

Impact des instabilités de terrains sur les infrastructures routières dans le Rif central méridional (Cas du PK 144 de la RR 408 " -Taounate, Maroc)

Impact of land instability on road infrastructure in the Southern Central Rif
(Case of PK 144 on regional road 408 - Taounate, Morocco)

Impacto de la inestabilidad del terreno en las infraestructuras viarias del centro sur del Rif (Caso del PK 144 de la RR 408 -Taounate, Marruecos)

Khalid El-Moudni

khelmoudni@gmail.com  0009-0005-5453-6710

Ministère de l'Éducation nationale, du Préscolaire et des Sports, Académie Régionale de L'Education et de Formation,
Tanger – Tétouan - Al Hoceïma. BP 5183 - Tétouan. Av Mohammed Bannouna, Boujarrach. 93040 Tétouan, Maroc.

Abdelghani Houari

gartet.abdelghani@gmail.com  0000-0002-7037-584X

Département de Géographie, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Sais-Fès, Université Sidi Mohamed
Ben Abdellah, Fès, BP 59, Route Immouzer. 30000 Fès, Maroc.

El Houssaine Afkir

elafkir@gmail.com  0009-0009-4233-4491

Equipe d'Etudes et Recherches en Géographie et Développement Durable, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines,
Tétouan, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc. RN 16. BP 210. 93150, Martil, Maroc.

INFO ARTÍCULO

Reçu: 31-05-2024
Révisé: 16-12-2024
Accepté: 14-01-2025

MOTS-CLÉS

Rif central méridional
Unité structurale
Instabilité
Glissement

RÉSUMÉ

La zone d'étude appartient à l'unité structurale externe du Rif marocain, et plus précisément au sein du Rif central méridional (domaine du Mesorif), qui est considérée comme une zone de transition entre deux grandes unités; le Prérif au sud et le Rif interne au nord. En effet, ces zones se caractérisent par une forte susceptibilité à l'instabilité des versants, sous l'influence de plusieurs facteurs, dont les principaux sont ; la prédominance de roches tendres, reliefs accidentés à pentes abruptes, l'agressivité du climat, la forte érosion fluviale..., ainsi que les formes d'exploitation du sol, le déboisement et l'ouverture des routes. L'instabilité des versants affecte négativement les biens des populations et les infrastructures, notamment les routes et les ouvrages d'art associés. Dans la présente étude, nous traiterons cette problématique en présentant un cas typique des phénomènes d'instabilité dans le Rif central méridional, sur la route régionale n°408 au point kilométrique 144, qui est affecté par une dynamique superficielle (ravines et coulées) et semi-profonde combinant affaissement et glissement à une vitesse moyenne atteint 30,7 cm entre 2016 et 2021. Afin d'atteindre les objectifs de ce travail, une méthodologie scientifique a été adoptée, basée sur la recherche de terrain (suivi temporel du mouvement de glissement par l'utilisation de barres de fer), la réalisation d'analyses en laboratoire pour déterminer les caractéristiques du sol, et l'exploitation des études géotechniques qui ont réalisé des sondages jusqu'au substratum rocheux.



KEYWORDS

Southern central Rif
Structural unit
Instability
Landslide

ABSTRACT

The study area belongs to the external structural unit of the Moroccan Rif, and more precisely within the southern Central Rif (Mesorif domain), which is considered a transition zone between two major units: the Prérif to the south and the Internal Rif to the north. Indeed, these areas are characterized by a high susceptibility to slope instability, under the influence of several factors, the main ones being: the predominance of soft rocks, rugged terrain with steep slopes, aggressive climate, strong fluvial erosion..., as well as land use practices, deforestation, and road construction. Slope instability negatively affects the populations' properties, and infrastructure, particularly roads and associated engineering structures (bridges, culverts, etc.). In this study, we will address this issue by presenting a typical case of instability phenomena in the southern Central Rif, on regional road 408 at kilometer point 144, which is affected by surface dynamics and semi-deep erosion combining subsidence and landslide at an average speed of 30.7 cm between 2016 and 2021. In order to achieve the objectives of this work, a scientific methodology has been adopted, based on field research (temporal monitoring of the sliding movement using iron bars), laboratory analyses to determine the soil characteristics, and the use of geotechnical studies that have carried out deep boreholes down to the bedrock.

PALABRAS CLAVE

Rif centro sur
Unidad estructural
Inestabilidad
Deslizamiento

RESUMEN

La zona de estudio pertenece a la unidad estructural externa del Rif marroquí, y más precisamente dentro del Rif centro sur (dominio del Mesorif), que se considera una zona de transición entre dos grandes unidades; el Prerif al sur y el Rif interno al norte. En efecto, estas zonas se caracterizan por una fuerte susceptibilidad a la inestabilidad de las laderas, bajo la influencia de varios factores, entre los que destacan: la predominancia de rocas blandas, relieves accidentados con pendientes abruptas, la agresividad del clima, la fuerte erosión fluvial..., así como las formas de explotación del suelo, la deforestación y la apertura de carreteras. La inestabilidad de las laderas afecta negativamente a los bienes de las poblaciones y a las infraestructuras, especialmente las carreteras y las obras de fábrica asociadas. En el presente estudio, trataremos esta problemática presentando un caso típico de los fenómenos de inestabilidad en el Rif centro sur, en la carretera regional nº408 en el punto kilométrico 144, que se ve afectado por una dinámica superficial y semiprofunda que combina subsidencia y deslizamiento a una velocidad media que alcanza los 30,7 cm entre 2016 y 2021. Para alcanzar los objetivos de este trabajo, se adoptó una metodología científica, basada en la investigación de campo (seguimiento temporal del movimiento de deslizamiento mediante el uso de barras de hierro), la realización de análisis en laboratorio para determinar las características del suelo, y la explotación de los estudios geotécnicos que han realizado perforaciones profundas hasta el sustrato rocoso.

9

1. INTRODUCTION

Les risques naturels constituent aujourd'hui l'un des principaux enjeux et contraintes auxquels le monde est confronté, en raison de leurs conséquences néfastes sur les plans environnemental, économique et social (Sharpe, 1938; Tricart, 1977; Gueremy *et al.* 1987; Flageollet, 1989; Marre, 1998; Yvette, 2003; Olivier, 2002 et 2006). Le Maroc, pays méditerranéen caractérisé par une grande diversité géologique et climatique, est particulièrement vulnérable à ces aléas. Les phénomènes extrêmes tels que les inondations, les sécheresses, les séismes et les mouvements de terrain y sont récurrents, engendrant des conséquences socio-économiques et environnementales de plus en plus importantes (Gartet, 2007 et 2010; Suter, 1965; Morel, 1987). Ces événements représentent une menace pour les populations et les biens, et entravent le développement des régions touchées.

En raison de la fragilité des formations rocheuses, de l'agressivité climatique, de la forte pente et des interventions anthropiques non maîtrisées, la région du Rif est particulièrement exposée aux phénomènes morphodynamiques sur les versants et aux processus hydrodynamiques en bordure (berges) des cours d'eau (Lacoste, 1934; Suter, 1980; Leblanc, 1975; Maurer, 1964 et 1968; Al Karkouri, 2003). En conséquence, ce domaine se caractérise par une grande diversité de phénomènes (glissements, éboulements, coulées boueuses, affaissements, érosions fluviales...) qui menacent la stabilité des infrastructures routières et



des ouvrages d'art associés (Yazidi, 2002 ; Janati Idrissi, 2013; El-Moudni 2008 et 2022). Ces phénomènes engendrent d'importants dégâts matériels et économiques, compromettant ainsi les projets de développement socio-économique. C'est dans ce contexte que la problématique de l'instabilité des terrains a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs.

Notre étude se concentrera sur le domaine du Rif central méridional, qui est fortement affecté par l'instabilité des versants, entraînant une dégradation continue des infrastructures routières. Cette forte récurrence est liée à la prédominance de formations géologiques fragiles, à la forte pente des terrains, à un réseau hydrographique dense, à l'intensité des pluies et à la construction de routes dans des zones à risque. À travers cette étude, nous présenterons un cas typique du domaine de Mesorif, au niveau de la route régionale 408 au point kilométrique 144. À cet endroit, l'axe routier est soumis à une dynamique complexe combinant des processus superficiels tels que les ravines et les coulées boueuses, entraînant l'obstruction des canalisations et la déséquilibre des remblais, ainsi que des instabilités semi-profondes comme d'affaissement et de glissement, avec une vitesse moyenne de 30,7 cm par an.

Cette étude vise à caractériser les processus d'instabilité des versants et à évaluer leur impact sur les infrastructures routières dans le domaine du Rif central méridional. A travers une approche géographique et géomorphologique; combinant travail de terrain (suivi l'évolution des phénomènes) et étude documentaire (rapports géotechniques, cartes et données climatiques), nous chercherons à identifier les facteurs de la genèse, de déclenchement et de réactivation de ces phénomènes.

2. LE CONTEXTE GENERAL DU MILIEU ET DU SITE ETUDIE

La zone d'étude est située dans les montagnes du Rif, plus précisément dans sa partie centrale méridionale, caractérisée d'un point de vue structural par la présence d'unités sous forme de nappes de charriages (nappes d'Aknoul, de Tanger, de Senhaja, unité de Loukous, fenêtres métamorphiques, zone de couverture tertiaire et zones de dépôts récents), constituées d'une structure géologique très complexe, affectées par une série d'accidents structuraux (failles et plis), caractérisée par une prédominance de roches friables, meubles et sensibles à l'instabilité (Asebriy, 1984; Poujol, 2014; Yazidi *et al.*, 1995). Ce domaine est traversé par plusieurs oueds, dont oueds d'Oudiyar, Oudeur, Aoulay, Amzez, Sra..., se caractérisent par un réseau de drainage orientés du nord vers le sud, et ils convergent (se rejoignent) tous au niveau de l'oued Ouergha qui dessine sa forme sub-arquée depuis l'est vers l'ouest (figure 1).

Le climat du Rif central méridional est un climat méditerranéen avec des variations locales importantes dues à l'altitude et à l'influence maritime. Il se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides, avec des précipitations concentrées en automne et en hiver. Concernant la température, en étés est chaud et sec, atteindre au moyen 37,1°C, et en hivers est doux et humides, avec des températures de 4,7°C en moyen (selon la station d'Ourtzagh). Tandis que les précipitations ; sont concentrées principalement en automne et en hiver, avec un moyen annuel varie considérablement en fonction de l'altitude et de l'exposition des versants, où les zones montagneuses reçoivent plus de précipitations (736,9 mm en moyen selon la station Bab Ouender, période 1956-2021) que les dépressions (511,2 mm en moyen selon la station d'Ain Aïcha, période 1981-2021).

Ce domaine est caractérisé par une forte pression démographique, avec une densité de population variant entre 144 et 210 hab./km² (cas des communes d'Ain Mediouna, Sidi Yahya Beni Zeroual, Ain Aïcha...), dont la plupart des activités économiques sont liées à l'agriculture et au commerce. Parmi les agglomérations les plus importantes de cette région, on cite la ville de Taounate, puis des centres semi-urbains émergents tels que Galaz, Ghafsaï, Bouhouda, Ain Aïcha, Ourtzagh, Ain Mediouna, Khlalfa...etc.

Le site instable est localisé à la convergence des coordonnées géographiques 34° 31' 54,2" Nord et 04° 57' 20,1" Ouest, à une altitude de 192 mètres (figure 2). Le versant est orienté vers l'ouest, sa pente caractérisée par une forte irrégularité spatiale. Le talus, particulièrement au début, atteint une inclinaison de 75° et montre des signes de fragmentation (fissures) au niveau de la roche. Les pentes s'adoucissent ensuite, variant entre 40° et 50° jusqu'au point kilométrique 144+300. D'autre part, le site étudié est caractérisé par la prédominance de formations argileuses peu perméables.

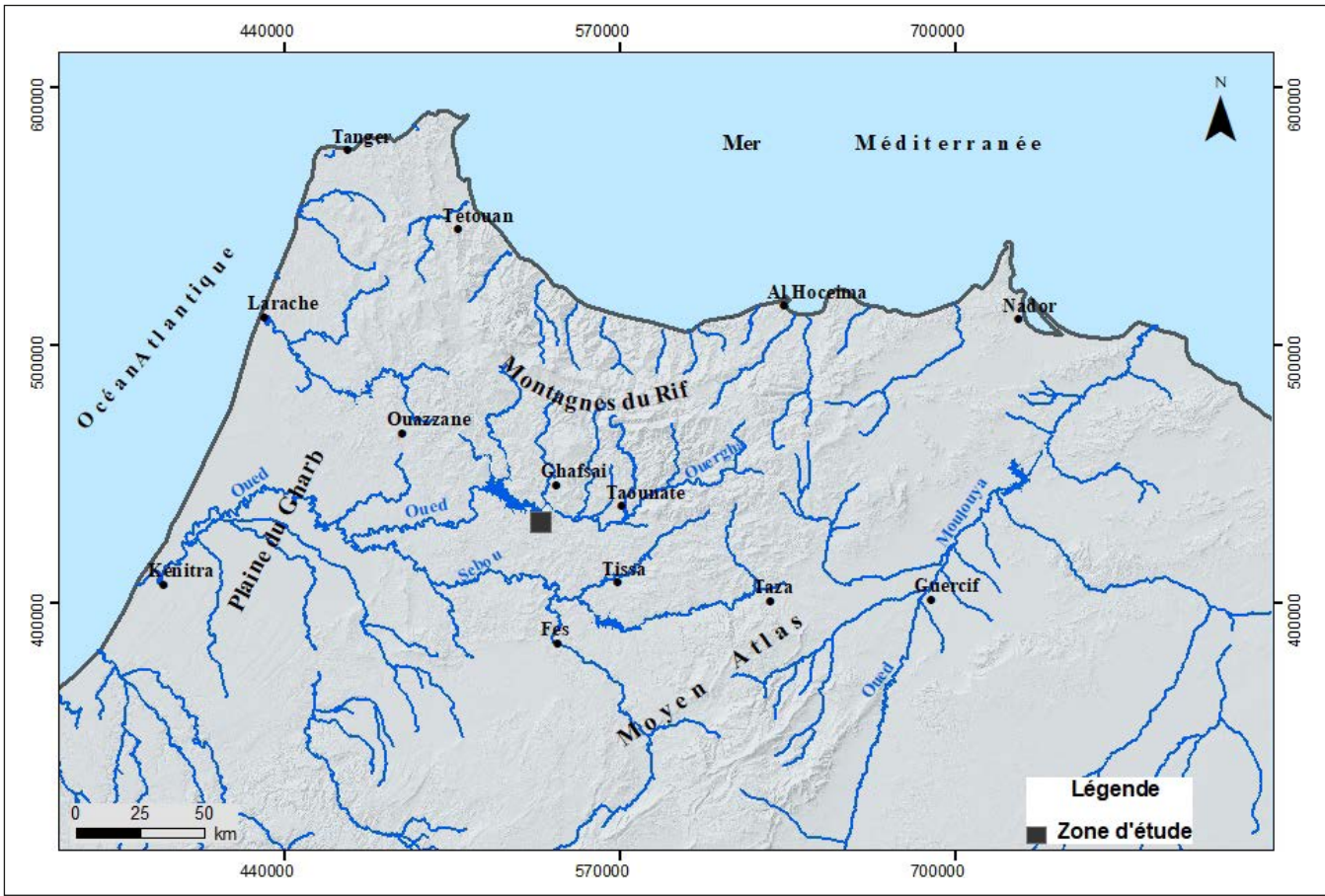


Figure 1. Localisation générale de la zone d'étude. Source: Cartes topographiques –élaboration propre–.

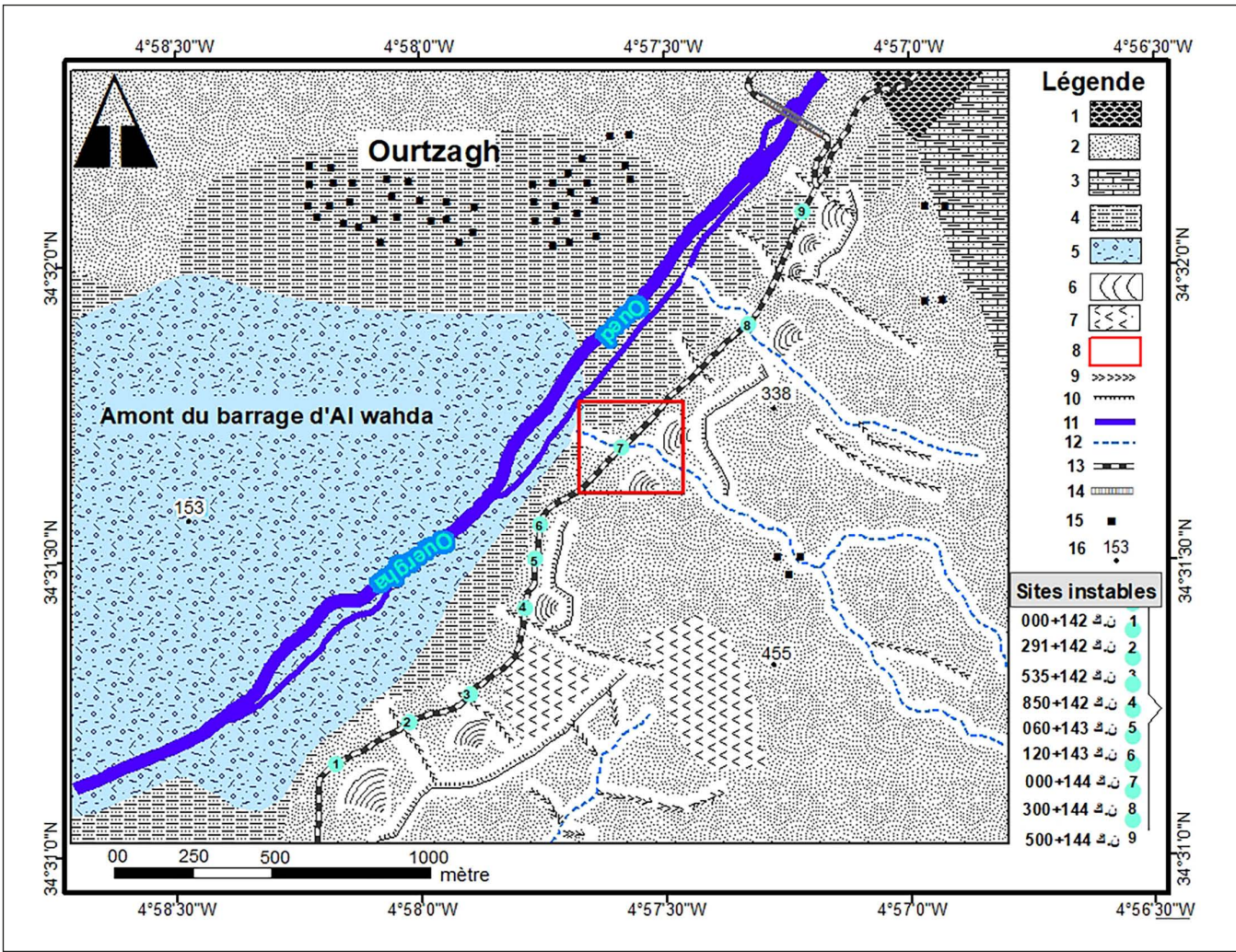


Figure 2. Localisation du site instable dans son contexte général. Source: Images satellites (2019), recherche de terrain et carte géologique du Rif au 1/500.000 –élaboration propre–. 1: Conglomérat noir et grès massifs à silex, 2: marne bleue, affleurements gréseuses et conglomérat, 3: flysch gréseux et calcaire, 4: basses terrasses, 5: zone submergée par les eaux du barrage, 6: coulées boueuses et glissements, 7: badlands, 8: le site étudié, 9: ravines, 10: niches d'arrachement, 11: oued Ouergha, 12: cours d'eau saisonnier, 13: RR 408, 14: pont, 15: habitation, 16: point d'altitude.



3. MATERIELS ET METHODES

3.1. Etude et analyses granulométriques des sols

Ce processus consiste à soumettre un échantillon de sol à un tamis, qui permet de passer un échantillon de matériau à travers une série de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les mailles ont des ouvertures de plus en plus petites de haut en bas. Les particules dont la taille est supérieure à l'ouverture du tamis sont retenues, tandis que les particules plus petites le traversent et sont collectées par le tamis inférieur. Les matériels utilisés dans ce processus sont; une série de tamis normalisés (norme NF P 18-552), un agitateur mécanique, une balance de précision, un collecteur de fond et un pinceau. Les procédures pratiques suivies dans ce processus sont successivement les suivantes: préparation de l'échantillon (sécher l'échantillon et déterminer la masse totale M), montage de la série de tamis (d'ordre décroissant), verser l'échantillon sec sur le tamis supérieur, mettre en marche du tamis mécanique d'une durée de 10 minutes, peser des refus sur chaque tamis, et enfin de calculer le pourcentage de chaque fraction granulométrique par rapport à la masse totale de l'échantillon; soit pour le pourcentage passant au tamis i en fonction de l'équation $(M - \sum m_j) / M * 100$, ($j=1$ à i), ou pour le retenu sur le tamis i en fonction de $(m_i / M) * 100$.

D'autre part, et pour identifier et évaluer le comportement du sol, les essais de limites d'Atterberg ont été effectués, en utilisant la norme de NF P94-051. A travers ces essais, nous avons identifié les déterminants suivants:

- La limite de liquidité (LL) par la méthode de la coupelle de Casagrande;
- La limite de plasticité (LP);
- L'indice de plasticité (IP), qui est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, où : $IP = LL - LP$;
- L'indice de consistance (I_c), pour caractériser l'état hydrique du sol et d'évaluer sa consistance. La formule utilisée est: $IC = (LL - w) / IP$ (où : LL est la limite de liquidité, w est la teneur en eau, et IP est l'indice de plasticité).

12

3.2. Déterminer des propriétés mécaniques du substrat à partir des rapports géotechniques

La connaissance des caractéristiques mécaniques et granulaires des sols profonds permet de comprendre dans quelle mesure la formation rocheuse est sensible à certains phénomènes d'instabilité, notamment en ce qui concerne les glissements de terrain profonds, les affaissements et les effondrements. A cet effet, on a exploité les résultats des rapports géotechniques effectués par le service de l'Equipement et des Transports en partenariat avec le Laboratoire Public d'Etudes et d'Essais (LPEE). Les sondages profonds effectués dans le site étudié sont: trois sondages pressiométriques –SP– (pour calculer la portance du sol), et trois sondages pénétromètres dynamique –SPD– (pour but de déterminer la résistance dynamique), complétées par l'achèvement de puits par une pelle robotisée et des analyses de laboratoire. A partir de ces résultats, et afin de connaître les réactions du sol à différentes profondeurs, on a mesuré la pression de fluage (PF), la pression-limite (PL) et le module de pression (EM), (selon la classification de Ménard L., 1963).

3.3. Le travail de terrain et outils de mesurer l'affaissement de masse

Dans cette étude, le travail de terrain est constitué un processus indispensable pour ajuster l'instabilité du terrain. Il nous a permis d'observation directe, prendre des mesures, analyser les phénomènes et suivre leur évolution temporelle.

Pour le but d'évaluer la vitesse du glissement et compréhension de leur mécanismes, nous avons basé sur une technique simple à travers des tiges de fer. De sorte que 18 tiges (de 1,10 mètres) ont été



installées le long de la niche d'arrachement (figure 3), dont neuf sur la zone stable, opposées de façon perpendiculaire aux 9 tiges au niveau de la masse glissante. En mesurant régulièrement la position et la distance de déplacement entre les tiges opposées (exemple: la tige P5 située en face de la tige P'5). La vitesse de glissement est calculée en divisant le déplacement mesuré entre deux observations par l'intervalle de temps entre ces observations (où: $Vitesse = Déplacement / Temps$).

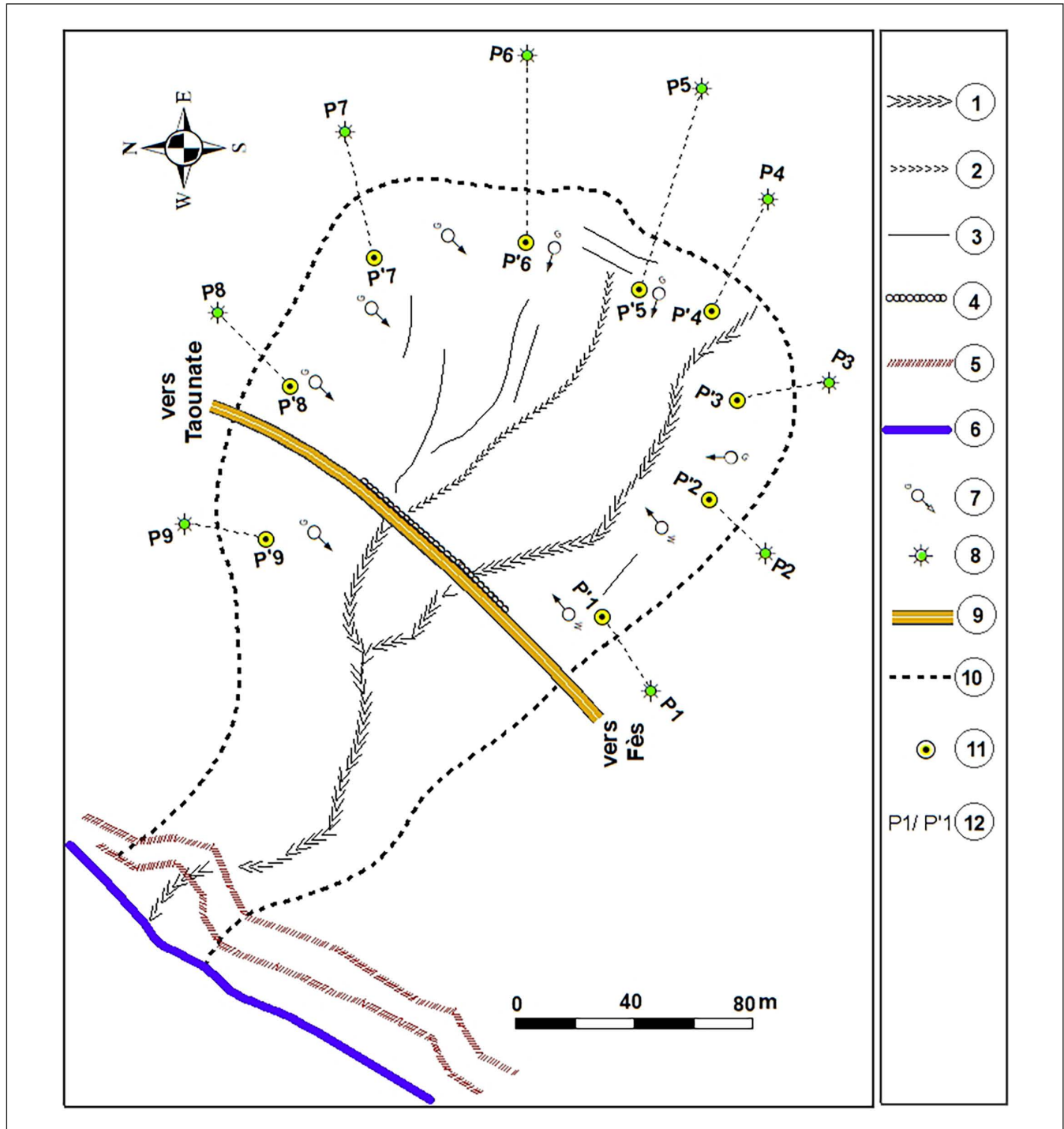


Figure 3. Quelques indicateurs d'instabilité et localisation des tiges de fer. Source: travail du terrain (entre 2016 et 2021 –élaboration propre-). 1: ravinement concentré profond ; 2: ravins ; 3: fissuration de retrait ; 4: zone d'accumulation des eaux et matériaux fins ; 5: terrasses résultant de la montée des eaux du barrage ; 6: oued Ouergha. 7: orientation de la pente et le mouvement de masse et des particules ; 8: barres de fer plantées en dehors de la masse glissée (zone stable) ; 9: tronçon routier menacé ; 10: limite de la masse en mouvement ; 11: barres de fer plantées sur la zone de glissement ; 12: la distance entre deux points de mesure.



4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Conditions locales de la genèse et évolution de la dynamique au pk 144

4.1.1. Impact des facteurs météorologiques sur l'instabilité du terrain

Le travail de terrain montre que les phénomènes d'instabilité sont étroitement liés à la quantité et à la durée des précipitations. En effet, la plupart des cas d'affaissements (réactivation du glissement) ont été enregistrés pendant et après des périodes de pluies intenses ou prolongées. Afin d'illustrer ce facteur, nous nous appuyerons sur la période climatique 2017-2019, en se basant sur la station d'Ain Aicha (figure 4).

L'analyse des données de la figure 4 permet de conclure que:

- De fortes variations des précipitations mensuelles sont observées au sein d'une même saison, ainsi qu'entre les saisons. Avec une grande variabilité interannuelle (exemple : 883.9 mm en 2017-2018 et 650.7 mm en 2018-2019);
- De fortes variations des précipitations mensuelles sont observées, tant au sein d'une même saison qu'entre les mêmes mois d'une saison à l'autre (Par exemple, les précipitations totales ont atteint 339 mm en mars 2017-2018, alors qu'elles n'ont pas dépassé 15,9 mm durant le même mois de la saison 2018-2019);
- Une forte concentration sur certaines périodes, avec des pics à 339 mm en mars 2017-2018 et 273,5 mm en octobre 2018-2019, entrecoupées de périodes sèches s'étendant de juin à août, ce qui caractérise un climat méditerranéen typique.

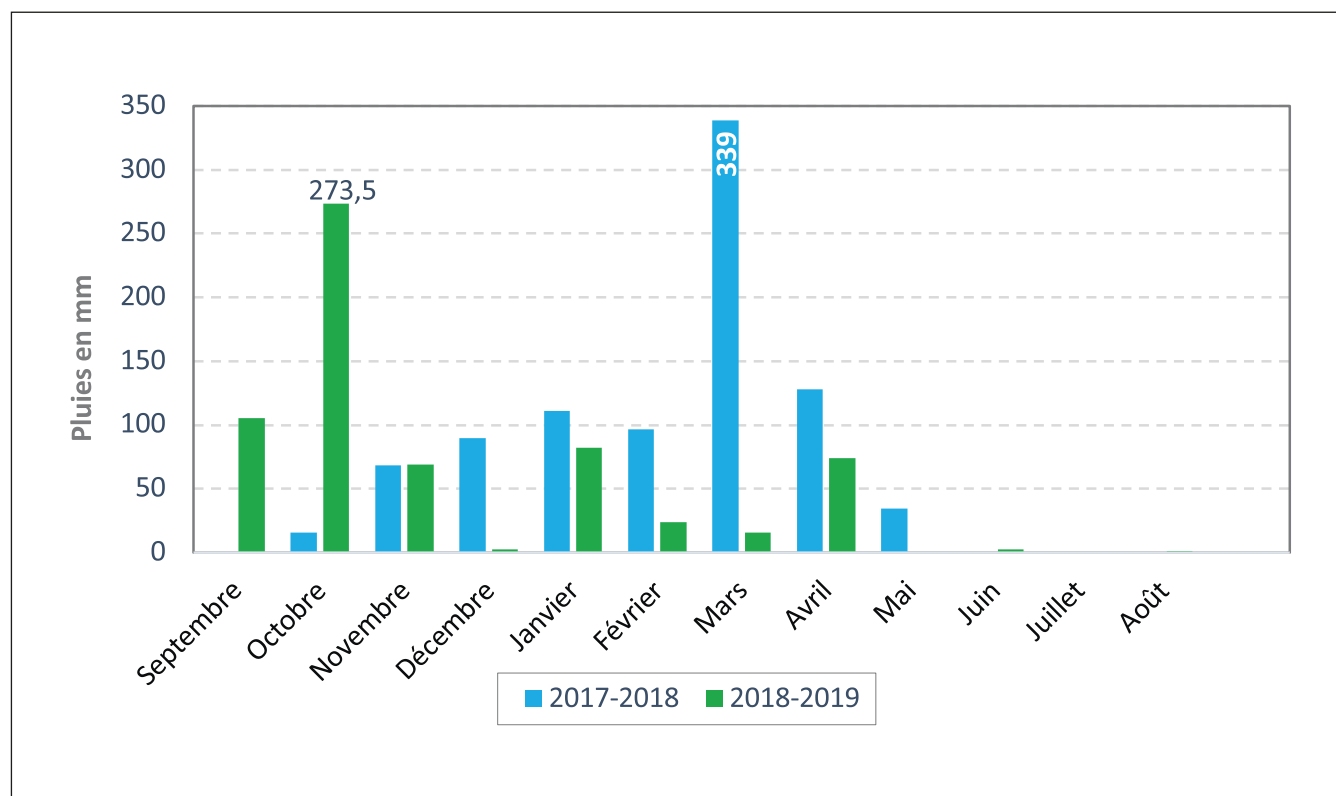


Figure 4. La distribution mensuelle des pluies au cours des saisons 2017-2018 et 2018-2019 selon la station d'Ain Aicha. Source: ABHS-Fès –élaboration propre-.

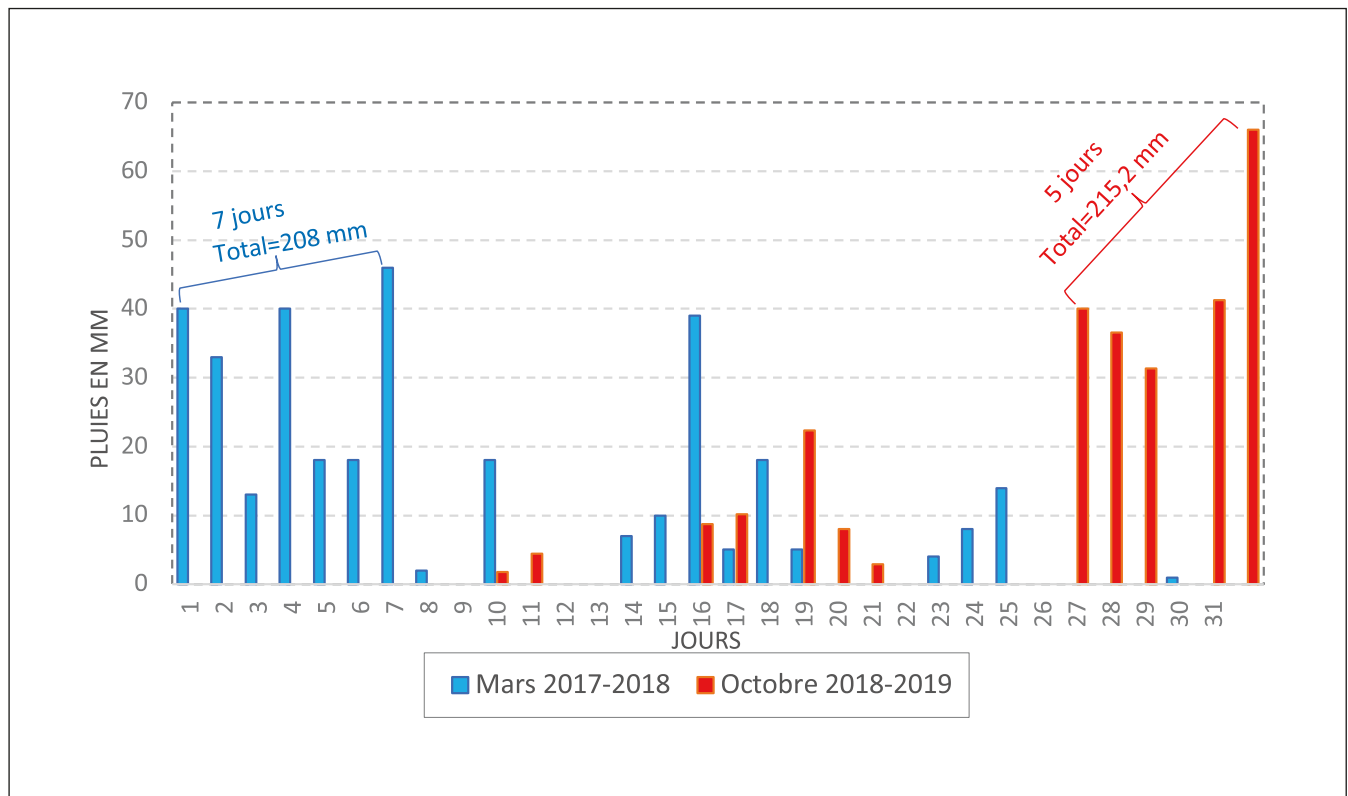


Figure 5. Répartition des pluies journalières au cours des mois de mars 2017-2018 et octobre 2018-2019 selon la station d'Aïn Aïcha. Source: ABHS-Fès –élaboration propre-.

Nous nous baserons sur les données des mois de mars 2017-2018 (à la saison d'hiver) et octobre 2018-2019 (à la saison d'automne), étant donné qu'ils sont les plus pluvieux. Ces données nous permettront de tirer les conclusions suivantes:

15

- Événements extrêmes et une grande variabilité des pluies journalières au cours des mois étudiés, avec des pics à 46 mm le 7 mars 2017-2018 et 66 mm le 31 octobre 2018-2019 (figure 5);
- Une forte concentration temporelle des pluies, avec des événements pluvieux de longue durée. En effet, la durée du 1^{er} à 7 mars 2017-2018, a enregistré 208 mm. Aussi entre le 26 et le 31 octobre (5 jours) 2018-2019, a enregistré 215,2 mm (figure 5). Ces événements accélèrent le débit du cours d'eau, augmentant ainsi son pouvoir d'érosion des berges.

A partir de suivi de terrain, on affirme que cette forte concentration des pluies a provoqué une déstabilisation de versant, se manifestant par la réactivation de glissement et l'apparition de nouveaux ravinements et coulées. Ce fait indique que cette instabilité est attribuable à l'augmentation significative de l'humidité des sols, favorisée par l'infiltration des eaux. Aussi les propriétés mécaniques des sols (la résistance et la cohésion) se sont détériorées, conduisant à des pertes d'équilibre et à de mouvement de masse.

D'autre part, en raison de la prédominance des formations argileuses, la température est un facteur influençant significativement les propriétés des sols, en particulier compte tenu des écarts de température importants qui caractérisent la zone d'étude (en moyenne 4,7°C en hiver et 37,1°C en été). L'action de la température se traduit par les mécanismes suivants (El-Moudni, 2022):

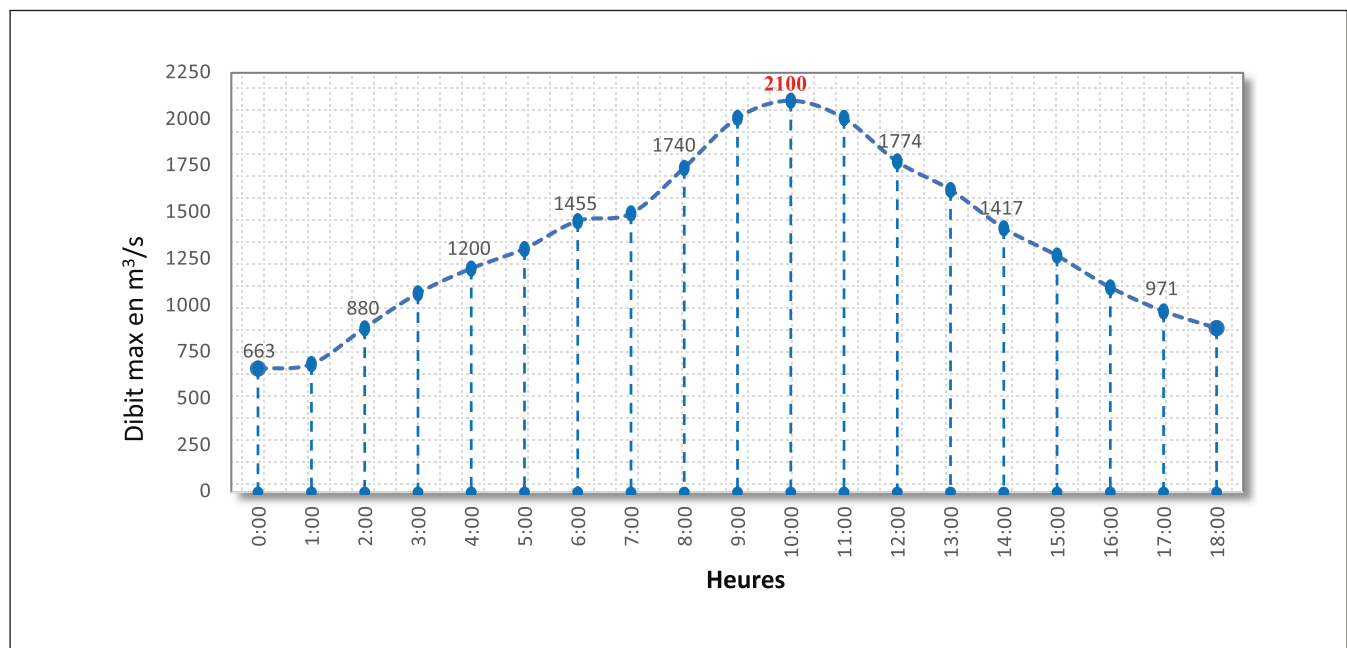
- Dilatation et contraction thermiques, résulte des variations de température, le sol se dilate lorsqu'il fait chaud et se contracte lorsqu'il fait froid. Ces mécanismes répétés entraînent l'apparition des fissures dans les couches (observation visuelle);



- Le séchage du sol à cause d'évaporation, qui réduit sa teneur en eau. Cette perte d'eau provoque un retrait des particules du sol et la genèse de pores, augmentant ainsi sa porosité et sa fragilité;
- Les variations de température, en altérant la cohésion du sol, favorisent sa dégradation et augmentent sa sensibilité aux contraintes.

4.1.2. Impact de la dynamique fluviale sur l'instabilité du versant

La dynamique fluviale est considérée comme l'un des principaux facteurs naturels déclenchant l'instabilité des versants dans le domaine du Rif central méridional. Ce domaine se caractérise par des conditions favorables accentuant l'impact de l'eau sur l'érosion des berges (Afkir, 1985; Gartet, 1994; El-Fengeur, 2009). Ces conditions sont caractérisées par la faible perméabilité des sols, pentes très abruptes, la densité du réseau hydrographique, la dégradation de la couverture végétale et la concentration des précipitations (Gartet, 2001; El-Ommal, 2021). Ces conditions contribuent à rendre la réponse hydrologique de l'oued Ouergha rapide et violente, avec des débits instantanés atteignant des niveaux records (tableau 1), menaçant ainsi la stabilité des versants et des infrastructures routières. Pour illustrer cela, prenons l'exemple de l'évolution du débit instantané de cet oued à la station d'Ain Aïcha le 14 janvier 2010, qui est passé de 663 m³/s à minuit à 2100 m³/s à 10 heures du matin (figure 6).



16

Figure 6. Évolution du débit instantané de l'Oued Ouergha entre minuit et 18 heures le 14 janvier 2010 à la station d'Ain Aïcha. Source: ABHS-Fès –élaboration propre-.

En général, l'impact de l'eau d'oued Ouergha sur l'instabilité du versant s'exerce par les mécanismes suivants:

- Sous-croisement: Où l'eau qui coule à la base du versant érode les matériaux, creusant ainsi un vide. Cette perte de support entraîne une diminution de la résistance du versant, le rendant plus susceptible de glisser;
- Erosion latérale: Le courant d'eau creuse les berges, entraînant un recul du versant et une modification de sa pente;
- Variations du débit: Ces variations peuvent induire des changements brusques de la force exercée sur le versant, favorisant ainsi leur instabilité.



Tableau 1. La situation du versant et du tronçon routier par rapport à la fréquence des écoulements de l'oued (mesure de 10 avril 2018).

Pk de la RR 408	La distance entre (en mètre)			Le niveau de l'eau en bas de versant (en mètre)
	La route et le pied du talus	Le bas de talus et le lit de l'oued à débit minimal	La route et le niveau d'eau à la hauteur maximale de débit	
144	175	68	146	29

Source: travail de terrain (élaboration propre).

De même, les observations et l'étude menée directement sur le terrain ont bien élucidé l'impact des eaux retenues dans le barrage El Wahda une fois en contact avec les bas versant limitrophes (photos 1 et 2). Les imbibitions de l'eau qui se font latéralement, contribuent à l'engorgement du substratum rocheux, et une fois le seuil de viscosité est franchi; les phénomènes liés à l'instabilité d'ensemble prennent naissance pour déclencher des empilements de matériaux arrachés de l'amont vers l'aval, sous l'effet de la gravité, volumes des vides et le poids de la masse décollée (Gartet, 1994; El-Moudni, 2022).



Photos 1 et 2. Hauteur importante de débit au niveau du pont de Ourtzagh (photo A au pk 144+500) et l'impact de l'eau imbibé sur le pied de versant étudié et sur le tronçon routier en question (photo B au pk 143+60). Source: auteurs, Cliché le 10 avril 2018.

4.1.3. Le rôle du mauvais drainage routier dans l'instabilité du versant

Le mauvais drainage routier est un facteur aggravant significatif dans l'instabilité de versant (Janati, 2013). Il contribue directement à la dégradation des sols et à l'augmentation du mouvement de la masse (photo 3). En effet, l'eau stagnante à proximité du tronçon routier affecte la stabilité du versant à travers de:

- Saturation du sol augmentant la pression interstitielle, et réduisant ainsi leur résistance au cisaillement et augmentant leur susceptibilité au mouvement (Boiffin, 1984);
- L'eau de ruissellement non canalisée augmente l'intensité d'érosion, creusant des ravines et fragilise la stabilité du versant. Aussi, elle entraîne le transport de particules fines, ce qui réduit la cohésion des sols et favorise le glissement;
- L'eau qui s'infiltre sous les fondations provoque des tassements différentiels, ce qui peut à son tour déstabiliser le versant;
- Augmentation de la pression hydrostatique à cause d'accumulation de l'eau dans les fissures, ce qui provoque des dilatations et des ruptures, favorisant ainsi le mouvement de masse.



Photo 3. L'accumulation des eaux de pluie au-dessus de tronçon routier, due à l'insuffisance et à l'inefficacité des systèmes de drainage. Est un phénomène plus fréquent dans le Rif central méridional. La photo prise de pk 144+100 de la route régionale 408. Source: auteurs, Cliché le 13 avril 2018.

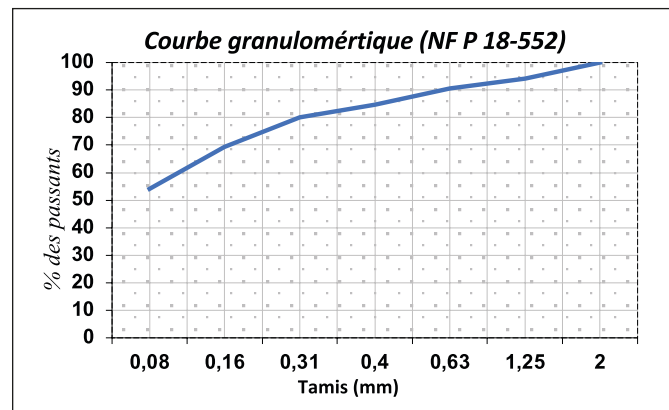
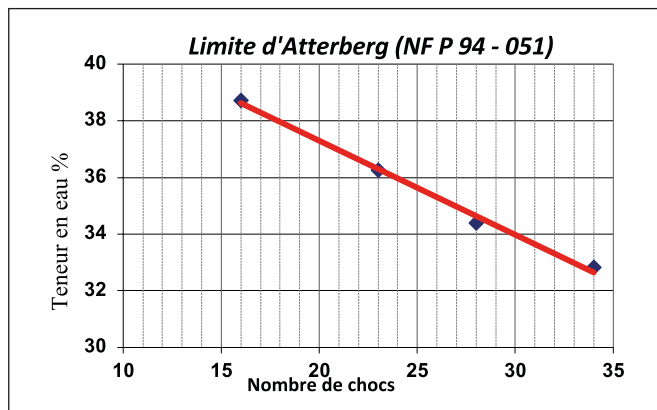
4.1.4. Vulnérabilité des formations superficielle aux phénomènes d'instabilité

Le tableau 2 ci-dessous présente les résultats granulaires d'un échantillon de sol prélevé au-dessus de la masse instable.

Tableau 2. Résultats d'analyse granulaire d'un échantillon du sol pris du versant instable à une profondeur de 0,4 mètre.

Date de prise d'éch.	PK	Situation sur le versant	yh g/cm ³	Teneur en eau W (%)	Limites d'Atterberg		IC	Propriétés granulaires	
					LW	LP		% >2 mm (%)	% < 80 µm (%)
10/09/2018	144	Côté droit du tronçon	107	25.88	36.0	15.0	0.48	5.88	54.12

Source: analyses réalisées au laboratoire géotechnique méditerranéen –élaboration propre-.



Figures 7 et 8. Courbes d'analyses granulaires d'échantillon testé au niveau de la masse glissée. Source: analyses réalisées au laboratoire géotechnique méditerranéen –élaboration propre-.



Les résultats obtenus (représentés dans le tableau 2 et les figures 7 et 8) montrent que la zone étudiée est caractérisée par la domination des formations alluviales limoneuses de viscosité moyenne, classé comme sol fin (A3), pour que l'indice de viscosité est d'ordre de 21%, et les matériaux fins dont le diamètre moins de 80 μm sont d'environ 54,12%. Les formations semi-superficielles se caractérisent par une augmentation significative de la teneur en eau; qui atteint 25,88 %. Cela indique qu'il s'agit de l'une des formations caractérisées par leur grande capacité d'absorber et de retenir de l'eau. Ce qui influe directement le degré de leur cohésion et de leur résistance.

4.1.5. Un substrat rocheux aux propriétés géotechniques favorables à la genèse du glissement

Le tableau 3 ci-dessous, présente des résultats des sondages profonds (sondages pressiométriques –SP–, et sondages pénétromètres dynamique –SPD–) effectués au niveau de la masse glissée.

Tableau 3. Résultats d'analyse granulométrique des formations profondes sur les sites des sondages SP et SPD effectués le long du versant au pk 144.

Source référentielle	Prof. en mètre	yh kg/ m³	Teneur en eau W (%)	Limites Atterberg		VBS	Caractéristiques granulaires		Propriétés mécaniques	
				IP (%)	WL (%)		% >2 mm (%)	% < 80 μ (%)	Cisaillement lent	
									C.C.D	
									φ'°	C'kpa
223-2/0958/1 -SP5-	[4-3.5]	1960	21.0	31	54.1	7.5	00	98.3	23	29
	[10-09]	2040	16.0	28	49.6	5.8	01	99.0	30	27
223-2/957/3 -SP6-	[07-06]	2010	20.0	24	46.1	5.4	00	99.6	29	22
	[10-09]	2030	18.0	28	48.6	6.5	00	99.8	28	21
223-2/957/4 -SP7-	[07-06]	2080	17.7	27	51.2	6.9	00	99.1	28	26
	[11.5-11]	2070	22.3	31	51.7	7.0	00	99.7	24	19

Source: DETLE –Taounate.

DETLE : Direction d'Équipement et de Transport et de Logistique et de l'eau.

Prof.: la profondeur / **h.y:** la masse / **IP:** indice de plasticité / **WL:** limite de liquidité / **mm:** millimètre / **μ :** micromètre

A partir des données présentées au tableau 3, les formations profondes du site étudié sont à haute viscosité et riches en argiles (à l'exception de l'échantillon situé à une profondeur comprise entre 6 et 7 mètres au SP6), caractérisés par leur sensibilité excessive à l'eau. Ce qui provoque des changements importants de volume et une diminution de la résistance. Les réactions de celui-ci, à des profondeurs différentes, le long de la masse en mouvement sont très variées, on peut les traiter comme suit:

- **Concernant SP7:** exécuté directement sur le bord de la route, ses résultats ont montré que les formations argileuses et alluviales voient leur teneur en eau augmente avec l'augmentation de la profondeur (22,3% à une profondeur de 11,5 m), et l'indice de plasticité aussi; ayant enregistré la valeur la plus élevée de l'ordre de 31%. Les essais de cisaillement lent montrent que les valeurs de l'indice de consistance et de l'angle de frottement diminuent à mesure que nous nous enfonçons, ce qui indique que le substrat à une profondeur de 11 à 11,5 mètres est plus cohérent, et donc plus résistant au cisaillement;
- **Pour le SP5:** exécuté sur la même ligne de sondage précédent (SP7), et deux échantillons ont été testés ; le premier à une profondeur comprise entre 3,5 et 4 mètres ; et le second à une profondeur



entre 9 et 10 mètres. Les résultats étaient différents par rapport à l'échantillon précédent, où la teneur en eau diminue avec la profondeur (21% dans le premier échantillon et 16% dans le deuxième). À 4 mètres de profondeur, la formation rocheuse montre une cohésion réduite, signe d'une altération avancée de la couche superficielle, soumise aux influences climatiques et hydriques. Inversement, à 10 mètres, l'angle de frottement de 30° indique des formations plus cohérentes, moins affectées par les processus d'altération.

- **Quant à le SP6:** exécuté au pied du versant, deux échantillons ont été testés: le premier à une profondeur de 6 à 7 m, qui a montré que la formation alluviale argileuse est de plasticité moyenne (24%), et le second échantillon à une profondeur de 9 à 10 m ; a montré que les formations argileuses et alluviales sont à forte plasticité (28%). L'analyse granulométrique et les essais mécaniques ont démontré une symétrie relative entre les formations rocheuses, entre 6 et 10 mètres de profondeur, où nous n'avons pas enregistré de changements significatifs des valeurs enregistrées, ni au niveau de l'angle de frottement (entre 28 et 29 degrés) ni au niveau des valeurs de cohésion (entre 21 et 22).

Généralement, en raison de l'agressivité des conditions externes (climatiques), les formations superficielles sont soumises à une forte altération chimique, produisant des éléments et particules fins ; qui migrent par lessivage à travers les fissures, ce qui explique la valeur élevée de l'angle de frottement au niveau du substrat à des profondeurs de 6 mètres et plus.

4.1.6. Résultats de mesure de Pression de Fluage, Pression-limite et Module de pression

A partir des données du tableau 3 et des figures 9, 10 et 11, nous enregistrons une différence très nette d'allures, que ce soit d'un site à l'autre (selon les sites des sondages), soit au niveau du même sondage en passant de formations proches de la surface à des formations profondes. Ce qui souligne la différence de niveau d'interaction de formation avec l'extension de la sonde.

On conclure, donc, que des valeurs retenues et enregistrées au niveau du module de pression (EM) connaissent une augmentation de la surface vers la profondeur, et les valeurs s'avèrent très élevées, allant de 356 MPa au point de sondage SP7 à 409,4 MPa au SP5 (à l'aval du versant). Également, au niveau de la surface; les déformations du sol sont une résultante de légères pressions, à l'inverse aux niveaux lithologiques profonds, de sorte que le remblai alluvial ; libère des pressions limites inférieures à 0,5 MPa, montrant une puissance d'environ de 3,5 mètres.

De plus, selon la classification conventionnelle des sols adoptée par Ménard (Fascicule 62-V.), les pressions limites apparaissent très faibles à une profondeur de 1,5 mètre, d'environ de 0,7 MPa aux points de sondage SP6 et SP7, ce qui confirme que les formations superficielles d'argiles alluviales sont très molles et sensibles aux mécanismes d'érosion, ce qui explique la forte concentration des phénomènes de ravinements et des coulées de boue. On observe également que ces pressions limites deviennent moyennes à une profondeur de 3 mètres (entre 1 et 2 MPa), ce qui indique la présence d'une formation ferme (argile et alluviales), puis les mêmes valeurs ont enregistré une augmentation à partir d'une profondeur de 6 mètres au point de sondage SP6 ; et de 4,5 mètres au SP5 et SP7 (du côté droit de la chaussée et au pied du versant), dépassant la valeur de 2,5 MPa et plus, indiquant l'existence d'une argile très ferme à solide.

De ce qui précède, nous concluons que la cohésion des formations argileuses et alluviales augmente encore avec la profondeur et devient plus résistante au cisaillement (rupture). Ceci est confirmé par le résultat de la division des valeurs de module de pressions par les valeurs des pressions limites (EM/PL), qui ont montré l'existence d'une épaisseur d'argile altérée d'environ 3,5 mètres (notamment au SP6 au pied du versant), tandis qu'à partir d'une profondeur de 3,5 mètres; on enregistre la variation des couches argileuses marneuses de cohésion forte à très forte (solide à très solide).

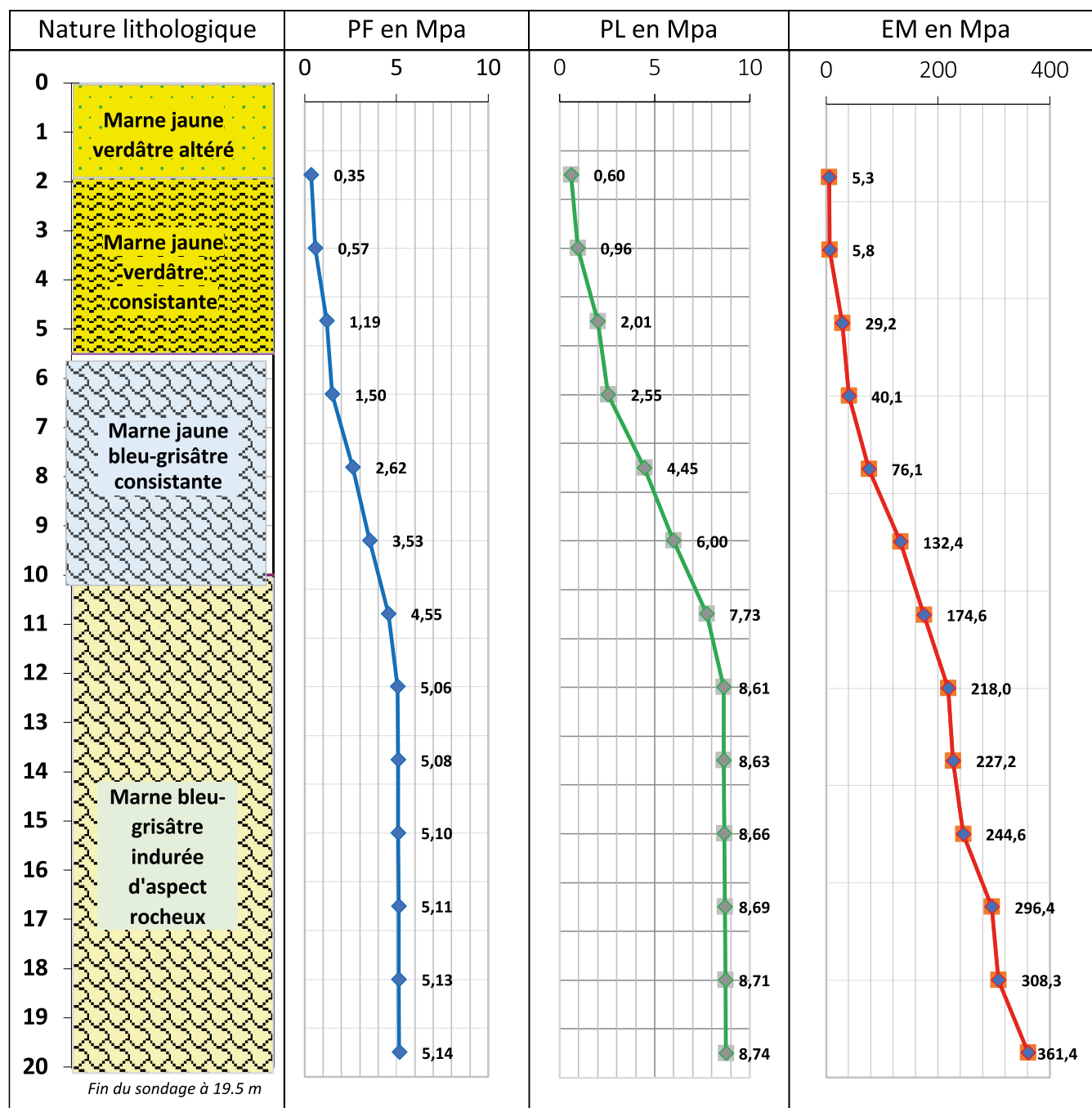


Figure 9. Résultats de l'essai de sondage pressiométrique (SP5) réalisé au pied du versant (2016). Source: DETLE de Taounate –Modifié–.

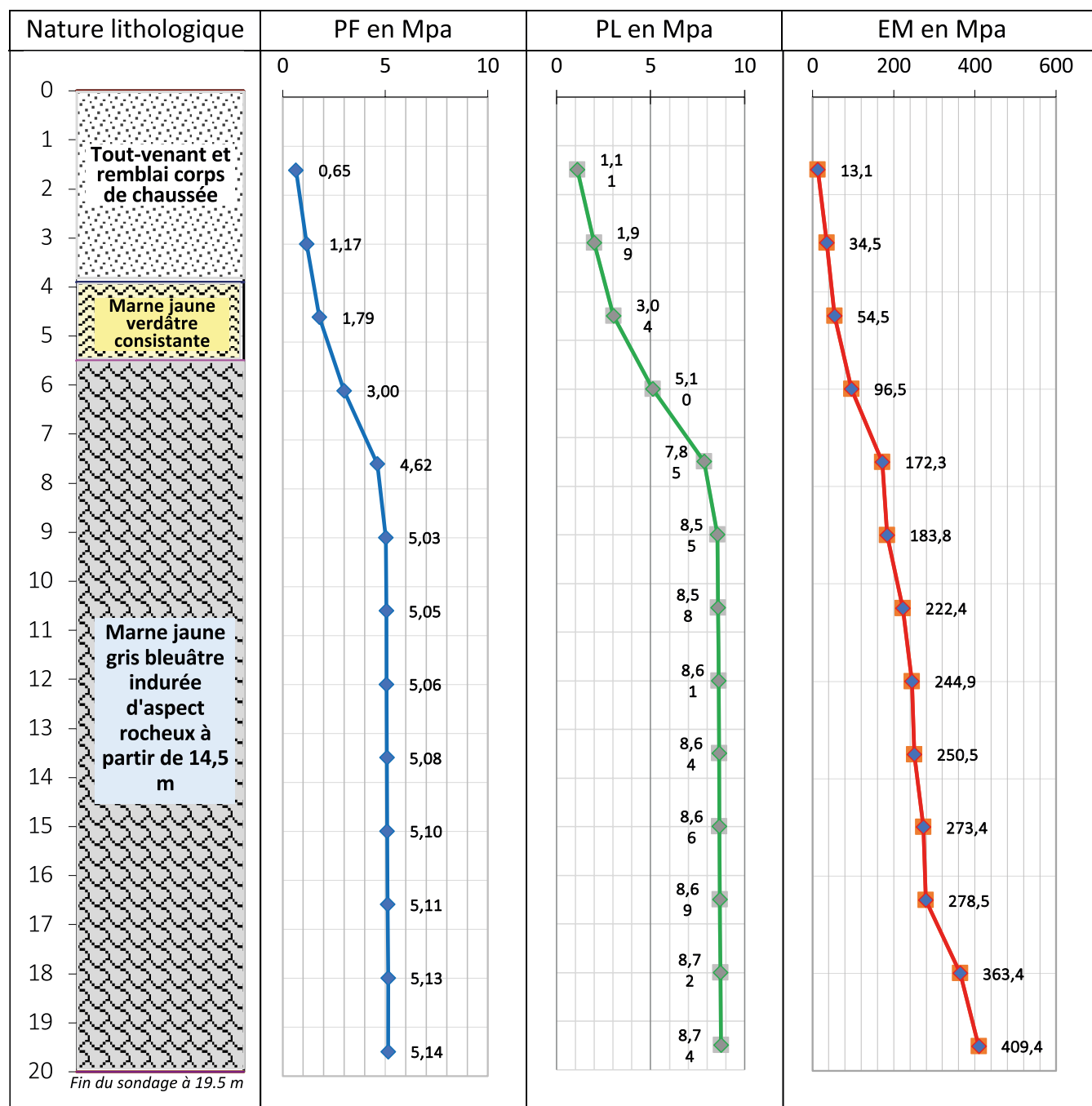


Figure 10. Résultats de l'essai de sondage pressiométrique (SP6) réalisé au côté gauche de la chaussée (2016). Source: DETLE de Taounate –Modifié–.

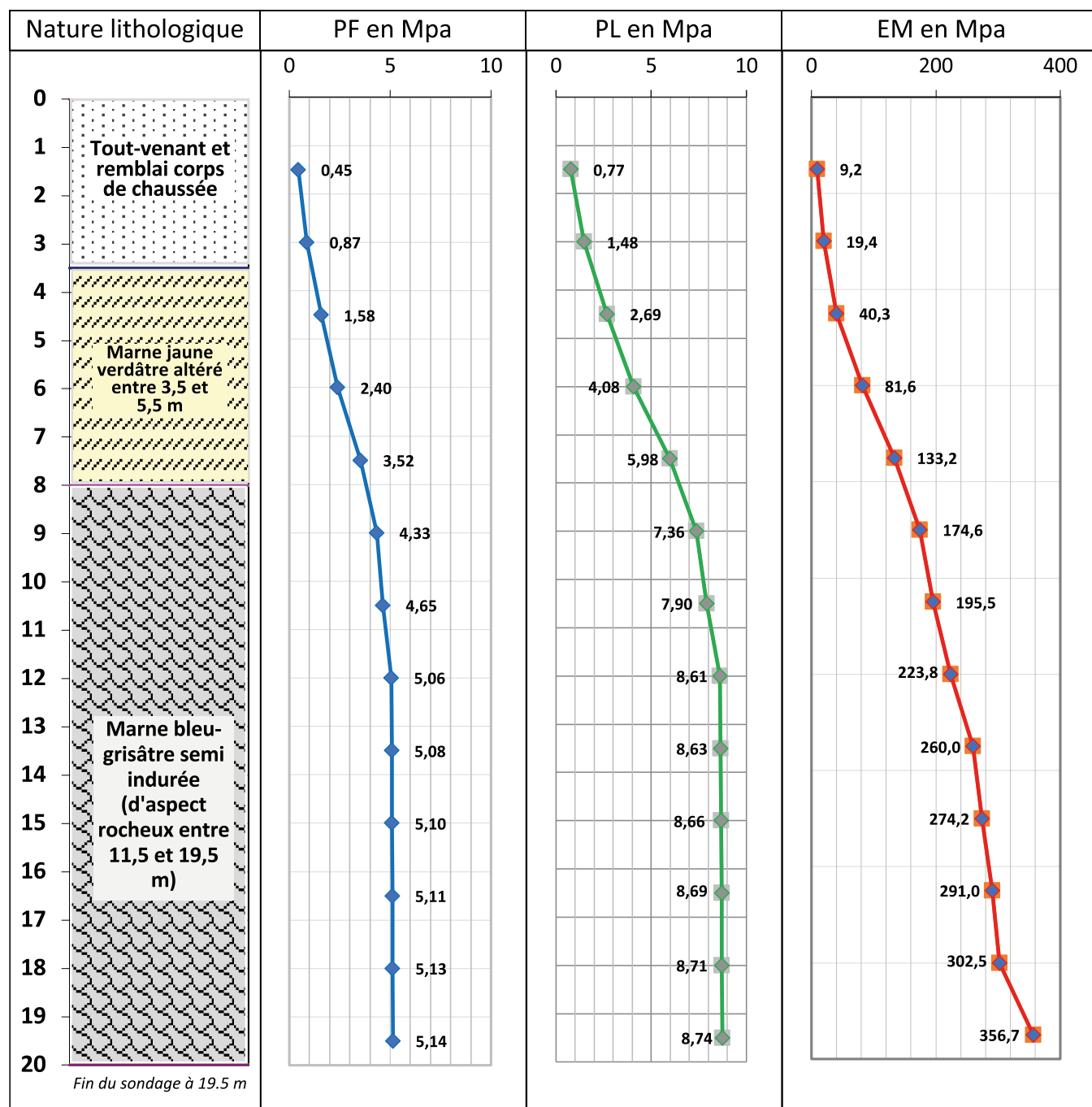


Figure 11. Résultats de l'essai de sondage pressiométrique (SP7) réalisé au côté droit de la chaussée (2016). Source: DETLE de Taounate –Modifié–.

4.1.7. Analyse des résultats de mesure de sondage pénétromètre dynamique

L'analyse des résultats des sondages pénétromètre dynamique ; ayant été exécuté le long de la pente (six sondages distribués à deux profils – figures 12 à 17) ; a permis de dégager et décrire deux horizons lithologiques, qui sont comme suit :

- **Premier horizon:** qui est l'horizon superficiel instable, dans lequel une évolution de N se fait de manière continue jusqu'à 9 mètres de terrain naturel (TN). Cette évolution des nombres de coups N permet de constater que la formation est en perpétuelle dynamique, et donc non stable. Cette évolution peut se faire de manière arithmétique comme c'est le cas de la majorité de profil, mais aussi,



peut être marquée par une surface d'instabilité nette comme c'est le cas du profil SPD3 (entre 6 et 7 mètres/TN);

- **Le deuxième horizon:** correspond au niveau profond du sol; situé entre 9 et 10 mètres de profondeur, c'est l'horizon le plus stable marqué par un nombre de coups d'environ 90, ce qui indique, selon la classification «Ménard», une résistance mécanique très élevée de formation rocheux. Dans ce contexte, nous confirmons les résultats obtenus au niveau des sondages pressiométriques (SP), où nous avons conclu que plus nous fonçons en profondeur; plus la formation sera compacte, non poreux, cohérente et donc plus résistante.

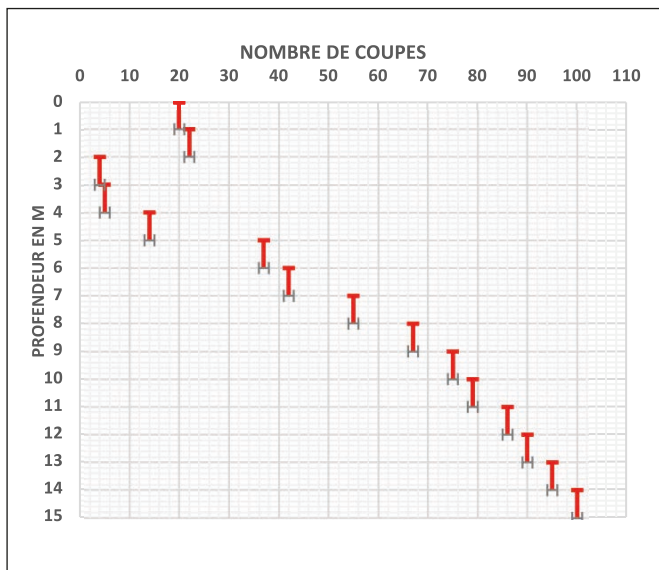


Figure 12. Résultat de SPD1 exécuté en amont. Source: DETLE de Taounate –Modifié–.

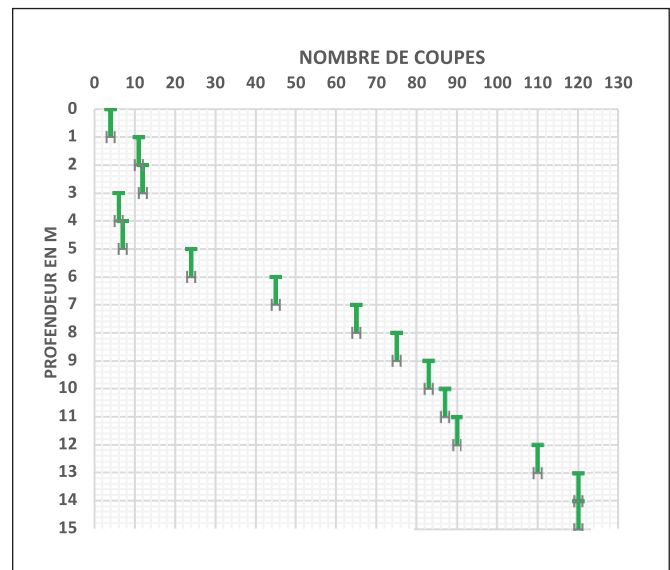


Figure 13. Résultat de SPD2 exécuté en remblai. Source: DETLE de Taounate –Modifié–.

24

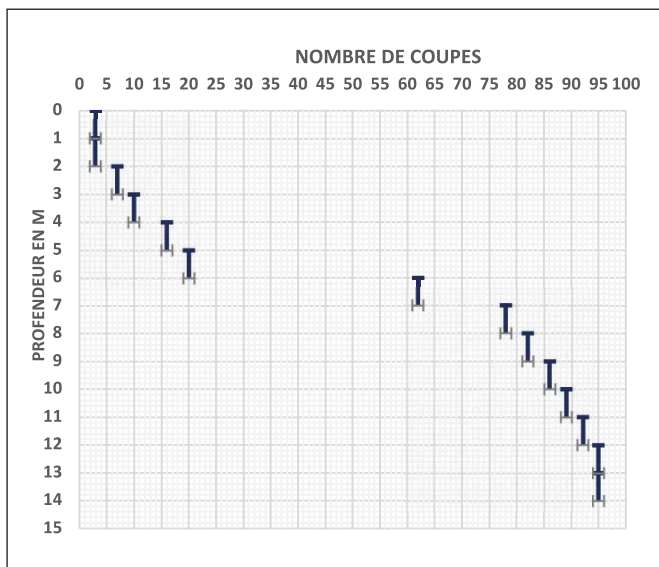


Figure 14. Résultat de SPD3 exécuté en aval. Source: DETLE de Taounate –Modifié–.

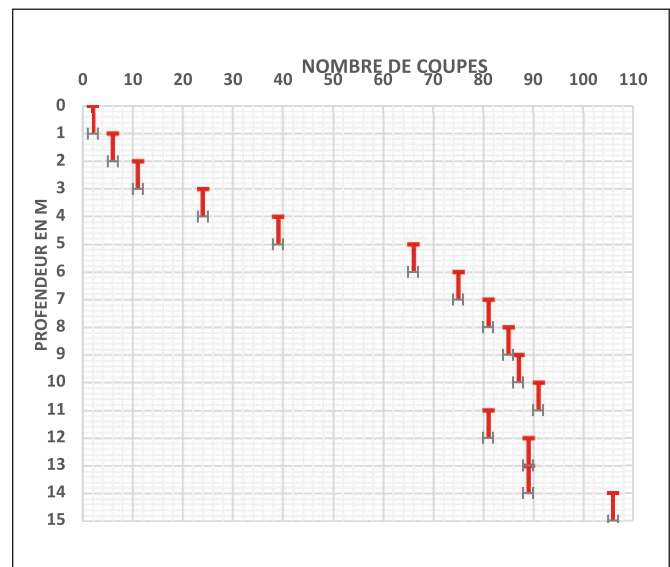


Figure 15. Résultat de SPD4 exécuté au mi-versant. Source: DETLE de Taounate –Modifié–.

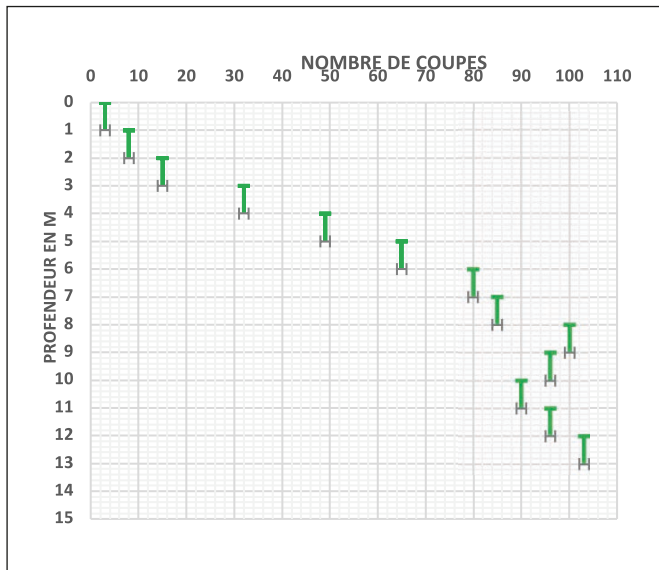


Figure 16. Résultat de SPD5 exécuté en remblai. Source: DETLE de Taounate –Modifié-.

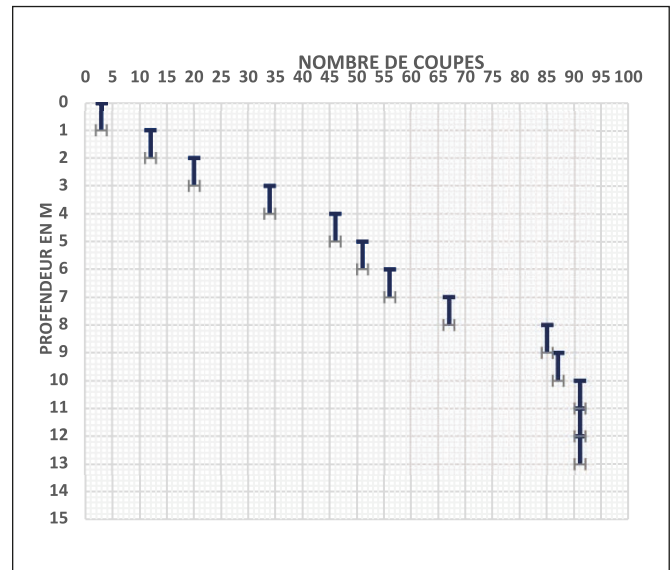


Figure 17. Résultat de SPD6 exécuté en aval. Source: DETLE de Taounate –Modifié-.

4.2. Les formes et les processus d'évolution géomorphologique sur le versant

4.2.1. L'érosion linéaire superficielle associée aux ravinements

La concentration de l'érosion superficielle sur le versant est due aux facteurs de la fragilité lithologique, l'intensité des précipitations, la pente et la faible couverture végétale. Parmi les manifestations les plus importantes de l'érosion superficielle sur ce versant, on peut citer les ravinements, que l'on distingue en deux types:

25

- **Ravinements superficiels récents:** sont moins profonds (moins de 0,60 mètre), se présentent sous forme de rainures ou d'érosions en griffe. Ils se développent principalement sur la partie moyenne du versant et près des zones d'arrachement. Ces ravinements sont liés à l'érosion linéaire et verticale induite par les écoulements superficiels, particulièrement dans les zones à forte pente et dépourvues de végétation. Ils apparaissent et évoluent sous l'effet des pluies saisonnières, et peuvent être partiellement comblés par les pratiques agricoles.
- **Ravins profonds:** Ce sont des ravins anciens, situés en aval en forme de U, résultant d'une érosion concentrée et prolongée. Leur profondeur varie entre 1 et 3 mètres (figure 20). Ils sont orientés et développés vers le tronçon routier.

L'évolution des ravins a significativement compromis la stabilité du tronçon routier. L'élargissement et l'approfondissement de ces ravins ont induit une perturbation majeure de la stabilité du remblai routier, notamment en fragilisant sa base (figures 3 et 20). Par ailleurs, l'encaissement et le décapage des matériaux meubles en amont ont exacerbé la situation. Ces matériaux, transportés par l'érosion, viennent s'accumuler directement sur la chaussée, obstruant les caniveaux et ouvrages d'art. Cette sédimentation provoque une élévation du niveau de base et favorise la stagnation des eaux, en particulier sur le côté droit de la route. L'infiltration progressive de ces eaux dans les remblais et le corps de chaussée entraîne une diminution rapide de leur cohésion et de leur résistance, favorisant ainsi le glissement de terrain, les affaissements et les arrachements de chaussée. Ces phénomènes dégradent considérablement les infrastructures de drainage et de soutènement.



4.2.2. Dynamique semi-profonde liée à un glissement avec affaissement

4.2.2.1. Quelques caractéristiques géométriques de la dynamique

Le glissement de terrain a affecté une superficie considérable, s'étendant sur environ 286 mètres de long pour 160 mètres de large. La masse instable a adopté une morphologie caractéristique en forme de poire, avec un élargissement marqué dans sa partie médiane et amont, et un rétrécissement progressif en aval (figure 20). Cette configuration suggère un mouvement complexe, peut-être influencé par la topographie locale et la nature des matériaux.

La zone d'arrachement, d'où s'est détachée la masse glissante, présente une forme en croissant de lune. Toutefois, la détermination précise de sa profondeur s'avère délicate en raison de la vitesse relativement lente du glissement. Cette dynamique lente a également compliqué l'évaluation détaillée de la nature des matériaux mobilisés et de leur vitesse de déplacement. Par ailleurs, les pratiques anthropiques exercées sur le versant ont rendu difficile toute analyse approfondie, notamment en termes de quantification des volumes déplacés et de caractérisation des mouvements.

4.2.2.2. L'estimation annuelle du mouvement de glissement

Le tableau ci-après récapitule les résultats des mesures effectuées sur le terrain entre 2016 et 2021. Ceux – ci ont permis de cerner de près le taux moyen de déplacement qu'est de l'ordre de 30,7 cm pour une période de cinq ans.

Tableau 4. L'évolution annuel du glissement (en mètre) à partir des mesures de terrain.

Points de mesure	Evolution la distance de déplacement en mètre						La distance totale de déplacement en cm (2016/2020)
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
[P1-P'1]	36	36,07	36,18	36,2	Stabilité	Stabilité totale du glissement	20
[P2-P'2]	34	34,08	34,19	34,21			21
[P3-P'3]	38	38,12	38,26	38,31	38,34		34
[P4-P'4]	47	47,14	47,30	47,35	47,39		39
[P5-P'5]	80	80,14	80,30	80,36	80,40		40
[P6-P'6]	74	74,15	74,30	74,36	74,40		41
[P7-P'7]	48	48,13	48,29	48,34	48,37		37
[P8-P'8]	40	40,10	40,22	40,24	Stabilité		24
[P9-P'9]	34	34,08	34,19	34,21			21
Moyen* en cm	--	11,22	13,66	3,88	2	--	30,7

(*): le moyen annuel de déplacement/affaissement (en cm).

Source: travail du terrain –élaboration propre–.

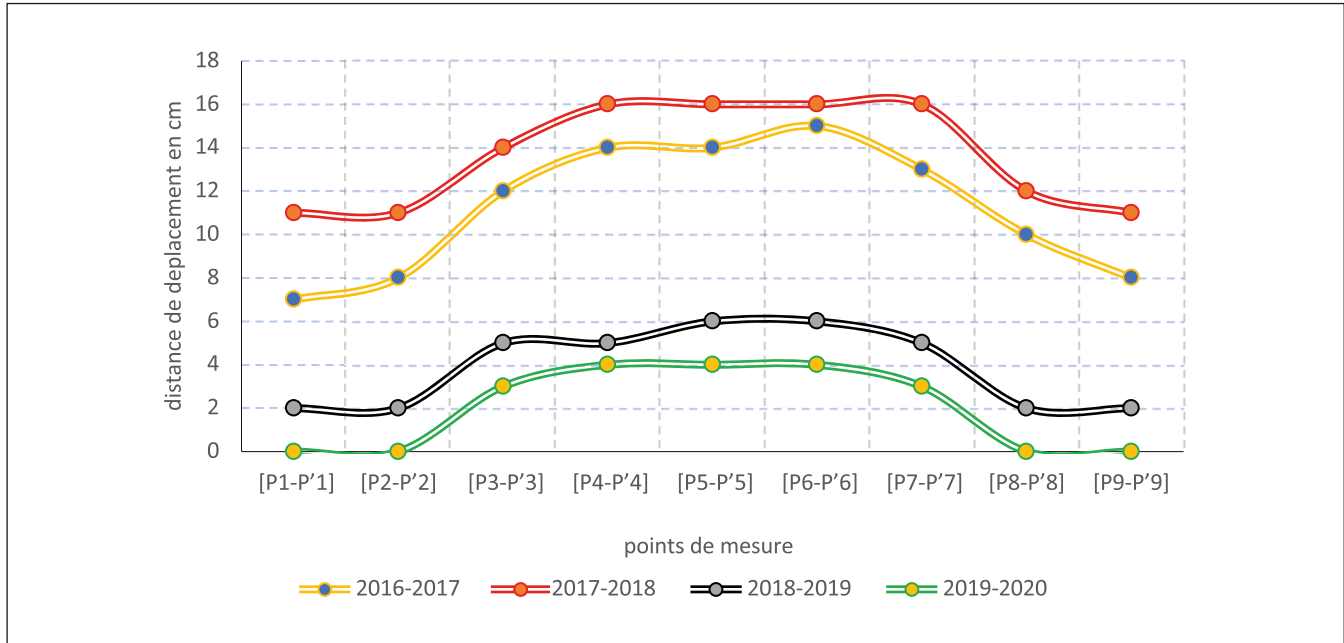


Figure 18. Evolution des mouvements annuels du glissement (en cm) selon les points de mesure.
Source: travail du terrain entre 2016 et 2021 (élaboration propre).

La lecture des données du tableau 4 et de la figure 18; nous permet de conclure des notes suivantes:

- Une nette différence du mouvement de la masse glissante selon les années, où le déplacement maximal enregistré en 2018 (d'une moyenne de 13,66 cm), et le minimal n'a pas dépassé une moyenne de 2 cm en 2020;
- Une grande différence du mouvement selon la situation des points de mesures, où nous avons enregistré un mouvement clair en amont du versant (entre P3 et P7); allant de 34 à 41 cm en cinq ans, tandis qu'il en reste généralement lent sur les bords centrale (entre 20 et 24 cm comme le total de déplacement);
- Le mouvement le plus fort des masses a été enregistré au niveau des points de P4 à P7 d'environ 16 cm durant une seule année (2018), ce sont les points affectés soit par la présence des ravins ascendantes, soit par les fissures de retrait (voir figures 3 et 20);
- Une stabilité partielle enregistrée à quelques points en 2020, et elle en totale à l'ensemble du versant à l'année 2021, grâce aux travaux d'aménagement réalisés par DETLE (Travaux achevés fin de 2019).

27

4.2.2.3. L'estimation mensuelle du mouvement de glissement

La figure ci-après montre des résultats obtenus des mesures mensuelles du mouvement de glissement, qui nous a permis d'estimer le taux moyen de déplacement à 0,64 cm par mois. Cependant, ce moyen est hétérogène, et le plus souvent il dépend de quantité de pluies retenues jusqu'alors.

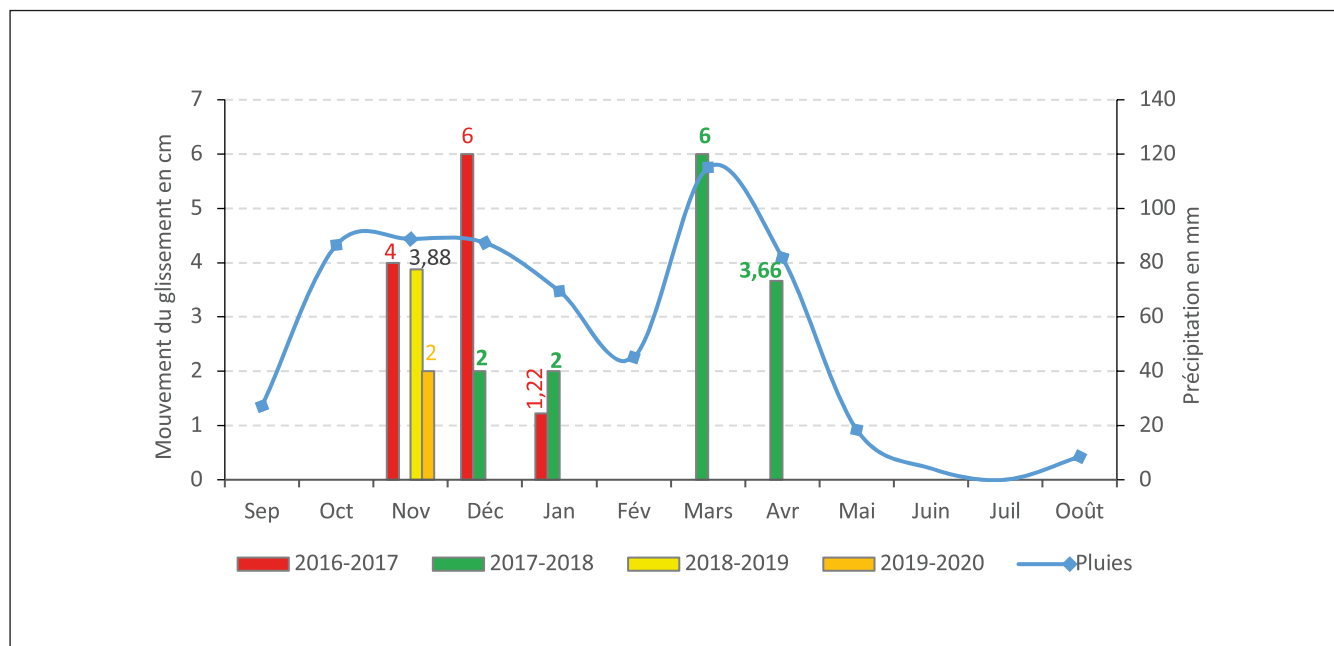


Figure 19. Le mouvement mensuel du glissement (en cm) par rapport aux moyennes pluviométriques entre 2016 et 2020 selon la station d'Ain Aicha (en mm). Source: travail du terrain 2016-2021 (données climatiques de l'ABHS) –élaboration propre-.

L'analyse des résultats liés au mouvement mensuel du glissement, tout en tenant compte des précipitations recueillies, a permis de souligner les remarques suivantes:

- La plupart des cas des mouvements ont été enregistrés au cours de la période allant de novembre à janvier qui coïncide avec la saison la plus arrosée de l'année, avec deux exceptions enregistrées au cours des mois de mars et avril 2018, après des pluies fortes et continues au cours de ces mois s'élevant respectivement à 339 et 128 mm (saison 2017-2018);
- La moyenne mensuelle maximale du mouvement de glissement était de 6 cm, enregistrée en décembre 2016-2017 et en mars 2017-2018, suite à de violentes pluies en deux phases successives ayant enregistrées respectivement 168,3 et 339 mm;
- Une stabilité nette du glissement pendant les mois d'été et au début de l'automne. Au cours ce mois; bien qu'il pleuve, la quantité retenue il ne suffit pas pour déclencher de telle dynamique;
- La dynamique, s'elle existe, au cours de chaque automne; peut se limiter au déclenchement de petits glissements sans importance. Seules les formations lithologiques préparées issu la dessiccation estivale peut être mis en mouvement par ruissellement superficiel direct et donnent naissance à des eaux chargés en boue. Et, toutes nouvelles pluies peuvent les conditions d'instabilité.

28

4.2.2.4. Impact de la dynamique et les dégâts enregistrés

Les dégâts et les répercussions sont clairement liés au type de dynamique ; de sorte que:

- En dépit d'un mouvement de glissement lent (30.7 cm/an en moyenne), la partie médiane du versant a connu un effondrement catastrophique en avril 2018, entraînant un affaissement de la chaussée de plus de 85 cm et la destruction complète de la route (figure 20 et photo 5);
- Colmatage des caniveaux et système de drainage, à cause de l'intensité d'érosion superficiel (photos 4 et 6), provoquant l'accumulation de l'eau et des boues sur le bord de la route et provoque ainsi des difficultés de drainage;



- Répercussions économiques dues à des pertes énormes en terres agricoles à cause de l'érosion, en moyens de financement, en retard de mise à niveau du réseau routier endommagé, particulièrement après des périodes très humides ou des événements climatiques exceptionnels.

Photo 4. Coulées de boue affectés les gabions et les canaux de drainage. *Source: auteurs, Cliché le 19 avril 2019*



Photo 5. Détérioration et affaissement violent du tronçon routier. *Source: auteurs, Cliché le 10 avril 2018*



Photo 6. Colmatage total des tubes et des canaux de drainage. *Source: auteurs, Cliché le 13 avril 2019*



Figure 20 et photos 4-6. Quelques indices d'impact de la dynamique et instabilité du site. *Source: image satellite et recherche de terrain –élaboration propre-.*



5. CONCLUSION

Dans le nord marocain, le domaine du Rif central méridional, et par leurs caractéristiques physiques et anthropiques, est une région particulièrement vulnérable aux risques géomorphologiques et morphodynamiques. Où, les glissements de terrain, les éboulements et les coulées de boue, les affaissements..., sont plus fréquents, ont des conséquences directes et souvent dévastatrices sur le réseau routier.

Dans ce contexte, les phénomènes d'instabilité de terrain sont des déséquilibres environnementaux résultent de l'action combinée de facteurs plus ou moins complexes. Soit permanents tels que la géologie, l'hydrogéologie, la topographie, le couvert végétale..., ou facteurs variants (dynamiques) dont les agents climatiques, impacts de l'eau, actions anthropiques, vibrations sismiques...etc.

Dans le cas étudié, l'utilisation d'une approche géographique et géomorphologique, a permis de déterminer les facteurs possibles responsables d'instabilité, d'identifier le type et la structure du phénomène affecté (glissement/affaissement), de déterminer la vitesse moyenne de glissement (d'ordre de 30,7 cm comme un moyen annuel) et d'estimer probable de la profondeur de la masse glissée ($\approx 3,5$ mètres en raison de la présence d'une couche d'argile très altérée à cette profondeur).

Les résultats de notre étude sont en accord avec les travaux précédents réalisés sur différentes régions Rifaine, qui ont mis en évidence l'importance de certains facteurs génétiques et déclenchants l'instabilité des versants. Dans le site étudié, nos analyses permettent d'affiner ces résultats en proposant une classification en deux niveaux des facteurs explicatifs:

- Facteurs liés à l'augmentation (forces) de la pente et l'ablation du support sous-jacent par érosion, la surcharge exercée soit par des agents naturels (l'eau), soit par l'action anthropique (terrassement routier) ;
- Facteurs liés à la diminution de la résistance du matériau, qu'il s'agisse des facteurs intrinsèques liés à la nature des matériaux d'origine, c'est-à-dire les minéraux et les roches constituant le sol, ou des facteurs actifs liés indirectement aux matériaux affectés, tels que l'altération due aux agents atmosphériques, l'augmentation des pressions interstitielles et la modification de la structure intergranulaire.

30

En effet, l'étude des phénomènes morphodynamiques dans le domaine Rifain est rendue complexe par l'interdépendance et l'interaction de nombreux facteurs. Il est ainsi difficile de généraliser les résultats d'une étude de cas à l'ensemble de ce domaine. Pour mieux comprendre ces processus, il est nécessaire d'identifier les seuils critiques (climat, hydrogéologie, topographie, propriétés des matériaux) qui marquent le passage de la stabilité à l'instabilité. La détermination de ces seuils permettra d'établir une base de données précise pour l'élaboration de cartes des risques et la mise en place de mesures de prévention adaptées.

Dans une perspective de recherche approfondie, nous envisageons de mener une étude géotechnique détaillée des sols, en portant une attention particulière aux argiles. Cette étude aura pour objectifs d'identifier les mécanismes de dégradation des sols, de déterminer les facteurs déclencheurs des instabilités et de quantifier les seuils critiques de rupture. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre la dynamique des mouvements de terrain dans cette zone et de proposer des mesures de prévention adaptées, notamment pour les infrastructures routières situées à proximité.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui nous ont aidés à mener à bien ce travail, et nous souhaitons remercier tout particulièrement: 1) La Direction d'Équipement et de Transport et de Logistique et de l'eau de Taounate (DETLE), qui nous a fourni les rapports géotechniques (résultats des sondages et analyses géotechniques du substrat rocheux), 2) Le laboratoire géotechnique méditerranéen



à Tétouan qui a accepté de réaliser les analyses des sols, 3) L'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou à Fès (ABHS) qui nous a fourni des données climatiques et hydrologiques.

Responsabilité et conflit d'intérêts

Les auteurs affirment leur engagement à déclarer tout conflit d'intérêts, actuel ou potentiel, qui pourrait être lié à la publication de cet article. Les trois auteurs ont contribué à cette recherche de la manière suivante: 1) Khalid El-Moudni a été chargé de la collecte de diverses données (cartes, images satellites, images solaires, données numériques, rapports géotechniques, suivi de phénomènes...), de la rédaction de l'article, de la préparation des cartes, des figures et des bases de données, ainsi que de l'interprétation des résultats. 2) Abdelghani Houari et El Houssaine Afkir ont encadré ce travail, l'ont orienté, ont analysé et interprété les données, ont corrigé l'article, ont vérifié la validité des résultats (en laboratoire et sur le terrain), et ont préparé et traduit les résumés.

RÉFÉRENCES

- Afkir, E. (1985). *Le bassin versant de l'Inaouène : caractéristiques climatiques et comportement hydrologique, Contribution à une connaissance climato-hydrologique d'un bassin versant méditerranéen*. [Thèse de 3^e cycle]. Univ. Toulouse Le Mirail.
- AFNOR, (2000). *Norme Française NFP-94-110, Essai pressiométrique Menard*. Partie 1 sons cycle. AFNOR la plaine Saint-Denis, France.
- Al Karkouri, J. (2003). *Dégradation du milieu naturel dans le bassin versant de Béni Boufrah (Rif central- Maroc): Analyse des facteurs et des processus, essai de quantification et de modélisation spatiale*. [Thèse de Doctorat d'état en géographie]. Univ. Mohamed V, Rabat.
- Asebriy, L. (1984). *Etude géologique de la zone sub-rifaine: nouvelles interprétations paléogéographiques et structurales du Rif externe; exemple du Moyen Ouergha, Maroc*. [Thèse 3^e cycle]. Faculté des Sciences, Université, Mohammed V, Rabat.
- Arif, S. (1994). *La géomorphologie des terrasses quaternaires de la vallée moyenne de Ouergha: Rif et Prérif du Maroc*. [Thèse de doctorat]. Univ Bordeaux III.
- Boiffin, J. (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. [Thèse pour le titre de Docteur ingénieur, Sciences Agronomiques]. INA-PG, Paris Grignon.
- El Fellah, B. (2000). *Dynamique des versants et risques associés dans le Rif central*. [Thèse de doctorat en géographie]. Université Mohammed V, Rabat.
- El Fengeur, M. (2009). *Dynamique des milieux naturels et enjeux d'aménagement dans les marges méridionales du Rif central. Cas des bassins versants d'Oulaï et d'Amzmaz*. [Thèse de doctorat en géographie]. FLSH Saïs-Fès, Maroc.
- El-Moudni, Kh. (2008). *Impacts des mouvements de terrain sur l'instabilité des axes routiers dans la région de Taounate*. [Mémoire de Master en Géographie]. FLSH Sais-Fès.
- El-Moudni, Kh. (2022). *Dynamique des milieux naturels et déséquilibres des fondations des infrastructures routières dans le Rif central méridional et les collines de prérif*. [Thèse de doctorat en Géog., 3^{ème} cycle]. FLSH Saïs-Fès, USMBA.
- El Ommal, M. (2021). *Dynamique des versants dans le Rif central : évaluation quantitative et qualitative de l'érosion hydrique et enjeux d'aménagement du territoire (cas du bassin versant de l'Oued Sra)*. [Thèse de doctorat en géographie]. FLSH Saïs-Fès.
- Faris, A. (1994). *Essai méthodologie de la cartographie des risques naturels liés au mouvement de terrain. Application à l'aménagement de la ville de Taounate (Rif. Maroc)*. [Thèse de doctorat, université Franch-Conté, Besancon]. <https://doi.org/10.1051/geotech/1994069063>
- Flageollet, J.C. (1989). *Les mouvements de terrains et leurs prévention*. Masson, coll. Géographie.
- Gartet, A. (1994). *Morphogenèse et hydrologie dans le bassin versant de l'Oued Lebène (Rif méridional et Prérif Central et Oriental)*. [Thèse Doc.]. Univ. Provence, Aix-en-Provence.
- Gartet, A. (2007). *Risques naturels, anthropiques et technologiques dans l'agglomération de Fès et son arrière-pays: aménagement, gestion et prévention*. [Thèse Doc. D'Etat en Géog.]. FLSH Saïs-Fès, USMBA.



- Gartet, A. (2010). *Mouvements de terrain et risques environnementaux dans l'agglomération de Fès et son arrière-pays, Aménagement, Gestion et Prévention*.
- Gartet, J. (2001). *Contribution à la connaissance de la dynamique fluviale au Pléistocène supérieur et à L'holocène dans la vallée de Ouergha: (Rif, Maroc)*. [Thèse de doctorat d'état]. Université d'Aix Marseille.
- Gueremy, P. et al. (1987). Mouvements de terrain successifs: les glissements de terrain et les coulées du versants sud de la Montagne d'Avize (Marne). *Trav. Instit. Géogr. de Reims*, (69-72), 113-127. <https://doi.org/10.3406/tigr.1987.1213>
- Janati Idrissi, A. (2013). *Routes et Entretien Routier au Maroc, la route du développement passe par le développement de la route*. Editions et impressions Bouregreg.
- Lacoste, J. (1934). *Etudes géologiques dans le Rif méridional*. [Thèse de doctorat]. Ecole Pratique des Hautes Études, Paris.
- Leblanc, D. (1975). *Etudes géologiques dans le Rif externe oriental au nord de Taza*. [Thèse d'Etat Univ.]. Paul Sabatier Toulouse.
- L.P.E.E. (2016). *Etude Géotechnique pour traitement de l'environnement et confortement des points de glissement, Section du PK 144+000 de la RR408*. DPETL de Taounate, Doss. n° 2016-220-01284-2016-0055/001. 11 pages + Annexes. Fès.
- Maurer, G. (1964). L'érosion dans le Rif et le Prérif. I: Présentation de la vallée des Beni- Hassan. (d'Ikaouen). II: Présentation du paysage autour de Bab Jbah (Ouest de Taounate- el-Kchour). *Revue de Géographie du Maroc*, (6), 89-106 et 111-118.
- Maurer, G. (1968). *Les Montagnes du Rif central: Etude géomorphologique*. [Thèse de Doctorat d'État]. Faculté des lettres et sciences, Université de Paris.
- Marre, A. (1998). *L'érosion entre nature et société*. Dossiers n°22 des Images Economiques du Monde, Paris, SEDES.
- Olivier, M. (2002). *Aléas géomorphologiques (Mouvements de terrain), processus, fonctionnement, cartographie*. [Diplôme d'Habilitation]. Université Louis Pasteur-Strasbourg I.
- Olivier, D. (2006). *Cinématique de glissements de terrain et prédiction de leur réactivation: approche probabiliste dans la région d'Oudenaarde*. [Thèse de doctorat]. Université de Liège.
- Poujol, A. (2014). *Analyse des déformations actuelles dans le Rif (Maroc) : approche morpho-tectonique*. [Thèse de Doctorat]. Université Montpellier, France.
- Sharpe, C.F.S. (1938). *Landslides and related phenomena*. Uni. Press.
- Suter, G. (1980). *Carte géologique du Rif, 1/500.000. Notes explicatives et Mémoires du Service géologique du Maroc*.
- Tricart, J. (1977). *Précis de Géomorphologie dynamique générale*. SEDES. Paris.
- Yazidi, A., & Benziane, F. (1995). *Géologie du Rif: Relation avec les mouvements de terrain*. Séminaire: Glissements de terrain: Cas du Nord marocain. Casablanca, Maroc.
- Yazidi, M. (2002). *Etude et cartographie de zones d'instabilités de terrain le long de la route nationale 2 entre Bab Taza et Bab Berred*. [Thèse Doc. National]. Uni. Ibn Tofail.
- Yvette, V. (2003). *Les risques*. SEDES.