Géologie Alpine, t. 47, 1971, p. 5 24

Les problèmes posés par la stabilité des pentes dans les régions montagneuses

par Pierre ANTOINE *, Jean BIAREZ **, Pierre DESVARREUX * et Jean-Pierre MOUGIN *

RÉSUMÉ. — Le développement rapide des aménagements actuels de la montagne (stations de sports d'hiver, routes, etc.) conduit de plus en plus à implanter divers ouvrages sur des pentes naturellement peu stables, dont l'instabilité est accrue par les travaux humains.

Après avoir examiné le problème mécanique théorique de la stabilité des pentes, les auteurs distinguent trois sortes de pentes et exposent la meilleure façon de se comporter face à elles :

— Si une pente est en mouvement, quels sont les critères du mouvement, comment se produit-il, comment arrive la rupture, quels sont les moyens à mettre en œuvre pour la surveillance et comment évaluer le risque ?

— On décrit ensuite les phénomènes de glissements anciens stabilisés, les conséquences qu'ils peuvent entraîner pour l'aménagement de telles pentes et la façon de les aborder ;

— Enfin, placé devant une pente qui semble stable, comment évaluer la modification de sa stabilité en fonction des différentes modifications que l'homme est susceptible de lui apporter ; on décrira une méthode de calcul simplifiée du coefficient de sécurité à partir de et en corrigeant la méthode de Fellénius.

Dans un dernier paragraphe, on envisagera succinctement les moyens de remédier aux phénomènes d'instabilité des pentes.

SUMMARY. — In the present days the speedy development of urbanisation in the mountainous areas, especially in the French Alps (winter sport resorts, highways...) more and more leads to locate various engineering works and buildings on slopes, of which, in natural conditions, the stability rate is low, and the stability of which very often increases with human activity.

After a theoretical examination of slope stability problems from a mechanical point of view, the authors distinguish three kinds of slopes and they explain the best way to solve the problem they set :

— First, when a slope is moving, what are the criteria characterizing the movement, how dces the movement arise, how does it lead to failure, which are the best means to be employed for watching over the displacements and how to evaluate the risk ?

— Secondly, the « ancient landslides » (i. e. those which have occured during the quaternary period), but have more or less stabilized in the present days, are discribed as well as the consequences that their occurence may entail relatively to civil engineering works on such slopes ;

— Finally some considerations are made on the subject of the slopes which stability seems to be guaranteed ; how is it possible to evaluate human activity brings to it ; a simplified computation method for obtaining the safety factor from Fellenius method is described.

In a last paragraph, the various means to be used for stabilizing the slopes are briefly reviewed.

* Institut Dolomieu, rue Maurice Gignoux, Grenoble.

** Laboratoire de Mécanique des Sols, Domaine Universitaire, 38 - Saint-Martin-d'Hères.

AVANT-PROPOS.

Les manifestations de l'instabilité des versants dans les régions montagneuses ont attiré depuis longtemps l'attention des naturalistes et particulièrement des géologues. Dans la plupart des cas, l'échelle des manifestations fossiles dépasse singulièrement ce qu'il nous est possible d'observer à l'heure actuelle dans nos régions alpines, mis à part quelques catastrophes de caractère exceptionnel comme par exemple le glissement du Vajont et les glissements provoqués par les séismes récents du Chili et du Pérou. A ce titre elles peuvent être considérées comme un facteur structural au même titre que d'autres (d'origine tectonique), ainsi que l'a montré récemment par exemple C. KERCKHOVE (1969) à propos de l'énorme glissement de Jausiers dans la vallée de l'Ubaye.

Un certain nombre d'articles généraux ont été consacrés par le passé à cette question importante parmi lesquels, pour les régions nous concernant, et à titre d'exemple, nous pouvons citer : A. HEIM (1932), J. GOGUEL (1937), L. MORET (1945). A l'étranger la question de la stabilité des pentes fait l'objet d'études très actives notamment aux Etats-Unis, en U.R.S.S., en Norvège, au Japon, en Angleterre, en Tchécoslovaquie, etc. (voir à ce propos la partie bibliographique des thèses de J.-P. BOMBARD et de P. DESVARREUX).

Historiquement ce sont donc les géologues qui, seuls, dans la plupart des cas, ont abordé l'étude des mouvements de versants. Naturalistes par formation, ils se sont attachés à la description des effets, beaucoup plus qu'à la compréhension de la cause des mouvements. La conséquence de cet état de fait fut une floraison de classifications fondées sur des critères extrêmement variables dépendant par exemple soit de l'origine géographique de l'auteur (donc des exemples qu'il était à même de fournir), soit de sa tournure d'esprit ou de sa formation. Cet état de choses n'allait pas sans compliquer la tâche de ceux qui, ultérieurement, tentèrent de simplifier quelque peu tout cela.

Malgré ces imperfections, il était possible de dégager statistiquement un certain nombre de facteurs d'origine géologique dont le rôle était prépondérant dans l'affaiblissement de la stabilité des pentes, notamment la lithologie, la structure (pendage, fissuration), ainsi que la présence d'eau. Cette accumulation de données d'observation, purement descriptives, ou bien interprétées de façon peu approfondie, ne permettait pas d'approcher l'étude du mouvement en tant que tel, c'est-à-dire d'aborder le problème sous son aspect mécanique.

Sur le plan français et même plus strictement alpin, l'initiative d'appliquer la logique mécanique à l'étude des mouvements de terrains revint à l'un d'entre nous (J. B.). La perspective ainsi ouverte permettait d'une part d'envisager la classification en laissant de côté les multiples effets d'une même cause, d'autre part, connaissant mieux les lois du mouvement, d'espérer accroître l'efficacité des remèdes possibles, voire même estimer l'importance du danger.

Ainsi peu à peu, sur le plan grenoblois, grâce à une collaboration entre les disciplines mécaniques et géologiques, un certain nombre de recherches ont permis de se faire une idée plus exacte du phénomène. La présente note a pour but de faire le point de quelques résultats récents, d'en dégager des indications pratiques et de replacer les études en cours dans le contexte régional actuel.

I. — Importance pratique des études entreprises.

A) *Les enseignements du passé et de l'époque actuelle.*

Aborder à l'heure actuelle dans les Alpes et, de façon générale, le problème de la stabilité des pentes revient à faire converger la connaissance scientifique et le fait divers. Une série de catastrophes présentes à toutes les mémoires a en effet sensibilisé l'opinion publique et rappelé cruellement que les réactions de la nature aux entreprises humaines sont parfois redoutables. Nous rappellerons trois exemples très différents survenus dans la dernière décade :

— le glissement du Plateau d'Assy (16 avril 1970) où le sanatorium du Roc des Fiz fut balayé par une coulée terreuse issue du glissement d'un revêtement morainique (voir photo n° 1) ;

— les coulées boueuses de Pontamafrey qui trouvent leur origine dans un gigantesque glissement affectant le versant ouest de la montagne du Coin du Châtel en Maurienne ; ce

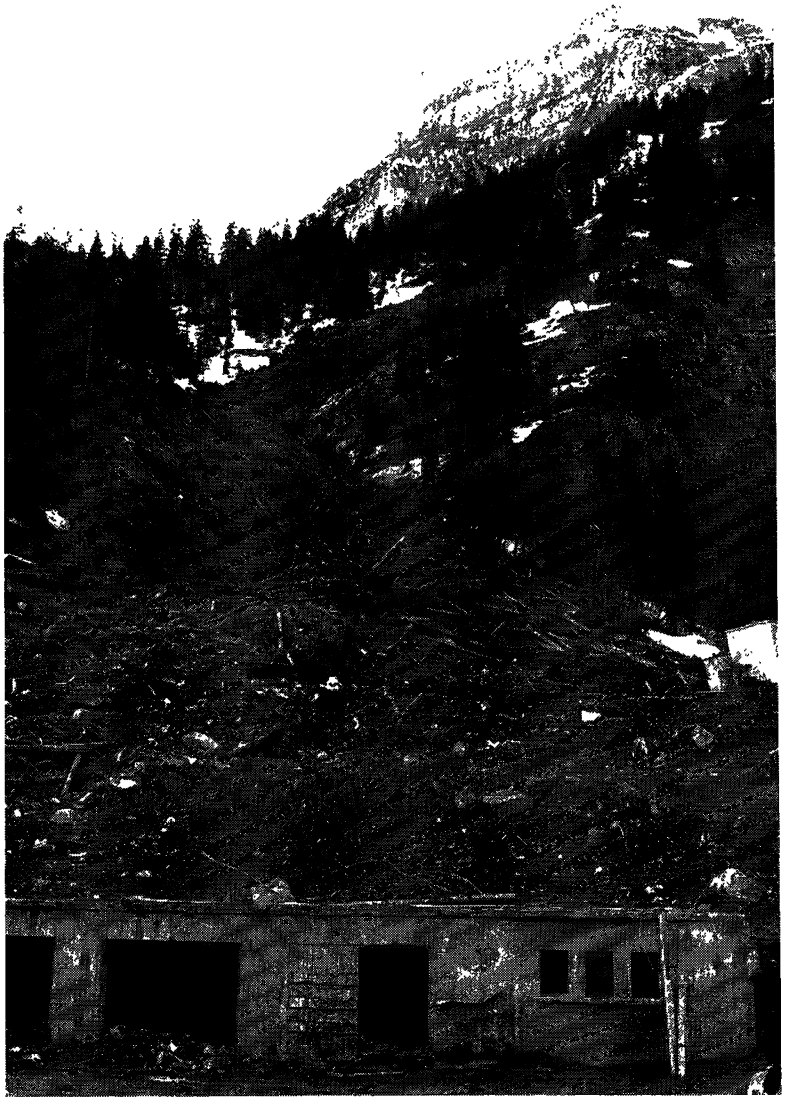

PHOTO n° 1. — Glissement du Plateau d'Assy.

Exemple de mouvement localisé évoluant en coulée à grande vitesse et dont l'effet destructeur peut se comparer à celui d'une avalanche ; la zone de départ (couverture d'altération d'un versant marneux) est située en haut et à droite (invisible sur la photo), et la masse en mouvement a emprunté un couloir naturel au débouché duquel se trouvaient les bâtiments détruits.

(*Cliché P. Antoine.*)

dernier phénomène, s'il n'a pas causé de victimes, a fortement perturbé l'activité dans la vallée de l'Arc (coupure de la R. N. 6 vers l'Italie et de la voie ferrée Paris - Turin) (voir photo n° 2) ;
le gigantesque glissement du versant nord du Mont Toc dans la retenue du Vajont en Italie du Nord (9 octobre 1963), responsable indirect de l'anéantissement du village de Longarone (voir photo n° 3).

Les deux premiers exemples relèvent de causes naturelles, le dernier en revanche illustre l'incidence fâcheuse des travaux entrepris par l'homme (fluctuation du plan d'eau de la retenue de Vajont).

Si les phénomènes d'origine purement naturelle sont souvent difficiles à prévoir, les risques résultant de l'activité humaine peuvent souvent être pressentis sinon prévus exactement.

B) *Estimations pour le futur.*

Le développement futur de la civilisation dite des loisirs entraîne, en ce qui concerne la région alpine, la transformation en terrains de jeu de régions entières de montagnes qui étaient en voie de dépeuplement. Ceci conduit à une urbanisation

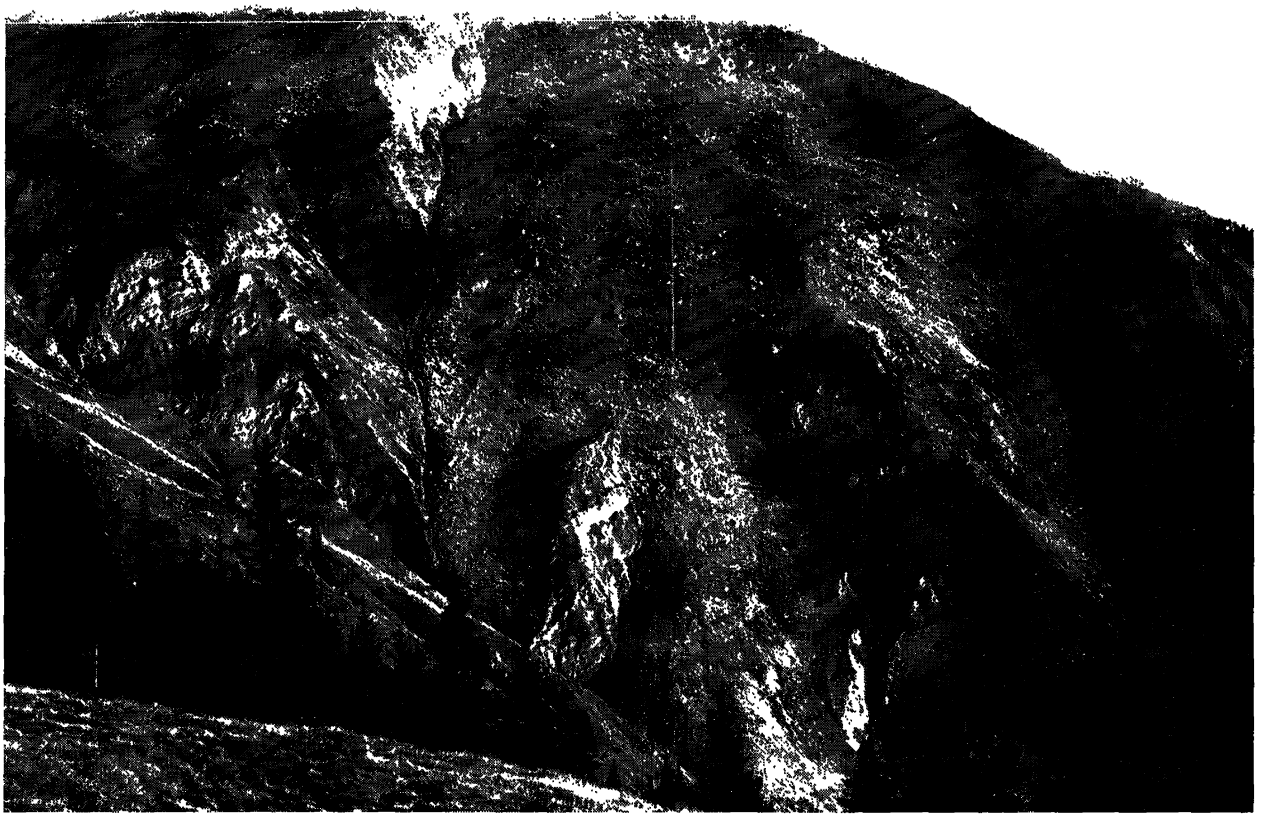

PHOTO n° 2. — Glissement du versant ouest de la Montagne du Coin du Chatel (origine des coulées de Pontamafrey en Maurienne).

La partie supérieure du versant appartient à la zone du Flysch des Aiguilles d'Arves (charriée) et repose sur les terrains autochtones de la Zone Dauphinoise par l'intermédiaire d'un épais niveau de gypse dont certains témoins sont visibles dans la partie inférieure de la photo (affleurement blanc). Il est probable que des phénomènes de dissolution du gypse sont à l'origine de la rupture d'équilibre du versant. L'évolution est particulièrement rapide puisque, il y a une vingtaine d'années, le versant était indemne et boisé et portait une maison forestière. (*Cliché P. Antoine.*)

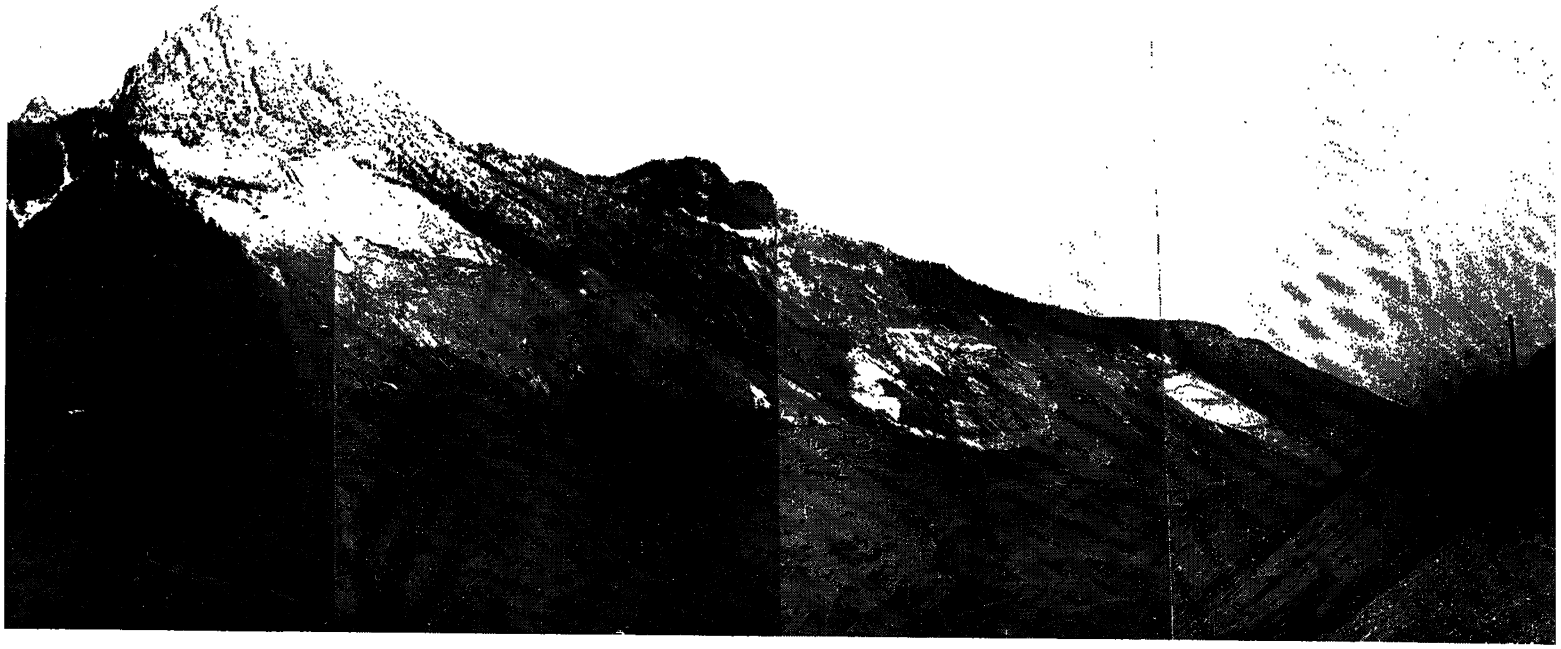

PHOTO n° 3. — Glissement du versant nord du Mont Toc dans la retenue du barrage du Vajont.

On a là un glissement dont les causes sont artificielles et qui, par son échelle, rappelle nettement les mouvements de versants considérables qui sont apparus à la fin de l'époque glaciaire en de nombreux points des Alpes. On distingue au premier plan la masse glissée surmontée par les dalles structurales sur lesquelles s'est produit le glissement ; la différence d'altitude entre le sommet et la base de la surface de glissement visible est d'environ 500 mètres.

(*Cliché P. Antoine.*)

de la montagne, en particulier sous la forme de l'implantation de stations de sports d'hiver de taille souvent considérable. Nous assistons ainsi à la transposition de problèmes déjà souvent difficiles à résoudre dans un cadre urbain de faible relief (fondations, voie d'accès, assainissement...) à un milieu souvent hostile ou tout au moins peu favorable. Il est aisé de prévoir que sans une approche scientifique du problème, les difficultés et les incidents iront en croissant à l'avenir.

Les études entreprises à Grenoble sur le sujet revêtent donc un aspect à la fois scientifique et de vulgarisation, par la volonté de diffuser les résultats fondamentaux acquis dont les applications pratiques sont évidentes.

II. — Aspect mécanique.

A) *Exposé du problème.*

L'étude physique des glissements de terrains relève de la mécanique des milieux continus, car il s'agit de faire l'étude des déformations d'un corps soumis à certaines sollicitations. Etant un problème de mécanique, il fait intervenir trois notions physiques qui sont :

1° *Les lois fondamentales,* qui sont valables pour tous les corps en équilibre et découlent de l'équation

$$\Sigma F - m\gamma = O$$

où ΣF représente la somme des forces appliquées à un solide de masse m et qui lui donnent une accélération γ, et de l'équation thermodynamique de continuité qui exprime la conservation de la masse.

2° *Les lois rhéologiques,* qui sont les lois physiques qui représentent les propriétés mécaniques des matériaux et qui relient les contraintes aux déformations et à leurs dérivées par rapport au temps. Nous décrirons sommairement quelques aspects de ces propriétés mécaniques dans le § B, 2°, pour introduire les notions de cohésion et de frottement interne.

3° *Les conditions aux limites.*

La combinaison des équations fondamentales et des lois rhéologiques conduit à des équations différentielles valables pour tous les milieux ayant les mêmes lois rhéologiques ; on tiendra compte des conditions particulières à chaque milieu en introduisant, lors de l'intégration de ces équations différentielles, les conditions aux limites qui peuvent être :

a) géométriques : c'est la morphologie interne et externe de la pente ainsi que les contours de la nappe et les circulations d'eau ;

b) dynamiques : ce sont les forces appliquées en certains points du massif, telles que des surcharges dues à des bâtiments ou des surpressions d'eau.

4° *Résolution du problème.*

Théoriquement, résoudre un problème de stabilité de pente consiste donc à intégrer des équations différentielles en tenant compte des conditions aux limites : la solution devrait donc se présenter comme une série d'équations donnant en chaque point et en fonction du temps les contraintes et les déplacements. Malheureusement, dans la pratique la résolution de ces équations différentielles n'est possible que dans quelques cas très simples. Dans le cas général, on est conduit à faire des hypothèses simplificatrices, et cela conduit à différentes méthodes de calcul qui ne peuvent donner que des résultats approchés.

B) *Calcul théorique de la stabilité d'une pente.*

Pour résoudre le problème de la stabilité, il faut donc connaître :

— les lois fondamentales ;
— les lois rhéologiques ;
— les conditions aux limites.

1° *Les lois fondamentales.*

Ce sont les mêmes pour tous les corps et elles sont parfaitement connues.

2° *Les lois rhéologiques.*

Elles traduisent les propriétés mécaniques du matériau ; leur étude comporte une analyse qualitative et une analyse quantitative.

a) l'analyse qualitative. — Elle a pour but de déterminer comment le corps réagit aux efforts auxquels il est soumis ; ces lois qualitatives peuvent être les mêmes pour de nombreux corps, et nous exposerons ici un cas simple ; elles introduisent divers paramètres à déterminer par

b) l'analyse quantitative et qui caractérisent chaque corps.

c) Exemple de loi rhéologique. — On peut chercher quelle est la loi de variation des déformations (ε) en fonction des contraintes verticales (σ_1) pour un échantillon d'argile soumis à des contraintes horizontales (σ_2) données. L'essai expérimental donnera, dans l'espace des déformations et des contraintes, des courbes différentes (I), (II) et (III) pour trois valeurs différentes de σ_2. Voir les figures 1 et 2.

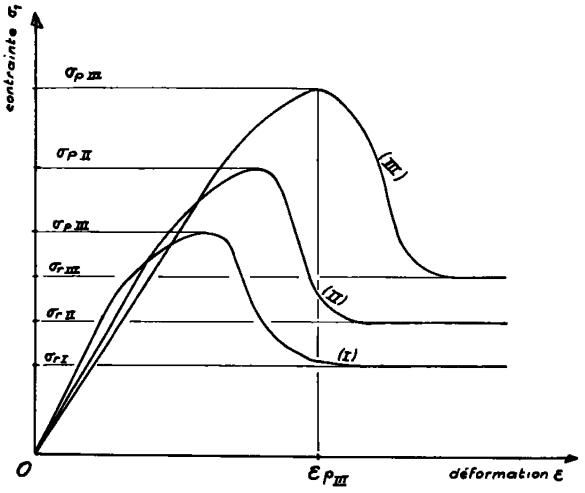

Fig. 1. — Courbes contraintes — déformations.

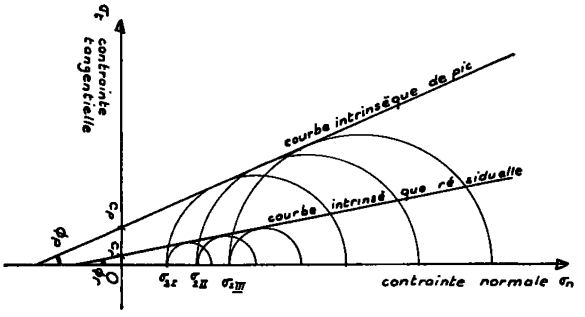

Fig. 2. — Diagramme de Mohr.

Nous voyons sur la figure 1 que la courbe contraintes-déformations présente un pic (contrainte de pic σ_p) et un palier (contrainte résiduelle σ_r). Ces valeurs sont fonction de la contrainte σ_2. Tant que la déformation est inférieure à ε_p correspondant au pic, on peut espérer pour le matériau une résistance égale à σ_r ; tandis que dès que la déformation dépasse ε_p, on ne peut plus espérer qu'une résistance égale à la contrainte résiduelle σ_r.

On peut alors construire le diagramme de Mohr à partir des valeurs de pic ou de palier, et on obtiendra pour le matériau les courbes intrinsèques de pic et de palier, la courbe intrinsèque représentant la limite des contraintes admises par le matériau. Ces courbes intrinsèques peuvent être assimilées à des droites dont l'équation est

$$\sigma_t = c + \sigma_n \,.\, \mathrm{tg}\, \varnothing$$

avec σ_t : contrainte tangentielle, et σ_n : contrainte normale.

Les deux paramètres introduits par cette équation sont c la cohésion et $\varnothing$ l'angle de frottement interne qui sont caractéristiques du matériau et des conditions de l'essai.

En effet les paramètres c et $\varnothing$ sont, pour un même matériau, variables en fonction de divers paramètres tels que la teneur en eau, mais surtout en fonction de la vitesse du mouvement. On voit donc ainsi apparaître une importante difficulté dans la mesure de ces paramètres : il est impossible de prévoir quelle sera la vitesse du mouvement naturel et surtout d'atteindre en laboratoire des vitesses aussi faibles que les vitesses naturelles. Il est d'autre part souvent impossible de savoir si le terrain a subi des déformations telles que les valeurs de pic sont ou non dépassées. Enfin l'histoire géologique du terrain intervient en particulier par les contraintes de consolidation qui se sont produites au cours du temps.

On voit ainsi que la détermination de la loi rhéologique pose une première et importante difficulté dans le problème de la stabilité théorique des pentes.

Remarque. — Contraintes normales et contraintes effectives. Un sol est en général composé de trois phases : solide, liquide et gaz ; en négligeant l'influence de la phase gazeuse, nous constatons que les contraintes qui s'exercent en un point donné du sol sont transmises d'une part par le contact entre les particules solides (ce sont les contraintes effectives σ', et tous les paramètres qui s'y rapportent seront affectés de l'indice $'$ et elles sont indépendantes des pressions intersticielles) et d'autre part par la pression de l'eau (c'est la pression intersticielle u). La contrainte totale σ en un point est donc la somme de ces deux quantités :

$$\sigma = \sigma' + u$$

Les paramètres cohésion et angle de frottement interne seront par la suite exprimés en termes de contraintes effectives et notés c' et $\varnothing'$.

3° *Les conditions aux limites.*

Leur détermination comporte les étapes suivantes :

a) Conditions aux limites géométriques. — Il s'agit de connaître la morphologie externe et interne des phases solides et liquides ; il faut donc effectuer :

— un levé topographique pour la géométrie externe ;
— un levé géologique et hydrogéologique complété ou non par des reconnaissances par sondages, géophysique, etc., pour la géométrie interne.

b) Conditions aux limites dynamiques. — Les surcharges sur la pente sont faciles à mesurer ; quant aux surpressions de l'eau, leur détermination est plus complexe et nécessite soit des mesures (piézomètres, capteurs de pression...), soit des calculs d'hydrodynamique souterraine.

La connaissance de tous ces facteurs devrait se traduire par une carte et une série de coupes sur lesquelles tous ces paramètres seraient portés.

III. — Comment réagir devant une pente ?

Lorsqu'un projet prévoit l'implantation d'une route, de bâtiments, d'ouvrages, etc., sur ou sous une pente, on est amené à se poser la question de savoir si cette pente présente un risque de mouvements préjudiciables à ces ouvrages. Le problème doit être cependant abordé de façon différente selon que la pente est le siège de mouvements apparents ou non ; de plus, lorsque la pente semble stable, il est possible qu'elle ait été par le passé le siège de mouvements stabilisés depuis, mais qui risquent de se reproduire dans certaines conditions. C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous évoquerons successivement les trois cas suivants :

— la pente bouge ;
— la pente a bougé, mais est stabilisée ;
— la pente n'a jamais bougé.

A) *La pente bouge.*

En présence d'une pente qui est le siège de mouvements apparents, on peut chercher soit à la stabiliser (cela essentiellement par des drainages, et ce point sera traité dans le chapitre IV), soit à la surveiller pour établir des critères de danger, évaluer le risque et prévoir un signal d'alarme éventuel. Tout d'abord comment s'aperçoit-on qu'une pente bouge ?

1° *Critères de mouvements.*

Les mouvements d'une pente se traduisent par un certain nombre d'éléments que nous ne ferons qu'énumérer rapidement, car ils sont décrits très en détail par J.-P. BOMBARD (1968, p. 132-148). On peut tout d'abord observer le mouvement lui-même lorsqu'il est assez rapide, mais ce n'est pas le cas la plupart du temps. Cependant une pente affectée d'un mouvement de masse présente un aspect caractéristique ondulé, avec des bourrelets, des crevasses plus ou moins profondes et larges, des arbres penchés, des murs ou des routes brisés, etc.

2° *Mouvements et rupture d'une pente.*

Si la pente bouge, on peut constater des déplacements en surface. Le problème consiste à savoir si la vitesse de ces déplacements peut à un moment aller jusqu'à la « rupture », c'est-à-dire le passage par une vitesse maximale suivi d'un ralentissement. Avant d'aborder les méthodes pratiques d'investigation, il est nécessaire de donner quelques généralités sur les vitesses de mouvements.

Avant la rupture, les mouvements ont une vitesse sensiblement constante dont les variations sont dues à celles des conditions aux limites. Cette phase, analogue au fluage visco-plastique, peut se poursuivre durant des années.

La phase de rupture commence par une accélération des mouvements donnant une allure exponentielle à la courbe des déplacements. Cette accélération peut durer pendant un temps variable : à Vajont, un mois. Elle se produit indépendamment des conditions aux limites si elle y était liée avant. L'exemple type de déplacements non dangereux dans l'immédiat est celui où les variations de vitesse autour d'une vitesse moyenne correspond aux variations de certaines conditions aux limites (pression intersticielle variant au rythme de la pluviométrie) ; voir à ce sujet DESVARREUX (1970, p. 122-123).

En conclusion, toutes les accélérations de mouvement ne sont pas également dangereuses. En abordant une pente « suspecte » qui présente les signes topographiques de mouvements, il faut toujours :

— obtenir des mesures de déplacements ;
— estimer le risque de glissement en volume ;
— évaluer la vitesse maximale que peut atteindre le mouvement ;
— établir un critère de danger, c'est à-dire un moyen de déterminer le moment à partir duquel on court un risque supérieur à une limite qu'on s'est fixée à l'avance.

3° *Mesures de déplacements en surface.*

Elles ont pour but de déterminer l'ordre de grandeur et les variations de la vitesse du mouvement.

Le moyen classique consiste à implanter des témoins dans la zone suspecte et d'en relever régulièrement la position en se servant d'un canevas de repères fixes et en utilisant les méthodes topographiques classiques (triangulation au théodolite ou théodolite plus télémètre). La période des mesures peut varier de huit jours à six mois selon la vitesse des mouvements.

On peut également combiner des triangulations précises (mieux que le centimètre) effectuées deux à quatre fois par an avec des mesures effectuées à intervalles plus rapprochés (huit à quinze jours ou même tous les jours) de quantités variant dans le même sens que les déplacements (par exemple angles ou distances) pour obtenir l'allure de la courbe des déplacements.

On peut enfin compléter ces mesures par la surveillance de l'écartement de certaines fissures.

Indépendamment des corrélations qu'elles permettent d'établir avec différents paramètres, ces mesures doivent servir à déceler une accélération dangereuse des mouvements.

Exemples : voir les mesures de déplacements sur le site de Vajont par SELLI et TREVISAN (1964) et sur le site de G. L... par DESVARREUX (1970, p. 122-123).

4° *Risque de glissement en volume.*

Le but de cette étude est de déterminer le volume en glissement et de distinguer les zones en mouvement plus ou moins rapide.

A partir des mesures de déplacements et en s'aidant des indices morphologiques (voir J.-P. BOMBARD, 1968), on peut limiter en surface la zone en mouvement ; on peut également y distinguer des sous-zones animées de vitesses différentes. La détermination de la position de la surface de glissement, qui permettra d'évaluer le volume en mouvement, se fait à l'aide des données suivantes :

— résultats de mesures sur inclinomètres ou tubes de déformation ;
— intersection supérieure et inférieure de la surface de glissement avec la surface topographique, repérable à certaines formes ;
— position de la surface de glissement sensiblement parallèle aux vecteurs vitesse en surface ;
— dans tous les terrains anisotropes, la surface de glissement a une forme liée à cette anisotropie (voir le § III, C, 3°).

On peut ainsi limiter en volume les risques de glissement ; voir par exemple les estimations à Vajont (MÜLLER, 1961) et à G. L... (DESVARREUX, 1970).

5° *Evaluation de la vitesse maximale des mouvements.*

Nous avons vu que la résolution des équations différentielles obtenues à partir des équations fondamentales et des lois rhéologiques, combinée avec les conditions aux limites, devait donner théoriquement les contraintes et les déformations en tout point et en fonction du temps ; or on ne peut résoudre ces équations ; on ne connaît les solutions que pour le passé (solutions du passé), alors que certaines « données » sont imprécises. Le problème revient alors à estimer quelles seraient les vitesses pour d'autres conditions aux limites ou une autre loi rhéologique que celles que le matériau a connues. Pratiquement on se borne à donner une limite supérieure de la vitesse en prenant des caractéristiques mécaniques extrêmes (en négligeant la cohésion et en prenant un angle de frottement très faible). Ceci est très important pour des glissements se produisant au-dessus de plans d'eau, car la hauteur des vagues produites est liée à la vitesse de chute. Voir par exemple le calcul à posteriori de la vitesse maximale atteinte à Vajont par CIABATTI (1964) ; actuellement l'Ecole Centrale de Paris, sous la direction de M. BIAREZ, cherche à calculer une limite supérieure de la vitesse à G. L... pour différentes hauteurs d'eau dans le sol.

6° *Critère de danger.*

Il a pour but de déterminer à partir de quel moment le risque couru est inacceptable ; ce peut être :

— une vitesse supérieure à une limite fixée à l'avance ;
— une accélération se produisant pendant une période trop longue ;
— un volume en mouvement s'accroissant au-delà de certaines limites ;
— etc.

Le critère le plus utile consiste à déterminer le moment à partir duquel on est certain d'avoir la rupture. Il est fondé sur le fait que l'accélération précédant la rupture ne correspond plus aux variations de conditions aux limites (par exemple diminution de la sollicitation entraînant non plus un ralentissement mais une accélération des mouvements ; ou bien accélération se poursuivant alors que la sollicitation demeure constante). On peut l'établir pratiquement à partir de corrélations entre les vitesses et certaines sollicitations (pression intersticielle, cote du plan d'eau...).

Il faut cependant remarquer que ce critère n'est applicable qu'en cas de sollicitation demeurant constante ou diminuant ; connaître le risque que fait courir une augmentation de sollicitation nécessite de savoir calculer les solutions de l'avenir.

Voir comme critères de danger le cas du glissement de Vajont (p. 82-83 et 107-108) et de G. L... (p. 81) dans DESVARREUX (1970).

B) *La pente a bougé et est stabilisée.*

1° *Réalité et description des mouvements anciens.*

On rencontre dans les régions montagneuses des pentes qui ont subi un mouvement dans le passé et qui sont actuellement stabilisées ; il est possible dans ce cas de faire une distinction chronologique arbitraire entre les phénomènes présentant un âge « géologique » et ceux qui remontent à un passé récent, c'est-à-dire dont l'homme fut témoin comme par exemple l'écroulement et glissement du Granier et des abîmes de Myans en Savoie (novembre

1248), du Claps de Luc dans la Drôme (1442), du col du Dérochoir dans la chaîne des Fiz en Haute-Savoie (1751) en ce qui concerne la France, des Diablerets (1714 et 1749) et du Righi (1806) en Suisse. Toutes ces catastrophes sont signalées par L. MORET (1945).

En ce qui concerne la première catégorie, les effets seuls sont actuellement observables ; quant aux seconds, si la tradition et des documents historiques en portent témoignage, les indications sur le mouvement lui-même sont soit absentes, soit trop vagues pour pouvoir être utilisées.

En ce qui concerne les pays alpins, il apparaît à l'expérience sur le plan pratique que l'existence de glissements anciens revêt une grande importance en raison des particularités de l'histoire récente de la chaîne.

2° *Généralités sur les phénomènes de glissements anciens dans les Alpes.*

L'exécution de levés géologiques détaillés (aux échelles du 1/20 000e ou du 1/25 000e) depuis quelques décades, et surtout l'emploi généralisé des techniques de photo-interprétation au stade synthétique du dessin des cartes géologiques révèle de plus en plus l'importance des surfaces couvertes par les glissements anciens ; ces derniers sont très répandus et affectent à peu près toutes les zones structurales de la chaîne. Leur développement est évidemment plus ou moins spectaculaire selon les facteurs d'instabilité dominants tels que nature lithologique ou disposition structurale des masses rocheuses concernées. La figure 3 illustre assez bien cela : elle montre un relevé systématique d'après photographies aériennes de tous les indices de mouvements de terrains identifiés en Maurienne (vallée de l'Arc en Savoie) entre les massifs cristallins externes et la zone des schistes lustrés. On remarquera la nette prédominance des mouvements anciens dans les schistes jurassiques de la zone dauphinoise interne, le flysh des Aiguilles d'Arves et le houiller briançonnais ; il convient de noter qu'il s'agit là de formations rocheuses ayant en commun des teneurs importantes en minéraux argileux ainsi qu'une très forte anisotropie de constitution.

Nous rappellerons que l'on admet une relation entre ces mouvements de terrains anciens généralisés et les glaciations quaternaires ; les mouvements se sont produits lors de la décrue glaciaire, soit durant des interstades, soit essentiellement lors de la fonte définitive. Sans entrer dans des détails qui seront précisés par des études futures, on peut penser que la convergence de facteurs tels que les alternances du gel et du dégel en climat périglaciaire, l'accroissement de la teneur en eau des versants lors de la fonte, la disparition du glacier qui jouait jusque-là le rôle de clavage pour les versants peuvent expliquer le déclenchement à peu près contemporain dans toutes les Alpes (soumises aux mêmes conditions) de mouvements de versants souvent très importants. Il est évident que des facteurs secondaires comme la géométrie des couches (pendages, directions privilégiées de fractures), ou bien l'exposition, jouent localement un rôle prépondérant et expliquent certaines anomalies de répartition.

En résumé, il faut retenir de tout cela que la période quaternaire a vu dans les Alpes se développer de façon très générale des conditions propices aux mouvements de versants. Selon le type de terrains concernés, les surfaces affectées peuvent être considérables.

Ce fait doit absolument être souligné, car, comme nous allons le montrer, de telles zones se trouvent particulièrement exposées à des remises en mouvement partielles, soit naturellement, soit le plus souvent à l'heure actuelle à la suite de travaux résultant de l'activité humaine. L'intérêt pratique de l'identification de telles zones est par conséquent évident.

3° *Quelques caractéristiques singulières des glissements anciens.*

Les dimensions atteintes par les glissements anciens sont souvent considérables, et ils affectent parfois des versants entiers de vallées montagneuses. Il arrive dans certains cas extrêmes que la crête séparant deux vallées appartienne elle-même à une masse glissée ou bien qu'elle soit dédoublée par la partie supérieure de la surface de rupture. De tels glissements en masses énormes sont très fréquents dans les séries lithologiques à dominante schisteuse : Lias « dauphinois » (par exemple au Sud du Grand Châtelard en Maurienne, ou à la Crête des Gîtes au-dessus des Chapieux au Nord de Bourg-Saint-Maurice, ou encore le grand glissement de Villar-d'Arène cité par GIGNOUX et BARBIER à proximité du col du Lautaret), ou Carbonifère de la Maurienne (par

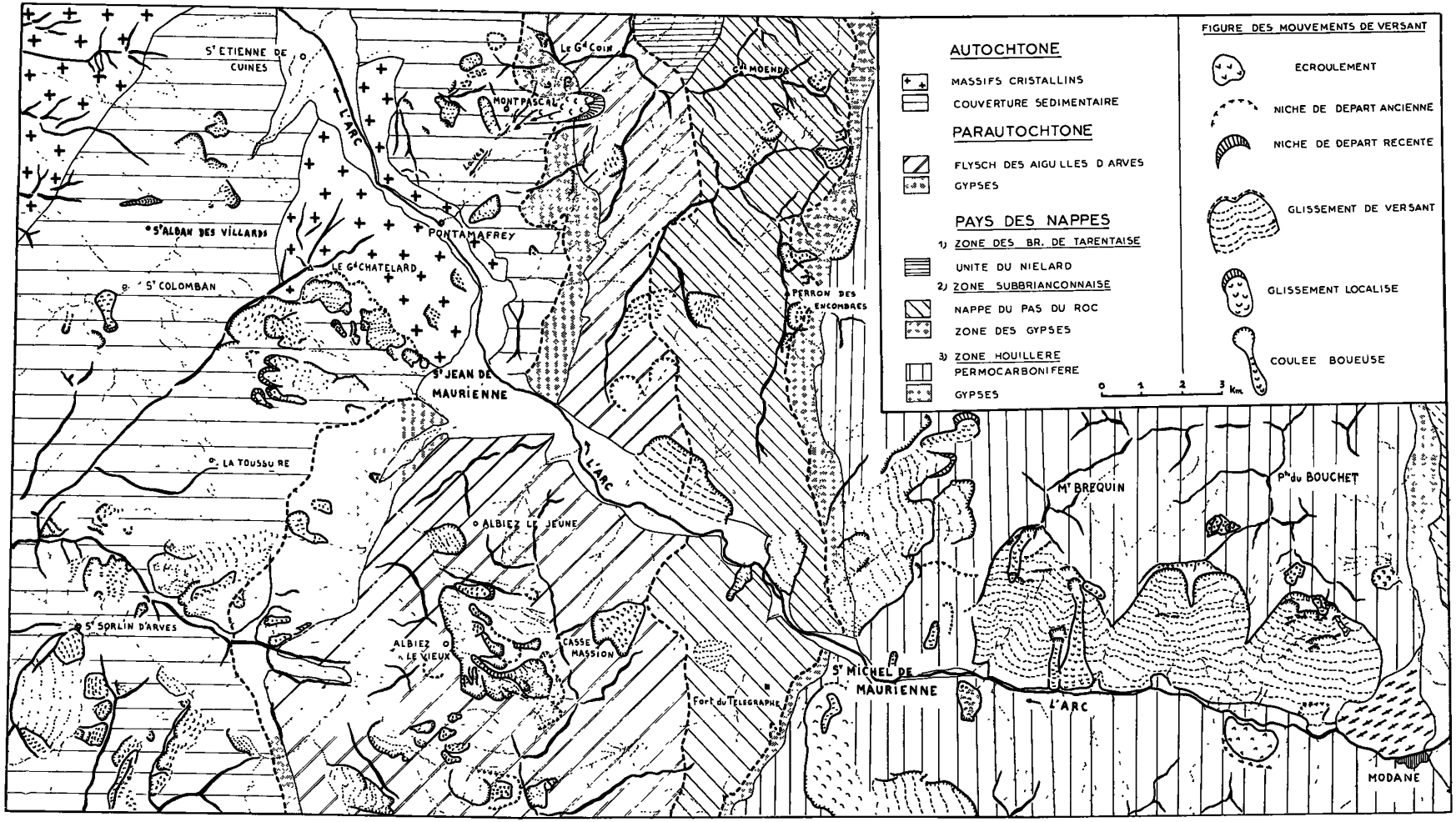

Fig. 3. — Recensement des principales formes de mouvement de versant sur une section de la vallée de l'Arc (Maurienne), entre les massifs cristallins externes et le Permocarbonifère métamorphique.

On remarquera l'abondance des glissements anciens dans la série sédimentaire autochtone (schistes argileux) et dans la zone houillère (carte dressée par les étudiants de 3e Cycle de Géologie Appliquée de Grenoble ; direction P. ANTOINE).

exemple en rive droite de l'Arc entre Saint-Michel-de-Maurienne et La Pra, ou en vallée de Belleville en Savoie), ou Terres Noires jurassiques du Trièves (région comprise entre Monêtier-de-Clermont et Clelles dans l'Isère), ou flyschs divers, schistes lustrés, etc.

L'extension même de la zone glissée, lorsqu'elle affecte des versants montagneux entiers, est un obstacle à la reconnaissance de phénomènes qui est parfois difficilement concevable à l'échelle humaine. Bien des erreurs d'interprétation géologique d'affleurements appartenant à des zones glissées, en termes structuraux, trouvent là leur origine (exemples de Jausiers déjà cité et du glissement de l'unité de Salins en Tarentaise dans la région du Fort 2 000 au-dessus de Bourg-Saint-Maurice, etc.).

En outre sur le plan pratique, l'étude des déformations, lorsque de tels ensembles ne sont pas stabilisés totalement, est souvent difficile, car les bases fixes pour disposer les appareils de visée ne sont pas aisées à trouver. Etant donné la masse considérable de terrains remaniés représentée par des glissements anciens de ce type, il est rare en effet que la stabilité soit parfaitement recouvrée en tout point de la masse. On peut en général, malgré une apparente stabilité, déceler des variations de vitesse de déplacement d'un point à un autre de la masse glissée. On assiste alors fréquemment à des reprises localisées du mouvement sous une forme parfois différente (coulées de boue par exemple), l'accélération du mouvement pouvant avoir une cause naturelle ou artificielle.

On doit remarquer à ce propos que le comportement ultérieur dépendra en grande partie de l'intensité de la déformation interne de la masse lors du mouvement primitif, certains glissements ne produisant qu'une translation de masse sans remaniement interne, alors que d'autres introduisent de très fortes déformations de la masse glissée. Ces déformations introduisent des modifications importantes dans la résolution du problème de la stabilité de la pente :

— la loi rhéologique du matériau peut varier considérablement, car, d'une part, lorsque le remaniement n'est pas très grand, les propriétés mécaniques peuvent passer des valeurs de pic aux valeurs résiduelles, et, d'autre part, lorsque le remaniement devient important, le matériau peut changer entièrement de loi rhéologique qualitative par destruction de sa nature initiale (essentiellement par fracturation) ;
— la forte déformation interne d'une masse glissée peut s'accompagner d'une modification complète des conditions aux limites et en particulier des conditions aux limites hydrauliques, résultant tout à la fois du changement de localisation et de la modification de la géométrie interne de la masse qui influe très directement sur la répartition de la phase liquide au sein du glissement.

En conclusion, nous dirons que les glissements anciens considérés comme stabilisés correspondent en fait à des terrains nouveaux dont les diverses propriétés mécaniques et hydrauliques se sont détériorées par rapport à leur état initial. La nouvelle position d'équilibre, atteinte de façon plus ou moins définitive, doit donc être considérée de façon générale comme précaire. La recherche de telles zones de glissements anciens doit donc être un des premiers soucis de toute personne chargée de l'étude d'un projet d'aménagement de la montagne. Il s'agit en effet de zones particulièrement sensibles à des modifications (parfois subtiles) introduites par l'activité humaine.

4° *Quelques conséquences pratiques.*

Sur le plan pratique, c'est-à-dire dans l'optique du projeteur ou du réalisateur qui doit composer avec le terrain, de telles pentes anciennement glissées posent de redoutables problèmes. Il n'existe pas de méthode rigoureuse pour les aborder, et seule une longue expérience (y compris les leçons tirées d'échecs précédents) peut guider vers une solution satisfaisante.

a) Difficulté de la prévision. — Il n'est pas possible de prévoir exactement l'évolution d'un glissement ancien en fonction des modifications qu'apportera tel ou tel type de travaux. La pente n'étant pas en mouvement (ou seulement en mouvement très lent), le critère de danger (défini au § III, A, 6°) n'aura plus de signification. La détermination d'un facteur de sécurité selon la méthode du § III, 6, se heurtera à de très grosses difficultés qui proviendront surtout de la nature très hétérogène du matériau, donc de la difficulté qu'il y aura à déterminer les diverses propriétés et conditions aux limites en chaque point du massif. Enfin l'existence de mesures diverses serait très utile, mais

l'expérience montre que l'on ne dispose presque jamais de telles mesures lorsque la question est posée du degré de danger de tels glissements.

b) Conduite à tenir. — Le problème étant ainsi posé, la solution est connue de longue date : il est préférable d'éviter les travaux dans les zones suspectes ou bien de les adapter aux conditions particulières des anciens glissements. Cette proposition, qui apparaît comme une vérité d'évidence, est cependant loin d'être à l'esprit de tous ceux qui, de près ou de loin, concourent à l'aménagement de la montagne.

Sur le plan pratique il importe que ces « utilisateurs » soient bien convaincus de la nécessité d'une étude géologique sérieuse préalable à tout plan-masse d'ensemble. Cette étude consistera à identifier tous les indices trahissant les mouvements anciens stabilisés et à les délimiter avec exactitude sur un fond topographique approprié. Il est évident que ce travail devra être mené de façon scrupuleuse et objective par un géologue accoutumé à ce type de problème, et si possible familier de la montagne et de ses pièges. La géologie ayant déterminé la « hiérarchie » des dangers, les plans peuvent être adaptés de façon à les éviter ou bien la mécanique prenant le relais, on peut tenter de préciser le degré de danger ainsi que les remèdes les mieux adaptés pour réaliser malgré tout un aménagement sûr.

C) *La pente n'a jamais bougé.*

1° *Détermination de la stabilité théorique.*

Comme cela a déjà été dit au § II « Aspect mécanique », déterminer la stabilité d'une pente consiste à intégrer les équations différentielles obtenues par combinaison des lois fondamentales et rhéologiques en tenant compte des conditions aux limites.

Ce problème n'étant malheureusement pas soluble, sauf dans de très rares cas, on a été conduit à faire des hypothèses simplificatrices qui conduisent à différentes méthodes de calcul. Divers auteurs se sont penchés sur la question, et nous citerons pour mémoire ces différentes méthodes : Fellénius, Taylor, Caquot, Bishop, Biarez... Ces méthodes conduisent à la définition d'un coefficient de sécurité F qui représente, selon les cas, le rapport entre l'action des forces résistantes et l'action des forces motrices auxquelles est soumis le massif, ou le rapport entre les propriétés mécaniques réelles du matériau et les propriétés mécaniques nécessaires à la stabilité du massif. On voit donc que plus ce coefficient est élevé, plus la stabilité est grande, plus il se rapproche de 1, plus la stabilité diminue.

2° *Exposé de la méthode de Fellénius.*

a) Description de la méthode. — Pour expliciter les difficultés rencontrées et l'influence des divers paramètres, nous exposerons la méthode de Fellénius qui est la plus inexacte de toutes ; mais il est possible de se rapprocher de la réalité par quelques corrections simples, et elle reste ainsi, et de loin, le moyen le plus rapide pour avoir une assez bonne idée du coefficient de sécurité.

Nous discuterons plus loin de la nature et de la forme des surfaces de glissement (§ C, 3°), et nous supposerons donc pour l'instant une surface de glissement dont la section par un plan vertical dans le sens du mouvement est circulaire.

Considérons (fig. 4) une pente formée d'un matériau homogène et isotrope de cohésion et d'angle de frottement interne exprimés en termes de contraintes effectives : c' et $\varnothing'$, dans laquelle se trouve une nappe, et cherchons le coefficient de sécurité du massif limité par la pente et une surface de glissement circulaire arbitrairement choisie. Les hypothèses simplificatrices sont les suivantes :

— le problème est à deux dimensions ;
— le massif étant découpé en tranches verticales d'égale épaisseur, l'interaction entre ces tranches est nulle ;
— les contraintes normales le long de la surface de glissement, dans la zone découpée par une tranche, sont égales à la composante normale à la surface du poids de la tranche.

Le massif étant découpé en tranches verticales de largeur égale, on examine successivement pour chaque tranche les forces qui s'y exercent. Soit W le poids de la tranche. La force motrice est T, composante de W selon la surface de glissement. Les forces résistantes sont :

— la force de cohésion égale à la cohésion multipliée par la surface sur laquelle elle s'exerce, c'est-à-dire l . 1, si l est la longueur de l'arc de glissement intercepté par la tranche considérée ;

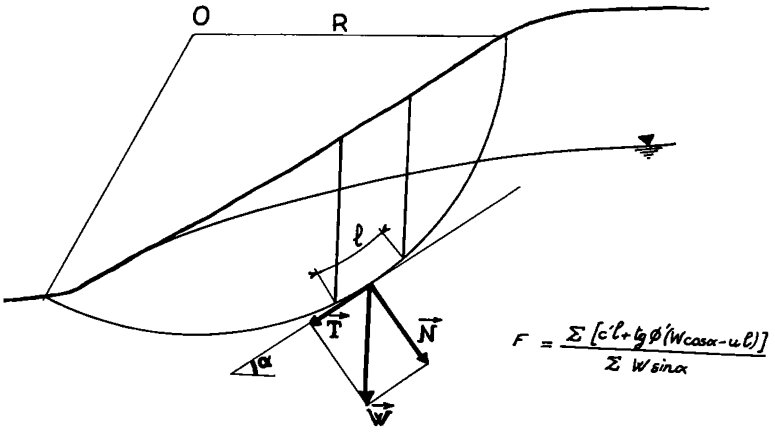

Fig. 4. — Schéma de la méthode de Fellénius.

— la force de frottement égale à la contrainte effective agissant le long de l'arc de glissement multipliée par le coefficient de frottement, c'est-à-dire la tangente de l'angle de frottement interne ; la contrainte effective étant égale à la différence entre la contrainte totale et la pression intersticielle, la force de frottement vaut donc :

$$(W.\cos\alpha - u.l).\operatorname{tg}\varnothing'$$

si α est l'angle de la base de la tranche avec l'horizontale.

Si R est le rayon du cercle de glissement, le moment de ces forces s'écrit :

Moment moteur : T.R

Moment résistant :

$$[c'.l + (W.\cos\alpha - u.l).\operatorname{tg}\varnothing'].R$$

Si on fait la somme sur toutes les tranches des moments moteur et résistant (le signe Σ signifiant somme sur toutes les tranches de) et si on fait le rapport des deux sommes, on obtient le coefficient de sécurité F :

$$F = \frac{\Sigma\,[c'.l + (W.\cos\alpha - u.l).\operatorname{tg}\varnothing']}{\Sigma\,(W.\sin\alpha)}$$

b) Recherche du coefficient de sécurité. — Lorsqu'on connaît la surface de glissement potentielle, on applique la méthode à cette surface ; lorsqu'on ne la connaît pas, il faut chercher, parmi toutes celles possibles, celle qui conduit au plus faible coefficient : on se fixe dans le plan un certain nombre de centres de cercles, et pour chaque centre on cherche le cercle donnant le plus faible coefficient. On trace alors (voir fig. 5) les courbes joignant les centres de même coefficient, et le centre du cercle le plus probable se trouve au centre de la courbe de plus faible coefficient.

c) Validité, corrections et extension de la méthode. — De très nombreux calculs ont été effectués sur des pentes stables et instables par la méthode de Fellénius et d'autres méthodes [1] ; on en a tiré les conclusions suivantes :

— la méthode de Fellénius conduit à un coefficient FF trop bas, mais en ajoutant à FF un terme correctif trouvé statistiquement et égal à 0,12 on aura un coefficient dit coefficient probable :

$$FP = FF + 0{,}12$$

qui, à 5 % près au maximum, sera proche de la réalité ;

— à l'aide de cette correction, la méthode donnera des résultats aussi valables que d'autres méthodes, et cela grâce à des calculs beaucoup plus simples ;

— enfin cette méthode, qui n'est valable théoriquement que pour des surfaces circulaires, peut être étendue avec une bonne approximation à des surfaces non circulaires mais

[1] Résultats pour l'instant inédits.

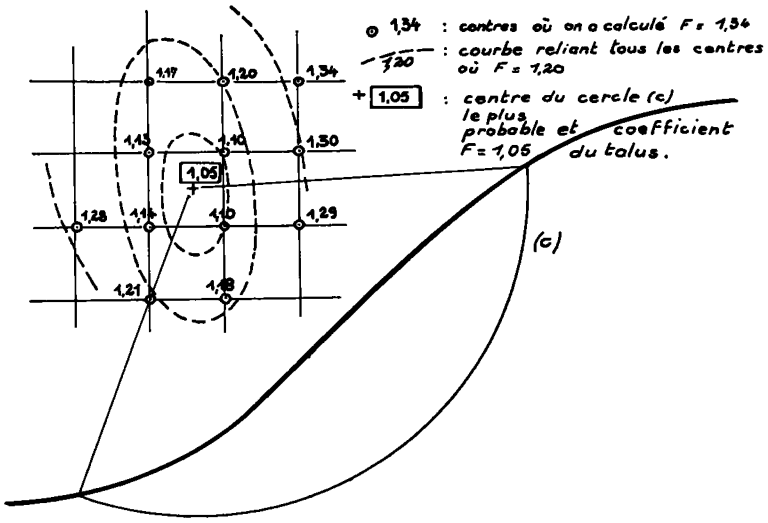

Fig. 5. — Détermination du cercle de rupture le plus probable.

présentant une certaine concavité, telles que des surfaces dont la définition géométrique se rapproche d'une combinaison de droites et de cercles.

Pour des surfaces de glissement planes, se produisant dans des massifs semi-infinis plans, il existe une méthode rigoureuse et simple d'emploi (voir P. DESVARREUX, 1970, p. 30-36).

3° *Les surfaces de glissement naturelles.*

Nous introduisons ce paragraphe à l'intérieur du chapitre consacré aux pentes n'ayant jamais bougé, car l'observation du terrain peut donner des indications sur la forme qu'aurait la surface de rupture si un glissement venait à se produire dans une pente stable.

La variété des surfaces de glissement est très grande, mais on peut les classer en tenant compte de l'homogénéité du terrain quant à sa géométrie interne et à ses propriétés mécaniques.

a) Terrains homogènes. — Dans les terrains très homogènes, on observera que les surfaces de glissement naturelles sont toujours très proches de figures géométriques simples telles que cercles ou droites.

b) Terrains très hétérogènes. — Lorsque les terrains sont très hétérogènes, la surface de glissement est associée à cette hétérogénéité ; dans un terrain sédimentaire présentant une succession de strates de propriétés mécaniques et hydrauliques très différentes, la surface de glissement emprunte généralement une ou plusieurs couches privilégiées ; c'est le cas très connu du glissement du Vajont ou du glissement de la Beas River (Inde) représenté par la figure 6.

c) Réalité de la surface de glissement dans un sol. — La surface de glissement n'a de surface que le nom, car il s'agit en fait d'un certain volume de remaniement entre le massif glissant (souvent en masse non remaniée) et le terrain qu'aucun mouvement n'affecte. L'épaisseur de cette zone peut varier de quelques dixièmes de millimètre à quelques décimètres ; ce phénomène est parfaitement décrit dans la thèse de P. DESVARREUX (p. 65) dont est extraite la figure 7 ; on observe que le terrain naturel est formé d'une alternance de petits lits argileux et sableux et qu'au niveau de la zone de rupture l'ordre naturel a été détruit.

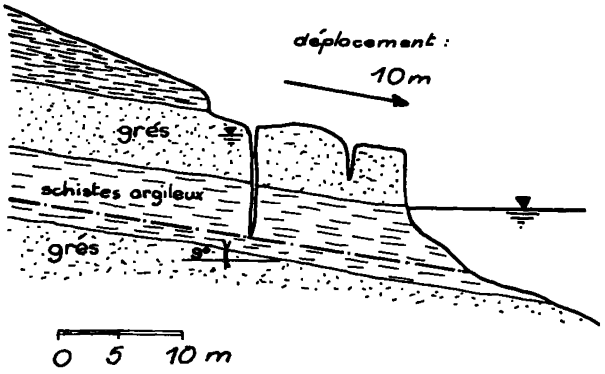

Fig. 6. — Glissement de la Beas River (Inde du Nord) d'après HENKEL et YUDHBU (1966).

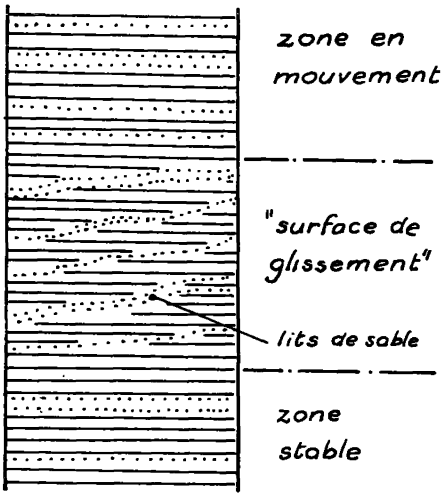

Fig. 7. — Déformation de la structure d'une argile à lits de sable horizontaux d'après P. DESVARREUX (1970).

On remarquera d'autre part que la surface limitant le terrain resté en place de celui qui a bougé n'est pas continue mais constituée d'un ensemble de petites surfaces dont les directions forment des groupes bien définis. On observe ce phénomène dans deux cas principaux :

1) Lorsque le terrain possède une très fine stratification (cela a été observé dans les marnes), une des familles de surfaces élémentaires est constituée par les plans de stratification, comme le montre la fig. 8 ;

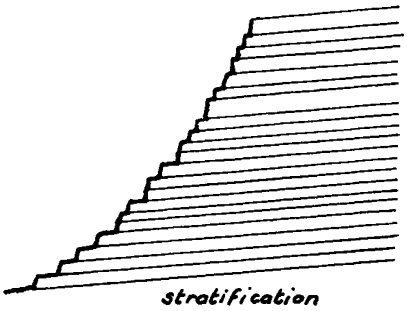

Fig. 8. — La surface de glissement emprunte la stratification.

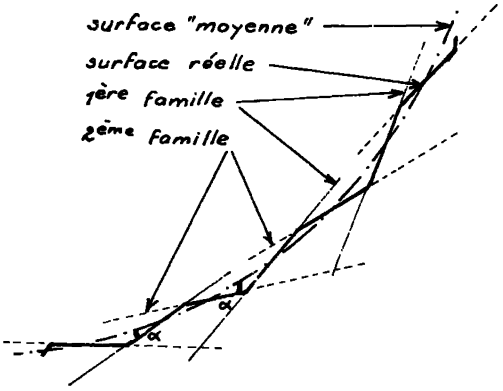

Fig. 9. — La surface de glissement est composée de deux familles de plans formant un angle α positif ou négatif constant avec la direction moyenne.

2) On observe aussi dans certains terrains très homogènes, tels que des argiles surconsolidées, que la surface moyenne (en traits mixtes sur la fig. 9) est formée par l'intersection de deux familles de plans faisant un angle positif et négatif constant avec la direction moyenne. Il est vraisemblable que ces deux systèmes de plans correspondent aux deux directions de cisaillement qui apparaissent dans un matériau soumis à un certain état de contraintes.

4° *Influence de divers paramètres sur la stabilité.*

La stabilité d'une pente dépend de toutes les données énoncées au chapitre II :

— lois fondamentales,
— loi rhéologique,
— conditions aux limites.

Si on fait varier l'un des paramètres intervenant dans la résolution du problème de stabilité, celle-ci variera ; passons donc en revue les différents facteurs susceptibles de se modifier et étudions leur influence sur la stabilité.

a) Modification de la loi fondamentale. — Elle ne peut pas varier qualitativement, mais elle fait intervenir les forces de volume qui sont des forces verticales d'intensité $r \cdot g$, où r est la masse volumique et g l'accélération de la pesanteur :

— la masse volumique r varie en fonction du degré de saturation en eau du massif, mais l'influence de cette variation sur la stabilité peut être tenue pour négligeable ;
— l'accélération de la pesanteur, représentée par un vecteur vertical d'intensité g, peut être modifiée lors d'une secousse sismique, et il s'ajoutera au vecteur g une composante horizontale (cas défavorable) ng (n étant le rapport entre l'accélération horizontale due à la secousse et l'accélération normale de la pesanteur). Indépendamment des phénomènes de vibration introduits, la variation de direction de la résultante des forces de pesanteur causera une variation du coefficient de sécurité. Nous citerons comme exemple le calcul effectué par P. Desvarreux (1970, p. 41-43) pour un talus semi-infini plan de pente 22°, sans circulation d'eau, de paramètres $c = O$ et $\varnothing = 35°$:

Tremblement de terre	Degré dans l'échelle internationale	n	Coefficient de sécurité F
Néant	0	0	1,70
Sévère	IX	0,10	1,32
Violent	X	0,25	0,97
Catastrophique .	XI	0,50	0,53

b) Modification des lois rhéologiques. — A l'exception de cas très rares, les lois rhéologiques qualitatives ne peuvent être modifiées ; seuls les paramètres numériques peuvent varier, et cela principalement dans deux cas :

1) Sous l'influence de grandes déformations : nous avons montré au § B, 2° du chapitre II que les courbes contraintes-déformations comportent un pic correspondant à une déformation ε_p au-delà de laquelle les paramètres de résistance mécanique (contrainte applicable, frottement, cohésion) diminuent de façon importante. Si donc un massif en état stable apparent est le siège de mouvements très lents et indécelables, et si les déformations atteignent la valeur critique ε_p, la résistance mobilisable passera, aux endroits concernés, des valeurs de pic aux valeurs de palier, et le coefficient de sécurité diminuera d'autant.

2) Sous l'influence de l'eau : les différents paramètres de la loi rhéologique varient en fonction de la teneur en eau du matériau, mais de façon très peu importante, sauf en ce qui concerne la cohésion qui peut décroître très notablement lorsque la teneur en eau augmente, comme l'indique la figure 10 tirée de Hvorslev (1937).

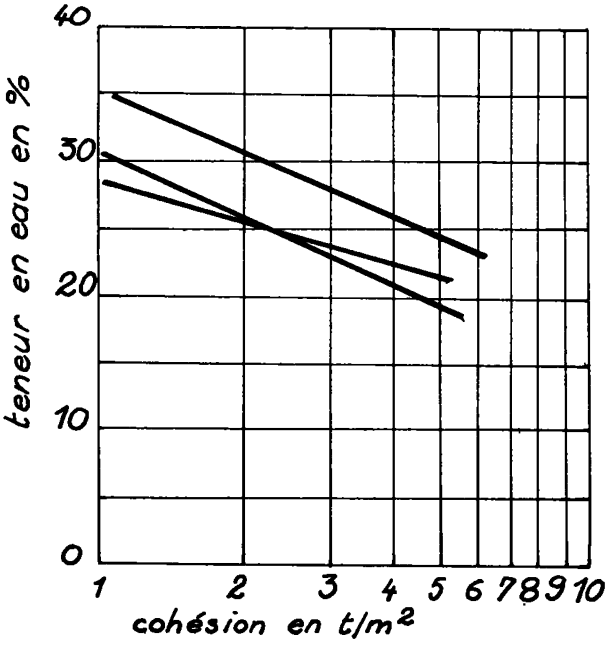

Fig. 10. — Variation de la cohésion avec la teneur en eau d'après Hvorslev.

c) Modification des conditions aux limites. — C'est dans ce domaine que les modifications les plus importantes peuvent se produire ; nous n'insisterons pas sur les variations de la géométrie externe du massif, car il est bien évident que l'augmentation de la pente d'un talus (que ce soit natu-

rellement par érosion ou par des terrassements) diminue très rapidement sa stabilité ; il existe d'autre part dans la littérature des abaques qui peuvent être utiles pour connaître la variation du coefficient de sécurité d'un talus en fonction de sa pente et de ses propriétés mécaniques (en particulier D. W. TAYLOR, 1948), mais elles sont parfois très approchées et surtout incomplètes. Signalons aussi que lors de la prévision de la stabilité d'un talus à terrasser, il faut distinguer entre la stabilité à court terme et la stabilité à long terme, la première étant beaucoup plus grande que la seconde ; A. W. SKEMPTON a très soigneusement étudié ce point ; en particulier voir le compte rendu du Congrès International de Mécanique des Sols de Mexico, 1969.

Le point le plus important, car souvent le plus mal prévu et prévisible, est celui de l'influence de la variation de la position de l'eau dans le massif : variation de certaines circulations et surtout de la position de la nappe. Les circulations d'eau, en se modifiant, peuvent créer en certains points des surpressions importantes. Nous nous attacherons plus en détail à la variation de la cote de la nappe. La pression intersticielle u qu'elle engendre le long de la surface potentielle de glissement est proportionnelle à la différence de cote entre la nappe et cette surface ; or les contraintes effectives σ' le long de la surface, qui sont proportionnelles aux forces résistantes par frottement ($\sigma' . \text{tg}\, \varnothing$) sont égales aux contraintes totales σ, constantes, diminuées de la pression intersticielle u ; on voit donc que les forces résistantes par frottement : $\sigma . \text{tg}\, \varnothing' - u . \text{tg}\, \varnothing'$ diminuent lorsque la cote de la nappe augmente. Pour chiffrer cette variation, des calculs ont été faits ou sont en cours pour différents profils de talus et de nappes plus ou moins proches de la réalité, et nous citerons à titre d'exemple le cas théorique le plus simple représenté sur la figure 11. Soit un talus plan AB

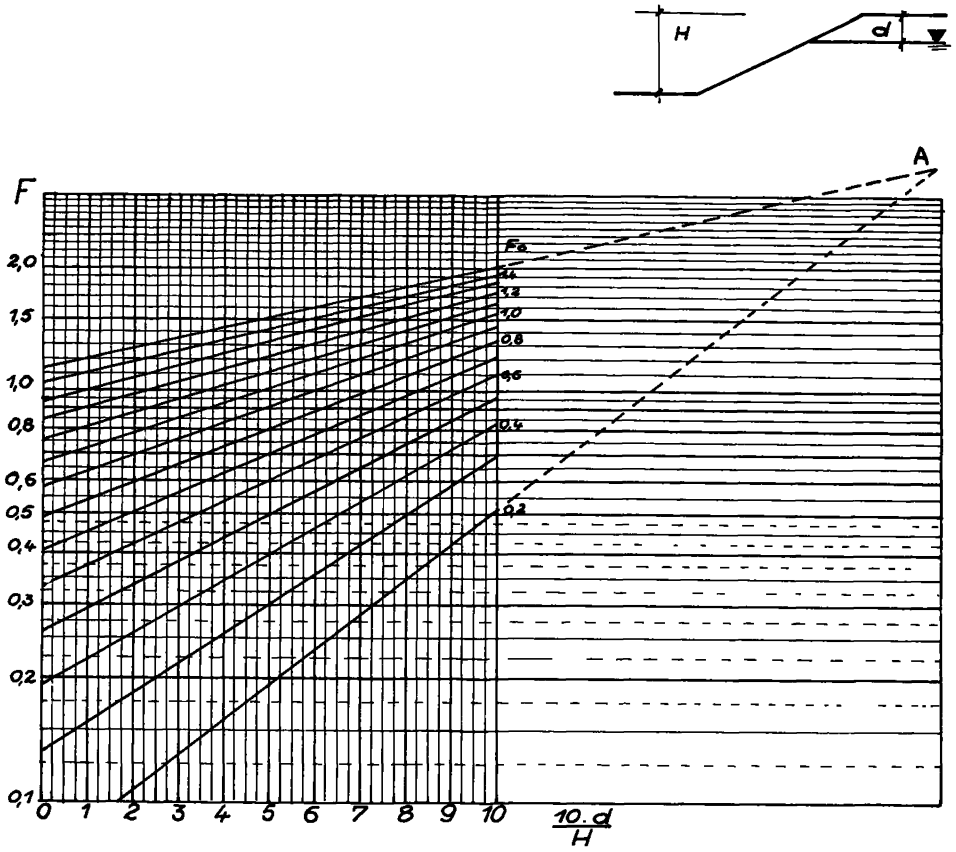

Fig. 11. — Variation du coefficient de sécurité avec la cote de la nappe.

de pente 1 : 2 reliant deux plans horizontaux AA′ et BB′ de différence de cote H ; la cote d de la nappe supposée horizontale sera exprimée à partir du plan supérieur BB′. Pour un tel talus, de propriétés mécaniques données (c' et $\varnothing'$), le coefficient de sécurité vaut F_0 lorsque $d = H/2$, et nous exprimerons F en fonction de F_0 par la formule trouvée expérimentalement :

$$ln(10\,F) = [0.237 - 0{,}0667 ln(10\,F_0)].\frac{10\,d}{H} + 1{,}333 ln(10\,F_0) - 1{,}187$$

qui se traduit sur une abaque en coordonnées semi-logarithmiques par une série de droites selon la valeur de F_0. Pour utiliser cette abaque, il faut calculer le coefficient F_1 pour une certaine cote d_1 de la nappe, et le coefficient F du même talus, lorsque la nappe variera, se situera sur la droite passant par le point de coordonnées d_1 et F_1.

IV. — Remèdes.

A) *Principaux remèdes.*

Lorsqu'un glissement de terrain ancien, actuel ou probable a été décelé, il faut alors décider des mesures à prendre : la décision peut être d'agir sur le glissement par des méthodes préventives ou curatives, mais elle peut aussi être de fuir le danger contre lequel les moyens d'action humains sont souvent impuissants ou trop onéreux.

Si l'apparition d'un mouvement de terrain est liée à la modification d'un ou plusieurs des paramètres de l'équilibre, il en sera de même pour toute tentative de stabilisation.

Les lois fondamentales ne peuvent pas être modifiées ; la loi rhéologique ne peut être améliorée que par l'intermédiaire de la cohésion qui, nous l'avons vu au § III, C, 4°, *b*, 2 croît lorsque la teneur en eau diminue ; quant aux conditions aux limites, il faut distinguer les conditions géométriques telles que la pente du talus qui dans la plupart des cas ne peuvent être modifiées dans le sens favorable, des conditions aux limites hydrauliques qui peuvent être améliorées par la diminution de la quantité et de la pression de l'eau ; l'eau intervenant en effet dans le coefficient de sécurité par la cohésion et la pression intersticielle. Il faut donc évacuer l'eau des zones dangereuses : le drainage est le moyen le plus efficace, et il peut s'effectuer selon divers procédés dont le plus utilisé est celui des drains subhorizontaux ; nous n'insisterons pas sur ces diverses méthodes qui sont parfaitement décrites dans la littérature technique. Nous citerons enfin la lutte contre l'érosion de surface qui peut être pratiquée essentiellement en favorisant la couverture végétale, en supprimant le ruissellement et en diminuant le pouvoir destructeur de petits cours d'eau.

B) *Dangers des remèdes.*

La mise en œuvre d'un remède ne doit s'effectuer qu'après une étude très sérieuse, car elle est souvent très onéreuse, mais surtout elle peut conduire à des effets imprévus encore plus désastreux que ceux contre lesquels on lutte. En faire un exposé complet reviendrait à citer tous les cas d'espèces ; aussi nous limiterons-nous à deux exemples significatifs.

Le premier exemple se rencontre assez fréquemment : lorsqu'on draine une zone instable, on peut être conduit à collecter les eaux de drainage dans des tranchées, des canalisations ou des buses en ciment ou en éternit qui sont des matériaux très rigides. Comme ils sont implantés avant la stabilisation des terrains, ces ouvrages ne suivent pas les déformations du sol, se brisent et perdent leur eau ; celle-ci est alors concentrée aux points de fuite, et cet effet est encore plus désastreux que la présence de cette eau répartie sur l'ensemble de la zone drainée.

Deuxième exemple : dans les Alpes du Sud, un petit torrent a entaillé son lit sur la pente d'un coteau assez peu stable ; le débit moyen de ce torrent est faible mais peut augmenter considérablement après de grosses précipitations, et il se mettait alors à éroder ses berges, détériorant ainsi la stabilité du coteau. Pour remédier à cette situation, il a été construit le long du lit du torrent des petits murs barrages en béton de façon à atténuer la violence du torrent. Celui-ci a déposé très rapidement des alluvions derrière ces murs et créé ainsi des rétentions d'eau qui s'est infiltrée dans le coteau dont les mouvements ont augmenté. On voit donc par cet exemple qu'un remède apporté à un facteur défavorable (l'érosion) peut augmenter considérablement une autre cause d'instabilité (les infiltrations) et le résultat des deux phénomènes

être parfois positif, mais la plupart du temps négatif.

Nous dirons, pour conclure ce chapitre, que lorsque le projet d'implantation d'un ouvrage, d'un bâtiment ou d'une route par exemple recoupe une zone instable ou susceptible de le devenir, le meilleur remède, lorsque cela est possible, est de modifier ce projet pour éviter la zone incriminée.

V. — Conclusion.

Nous pouvons résumer l'exposé précédent en énonçant qu'il nous apparaît comme essentiel que tout indice de mouvement (qu'il soit passé ou actuel) soit pris en compte avec le plus grand sérieux, car il traduit une instabilité dont on ne peut savoir à priori si elle ne conduira pas à un accident.

Cependant tout l'effort, et c'est là pour l'instant un des points délicats, consiste à se fixer un risque admissible compatible avec les observations, car il ne convient pas forcément de verser dans un pessimisme exagéré. Nous avons en effet constaté à maintes reprises que les calculs pour la prévision du risque maximal se pratiquent à partir de paramètres extrêmes ; les résultats obtenus dépassent alors très souvent un certain degré de risque que l'on peut considérer comme admissible. Si l'on systématise une telle attitude, celle-ci devient rapidement paralysante, et il faut alors renoncer à tout projet. Dans l'état actuel de nos connaissances, seule l'expérience acquise permet une position raisonnable, à mi chemin entre ces deux positions extrêmes. On est cependant très vite limité dans une voie aussi subjective en raison du peu de signification des comparaisons possibles.

Le but pratique des études entreprises actuellement est justement de rechercher des méthodes moins empiriques permettant de déterminer les divers paramètres intervenant dans le problème de la stabilité d'une pente, en serrant la réalité d'aussi près que possible, de façon à estimer raisonnablement les risques courus soit en face de glissements naturels, soit en fonction des aménagements projetés.

BIBLIOGRAPHIE

BIAREZ (J.) (1962). — Remarques sur les calculs de stabilité des talus (*Annales des Ponts et Chaussées*, n° 19, août 1962, p. 373-393).

BISHOP (A. W.) (1955). — The use of the slip circle in the stability analysis of slopes (*Geotechnique*, V, 1-7).

BOMBARD (J.-P.) (1968). — Une approche des problèmes posés par l'étude des mouvements de terrains. Essai méthodologique (Thèse de IIIe cycle, Fac. Sc. Grenoble).

CAQUOT (A.) (1954). — Méthode exacte pour le calcul de la rupture d'un massif par glissement cylindrique (*Proc. Eur. Conf. Stokholm*, 1954, vol. I).

CIABATTI (M.) (1964). — La dinamica della frana del Vajont (*G. Geol. Italia*, 32, n° 1, p. 139-154).

DESVARREUX (P.) (1970). — Recherche d'une méthode d'étude des mouvements de terrains et applications pratiques (Thèse de Docteur Ingénieur, Fac. Sc. Grenoble).

GOGUEL (J.) (1937). — Les glissements de terrains du Sud-Est de la France (*Annales des Ponts et Chaussées*, p. 47 60).

HEIM (A.) (1932). — Bergsturz Menschenleben, p. 218.

KERCKHOVE (C.) (1969). — La zone du Flysch dans les nappes de l'Embrunais-Ubaye (Alpes Occidentales) (*Géologie Alpine*, tome 45, p. 5-204).

MORET (L.) (1945). — Les éboulements de terrains en montagnes. Edition de *la Revue des Alpes*, Grenoble.

MÜLLER (L.) (1961). — 15e rapport géologique effectué pour la S.A.D.E.

SELLI (R.) et TREVISAN (L.) (1964). — Caratteri e interpretazione della frana del Vajont (*G. Geol. Italia*, 32, n° 1, p. 7-104).

SKEMPTON (A. W.) (1948). — The Ø = O stability analysis and its theorical basis (*Proc. 2nd Int. Conf. Soil. Mech.*, 2, 50-53).

— (1968). — Stability of earth slopes and embankments foundation (*Cong. Int. Mécan. Sols*, Mexico, 1968).

TAYLOR (D. W.) (1937). — Stability of earth slopes (*Jr of Boston Soc. of Civ. Ing.*, vol. XXIV, n° 3, juin 1937).

— (1948). — Fundamentals of soil mechanics.

Laboratoire de Géologie
de l'Université de Grenoble.
(Laboratoire de Géologie alpine
associé au C.N.R.S.)

Laboratoire de Mécanique des Sols
de l'Université de Grenoble.

Manuscrit déposé le 2 mars 1971.