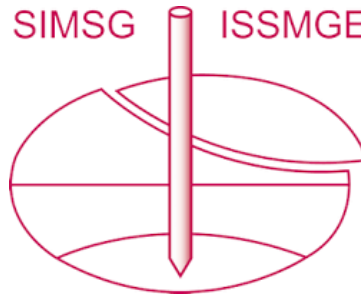


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Cartographie des risques de glissements de terrain pour les autoroutes de l'Est du Maroc

Mapping of landslide risk along highways in eastern Morocco

Abdelkrim Derradji¹, Lionel Lorier², Mohammed Sahli³, Pierre Breul⁴, Denis Fabre³

Abstract : *The motorway network of Morocco was greatly increased in the past two decades :nearly 1,500 km have been opened since 2000. The main geotechnical difficulties were encountered in two main areas: the North of Morocco (Rif marl and flysch) and the Atlas between Marrakech and Agadir (Triassic clayey sandstones). The earthworks in such rockmasses are very sensitive to water conditions and slope stability is frequently problematic. With the experience gained, a guide of methodology for the study of the stability of large slope in argillaceous rocks as been established in 2015.*

The present paper results from a scientific partnership between ADM (Autoroutes du Maroc) and the University Blaise Pascal (Polytech Clermont-Ferrand) with the effective collaboration of the ADRGT (Association pour le Développement des Recherches sur les Glissements de Terrain). The research program deals with understanding the phenomena of landslides in clayey rock along the highway A2 between Fez and Taza. Our paper presents a new method of hazard zoning for highway excavations and embankments along this route, on a total length of 104 km.

From this zoning, the National Company of Motorways of Morocco -ADM developed another innovative approach: it consists, starting from the zoning performed, to define stabilization strategies, monitoring and operation of the portion of highway FEZ-TAZA short term (duration 4 years) and medium term (duration 15 years).

The objective is to control risks of slope instability over a period of at least 15 years taking into account also the additional risk of climate change. And supply the budget of the risks of instability by loans called "Green Fund".

Keywords: *risk analysis, landslide hazard, marls, highway, Morocco*

Résumé : Ce travail est réalisé dans le cadre d'une Convention de partenariat scientifique entre la Société des Autoroutes du Maroc (ADM) et l'Université Blaise Pascal (Polytech Clermont Ferrand). Réalisé avec la collaboration effective de l'ADRGT (Association pour le Développement des Recherches sur les Glissements de Terrain), il s'inscrit dans un programme relatif à la compréhension des phénomènes de glissements de terrain, argileux ou marneux le long de l'autoroute A2 entre Fez et Taza. Le travail consiste à effectuer le zonage des aléas "glissements de terrain" au niveau des versants et des talus autoroutiers le long de ce tracé, soit une distance de 104 km.

A partir de ce zonage, la Société Nationale des Autoroutes du Maroc -ADM a mis au point une autre démarche pertinente et innovante : elle consiste, en partant du zonage réalisé, à définir les stratégies de stabilisation, de surveillance et d'exploitation de la portion d'autoroute FEZ-TAZA à court terme (durée 4 ans) et à moyen terme (durée 15 ans).

L'objectif étant de maîtriser les risques d'instabilités de pente sur une durée au moins égale à 15 ans en tenant aussi compte du risque supplémentaire du changement climatique. Et approvisionner le budget de ces risques d'instabilités par des prêts dites « Fond Vert ».

Mots clés: zonage de risque, glissement de terrain, marnes, autoroute, Maroc

¹ DERRADJI Abdelkrim, Autoroutes du Maroc, Rabat, MA, derradji.abdelkrim@adm.co.ma

² LORIER Lionel, Société Sage, Gières, FR, l.lorier@sage-ingenierie.com

³ SAHLI Mohammed, ADRGT, Gières, FR, sahlm@yahoo.com

⁴ BREUL Pierre, UBP, Clermont Ferrand, FR, pierre.breul@univ-bpclermont.fr

1 ZONAGE DU RISQUE GEOTECHNIQUE

1.1 Identification géologique et géotechnique des terrains traversés

Le tracé autoroutier de l'A2 se situe dans un cadre géologique complexe lié à l'histoire tectonique de cette partie du Maroc. Il suit en majeure partie les terrains autochtones du domaine atlasique, constitués de terrains paléozoïques et secondaires plissés, ennoyés par des sédiments marneux tertiaires subhorizontaux. Le tracé traverse sur les deux derniers tronçons à l'approche de Taza le front fortement tectonisé des nappes pré-rifaines déversées vers le Sud.

D'un point de vue géotechnique, la définition des classes de terrain des déblais est en accord avec la classification du Guide méthodologique ADM (voir référence).

1.2 Critères retenus pour le zonage de l'aléa "glissement de terrain"

Le travail de zonage est remis sous la forme d'un tableau détaillé, donnant pour chaque sens de circulation et chaque zone d'un tronçon: 1) sa longueur et la longueur cumulée en m, 2) la référence ADM de l'ouvrage s'il y a, 3) les caractéristiques de l'ouvrage (type: déblai, remblai, ouvrage bétonné); hauteur ou épaisseur; pente; risberme s'il y a; 4) la classe de sol du déblai s'il y a; 5) la nature des travaux réalisés sur la zone; 6) un ensemble de commentaires relatifs à la nature des désordres et du comportement des ouvrages; 7) la nature de l'aléa probable, matérialisé par une couleur vert, jaune, orange ou rouge pour chacun des types de glissements G1 à G4 susceptibles de se produire dans la zone.

Outre le tableau récapitulatif évoqué, les aléas des zones de chaque tronçon sont reportés sur un fond cartographique Google, avec le tracé autoroutier du tronçon rappelé sur un fond géologique ou topographique.

La qualification de l'aléa est réalisée selon l'épaisseur des terrains en mouvement ou potentiellement mobilisables, comme l'indiquent la Figure 1 et le Tableau 1 extraits du guide méthodologique ADM cité.

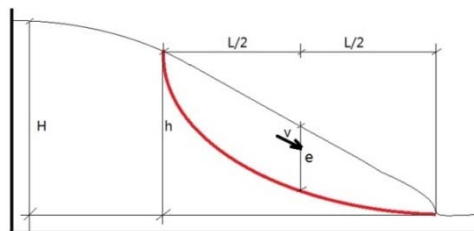


Figure 1: Paramètres géométriques d'un glissement type

H : hauteur du talus

L : longueur d'extension de la zone en mouvement

v: vitesse de mouvement

h : hauteur du glissement

e : épaisseur du glissement ou profondeur de la surface de glissement

Tableau 1: Classement des mouvements en fonction de leur profondeur

Dénomination	Type de glissement	Profondeur "e" de la surface de glissement
G1	Superficiel	0 - 2 m
G2	Semi profond	2 - 10 m
G3	Profond	10 - 30 m
G4	Très profond	> 30 m

L'analyse globale a permis d'établir des synthèses statistiques pour chaque tronçon et une analyse par type de glissement et une analyse globale des aléas.

Outre une présentation des résultats sous forme de tableau de synthèse pour chaque tronçon, une expression graphique est également donnée (voir Figure 2). L'aléa est représenté dans le tableau comme dans le graphique, par une couleur différente selon son importance :

- Vert : faible à nul ;
- Jaune : moyen ;
- Orange : élevé ;
- Rouge : très élevé.

Une zone pourra par exemple présenter un risque élevé de glissement superficiel et un risque faible de glissement profond...

Une consultation du zonage permet d'un coup d'oeil de repérer les zones à risque immédiat prioritaires pour les travaux de confortement, ainsi que celles à mettre sous surveillance afin d'assurer la sécurité des usagers. Le provisionnement financier des risques peut ainsi également en être déduit pour chaque tronçon.

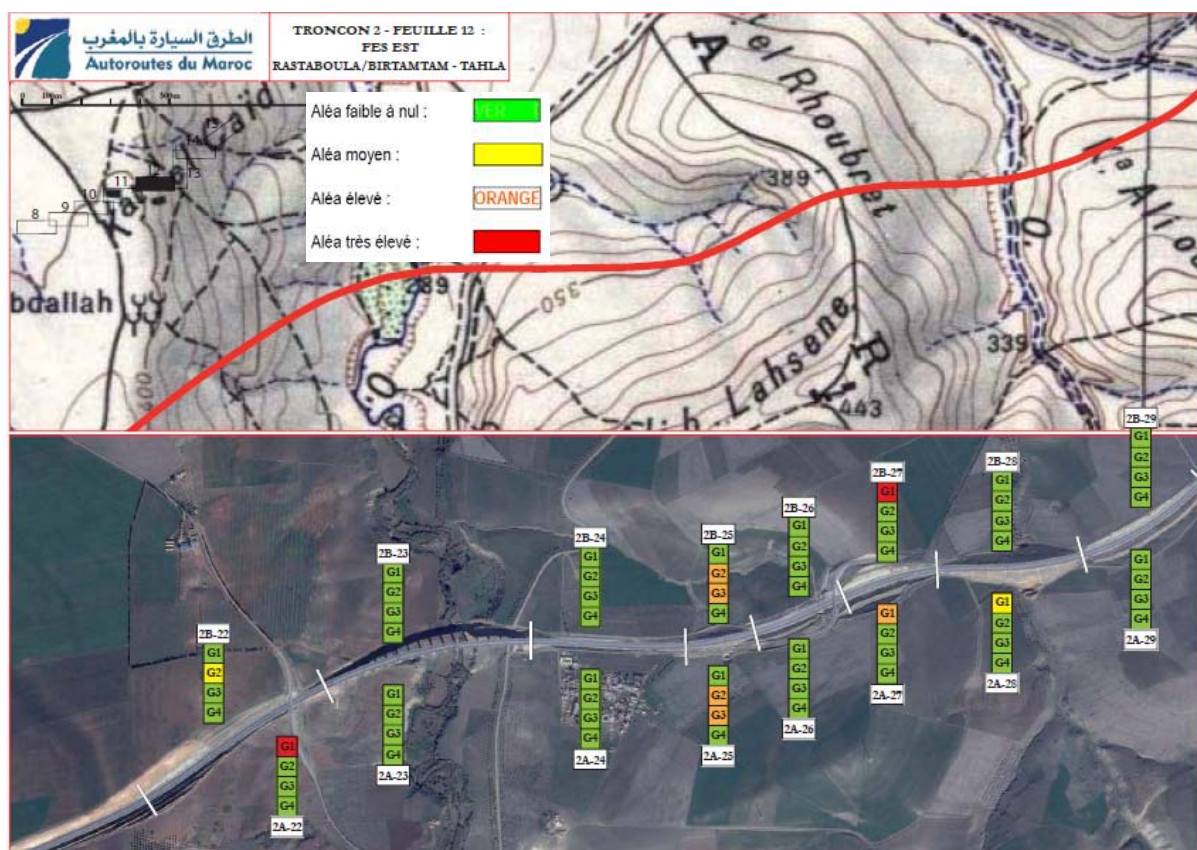


Figure 2: Exemple de présentation graphique des aléas de la zone d'étude Bir Tamtam - Tahla

2 APPROVISIONNEMENT DU RISQUE GÉOTECHNIQUE

Le zonage réalisé sur le tronçon autoroutier FEZ-TAZA (104 kms) apporte un éclairage nouveau sur les aléas en présence. Elle a en particulier permis de mettre en évidence les points suivants :

- Les aléas de glissements estimés comme très élevés affectent entre 10 et 14% de l'itinéraire total (suivant la direction de circulation) et impactent un linéaire cumulé de chaussée de l'ordre de 6 kms d'autoroute sur les 2 directions de circulation.
- Les aléas de glissements estimés élevés affectent quant à eux un linéaire cumulé de chaussée de près de 45 Kms d'autoroute le long des 2 directions de circulation.

- Ces aléas sont inégalement répartis sur l'itinéraire concerné. Ils sont davantage présents sur les tronçons montagneux entre Tahla et Msoun.
- Ces aléas peuvent avoir à court-moyen terme des conséquences importantes sur l'itinéraire.

A partir de ce zonage, la Société Nationale des Autoroutes du Maroc -ADM a mis au point une autre démarche pertinente et innovante : elle consiste, en partant du zonage réalisé, à définir les stratégies de stabilisation, de surveillance et d'exploitation de la portion d'autoroute FEZ-TAZA à court terme (durée 4 ans) et à moyen terme (durée 15 ans).

L'objectif étant de maîtriser les risques d'instabilités de pente sur une durée au moins égale à 15 ans en tenant aussi compte du risque supplémentaire du changement climatique. Et approvisionner le budget de ces risques d'instabilités par des prêts dites « Fond Vert ».

Cette démarche consistait en :

- Traduction de l'aléa « glissement de terrain » en « risques sur chaussée » sur l'ensemble de l'itinéraire, soit sur près de 104 Kms. La notion de « risques sur chaussée » étant égale au produit de l'aléa « glissement de terrain » par « la probabilité d'atteinte par l'instabilité de la plateforme routière ». Le « risque sur chaussée » sera pondéré par un degré de gravité lui-même lié aux conséquences de l'évènement sur la chaussée et sur les usagers, dans les zones où les aléas de glissement de terrain sont jugés les plus élevés.
- Prévention de solution de confortement en fonction de chaque type de glissement prévisible. Ainsi la détermination des budgets prévisionnels tenant compte des coûts des différentes stratégies de surveillance, d'entretien et de travaux de stabilisation. Ces stratégies seront définies à 4 ans (stratégies à court terme) et à 15 ans (stratégie à moyen terme).

REFERENCES

Ce travail est basé sur des documents ADM, notamment sur le Guide Méthodologique (Stabilité des talus pour les grands aménagements linéaires, Rabat, 2014), réalisé en partenariat ADM-Polytech-ADRGT.

Mapping of landslide risk along highways in eastern Morocco

Abdelkrim Derradji⁵, Lionel Lorier⁶, Mohammed Sahli⁷, Pierre Breul⁸, Denis Fabre⁷

Keywords: *landslide hazard, marls, risk analysis, highway, Morocco*

This work is done in the framework of a scientific partnership between ADM (Autoroutes du Maroc) and the University Blaise Pascal (Polytech Clermont-Ferrand) with the effective collaboration of the ADRGT (Association pour le Développement des Recherches sur les Glissements de Terrain). The research program deals with understanding the phenomena of landslides in marly rock along the highway A2 between Fez and Taza. Our paper presents a new method of hazard zoning for highway excavations and embankments along this route, on a total length of 104 km.

1 ZONING GEOTECHNICAL RISK

1.1 Geology and Geotechnique

The motorway route of the A2 takes place in a complex geological setting related to the tectonic history of this part of Morocco. It concerns mostly autochthonous formations of the Atlas area consisting of paleozoic and secondary folded layers, covered by tertiary sediments (subhorizontal marls). On the last two sections before Taza, the route crosses the highly tectonized front of the pre-Rif nappe overthrusting towards the South.

The following formations are pointed out:

- Surface deposits: coarse silty alluvium, generally intersected over a few meters thick on deep wadi valleys with occurrence of terraces. These materials can be interbedded with sand lenses. On the plateaus, compact conglomerate and alluvial levels are often observed, with thickness between 5 and 20 meters. These deposits generally date from the Quaternary but also from the Miocene.
- Autochthonous formations (Upper Miocene): they are mainly consisting of blue marl with levels of conglomerates and sandy limestones. The sub-horizontal layers are cut on a large part of the highway and may be very thick (100-400 meters). These marls are weathered from the surface on varying thicknesses (1 meter up to 10-20 meters) and are easily distinguished by their yellow color; their plasticity index appears significantly higher.
- Allochthonous formations in the region of Taza: these layers are linked to overthrusting that gives them a more complex stratigraphy. They correspond to alternations of marl and sandstone levels of light beige to white color; they may date from the Oligocene and Eocene. Some marly levels may contain characteristic flints.

From a geotechnical perspective, the definition of nature and properties of the excavated rock is consistent with the classification of the ADM methodology guide (see reference), i.e. mainly here:

- Class 1: surface soils and weathered levels with low cohesion. These granular or poorly cohesive soils have a uniaxial compressive strength lower than 0.6 MPa
- Class 2: indurated soils and relatively homogeneous soft rock. They belong to the category of HSSR (Hard Soils - Soft Rocks) whose mechanical characteristics are between those of soil and rock. This is the typical case of marls

Class 3 rocks (rocky formations with a heterogeneous structure related to the weathering process or to the presence of interbedded clay levels / or highly fractured zones) and Class 4 (massive rock poorly weathered) are not encountered in the study area.

⁵ DERRADJI Abdelkrim, Autoroutes du Maroc, Rabat, MA, derradji.abdelkrim@adm.co.ma

⁶ LORIER Lionel, Société Sage, Gières, FR, l.lorier@sage-ingenierie.com

⁷ SAHLI Mohammed, ADRGT, Gières, FR, sahlm@yahoo.com

⁸ BREUL Pierre, UBP, Clermont Ferrand, FR, pierre.breul@univ-bpclermont.fr

1.2 Criteria adopted for the zoning of landslide hazard

The zoning work is presented in form of detailed tables giving for each direction of the highway and each section:

- 1) its length and situation ;
- 2) ADM references;
- 3) characteristics of the transversal profile (type: excavation, embankment, concrete work...), height or thickness, slope angle ;
- 4) geotechnical class of the rock ;
- 5) nature of previous work carried out in the area;
- 6) comments on the nature of the disorders and behaviour of the works;
- 7) the nature of the likely hazard, shown by a green, yellow, orange or red color for each type of landslides likely to occur in the area (G1 to G4, see Table 1 and Figure1).

The diagram illustrates the geometry of a landslide on a slope. The total height of the slope is labeled H . The total horizontal extension of the moving area is labeled L , which is divided into two equal segments of $L/2$. A red curved line represents the sliding surface, with its vertical height at the midpoint labeled h . The thickness of the slide or the depth of the sliding surface at the midpoint is labeled e . An arrow labeled v indicates the direction of movement down the slope.

Figure 1 .Geometrical definition of landslides

H : height of the slope

L : length of extension of the moving area

v :speed of movement;

h :height of the slide

e : thickness of the slide or depth of the sliding surface (at $L/2$)

Table 1: Classification of movements as a function of their depth

Category	Landslide type	Depth « e » of the sliding surface
G1	Superficial	0 - 2 m
G2	Semi surficial	2 - 10 m
G3	Thick	10 - 30 m
G4	Very thick	> 30 m

2 GRAPHIC PRESENTATION OF RESULTS

Besides giving the results as a summary table for each section, a graphic expression is also given with an extract of the topographic or geological map (when existing) and a Google Earth picture (see example on Figure 2). The hazard is represented in the table as in the chart with a different color depending on its importance (green to red , see Figure 2) and its thickness (G1 to G4, see Figure 1).

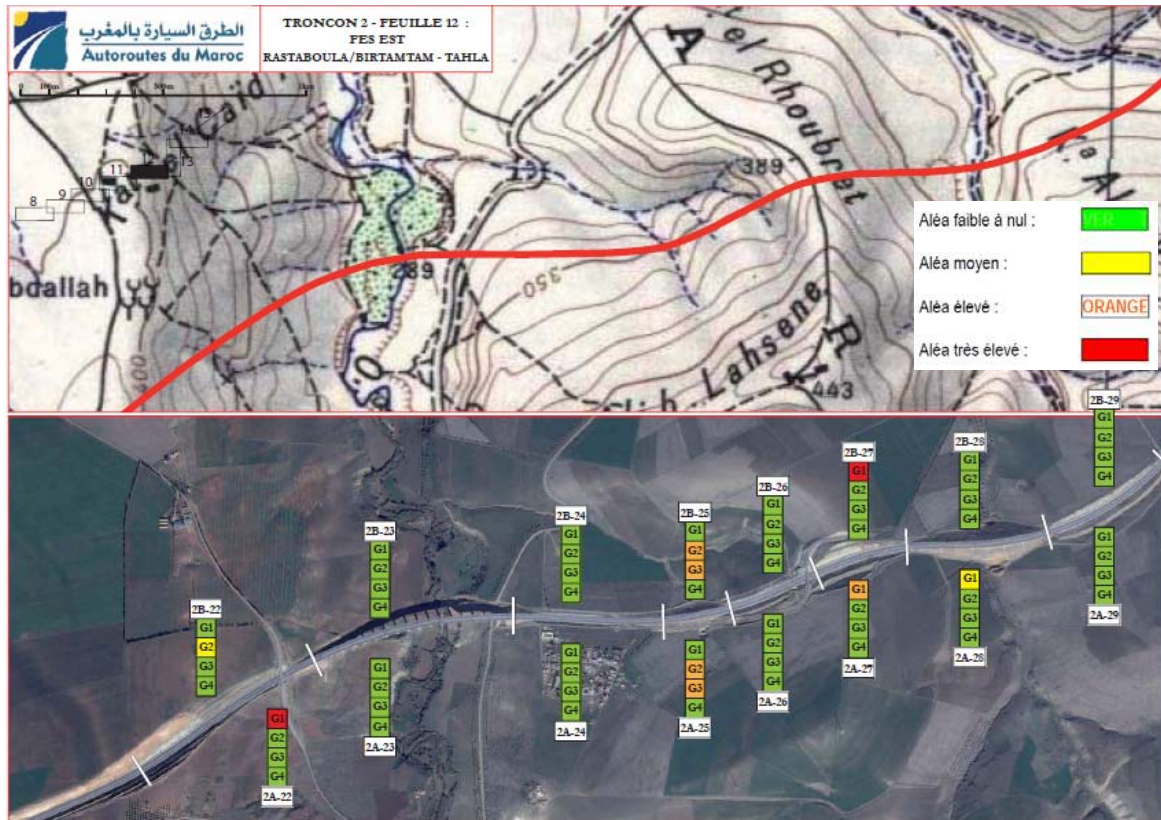


Figure 2: Graphical presentation of landslide hazards for the BirTamtam –Tahla section

2. SUPPLY RISK GEOTECHNICS

The zoning performed on the motorway section FEZ-TAZA (104 kms) gave more clarification of risk and hazards. In particular, it helped to highlight the following points:

- The hazards of landslides estimated as very high affect between 10 and 14% of the total route (in direction of movement) and a cumulative impact linear floor of about 6 kms of motorway on two directions of traffic .
- The hazards of high estimated landslides affecting about them a cumulative linear floor nearly 45 Kms of highway along the two directions of traffic.
- These risks are unevenly distributed on the route concerned. They are more present on the mountainous sections between Tahla and Msoun.
- These hazards can have short-medium term significant impact on the itinerary.

From this zoning, the National Company of Motorways of Morocco -ADM has developed another innovative pertinent approach: it consists, starting from realized zoning, defining stabilization strategies, monitoring and operation of the portion highway FEZ-TAZA short term (duration 4 years) and à moyen term (duration 15 years).

The objective is to control risks of slope instability over a period of at least 15 years taking into account also the additional risk of climate change. And supply the budget of the risks of instability by loans called "Green Fund". This approach consisted of:

- Translation hazard "landslide" to "risk on floor" on the entire route, is nearly 104 Kms. The concept of "risk on floor" being equal to the product of hazard "landslide" by "the likelihood of injury by the instability of the road platform." The "risk on floor" will be weighted by severity itself related to event's impact on the floor and on to users in areas where landslide hazards are considered the highest.

- Preventing reinforcement solution according to each type of slip predictable. Thus the determination of projected budgets taking into account the costs of different strategies for monitoring, maintenance and detraux stabilization. These strategies will be set to 4 years (short-term strategies) and 15 years (medium-term strategy).

CONCLUSION

The overall analysis has established statistical summaries for all sections between Fes and Taza. Thus, for each section, a comprehensive analysis of hazards by sliding type (from superficial to very thick) may be obtained. Charts and tables consultation allows us to identify priority areas for survey, monitoring and reinforcement work.

REFERENCES

This work is based on ADM documents, particularly the “Guide Méthodologique: Stabilité des pentes pour les grands aménagements linéaires”, Rabat, 2014), realized in partnership ADM-Polytech-ADRGT.