Geotechnical analysis and evaluation of the instability risk along the Hassan district cliff (Rabat- Morocco)

Analyse géotechnique et évaluation du risque lié à l'instabilité le long de la falaise du quartier Hassan (Rabat-Maroc)

Kh. BAHEDI¹, et M. BENAMMI¹

¹Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences, Département de Géologie, BP.133- Kénitra -Maroc.

Abstract. The studied area is a case inside the urban domain that shows instabilities of ground along the cliff of Hassan district (Rabat- Morocco), materialized by rock falls and block collapses. These phenomena constitute a great risk on human, economic, cultural and environmental stakes. The intensity of this instability depends on the combined effects of different factors analyzed in this work such as the lithology nature, the geotectonic context, and the surfaces of discontinuities in particular those of fracturing. Geotechnical tests carried at the laboratory allow the identification and the characterization of the mechanical behaviour of the superficial formations constituting this cliff as well as its marly bedrock. The degree of activity of this phenomenon is highlighted by analysis and direct observation on the field and by a comparative study of the multi-dated aerial photos. The combination of these various studies allows the establishment of a synthetic map which gives an evaluation of the risk all along this cliff.

Résumé. Située à l'intérieur du domaine urbain, la falaise du quartier Hassan montre des instabilités de terrain matérialisées par des chutes et écroulements de blocs. Ces phénomènes constituent un grand risque sur des enjeux humains, économiques, culturels et environnementaux. L'intensité de cette instabilité dépend des effets conjugués des différents aspects analysés dans ce travail à savoir : la lithologie, le contexte géotectonique, les surfaces de discontinuités notamment la fracturation. Les essais géotechniques effectués au laboratoire permettent l'identification et la caractérisation du comportement mécanique des formations superficielles constituant la falaise ainsi que son substratum marneux. Le degré d'activité de ce phénomène, plus ou moins remarquable, est mis en évidence par l'analyse et l'observation de terrain et par l'étude comparative des photos aériennes de différentes missions. La combinaison de ces différentes études permet d'établir une carte de synthèse qui donne une évaluation du risque dans ce secteur.

1 Introduction

Les problèmes entraînés par les instabilités des falaises notamment dans le domaine urbain, représentent un danger réel pour la sécurité publique. Ceci nécessite de chercher à comprendre les principaux facteurs qui sont à leur origine, les enjeux plus ou moins vulnérables et ainsi essayer de connaître le degré de risque, en vue d'atténuer son effet sur les enjeux humains, économiques, culturels et environnementaux. La falaise du quartier Hassan fait partie de la plaine côtière du bassin Gharb-Mamora, qui forme une demi-cuvette fermée du côté de l'océan par des cordons littoraux quaternaires plus ou moins consolidés s'alignant parallèlement au rivage [1]. Ces formations d'origine marine très hétérogènes: calcaires gréseux, conglomérats, grès et sables, reposent sur un substratum imperméable formé par des marnes bleues du Miocène (fig. 1c)[2]. Cette falaise est située sur la rive gauche de l'Oued Bou Regreg (fig. 1). Elle a une pente raide et une dénivellation d'environ 22m à 24m qui s'amortit progressivement vers le Nord.

Fig. 1. Situation de la région étudiée à l'échelle du Maroc (a), le long de la vallée du Bou Regreg (b) et coupe géologique des différentes formations quaternaires et miocènes [2](c).

2 Résultats

2.1 Description du phénomène d'instabilité

Du point de vue lithostratigraphique, la falaise est formée par deux grandes barres de grés calcaires consolidés affectées par un réseau intense de fractures et par une forte dissolution (fig. 2). Ces grés sont intercalés par des niveaux conglomératiques friables à matrice argileuse avec une base sableuse plus au moins meuble [3]. Une argile rouge remplit les fractures et les puits de dissolution. La falaise du quartier Hassan est marquée par une grande instabilité manifestée par des écroulements de blocs de différentes tailles comme en témoigne le grand bloc récemment échoué près du carrefour du super marché « Marjane » (fig. 2a). La nature lithologique de la falaise favorise le développement à l'intérieur de celle-ci de plusieurs phénomènes qui sont à l'origine de cette instabilité à savoir :

- 1. La dissolution des grés - calcaires suite à la percolation des eaux le long des zones de faiblesse.
- 2. L'érosion du niveau conglomératique par l'eau de ruissellement comme par l'eau qui s'infiltre de la surface en entraînant les particules fines et en vidant une partie de son squelette solide, ce qui a provoqué en quelques endroits le détachement des blocs de la barre supérieure suite à une position de porte à faux.
- 3. La fracturation qui se développe sur les grés découpant celle-ci en une série de blocs plus ou moins disloqués.

Les surfaces de discontinuités provoquées par cette fracturation et les poches résultant de la dissolution évoluent en des fentes remplies par les sols argileux de la surface avec des épaisseurs variant de 30cm à 50cm (fig. 4, photo).

Fig. 2. Bloc écroulé près de Marjane (a) et colonne lithostratigraphique de la falaise d'après [3] (b).

2.2 Analyse de la fracturation

Les fractures dans les grés-calcaires jouent un rôle important dans l'instabilité de la falaise, ce qui nous amène à faire une analyse de leurs paramètres géométriques. Les mesures des directions et des pendages des fractures prélevées sur la barre gréseuse sont groupées selon des classes de 20°. La rosace des différentes familles de fractures mesurées (fig. 3a) montre que les directions prédominantes sont celles de l'intervalle [100° ; 120°], vient en deuxième position les directions de

l'intervalle $[0^\circ ; 20^\circ]$ qui sont subparallèles à la direction moyenne de la falaise (fig. 4). Les différentes familles de fractures, qui ont été reportées sur le stéréogramme Schmidt (hémisphère supérieur), sont représentées par des plans moyens P_1 à P_6 (fig. 3b et 3c). Ce stéréogramme montre que les pendages prépondérants se font généralement vers le NE et l'ESE (fig. 3b). La résultante de ces deux pendages coïncide en général avec le sens d'inclinaison moyen de la pente de la falaise vers l'Est.

Fig. 3. Rosaces des orientations dominantes de la fracturation (a) ; les fractures sont groupées en plusieurs familles dont sont représentés les plans moyens (b et c).

Notons que les zones où les fractures sont parallèles à la direction de la falaise sont sujettes à des écroulements et que les dièdres formés par l'intersection de ces plans prédominants s'écroulent perpendiculairement à la direction moyenne de la falaise (fig. 4). C'est le cas du grand bloc (environ 1000m^3) qui s'est détaché au niveau des conglomérats friables supérieurs près du carrefour du super marché Marjane. Les plans de rupture du dièdre ont les caractéristiques géométriques suivantes : N110,80°S et N020,85°E.

Fig. 4. Carte schématique des plans de fractures qui affectent la falaise (a) et photo montrant une fente remplie d'argiles rouges (flèche), noter le niveau conglomératique à la base des grès-calcaires (b).

2.3 Etude géotechnique

Afin d’identifier les formations de la falaise et de comprendre leur comportement mécanique, une étude géotechnique s’avère nécessaire. Cette étude a été faite au sein du laboratoire Labotest à Kénitra. Elle consiste en la pratique d’essais d’identification, d’essais de compressibilité à l’œdomètre et des essais de cisaillement notamment sur les argiles. L’échantillonnage est fait sur le remplissage des fractures (échantillon R1), sur le niveau conglomératique (échantillon R2) et sur le substratum marneux (échantillon R3) qui affleure vers le sud de la falaise (fig. 2b).

2.3.1 Essais d'identification

Les résultats des essais de l’analyse granulométrique et des limites d’Atterberg des échantillons R₁, R₂ et R₃ sont résumés dans le tableau I ci-dessous.

Tableau I. Analyse granulométrique et limites d’Atterberg des échantillons R₁, R₂ et R₃.

Mailles (mm)	Refus cumulés (g)			Pourcentage Refus cumulés (%)			Pourcentage Passants (%)		
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₁	R ₂	R ₃	R ₁	R ₂	R ₃
0,080	876	17 219	69	39,720	94,680	3,9	60,3	5,3	96,1
1,250	46	14 744	1	2,080	81,070	0,05	97,9	18,9	99,95
2,000	32	14 099		1,450	77,530	-	98,6	22,5	-
8,000	12	10 634	-	0,540	58,470	-	99,5	41,5	-
10,000	8	9 463	-	0,360	52,030	-	99,6	48,0	-
63,000	-	722	-	-	4,900	-	-	96,0	-
Limites Atterberg	Limite de liquidité WL (%)			Limite de plasticité W _p (%)			Indice de plasticité IP		
	37	50	38	19	21	20	18	29	18

Selon la classification française du Laboratoire des Ponts et Chaussées et en se basant sur les résultats de ces deux essais [4], les échantillons R₁ et R₃ sont des argiles moyennement plastiques alors que l’échantillon R₂ est une grave (conglomérat) argileuse plastique.

2.3.2 Essai œdométrique

L’essai à l’œdomètre a pour but de caractériser le comportement des sols de type argileux et permet ainsi de définir, en complément des limites d'Atterberg, la possibilité de gonflement-retrait du matériau. L’essai consiste à placer un échantillon non remanié dans la cellule oedométrique afin de le soumettre à une charge donnée dans le but de déterminer le coefficient de compressibilité (C_c) et l’indice de gonflement (Ig). Le tassement dû aux chargements et le gonflement dû aux déchargements des deux échantillons R₁ et R₃ sont portés dans la courbe suivante :

Fig. 5. Courbes oedométriques des échantillons d'argiles rouges remplissant les fractures (R1) et des marnes bleues du substratum imperméable (R3).

Le coefficient de compressibilité correspond à la valeur absolue de la pente de la tangente à la deuxième branche rectiligne de la courbe œdométrique ($C_c = -\Delta e / \Delta \text{Log} \sigma$). L'indice de gonflement (I_g) est défini par la pente de la tangente à la courbe de retour.

En se référant à la classification basée sur les coefficients de compressibilité [5], l'échantillon R1 est moyennement compressible ($C_c = 0,15$) alors que R3 est assez fortement compressible ($C_c = 0,22$). Les indices de gonflement de ces deux sols (respectivement $I_g = 0,017$ et $0,016$) sont inférieurs au seuil des matériaux gonflants ($I_g = 0,04$) [6]. Notons que la plasticité de ces sols est un paramètre qui pourrait influencer leur comportement gonflant [7].

2.3.3 Essai de cisaillement

Cet essai permet la détermination de la résistance du sol aux sollicitations qui lui sont appliquées. Les courbes de la figure 6A montrent les déformations atteintes par la contrainte tangentielle pour les deux échantillons R1(a) et R3(b). On constate que la résistance au cisaillement obtenue correspond au palier qui traduit la plasticité parfaite. Cette déformation plastique est obtenue sous des faibles déplacements, ce qui atteste que les deux échantillons sont caractérisés par une faible résistance au cisaillement.

Les courbes intrinsèques (fig. 6B) qui représentent les droites de Coulomb des deux échantillons R1(a) et R3(b), permettant de séparer les zones des contraintes possibles (élasticité) des zones des contraintes impossibles à atteindre (plasticité). On en déduit la Cohésion (C), qui correspond au point d'intersection de la droite de Coulomb avec l'axe des ordonnées ($C = 0,25$ bar pour R1 et $C = 0,20$ bar pour R3) et l'angle de frottement interne (ϕ), qui correspond à la pente de cette droite ($\phi = 15^\circ$ pour R1 et $\phi = 22^\circ$ pour R3).

Fig. 6. Courbes contrainte – déplacement (A) et intrinsèques (B) des échantillons R1 (a) et R3 (b).

2.4 Etude comparative des photos aériennes

Dans le but d'évaluer le degré d'activité de ce phénomène d'instabilité et de chercher les traces et les limites atteintes par les blocs écroulés, nous avons procédé par une étude comparative pour établir des esquisses d'interprétation des photos aériennes de 1966 et de 1997. Cette étude montre un changement notable de la forme de la falaise. L'érosion combinée à l'écroulement de blocs y a taillé des indentations et de rentrants. Ceci se traduit par un petit déplacement de la falaise vers l'Ouest notamment en face du Mausolée Mohammed V.

2.5 Evaluation du risque

L'évaluation du degré du risque consiste en la combinaison de l'intensité de l'aléa avec la vulnérabilité des enjeux. Cette évaluation est basée sur l'estimation de l'étendue du retrait par rapport au sommet du talus et par rapport à la zone d'arrivée des blocs. Cette estimation consiste à délimiter deux bandes dont la largeur est au moins égale à la hauteur du talus, l'une au pied et l'autre au sommet de la falaise.

La cartographie de l'aléa montre une zone de fort degré de phénomène d'instabilité qui s'étend du sud jusqu'en face du Mausolée Mohammed V sur plus de 650m. La route qui surplombe la falaise surtout au Sud, le pied de celle-ci où a été aménagé un petit espace vert public et également la route d'en bas qui constituait la principale artère entre Salé et Rabat constituent les enjeux les plus vulnérables de ce secteur. La sommation des zones des enjeux avec celles des différents aléas nous permet de synthétiser une carte de risque instabilité le long de la falaise (fig. 7). Elle montre un

risque fort en face de Marjane (où la côte est plus élevée) passant latéralement vers le Nord à un risque moyen puis faible.

Fig. 7. Carte du degré des aléas avec les délimitations des enjeux vulnérables (a) et carte de synthèse du degré du risque (b).

3 Conclusions

Afin de comprendre et de mettre en évidence le risque encouru par le phénomène d'instabilité manifesté par les écoulements de blocs dans la falaise étudiée, nous avons analysé les caractéristiques géotectoniques des formations de celle-ci, l'activité de ce phénomène à partir d'une étude de terrain et une étude comparative des photos aériennes.

L'étude de terrain nous a permis d'estimer le degré de cette instabilité. Celle-ci est engendrée par un certain nombre de phénomènes tels que l'érosion des formations, la fracturation des roches, la dissolution, le soutirage des fins et la mise en porte à faux des barres gréso-calcaires.

Les essais géotechniques montrent que l'instabilité de la falaise est engendrée en grande partie par le niveau conglomératique friable très érodé. En effet l'infiltration des eaux de surface augmente la plasticité de ce niveau constituant ainsi une couche savon sur laquelle glissent les formations sus-jacentes

L'instabilité est également favorisée par les argiles de remplissages. L'existence ou l'absence de l'eau change le comportement de ces derniers [8]. L'augmentation de la teneur en eau est accompagnée par une perte de la résistance au cisaillement de ces matériaux traduite par une

diminution de la cohésion et de l'angle de frottement qui sont déjà faibles, et par des changements de volume même faibles comme en témoignent les valeurs de l'indice de gonflement et du coefficient de compressibilité.

L'existence d'un substratum marneux imperméable formé par des argiles moyennement plastiques, faiblement gonflantes, assez fortement compressibles et faiblement résistantes au cisaillement contribue aux phénomènes de glissements, gonflements et tassements.

La fracturation joue un grand rôle dans cette instabilité. Les fractures délimitent de gros blocs découpés en dièdres presque droits s'écroulent perpendiculairement à la direction moyenne de la falaise (N20). Les fentes remplies d'argile s'ouvrent progressivement en V jusqu'à la rupture. Elles vont certainement engendrer des détachements de blocs comme en témoignent les différents phénomènes anciens et récents observés sur le terrain.

L'étude comparative des photos aériennes montre sur une période de 30 années un recul remarquable de la falaise, notamment dans sa partie supérieure (sud). Cette étude nous a permis de localiser sur la falaise des zones où le phénomène déclaré semble plus actif et donc de plus forte intensité. L'évaluation du degré de risque montre un fort degré qui s'étend du sud jusqu'en face de la tour Hassan incluant la route d'en haut, la route d'en bas et le pied de la falaise.

Références

1. M. Combe, Le bassin Rharr-Mamora et les petits bassins septentrionaux des oueds Drader et Soueire. Notes et mémoires du Service Géologique du Maroc, **231**, p93-129, (1975).
2. A. Michard, Eléments de géologie marocaine. Notes et mémoires du Service Géologique du Maroc, **252**, 408p (1976).
3. M. Aberkan, Etude des formations Quaternaires des marges du bassin du Rharr (Maroc Nord-occidental). Thèse Doctorat d'état Es-science, Université Bordeaux I, France, 289p (1989).
4. C. Schon, Classification géotechnique des sols basée sur la classification U.S.C.S. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, **15**, p 3-4 à 3-16 (1965).
5. G. Philipponnat, et B. Hubert, *Fondations et ouvrages en terre*. Editions Eyrolles.399p, (1979).
6. J. Costet, et G. Sanglerat, *Cours pratique de mécanique des sols.1*. Editions Dunod, Paris, 284p (1988).
7. A. Djedid, A. Bekkouche, et SM. Aissa Mamoune, Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie). Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, **233**, (2001).
8. Kh. Bahedi, et M. Benammi. *Les instabilités de terrain*. Analyse géotechnique et évaluation du risque lié aux instabilités de terrain cas des falaises de Mehdiya (Kénitra) et de Hassan (Rabat)-Maroc). Editions Universitaires Européennes, 110p, (2011).