



## INFLUENCE DE LA MARÉE SUR LA STABILITÉ DES PENTES

A. REZZOUG, A. ALEXIS et M. KISMI

Laboratoire de Génie Civil E.C.N., I.U.T. St-Nazaire, B.P. 420, 44606 Saint-Nazaire Cedex

### Résumé

Dans les zones littorales soumises à de fortes marées, sont apparues de nombreuses perturbations ou ruines d'ouvrages induites par des contraintes océaniques. Si les conséquences nuisibles de l'agitation de la houle ne tardent pas à apparaître sur la carapace des ouvrages, la marée a un impact différé et peut engendrer des désordres majeurs aussi bien au niveau du noyau de l'ouvrage qu'au niveau de la carapace. Des affouillements locaux ont ainsi été observés au pieds des talus d'estran, mais aussi des ruptures en grand glissement causées par la marée. Depuis plusieurs années, l'étude de stabilité de pentes n'a pas cessé d'être affinée par différents développements, par contre l'influence du niveau piézométrique dû à la marée dans les calculs de stabilité de talus d'estran n'a jamais été abordée. A partir d'un code numérique de stabilité de pentes (PETAL du L.C.P.C.) on utilise la méthode des perturbations pour caractériser les lignes de glissement et pour définir le coefficient de sécurité associé. Dans le but de nous permettre de prendre en compte l'influence d'un cycle de marée sur la stabilité d'une pente, nous évaluons l'augmentation du risque engendré par l'action hydraulique cyclique de la marée. Différents cas, avec un sol de référence, ont été étudiés en faisant varier d'une part la pente du talus et d'autre part le niveau d'eau établi dans le massif. L'utilisation de l'outil numérique a permis de quantifier l'influence de la marée, à différents instants du cycle, sur le coefficient de sécurité au grand glissement d'un talus estuarien semi-immersé. Les résultats obtenus montrent une réduction significative du coefficient de sécurité et mettent en évidence l'importance de la prise en compte de la marée dans les calculs de stabilité des talus d'estran.

### 1. INTRODUCTION

Les variations cycliques de pression de l'eau provoquées par la marée peuvent causer des changements importants dans l'état de contraintes, une diminution notable des forces inter-granulaires, et des déformations significatives jusqu'à des ruptures locales ou globales de la structure. Après l'entrée d'eau dans le massif pendant la marée montante, il apparaît un écoulement sortant à marée descendante. Du fait du débit sortant, les vitesses d'écoulement peuvent être importantes en pied de talus. Ces phénomènes peuvent altérer la stabilité globale ou locale (glissement, érosion, affouillement...) d'un massif et montrent, par là même, leur importance dans le domaine du Génie Civil et du Génie Côtier.

L'étude numérique de l'écoulement dû à la marée a déjà été réalisée (Rezzoug, 1992, 1993 a) au moyen de trois modèles mathématiques de l'écoulement à surface libre dans les massifs portuaires soumis à la marée, dont les théories sont basées respectivement sur :

- l'équation de Dupuit en transitoire non linéaire (code MAREESOL),
- la théorie générale des nappes aquifères (modèle NAPP de CESAR-LCPC),
- l'équation de Richard des milieux non saturés (modèle NSAT de CESAR-LCPC).

Tous les moyens utilisés montrent une onde progressive d'écoulement pénétrant à l'intérieur du talus (Fig. 1).

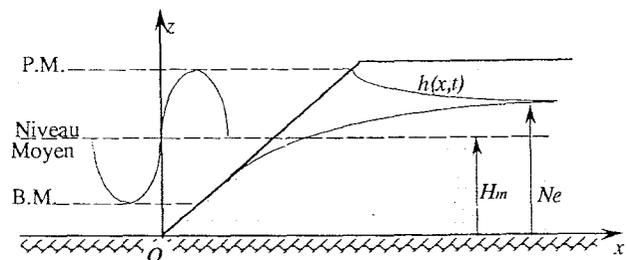


Fig. 1 : Modélisation de l'action de la marée sur un talus. (P.M. pleine mer ; B.M. basse mer ;  $H_m$  niveau moy. de la marée ;  $N_e$  niveau d'équilibre)

Elle s'amortit sur une distance fonction de la perméabilités du milieu, caractérisant la longueur d'une zone perturbée par les changements instantanés et cycliques de la pression interstitielle ainsi que les vitesses d'écoulement induites par la marée. Les calculs mettent également en évidence une surcote du niveau d'équilibre ( $N_e$ ) dans le talus par rapport au niveau moyen de la marée ( $H_m$ ).

Les expérimentations en laboratoire (Rezzoug, 1993b) et en nature (Rezzoug, 1994) ont validé les résultats des modèles mathématiques.

L'écoulement peut engendrer des ruptures globales (grand glissement) ou superficielles (érosion, affouillement). Dans cet article, nous étudions l'influence de cet écoulement sur la stabilité d'un talus en considérant un mode de rupture : le grand glissement.

### 2. APPROCHE PRELIMINAIRE

Les forces dues à l'écoulement permanent de l'eau sont toujours importantes et celles dues aux écoulements transitoires le sont encore davantage, mais, dans notre cas, elles sont mal connues. L'exemple suivant (Fig.2) est donné par Pilot (1970) ; il montre que l'action de ces forces, dans le sens d'un glissement, peut être de l'ordre de grandeur des forces de pesanteur qui constituent la cause naturelle des ruptures.

Soit  $\Delta M_e$  : moment moteur dû à la force d'écoulement, et  $\Delta M_p$  : moment moteur dû au poids de l'élément

$$r = \frac{\Delta M_e}{\Delta M_p} = \frac{\gamma_w \sin \alpha \sin(\theta + \alpha)}{\gamma' \cos \theta} \quad (1)$$

Pour  $\theta = 60^\circ$  ;  $\alpha = 30^\circ$  et  $\gamma' \approx \gamma_w$  , on a  $r = 1$ , on constate que l'élément de volume  $\Delta V$  est soumis à une force d'écoulement dont la participation au moment moteur est de l'ordre de celle de son poids ; à cette intervention de l'eau il faut aussi ajouter, tout le long de la ligne de rupture, la diminution de résistance au cisaillement provoquée par les pressions interstitielles.

On n'a envisagé, ci-dessus, qu'une forme d'intervention de l'eau dans la stabilité des talus, celle qui consiste à évaluer les pressions interstitielles le long des surfaces de glissement et à introduire la force résultante dans les équations d'équilibre. Dans notre cas, il est avantageux aussi d'envisager une autre forme d'intervention en introduisant la force de percolation ou poussée d'écoulement.

Dans le cas général d'un écoulement quelconque dans un talus en rupture circulaire, on a ainsi équivalence entre les deux systèmes de forces : résultante de pression interstitielle et résultante de forces d'écoulement. Dans certains cas géométriques simples, celui des pentes naturelles, par exemple, où le calcul de la force de volume (poussée d'écoulement) est immédiat, cette seconde forme est plus commode (Pilot, 1970).

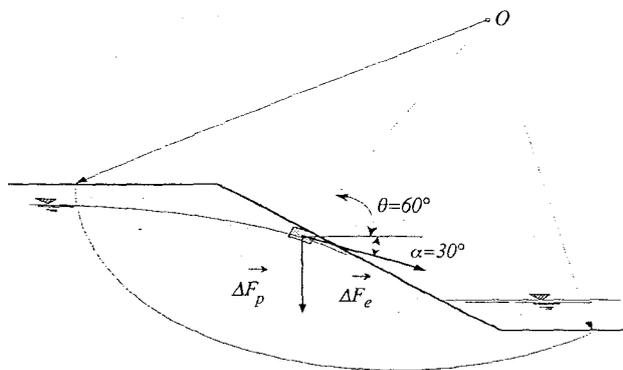


Fig. 2 : Influence de l'écoulement d'eau sur la stabilité d'un talus.

### 3. APPLICATION DE LA METHODE DES PERTURBATIONS

#### 3.1. Principe de la méthode

La méthode de perturbations est l'une des méthodes de calcul par tranches d'un glissement selon une ligne quelconque. Elle se base, selon Faure *et al.* (1975), sur le principe suivant :

Les forces qui agissent sur une masse de sol en mouvement (méthode globale) sont :

- force de pesanteur (le poids),
- résultante des pressions interstitielles le long de la courbe de rupture,
- force de résistance au cisaillement. Sur un petit élément de la courbe de rupture agissent la contrainte normale effective  $\sigma'$  et la contrainte tangentielle

$$\tau' = \frac{1}{F} (c' + \sigma' \tan \phi') \quad (2)$$

En utilisant les trois équations de la statique pour décrire l'équilibre, on obtient un système nécessitant une hypothèse sur la répartition des contraintes  $\sigma$  le long de la courbe de rupture. D'où la recherche d'une loi de répartition de la contrainte normale  $\sigma$  sur la courbe de rupture, plus satisfaisante que celle utilisée par Fellenius. Dans la méthode des perturbations, cette hypothèse s'écrit :

$$\sigma = \sum \gamma_i h_i \cos^2 \alpha (\lambda + \mu \tan \alpha) \quad (3)$$

Des recherches ont abouti à la conclusion que cette loi de répartition est la plus satisfaisante (Filliat, 1989).  $\lambda$  et  $\mu$  sont avec  $F$  les trois inconnues du système des trois équations de la statique ( $F$  apparaissant au dénominateur, la solution est délicate mais possible). Cette méthode largement utilisée en France pour les ruptures circulaires et non circulaires fournit en plus une expression du lobe de contrainte qui est un moyen de contrôle du calcul et qui offre la possibilité d'envisager d'autres développements comme la prise en compte des déplacements (Faure, 1992).

#### 3.2. Présentation du programme PETAL84 du L.C.P.C.

Le programme PETAL84, logiciel performant de calcul de stabilités des pentes, est issu du programme R.R.T. qui est déjà opérationnel depuis 1966 au L.C.P.C. En rupture circulaire,  $F$  est calculé simultanément par les trois approches (Fellenius, Bishop, Perturbations) ; en rupture non circulaire, la méthode des perturbations a été la seule retenue en raison de sa fiabilité (Faure, 1992). La performance du logiciel PETAL84 tient à son caractère modulaire. Les modules sont représentés par une collection de sous-programmes qui permettent de faire entrer dans le calcul les données géométriques, géotechniques et hydrauliques du problème. Signalons encore que le logiciel PETAL84 accepte un profil topographique de forme quelconque, 30 couches de terrains de nature différente et une division du profil qui peut aller jusqu'à 300 tranches verticales. En rupture circulaire, le temps de réponse par cercle testé est d'environ une seconde sur un IPC 386 ;  $F_{min}$  est défini par des calculs successifs portant sur plusieurs centaines de cercles.

#### 3.3. Evolution du coefficient de sécurité

Avec la méthode des perturbations nous avons effectué des calculs sur PETAL84 pour plusieurs cas de talus d'inclinaison  $\alpha = 7,5^\circ$  ;  $10^\circ$  ;  $15^\circ$  ;  $22^\circ$  et  $30^\circ$ . Nous avons conservé le même matériau, un limon sableux frottant dont les caractéristiques mécaniques sont:  $c' = 4$  kPa et  $\phi' = 40^\circ$  avec  $\gamma = 22$  kN/m<sup>3</sup>. La figure 3. montre la variation du coefficient de sécurité pendant le demi-cycle du jusant. L'axe des abscisses représente la différence de niveau entre nappe intérieure (fixé au niveau de la pleine mer) et extérieure (variable, descendante).

Nous remarquons que le coefficient de sécurité décroît dans les premiers temps du jusant, et prend à la fin une direction asymptotique horizontale. Malgré les caractéristiques mécaniques fortement favorables de ce

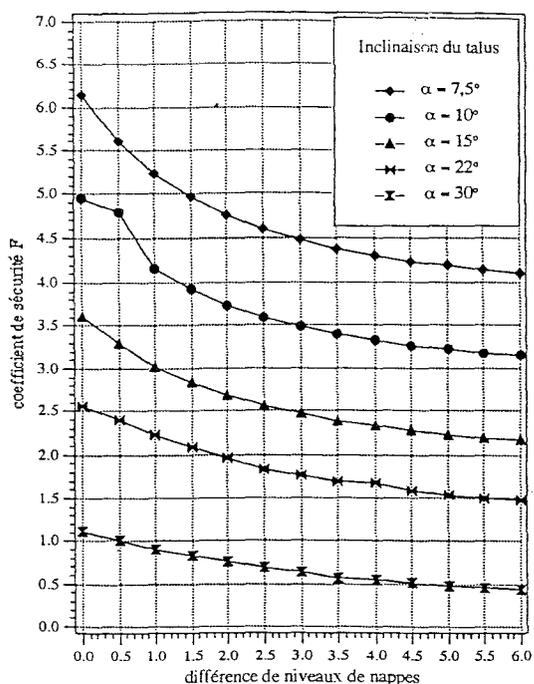


Fig. 3 : Variation du coefficient de sécurité durant le jusant sur un talus de pente  $\alpha$ .

matériau, la pente d'inclinaison  $22^\circ$  reste la limite admissible de stabilité.

#### 4. CONCLUSION

Les phénomènes d'instabilité des talus portuaires sous l'action de la marée sont mal connus. Des calculs antérieurs ont montré que le niveau piézométrique dans le talus était proche de celui de la marée haute.

Dans cet article, nous avons pris en compte l'action de ce niveau piézométrique, à différents moments de la marée, sur la stabilité au grand glissement du talus. Au moyen de la méthode des perturbations, nous avons pu établir l'évolution du coefficient de sécurité en fonction de la différence des niveaux des nappes (entre l'intérieur et l'extérieur du talus) pour différentes pentes.

L'instabilité apparaît ainsi directement liée à la position horaire dans le cycle de marée. Nous avons pu ainsi montrer que, dans le cas d'un sol type, seuls les talus de pente inférieure ou égale à  $22^\circ$  restent stables pendant l'ensemble du cycle de marée.

Cette étude sur les ruptures globales engendrées par l'écoulement sur les talus portuaires sera complétée par une étude ultérieure sur les ruptures superficielles par érosion et/ou affouillement.

#### Bibliographie

Faure R.M. 1992. Méthodes de calcul de stabilité des pentes et leur validation. Journées franco-marocaines de mécanique des sols, Paris 21-22 mai 1992, p. 17.

Faure R.M., Moreau M., Gauriat M. et Gueniot M. 1975. Application de la visualisation interactive aux calculs de stabilité des pentes Programme VESTAL. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 78, juillet et août 1975, 117-130.

Filliat G. 1981. La pratique des sols et fondations. Edition du Moniteur, p.1392.

Pilot J. 1970. Stabilité des talus routiers. Bulletin des laboratoires routiers : Hydrauliques des sols, n° spécial, avril 1970, 163-175.

Rezzoug A. et Alexis A. 1992. Impact d'un écoulement cyclique sur un ouvrage semi-émergé, Journées Nationales de Génie Côtier-Génie Civil, 26-28 février, Nantes, 222-231.

Rezzoug A., Alexis A. et Thomas P. 1993a. Ecoulement dans les talus intertidaux. Xème Forum des Jeunes Océanographes, 1 et 2 avril, Wimereux. En cours de parution dans le Journal de Recherche Océanographique.

Rezzoug A., Alexis A. et Thomas P. 1993b. Theory and experimental validation of tidal seepage in banks. International Conference on Hydro-Science and Engineering, Washington, June 7-11, 1993, Sam S. Y. Wang, ed., The University of Mississippi, Advances in Hydro-Science and Engineering, vol. I, part B, 1711-1716.

Rezzoug A. 1994. Modèles d'écoulement à surface libre dans un massif soumis à la marée. Application au comportement d'un talus portuaire. Thèse de Doctorat, en préparation.

#### QUESTIONS

1) Peut-on appliquer, ou étendre, votre méthode à l'action de la houle sur un talus ? Il serait alors nécessaire de prendre en compte les variations de perméabilité sur la carapace et dans les sous-couches ?

#### RÉPONSE

Nous nous sommes limités à l'action de la marée qui engendre un écoulement lent (darcynien). Le couplage de l'action de la marée et de la houle sur un talus nécessiterait une bonne connaissance des variations et des changements de caractéristiques hydrauliques dans la zone perturbée du corps de l'ouvrage, ainsi qu'une extension du champ de notre modélisation.

2) Dans le dimensionnement de digues, on utilise la formule de Hudson (stabilité carapace), on ignore en général les problèmes de rupture par grand glissement. Il serait intéressant de pouvoir prendre en compte ce phénomène ?

#### RÉPONSE

L'étude de ce phénomène, sur un ouvrage donné, quantifie la remontée critique du niveau piézométrique (excès de pression interstitielle) et met en évidence la zone sollicitée par les changements importants du champ de pressions et de vitesses d'écoulement. A partir de ces éléments, nous pouvons procéder à une vérification de la stabilité de l'ouvrage soit par glissement profond. Cette démarche peut donc compléter le dimensionnement établi par la formule de Hudson.

