

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.

Barrages de correction torrentielle: estimation des poussées de berges

Torrent control dams: assessment of the thrust of the banks

F.Nicot & J.M.Tacnet – *Cemagref, Unité de Recherche ETNA, Grenoble*

E.Flavigny – *Laboratoire Sols, Solides, Structures, Grenoble*

RESUME : Les barrages de consolidation visent à limiter l'érosion du chenal d'écoulement des torrents et sont souvent implantés dans des sites où les berges sont fortement instables. Ces zones constituent en effet d'importantes zones d'alimentation en matériaux solides. Les méthodes actuelles de dimensionnement de ces ouvrages restent basées sur une approche bidimensionnelle d'estimation des actions et des réactions du sol en fondation. De même, les actions dues aux poussées des berges instables, qui entraînent de nombreuses pathologies sur les ouvrages, restent mal connues et ne sont pas prises en compte dans les justifications de la stabilité externe et interne des ouvrages. Cet article présente la problématique et la démarche d'étude en vue d'améliorer la connaissance des interactions entre les barrages et le sol au niveau des fondations et des berges. Dans cette perspective, une approche analytique est proposée, puis les bases d'une simulation numérique introduisant la méthode des Eléments Finis sont définies.

ABSTRACT : Mitigation strategies against natural risks in mountainous areas often include protection works against torrential flooding, avalanches or falling rocks. These structures, which are submitted to specific phenomena as well as they are built in a difficult geotechnical context, must be designed in compliance with specific requirements. Torrent control dams based on an active protection concept are often built to limit the risks of bank slip in the upper part of the catchment area. Usually, design of such structures is based on a two-dimensional approach, allowing force reactions applied by the soil to the foundations of the structure to be assessed. Furthermore, the thrust of the bank is seldom taken into account, even if the loading is likely to be the cause of a lot of observed damages. This paper exposes a methodology whose purpose is to improve the modelling of interaction between soil and structure. After an original analytical approach is presented, the main basis of numerical simulation (Finite Element Code) are defined.

1 INTRODUCTION

Les matériaux transportés par les torrents en crue par charriage ou sous forme de laves torrentielles sont fréquemment issus des berges en glissement. Pour limiter les volumes de matériaux susceptibles de transiter vers l'aval, la construction de barrages de "consolidation" dans ces zones de berges instables présente un intérêt stratégique important dans un dispositif de correction torrentielle. Implantés en série dans les tronçons fortement érodables du chenal d'écoulement dans le cadre de travaux de correction active, ces ouvrages visent à limiter l'érosion longitudinale du lit du torrent, les divagations latérales des écoulements et l'érosion des berges et dans une moindre mesure laminer les laves torrentielles. Ces structures, en béton armé pour la plupart, ont une hauteur moyenne entre 5 et 15 m au niveau de la cuvette déversoir et les plus courantes s'apparentent globalement à des murs de soutènement de type autostable (cantilever). La difficulté d'accès aux sites d'implantation des ouvrages limite souvent les possibilités d'emploi de moyens lourds pour leur réalisation. Les terrains de fondation sont souvent médiocres, fortement hétérogènes et de forte granulométrie (matériaux altérés, moraines à gros éléments, etc....).

En termes de dimensionnement, ces ouvrages se distinguent d'ouvrages d'art plus courants par la nature des charges agissant (chocs, poussée de lave torrentielle) et par un contexte géotechnique de mise en place difficile (caractéristiques géomécaniques du sol de fondation mal connues, instabilité de berges avec une forte interaction sol-structure...). Ces ouvrages sont typiquement tridimensionnels en raison d'une géométrie fortement variable entre l'axe de l'ouvrage et les rives et d'actions (poussée des terres, laves torrentielles) agissant non seulement dans des plans perpendiculaires au voile (amont-aval) de l'ouvrage mais aussi dans des directions quelconques

notamment dans le cas d'instabilité de berges. Des pathologies observées sur des barrages endommagés mettent en évidence la complexité de la détermination des efforts (direction, intensité, répartition de contraintes) liés à l'effet de la poussée des berges sur ce type de structures (Fig. 1). Les matériaux rencontrés provenant d'éboulis de pentes sont souvent grossiers et les conditions de site rendent les sondages ou essais in situ inadéquats. Dans le cas de pentes instables, on se trouve en présence de glissement dont à la fois la profondeur et la longueur de la zone active sont difficiles à déterminer. Cette étude se propose d'identifier puis d'évaluer les actions dues à un glissement sur une structure de ce type.

Dans cette perspective, après avoir décrit les principales pathologies observées sur les barrages de correction torrentielle, une méthode analytique s'appuyant sur les travaux de Blondeau et Virollet (1976) est proposée ; cette méthode permet, dans le cas de la présence à faible profondeur d'un substratum rocheux



Figure 1 : Action d'une berge instable sur un barrage de correction torrentielle de type consolidation.

parallèle à la pente, d'évaluer les efforts appliqués par les berges sur les parements latéraux de l'ouvrage. La dernière partie est consacrée à l'application de la Méthode des Eléments Finis. En particulier, les difficultés de mise en place de ce type de modélisation, dans un contexte d'instabilités de berges, sont évoquées. Enfin, une méthodologie pour le dimensionnement des barrages de correction torrentielle est dégagée.

2 QUELQUES EXEMPLES DE PATHOLOGIES OBSERVEES

Les barrages de correction torrentielle, compte tenu de leur environnement géotechnique très spécifique, sont soumis aux actions suivantes :

- Actions dues au torrent (fluide à rhéologie complexe, présence éventuelles de blocs rocheux).
- Actions dues à la poussée des berges latérales.

Si les actions dues au torrent sont de type dynamique, les secondes sont au contraire de type quasi-statique. Néanmoins, leur estimation demeure aujourd'hui un problème ouvert.

Parmi les pathologies observées sur les barrages, certaines peuvent être imputées à l'action du fluide, et des éléments solides charriés ; mais la plupart doivent être cependant reliées à l'action des berges latérales, souvent dissymétrique, et orientée dans un plan différent de celui du barrage. L'action des berges conduit à des désordres qui sont de deux sortes :

- Déplacements de corps rigide de l'ouvrage, par rapport aux berges (stabilité externe de l'ouvrage). On peut observer alors un basculement ou un enfoncement du barrage, parfois même un déplacement ou un basculement vers l'aval.
- Apparition d'un réseau de fissures plus ou moins ouvertes (stabilité interne de l'ouvrage). Ces fissures sont souvent orientées à 45 degrés par rapport à la direction horizontale (Fig. 2). Parfois, un réseau de fissures sub-horizontales s'observent également.

Dans certains cas, les deux types de désordres co-existent sur un même ouvrage : le barrage a subi un déplacement de corps rigide, auquel s'associe un système de fissures plus ou moins étendues. Lorsque la sollicitation est suffisamment importante, il peut y avoir rupture et déplacement d'une partie du barrage (Fig. 1).

3 APPROCHE ANALYTIQUE

3.1 Contexte géomécanique

On s'intéresse à l'action des berges dans le plan de l'ouvrage perpendiculaire à l'axe du torrent. Les berges sont représentées par une pente uniforme de longueur L , d'angle θ , limitée en profondeur par la présence d'un substratum parallèle à la pente et situé à une profondeur h (Fig. 3). On admettra par ailleurs que l'angle de la pente θ est supérieur à l'angle de frottement φ , et on supposera en première approximation qu'il n'y a pas d'écoulement d'eau au sein du massif. Dans un tel contexte géotechnique, le substratum apparaît comme un plan de discontinuité brutale, susceptible de faciliter le glissement plan vers l'aval des matériaux sus-jacents. En outre, on se limitera dans le cadre de l'approche analytique au cas d'un ouvrage fondé dans le substratum rocheux supposé parfaitement rigide. De cette façon, seule l'action des berges sur le parement latéral de l'ouvrage, liée à la mobilisation des matériaux reposant au-dessus du substratum, sera analysée.

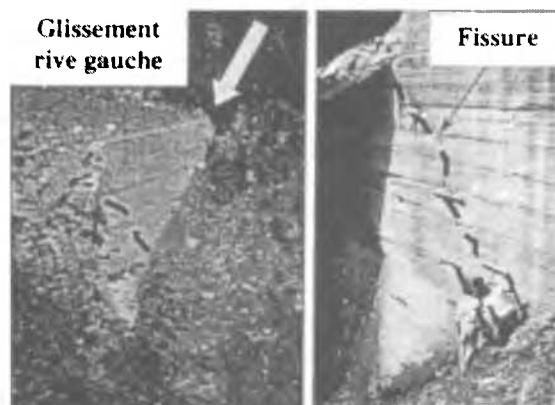


Figure 2 : Action d'une berge en glissement sur un barrage de correction torrentielle.

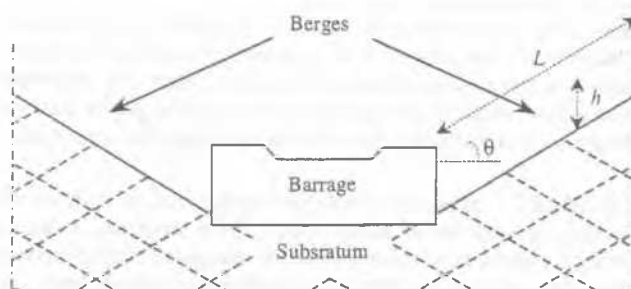


Figure 3 : Coupe schématique du barrage et des berges.

3.2 Analyse mécanique du massif

On s'intéresse dans cette section à l'action d'une des berges sur le parement latéral du barrage. Si l'on admet que la contrainte s'exerçant sur une facette verticale est la même en tout point du massif situé à une même profondeur (ce qui revient à considérer le massif comme étant semi-infini), alors en un point M du massif de sol situé à une profondeur z ($z < h$), la contrainte sur une facette parallèle au substratum est donnée par les équations (Cambou, 1991) :

$$\sigma_o(z) = \gamma z \cos^2 \theta \quad (1)$$

$$\tau_o(z) = \gamma z \cos \theta \sin \theta \quad (2)$$

où γ représente le poids volumique du terrain et θ la pente du substratum.

Par ailleurs, on admet que le volume élémentaire de sol autour du point M est dans un état d'équilibre limite supérieur de Rankine. En adoptant le critère de Mohr-Coulomb comme critère de plasticité, le cercle de Mohr associé à l'état de contrainte au point M est donc tangent aux deux droites de Mohr-Coulomb. L'hypothèse selon laquelle $\theta > \varphi$ induit l'existence d'une surface critique située à une profondeur z_c définie par :

$$\tau_o(z_c) = -c - \sigma_o(z_c) \tan \varphi \quad (3)$$

c'est-à-dire

$$z_c = \frac{c}{\gamma \cos^2 \theta (\tan \theta - \tan \varphi)} \quad (4)$$

L'utilisation de la construction de Mohr permet de déduire les directions de glissement en tout point du massif ; de cette façon, le schéma cinématique suivant peut être proposé (Fig. 4).

4 APPROCHE NUMERIQUE

En développement de l'approche analytique développée ci dessus, une série de modélisations numériques a été entreprise. Ces modélisations numériques, bidimensionnelles, sont réalisées à deux dimensions sur une coupe perpendiculaire à l'axe du torrent : cette approche a été préférée à ce stade de l'étude à une modélisation tridimensionnelle. Les objectifs de ces modélisations sont les suivants :

- Comparaison avec la méthode analytique.
- Connaissance des efforts internes dans l'ouvrage.
- Evaluation du rôle de la géométrie de l'ouvrage.
- Evaluation de l'effet de l'inclinaison des berges latérales.
- Evaluation de l'effet d'une surface de glissement préexistante dans les berges.

4.1 Modélisation

Les modélisations ont été effectuées avec le logiciel Plaxis (Brinkgreve, 1998). Le comportement du sol est un modèle élastique-plastique de Mohr Coulomb sans écrouissage. Les caractéristiques géométriques et géotechniques sont identiques à celles retenues pour l'approche analytique, sauf les points suivants :

- la longueur de la pente a été réduite à 60 mètres. Une étude de sensibilité a montré que cela n'avait pas d'influence sur les résultats ultérieurs ;
- un module d'Young pour le sol de 13 MPa et un coefficient de Poisson de 0.3 ont été adoptés.

Le maillage retenu est indiqué sur la figure 5 : on a retenu une zone de substratum sous la couche de sol. Une interface, sans réduction de propriétés mécaniques permet le glissement de la couche de sol sur le substratum.

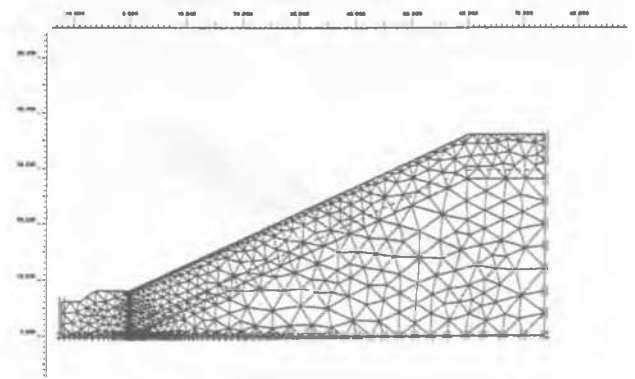


Figure 5 : Maillage.

La modélisation a été menée en appliquant le poids propre à la couche de sol.

4.2 Résultats

Les déplacements incrémentaux sont donnés en fin de chargement sur la figure 8, pour la partie basse de la pente. On y visualise l'écoulement plastique de la pente au dessus du barrage.

Un examen des points où le critère de plasticité est vérifié (Fig. 7) montre que l'on retrouve un coin de sol analogue au coin ABCD de la figure 4 en zone I.

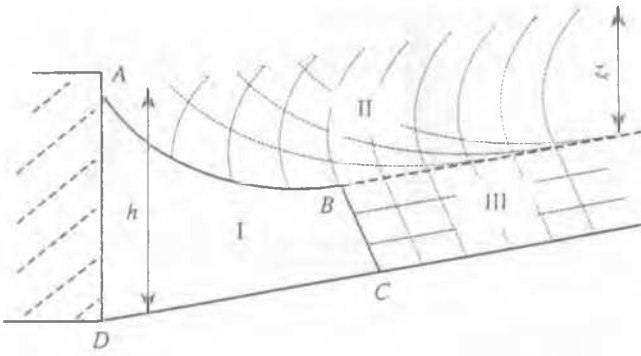


Figure 4 : Schéma cinématique associé au massif de sol.

- La zone I est constituée d'un coin de sol en équilibre surabondant (élastique).
- La zone II est constituée de sol en équilibre limite de butée (équilibre supérieur de Rankine).
- La zone III est en équilibre limite, assuré par la présence de l'ouvrage.

Les zones II et III sont séparées par la surface critique qui est située à la profondeur z_c . Au delà de cette profondeur, un déficit de cisaillement $\Delta\tau$ apparaît lorsque l'angle de la pente θ est supérieur à l'angle de frottement φ :

$$\Delta\tau = c \left(\frac{z}{z_c} - 1 \right) \quad (5)$$

Ce déficit est équilibré par la réaction imposée par l'ouvrage. Par ailleurs, il est possible de déterminer à l'aide de la construction de Mohr les contraintes en tout point du contour ouvert ABCD. L'équilibre du coin de sol ABCD permet alors, par intégration des contraintes le long du contour ABCD, de déduire le torseur des efforts appliqués par le massif sur le parement AD de l'ouvrage.

A titre d'illustration, on considère le cas suivant, pour lequel les berges sont constituées de sables argileux :

$$\begin{aligned} \theta &= 25 \text{ (degrés)} & \gamma &= 18 \text{ (kN/m}^3\text{)} \\ h &= 8 \text{ (mètres)} & \varphi &= 18 \text{ (degrés)} \\ L &= 100 \text{ (mètres)} & c &= 10 \text{ (kPa)} \end{aligned}$$

La méthode précédente fournit alors les éléments de réduction du torseur au point D ; F_h et F_v sont les composantes horizontale et verticale de la résultante et M_D le moment calculé au point D :

$$\begin{aligned} F_h &= 725 \text{ (kN)} \\ F_v &= 338 \text{ (kN)} \\ M_D &= 2777 \text{ (kN.m)} \end{aligned}$$

Il s'agit bien sûr d'une méthode simplifiée, bi-dimensionnelle, mais facile et rapide à mettre en œuvre. Elle fournit en particulier une première estimation de l'action de la poussée des berges dans le plan du barrage. Néanmoins, seule la résultante de cette action est évaluée ; cette méthode ne permet pas de connaître la distribution des contraintes le long du parement du barrage.

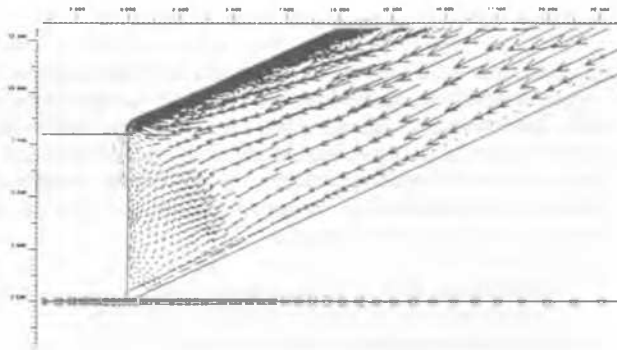


Figure 6 : Champ de déplacements incrémentaux.

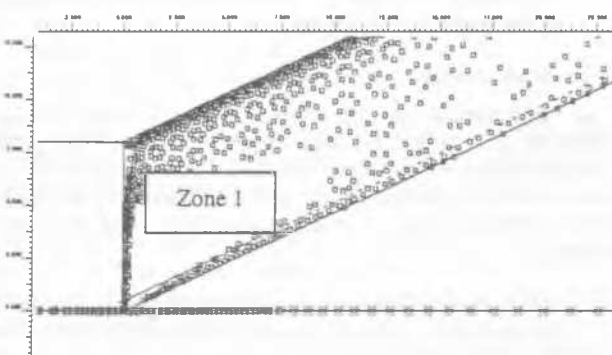


Figure 7 : Points plastiques.

4.3 Coefficient de sécurité

Il est possible de calculer le coefficient de sécurité F de la pente en élément finis par une méthode analogue à la méthode de Taylor (Taylor, 1948) en diminuant cohésion et angle de frottement. Appliqué au cas présent, le coefficient de sécurité est de l'ordre de 1.03. Les déplacements calculés alors n'ont pas de signification physique. Il est toutefois intéressant de représenter le champ de déplacement incrémental (Fig. 8).

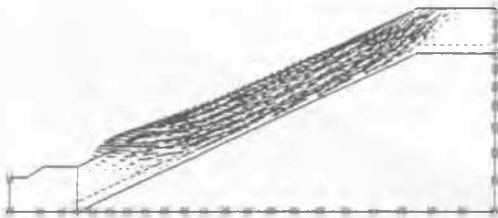


Figure 8 : Champ de déplacement incrémental.

4.4 Efforts appliqués sur l'ouvrage

Il est possible de calculer les efforts appliqués sur le parement vertical AD (cf. Fig. 4) en intégrant les répartitions de contraintes normales et tangentielles agissant. Ce calcul fournit :

$$F_h = 680 \text{ (kN)}$$

$$F_v = 228 \text{ (kN)}$$

$$M_D = 2830 \text{ (kN.m)}$$

Ces valeurs sont cohérentes avec celles obtenues par l'approche analytique. Les répartitions des contraintes sont indiquées sur la figure 9.

Il est important de noter que la répartition de contrainte normale n'augmente pas linéairement avec la profondeur : elle est même décroissante à partir de la mi-hauteur du parement : la partie haute de l'ouvrage est alors fortement sollicitée.

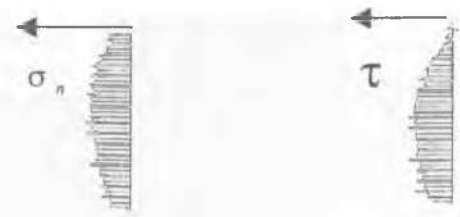


Figure 9 : Répartition des contraintes normale σ_n et tangentielle τ sur le parement.

5 CONCLUSION

L'étude d'un certain nombre d'ouvrages géotechniques se prête bien à l'emploi de méthodes analytiques classiques, de même qu'à l'utilisation de la modélisation numérique mettant en œuvre la méthode des Eléments Finis. En particulier, dans le cas des barrages de correction torrentielle, de telles méthodes permettent d'évaluer la résultante des efforts appliqués par les berges sur le parement latéral de l'ouvrage. On soulignera à ce propos la très bonne cohérence entre les résultats issus des deux méthodes, analytique et numérique. Toutefois, il importe de souligner les difficultés de mise en œuvre de la méthode des Eléments Finis dans un contexte d'instabilité de berges, liées aux déformations importantes que subit le massif au voisinage de son état d'équilibre limite. Par ailleurs, dans le cas des formations de pente constituées de sols à forte granularité, peu d'essais mécaniques sont disponibles et les valeurs des paramètres mécaniques utilisées dans les calculs résultent de choix arbitraires. Par conséquent, l'amélioration de la connaissance de ces sols s'avère donc essentielle pour permettre une modélisation représentative de l'interaction entre les ouvrages et des sols à forte granularité rencontrés en montagne. Les modélisations évoquées dans le cadre de cet article ont permis de comparer la résultante des efforts appliqués par les berges sur le parement latéral de l'ouvrage dans un plan perpendiculaire à l'axe du torrent. En outre, l'analyse qualitative des résultats a été intégrée dans un calcul de justification de la stabilité globale des ouvrages développé par ailleurs. La limitation de la présente étude est son caractère bidimensionnel. Les efforts mis en jeu peuvent être absorbés par la structure s'ils restent dans le plan du voile. Par contre, si les conditions géométriques de l'ouvrage par rapport à la pente entraînent des efforts hors plan, la flexion parasite ainsi créée est néfaste et nécessite alors des calculs tridimensionnels.

REFERENCES

- Blondeau, F. & Violette, M. 1967. Les méthodes d'analyse de stabilité, *Bulletin de Liaison des Ponts-et-Chaussées*, n° spécial, pp. 149-154
- Brinkgreve, R.B.J. & Vermeer, P.A. 1998. *Plaxis, version 7*, Balkema, Rotterdam.
- Cambou, B. & al. 1981. *Problèmes pratiques de mécanique des sols et de fondation*. Ed. Dunod, Tome 2, pp. 216-257.
- Costet, J. & Sanglerat, G. 1976. *Cours pratique de mécanique des sols*. Ed. Dunod.
- Taylor, D.W. 1948. *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley and sons, New York.