

LE PONT SIDI RACHED À CONSTANTINE (ALGÉRIE) : UNE CULÉE DANS UN GRAND GLISSEMENT DE TERRAIN

Bernard PINCENT*, Rachid BOUGDAL**, Marc PANET***
et Aïssa BENTABET****

RÉSUMÉ

Construit entre 1908 et 1912, le pont Sidi Rached est un ouvrage en pierre de taille de 447 mètres de longueur. Il comporte 27 arches dont une arche de 70 mètres franchissant le ravin du Rhumel. Les piles sont fondées sur une assise calcaire stable, à l'exception des deux dernières piles et de la culée orientale, qui sont fondées sur des marnes telliennes allochtones, très fracturées, surmontant les calcaires. La faible stabilité de ces marnes a eu pour conséquence, la dégradation des deux piles et de la culée. Des études et expertises ont été entreprises pour arrêter les désordres, sans succès. Les causes avancées pour expliquer ces désordres ont été longtemps attribuées soit à l'hétérogénéité du sol d'assise des fondations soit à un glissement local.

Les travaux géologiques, hydrogéologiques et géotechniques présentés ici, montrent que l'ensemble du versant qui prolonge l'extrémité orientale du pont Sidi Rached, est instable et est à l'origine des dégradations de cet ouvrage. Outre la cartographie géologique du site, à l'échelle du 1/2000^{ème}, une série de sondages carottés, équipés en piézomètres et en inclinomètres, de même que des mesures topographiques, confirment cette instabilité, lente, mais de grande ampleur.

Mots clés - Pont Sidi Rached - Culée - Marnes telliennes - Calcaires néritiques - Glissement de terrain - Inclinomètre - Surface piézométrique.

CONSTANTINE SIDI RACHED BRIDGE (ALGERIA) : AN ABUTMENT IN A LARGE LANDSLIDE.

ABSTRACT

Built between 1908 and 1912, Sidi Rached Bridge is a 447 meters length freestone structure. It has 27 arches of which one of 70 meters going over the Rhumel river. The piers are founded over a stable limestone base, except for the last two piles and the eastern abutment (station side), that are founded on very fractured tellian allochtonous marls overlaying limestone formations. The weak stability of these marls was the cause of the two piles and the eastern abutment deterioration. Studies and expertises were made in order to stop the degradation. The reasons brought to explain these disorders were, for a long time, attributed to the heterogeneous level rock foundation or a local landslide.

*Ingénieur Expert, ARCADIS EEG SIMECSOL, France.

**Laboratoire de Géodynamique, Géologie de l'Ingénieur et Planétologie, Faculté des Sciences de la Terre, Géographie et Aménagement du Territoire, USTHB, BP. 32, El Alia, Alger.

***Expert International.

**** Ingénieur Expert Chef de projet ARCADIS EEG SIMECSOL, France.

- Manuscrit déposé le 04 Janvier 2006, accepté après révision le 06 Février 2008.

The geological, hydrogeological and geotechnical studies presented here show that the whole hills slope extending the eastern Sidi Rached bridge side, is unstable and is the source of degradation of this structure. Beside the geological mapping of the site at a 1/2000 scale, series of boreholes with inclinometers and piezometers, as well as topographic measures, confirm this slow but large instability.

Key words - Sidi Rached bridge - Abutment - Tellian marls - Neritic limestones - Landslide - Inclinometer - Piezometric surface.

1. INTRODUCTION

Le site du pont Sidi Rached fait partie du projet d'étude des nombreux glissements de terrain qui affectent le tissu urbain de Constantine. Contrairement aux autres sites instables, celui-ci est peu urbanisé. Sa particularité vient de l'instabilité de son versant oriental, au pied duquel on trouve des voies ferrées, des routes d'accès vers la ville et le pont en question.

Construit entre 1908 et 1912, ce pont est un ouvrage en pierre de taille doté d'un tablier en béton armé (technique Séjourne) de 447 mètres de longueur. Il comporte 27 arches dont 8 de 9,80 m et une de 70 mètres franchissant le ravin du Rhumel. La largeur de voie est de 12 m environ.

Les piles sont fondées sur une assise calcaire robuste à l'exception des deux dernières piles et de la culée orientale (côté gare), qui sont fondées sur des marnes finement litées et marno-calcaires telliens, très fracturés. Le franchissement d'une zone fracturée dans l'assise calcaire, en rive gauche du Rhumel (côté ville), explique la présence d'une voûte de 30 mètres parmi celles de 9,80 m.

A la suite de nombreux désordres, la première arche s'est rompue et son tablier a été remplacé par un tablier métallique. Ce pont est un ouvrage sensible puisqu'il assure le passage des véhicules d'une rive à l'autre du Rhumel.

Des études et expertises ont été entreprises pour arrêter les désordres, sans grand succès. Ce n'est que récemment, que l'instabilité de

l'ensemble du versant (site du chemin forestier) a été avancée comme cause possible des désordres observés au niveau de la culée est du pont Sidi Rached.

2. HISTORIQUE DES DÉSORDRES ET DES SOLUTIONS MISES EN OEUVRE

En 1910, à la suite d'un hiver pluvieux, des désordres apparaissent sur la culée est qui est alors terminée : fissures verticales dans le parement de la culée et dans l'anneau aval de la première voûte. Les désordres sont attribués à une poussée des terres consécutive, à un mauvais drainage des marnes, et un drainage de la fondation par puits et galerie est mis en œuvre.

En 1922, à la suite de l'évolution des mouvements, des témoins en béton sont posés pour suivre l'évolution des fissures et un drainage superficiel a été réalisé.

Les désordres se poursuivent puisqu'en 1938, une campagne de reconnaissance des sols est lancée. Elle montre que la culée est et les deux piles avoisinantes sont fondées sur les marnes surmontant une couche massive de calcaire. Plus tard, en 1941, l'absence de stabilisation des désordres commande des mesures de consolidation : des pieux inclinés ancrés dans le calcaire sont alors réalisés pour asseoir les piles sur ce substratum plus stable, les deux derniers rangs de piles et la culée sont consolidés par des forages injectés, des poutres en béton armé sont installées entre les piles et la culée, et les fissures sont injectées par un coulis de ciment.

LE PONT SIDI RACHED À CONSTANTINE (ALGÉRIE) : UNE CULÉE DANS UN GRAND GLISSEMENT DE TERRAIN

En 1947, à la suite d'une forte secousse sismique qui a ébranlé la région de Constantine, les fissures existantes évoluent et de nouvelles apparaissent sur les trois groupes de piles épargnées jusqu'alors. Des mesures topographiques de surveillance du pont débutent en 1954.

Après analyse, ces mesures font craindre un grave problème de stabilité du pont à terme, des travaux importants sont entrepris :

- remplacement de la première voûte par un arc en béton armé à trois articulations;
- transformation de la deuxième voûte en culée par remplissage en béton armé, ancré à 1,5 m dans le calcaire;
- mise en place de butons à mi-hauteur équipés de vérins de réglage;
- exécution de forages horizontaux pour drainer le massif derrière la culée.

L'articulation à la clé de l'arc en béton armé est composée de cinq vérins à vis réglables et de quatre bielles, joignant les deux parties de l'arc séparées par cette articulation, qui est capable d'absorber un déplacement horizontal de 30 cm environ.

En mai 1979, une conduite d'eau potable de 400 mm de diamètre se rompt et des quantités importantes d'eau se déversent sur le talus surplombant la plate-forme des chemins de fer. Le 17 mai 1979, un glissement apparaît sur le talus de déblai situé dans la gare de Constantine. En juin de la même année, l'arc à trois articulations de la première voûte se rompt. Les vérins sont écrasés et flambent à la clé, les butons placés à mi-hauteur flambent et la chaussée se fissure avec décollement du parement des trottoirs. Néanmoins, aucun désordre significatif n'est observé dans la structure du pont; le dispositif mis en place a bien joué son rôle, jusqu'à la destruction !

Une campagne de sondages et d'essais en place et en laboratoire est lancée. Les mesures confortatives adoptées consistent à remplacer la voûte par une poutraison métallique reposant, côté culée, sur des pieux verticaux ancrés dans le calcaire. En 1992, on observe encore un déplacement longitudinal du tablier et un écrasement du béton de la dalle. Le joint de dilatation côté pile est endommagé et des fissures au niveau du mur garde-grève sont apparues, preuve que les déplacements se poursuivent. Les travaux de réparation de 1994 consistent à démolir la dalle au niveau du joint de dilatation, rétablir le joint entre le mur garde grève et le tablier en découpant le tablier, mettre en place un joint de type Freyssinet, colmater les fissures côté pile, remettre en état le joint et enfin reconstruire le mur garde grève, côté culée.

En 1997, des désordres importants sont constatés au niveau de la chaussée à la suite d'un déplacement de la culée: écrasement des appareils d'appui, fissuration du mur garde-grève, fermeture des joints de chaussée. Fin 1997, de nouveaux travaux sont entrepris : mise en place d'un joint à grand souffle, réfection des poutres de renforcement par TFC, traitement des éclatements de béton sous dalle, reconstruction du mur garde grève, remplacement des appareils d'appui abîmés.

Les causes avancées pour expliquer ces désordres ont été longtemps «l'hétérogénéité du sol d'assise des fondations» et/ou un «glissement local». L'action d'un grand glissement du versant à l'amont venant buter ou englobant la culée du pont est peu mise en avant. Des questions se posent toutefois et le Laboratoire des Travaux Publics de Constantine (LTP Est) propose d'entamer une étude approfondie à l'aide d'un matériel approprié (inclinomètre, piézomètre) pour déterminer s'il y a mouvement d'ensemble ou si celui-ci reste localisé. Seul un expert, Paulsen (1999), avance «un glissement à grande échelle.

3. GÉOLOGIE

Les sites du chemin forestier et de la culée est du pont Sidi Rached ont été explorés, lors des études antérieures, à l'aide de nombreux sondages de reconnaissance géotechnique, concernant surtout la culée et relativement peu, le versant qui la surplombe. Nous avons réalisé des reconnaissances complémentaires en 2003-2004 sur la base d'une cartographie géologique préalable (fig.2), à grande échelle (1/2000^{ème}).

La culée est du pont Sidi Rached domine un talus aval de 30 % de pente, interrompu par les gorges profondes du Rhumel. Vers l'amont, cette culée est prolongée par un replat de terrassement ancien, formant la plateforme ferroviaire, puis par le versant du chemin forestier, de 25% de pente, qui se raccorde au plateau de Mansourah, à 100m de dénivelé par rapport au pont.

Outre l'avenue de Roumanie qui le longe, le talus aval est occupé par quelques constructions anciennes très endommagées. Le versant du Chemin forestier est par contre, peu construit, mais couvert par une végétation arborée. De nombreuses ravines, issues du plateau de Mansourah, se perdent au niveau de la plateforme ferroviaire, par suite d'un drainage déficient.

Les roches qui forment cette morphologie sont variées. Elles sont représentées par la série stratigraphique suivante :

- Les calcaires massifs du Crétacé supérieur (Cénomano-Turonien)

Ils sont connus sous le terme de «Néritique constantinois» et correspondent à une série massive de calcaires fins, gris à blanchâtres, fossilifères (photo 1). Ils affleurent sur toute la hauteur des gorges (plus de 150 m), en bancs métriques et sont coiffés par quelques mètres de pélites et grès calcaires observés sur le talus aval de la culée du pont (à l'intérieur de la société Naftal). Cette formation représente le terrain substratum du site du pont Sidi Rached.



Photo 1 - Le pont de Sidi Rached à Constantine
Sidi Rached bridge in Constantine

F : Miroir de faille verticale N130° remontant l'assise calcaire cénomano-turonienne (**Vertical fault Mirror N130° uplifting Cenomanian-Turomian limestone**).

Sur le plan structural, le calcaire néritique correspond à un flanc monoclinale de direction N 60° et de faible pendage (5°) vers le SE (fig.1 et 3). Il présente une légère inflexion au droit de la plateforme ferroviaire, d'après l'interprétation des coupes de sondages

- Les marnes et marno-calcaires crétacés (telliens)

Les marnes sont de couleur gris-sombre et se présentent en feuillets millimétriques à centimétriques. Elles se débitent facilement suivant leurs joints de stratification et le réseau serré de diaclases qui les découpe (photo 2).

Elles renferment des bancs demi-métriques marno-calcaires plus robustes et occupent, sous un faible recouvrement colluvial, la grande majorité du talus aval du pont de Sidi Rached et le versant du chemin forestier. L'observation de cette formation sur site et sur carottes de sondages, permet de distinguer deux termes :

- un terme supérieur décomprimé et parcouru par un réseau de diaclases ouvertes, tapissées d'oxydes et parfois de gypse. Cet hori-

LE PONT SIDI RACHED À CONSTANTINE (ALGÉRIE) : UNE CULÉE DANS UN GRAND GLISSEMENT DE TERRAIN

zon est très mal récupéré par sondages et les carottes sont souvent remaniées et récupérées en fragments centimétriques. Des pertes totales d'eau sont constatées dans quelques forages anciens. Son épaisseur varie entre 10 et 20 m.

- un terme inférieur plus consistant, mis en évidence par les sondages et mieux récupéré (carottes de 10 à 100 cm). Cet horizon renferme néanmoins, quelques passées terreuses.

Contrairement à la régularité de la structure des calcaires néritiques qu'elles recouvrent, ces marnes sont très plissées et montrent, de place en place, une grande variation de leur direction et pendage. Elles sont discordantes sur l'assise calcaire et correspondent aux nappes telliennes d'âge probable maestrichtien.



Photo 2 - Marnes crétacées, telliennes, très fracturées et décomprimées (versant du chemin forestier)

*Fractured and uncompressed
Cretaceous tellian marls*

- Les calcaires lacustres de Mansourah.

Ils sont d'âge quaternaire ancien et forment le plateau de Mansourah (photo 3). Ils sont représentés par des dalles épaisses, subhorizontales, de plusieurs mètres de calcaire blanchâtre, vacuolaire, discordant sur les marnes telliennes.

Un conglomérat de 1 à 2 m d'épaisseur, affleure localement à la base de ces cal-

caires. L'érosion différentielle entre les marnes friables et les dalles calcaires robustes, entraîne des écroulements fréquents de gros blocs parsemés le long du versant qui domine le pont Sidi Rached.



Photo 3 - Dalle calcaire, disloquée en bordure du plateau quaternaire de Mansourah

Dislocated limestone flag, in the edge of Mansourah quaternary table-land

- Les colluvions et éboulis

Ils sont de nature hétérogène, à débris pélistiques dominants et recouvrent superficiellement l'ensemble du versant marneux. Quelques encroûtements calcaires se développent sur des zones de replats topographiques tel celui situé au-dessus du talus de la voie ferrée.

- Les remblais

Les remblais les plus épais sont localisés, d'après les sondages, au droit de la culée orientale du pont et le long de la route qui mène vers la gare ferroviaire (rue Zaamouche). L'ensemble des sondages anciens, réalisés sur la culée du pont Sidi Rached et la plate forme ferroviaire voisine, a mis en évidence la présence de remblais épais. Certains sondages montrent des épaisseurs de 8 à 10 m. Ces remblais sont de nature prédominante marneuse et paraissent peu ou mal compactés.

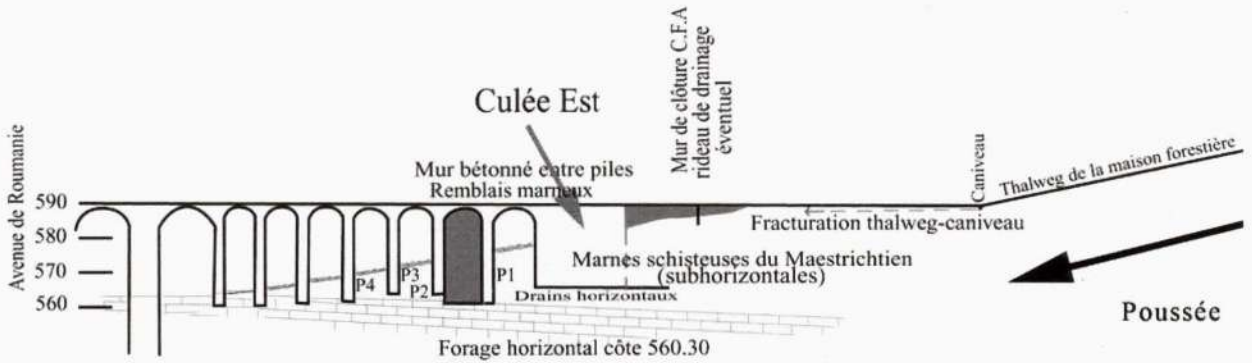


Fig. 1 - Structure géologique de la partie orientale du pont Sidi Rached, (d'après G. Durozoy, 1956, modifiée).

Geological structure of eastern side of Sidi Rached Bridge (G. Durozoy, 1956, modified)

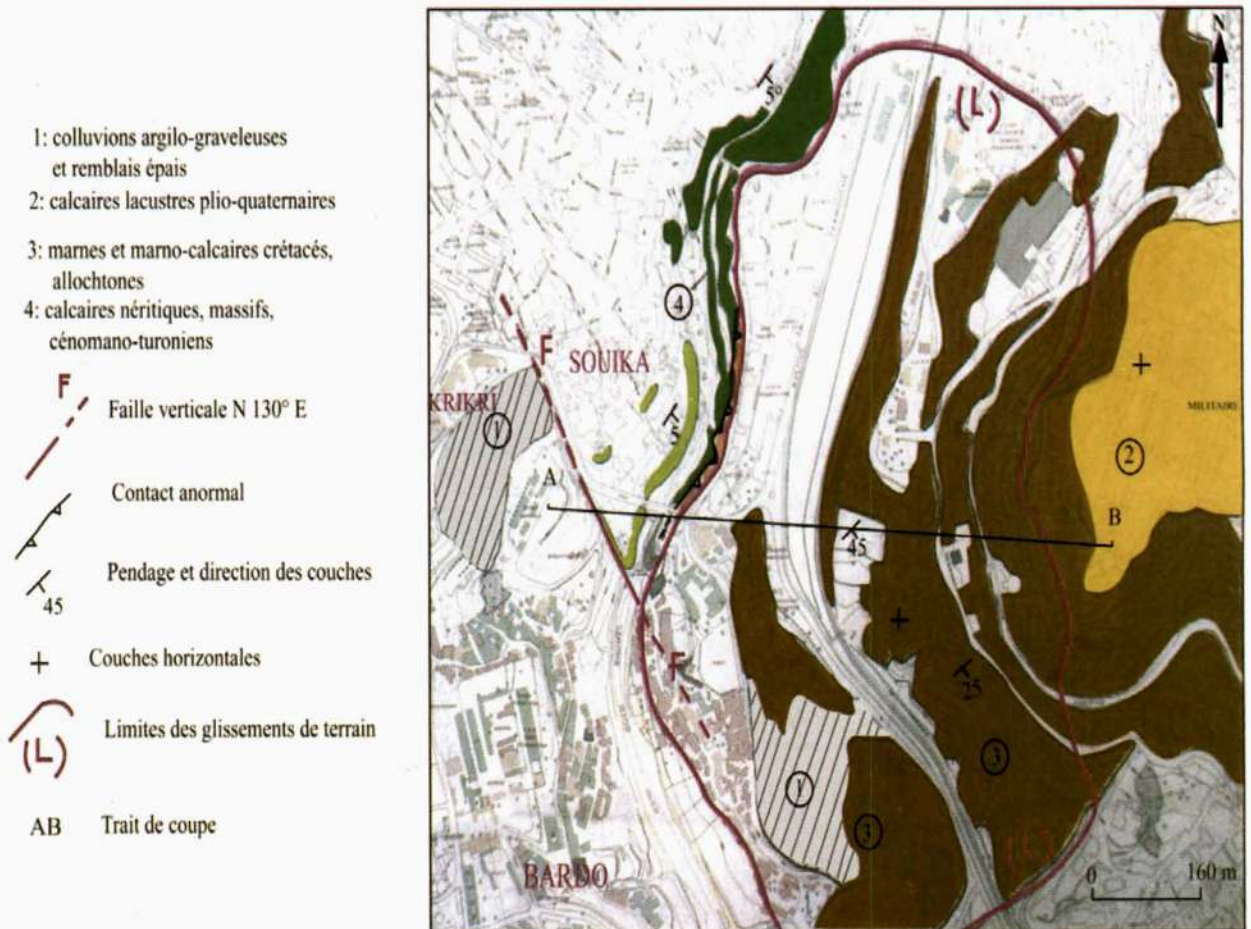


Fig. 2 - Carte géologique du site du pont Sidi Rached

Geological map of Sidi Rached site

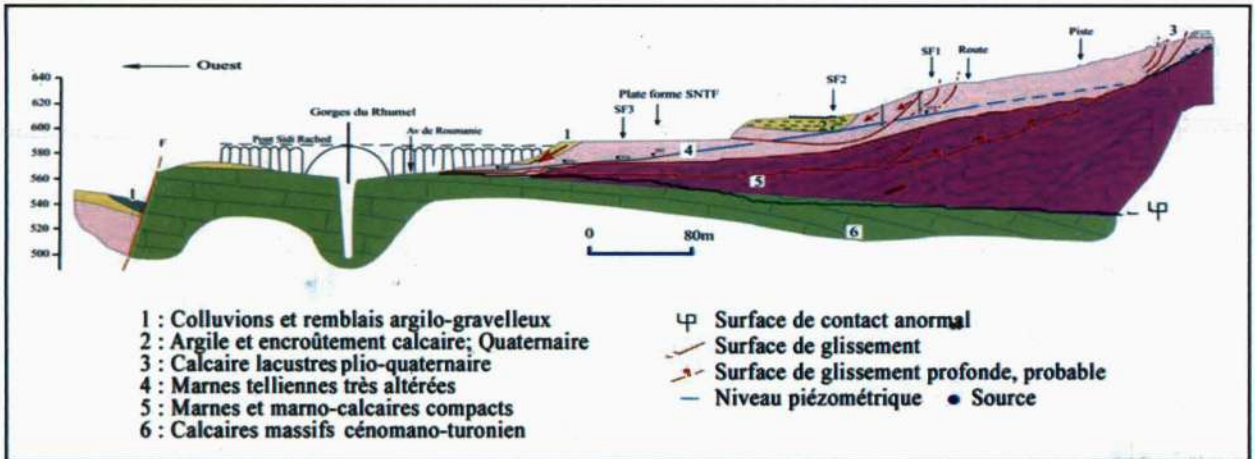


Fig. 3 - Coupe géologique (AB) du versant rive droite du Rhumel

Cross section (AB) of Rhumel river right side

La présence d'eau souterraine se manifeste par de nombreuses résurgences d'eau, le long du talus aval de la culée du pont. Sous ce dernier et à sa proximité, deux sources ont été captées lors de la construction de l'ouvrage, à la hauteur de l'avenue de Roumanie, à la côte d'altitude 563m. Ces résurgences correspondent sensiblement au contact entre les marnes telliennes altérées et fracturées, perméables et le calcaire sous-jacent, peu perméable. L'interprétation globale des données de terrain et des sondages carottés, montrent que les horizons aquifères correspondent :

- aux termes supérieurs, altérés et décomprimés des marnes telliennes,
- aux remblais existants en particulier sous la culée est du pont de Sidi Rached,
- aux calcaires lacustres assez poreux du plateau de Mansourah. La nappe contenue dans cet aquifère de structure géométrique légèrement inclinée vers l'est, semble s'écouler dans cette direction.

L'examen des relevés piézométriques d'une campagne de sondages carottés, réalisés par le LTP Est au voisinage de la culée du pont (période 1998-2000), montre la présence d'eau souter-

raine entre les côtes 572 et 568m, suivant le sens de la pente, soit un gradient hydraulique moyen de 2,5 % entre les piézomètres extrêmes : Sc1 et Sc7 (fig.4).

Les relevés piézométriques effectués entre janvier 1998 et juin 2000, bien qu'irréguliers dans le temps, ne montrent pas de variations notables. La nappe paraît insensible aux écarts saisonniers des précipitations malgré les fortes pluies de l'hiver 1998. Nous attribuons cette faible variation du niveau piézométrique, d'une part, à une perméabilité probablement élevée des marnes et marno-calcaires telliens très altérés et d'autre part, à la vidange rapide de la nappe qui se trouve ici, proche de son exutoire : les gorges du Rhumel.

L'alimentation de l'aquifère marneux décomprimé et fissuré, est assurée par l'impluvium relativement large (500 m), compris entre la bordure du plateau de Mansourah et le talus rive droite du pont Sidi Rached, mais également par les infiltrations sur le plateau. En raison de l'inefficacité des ouvrages de drainage du versant dominant la plate forme ferroviaire, signalée dès 1956 par Durozoy, la plupart des eaux de ruissellement du versant s'infiltrent dans le sol, et en particulier au niveau de la plate forme

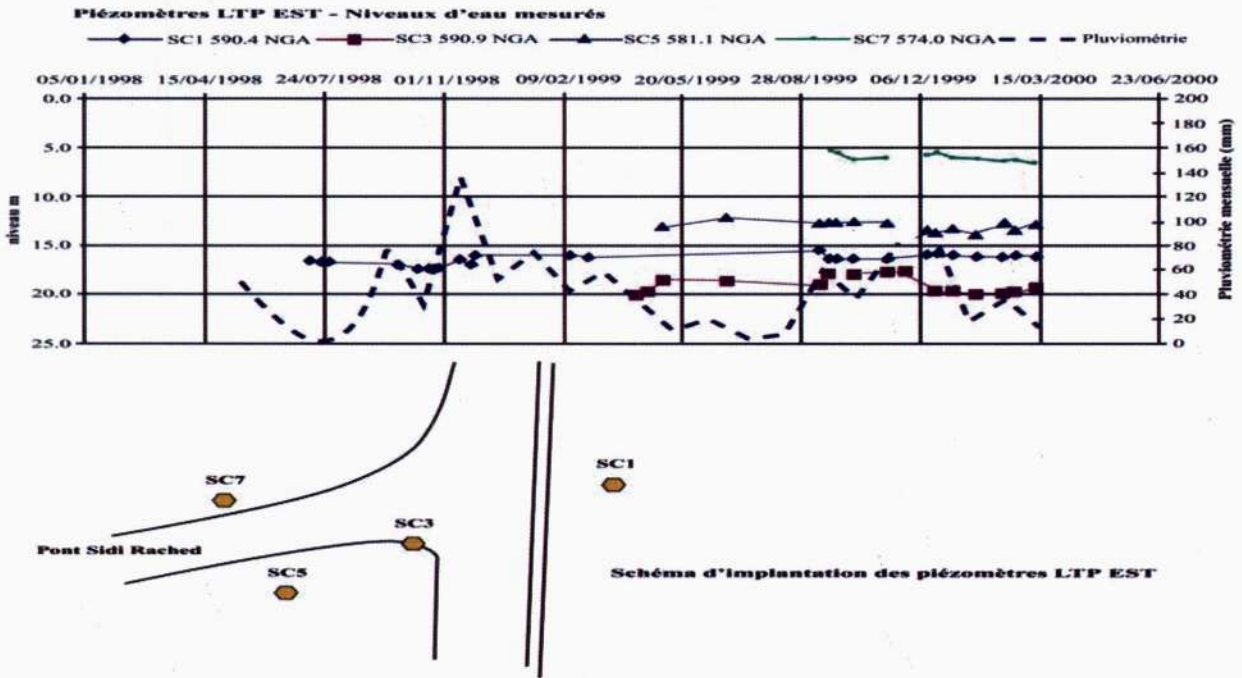


Fig. 4 - Mesures piézométriques et pluviométrie

Piezometric and pluviométric measures

ferroviaire, pour réapparaître sous forme de sources, en aval de la culée du pont Sidi Rached. Depuis la construction du pont, plusieurs dispositifs de drainage ont été installés : puits, fossés, galerie, drains subhorizontaux. On note sur le terrain, dans le talus sud par exemple, la présence d'anciens drains mais qui ne semblent plus fonctionner. En revanche, certains drains ont produit beaucoup d'eau : des « débits importants de certains drains, notamment ceux qui débouchent au dépôt SNTV, de 1 et 2 l/s en période pluvieuse » ont été notés par le LTPEst (1983).

5. ÉTUDE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

5-1 Observations sur site

Au cours des études antérieures, le problème de l'instabilité de la culée est du pont Sidi Rached, a été expliqué par un glissement de terrain local dont les contours ne dépassaient pas les environs

les plus proches de la culée. En effet, les désordres les plus apparents sont bien exprimés le long du talus aval, de part et d'autre de la culée, tels que :

- la fissuration de plusieurs constructions en béton armé (photo 4);
- le basculement de murs de soutènement;
- la dégradation de structures enterrées à l'intérieur du siège NAFTAL;
- l'inclinaison systématique des arbres (photo 5).

Le levé géologique de tout le versant, en amont du pont montre, cependant, plusieurs autres indices d'instabilité. Il s'agit, en particulier :

- d'une ouverture excessive de diaclases et joints de stratification des marnes telliennes;
- d'affaissement et fissuration affectant deux chemins forestiers (photo 6).

LE PONT SIDI RACHED À CONSTANTINE (ALGÉRIE) : UNE CULÉE DANS UN GRAND GLISSEMENT DE TERRAIN

Les ouvrages de drainage anciens, des eaux superficielles, sont systématiquement fissurés (photo 7) et les voies ferrées sont périodiquement rectifiées, preuve de l'instabilité de leur sol support.

Ces observations militent ainsi, en faveur d'un glissement de terrain mobilisant l'ensemble du versant, compris entre le contrebas du plateau de Mansourah (côte 685m) et le talus aval de la culée du pont (côte 565m). Les terrains déstabilisés correspondent aux remblais et probablement



Photo 4 - Constructions fissurées et abandonnées, sur le talus aval du pont.

Cracked and surrendered constructions, down side the bridge

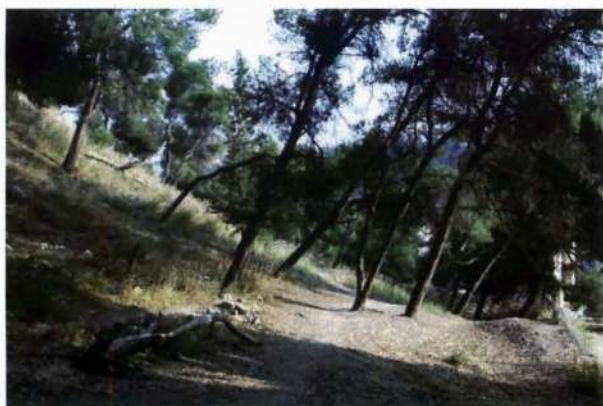


Photo 5 - Inclinaison systématique des arbres, au voisinage de la culée du pont, talus aval.

Inclined trees near the bridge abutment



Photo 6 - Affaissement et fissuration d'un chemin forestier, en amont du pont

Collapse and cracks of forest way, above the bridge



Photo 7 - Déformation et fissuration de tous les ouvrages de drainage des eaux superficielles, talus amont de la plate-forme ferroviaire.

Deformation and cracks of all superficial water drainage constructions, slope of railway platform

aux marnes telliennes les plus remaniées (les plus mal récupérées par sondages carottés). Les calcaires cénomano-turonien, formant des falaises très hautes, ne montrent aucun indice d'instabilité.

C'est sur la base de ces observations de terrain, qu'un programme d'investigation par sondages équipés d'inclinomètres, a été élaboré, suivant un profil étendu à toute la hauteur du versant soupçonné instable.

5-2. Mesures inclinométriques

Plusieurs campagnes de mesures inclinométriques ont été lancées et pour ne citer que les plus récentes :

- 1) campagne 1999 LTP Est au niveau de la culée du pont;
- 2) campagne 2002 et 2004 LTP Est au niveau de la culée du pont;
- 3) campagne EEG SIMECSOL LTPEst (juillet 2003 à juillet 2004).

La période de mesure de la campagne 1 (1999) semble insuffisante en raison du mode d'installation des inclinomètres adoptée alors (clavage au sable, campagnes 1 et 2) qui est de moindre sensibilité que les inclinomètres scellés au coulis de ciment (campagne 3). Dans le premier cas, il faut en effet un déplacement important du terrain pour déformer le tube, ce qui masque les mouvements pendant quelques temps. Seuls les résultats des mesures de 2002 à 2004 des campagnes 2 et 3 ont fourni des résultats significatifs.

Les courbes inclinométriques font nettement et rapidement apparaître la profondeur des surfaces de glissement. Pour les variations angulaires, les courbes présentent des pics correspondant à ces surfaces. A ce stade des mesures, on peut noter que :

- l'inclinomètre le plus à l'amont (SF1, fig.6) n'indique pas de déplacement du terrain;
- l'inclinomètre SF2, installé à mi-pente montre clairement la présence de deux surfaces de rupture actives et profondes, l'une à 14 m de profondeur et l'autre à 30,5 m;
- les inclinomètres du LTPEst installés au niveau de la culée du pont (plus en aval du SF2) montrent une surface de rupture qui se confond avec l'interface entre le calcaire et les marnes telliennes.

Les inclinomètres mettent clairement en évidence plusieurs surfaces de glissement ; le versant du chemin forestier jusqu'au Rhumel est affecté par des instabilités qui sont à l'origine des désordres de la culée du pont Sidi Rached et des bâtiments construits dans la pente et à l'aval.

Les profondeurs des surfaces de rupture sont de 14 m et 30,5 m au niveau du sondage SF2 (fig. 3 et 5) où on observe deux glissements superposés. Les vitesses de déplacement des glissements varient entre 13,6 et 46,7 mm /an. On notera toutefois que la moyenne des vitesses atteint 30 mm par an ! Il s'agit d'un mouvement lent mais mesurable et dont les effets sur la culée du pont Sidi Rached sont considérables.

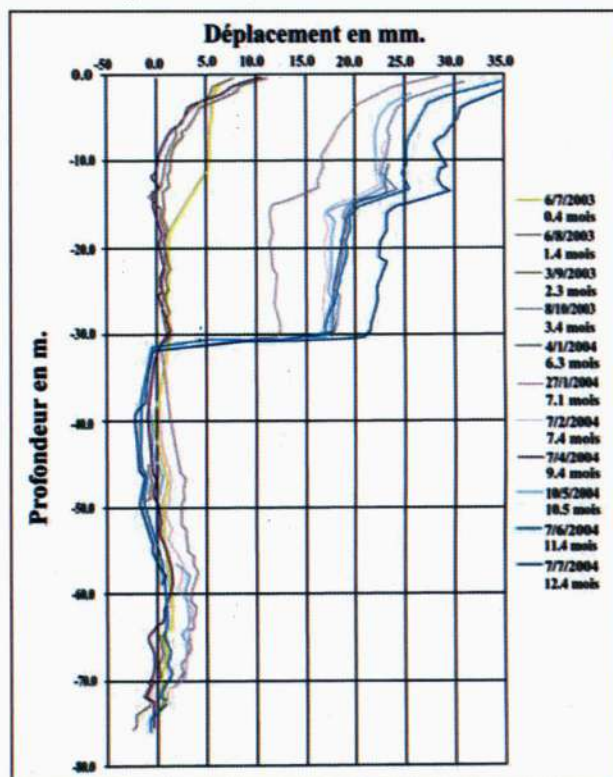


Fig. 5- Déplacements de l'inclinomètre SF2. On note ici deux surfaces de rupture, à 14 m et 30,5 m de profondeur.

Displacements of SF2 inclinometer. Note two break surfaces at 14 and 30.5m depth

5-3. Mesures topographiques de surveillance. Des mesures depuis 1954

Les mesures topographiques de surveillance ont débuté en mai 1954, il y a plus de 50 ans. Ces mesures ont toujours été réalisées avec du matériel de précision (théodolite et niveau) en suivant les procédures de la microgéodésie avec mise en place d'un réseau de points matérialisés par des repères et des points fixes matérialisés par des embases sur des piliers.

On peut distinguer deux séries de campagnes de mesure : de mai 1954 à avril 1960 avec sept campagnes de mesures réalisées suivant un rythme annuel, puis de juin 1997 à avril 2001 avec trois campagnes de mesures effectuées tous les deux ans. La réutilisation réussie du réseau de 1954 pour les campagnes de 1997 à 2001, a permis de recalibrer les mesures récentes sur celles de mai 1954. On peut donc estimer aujourd'hui l'amplitude, la direction et la vitesse moyenne des déplacements sur une période de 50 ans, avec une grande précision. Il faut toutefois regretter le faible nombre de points observés en dehors de l'ouvrage lui-même et l'absence de mesures durant 37 ans, entre 1960 et 1997, empêchant de mettre en évidence les variations des vitesses des déplacements durant cette période.

L'analyse de ces mesures conduit à des résultats très intéressants (fig.6) :

1) les points de la pente (Q), de la route (P) et de la culée (C) se déplacent de manière significative et régulière au cours du temps (respectivement 880 mm, 1340 mm et 535 mm en 47 ans) alors que les points de la première pile (A) se déplacent très faiblement (49 à 57 mm en 47 ans) par effet de butée de l'ouvrage,

2) la vitesse moyenne du déplacement du terrain dans la pente est de 19 mm/an au point Q et de 28.5 mm/an au point P au niveau de la route nationale. Il est vraisemblable que ce déplacement intègre des mouvements de surface plus importants qu'au point Q;

3) la vitesse moyenne du déplacement du point C près du pont est de 11 mm/an, nettement plus faible que celle des autres points dans la pente;

4) la vitesse moyenne des déplacements des points de la première pile du pont est très faible, de 1.1 à 1.2 mm/an.

5) les directions des déplacements des points C, Q et P sont clairement est, avec une légère rotation (+16°) vers le nord-est pour les points de la pile (direction moyenne 287°), vraisemblablement une conséquence de la réaction exercée par le pont qui est courbe à cet endroit;

6) les inclinaisons des déplacements sont toutes proches de celle de la pente moyenne (14°) sauf pour le point C de la culée, qui se soulève (+101 mm en 47 ans) ! Ce déplacement est parallèle au toit du calcaire sous la culée, sur lequel glisse la marne. La culée est donc entraînée par le glissement; elle remonte à cet endroit à cause du pendage du calcaire.

Faute de mesures avant 1954, il est impossible de quantifier l'évolution de la vitesse des déplacements au cours du temps. Avec une vitesse constante, la culée se serait déplacée de 2,1 m depuis sa construction. Le déplacement de la culée est en réalité plus modéré; il est estimé à un mètre environ; la vitesse a donc varié avec le temps.

Les mouvements se sont-ils accélérés ?

C'est peu vraisemblable pour le point C dont la vitesse moyenne entre relevés varie peu. Dans un premier temps, le pont lui-même puis les renforcements de la structure ont vraisemblablement ralenti le déplacement de la culée. Ces renforcements n'ont pas suffi à arrêter les mouvements. Sans connaître la raison profonde des déplacements de la culée, permettre à la culée de se déplacer sans trop solliciter le pont par la mise en place d'un tablier avec un joint a certainement sauvé le pont Sidi Rached !

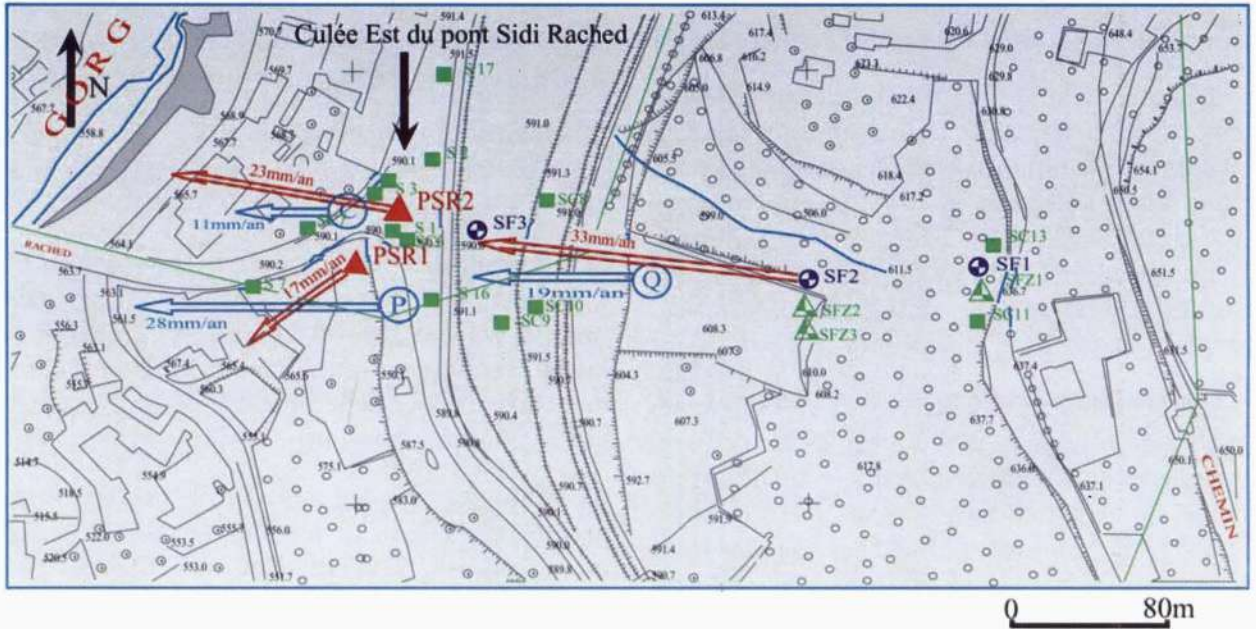


Fig. 6 - Vitesse et direction de déplacement
Speed and direction of displacement

Périodes de mesures : 1954-1960 (en rouge), 1997-2001 (en bleu) SF1 à SF3 : inclinomètres récent (2003) (Period of measures : 1954-1960 (red), 1997-2001 (blue); SF1 to SF3: recent inclinometers (2003))

6. ANALYSE DE STABILITÉ DU VERSANT

La figure 2 indique l'extension maximale des glissements potentiels déduits des observations géomorphologiques. Leur surface est considérable : 678 000 m² environ seraient instables.

En tenant compte d'une profondeur moyenne de glissement de 20 m et d'un coefficient géométrique de 0,5, le volume de terrain en déplacement serait de 6,8 millions de m³. Plusieurs indices font penser que nous nous trouvons en présence de plusieurs glissements anciens qui se superposent d'après les mesures inclinométriques ou se côtoient, et dont certains sont actifs aujourd'hui comme celui mis en évidence à l'amont immédiat du pont par exemple. Le volume de ce glissement est de plus de 500 000 m³

Caractéristiques géotechniques des formations

On ne dispose que peu de renseignements sur les caractéristiques géotechniques des formations en place. En effet, les sondages carottés réalisés lors des précédentes campagnes n'ont pas fait l'objet de prélèvements d'échantillons intacts et aucun essai en laboratoire n'a été réalisé. Les marnes qui se présentent le plus souvent en feuillets millimétriques à centimétriques ont un comportement plus proche de celui d'une roche que d'un sol. Les derniers essais en laboratoire se sont donc limités à la réalisation d'essais d'identification. On observe que les pourcentages de fines (inférieures à 8 μ m) sont compris entre 50 et 80% et que la fraction argileuse (éléments inférieurs à 2 μ m) varie de 25 à 50%.

La présence de nappes joue certainement un rôle important dans les mouvements du versant du chemin forestier. Ils sont anciens, les déplacements cumulés sur une période de 50 ans sont de l'ordre du mètre, les vitesses de déplacement restent faibles mais continues, mais les conditions initiales qui ont déclenché ces mouvements restent délicates à déterminer.

Dans le cas d'un glissement déclaré, dont la géométrie, la position de la surface de rupture sont bien connues, on dispose d'informations qui permettent d'établir un «modèle» simplifié mais réaliste du point de vue mécanique du glissement. Le raisonnement repose sur la constatation que le glissement est un essai de rupture en vraie grandeur.

Les hypothèses sur lesquelles s'appuie cette modélisation sont simples :

- la cohésion du sol est nulle le long de la surface de rupture;

- on étudie les variations du coefficient de sécurité en fonction des variations de l'angle de frottement et des pressions interstitielles schématisées par une nappe dans des fourchettes raisonnables dictées par les observations et les essais;

- on analyse en priorité les variations du coefficient de sécurité. Ceci signifie par exemple, qu'on recherchera une augmentation de 50% du coefficient de sécurité pour assurer la stabilisation de la pente plus qu'une évolution de 1 à 1,5 comme c'est l'habitude.

On peut adopter alors la méthode de calcul appelée «calcul rétrograde» ou plus généralement «back analysis» qui est schématisée sur la figure 7. Cette méthode conduit à un graphe $F(\varphi, U)$ pour chaque type de glissement du site. Pour analyser l'effet d'un drainage ($U > U'$; U étant la pression interstitielle dans les conditions naturelles), on calcule la fonction $F(0, \varphi, U')$

avec l'objectif d'atteindre par exemple un coefficient de sécurité F de l'ordre de 1,5. Bien évidemment les paramètres explicatifs sont bornés par comparaison avec les valeurs obtenues par ailleurs, sur ce type de matériau, par des essais en laboratoire notamment.

Sur le graphe de la figure 7, l'effet d'une diminution des pressions interstitielles (U') qui correspond au rabattement de la nappe du terrain naturel à la nappe observée, conduit à une augmentation du coefficient de sécurité de l'ordre de 50% pour un angle de frottement moyen qui se situe entre 20 et 22°.

La méthode des perturbations développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et intégrée dans le logiciel de calcul de stabilité des ouvrages et pentes TALREN a été adoptée. Elle est particulièrement bien adaptée au calcul de stabilité de pentes avec des ruptures non circulaires qui sont celles observées sur le site.

La morphologie du site et les mesures inclinométriques conduisent à étudier trois types de glissements :

- 1) un grand glissement englobant toute la pente;
- 2) un glissement plus local détecté par l'inclinomètre SF2 en milieu de pente;
- 3) un grand glissement débutant au niveau du chemin forestier.

Les calculs montrent que l'instabilité de la pente peut s'expliquer par des caractéristiques géomécaniques au niveau de la surface de rupture où $c' = 0$ et $\varphi' = 20$ à 22° et la nappe au terrain naturel où $c' = 0$ et φ' entre 13 et 15° si la nappe correspond à celle qui a été observée.

Est-il possible que l'angle de frottement résiduel de ces marnes soit aussi faible que 14° ? De quels éléments dispose-t-on pour conclure ?

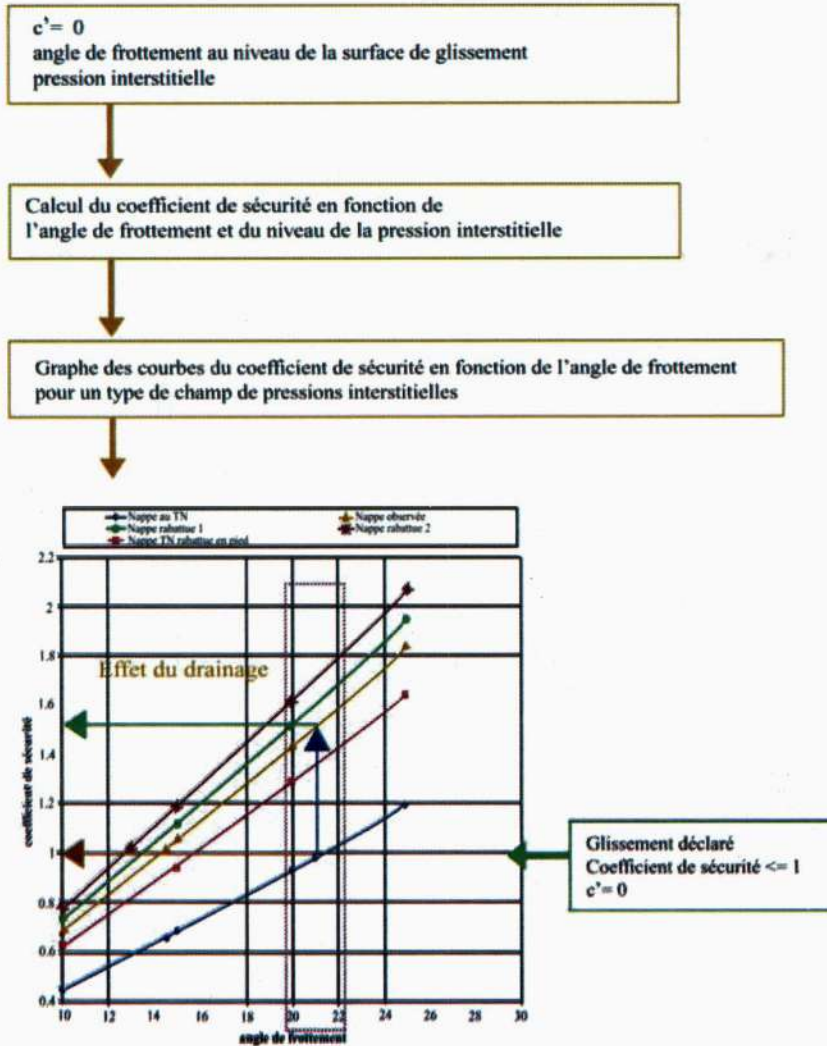


Fig. 7 - Méthodologie des calculs de stabilité «back analysis» (Cartier, G. 1985)

Back analysis methodology of stability calculation (Cartier G. 1985)

Les calculs de stabilité montrent que les caractéristiques à la surface de rupture $c'=0$, $\phi' = 21^\circ$ et la nappe observée, conduisent à un coefficient de sécurité de 1,5; la pente devrait être stable ce qui est contraire aux observations et mesures.

Les déplacements des surfaces de glissement ont été très importants, ce qui a eu pour effet de lisser ces surfaces en faisant chuter l'angle de frottement jusqu'à l'angle de frottement résiduel.

Cette valeur $\phi' = 14^\circ$ est tout à fait admissible pour les marnes telliennes remaniées avec une forte proportion de particules argileuses dont l'angle de frottement résiduel doit se situer entre 6 et 14° à la lecture des corrélations de Skempton, Mesri et Diaz Capeda ou Blondeau. La détermination des caractéristiques résiduelles (C_{res} et ϕ_{res}) par des essais de cisaillement annulaire ou alterné reste à faire pour un calcul de stabilité plus précis.

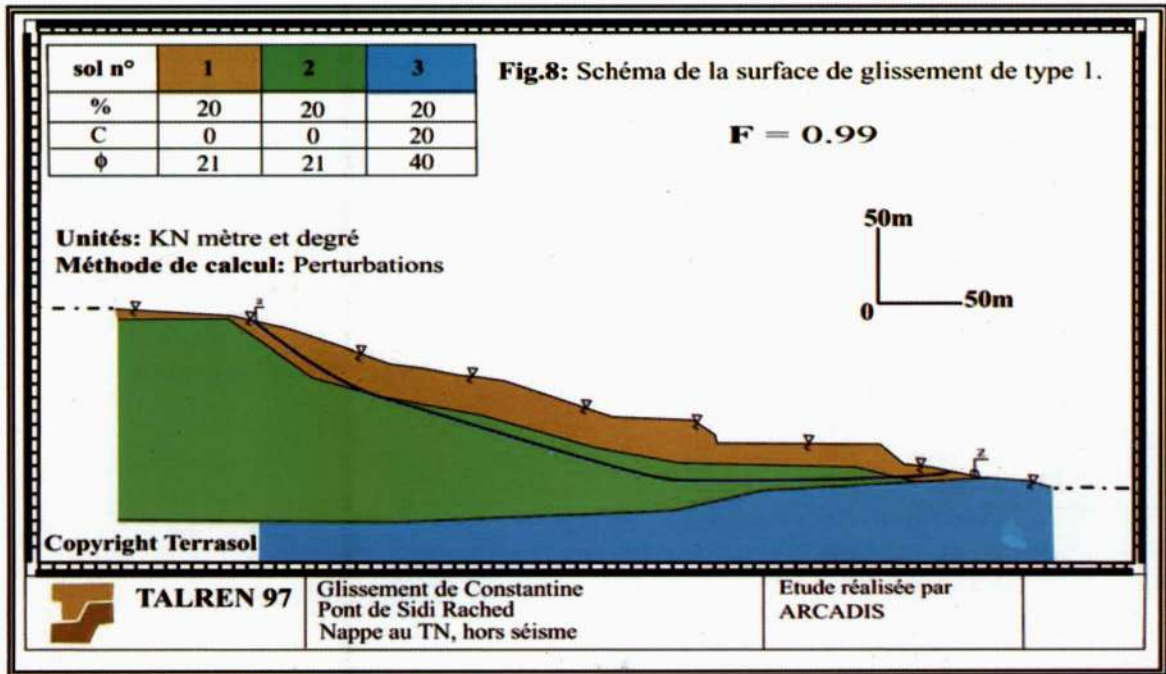


Fig. 8 - Schéma da la surface de glissement de type 1

Diagram of the sliding surface, type 1

7. PROBLÉMATIQUE DE LA CONFORTATION DES GLISSEMENTS

Rappel des données du problème

- Surface des glissements potentiels : environ 300 000 m²;
- Ruptures à des profondeurs variant de 13 à 30 m;
- Volume des terrains instables : plus de 6 millions de m³;
- Glissement actif à l'aval du pont Sidi Rached d'un volume de plus de 500 000 m³.

Nous sommes donc en présence de grands glissements, profonds et actifs. Le site est peu bâti et les mouvements sont lents et relativement homogènes ce qui a limité les désordres sur les bâtiments. La sauvegarde à long terme du pont Sidi Rached ne laisse le choix qu'entre deux alternatives : arrêter totalement les glissements

de terrain au moins au niveau de la culée ou accepter les mouvements et adapter le pont pour qu'il puisse subir ces déplacements pendant une durée suffisamment longue.

Dans cette problématique, en raison de la présence du pont, la solution intermédiaire qui consisterait à conforter le versant tout en acceptant de petits déplacements n'a pas été envisagée. On aboutit alors à une solution qui cumule les inconvénients et les coûts de chaque solution, ce qui ne paraît pas judicieux.

Arrêter les déplacements ?

Pour la pente à l'amont du pont, la plate-forme du chemin de fer constitue une butée importante qui s'oppose au déplacement du versant. Il en est de même pour le massif surmonté d'un replat qui constitue le talus à l'amont des voies ferrées, dans l'alignement du pont. A l'aval, la pente se poursuit avec une hauteur de plus en plus importante à

mesure qu'on s'éloigne du pont vers le sud. Charger cette partie la rendrait encore plus instable.

Réaliser une butée plus importante, décharger la pente ? Les calculs de stabilité indiquent que la géométrie actuelle de la pente n'est pas défavorable; il convient donc de ne pas la modifier sans précautions. Localement, toutefois, la pente des talus particulièrement celle du talus de la route nationale, pourra être aménagée pour la rendre moins raide.

Une des premières études géotechniques relatives aux désordres anciens, survenus sur la culée est du pont Sidi Rached (rapport de G. Durozoy, 1956) met l'accent sur le rôle primordial des eaux souterraines dans la déstabilisation du talus portant cette culée. Un programme de drainage par sondages horizontaux et fossés drainants a été préconisé et mis en œuvre, en se limitant à la zone de la culée. Cette action ne fut malheureusement pas efficace.

Drainer

Les calculs de stabilité qui englobent la culée et le versant en donnent une explication : ils montrent que le drainage complet – qui est techniquement irréalisable – n'apporterait pas un coefficient de sécurité suffisant pour garantir la stabilité des mouvements.

En effet, dans les hypothèses les plus probables, un drainage complet de la pente (nappe totalement rabattue) n'apporte qu'un supplément de coefficient de sécurité de 30% maximum. Compte tenu de la difficulté technique de réaliser un tel drainage et du niveau du coefficient de sécurité (1,3), l'arrêt des mouvements ne peut être garanti. Les conclusions des calculs effectués sur les deux autres types de glissement sont identiques : un drainage total augmente le coefficient de sécurité de 35% environ pour le glissement 3 et de 10% pour le glissement 2.

En cas de séisme avec une accélération horizontale de 0,09 g, le terrain étant totalement drainé, le coefficient de sécurité varie de 0,9 à 1. Ces coefficients sont insuffisants pour assurer la stabilité de la pente soumise à ce séisme (période de retour de 100 ans). A l'analyse de ces résultats, il apparaît impossible d'assurer la stabilité du versant et des glissements par drainage.

Actions mécaniques.

Les solutions telles que les inclusions, profilés, clouage, murs ancrés, soutènements (murs en béton, ouvrages cellulaires, gabions), ne peuvent être envisagées que lorsqu'un glissement est limité. Dans le cas présent, où des mouvements ont été détectés dans l'ensemble de la zone, avec des surfaces de glissement à grande profondeur, les efforts stabilisateurs qui peuvent être développés par ce type d'ouvrages sont sans commune mesure avec les forces motrices générées par les masses en mouvement, sauf à en multiplier le nombre de façon irréaliste.

Créer par exemple, un massif à l'amont de la culée du pont pour stopper ou dévier les mouvements du versant revient à créer un point dur qui va s'opposer aux forces exercées par le terrain à l'amont. Ce massif doit s'étendre sur au moins 50 m en longueur et concerner une couche de terrain de 40 m de hauteur. L'analyse montre que le terrain qui glisse va se mettre en butée à l'arrière du massif. Les efforts deviennent alors considérables : il faut développer 340 000 tonnes sur 50 mètres de longueur sans être certain d'arrêter les déplacements. On notera que si le massif est capable de s'opposer à ces forces, le terrain à l'amont du massif ne déviara pas sa trajectoire latéralement, il se plastifiera et passera finalement par-dessus le massif !

Il est donc impossible d'arrêter ou de dévier le glissement en garantissant l'absence de déplacements à long terme.

8. LES DISPOSITIONS DE SAUVEGARDE DE LA CULÉE EST DU PONT SIDI RACHED

L'inefficacité d'un drainage complet pour arrêter les glissements ne doit pas faire oublier les effets très néfastes des apports d'eau exceptionnels qui peuvent survenir. On peut éviter des désordres exceptionnels comme ceux survenus lors de la rupture de la conduite d'eau de diamètre 400 mm, en maîtrisant les eaux et particulièrement celles de la plate-forme des chemins de fer qui collecte non seulement les eaux pluviales avec une superficie importante mais aussi les eaux du versant. Cette maîtrise des eaux est aussi bénéfique en cas de séisme en évitant le cumul de pressions interstitielles fortes avec le séisme. Dans le même esprit, drainer le terrain autour de la culée est une mesure de sauvegarde qui limite les effets de situations exceptionnelles sur l'ouvrage : forte remontée de la nappe ou séisme.

8-1. Drainage de la culée est

Quatre des sept drains forés en 1954-1956 coulaient, dont un en hiver seulement. Leur effet certes positif, est resté limité à la zone de la culée. Rétablir ce type de drainage, avec par exemple l'objectif de limiter la remontée de la nappe en pied de glissement aura un effet incertain. Dans un terrain en mouvement, les drains subhorizontaux présentent à long terme, plus d'inconvénients que d'avantages. En effet, une fois rompus ou colmatés, ils peuvent provoquer l'augmentation des pressions interstitielles dans le terrain. Il est donc préférable de réaliser soit des tranchées drainantes, soit des galeries, deux solutions qui admettent plus de déformations que la précédente. La solution préconisée est de mettre en oeuvre un drainage efficace au niveau de la culée, avec pour objectif de limiter la remontée de la nappe en pied de glissement et par là, d'éviter d'éventuelles accélérations locales des déplacements.

Pour cela, le drainage de la culée est comportera une galerie drainante de 3 m d'ouverture et de 80 m de longueur environ, à partir de laquelle seront forés des drains rayonnants de 30 m de longueur en moyenne (fig.9).

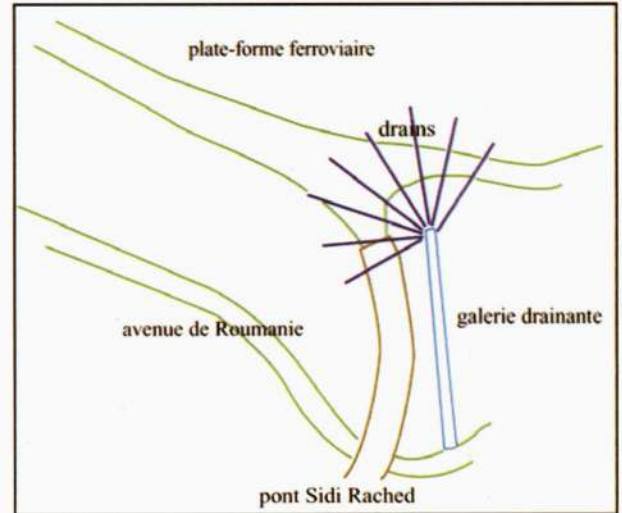


Fig. 9 - Schéma du drainage proposé pour limiter la remontée de nappe.

Diagram of suggested drain age to reduce the uplifting of underground water level

8-2. Culée coulissante

Dans l'impossibilité d'arrêter les mouvements du versant, le pont doit vivre avec une culée qui se déplace sur des appuis glissants et un joint à grand déplacement (fig.10).

Concevoir un joint de durée de vie de 15 ans, durée de vie normale d'un joint de chaussée, et de déplacement de 30 centimètres ne pose pas de problème insurmontable : le pont sur le Tage à Lisbonne possède des joints de chaussée qui admettent des ouvertures de près de deux mètres en cas de séisme. C'est ce type de solution qui a été adopté pour réparer les désordres apparus sur le pont et particulièrement au niveau de la chaussée, mais semble-t-il, sans tenir compte de la cause réelle des désordres (un très grand

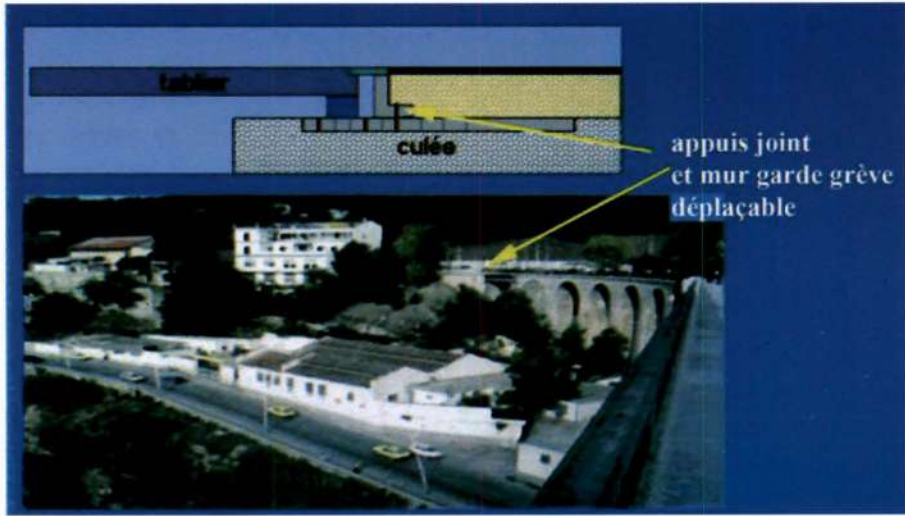


Fig. 10 - Schéma des appuis coulissants proposés

Diagram of suggested slide abutment

glissement), de l'amplitude des mouvements à long terme (métrique en 50 ans) et de leur vitesse (2 cm par an)

Pour le long terme, afin d'éviter des travaux lourds à chaque recalage des appuis et changement de joints, la semelle sera équipée d'appuis glissants démontables et le mur garde grève sera amovible. Ils peuvent être déplacés lorsque le joint arrive en fin de course. Cette amélioration du dispositif existant facilitera les travaux de maintenance, diminuera leur durée et raccourcira les périodes de coupure du pont.

8-3. Surveillance

La surveillance (observation visuelle, topographie, nivellement, inclinométrie et piézométrie) doit s'exercer en priorité au niveau du pont et dans les zones instables, en les dépassant largement, dans la mesure où des incidents qui leur sont extérieurs, peuvent entraîner leur extension.

Les zones de transition : zone en mouvement-zone stable, doivent être particulièrement surveillées.

9. CONCLUSIONS

Les archives du pont Sidi Rached, qui ont pu être consultées pour reconstituer l'historique des désordres, et les mesures (topographiques, inclinométriques) ont permis de mettre en lumière le comportement du site du chemin forestier et du pont Sidi Rached. Ces seules informations montrent clairement que c'est toute la pente du site du chemin forestier qui se déplace suivant des surfaces de rupture très profondes, entraînant dans son mouvement la culée est du pont Sidi Rached.

Malheureusement, il n'existe pas de solutions qui garantissent l'arrêt des déplacements du glissement de terrain. L'ampleur du glissement, le volume des terrains instables - 6 millions de m^3 dont 500 000 m^3 à l'aval du pont - et les forces en jeu, ne le permettent pas.

Le pont et le versant sont placés sous surveillance visuelle, topographique, piézométrique et inclinométrique et des solutions de sauvegarde ont été dimensionnées pour permettre de conserver le lien que constitue le pont Sidi Rached entre les deux rives du Rhumel :

- drainage du terrain de la culée par galerie et drains subhorizontaux rayonnants pour éviter

LE PONT SIDI RACHED À CONSTANTINE (ALGÉRIE) : UNE CULÉE DANS UN GRAND GLISSEMENT DE TERRAIN

les effets de situations extrêmes de pressions interstitielles;

- mise en œuvre sur la culée d'une solution originale : des appuis glissants et des joints à grand déplacement intégrés dans une structure modulaire dont le cycle de maintenance devrait être de 15 ans environ.

BIBLIOGRAPHIE

- ARCADIS, 2004. Etude des glissements de terrain dans la ville de Constantine.
- BOUGDAL, R., BELHAI, D. ET ANTOINE, P. 2004. Géologie détaillée de la ville de Constantine et ses alentours : une donnée de base pour l'étude des glissements de terrain. *Bull. Serv. Géol. de l'Algérie*, vol. 18, n° 2.
- CARTIER, G. 1985. Méthodologie d'étude des glissements de terrain. *Rapport interne du Laboratoire des Ponts et Chaussées, Paris*
- COIFFAIT, P.E., VILA, J.M. ET GUELLAL, S. 1977. Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, Feuille n°74 El Aria avec notice explicative détaillée.
- COIFFAIT, P.E. 1992. Un bassin post-nappes dans son cadre structural : l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord-orientale). *Thèse Doctorat Es-Sciences, Paris*.
- DUROZOY, G. 1956. Géotechnique de la culée orientale du pont de Sidi Rached, Constantine - *Archives de la subdivision des T.P. Constantine*.
- FICHEUR, M. 1899. Carte géologique de Constantine à 1/50 000.
- LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'EST (LTPE). Archives d'études de sols de la ville de Constantine. Période : 1970-1998
- LAHONDERE, J.C. 1987. Les séries ultratelliennes d'Algérie Nord orientale et les formations environnantes, dans leur cadre structural. *Thèse es-Sciences, Paris*.
- PAULSEN, 1999. Glissements de terrain dans la ville de Constantine. *Mission des experts du 1 au 9/12/1999*. 117 989. p. 34. Direction de l'Urbanisme et de la Construction, Wilaya de Constantine
- SNTF. Archives d'études de sol relatives au pont Sidi Rached.
- VILA, J.M. 1977. Carte géologique de Constantine à 1/200 000. *Serv. Carte, géol. Algérie*.