

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Une Analogie Mécanique pour l'Étude de la Stabilité des Ouvrages en Terre à Deux Dimensions

A Mechanical Analogy for the Study of the Stability of Two-dimensional Earth Structures

par G. SCHNEEBELI, Ingénieur au Service des Études et Recherches Hydrauliques d'Électricité de France, Paris

Sommaire

L'analogie, mise au point pour la représentation d'un sol sans cohésion, consiste à remplacer ce dernier par un empilage de rouleaux cylindriques. Elle permet l'étude de tous les problèmes ne comportant que deux dimensions, c'est-à-dire la plupart des problèmes traités par la mécanique théorique des sols. Les modèles analogiques présentent, par rapport aux modèles réalisés avec du sable, l'avantage qu'ils éliminent entièrement l'effet des parois latérales que subissent ces derniers. Ils éliminent, du fait même de leur structure, les contraintes intermédiaires.

Des essais effectués au moyen d'un appareil de compression biaxiale, spécialement conçu, ont montré que les empilages de rouleaux se comportent exactement comme les milieux sans cohésion de la mécanique théorique des sols. L'angle de frottement interne semble dépendre surtout de l'état de surface des rouleaux. Actuellement, on a réalisé des ϕ allant de 24 à 35 degrés.

Pour obtenir des milieux isotropes, il est nécessaire d'utiliser des mélanges de rouleaux d'au moins deux diamètres différents. Il ne semble pas, cependant, que le dosage granulométrique ait une grande influence sur l'angle de frottement.

La nouvelle technique expérimentale se prête à l'étude directe de la plupart des problèmes qui se présentent en pratique. Elle permet de se contenter de modèles relativement très petits. Une application particulièrement intéressante consiste à relever photographiquement certaines lignes de glissement ce qui rend possible une étude théorique du problème au moyen de la théorie des lignes de glissement (équation de Kötter).

Introduction

En mécanique des sols, beaucoup de problèmes de stabilité d'ouvrages peuvent se ramener à deux dimensions. D'ailleurs la plupart des calculs théoriques que l'on peut faire présupposent des surfaces de glissement cylindriques et ne s'appliquent donc qu'à des problèmes plans. Il serait presque justifié de dire que la mécanique théorique des sols classique est bidimensionnelle. En effet, de nombreux développements ont pour base le critère de rupture de Coulomb que l'on peut écrire :

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2) \sin \phi + 2C \cos \phi \quad \dots (1)$$

Ainsi qu'on le voit, deux contraintes principales seulement y figurent.

Lorsque l'on veut étudier ces problèmes au moyen de modèles réduits, soit pour vérifier une théorie, soit pour obtenir des résultats directement applicables à un cas particulier, on se heurte à la difficulté suivante: Dans la plupart des modèles qui ont été réalisés, pour l'étude des massifs sans cohésion notamment, la tranche étudiée du massif est maintenue entre deux plaques latérales. Bien que l'on s'efforce en général de rendre ces plaques aussi lisses que possible (plaques de verre) on doit constater que le frottement sur ces parois fictives n'est pas négligeable et influe sur le résultat des essais. Ce phénomène, qui a notamment été signalé par M. Caquot, est extrêmement regrettable car il enlève beaucoup de valeur aux résultats que l'on peut obtenir avec un modèle. Et pourtant, en mécanique des sols comme en hydraulique ou en élasticité, la technique des modèles aurait pu être extrêmement fructueuse en raison de la difficulté que présentent souvent les calculs théoriques.

Summary

An analogical representation of a cohesionless soil is obtained by piling up cylindrical rods. It will apply to the study of all two-dimensional problems, that is to say most problems investigated by theoretical soil mechanics. Analogical models have the advantage that they are free from the lateral wall-effects which the classical sand-filled models undergo, and, owing to their very structure, they eliminate the intermediate stresses.

Tests, performed with a specially built biaxial compression apparatus, have shown that the piles of rods have exactly the same mechanical properties as the cohesionless media of theoretical soil mechanics. The angle of internal friction seems to be chiefly dependent on the surface roughness of the rolls. Angles ranging from 24 to 35 degrees have been obtained in the present tests.

In order to obtain isotropic media it is necessary to use rolls of at least two different diameters. However, it does not look as if the granulometric proportions have a great influence on the friction angle.

The new experimental method is fit for direct study of most of the practical problems encountered. It permits the use of relatively very small models. A particularly interesting application consists in the photographic recording of certain slip-lines, the knowledge of which will permit stress computations based on Kötter's equations.

Nous avons cherché à supprimer l'inconvénient dont souffrent les modèles réduits en nous orientant délibérément vers une représentation analogique du sol. Les grains de ce dernier sont remplacés par des rouleaux cylindriques de dimensions telles que l'empilage constituant le modèle puisse se passer de supports latéraux.

Les massifs ainsi réalisés sont véritablement bi-dimensionnels: la troisième dimension ayant non seulement été éliminée dans le système des forces extérieures agissant sur le massif, mais encore dans la structure même de ce dernier.

Nous voudrions dès maintenant répondre à certaines objections de principe qui seront évidemment faites à notre technique expérimentale. Ne faut-il pas craindre, nous dira-t-on, qu'en remplaçant un sol par un empilage de rouleaux, vous n'introduisiez dans le modèle des éléments étrangers au prototype? Et, inversement, les rouleaux présenteront-ils toutes les propriétés d'un sol? Avant de répondre directement à ces deux questions, nous pensons qu'il n'est pas inutile de nous arrêter un instant à des considérations d'ordre plus général.

Lorsque, après d'autres Laboratoires, le Service des Études et Recherches Hydrauliques d'Électricité de France a abordé l'étude sur modèle des grands barrages-voutes, il a été procédé à une analyse approfondie des techniques et également des tendances générales en matière de modèles. NIZERY, REMENIERAS et BEAUJOINT (1953) ont constaté:

'Les techniques expérimentales varient largement d'un laboratoire à l'autre, mais surtout les idées directrices sont loin d'être convergentes. Les uns préfèrent limiter leurs ambitions

à la recherche d'une similitude correcte dans le domaine élastique. Les autres, devant la complexité du comportement des matériaux, voient dans le modèle l'instrument qui leur donnera une image synthétique du comportement de l'ouvrage. On oscille ainsi entre un empirisme peut-être excessif et la recherche d'une similitude rigoureuse peut-être aussi excessive, entre le modèle "machine à calculer" et le modèle "pour voir".

Les matériaux de la mécanique des sols ont un comportement encore plus complexe et peut-être moins bien connu que le béton des grands barrages. Il est peu probable qu'il soit possible d'obtenir, dans ce domaine, ce qu'on peut appeler une 'similitude rigoureuse'. Quant au modèle 'pour voir', il ne saurait être envisagé qu'en tant que modèle 'grandeur presque nature' réalisé avec le même matériau que le prototype.

Il se trouve donc que la complexité même des propriétés du matériau 'terre' rend futile le débat entre les protagonistes des deux tendances. Car s'il est vrai que la complexité d'un phénomène fournit aux esprits tournés vers l'empirisme des arguments faciles contre toute tentative théorique, cette même complexité condamne l'empirisme pur et simple, sinon à rester stérile, du moins à piétiner longtemps sur place.

Rappelons à ce propos que la mécanique des sols a commencé à progresser rapidement le jour où l'on a eu l'audace d'appliquer systématiquement à un matériau très complexe des schémas théoriques très simples. C'est là en effet qu'il faut voir l'essentiel de l'œuvre de Terzaghi. Les matériaux de la *Mécanique théorique des sols* sont des matériaux théoriques beaucoup plus simples que les sols réels, et Terzaghi a pris grand soin de ne pas les confondre avec ces derniers. Ils ont en commun avec les sols certaines propriétés schématisées certes, mais qui apparaissent cependant essentielles. Il existe donc indubitablement entre les deux classes de matériaux (matériaux réels et matériaux théoriques) une analogie fondamentale dont l'expérience a amplement démontré l'intérêt. C'est une analogie de cet ordre que nous avons cherché à matérialiser au moyen de nos empilages de rouleaux. Nous répondrons donc ceci aux questions soulevées ci-dessus:

Peu nous importe que les rouleaux présentent ou non toutes les propriétés d'un sol réel. L'important est qu'ils aient certaines propriétés fondamentales sur lesquelles est basée notre analogie. Bref, nous ne demandons à un empilage de rouleaux que trois choses: être homogène et isotrope et obéir à la loi de Coulomb exprimée par l'équation 1.

Ceci définit avec précision les possibilités et les limitations de l'analogie que nous proposons. Ajoutons à cela que, jusqu'à présent, nous nous sommes bornés à rechercher une analogie pour les matériaux sans cohésion caractérisés théoriquement par le critère de rupture:

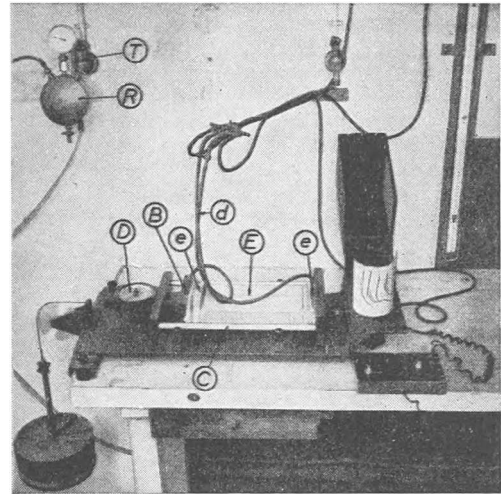
$$\sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2) \sin \phi \quad \dots (2)$$

L'Appareil de Compression Biaxiale

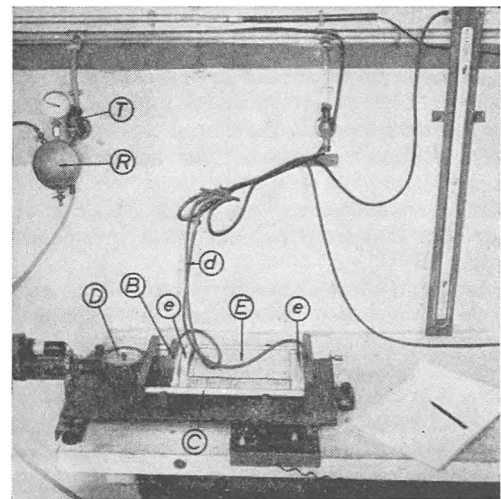
Pour vérifier si les empilages de rouleaux satisferont à ce critère, il a fallu mettre au point un appareillage expérimental spécial. Pour les tous premiers essais, nous nous sommes contentés de montages extrêmement sommaires et nous avons notamment utilisé un appareil de compression et de traction qui avait été mis au point par M. Beaujoint pour des essais d'éprouvettes en caoutchouc lors de l'étude sur modèle des barrages de Tignes et de Roselend. Bien que cet appareillage fût très mal adapté à nos besoins, ces premiers essais nous ont encouragé à persévérer.

L'appareil de compression biaxiale que nous avons construit ensuite s'inspire quant à son principe, des appareils triaxiaux classiques. Il en diffère, cependant, notablement du point de vue de sa réalisation. L'appareil est montré par les photographies de la Fig. 1. L'éprouvette *E*, constituée par l'empilage

des rouleaux, est recouverte d'une enveloppe mince en feuille anglaise. Elle est montée sur deux embases *e* sur lesquelles sont branchées des canalisations *d* connectées au réservoir *R*. La trompe à vide *T* permet de créer une dépression dans le réservoir et dans l'éprouvette. C'est cette dépression qui produit l'étreinte latérale. La compression longitudinale est obtenue au moyen du cadre mobile *C* qui écrase l'éprouvette



(a)



(b)

Fig. 1 Appareil de compression biaxiale: (a) pour les essais à charge constante; (b) pour les essais à dépression constante

E, éprouvette; *e*, embases; *d*, canalisations permettant de créer la dépression; *R*, réservoir; *T*, trompe à vide; *C*, cadre mobile; *D*, dynamomètre

Biaxial compression apparatus: (a) for tests at constant load; (b) for tests at constant reduced pressure

E, specimen; *e*, base; *d*, connections for creating the reduced pressure; *R*, reservoir; *T*, vacuum line; *C*, movable frame; *D*, dynamometer

contre la butée *B*. L'effort total de compression exercé par ce cadre est lu sur le dynamomètre *D*. Afin d'éliminer l'action de la pesanteur, l'éprouvette est disposée horizontalement (l'axe des rouleaux étant vertical).

L'appareil permet de choisir entre deux modes opératoires:

1. *Essais à dépression variable et charge constante* — Une traction constante est alors exercée sur le cadre au moyen d'un poids en fonte. La poulie de renvoi de grand diamètre est montée sur roulement à billes pour réduire au minimum le frottement. De même, le guidage du cadre se fait par des

roulements. Le déplacement du cadre, c'est-à-dire le raccourcissement de l'éprouvette, est transmis au tambour de l'appareil enregistreur de la dépression. L'essai consiste à faire décroître lentement celle-ci jusqu'à la rupture. On obtient directement l'enregistrement déformation-dépression.

2. *Essais à dépression constante et déplacements imposés* — Au cours de ces essais la dépression est maintenue constante dans l'éprouvette. Le cadre est tiré par une vis sans fin actionnée par un petit moteur électrique. L'effort exercé sur le cadre est indiqué sur le dynamomètre. La Fig. 2 montre les courbes

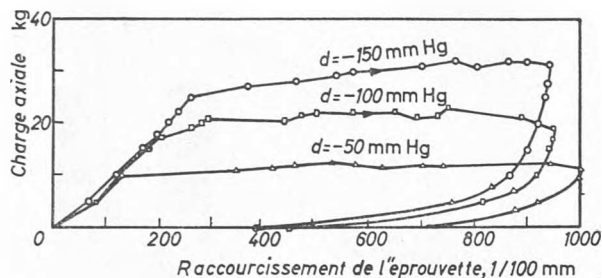


Fig. 2 Courbe charge axiale—raccourcissement au cours d'un essai à dépression constante. Rouleaux dural sablés, 50% Φ 3 mm, 50% Φ 2 mm

Curve of axial load against shortening during a test at constant reduced pressure

charge axiale — raccourcissement relevées pendant des essais à dépression constante.

Les Résultats Obtenus

Pour les tous premiers essais, nous avons utilisé des rouleaux en nylon de 9 mm de diamètre et de 40 mm de longueur. Il est apparu aussitôt qu'un empilage de ces rouleaux ne saurait être considéré comme isotrope. En effet, il est aisé de voir que les centres des rouleaux se trouvent aux nœuds d'un réseau de triangles équilatéraux et qu'il existe de ce fait trois directions privilégiées faisant entre elles des angles de 60 degrés. Les essais ont montré que tous les glissements se produisaient selon ces directions.

Nous avons eu alors l'idée de recourir à un mélange de rouleaux de 9 mm et de 6 mm de diamètre. Ces rouleaux sont d'abord mélangés puis empilés au hasard. A condition évidemment de considérer un élément de surface qui ne soit pas trop petit, il n'est plus possible de déceler des directions privilégiées. L'empilage est devenu homogène et isotrope 'en moyenne'. Nous n'insisterons pas sur cette notion de moyenne qui est intuitive. Disons simplement que, pour représenter correctement un échantillon du sol, le massif de rouleaux devra avoir des dimensions grandes par rapport au diamètre de ces derniers. Il en résulte que l'on a intérêt à utiliser des rouleaux de faible diamètre si l'on veut limiter les dimensions des modèles.

C'est pour cette raison que nous avons finalement étudié des empilages de rouleaux en duralumin de 3 mm et de 2 mm de diamètre, et de 39.5 mm de longueur moyenne, ces dimensions correspondant à peu près à la limite inférieure compatible avec une manipulation aisée des empilages.

Les planches données en Fig. 3 montrent les résultats des essais effectués. Chaque cercle de Mohr correspond, en principe, à la moyenne de trois essais.

On voit que les empilages étudiés satisfont remarquablement bien le critère de Coulomb: L'angle de frottement est bien défini pour chaque matériau. La faible cohésion que l'on remarque sur les diagrammes de Mohr provient de la capote en caoutchouc qui entoure l'éprouvette. La valeur est sensible, ainsi que des essais particuliers l'ont montré, à l'épaisseur de la feuille anglaise ayant servi à la confection de la capote.

Tous les essais ont été faits, aussi bien à charge constante

qu'à dépression constante. Les angles de frottement obtenus ne semblent pas dépendre du choix de l'un ou l'autre de ces modes opératoires. Il est indépendant également de la section et de la forme de l'éprouvette ainsi que le montrent les planches c et d de Fig. 3. L'éprouvette standard est rectangulaire et mesure environ 151 x 222 mm. Nous avons également utilisé une éprouvette à section rétrécie (voir Fig. 4).

Par contre, le remaniement de l'éprouvette entre deux essais successifs joue un rôle très important. Si on se contente de restituer sa forme initiale à l'éprouvette déformée on constate, au cours de l'essai suivant, que sa résistance est nettement diminuée (voir Fig. 5). Ceci est dû, sans aucun doute, à l'apparition, au voisinage des plans de glissement, d'une structure plus lâche des rouleaux, structure qui est conservée si l'éprouvette est simplement redressée. Tous les essais ont donc été effectués après un remaniement complet de l'éprouvette qui a ainsi retrouvé, après chaque essai, sa structure initiale.

Le Tableau 1 résume les caractéristiques des principaux empilages essayés. Remarquons que le poids spécifique bidimensionnel qui figure dans ce tableau correspond au poids d'un prisme de rouleaux de 1 cm² de section. Pour obtenir le poids spécifique ordinaire de l'empilage il faut diviser γ par la longueur des rouleaux soit environ 3.95 cm pour les rouleaux en duralumin et 4 cm pour les rouleaux en nylon.

Tableau

Caractéristiques des principaux empilages essayés
Description and properties of the principal rod piles tested

Nature des rouleaux	Granulométrie Φ en mm	Poids spécifique bidimensionnel γ gr/cm ²	Angle de Frottement ϕ degrés
Nylon	50% Φ 9; 50% Φ 6	4.2	24
Dural lisse	20% Φ 3; 80% Φ 2	9.0	24
	50% Φ 3; 50% Φ 2	9.2	26
	67% Φ 3; 33% Φ 2	9.1	25
	80% Φ 3; 20% Φ 2	9.2	25
Dural sablé — rouleaux usés	50% Φ 3; 50% Φ 2	8.9	35
	50% Φ 3; 50% Φ 2	8.9	34

Il résulte des valeurs de γ obtenues pour les différents mélanges de rouleaux de duralumin lisses de 3 et de 2 mm de diamètre que l'angle de frottement ne varie que très faiblement avec la granulométrie. En fait il doit dépendre surtout de la porosité, c'est-à-dire de γ . Malheureusement il est assez difficile de mesurer très exactement la section d'une éprouvette et les valeurs γ figurant au Tableau 1 ne sont qu'approximatives.

Par contre il apparaît très nettement que l'état de surface des rouleaux influe beaucoup sur l'angle de frottement. Le mélange 50 pour cent Φ 3 mm, 50 pour cent Φ 2 mm, de rouleaux de duralumin voit son angle de frottement augmenter de 9 degrés après sablage des rouleaux. La légère diminution du ϕ des rouleaux sablés après un usage prolongé de ceux-ci, que nous avons attribuée à l'usure, confirme également l'importance de l'état de surface.

Conclusions

D'intéressantes perspectives semblent devoir s'ouvrir à la nouvelle technique expérimentale. Dès à présent nous l'avons utilisée pour l'étude des batardeaux à double paroi de palplanches fondés sur sol rocheux (Fig. 6). Nous rendons compte par ailleurs des résultats de ces essais (voir SCHNEBELI, G. et CAVAILLÉ-COLL, R., 1957). Disons simplement que ceux-ci consistaient à mesurer directement les moments maxima de renversement auxquels les batardeaux étaient susceptibles de résister. Les moments obtenus avec des empilages de rouleaux étaient nettement plus faibles que ceux que donnait un modèle

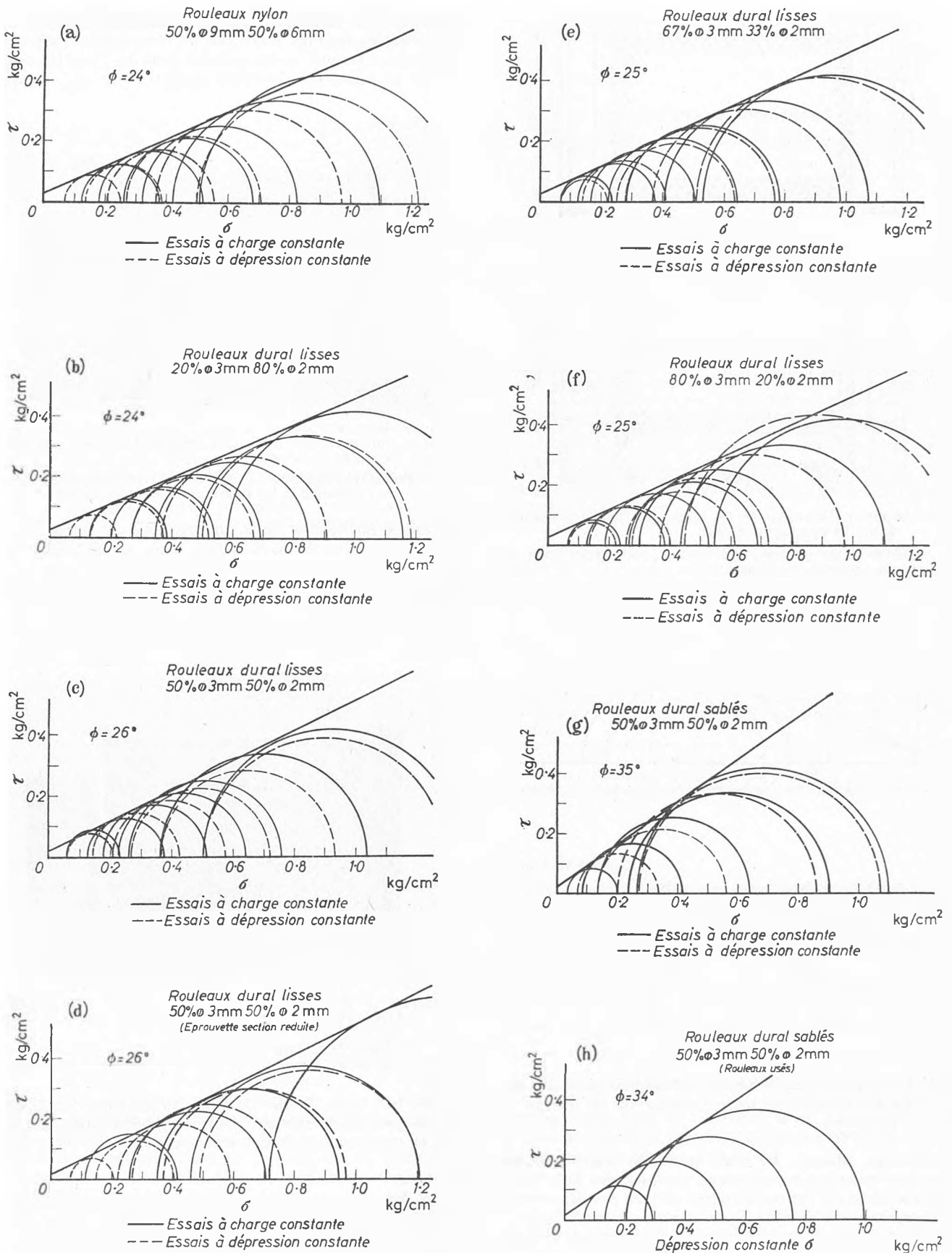


Fig. 3 Résultats d'essais de compression biaxiale réalisés sur des mélanges de rouleaux de composition variable
Results of biaxial compression tests obtained with mixtures of rods in various proportions

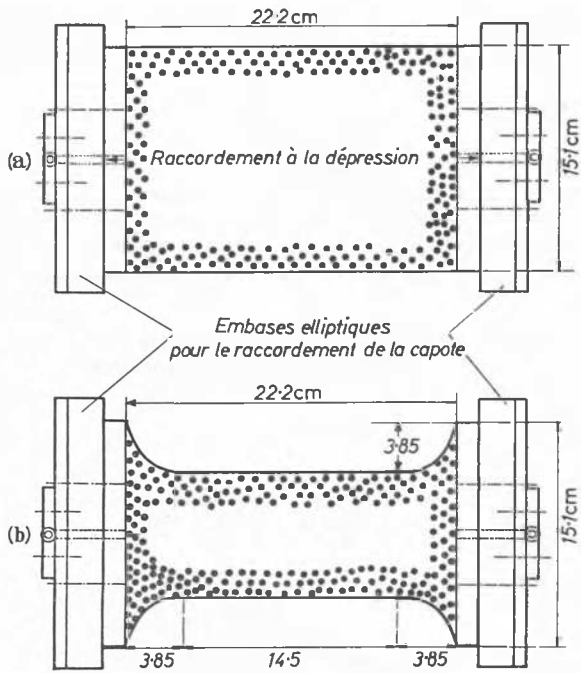


Fig. 4 Forme de l'éprouvette: (a) éprouvette standard rectangulaire; (b) éprouvette rétrécie
Shape of the specimen: (a) standard rectangular specimen; (b) specimen of reduced width

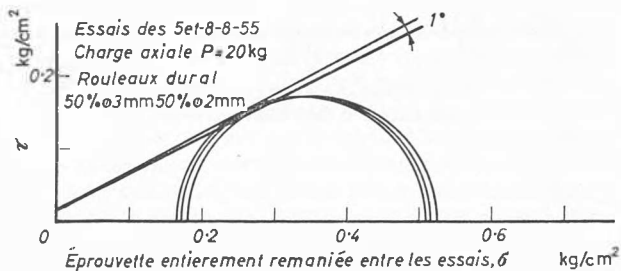
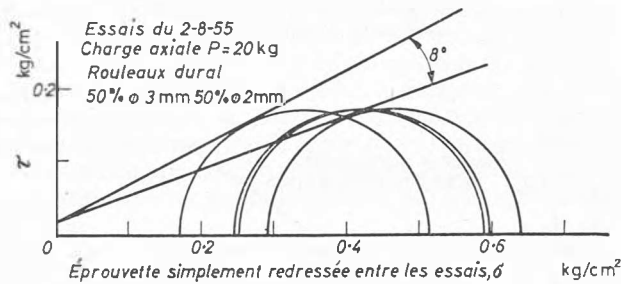


Fig. 5 Essais de compression biaxiale; influence du mode opératoire
Biaxial compression tests; influence of the method of operation

à remplissage sableux. La seule utilisation d'un tel modèle aurait donc conduit à surestimer la résistance des batardeaux, ce qui est grave car l'erreur commise ne joue pas dans le sens de la sécurité.

On peut concevoir de même des modèles destinés à l'étude de la stabilité d'une fondation, de problèmes de poussée et de butée, d'ancrage et, d'une façon générale, de tous les ouvrages en terre.

Une application intéressante consiste à déterminer photographiquement certaines lignes de glissement limites. Les photographies des Figs. 6 et 7 ont été obtenues en faisant une pose pendant la durée du mouvement du voile. La détermination de ces lignes de glissement permet d'une part, de bien

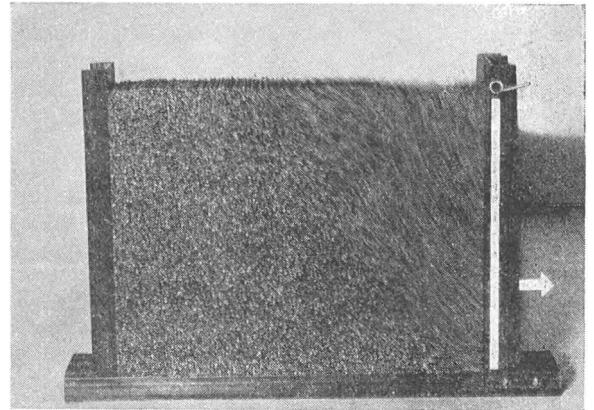


Fig. 6 Voile de soutènement articulé à son sommet (pose photographique montrant le mouvement des rouleaux et la ligne de glissement limite)

Retaining plate hinged at the top. (Time exposure showing the movement of the rods and the limiting slip-line)

entrevoir le phénomène de la rupture, mais elle permet aussi d'effectuer des calculs de résistance basés sur la théorie des lignes de glissement (on sait en effet que la connaissance d'une ligne de glissement permet le calcul des contraintes agissant le long de cette ligne).

Signalons enfin que les empilages de rouleaux permettent ainsi que l'expérience nous l'a montré, de se contenter des

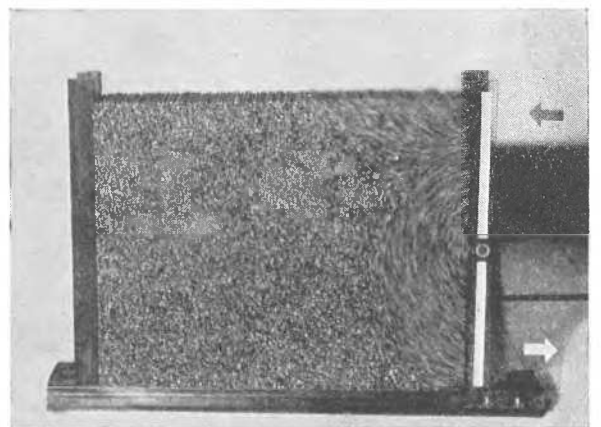


Fig. 7 Voile de soutènement articulé en son centre. (Pose photographique montrant le mouvement des rouleaux et les lignes de glissement limites)

Retaining plate hinged at the centre. (Time exposure showing the movement of the rods and the limiting slip-lines)

modèles très petits, l'ordre de grandeur de leurs dimensions étant de quelques décimètres. Notre méthode d'étude présente donc, en outre, un intérêt économique certain.

Références

- NIZERY, A., REMENIERAS, G. et BEAUJOINT, N. (1953). Étude sur modèle réduit des contraintes dans les barrages. *Annales des ponts et chaussées*. Juillet-October
- SCHNEEBELI, G. et CAVAILLÉ-COLL, R. (1957). Contribution au calcul de la stabilité des batardeaux à double paroi de palplanches. *Proc. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 2, 233.