

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 95 (1969)
Heft: 20

Artikel: Stabilité des talus et ordinateur
Autor: Dysli, M. / Vaisy, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-70249>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPFL (Ecole polytechnique
fédérale de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPFZ (Ecole poly-
technique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève

Membres:

Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; M. Mozer, arch.; J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »

Président: D. Bonnard, ing.

Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; M. Cosan-
dey, ing.; A. Métraux, ing.; A. Rivoire, arch.; J.-P. Stucky,
ing.

Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION

F. Vermeille, rédacteur en chef; E. Schnitzler, ingénieur, et
M. Bevilacqua, architecte, rédacteurs
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 46.—	Etranger	Fr. 50.—
Sociétaires	»	» 38.—	»	» 46.—
Prix du numéro	»	» 2.30	»	» 2.50

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »
N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie
La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 495.—
1/2 »	» 260.—
1/4 »	» 132.—
1/8 »	» 68.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.

Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales



SOMMAIRE

Stabilité des talus et ordinateur, par M. Dysli, ing. civil EPUL et J. Vaisly, ing. civil EPF.
Contrôle du dosage en ciment du béton, par Arthur Nyffeler, ing. civil dipl. EPUL.
Nécrologie: Alfred Stucky. — Bibliographie. — Divers.
Documentation générale. — Informations diverses.

STABILITÉ DES TALUS ET ORDINATEUR

par M. DYSLI, ing. civil EPUL et J. VAISLY, ing. civil EPF, à la Société Générale pour l'Industrie, Genève

1. Préambule

Les problèmes de stabilité des pentes sont parmi les plus délicats qui se présentent à l'ingénieur, en raison :

- des caractéristiques des sols souvent mal connues ; en effet, leur détermination ne peut être entreprise que sur une fraction infime du volume dont la stabilité est à étudier,
- de l'anisotropie des sols,
- de l'évolution des caractéristiques des sols dans le temps et en fonction des déformations,
- des conditions hydrologiques difficiles à connaître et variant, parfois dans une très forte mesure, au cours du temps.

Et pourtant, l'ingénieur est rendu responsable de la stabilité du talus ou de la digue qu'il projette, ou encore de l'avis qu'il donne sur celle d'un talus naturel.

Pour déterminer cette stabilité, il a à sa disposition plusieurs méthodes qui schématisent plus ou moins bien le processus naturel de la rupture. Les plus connues sont décrites sommairement ci-après. Certaines des plus récentes seront ensuite étudiées plus en détail ainsi que leur application sur ordinateur.

Seules les méthodes vont faire l'objet de notre propos ; nous allons, intentionnellement, éviter la discussion sur le choix des caractéristiques des sols (en particulier, contraintes totales ou effectives) et des coefficients de sécurité.

2. Méthodes de calcul

2.1 Méthodes globales (fig. 1)

Ces méthodes consistent à étudier l'équilibre global du solide limité par le talus et la surface de glissement, dont la directrice est le plus souvent une droite, un cercle ou une spirale logarithmique.

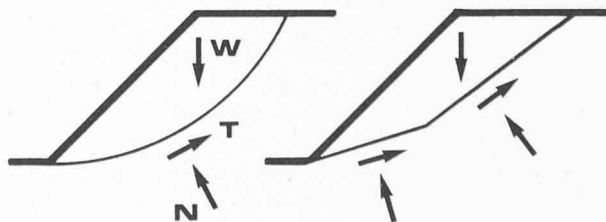


Fig. 1. — Méthodes globales

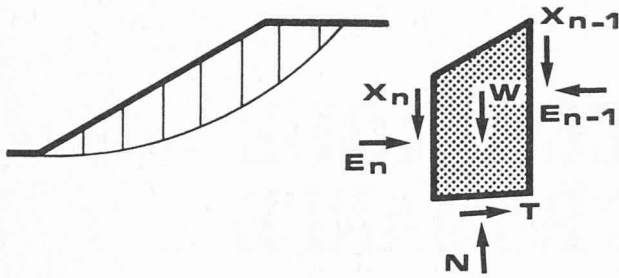


Fig. 2. — Méthodes des tranches.

Elles sont encore assez fréquemment employées pour déterminer, par exemple, la stabilité d'un mur de soutènement ou d'un talus dont la géométrie est simple. On doit ces méthodes, en particulier, à Coulomb, Bousinesq, Poncelet, Rankine, Taylor et Rendulic [3], [4], [9]¹. Récemment, le professeur Kérisel a développé une méthode globale, qui utilise le cercle, en y introduisant la poussée d'écoulement d'une nappe phréatique et établi des tables pour la plupart des cas types possibles [7].

2.2 Méthodes des tranches (fig. 2)

Ce sont les méthodes, plus modernes, proposées par Fellenius, Bishop [2] et Janbu [6] et perfectionnées, en particulier, par Morgenstern et Price [8]. Elles supposent le prisme de rupture divisé en tranches et étudient l'équilibre de chacune de ces dernières. On tend de plus en plus à les utiliser, surtout depuis l'avènement des ordinateurs, car, si leurs principes sont simples, leur utilisation peut être extrêmement complexe du fait du nombre d'inconnues, donc d'équations qu'elles déterminent.

2.3 Méthodes des contraintes

On considère le talus comme un solide semi-infini ; on détermine les champs des contraintes principales dans ce solide, puis on compare ces dernières, en chaque point, avec la résistance du terrain. Pratiquement, seule une approche au moyen de la méthode des éléments finis est réalisable et elle requiert l'usage d'un ordinateur. Dans ces méthodes, la forme de la surface de glissement est inconnue du problème et il faut noter que l'on peut y introduire n'importe quelle loi de déformation des matériaux. L'usage de telles méthodes nécessite une certaine expérience, notamment dans la décomposition en éléments finis [1], [5], [12].

3. Méthodes des tranches

3.1 Introduction

On tend donc, de plus en plus aujourd'hui à utiliser ces méthodes qui s'adaptent bien au calcul automatique. Cependant, elles ne devraient pas écarter, lorsque la géométrie du talus est simple ou lorsque les caractéristiques des sols sont mal connues, des méthodes comme celle de la spirale logarithmique ou l'usage de tables comme celles de Taylor ou de Kérisel.

Elles consistent à définir une surface de glissement, à diviser le volume ainsi déterminé en tranches à faces

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

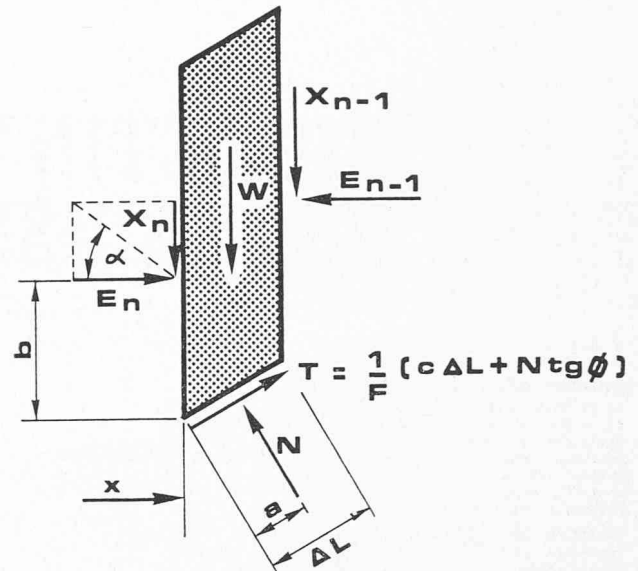


Fig. 3. — Forces sur une tranche.

verticales et à établir les conditions d'équilibre de chaque tranche (fig. 3). Malheureusement, ce procédé, si on l'applique d'une manière rigoureuse, détermine pour n tranches $(5n - 2)$ inconnues et seulement $3n$ équations d'équilibre ; le problème est donc statiquement indéterminé. Il faut éliminer cet excédent d'inconnues, soit en introduisant des relations contrainte-déformation (méthode des *contraintes*), soit en introduisant des hypothèses simplificatrices (Bishop simplifiée, Fellenius et Janbu), soit encore en utilisant une méthode proche de la programmation linéaire (Morgenstern et Price).

3.2 Méthodes de Bishop simplifiée et de Fellenius (fig. 4)

Ces deux méthodes admettent, comme hypothèse simplificatrice, que les interactions entre les tranches sont égales et opposées.

Dans la méthode de Fellenius, la droite de projection est perpendiculaire à la surface de glissement et dans celle de Bishop, cette droite est verticale.

Le calcul des coefficients de sécurité au moyen de ces deux méthodes est exposé sur la figure 4.

La pratique et les comparaisons avec des méthodes plus précises ont montré que ces hypothèses étaient admissibles si la surface de glissement est cylindrique et ceci surtout pour la méthode de Bishop ; en effet, le coefficient de sécurité obtenu avec cette dernière méthode ne diffère que de quelques pourcents de celui obtenu par la méthode de Morgenstern et Price, qui passe pour la plus rigoureuse. En revanche le coefficient de sécurité déterminé par la méthode de Fellenius est inférieur à celui obtenu par la méthode de Bishop. Nous allons comparer plus en détail ces trois méthodes à la fin de cet article ; cependant, il est important de signaler dès maintenant, qu'en présence d'une nappe phréatique, l'hypothèse simplificatrice de Bishop et Fellenius annule la projection horizontale de la poussée d'écoulement ($\gamma_w \sin \lambda$, λ étant la pente de la nappe phréatique) et cela n'est pas toujours admissible !

3.3 Méthode de Morgenstern et Price

Morgenstern et Price ont développé une méthode qui

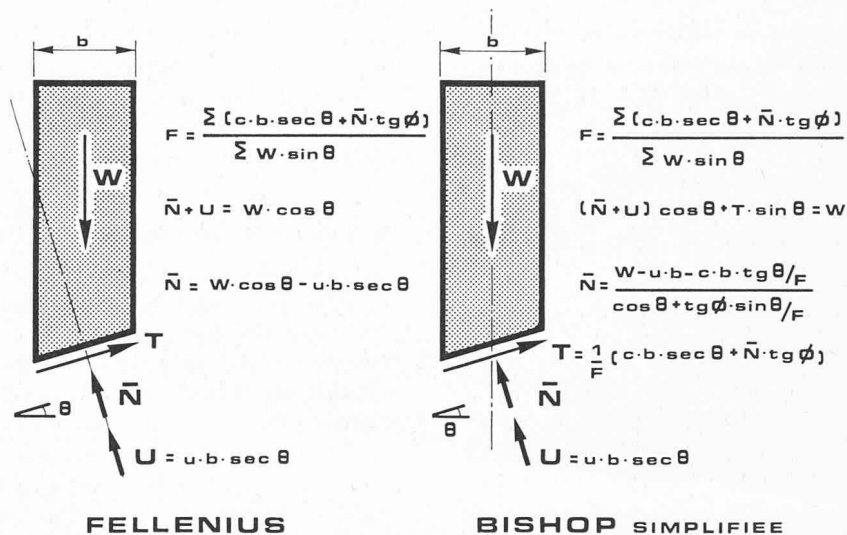


Fig. 4. — Méthodes de Fellenius et Bishop simplifiée.

tient compte des réactions entre chaque tranche et qui est applicable à n'importe quelle ligne de rupture (circulaire et non circulaire). Dans le système indéterminé d'équations — $(5n - 2)$ inconnues pour $3n$ équations, donc $(2n - 2)$ inconnues de trop, n étant le nombre des tranches — l'indétermination est levée par une première hypothèse simplificatrice négligeant l'épaisseur des tranches ($a = 0$). Il reste alors $(4n - 2)$ inconnues pour $3n$ équations donc $(n - 2)$ inconnues de trop.

Cette dernière indétermination est levée par la définition de la fonction $f(x) = \frac{1}{K} \cdot \frac{X(x)}{E(x)}$ qui réduit le nombre des inconnues de $(n - 1 - 1) = (n - 2)$, le dernier 1 correspondant à la nouvelle inconnue K .

Il reste donc $3n$ équations pour $3n$ inconnues.

Dans cette méthode, l'ingénieur doit choisir, par tâtonnement et en fonction de son expérience, la forme de la fonction $f(x)$, qui donne la sécurité minimum (fig. 5).

3.4 Méthode de Janbu

Janbu, par une approche différente de celle de Bishop, soit entre autres en projetant sur une horizontale les forces équilibrant chaque tranche, obtient, lorsqu'il néglige les réactions entre chaque tranche, un coefficient de sécurité identique à celui de la méthode de Bishop simplifiée.

Il propose aussi de tenir compte des réactions latérales en corrigeant ce facteur de sécurité par un coefficient f_0 ou en introduisant ces réactions analytiquement dans le calcul ; il admet alors que leur trajectoire passe par le tiers inférieur des tranches. Ceci lui permet de prendre en considération une surface de rupture non circulaire.

4. Utilisation de l'ordinateur

4.1 Généralités

Toutes les méthodes énoncées ci-dessus peuvent être adaptées au calcul automatique ; cependant, seules les méthodes relativement précises des tranches et des contraintes peuvent, à notre avis, l'être avantageusement.

Nous n'aborderons pas ici les applications sur ordinateur des méthodes des contraintes, pour lesquelles nous renvoyons le lecteur à la documentation existante [1], [5], [12].

L'analyse et la programmation pour l'ordinateur des méthodes de Fellenius, Bishop, Morgenstern et Price sont simples dans leurs principes, mais offrent d'assez grandes difficultés lorsque l'on veut tenir compte de tous les cas particuliers de la géométrie du talus ou de la ligne de glissement dans la méthode de Morgenstern et Price : plusieurs masses de glissement pour un même cercle, immersion partielle ou complète, etc., etc. La très grande vitesse de calcul des ordinateurs permet, en particulier pour les méthodes de Fellenius et de Bishop simplifiée, de déterminer automatiquement le centre et le rayon du cercle donnant le coefficient de sécurité minimum.

4.2 Programme pour les méthodes de Bishop simplifiée et Fellenius

A titre d'exemple, nous allons décrire ci-dessous les possibilités d'un programme élaboré par les auteurs sur le petit ordinateur IBM 1130 8 K de la Société Générale pour l'Industrie, qui se sont inspirés du programme LEASE du MIT (ICES — integrated civil engineering system) [11]. Ce programme permet de traiter des talus dont les caractéristiques sont les suivantes :

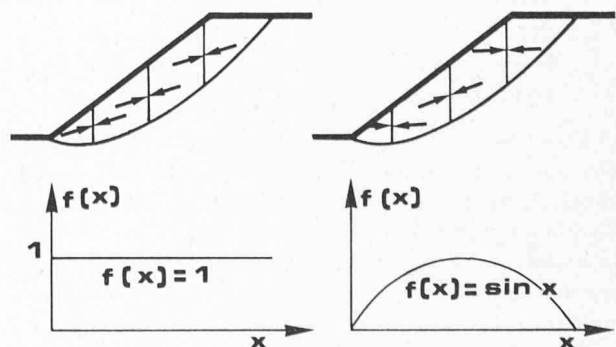


Fig. 5. — Fonctions $f(x)$ (Morgenstern et Price).

- 10 sols différents ;
- environ 100 tranches au maximum ;
- ligne de surface et nappe phréatique quelconques définies réciproquement par 100 et 10 points au maximum.

Le programme offre la possibilité de tenir compte ou non de la poussée d'écoulement de l'eau et de forces horizontales extérieures. On peut l'utiliser avec les trois modes d'investigation suivants :

- calcul pour des centres et des rayons de cercles définis par l'utilisateur ;
- recherche du coefficient minimum de sécurité pour des cercles dont les centres sont situés sur une grille définie par l'utilisateur et dont les rayons critiques sont déterminés par l'ordinateur ;
- recherche entièrement automatique du coefficient de sécurité minimum ; l'utilisateur fixe alors un point de départ et un accroissement fini ; le centre se déplacera automatiquement horizontalement et verticalement de la valeur d'un accroissement, et pour chaque centre le rayon donnant le coefficient de sécurité minimum est recherché par le programme. En toute franchise, les auteurs doivent reconnaître que l'ordinateur utilisé convient assez mal pour ce troisième mode d'utilisation à cause de la faible capacité de la mémoire centrale qui exige des recours trop fréquents à la mémoire périphérique (disque magnétique), d'où un temps de calcul beaucoup trop long.

Les résultats sont les valeurs des coefficients de sécurité obtenus par la méthode de Bishop simplifiée et par la méthode de Fellenius, soit pour chaque cercle calculé avec en fin de calcul la répétition du coefficient minimum, soit seulement pour le cercle donnant le coefficient minimum, ainsi que divers renseignements sur la géométrie des cercles étudiés.

4.3 Programme pour la méthode de Morgenstern et Price

L'exemple ci-dessous provient aussi de la bibliothèque des programmes de la Société Générale pour l'Industrie. Les talus pouvant être étudiés par ce programme ont les mêmes caractéristiques géométriques que ceux du programme précédent, mais la surface de glissement peut avoir une forme quelconque qui doit cependant être appréciée par l'utilisateur, comme du reste la fonction $f(x)$. Les résultats obtenus sont :

- pour chaque tranche, la position de la résultante des réactions latérales ;
- le coefficient de sécurité pour la surface de glissement choisie.

A ce stade, l'ingénieur doit vérifier si les résultats obtenus sont raisonnables. Par exemple, un mauvais choix de la fonction $f(x)$ peut déterminer une ligne d'action des forces horizontales qui tombe en dehors de la masse de glissement, ou des contraintes relatives à ces dernières forces qui dépassent la résistance admissible du sol. L'étude des résultats obtenus avec de tels critères permet d'éliminer toutes les solutions qui ne satisfont pas à la statique.

En général, pour différentes hypothèses de $f(x)$ donnant des résultats satisfaisant aux critères de grandeur et de position des forces horizontales, on trouvera des coefficients de sécurité qui sont pratiquement les mêmes, ceci bien entendu pour une même surface de glissement.

5. Application des différentes méthodes

Lorsqu'un cas pratique d'étude de stabilité de talus se présente à l'ingénieur, quelle méthode doit-il utiliser ? On serait tenté de répondre : la plus perfectionnée, soit la méthode de Morgenstern et Price avec le plus grand nombre possible de surfaces de glissement différentes. En procédant ainsi dans tous les cas, l'ingénieur accumulera les frais d'ordinateur, qui sont loin d'être négligeables, et passera des journées entières à analyser les résultats de chaque cas étudié pour enfin obtenir un coefficient de sécurité dont il ne pourra, le plus souvent, garantir la valeur.

Avant d'aller plus loin dans cette thèse, illustrons-la par un petit exemple (fig. 6). Il s'agit d'un talus sans nappe phréatique avec trois sols dont les caractéristiques géotechniques ne sont pas très bien connues. Pour le cercle décrit sur la figure, les résultats extrêmes obtenus par le recours aux méthodes de Bishop simplifiée et de Fellenius sont les suivantes :

Bishop simplifiée	Fellenius
2,184	1,785
1,693	1,376

Nous entendons par résultats extrêmes ceux obtenus par les combinaisons les plus défavorables, réciproquement les plus favorables des caractéristiques des sols. Pour la méthode de Bishop simplifiée, la sécurité maximum est ainsi environ 30 % supérieure à la sécurité minimum !

Nous soulevons, par cet exemple, tous les problèmes relatifs aux coefficients de sécurité en mécanique des sols, mais cela n'est pas l'objet de notre propos. Nous avons voulu seulement démontrer qu'il y a un genre de méthode pour chaque cas et que des méthodes qui peuvent paraître simplistes, ou l'usage d'abaques tels

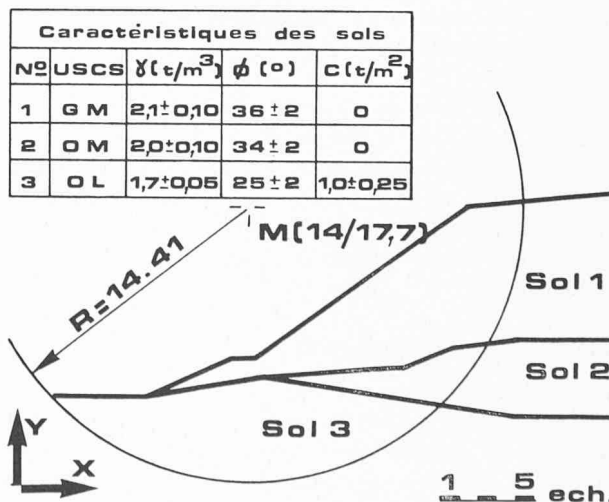


Fig. 6. — Talus de l'exemple.

LISTE DES DONNEES

NO.	X-GAUCHE	Y-GAUCHE	X-DROITE	Y-DROITE	PEITE SOL
1	4.40	8.41	9.40	6.41	0.0000 3
2	9.40	8.41	13.72	8.34	0.4588 1
3	13.72	8.24	14.60	8.24	0.0000 1
4	14.60	8.24	23.40	14.60	0.0700 1
5	23.40	14.60	30.48	23.40	0.1104 1
6	30.48	14.60	34.80	23.40	0.1500 2
7	34.80	14.60	38.31	23.40	0.1986 2
8	38.31	14.60	41.82	23.40	0.2460 2
9	41.82	14.60	45.33	23.40	0.2933 2
10	45.33	14.60	48.84	23.40	0.3400 2
11	48.84	14.60	52.35	23.40	0.3866 2
12	52.35	14.60	55.86	23.40	0.4333 2
13	55.86	14.60	59.37	23.40	0.4800 2
14	59.37	14.60	62.88	23.40	0.5266 3

NO.	COORDONNEES DES POINTS DONNES (LIGNE DE SURF. SEPAR. DES COUCHES)
1	4.88 8.41
2	9.40 8.41
3	13.72 8.24
4	14.60 8.24
5	23.40 14.60
6	30.48 14.60
7	34.80 14.60
8	38.31 14.60
9	41.82 14.60
10	45.33 14.60
11	48.84 14.60
12	52.35 14.60
13	55.86 14.60
14	59.37 14.60

NO.	COORDONNEES DES SEGMENTS ET DU SOL SOUS EAU
1	1 2 3
2	2 3 4
3	3 4 5
4	4 5 6
5	5 6 7
6	6 7 8
7	7 8 9
8	8 9 10
9	9 10 11
10	10 11 12
11	11 12 13
12	12 13 14
13	13 14 15

NO.	DATA	CLAR	TANPHISAR	BU	SC
1	2.000	0.400	0.701	1.10	0.00
2	1.600	0.400	0.720	1.10	0.00
3	1.600	1.000	0.600	1.10	0.00

LISTE DES SEGMENTS

N.B. LES 3 PREMIERS SEGMENTS DOIVENT REPRESENTER LA SURFACE DU TALUS DE GAUCHE A DROITE, IL NE DOIT PAS AVOIR DE LIGNES VERTICALES

Fig. 7. — « Output » du programme BISHOP.

que ceux de Taylor, sont tout à fait suffisants pour déterminer la stabilité d'un talus de forme simple et dont les caractéristiques géotechniques ne sont pas très bien connues, un talus de route par exemple. Le coefficient de sécurité devrait alors être relativement élevé ; si ce n'est pas le cas, il faudra, après une petite étude économique, soit modifier la forme du talus, soit déterminer de façon plus précise les caractéristiques et la géométrie des sols et alors utiliser une méthode d'investigation plus perfectionnée.

Le cas des talus artificiels (par exemple digues en terre) est tout différent. Les caractéristiques des sols sont généralement bien connues et le coût de leur mise en œuvre est relativement élevé ; le calcul le plus précis possible se justifie alors absolument.

Un troisième cas doit encore être mentionné, c'est celui des glissements de terrain d'une certaine importance dont la surface de glissement a été reconnue. Dans ce cas, un calcul au moyen de la méthode de Morgenstern et Price est tout à fait approprié. Il faudra alors déterminer les valeurs des caractéristiques des sols impliqués dans le glissement pour une sécurité légèrement inférieure à 1, ceci généralement en fonction d'un diagramme $\phi = f(c)$, et trouver un moyen matériel pour augmenter cette sécurité.

Signalons encore qu'une vérification de la stabilité aux tremblements de terre est souvent nécessaire et que l'ingénieur dispose à cet effet de la méthode conventionnelle dite « pseudo-statique », où l'effet du tremblement de terre est simulé par des forces horizontales $k \cdot W$, k étant le coefficient sismique, ou de la méthode dynamique développée par Newmark [13], qui permet une étude beaucoup plus rigoureuse.

Enfin, lors de toute analyse de stabilité, l'ingénieur doit se rappeler que le calcul se fait à deux dimensions, alors qu'en réalité, l'effet de la troisième dimension est

souvent important, et que le coefficient de sécurité est plutôt un coefficient d'expérience qui permet des comparaisons entre diverses surfaces de rupture ou projets.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. BENDEL : *Die Berechnung von Spannungen und Verschiebungen in Erddämmen*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau, Zurich, n° 55, 1962.
- [2] A. W. BISHOP and N. R. MORGENSTERN : *Stability coefficients for earth slopes*. Géotechnique, décembre 1960.
- [3] BRINCH HANSEN/LUNDGREN : *Hauptprobleme der Bodenmechanik*. Springer Verlag 1960.
- [4] A. CAQUOT et J. KÉRISEL : *Mécanique des sols*. 4^e édition, 1966.
- [5] R. W. CLOUGH and R. J. WOODWARD : *Analysis of stresses and displacements in embankments and foundations*. ASCE Conference on the stability of slopes and embankments 1966.
- [6] N. JANBU : *Application of composite slip surfaces for stability analysis*. Proc. conf. stability, vol. III, Stockholm 1954.
- [7] J. KÉRISEL et SIMECSOL : *Glissements de terrains*. Dunod, Paris 1967.
- [8] N. R. MORGENSTERN et V. E. PRICE : *The analysis of the stability of general slip surfaces*. Géotechnique, vol. 15, 1965, pp. 79-93.
- [9] K. TERAGHIZ et R. B. PECK : *Mécanique des sols appliquée*. Dunod, Paris, 5^e édition, 1965.
- [10] D. W. TAYLOR : *Soil mechanics*. John Wiley Sons, New York, 6^e édition, 1967.
- [11] R. V. WHITMAN and W. A. BAILEY : *Use of computers for slope stability analysis*. Journal of the soil mechanics and foundation division of the American Society of Civil Engineers, July 1967.
- [12] ZIENKIEWICZ : *The finite element method in structural and continuum mechanics*. Mc Graw-Hill, London 1967.
- [13] N. M. NEWMARK : *Fifth Rankine Lecture, Effect of Earthquakes on Dams and Embankments*. Géotechnique, vol. 15, 1965, pp. 139-159.

Adresse des auteurs :
M. Dysli et J. Vaisy, Société Générale pour l'Industrie,
71, avenue Louis Casaï, 1216 Cointrin-Genève.