

PROCEEDINGS OF THE ELEVENTH
INTERNATIONAL CONFERENCE
ON SOIL MECHANICS AND
FOUNDATION ENGINEERING
SAN FRANCISCO / 12-16 AUGUST 1985

EDITOR: PUBLICATIONS COMMITTEE OF XI ICSMFE

OFFPRINT / TIRÉ À PART

COMPTES RENDUS DU ONZIEME
CONGRES INTERNATIONAL DE
MECANIQUE DES SOLS ET DES
TRAVAUX DE FONDATIONS
SAN FRANCISCO / 12-16 AOUT 1985

EDITEUR: COMITE DES PUBLICATIONS DU XI CIMSTF



A.A.BALKEMA/ROTTERDAM/BOSTON

Analyse de stabilité d'ouvrages en sols renforcés

Stability analysis of reinforced soil structures

J. SALENÇON, Professeur, ENPC, Ecole Polytechnique, Laboratoire de Mécanique des Solides, Palaiseau, France
P. DE BUHAN, Ingénieur des Ponts et Chaussées, ENPC, Laboratoire de Mécanique des Solides, Palaiseau, France

RÉSUMÉ On présente une méthode pour l'analyse de stabilité des ouvrages en sols renforcés, fondée sur la modélisation macroscopique du sol par un matériau homogène anisotrope. Traitant le cas particulier d'un talus en sol purement cohérent renforcé par un sol de cohésion plus grande, on montre que la stabilité de cet ouvrage peut être analysée comme celle d'un talus en sol purement cohérent anisotrope, pour laquelle une méthode générale à caractère cinématique a été proposée antérieurement. La mise en oeuvre pratique est faite sur deux exemples. La comparaison des résultats obtenus avec ceux issus d'une méthode souvent utilisée dans la pratique met en évidence l'intérêt de la méthode d'homogénéisation pour le dimensionnement d'ouvrages en sol renforcé et attire l'attention sur les risques de surestimation importante du facteur de stabilité liés à l'emploi d'une méthode classique.

1 - INTRODUCTION

Les analyses de stabilité d'ouvrages en sols renforcés se font actuellement par des méthodes "à la rupture" transposées de celles utilisées classiquement pour les ouvrages constitués de sols naturels homogènes et isotropes. On a montré dans des publications récentes comment la théorie du calcul à la rupture permet d'interpréter de façon mécaniquement rigoureuse ces méthodes classiques (Salençon et Coussy, 1979) et d'en concevoir de nouvelles pour l'étude d'ouvrages constitués de sols naturellement anisotropes (Salençon et Tristán-López, 1981).

On se propose ici, par une application de la théorie du calcul à la rupture d'abord au niveau du matériau "sol renforcé", puis au niveau de l'ouvrage lui-même, de construire et de mettre en oeuvre une méthode d'analyse de stabilité simple et performante dans laquelle l'ouvrage sera modélisé comme constitué d'un matériau "sol renforcé" homogène et anisotrope.

Laissant de côté tous les développements théoriques disponibles par ailleurs, l'étude est présentée à propos de l'analyse de stabilité d'un talus en sol cohérent renforcé par un sol de cohésion plus grande (renforcement du type "argile stabilisée à la chaux"), traitée comme un problème bidimensionnel.

2 - LE PROBLÈME ÉTUDIÉ

On s'intéresse à l'étude de stabilité d'un talus de hauteur h et d'angle β , constitué d'un sol purement cohérent (cohésion C_1) renforcé par des couches verticales d'un sol plus cohérent (cohésion $C_2 > C_1$). Le problème ainsi défini peut être étudié dans la plan Oxy (figure 1).

En désignant par e_i l'épaisseur des couches du sol de cohésion C_i ($i = 1, 2$), les rapports $\lambda_i = e_i/e$ (où $e = e_1 + e_2$) représentent les proportions respectives de chacun des sols. On sup-

pose par ailleurs que le contact entre le sol en place et le sol de renforcement est à adhérence parfaite.

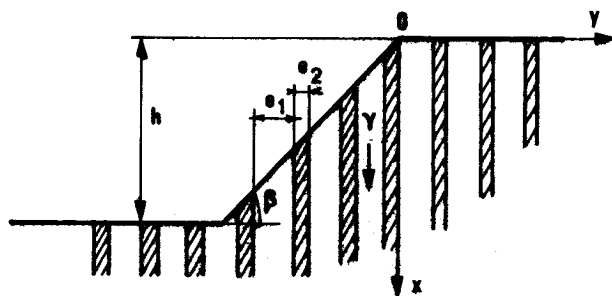


Figure 1 : Stabilité d'un talus en sol renforcé.

Les deux sols sont pesants, de même poids volumique γ , qui constitue ainsi l'unique paramètre de chargement de l'ouvrage.

On sait d'après un résultat classique que la stabilité d'un tel ouvrage ne peut être assurée que si le facteur adimensionnel $K = \gamma h/C_1$ (facteur de stabilité) demeure inférieur à une valeur critique K^+ qui, par des considérations d'analyse dimensionnelle, se met nécessairement sous la forme :

$$(\gamma h/C_1)^+ = K^+(\beta, C_2/C_1, \lambda_2/\lambda_1, e/h) \quad (1)$$

On s'attachera plus particulièrement ici à déterminer K^+ (ou tout au moins à en approcher la valeur) lorsque le rapport e/h tend vers zéro :

$$K_0^+ = \lim_{e/h \rightarrow 0} K^+, \quad (2)$$

c'est-à-dire en pratique lorsque l'épaisseur des couches du sol renforcé peut être considérée comme faible devant la hauteur du talus, longueur de référence de l'ouvrage.

3 - FONDEMENTS THÉORIQUES DE LA MÉTHODE D'HOMOGÉNÉISATION

3.1 La difficulté à déterminer K^+ tient essentiellement à la nature hétérogène du sol constituant l'ouvrage. Il paraît dès lors naturel, compte tenu de l'hypothèse formulée précédemment ($e/h \ll 0$), de chercher la solution d'un problème homogène associé (figure 2) défini par les mêmes paramètres de géométrie (β , h) et de chargement (γ) que dans le problème initial, mais pour lequel le sol renforcé est modélisé du point de vue macroscopique comme un *matériau homogène anisotrope* défini par son critère de rupture macroscopique. Celui-ci n'est fonction que des cohésions respectives des deux sols (C_1, C_2) ainsi que de leur proportion volumique.

Pour ce talus homogène, la stabilité est également régie par le facteur adimensionnel ($\gamma h/C_1$) qui doit être inférieur à une valeur limite que l'on notera K_{hom}^+ , fonction de C_2/C_1 et λ_2/λ_1 .

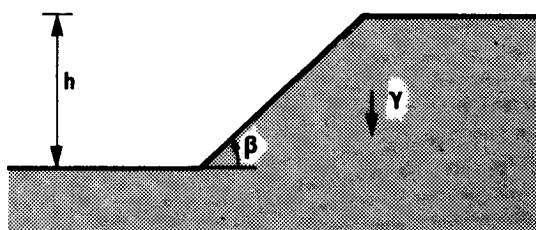


Figure 2 : Talus homogène associé.

3.2 La détermination du critère de résistance macroscopique du matériau "sol-renforcé" peut être effectuée par voie théorique : de Buhar et Salençon (1983) ont donné la formulation mécanique précise de ce problème et la méthode de construction explicite. Dans le même cadre et indépendamment, Suquet (1983) a pu démontrer un résultat très général qui se traduit dans notre exemple par l'inégalité suivante :

$$K_{\text{hom}}^+ > K_{\text{O}}^+ \quad (3)$$

c'est-à-dire que la valeur critique du facteur de stabilité de l'ouvrage "homogénéisé" défini au paragraphe 3.1 est supérieure à celle de l'ouvrage réel. Ce résultat, qui ne va manifestement pas dans le sens de la sécurité, se révélera néanmoins d'une importance décisive par la suite.

4 - CRITÈRE DE RÉSISTANCE DU MATÉRIAU "SOL RENFORCÉ"

4.1 Le critère de résistance du matériau homogénéisé "sol renforcé" obtenu dans le cadre défini ci-dessus apparaît comme du type *cohérent anisotrope*. Son expression est la suivante :

$$\sigma_M - \sigma_m - 2 C(\alpha) \leq 0 \quad (4)$$

où σ_M (respectivement σ_m) désigne la contrainte

principale majeure (respectivement mineure), comptée positivement en compression, à laquelle est soumis un élément représentatif de sol renforcé, et α est l'inclinaison de la direction de σ_M par rapport à l'orientation des couches (figure 3). La *cohésion anisotrope* $C(\alpha)$ qui apparaît dans ce critère, peut s'écrire :

$$C(\alpha) = C_1 \cdot \rho(\alpha, \lambda_2/\lambda_1, C_2/C_1) \quad (5)$$

où ρ est un facteur sans dimension, supérieur ou égal à 1, qui caractérise le renforcement du sol. Sa valeur est maximale pour $\alpha = 0^\circ$ et 90° , et minimale pour $\alpha = 45^\circ$:

$$C(0^\circ) = C(90^\circ) = C_1 \cdot \frac{1 + (\lambda_2/\lambda_1)(C_2/C_1)}{1 + (\lambda_2/\lambda_1)} = r C_1 \quad (6)$$

$$(\rho = r)$$

$$C(45^\circ) = C_1 \quad (\rho = 1) \quad (7)$$

Le diagramme polaire $\rho(\alpha) = C(\alpha)/C_1$ est représenté sur la figure 3.

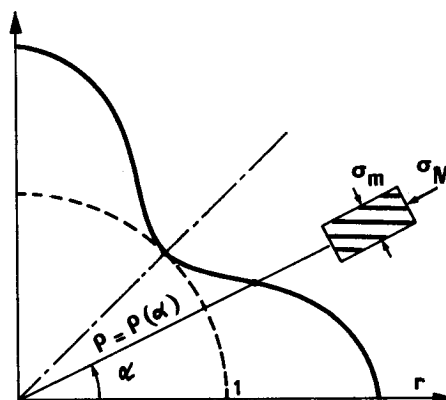


Figure 3 : Diagramme polaire de cohésion du sol renforcé.

4.2 Il est intéressant de pouvoir comparer ce critère avec celui de Bishop (1966), également de type cohérent anisotrope, employé pour décrire l'anisotropie de rupture de certaines argiles naturelles. On identifie pour cela les valeurs des cohésions relatives aux deux critères obtenues pour les angles de 0° , 45° et 90° . L'expression de la cohésion pour le critère de Bishop devient alors :

$$C(\alpha) = C(45^\circ) \cdot [r \cdot \cos^2 2\alpha + \sin^2 2\alpha] \quad (8)$$

La comparaison des diagrammes polaires de cohésion montre une assez bonne coïncidence des deux critères pour des valeurs de r proches de 1,7 (figure 4-a). Ils sont par contre nettement distincts pour les autres valeurs de r , en particulier lorsque r devient supérieur à 2 (figure 4-b).

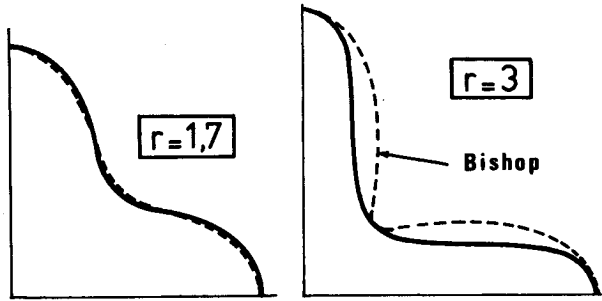


Figure 4 : Comparaison avec le critère de Bishop.

5 - ANALYSE DE STABILITÉ DU TALUS HOMOGENE ASSOCIE

Ce procédé d'homogénéisation permet donc de ramener l'étude de stabilité de l'ouvrage en sol renforcé à celle d'un ouvrage homogène constitué d'un sol obéissant au critère (4). Salençon et Tristán-López (1981) ont exposé le principe de la méthode cinématique utilisant des mécanismes de rupture par blocs rigides pour l'analyse de stabilité de ce dernier type d'ouvrages en matériau homogène purement cohérent anisotrope ; ils ont montré en particulier que la ligne de discontinuité de vitesse qui sépare le bloc en mouvement du reste du massif est nécessairement circulaire (figure 5).

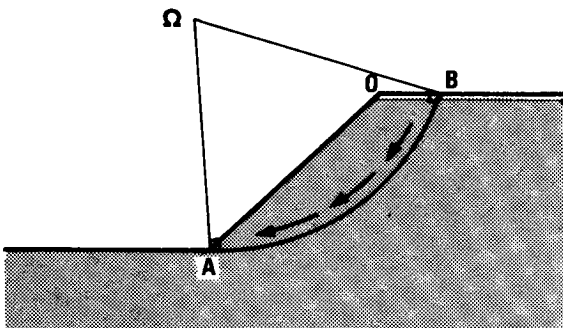


Figure 5 : Mécanisme de rupture circulaire.

L'utilisation de la méthode cinématique nécessite la connaissance des fonctions "pi" associées au critère de résistance. Celles-ci ont été calculées par Zghal (1983) pour le critère (4) et l'on peut ainsi déterminer une valeur par excès de K_{hom}^+ soit K_{hom}^m :

$$K_{hom}^m > K_{hom}^+ \tag{9}$$

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 6 sous forme d'abaques donnant K_{hom}^m/r en fonction de r et de λ_2/λ_1 , et pour deux valeurs d'inclinaison du talus : $\beta = 90^\circ$ (talus vertical), $\beta = 45^\circ$.

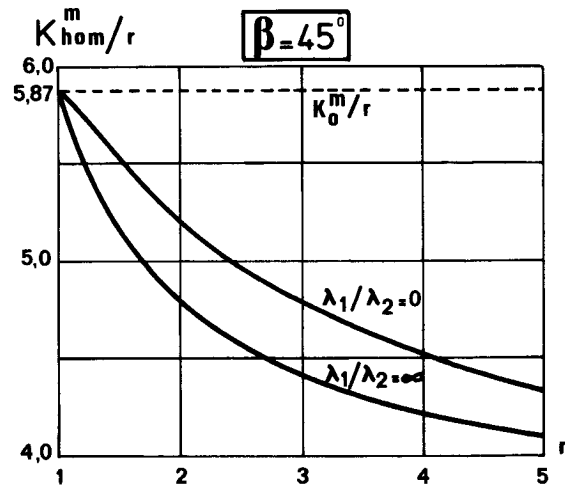
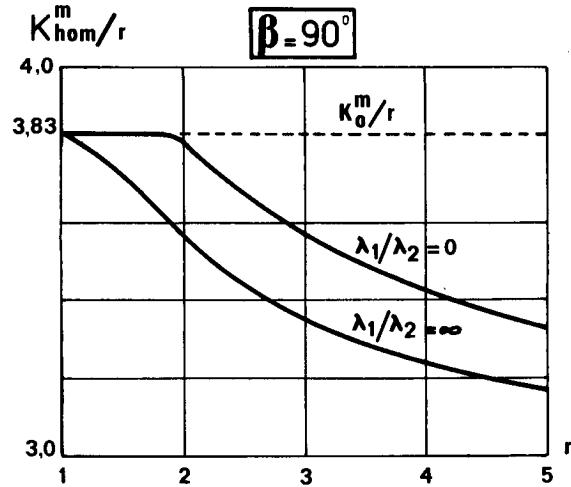


Figure 6

On remarque que l'on retrouve bien pour $r = 1$ et $\beta = 90^\circ$ (talus vertical constitué d'un sol homogène de cohésion C_1) le résultat classique dû à Taylor : $K_{hom}^m \approx 3,83$.

6 - COMMENTAIRES ET CONCLUSION

6.1 - Comparaison avec une méthode classique (Alimak Lime Column Method, 1980)

Une méthode utilisée habituellement pour le dimensionnement de pentes ou de talus en sols renforcés consiste à vérifier directement la stabilité de l'ouvrage hétérogène vis-à-vis de la rupture circulaire (figure 7), en particulier lorsque le rapport e/h tend vers zéro. Il est clair que ce type de calcul permet d'obtenir un majorant de K_0^+ noté K_0^m :

$$K_0^m \geq K_0^+ \tag{10}$$

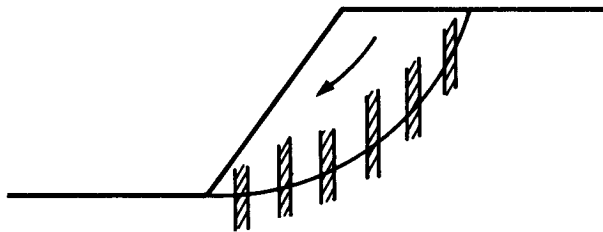


Figure 7 : Méthode classique d'analyse de stabilité d'un talus en sol renforcé.

Dans notre exemple, on montre que ce majorant est toujours proportionnel à r (par exemple $K_O^m \approx 3,83 r$ pour $\beta=90^\circ$), et on trouve qu'il est supérieur à celui obtenu par la méthode d'homogénéisation (voir abaques figure 6), soit :

$$K_O^m > K_{\text{hom}}^m \quad (11)$$

On tire alors de la combinaison de (9) et (11) et de l'inégalité de Suquet (3), la double inégalité :

$$K_O^m > K_{\text{hom}}^m > K_O^+ \quad (12)$$

Ce résultat important signifie que pour la même famille de mécanismes de rupture (cercles de glissement), la méthode d'homogénéisation fournit une meilleure approche par excès de K_O^+ que la méthode classique. Cette dernière conduit en effet au même majorant que celui que l'on obtiendrait à l'aide de mécanismes de rupture circulaire pour un talus constitué d'un sol homogène et isotrope de cohésion $rC_1 = \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2$ (moyenne pondérée des cohésions des deux sols).

En fait, rejoignant en cela l'intuition mécanique, la méthode d'analyse proposée rend bien compte de l'anisotropie macroscopique du matériau "sol renforcé", ce qui explique qu'elle conduise à de meilleurs résultats dans les analyses de stabilité.

6.2 Exemple pratique de dimensionnement.

Ainsi pour un talus d'inclinaison $\beta = 45^\circ$, constitué d'un sol homogène de cohésion C_1 , les deux méthodes donnent évidemment le même majorant de K_O^+ :

$$K_O^+ < 5,87$$

Le sol en place est alors renforcé par un sol de cohésion $C_2 = 10 C_1$ (ordre de grandeur de l'augmentation de cohésion d'une argile stabilisée à la chaux) dans une proportion de 10% ($\lambda_1 = 0,9$, $\lambda_2 = 0,1$) d'où $r = 1,9$.

La méthode classique donne alors $K_O^m \approx 11,15$ soit un accroissement de 90% de la valeur critique du facteur de stabilité du talus ; la méthode d'homogénéisation donne quant à elle $K_{\text{hom}}^m \approx 9,27$ ce qui montre que l'accroissement du facteur de stabilité dû au renforcement du talus ne sera en réalité pas supérieur à 58% : ainsi pour un talus dont le coefficient de sécurité serait initialement de 0,67, le renforcement permettra une

amélioration de ce coefficient jusqu'à 1,04 et non jusqu'à 1,25 comme indiqué par la méthode classique.

Ce résultat illustre bien le risque de surestimation de la stabilité d'un ouvrage en sol renforcé que comporte l'utilisation de la méthode classique.

6.3 Plusieurs prolongements de cette méthode sont envisageables : on peut par exemple préciser le rôle joué par les conditions de résistance aux interfaces entre le sol en place et le sol de renforcement (supposées être à adhérence parfaite dans notre étude). Il serait également possible d'étudier dans le cadre de la méthode d'homogénéisation d'autres types de renforcement.

RÉFÉRENCES

- SALENÇON, J & COUSSY, O (1979) "Analyse de la stabilité des remblais sur sols mous," C.R. symp. Int. Méc. Sols, Oaxaca (Mexique), Mars 1979, Vol I, 145-153.
- SALENÇON, J & TRISTAN-LOPEZ, A (1981) "Stabilité d'ouvrages en sols cohérents anisotropes," C.R. X^e Cong. Int. Méc. Sols, Stockholm, Vol III, 515-518.
- de BUHAN, P & SALENÇON, J (1983) "Définition et calcul d'un critère de rupture macroscopique pour le matériau multicouche," Coll. Int. CNRS "Critères de rupture des matériaux à structure interne orientée," Grenoble (France).
- SUQUET, P (1983) "Analyse limite et homogénéisation," CRAS, t. 296, série II, 1355-1358.
- BISHOP, A.W. (1966) "The strength of soils as engineering materials," Geotechnique, 16, 2, 89-130.
- ZGHAL, A. (1983) "Stabilité d'ouvrages en matériaux composites," Mémoire de D.E.A., Laboratoire de Mécanique des Solides, (Palaiseau), ENIT, (Tunis).
- LIME COLUMN METHOD. Document de la société Linden-Alimak, Suède, 1980.