FACTEURS ET MECANISMES GENERATEURS DES GLISSEMENTS DE LA ZONE LITTORALE DU RIF CENTRAL (MAROC) : ANALYSE ET MODÈLE CONCEPTUEL.

FACTORS AND MECHANISMS OF LANDSLIDES IN THE COASTAL AREA OF CENTRAL RIF (MOROCCO): ANALYSIS AND CONCEPTUAL MODEL.

Jamal EL KHATTABI , Erick CARLIER

Centre de Calcul et de Modélisation de Lens, Faculté Jean Perrin, Université d'Artois, SP 18, rue Jean Souvraz, 62 307 Lens cedex, France.

RÉSUMÉ- La bordure Nord du Rif Central (Maroc) est sujette à de nombreux mouvements de terrain. La prise en compte de l'ensemble des facteurs structuraux, mécaniques et hydrauliques a permis d'établir un modèle de variation spatio-temporelle du coefficient de sécurité (F), généralement considéré comme invariant dans le temps.

Mots clés- Glissements, facteurs d'instabilité, systèmes hydrogéologiques, modèle de rupture.

ABSTRACT - In the study of natural slopes stability and road embankments, the evaluation of the safety factor (F) depends on several parameters such as hydraulic factors. In the northern area of Morocco, characterized by frequent ground movements due to different soil characteristics, a new and highly important road has to be built. We present, in this paper, an evaluation study of the safety factor (F) by rupture calculation model adapted to local landslides. In this calculation, we take into account the variation of hydrogeologic characteristics between the backland and coastal zones (introduced in the equation form of specific flow), the variation of topographic slope and substrate, the passive and active earth pressure as well as mechanical parameters of schistose materials. With the obtained results, we can study the evolution of the safety factor (F) function of the space-time dimension and estimate the eventual risks.

Keywords- Landslides, Instability factors, Hydrogeologic systems, Slope-stability model.

1. Introduction

Les mouvements de terrain, phénomènes naturels ou liés aux actions anthropiques, sont souvent à l'origine de nombreux dégâts tant matériels qu'humains. La prévention des risques repose, d'une part, sur une modélisation prédictive fiable et, d'autre part, sur la réalisation de cartes de risques indispensables à tout aménagement. Pour mener à bien une stratégie de prévention efficace, il est certes nécessaire, au préalable, de définir les facteurs et les mécanismes qui engendrent ces mouvements.

Dans le nord du Maroc, la région du Rif Central est caractérisée par de fréquents mouvements de terrain endommageant régulièrement l'habitat ainsi que le réseau routier et ses infrastructures. Compte tenu de la complexité des phénomènes d'instabilité et afin de mieux comprendre la genèse de ces mouvements, une approche pluridisciplinaire associant géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique a été entreprise (El Khattabi, 2001). Ce type d'approche dont la mise en pratique est de plus en plus courante (Lebourg, 2000 ; Maquaire et al. 2001) a été développée selon une démarche fondée sur une phase d'analyse de l'instabilité (*phase 1*) suivie d'une modélisation et d'une cartographie des risques (*phase 2*).

Dans cet article sont présentés brièvement les résultats de la phase analytique qui a abouti à l'identification des facteurs et des mécanismes à l'origine des glissements profonds du Rif Central. Ces résultats sont ensuite complétés par une phase modélisation portant sur l'évaluation du coefficient de sécurité (F) en proposant un modèle (2D) détaillé de variations spatio-temporelles en prenant en compte les fluctuations piézométriques, les caractéristiques mécaniques variables des schistes les variations de la pente topographique et celles de la

surface de charriage. Les conditions réelles à l'origine de l'apparition des glissements et les différences dans leurs dimensions entre la région littorale et l'arrière pays sont discutées.

2. Présentation de la région d'étude

Le secteur se situe sur la bordure nord du Rif Central. Ce terrain couvre une bande approximativement E-W allant de l'oued Mestasa à l'ouest jusqu'à l'oued Tarmast à l'est.

Portion de l'arc Betico-rifain, la chaîne du Rif est un ensemble géologique relativement vaste. Son originalité se manifeste par sa lithologie variée, où prédominent cependant les formations marneuses et schisteuses, ainsi que par sa tectonique.

Le Rif Central montre une lithologie très diversifiée, repartie dans deux grands domaines (Fig.1) : le domaine dorsalien, qui concerne le massif des Bokoya et le domaine des flyschs, avec les formations des nappes de charriage de Tisirène, Chouamat et Kétama (Andrieux, 1971).

Cette région est caractérisée par une structuration complexe, liée d'une part, à deux directions de failles décrochantes conjuguées NW-SE et NE-SW à ENE-WSW et, d'autre part, à des failles de directions E-W à jeu décrochant et N-S (Morel, 1987 ; Aït Brahim et Chotin, 1989).

Les observations de terrain montrent principalement une succession lithologique avec des alternances très irrégulières de schistes et de grès, et parfois de niveaux calcaires ou marneux. Ces alternances lithologiques appartiennent aux formations géologiques des nappes de charriage de Tisirène et Chouamat (Andrieux, 1971) (Fig. 1).



Figure 1. Localisation et schéma structural de la région d'étude (El Khattabi, 2001).

3. Les instabilités de versants dans la région du Rif Central

Les conclusions de l'étude préliminaire ont permis de distinguer la dynamique superficielle de la dynamique profonde des versants rifains et de définir la typologie des mouvements de terrain. Les glissements ont été cartographiés (Fig. 2), ils se localisent soit au niveau littoral avec des dimensions peu importantes et une surface de rupture à aspect circulaire dominant, soit à l'arrière-pays avec des dimensions importantes et un aspect longiforme.





L'étude a été orientée sur les glissements plans profonds dont la surface de rupture se matérialise au niveau de la zone de charriage et particulièrement dans les formations grésoschisteuses de la Nappe de Chouamat (El Khattabi et al. 2002).

Il a été démontré (El Khattabi et Carlier, 2003) que plusieurs facteurs interviennent dans la déstabilisation des versants rifains. Il s'agit des pentes topographiques, des précipitations, de la sismicité, de la structure géologique et des conditions hydrogéologiques. Par ailleurs, des mécanismes interviennent dans cette déstabilisation et s'opèrent au niveau des formations schisteuses de Chouamat. Celles-ci correspondent à des transformations d'ordre micro-structurale provoquant une chute des caractéristiques mécaniques et hydrauliques.

4. Modélisation des glissements.

4.1. Modèle hydrodynamique

Sur le plan hydrogéologique, deux domaines peuvent être identifiés : l'arrière-pays (zone amont) caractérisé par des précipitations abondantes et surtout par des infiltrations facilitées par les bancs gréseux fracturés et la zone aval (littorale), marquée par des précipitations et des infiltrations moins importantes, hormis dans les vallées. Pour cette dernière, les remontées piézométriques sont lentes et uniformes dans l'espace. En revanche, dans la zone amont, des remontées rapides du niveau piézométrique sont envisageables. Un processus d'alimentation de la nappe profonde s'effectue par un écoulement vertical puis latéral conditionné par la perméabilité et la porosité de fissures des matériaux gréso-schisteux de Tisirène (Fig. 3).



Figure 3. Coupe à l'arrière pays montre le système d'infiltration et d'écoulement.

De l'équation unidirectionnelle de la variation de la hauteur d'eau définie par Boussinesq (1904):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{T}{\mu} * \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$
(1)

T : Transmissivité m²/s, μ : Porosité efficace

On 'a établi des expressions analytiques par les transformées de Laplace :

- Pour le cas d'une remontée brève suivie d'un niveau d'eau constant (Δh_W = constante)

$$h(x,t) = h_{w} + \Delta h_{w} * \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{T_{u}' * t}}\right)$$
(2)

T : Transmissivité m²/s, μ : Porosité efficace, hw : niveau piézométrique

- le cas d'une remontée brève suivie d'une baisse verticale ($\Delta h_W = \Delta h_W$.- k.t, k étant la perméabilité des matériaux gréso-schisteux de Tisirène et t le temps) A partir des deux équations établies h(x,t) et h'(x,t) la hauteur d'eau introduite dans le calcul de F ne sera pas constante.

$$h'(x,t) = h_{w} + (\Delta h_{w} - a.t - \frac{a.x^{2}.\mu}{2.T}).erfc[\frac{x}{2.\sqrt{\frac{T}{\mu}.t}}] + \frac{a.t.x}{\sqrt{\pi .\frac{T}{\mu}.t}}.e^{-\frac{x^{2}.\mu}{4.T.t}}$$
(3)

4.2. Modèle de glissement

La mise en place d'un modèle de comportement dépend des caractéristiques géométriques et physiques des glissements plans définis. Ces mouvements qui se distinguent par une surface de rupture préexistante plus ou moins plane, un substratum imperméable de faibles caractéristiques mécaniques et une épaisseur des formations glissantes qui varie de manière décroissante de l'amont vers l'aval, nous ont orientés vers un modèle de rupture de pente de hauteur finie (Philipponnat et Hubert 1997) (Fig. 4).



Figure 4. Caractéristiques du modèle.

Le calcul global du coefficient de sécurité s'obtient de l'expression suivante :

$$Fs = \frac{R + P'p}{T + P'a}$$
(4)

Avec :

$$R = \frac{n * b * \left\{ C' * \cos^2 \beta * \tan \varphi' \left[\gamma * \left(Z - n * \frac{b}{2} * \tan \alpha \right) + hw \left(\gamma_{sat-} \gamma_w - \gamma \right) \right] \right\}}{\cos \beta}$$
(5)

$$\Gamma = n * b * \sin \beta * \left[\gamma * \left(Z - n * \frac{b}{2} * \tan \alpha \right) + h_w * (\gamma_{sat} - \gamma) \right]$$
(6)

$$P'_{a} = \frac{1}{2} * \cos \beta^{2} * \left[\gamma * (Z - hw)^{2} * \tan^{2} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) + (\gamma_{sat} - \gamma_{w}) * hw^{2} * \tan^{2} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_{sat}}{2} \right) + \gamma_{w} * hw^{2} \right]$$
(7)

$$\mathbf{P}_{p} = \frac{1}{2} * \cos \beta^{2} * \left[\gamma * (\mathbf{Z} - \mathbf{hw})^{2} * \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + (\gamma_{sat} - \gamma_{w}) * \mathbf{hw}^{2} * \tan^{2} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{sat}}{2}\right) - \gamma_{w} * \mathbf{hw}^{2} \right]$$
(8)

 ϕ et C : angle de frottement interne et cohésion des matériaux de la zone non saturée de la nappe de Tisirène (en degrés et kPa), ϕ_{sat} et C_{sat}: angle de frottement interne et cohésion des matériaux de la zone saturée de la nappe de Tisirène (en degrés et kPa), γ w : Poids volumique de l'eau (kN/m³).

R: résistance au cisaillement, P'p: butée, T: composante tangentielle du poids des terres, P'a: Poussée, Z: hauteur initiale de la première tranche, b: largeur de la tranche (1m), n: nombre total de tranche, α : pente topographique, b: pente de substrat (pendage du charriage).

Ces paramètres ont été obtenus au laboratoire.

4.3. Evaluation du coefficient de sécurité en fonction des fluctuations piézométriques

Un modèle de simulation a été élaboré sous MATLAB (Matrix Laboratory) et a permis de simuler les variations du coefficient de sécurité en zone littorale et en arrière-pays à partir des données récapitulées dans le tableau I.

rablead I. Donnees geomecaniques				
Paramètres		Zone littorale	Arrière-pays	Observations
hw (m)	Niveau constant	20m	40m	Conditions hydrogéologiques
	Fluctuations	Entre 0 et 1m	h(x,t) ou h'(x,t) avec ∆hw=4m	
		PMR (G1)	Agni (G3)	Glissement étudié
Z1 (m)		80	150	terrain
b =b ₁ (m)		1		Valeur imposée
γ (kN/m ³)		20		Matériaux non saturés de
φ (degrés)		63		Tisirène
γ _{sat} (kN/m³)		24		Matériaux saturés de Tisirène
φ _{sat} (degrés)		22		
γw (kN/m³)		10		Standard
α (degrés)		10	25	Valeurs imposées
β (degrés)		5	22	
C' (kPa)		12.5 et 30		Schistes "remaniés" et
φ' (degrés)		25° et 40		"intacts" de Chouamat

Tableau I. Données géomécaniques

4.3.1. Arrière-Pays.

- Simulation avec h(x, t)

La figure 5A montre que le coefficient de sécurité diminue avec la longueur du glissement X et avec l'augmentation temporelle du niveau piézométrique.

- Simulation avec h' (x, t)

La figure 5B montre toujours une diminution du coefficient de sécurité avec la longueur du glissement X. Par contre, il enregistre une augmentation avec l'élévation temporelle du niveau piézométrique. Cela s'explique par la chute progressive du niveau d'eau verticalement à l'origine (Δ hw) engendrant une chute importante de la force de la poussée.



Figure 5. Evolution de F en fonction de X pour un t donné (A : $\Delta hw = cte$, B : $\Delta hw = -k.t$).

Ces simulations ont été réalisées en considérant les caractéristiques des matériaux schisteux remaniés. Les valeurs du coefficient de sécurité sont nettement supérieures dans le cas d'un schiste intact, aux caractéristiques mécaniques plus élevées comme le montre la figure 6.



Figure 6. Evolution de F à t =100h, dans le cas d'un schiste "remanié" et d'un schiste "intact".

Les simulations ont été réalisées pour deux valeurs de pente topographique ($\alpha = 10^{\circ}$ et 25°) et des valeurs de pente du substratum (β) allant de 5 à 25 degrés avec un pas de 5 degrés. La courbe $\beta = 22^{\circ}$ correspond aux caractéristiques du glissement d'Agni (Fig. 2). Pour chaque valeur de α , l'accroissement de β engendre une diminution de F. Les plus faibles valeurs de F sont pour des valeurs maximums de α et β (Fig. 7).



Figure 7. Variations de F en fonction de α et β (arrière-pays).

4.3.2. Zone littorale

Les influences des fluctuations piézométriques sur la variation du coefficient de sécurité sont significatives lorsque X augmente (Fig. 8). Pour des petits glissements (<=5m), les variations de la hauteur d'eau n'ont aucune influence : la masse est mobilisable pour toute hauteur d'eau. Par contre, au-delà de 5 m, des variations notables de F font leur apparition et s'accentuent avec les dimensions grandissantes de la masse mobilisable : les hauteurs d'eau peuvent influencer la stabilité du versant. En zone littorale, le risque d'instabilité est omniprésent. Il concerne des glissements de petite ampleur (< 10 m) ceci est lié essentiellement à l'absence de butée.



Figure 8: variations du coefficient de sécurité en zone littorale (20<hw<21m).

La figure 9 montre que dans le cas de petites dimensions (<=5m), des glissements sont envisageables à la fois pour les caractéristiques mécaniques des schistes "intacts" et "remaniés" (hw=21m, $\alpha = 10^{\circ}$ et $\beta = 5^{\circ}$). Cependant, les schistes "remaniés" donnent généralement des coefficients de sécurité moins élevés que les schistes 'intacts". Cette différence s'accroît avec la longueur potentielle du glissement. Ainsi, pour un F=1, la longueur du glissement est de 4m dans le cas schiste intact et de 9m pour le schiste remanié.



Figure 9. Variations de F en fonction de l'état des schistes (zone littorale).

Comme pour l'arrière-pays, l'augmentation de β engendre une baisse de F (Fig. 10). Par contre, Que ce soit pour $\alpha = 5^{\circ}$ ou 10°, les coefficients de sécurité demeuren t très proches et donc α n'influence pas F.



Figure 10. Variations de F en fonction de α et β (zone littorale)

5. Conclusion

Les paramètres mécaniques, géologiques et hydrauliques qui interviennent directement ou indirectement dans le déclenchement des glissements plans profonds ont été intégrés dans un modèle de calcul à la rupture. Les simulations effectuées permettent de suivre l'évolution du coefficient de sécurité (F) en tenant compte des différentes variables : paramètres mécaniques des matériaux schisteux de Chouamat ("intacts" et "remaniés"), fluctuations piézométriques et variations des valeurs de la pente topographique (α) et du pendage du charriage (β).

Pour effectuer une modélisation prédictive fiable, nous avons considéré les conditions hydrogéologiques locales. L'exemple traité tient compte de variations piézométriques faibles par rapport à la tranche d'eau initiale. A l'arrière pays, dans le cas d'une augmentation qui demeure constante l'équation d'écoulement obtenue h(x,t) donne des valeurs de F plus faibles par rapport à celles trouvées en utilisant h'(x,t) qui représente un écoulement avec un excédent chutant d'une manière linéaire. Ceci est du à la diminution de la force de la poussée liée à la

tranche initiale. Par ailleurs, la pente topographique qui joue un rôle important dans le cas des versants d'arrière pays, elle intervient faiblement au niveau des falaises littorales.

Les différences de dimensions de glissements entre l'arrière-pays et la zone littorale, s'expliquent au niveau du modèle par la variation de la force de butée ainsi que par son absence en falaises littorales.

Dans le domaine de définition morphostructurale et géologique du secteur étudié, la prise en compte, dans le modèle présenté, des évolutions piézométriques selon les caractéristiques hydrogéologiques locales, apparaît incontournable dans l'évaluation des conditions de stabilité des versants naturels.

6. Références bibliographiques

- Aït Brahim L., Chotin P. (1989) Genèse et déformation des bassins néogènes du Rif central (Maroc) au cours du rapprochement Europe-Afrique. *Geodinamica Acta 3-4*, 295-304.
- Andrieux J. (1971) La structure du Rif central : étude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un tronçon de la chaîne alpine. *Notes Mémoires 235*, Rabat, 152 p.
- Boussinesq, J. (1904) Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *Journal Mathématiques Pures et Appliquées 10*, 5-78.
- El Khattabi J. (2001) Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : application aux versants du Rif Central (Maroc). Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 258 pages.
- El Khattabi J., Carlier E. (2003) Tectonic and hydrodynamic control of landslides in the northern area of the Central Rif, Morocco. *Engineering geology 71*, 3-4, 255-264.
- El khattabi J., Colbeaux J.P., Van Laethem F. Boulemia C. (2002) Identification de la typologie des mouvements de terrain du Rif Central (Maroc) à l'aide d'une démarche méthodologique pluridisciplinaire : résultats de l'étude préliminaire. *Proc. JNGG*, Nancy 8 et 9 Octobre.
- Lebourg T. (2000) Analyse géologique et mécanique de glissements de terrain dans des moraines des Pyrénées centrales et occidentales. Th. Doctorat, Univ. Bordeaux I, 276 pages.
- Maquaire O., Flageollet J.C., Malet J.P., Schmutz M., Weber D., Klotz S., Albouy M., Descloîtres M., Dietrich M., Guerin R., Schott J.L. (2001) Une approche pluridisciplinaire pour la connaissance d'un glissement - coulée dans les marnes noires (Super - Sauze, Alpes - de - Haute - Provence, France). *Revue Française de Géotechnique 95-96*, 7-15.
- Morel JL. (1987) Evolution récente de l'orogène rifain et de son avant-pays depuis la fin de la mise en place des nappes (Rif, Maroc), Thèse d'Etat, Univ. Orsay-Paris, 570 pages.

Philipponnat, G, Hubert, B. (1997) Fondations et ouvrages en terre, Eyrolles Editions.

Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Lille 2004 (28 - 30 juin)