analyse des contraintes dans un talus
par la méthode des perturbations
stress analysis in a slope using
a perturbation method

R.M. FAURE

Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (E.N.T.P.E) *

Résumé

L'étude présentée est composée de deux parties.

La première confirme le résultat classique suivant : toute méthode de stabilité doit vérifier l'équation de projection suivant la verticale pour être convergente et fiable.

La seconde partie précise les paramètres à utiliser dans la méthode des perturbations présentée et montre que considérer le seul coefficient de sécurité F est insuffisant et que l'on doit se préoccuper du lobe des contraintes, afin de pouvoir étendre ces méthodes vers les problèmes de clouage par exemple.

Abstract

The following study consists of two parts.

The first one shows the well known result that the mechanics of any slope stability analysis must verify the equilibrium in the vertical direction in order to be reliable and to converge.

The second part indicates more precisely the parameters to be used in the perturbation method. This part shows that taking in account only the value of the safety factor F to guide this choice is not satisfactory. One must also consider the "stress lobe" (envelope of normal stresses along the failure curve).

* Rue Maurice-Audin, 69120 Vaulx-en-Velin.

1. INTRODUCTION

L'étude présentée ici peut être décomposée en deux grandes parties.

La première possède un caractère académique et aboutit au résultat intuitif, que toute méthode de calcul à la rupture en stabilité des pentes doit au moins vérifier l'équation de projection sur une verticale pour être convergente et fournir un résultat fiable.

La seconde partie est un paramétrage systématique des termes intervenant dans la méthode des perturbations, qui vérifie les trois équations de la statique, afin de proposer un choix de ces paramètres. Dans cette étude la solution du problème de statique n'est plus simplement le coefficient de sécurité F_s , mais aussi le lobe des contraintes et ce résultat, confronté à des solutions obtenues par éléments finis, permet d'envisager des études plus délicates comme le clouage des sols ou certains aspects sismiques de la stabilité des pentes (FAURE et al, 1986).

2. QUELQUES RAPPELS SUR LES MÉTHODES DE CALCUL DE STABILITÉ DES PENTES

Toute méthode de calcul est basée sur des hypothèses simplificatrices portant sur les lois qui régissent le comportement du matériau sol et sur la géométrie du problème.

L'hypothèse principale se rapportant à la géométrie est de considérer le problème plan. Pour le comportement du sol on supposera à la fois un comportement rigide de la masse en glissement, et un coefficient de sécurité constant défini par F_s et la vérification de la loi de Coulomb.

2.1. Méthodes des lignes de glissement

Si la ligne est simple on sait résoudre par un simple funiculaire des forces. C'est le cas de la méthode de Coulomb et des méthodes de blocs.

2.2. Méthodes des tranches

Le massif est décomposé en tranches verticales. Un inventaire des équations disponibles et des inconnues permet de définir le nombre d'équations supplémentaires à ajouter au système et suivant ce choix on obtient les diverses méthodes (ex. : BISHOP, MORGENTERN).

2.3. Méthodes globales

On suppose connaître une répartition des contraintes le long de la courbe de rupture sous une forme paramétrée. Les paramètres sont alors des inconnues dans la méthode de résolution (ex. : BELL, perturbations...).

2.4. Méthodes variationnelles

Une énergie de déformation peut être calculée avant la rupture, sa minimisation permet d'obtenir un système résolvant. Cette résolution peut être très sophistiquée comme chez BAKER et al. (1978), mais reste encore incomplète.

On peut donc recenser une vingtaine de méthodes bien connues pour les études de stabilité de pente. En comparant ces méthodes on remarque que si l'approche mécanique des sols est très développée, on a alors un schéma numérique peu stable et que lorsque l'on veut rendre ce schéma stable il faut simplifier au maximum des hypothèses de la mécanique des sols.

Une caractéristique commune de ces méthodes est que le lobe des contraintes n'est jamais exhibé comme résultat principal et que les comparaisons ne portent que sur le coefficient de sécurité F_s .

Dans ce qui suit nous allons donner au lobe des contraintes une place prépondérante dans l'étude comparative qui conduira à un choix.

3. LA MÉTHODE DES PERTURBATIONS

C'est une méthode globale ; la discrétisation qui conduit à des points de calcul que l'on appelle tranches par abus de langage, est essentiellement numérique afin de pouvoir calculer les intégrales.

3.1. Formulation

Cette méthode, dont le principe a été posé par RAULIN et al. (1972) vérifie les trois équations de la statique.

Considérons un volume de sol A délimité par la surface du talus et une courbe de rupture supposée connue. Ce volume A est en équilibre sous l'effet de son propre poids et la réaction du massif de sols sous-jacent.

Fig. 1. - Méthode globale.

En un point M de la courbe de rupture la réaction du sol sous-jacent peut être représentée par un vecteur contrainte noté σ . Ce vecteur contrainte σ peut être décomposé en un vecteur normal σ_n et un vecteur tangentiel τ à la courbe de rupture.

On appelle lobe des contraintes la courbe enveloppe des extrémités du vecteur σ_n . Suivant l'hypothèse de la rupture nous déduisons τ de σ_n par la loi de Coulomb et par l'application du coefficient de sécurité.

$$\tau = \frac{(\sigma_n - u) \operatorname{tg} \phi' + c'}{F_s}$$

Le lobe des contraintes normales apparaît donc comme une inconnue. Pour résoudre nous allons supposer connue une valeur approchée de cette contrainte, soit σ_0 . Les trois équations de la statique sont les équations résolvantes aussi nous pouvons écrire :

$\sigma_n = \sigma_0 (\lambda + \mu v)$ où λ et μ sont des inconnues (au même titre que F_s) et v un paramètre généralement géométrique connu en tout point.

On peut alors résoudre en λ , μ et F_s à l'aide de ces trois équations de la statique. Cette résolution est un peu délicate car F_s apparaît au dénominateur.

Dans la méthode des perturbations écrire l'équilibre de la masse A nécessite la connaissance des paramètres du sol (loi de Coulomb), un choix des expressions σ_0 et v . Pour cette masse A, définie par une courbe de rupture on obtient dans le vecteur solution les paramètres λ et μ qui déterminent la perturbation et F_s le coefficient de sécurité supposé constant le long de la courbe de rupture. Pour connaître la stabilité d'un talus on étudiera plusieurs courbes non circulaires, générées par un algorithme dans le programme NIXES et TROLLS.

La rupture la plus probable correspond à la courbe de coefficient de sécurité minimum.

Dans un but de généralisation on écrit :

$$\tau = \frac{[\sigma_0 (\lambda + \mu v) - u] \operatorname{tg} \phi' + c'}{F_0 d}$$

où d est une fonction définie le long de la courbe de rupture et qui permet de faire varier le F_s local ($F_s = F_0 d$) tout en gardant à F_0 une définition globale pour la courbe rupture.

σ_0 est appelée contrainte initiale

v est le paramètre de perturbation

$\lambda + \mu v$ est la perturbation

d est le paramètre de variation du coefficient de sécurité.

3.2. Choix de σ_0 , v et d

L'étude comporte deux parties qui sont la recherche de différentes formulations des termes σ_0 , v et d , puis une comparaison en vue du choix.

La formulation doit correspondre à une bonne intuition du résultat car tout système se résout d'autant plus facilement que l'on est proche de la solution. C'est ainsi que l'on progressera dans la définition de σ_0 .

Le choix des paramètres est mal aisé car il est difficile de définir de bons critères de choix. Des calculs en éléments finis seraient précieux, pour guider ce choix et cela reste une voie d'étude. Le choix proposé est guidé par des critères plus simplistes. Il sera fait au chapitre 6.

3.2.1. Choix de σ_0

Trois définitions, appelées modes sont proposées dans cette étude.

Fig. 2. – Rappel des notations.

- Le long de la courbe de rupture, au point M nous notons γh la valeur de la contrainte verticale sur une facette horizontale. C'est la contrainte à la profondeur h , dans un sol de poids spécifique γ et dont la surface est horizontale.

- L'angle orienté α est celui que fait la tangente à la courbe de rupture en M avec l'horizontale. $\alpha > 0$ défini l'amont du glissement, $\alpha < 0$ l'aval.

Mode 1

Nous proposons $\sigma_0 = \gamma h \cos^2 \alpha$

Cette valeur de σ_0 est parfois appelée contrainte de Fellenius en rappel de cette méthode et correspond à l'équilibre d'une tranche verticale de sol, en négligeant les forces intertranches, reposant sur une base inclinée à α sur l'horizontale. C'est le choix de RAULIN et al. (1972).

Mode 2

Le mode précédent ne différenciait pas l'amont de l'aval. Dans le mode 2 le signe de l'angle α différencie le calcul de σ_0 . Cependant on suppose que les directions principales sont la verticale et l'horizontale et γh est contrainte principale s'appliquant sur la facette horizontale quelle que soit la position du point M le long de la courbe de rupture.

On a ainsi pour $\alpha > 0$ la construction suivante :

Fig. 3. - Calcul de σ_ω mode 2.

N.B. : La convention de signe utilisée dans les constructions du cercle de Mohr est la suivante :

Fig. 4. - Convention de signe.

C'est exactement la convention inverse (sur σ_n et τ) de celle utilisée par Otto Mohr dans sa démonstration de 1882. Avec cette convention le pôle est obtenu directement par une parallèle à la facette passant par le point représentatif et les rotations des points représentatifs et des facettes se font dans le même sens.

Pour $\alpha < 0$ on a la construction suivante :

Fig. 5. - Calcul de σ_ω mode 2.

Les figures 3 et 5 permettent d'obtenir très simplement les algorithmes de calcul qui sont différenciés par ϕ' différant ou non de zéro et α positif ou négatif. L'amont et l'aval de la courbe de rupture sont ainsi différenciés dans une approche qui rappelle celle de la poussée et la butée, d'où une notion approximative de déplacement ainsi introduit dans un calcul de stabilité.

Mode 3

Dans le mode 2 la contrainte verticale de valeur γh est la contrainte principale. Dans ce mode 3 on suppose que la contrainte normale sur une facette horizontale est γh , mais n'est plus principale. Il y a rotation des axes principaux. On suppose également que le long de la facette inclinée à α , c'est-à-dire portée par la courbe de rupture l'état de rupture est atteint et est représenté sur le cercle de Mohr par le point de tangence entre le cercle et la courbe intrinsèque définie par l'angle ϕ' .

Le schéma du cercle de Mohr se complique et on obtient par exemple les trois figures 6, 7 et 8 :

Fig. 6. - Calcul de σ_ω mode 3.

Fig. 7. - Calcul de σ_ω mode 3.

Fig. 8. - Calcul de σ_0 , mode 3.

Un calcul trigonométrique fournit la valeur de σ_0 en fonction de γh , α et ϕ' et c' .

COMPARAISON DES TROIS MODES PROPOSÉS

La figure 9 fournit la valeur du rapport $\sigma_0/\gamma h$ en fonction de la valeur de α . Les courbes sont tracées pour $\phi' = 30^\circ$.

Fig. 9. - Comparaison des modes 1, 2 et 3.

La variation du rapport $\sigma_0/\gamma h$ apparaît plus réaliste avec le mode 3. L'amont et l'aval sont différenciés et c'est ce mode qui possède les hypothèses les moins restrictives pour la détermination de σ_0 .

La surestimation du cisaillement donnée par le mode 2 et indiquée par FAURE R.M. (1982) n'existe plus avec le mode 3 où l'on vérifie, de par l'hypothèse faite sur la rupture, que le point représentant la contrainte le long de la courbe de rupture appartient à la fois au cercle de Mohr limite à la courbe intrinsèque.

C'est pour la suite une garantie de l'homogénéité.

CHOIX DE L'EXPRESSION DE v

RAULIN et al. (1972) par tâtonnement avait choisi $v = \tan \alpha$. Les principales expressions testées dans cette étude sont les suivantes :

- a. $v = \tan \alpha$
- b. $v = \cos^2 \alpha$
- c. $v = \tan^2 \alpha$
- d. v : est la profondeur relative du point courant M comme le montre la figure 10.

Fig. 10. - Définition de $v = \frac{h}{l}$.

- e. v est une fonction de la distance relative du point courant M comme le montre la figure 11.

Fig. 11. - Définition de $v = f\left(\frac{x}{l}\right)$.

La fonction de v testée a un graphique qui rappelle un lobe de contrainte comme le montre la figure suivante.

$$\text{L'expression de } v \text{ est : } v = \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \left(0,375 + \frac{x}{l}\right).$$

Le graphe de cette fonction est fourni figure 12.

- f. $v = \gamma h \cos^2 \alpha$

Ce qui revient à écrire que la contrainte est perturbée par elle-même dans le cas du mode 1. Cette expression qui avait donné de bons résultats dans FAURE (1982) où elle n'était testée que sur une seule courbe, dans un sol homogène, s'est révélée très déroutante dans cette étude.

Fig. 12. – Graphe de la fonction de $v = f\left(\frac{x}{l}\right)$.

g. $v = \text{tg } \phi$

Cette expression n'a de l'intérêt que dans le cas d'un multicouche. Elle définit la perturbation comme une fonction géotechnique.

h. $v = \text{tg } \phi \cdot \text{tg } \alpha$

C'est l'expression précédente pondérée par la géométrie même de la courbe de rupture.

CHOIX DU PARAMÈTRE d

d est appelé le paramètre du coefficient de sécurité car il permet de faire varier F_s , valeur qui pondère τ , le long de la courbe de rupture. d doit être défini comme une fonction.

a. $d = 1$

F_s est alors constant tout le long de la courbe de rupture, c'est la définition habituelle.

b. $d = \frac{x}{l} + 0.5$

ou $\frac{x}{l}$ est la distance relative du point courant M comme définie précédemment fig. 11. Cette expression minimise le coefficient de sécurité dans la partie amont de la courbe de rupture.

c. $d = 1 - \frac{|\text{tg}(\alpha_{i-1}) - \text{tg}\alpha_i|}{\text{tg}\alpha_i}$

ou α_i et α_{i-1} sont les inclinaisons des facettes, bases des tranches i et $i-1$ relatives au point courant M de rang i . Cette expression traduit la variation locale de la pente de la courbe de rupture. Mais cette formulation se heurte bien souvent à l'insuffisance de la discrétisation géométrique qui se traduit par $\alpha_{i-1} = \alpha_i$.

d. $d = \frac{R^2 \text{ local}}{R^2 \text{ général}}$

R local, le rayon de courbure calculé autour du point courant. R général est le rayon d'un cercle passant par les deux points d'entrée en terre de la courbe de rupture et le point milieu

(en abscisse) de cette même courbe. Si la courbe de rupture est un cercle on retrouve ainsi $d = 1$ pour toute la courbe ce qui facilite les comparaisons. Mais la remarque précédente est là aussi une limitation à l'emploi de cette expression.

4. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU CHOIX DES ÉQUATIONS DU SYSTÈME RÉSOLVANT PAR UNE MÉTHODE VARIATIONNELLE

4.1. But recherché

La simplification nécessaire des calculs quand ils étaient faits à la main, ou à l'aide de petites machines demandait des algorithmes sommaires que l'on obtenait par élimination, de certaines équations. C'est en fait une conséquence des hypothèses faites et non a priori un choix délibéré des équations.

Ainsi, la méthode de FELLENIUS n'utilise que l'équation de moment, celle que l'usage appelle la troisième équation de la statique.

La méthode de BISHOP utilise les équations 2 et 3 de la statique, l'équation de projection suivant x (équation 1) n'étant pas prise en compte. La méthode de TAYLOR n'utilise que les équations 1 et 2 de la statique.

Ce choix fait par les différents auteurs pour aboutir à une programmation – suite de la mise en équation du problème – simple a-t-il une grande importance sur le résultat? Chacun présentant sa méthode comme une bonne méthode nous allons à l'aide de la méthode variationnelle présentée ci-après fournir quelques éléments de réponse à la question ci-dessus.

4.2. Formulation générale

On se donne le long de la courbe de rupture une répartition de la contrainte normale σ_n suivant l'expression déjà étudiée.

$$\sigma_n = \sigma_0 (\lambda + \mu v)$$

où σ_0 est une répartition approchée, v un paramètre fonction de point et λ et μ deux scalaires inconnus que le calcul définira.

Le cisaillement τ est obtenu par la loi de Coulomb :

$$\tau = \frac{(\sigma_n - u) \text{tg}\phi' + c'}{F_\sigma d}$$

où u est la pression interstitielle connue en tout point, c' et ϕ' les paramètres de la loi de Coulomb, $F_\sigma d$ le coefficient de sécurité. Dans ce qui suit d sera toujours pris égal à 1.

Dans un petit volume dV_i autour du point M courant de la courbe de rupture une expression de l'énergie élastique peut être donnée par :

$$EN_i = \frac{\sigma_n^2 + \tau^2}{E} dV_i$$

où E est le module d'élasticité du sol autour du point M.

Pour pouvoir utiliser cette formulation on supposera un déplacement global, élastique avant la rupture.

En considérant un calcul plan, donc un sol d'épaisseur unité, on peut écrire $dV_i = e_i ds_i$, $1 = e_i \frac{dx_i}{\cos \alpha_i}$,

e_i est l'épaisseur de sol intéressé comptée perpendiculairement à la courbe de rupture, dans le plan de rupture comme le montre la figure 13.

Fig. 13. – Notations.

Pour calculer EN_i , il faut connaître E et e_i . Comme le calcul porte sur la minimisation de $\sum_i EN_i$, E peut

être défini à un facteur multiplicatif près et e_i sera pris égal à 1 dans ce qui suit. Moduler E en fonction de paramètres géotechniques pourrait être une étude intéressante, d'une mise en œuvre aisée avec l'outil développé, mais qui n'a pas été abordée dans le cadre de cet article. En gardant $e_i = 1$ pour tout i, il suffit donc de connaître pour un multicouche le rapport des modules entre les divers sols. Le programme de calcul qui permet la distinction des différents modules de sols n'a pas été utilisé avec cette possibilité puisque dans cette étude qui porte sur le

choix des équations résolvantes tous les modules ont été donnés égaux.

Les paramètres externes étant ainsi définis l'expression de l'énergie élastique le long de la courbe de rupture est une fonction de F_s , λ et μ .

Pour résoudre on se servira de :

- l'expression de l'énergie minimale, donc une équation différentielle,
- et de deux, parmi les trois équations de la statique.

Ce problème classique de minimisation sous contrainte se résout en introduisant les multiplicateurs de Lagrange.

Suivant le choix des deux équations de la statique on obtient trois calculs notés FOR 12, FOR 13, FOR 23 rappelant les équations utilisées. Le développement complet des calculs est dans l'ouvrage de Faure (1982). Avant de présenter les résultats de cette étude rappelons sa mise en œuvre.

5. MISE EN ŒUVRE

La mise en œuvre de cette étude est faite à l'aide du programme NIXES et TROLLS, FAURE (1974) dans sa plus récente version (FAURE, 1983). Le paramétrage des modes, présentés au paragraphe 3.2 (mode 1, 2 et 3), le choix de v (1 à 8) et le choix de d (1 à 4) et le choix des méthodes Perturbations – FOR 12 – FOR 13 – FOR 23 – font que ce programme dispose en non circulaire de 384 méthodes auxquelles il faut rajouter la méthode de Bishop modifiée LPC en rupture circulaire.

Le programme peut combiner les différents choix pour éviter à l'utilisateur la définition de chacune des méthodes, ceci pour une rupture non circulaire seulement.

Des sorties graphiques permettent d'obtenir les différents lobes des contraintes pour des comparaisons plus pertinentes.

Le niveau de dialogue de ce programme est très élevé, l'expérience de visualisation interactive faite avec VESTAL (FAURE et al. (1975)), a été intégrée dans un mode conversationnel agréable et cet outil est parfaitement adapté à toute étude de cas. Une extension intégrant les possibilités de clouage des sols est déjà opérationnelle (Faure et al. (1985)). C'est à la fois un outil de recherche et un outil d'études particulières.

Pour l'étude présente, deux talus ont été étudiés. Les figures 14, 15 et 16 en précisent la géométrie ainsi que celle des courbes circulaires et non circulaires étudiées. Il y a 19 courbes ainsi définies.

Toutes les méthodes de calcul n'ont pas été testées sur toutes les courbes et tous les lobes de contrainte dessinés, mais environ 10 000 calculs ont été faits et près de 1 000 lobes dessinés.

6. RÉSULTATS

Ils sont de deux sortes :

- Evaluation du meilleur choix des équations de la statique dans une méthode simplifiée. Cette évaluation peut apparaître inutile, les méthodes actuelles, grâce au calcul numérique et à l'ordinateur, vérifiant les trois équations de la statique, mais elle garde une valeur historique et confirme, le jugement donné par l'expérience sur les méthodes classiques.

- Choix des expressions de σ_0 , v et d , quand les trois équations de la statique sont vérifiées. C'est le point de départ du développement des perturbations vers les algorithmes formulant de nouvelles approches comme celles prenant en compte le clouage des sols ou certaines conditions sismiques.

6.1. Choix des équations de la statique

L'étude faite ici utilise un calcul variationnel pour comparer les choix possibles des équations nécessaires. Les résultats obtenus sont plus qualitatifs que quantitatifs. La remarque de LUCENO et CASTILLO (1981) sur la formulation incomplète du problème variationnel – dans une forme bien plus développée qu'ici – confirme que les minima obtenus ne sont pas des minima absolus.

Les constatations suivantes ont été faites.

- Des méthodes différentes peuvent fournir des coefficients F_s semblables bien que les lobes de contraintes soient très différents (et même certaines méthodes a priori acceptables ne donnent que des contraintes négatives). De cette remarque nous avons conclu que pour choisir une méthode le lobe des contraintes doit être exhibé et être un critère de choix.

- Trop de contraintes numériques se traduisant par des tests – par exemple remettre les contraintes négatives à zéro – conduisent à une programmation lourde et peu efficace et induisent des risques d'erreur. Dans la littérature ces problèmes sont évoqués sous le nom de convergence ce qui est impropre. Dans la méthode de Bishop, revue par le L.C.P.C., on évite à la contrainte de devenir infinie et on sait que les intégrales de la méthode de MORGENSTERN et PRICE doivent être lipschiziennes. Pour cette dernière méthode, FREDLUND et KRHAN (1979) proposent une autre approche plus stable.

On rejettera donc toute méthode comportant des limitations de certains de ses paramètres au cours des calculs.

La première remarque conduit à rejeter toute méthode basée sur les équations 1 et 3 de la statique, les lobes obtenus présentant une large partie de contraintes négatives. Cela peut s'expliquer par le fait que le poids des terres, principal moteur d'une rupture, n'est plus pris en compte de façon directe.

Pour les méthodes basées sur les équations 1 et 2

ou 1 et 3 de la statique, leur stabilité n'est pas assurée vis-à-vis du choix de v , et a un degré moindre de σ_0 .

Différents couples σ_0 et v peuvent conduire à des résultats semblables, particulièrement pour le coefficient de sécurité F_s , un peu moins pour le lobe des contraintes.

Ce choix du couple σ_0 , v , correspond à différentes méthodes proposées et par exemple pour les équations 1-2 mode = 1, $v = \tan \alpha$ est équivalent à mode = 2 et $v = \cos^2 \alpha$, alors que pour les équations 2-3, $v = \gamma h \cos^2 \alpha$ conduit à ces mêmes résultats quel que soit le mode.

En conclusion le choix – pour une méthode simplifiée – de deux équations de la statique au lieu de trois doit comporter l'équation deux, mais l'efficacité de la méthode dépend aussi d'hypothèses faites pour l'approximation de la contrainte. Cela confirme que l'on puisse utiliser les méthodes de TAYLOR et de BISHOP par exemple.

6.2. Choix des paramètres

On a vu qu'avec un nombre limité d'équations on peut trouver des méthodes conduisant à un résultat acceptable moyennant un choix judicieux d'un couple mode et expression de v .

DUCAN et WRIGHT (1981) affirment que toutes les méthodes vérifiant les trois équations de la statique sont équivalentes à 5 % près sur le coefficient de sécurité F_s . Avec $v = \tan \phi$, dans la méthode des perturbations nous avons trouvé des coefficients de sécurité anormalement élevés, alors que cette méthode apparaît stable pour les différents modes ou autres expressions de v testées.

Le choix pour σ_0 est le mode 3. C'est le plus complet car la seule hypothèse faite correspond à dire que la contrainte normale, mais pas forcément principale, sur une facette horizontale a pour valeur γh . Ce choix est confirmé par l'observation de la forme du lobe des contraintes qui rappelle celles que l'on trouve dans la littérature dans des études à partir des méthodes de type éléments finis. Une comparaison faite par J.P. RAJOT à l'Université de Berkeley a indiqué de plus une bonne correspondance des coefficients de sécurité.

Un critère qui sert aussi pour le choix de v est l'observation des valeurs que λ et μ peuvent prendre. La méthode idéale serait celle où nous aurions $\lambda = 1$, $\mu = 0$, ce qui traduit une perturbation minimale donc un bon choix de σ_0 . En fait pour le mode 3 de σ_0 , μ reste « petit » et de ce fait le choix de v n'est pas fondamental.

Cependant la stabilité de l'expression $v = \tan \alpha$ à travers toutes les méthodes testées conduit à proposer ce choix.

Fig. 14-15-16.

Fig. 17. — • Exemple de sortie graphique des lobes de contrainte.
 • Les numéros correspondent aux calculs référencés sur l'imprimante.
 • La courbe notée u correspond au lobe des pressions interstitielles.

RÉSUMÉ DU PROCESSUS DE CHOIX

On a :

- 4 méthodes notées 12 - 13 - 23 - 123
- 3 modes σ_0 notés 1, 2, 3
- 8 expressions de v
- 4 expressions de d .

Etape 1

Le choix de d est $d = 1$ car les trois autres expressions n'ont pas fourni de résultats interprétables.

Etape 2

L'obtention de lobes de contraintes négatives conduit à éliminer la méthode 13.

Etape 3

- La méthode 12 ne donne des résultats acceptables que pour les couples :

– mode = 1, $v = \tan \alpha$

– mode = 2, $v = \frac{x}{h}$

- La méthode 23 ne donne des résultats acceptables

que pour $v = \frac{x}{1} \left(1 - \frac{x}{1} \right) \left(0,375 \frac{x}{1} \right)$

On ne retiendra les méthodes 12 et 23 que pour des choix particuliers des paramètres.

Etape 4

La méthode 123 est très stable par rapport à v sauf pour $v = \gamma h \cos^2 \alpha$.

Pour le mode 3, λ est voisin de 1, μ très petit en valeur absolue et $v = \tan \alpha$ fournit le lobe des contraintes le plus régulier.

A ce stade le choix est donc σ_0 suivant le mode 3, $v = \tan \alpha$ et $d = 1$.

Les extensions du programme NIXES et TROLLS sont faites avec ces expressions.

7. CONCLUSION

Cette étude a montré que pour un coefficient de sécurité acceptable, on peut obtenir un lobe de contrainte aberrant. Le lobe de contrainte doit être un élément du choix d'une méthode de calcul à la rupture car ces dernières se développent vers des applications comme l'étude des systèmes de confortation et posséder un bon état initial permettra de mieux juger l'influence du dispositif.

La méthode variationnelle présentée a montré que les approches simplifiées peuvent conduire à des résultats corrects, et la méthode des perturbations, sa grande souplesse à s'adapter à des concepts nouveaux comme le choix du mode 3 pour la valeur de σ_0 . Les variations envisagées avec le paramètre d n'ont pas donné de résultats probants, les comparaisons étant délicates.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à exprimer ses remerciements à la Division Gestion et Télématic du C.E.T.E. de Lyon qui a financé ces calculs et à M. LARE Kamba, ingénieur des Travaux Publics du Togo pour l'aide qu'il lui a apportée dans la comparaison et le choix des méthodes.

Le programme NIXES et TROLLS qui possède tous ces algorithmes automatisés devrait connaître un grand développement.

BIBLIOGRAPHIE

- BAKER R., GARBER M. – *Theoretical analysis of slopes*, Géotechnique 28, n° 4, 1978.
- DUNCAN J.M., WRIGHT S.G., – *The accuracy of the equilibrium methods of slope stability analysis*. Proc. int. symp. ou Landslides – 1982 – New Delhi. Vol. 1, pp. 247-254.
- FAURE R.M., MOUROUX P., RAJOT J.P., – *Prise en compte des actions sismiques dans un programme de stabilité de pentes*. Actes du colloque de Génie Parasismique Paris – Janvier 1986.
- FAURE R.M., MOREAU F., GAURIAT P., GUENIOT Y., – *Application de la visualisation interactive aux calculs de stabilité de pentes : le programme VESTAL*, Bull L.P.C., n° 78, 08-1975.
- FAURE R.M., MAGNAN J.P., MOREAU M., PILOT G., – *Calcul sur ordinateur des ouvrages en terre*. Revue Générale des Routes et Aéroports n° 523, 09-1976.
- FAURE R.M., – *Outils numériques en Mécanique des Sols, application aux stabilités de pentes*. Thèse présentée à Paris VI, mars 1982.
- FAURE R.M., RAJOT J.P., – *Le système NIXES et TROLLS*. Doc. E.N.T.P.E., 1985.
- FREDLUNG D.G., KRAHN J., – *Comparison of slopes stability methods of analysis*. Canadian Geotechnical Journal vol. 14.3, 08-1977.
- CASTILLO E., LUCENO A., – *A critical analysis of some variational methods in slope stability analysis*. Int. Jour. for Num. and An. Meth. In Geomechanics 6,2, 195-209, 1982.
- RAULIN P., ROQUES G., TOUBOL A., – *Calcul de la stabilité des pentes en rupture non circulaire*. Rapport de recherche L.P.C., n° 36, 06-1974.