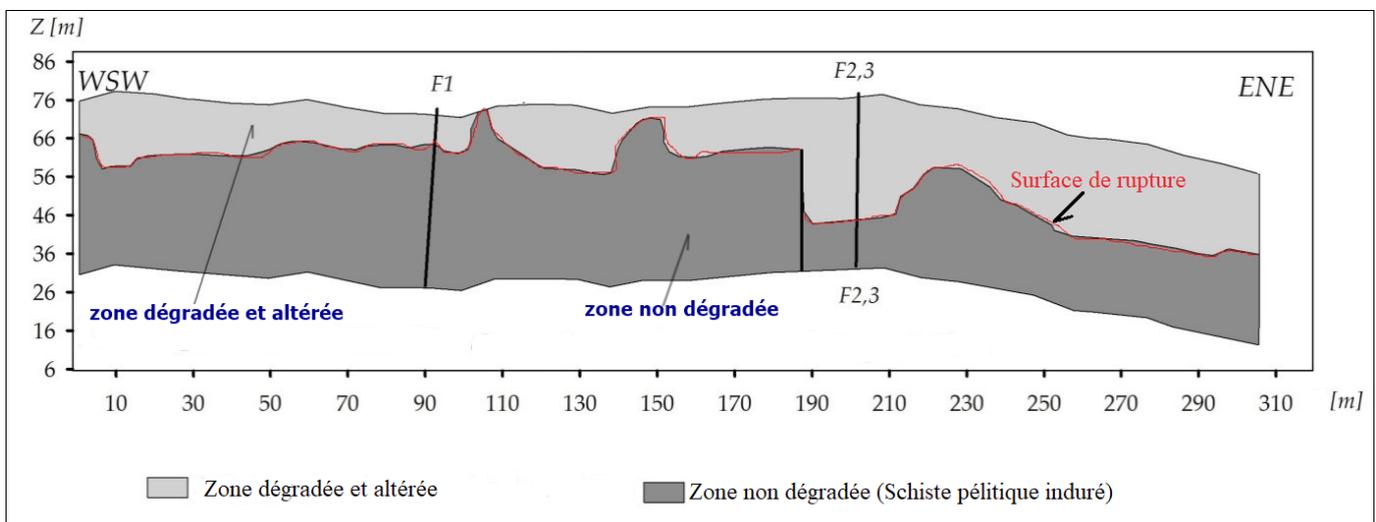


Figure 12. Modèle TRE simplifié de la zone d'étude.

Figure 12. Simplified TRE model of the study area.

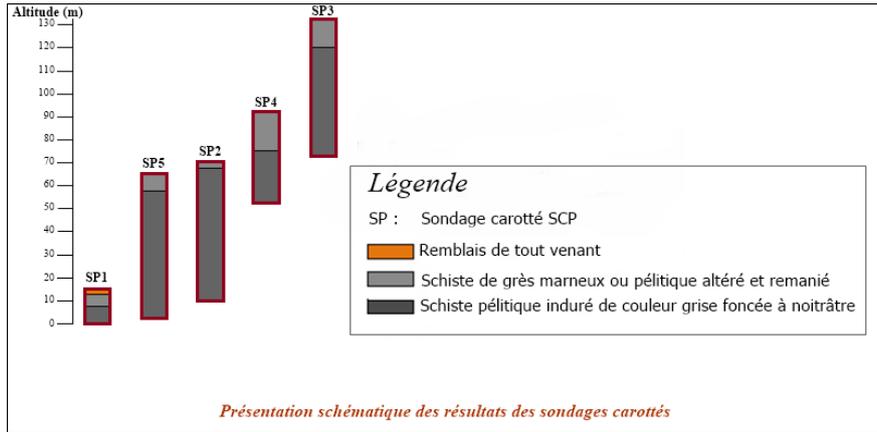


Figure 13. Schéma analytique des carottes obtenues au niveau des sondages.
 Figure 13. Analytical diagram of the cores obtained from the boreholes.

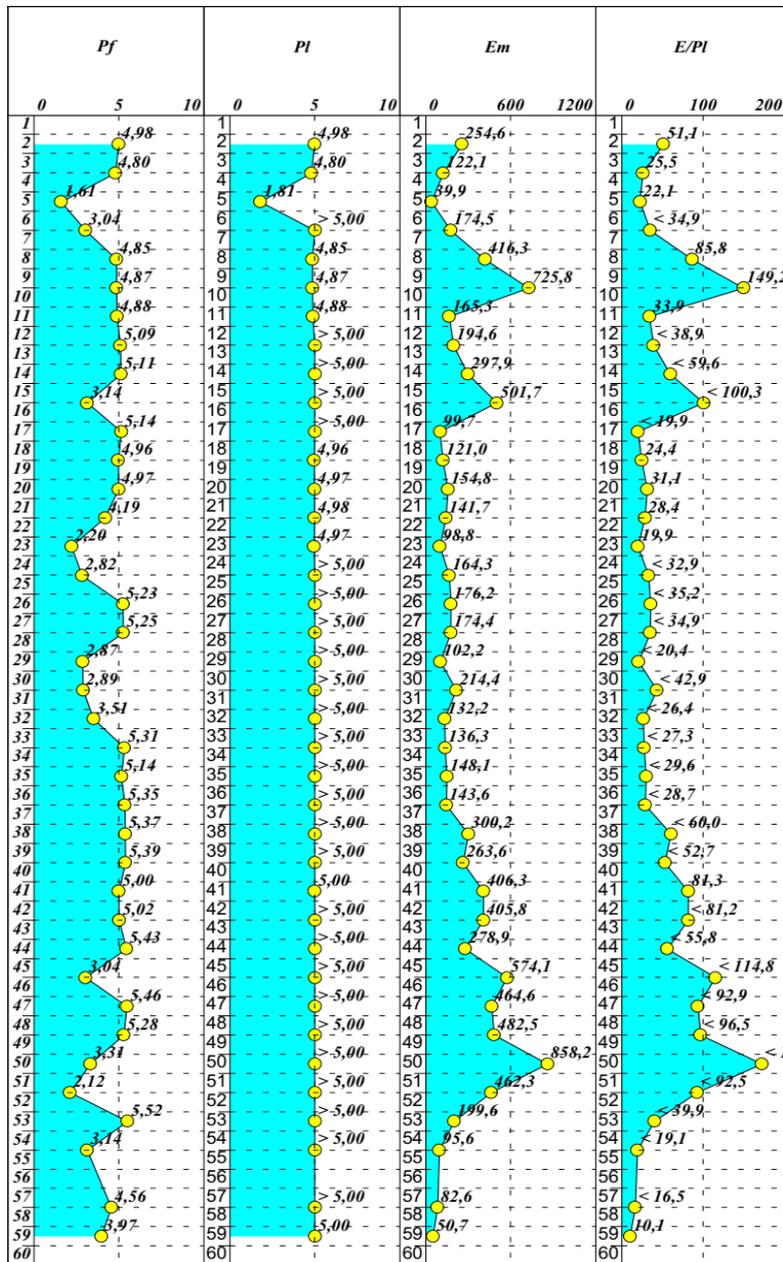


Figure 14. Résultats de l'essai pressiométriques de Ménard au niveau du sondage SCP 02.
 Figure 14. Results of the Menard pressure test at the SCP 02 borehole.

CONCLUSIONS

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 scindé 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 profil, et aussi l'exécution d'autres sondages carottés.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à présenter leur profonde gratitude à Mr. Hammou Mansouri, Directeur Adjoint, chargé des expertises et de l'ingénierie de conception géotechnique au sein du LPEE, pour avoir mis gracieusement les données géotechniques de notre versant d'étude. Ils adressent par ailleurs leurs vifs remerciements à l'éditeur du journal Hamid Slimani et aux évaluateurs anonymes pour leurs remarques justifiées qui ont permis au présent article de gagner en qualité.

REFERENCES

- Alilouch R., Morabiti K.E. & Mrihi A.E. 2017. Contribution à la connaissance hydrogéologique et hydrogéochimique des Aquifères de la région de Beni-Hassan (Rif Septentrional, Maroc). *European Scientific Journal*, 13, 441.
- 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, Section Sciences de la Terre*, 24, 33–40.
- Baud J. 2022. Classification pressiométrique des sols et des roches. Développements récents et applications <http://isc6.org/images/Cikkek/Sessions/ISC2020-154>
- Benmakhlof M., Galindo-Zaldívar J., Chalouan A. *et al.* 2012. Inversion of transfer faults : The Jebha-Chrafate fault (Rif, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 73, 33–43.
- Chalouan A., Michard A., El Kadiri K.H. *et al.* 2008. The Rif Belt. In : Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., & de Lamotte, D.F. (Eds.). *Continental evolution: The Geology of Morocco: Structure, stratigraphy, and tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction*; Series: Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 116, 100 p., Springer.
- De Capoa P., Di Staso A., Perrone V. *et al.* 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 Geosciences*, 339, 161–170.
- 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 p.
- Durand-Delga M., Hottinger L., Marçais J. *et al.* 1960. Données actuelles sur la structure du Rif. *Mémoires de la Société Géologique de France*, 1, 339–422.
- Durand-Delga M., Gardin S. & Olivier P. 1999. Datation des flyschs éocènes maurétaniens des Maghrébides: la formation du Jbel Tisirène (Rif, Maroc). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 328(10), 701–709.
- Elmoulat M., Ait Brahim L., Elmahsani A. *et al.* 2021. Mass movements susceptibility mapping by using heuristic approach. Case study: province of Tétouan (North of Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 1–19.
- El Fellah B. & Mastere M. 2015. The central Rif Mediterranean coast: Slope failures causative factors. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 37, 35–43.
- El Fellah B., Azzouz O. & Assebriy L. 1996. Exemple de glissement de terrain littoral sur la côte méditerranéenne des Bokoya entre Torrès et Badis, Rif, Maroc. *ORSTOM Réseau Érosion*, 16.
- El Gharbaoui A. 1981. La terre et l'homme dans la péninsule tingitane : Etude sur l'homme et le milieu naturel dans le Rif Occidental. Travaux de l'Institut Scientifique, série Géologie Géographie Physique, 15, 1–439.
- El Maz A., 1989. *Le métamorphisme régional méso-catazonal de la série métapelitique de Jbel-Sidi-Mohamedel Filali, et l'unité granulitique de Beni Bousera (Rif Interne), Maroc*. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, Paris.
- Gupta R.K., Agrawal M., Pal S.K. *et al.* 2019. Site characterization through combined analysis of seismic and electrical resistivity data at a site of Dhanbad, Jharkhand. *India Environmental Earth Sciences*, 78, 1–13.
- Harmouzi H., Nefeslioglu H.A., Rouai M. *et al.* 2019. Landslide susceptibility mapping of the Mediterranean coastal zone of Morocco between Oued Laou and El Jebha using artificial neural networks (ANN). *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1–18.

- Kornprobst J. 1974. Contribution à l'étude pétrographique et structurale de la zone interne du Rif (Maroc septentrional). *Notes et mémoires du service géologique du Maroc*, 256 p.
- 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 Processus Environnement*, 3, 335–352.
- Mastere M., Van Vliet Lanoë B., Ait Brahim L. 2017. Evaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain par approche probabiliste, application à la zone méditerranéenne entre Jebha et Oued Laou. *Press Universitaires de la Méditerranée, Editions Léone F et Vinet F, Géorisques*, 7, 169–178.
- Mastere M. 2020. Mass Movement Hazard Assessment at a Medium Scale Using Weight of Evidence Model and Neo-predictive Variables Creation, in: Rebai, N., Mastere, M. (Eds.), Mapping and Spatial Analysis of Socio-Economic and Environmental Indicators for Sustainable Development. *Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer International Publishing, Cham, pp. 73–85.
- Mastere M., El Fellah B., Olivier M. 2020. Landslides inventory map as a first step for hazard and risk assessment: Rif mountains, Morocco. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Section Sciences de la Terre*, 42, 49–62.
- Michard A., Saddiqi O., Chalouan A. *et al.* 2008. Continental Evolution : The Geology of Morocco. *Lecture Notes in Earth Sciences*, Vol. 116, Berlin Springer Verlag.
- 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.
- Morel J.L. & Julien M. 1992. Carte des mouvements récents du Rif au 1/500 000. Note et mémoire du Service géologique du Maroc, N° 365.
- Morel J-L. 2015. Etats de contrainte et cinématique de la chaîne rifaine (Maroc) du Tortonien à l'actuel. *Geodinamica Acta*, 3, 283–294
- Romagny A. 2016. *Évolution des mouvements verticaux néogènes de la chaîne du Rif (Nord-Maroc) : Apports d'une analyse structurale et thermo-chronologique*. Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis.
- Tahayt A. 2008. *Apport des mesures de la géodésie spatiale dans l'étude des déformations tectoniques actuelles dans la Méditerranée occidentale*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Zaagane M., Refas S., Abbache A. *et al.* Multisource data integration to investigate a 3D landslide morphology affecting an urban area: case of bordj bounaama (west algeria). *Mining Science*, 27, 227–251.
- Zhdanov M. & Portniaguine O. 1999. Focusing geophysical inversion images. *Geophysics*, 64(3), 874–887.

Manuscrit reçu le 04/11/2022

Version révisée acceptée le 13/07/2023

Version finale reçue le 20/07/2023

Mise en ligne le 24/07/2023