

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.

Efforts exercés par les sols sur les ouvrages

Earth Pressure on Structures and Tunnels

RAPPORT GÉNÉRAL

Rapporteur général : Stanislas M. HUECKEL, Dr. Ing., Professeur à l'Ecole Polytechnique de Gdańsk, Directeur de l'Institut Hydrotechnique de l'Académie Polonaise des Sciences, à Gdańsk, Pologne

Introduction

Vingt et un Rapports ont été envoyés pour être présentés à la Section 5 ; ils constituent un ensemble important surtout si on les compare aux treize Rapports présentés au Congrès de Londres, d'autant plus qu'en 1958 a eu lieu une Conférence à Bruxelles, consacrée exclusivement aux problèmes de la poussée et de la butée des terras. Comme à cette Conférence 33 rapports ont été discutés, on aurait pu craindre que l'intérêt pour ces questions soit épuisé et qu'un petit nombre de rapports seulement soit envoyé au Congrès de Paris. Les faits ont cependant démenti ces appréhensions et ont prouvé que ce domaine est toujours vivant et en évolution.

Il y a lieu néanmoins de souligner, que malgré leur nombre, les rapports n'étudient qu'une faible partie du domaine considéré, et, qu'un certain nombre de problèmes essentiels n'ont pas été abordés. C'est pourquoi, conformément à l'idée suggérée par le Comité d'Organisation, je me référerai non seulement aux rapports reçus, mais aussi aux plus intéres-

santes contributions publiées depuis 1957. Je ne ferai appel néanmoins aux communications de la Conférence de Bruxelles qu'en cas de nécessité, car je pose en principe que les résultats des manifestations de notre Association sont bien connues de tous les participants du Congrès.

Je suis convaincu qu'en raison des dimensions limitées de mon rapport j'ai passé sous silence plusieurs contributions publiées hors du Congrès, et qui auraient mérité d'être citées. J'espère qu'on ne m'en tiendra par rigueur et que les auteurs intéressés compléteront les contributions au Congrès en présentant des communications sur les résultats de leurs travaux lors de la discussion.

Je classerai les rapports présentés sous les rubriques adoptées par mes prédécesseurs, les Rapporteurs généraux des Congrès précédents, en soulignant quelques problèmes spéciaux. Pour faciliter l'orientation des lecteurs, j'ai présenté ci-après un tableau dans lequel les rapports sont classés selon leur objet et selon la méthode de recherche.

| | <i>Recherches</i> | | | | <i>Descriptions des ouvrages</i> |
|---|---------------------|-----------------------|--|--|---|
| | <i>Théoriques</i> | <i>En laboratoire</i> | <i>Sur modèles réduits</i> | <i>En place</i> | |
| Théories générales | DAVIN ; PRAMBORG | | | | |
| Palplanches et fouilles blindées | | | VERDEYEN et ROISIN ; ROWE et BRIGGS ; | DI BIAGIO et KJAERNSLI ; HEYMAN et BOERSMA ; | GOLDER ; HARDING et JENKINS ; Trois groupements italiens ; LEECH et PENDER. |
| Efforts exercés sur les fondations et les murs de soutènement | | | BIAREZ et CAPELLE ; CHAZY et HABIB ; | PECK et IRELAND ; | |
| Question : « butée-frottement » « parois-terre » déplacement » | | | HUECKEL et KWAŚNIEWSKI ; SCHOFIELD ; | | |
| Pressions exercées par les sols gonflants et les sols en fluage | | ŠUKLJE et VIDMAR ; | | KASSIF et ZEITLEN ; | |
| Silos | | | BUISSON et COMERRE ; | | |
| Tunnels | | | | DE REEPEE ; | |
| Mesures des pressions dans le sol | | | | TROLLOPE et LEE ; WIKRAMARATNA ; ICHIHARA et TAKAGI. | |

Théories à caractère général

La contribution de M. M. DAVIN (5/4) traite du problème tridimensionnel des déformations dans les milieux pulvérulents en état d'équilibre limite. L'auteur établit six équations nécessaires pour déterminer les six composantes du tenseur des contraintes. Trois d'entre elles sont déduites des conditions d'équilibre des contraintes aux points de contact entre grains, après l'application du tenseur au milieu, les trois autres sont déduites des équations de continuité.

Pour déterminer les trois premières équations l'auteur se sert d'un modèle théorique simplifié, composé de cylindres empilés et étudie le schéma des contraintes à l'état-limite en admettant que parmi les points de contact entre grains certains cessent d'exister du fait de l'écartement des deux grains, certains subsistent comme points de roulement, et les autres comme points de frottement.

Il poursuit l'étude à l'aide de l'appareil mathématique de la théorie de plasticité ; les équations résultantes ne permettent pas, comme le soutient l'auteur, d'obtenir dans les cas généraux des solutions par intégration, "mais elles permettent de définir des caractéristiques et d'aborder certains cas simplifiés par l'existence d'une symétrie".

Le rapport de M. Davin étant un des essais, peu nombreux d'ailleurs, de solutions théoriques du problème de l'équilibre-limite dans un milieu pulvérulent à trois dimensions, mérite l'attention.

M. B. O. PRAMBORG (5/14) traite de quelques solutions approximatives du problème plan de l'équilibre plastique d'un sol pulvérulent de densité non nulle.

Ces deux rapports constituent des contributions importantes à la théorie générale de l'équilibre du sol, et ils intéresseront également les participants de la section 3 A, de notre Congrès. Les thèmes de ces rapports ne rendent néanmoins qu'à un degré bien modeste toute la variété des nouvelles tendances, qui s'expriment actuellement dans le domaine de la poussée et de la butée des terres.

Avant de faire le point de nos connaissances dans le domaine qui nous intéresse, il y a lieu de souligner, que la théorie fondamentale de Coulomb n'a rien perdu de son actualité jusqu'ici, et continue d'être la base de l'activité des praticiens. Depuis 1957, dans divers pays une quinzaine environ de contributions à cette théorie ont paru, dont je ne voudrais pas charger la liste des références. Ces contributions traitent surtout de la solution de cas plus compliqués, rencontrés dans la pratique de l'ingénieur ; il ne manque même pas de manuels nouveaux avec des tableaux numériques pour faciliter l'utilisation des méthodes basées sur la théorie de Coulomb.

Les autres méthodes, basées sur les lois de l'élasticité, ou sur celles de l'équilibre limite ou plastique, bien connues et appréciées dans les milieux scientifiques, ne le sont pas encore partout dans les milieux des ingénieurs praticiens.

Cela tient peut-être au fait que leur application est difficile sans tableaux numériques ou nomogrammes, ceux-ci étant élaborés uniquement pour les cas les plus simples. En outre on regrette l'absence d'une définition exacte des conditions et des limites dans lesquelles les diverses méthodes doivent être prises en considération.

Je me permets de citer ici le professeur Kerisel [1957] qui dans son rapport général à Londres avait écrit : "Dire que pour de petites déformations, il faut appliquer les théories de l'élasticité, et pour de grandes déformations, celles de la plasticité n'est qu'une réponse partielle ; il faut préciser quelles sont les valeurs des déformations en cause dans chaque domaine, et comment joue alors la déformabilité de la structure pour altérer la distribution des contraintes". Ces précisions n'étant pas encore apportées, on est désorienté et c'est là que git le deuxième motif de l'insuffisante répartition des méthodes en question. Je reviendrai à ce problème

en me référant aux rapports concernant les essais sur modèles réduits.

Dans ces dernières années la théorie de l'équilibre limite des milieux pulvérulents de Sokolowski [1954] est de plus en plus appréciée dans les milieux scientifiques et plusieurs applications de cette théorie ont été publiées dans divers pays. En France, c'est dans les Laboratoires de Mécanique des Fluides de l'Université de Grenoble que cette théorie est développée et appliquée aux problèmes de poussée et butée des terres, et depuis 1957 quelques contributions ont été présentées à l'Académie des Sciences. [B. Wack, 1960, N. van Thach, 1960 et autres.]

Une contribution originale est aussi rapportée par Kézdi [1961] qui traite de l'état des tensions dans un coin plastique de dimensions infinies. Entre parenthèses, le livre dans lequel Kézdi publie sa contribution est une monographie importante, qui constitue une revue subtile et critique de l'état actuel des théories concernant la poussée et la butée des terres.

De Josselin de Jong [1959] apporte une autre contribution de valeur applicable aux problèmes de poussée ; il présente une construction graphique qui permet une détermination simple de la forme des lignes de glissement.

Les recherches de nouvelles solutions se poursuivent. Par exemple à la Conférence de Bruxelles un intéressant rapport de A. S. Stroganov [1958] a échappé à la discussion. L'auteur y analyse l'état des tensions dans les sols en basant ses recherches sur un autre critère de plasticité que le critère de Coulomb-Mohr adopté d'habitude pour les sols ($\tau_{\max} = \text{const.}$) et notamment sur le critère énergétique de Mises-Botkin. Les résultats des expériences de Stroganov ont confirmé les résultats de ses recherches théoriques.

La théorie de l'élasticité et la théorie de la plasticité se basent sur l'hypothèse d'un milieu continu, elles ne doivent donc être appliquées qu'aux sols dans lesquels cette continuité est assurée. Dans la plupart des cas, même les sols pulvérulents, bien que physiquement discontinus, peuvent être considérés comme remplissant la condition de continuité. Il y a néanmoins certains types de déplacements qui ne correspondent pas exactement aux hypothèses classiques : élastiques, plastiques ou même rhéologiques. Dans tous les cas pareils c'est la théorie de la probabilité qui vient au secours des théoriciens.

Dans ce domaine on fait en Pologne [Litwiniszyn, 1956] des recherches sur les applications de la théorie des probabilités aux problèmes de mouvement du sol. Comme modèle théorique on prend le milieu dit "stochastique" c'est-à-dire le milieu dans lequel les mouvements des éléments sont déterminés par les lois des probabilités. On essaie entre autres de résoudre le problème de poussée statique au repos (pression at rest) par l'application des lois précitées.

Ce bref et incomplet coup d'œil sur l'état actuel des théories de poussée et de butée confirme la thèse que les contributions présentées au Congrès ne représentent qu'une partie minime des problèmes constituant le domaine de recherche qui nous intéresse. Il est regrettable que les rapports fournis à ce groupe aient été si peu nombreux.

Palplanches et fouilles blindées

Ce problème fait l'objet d'un intérêt constant de la part des chercheurs, et la meilleure preuve en est que le nombre des rapports présentés (7) est assez considérable.

Le Prof. VERDEYEN et M. ROISIN (5/20) ont décrit les essais extrêmement intéressants sur un appareil-modèle type Schneebeli. Ils étudient l'influence des charges ponctuelles (ou concentrées le long d'une droite) sur un massif de terres maintenu par un rideau de palplanches, en fonction des caractéristiques du rideau. Les essais ont mis en évidence les figures de rupture correspondant à chaque position de surcharge,

ainsi que les conséquences d'un déplacement de l'appui en tête de la palplanche.

On a constaté qu'une charge ponctuelle cesse d'exercer une action sur le rideau si elle est écartée de ce dernier d'une valeur $x \geq 1,34 H$, (H — étant la hauteur libre du rideau). On a mis aussi en évidence que la résultante des pression dues à la charge concentrée se localise d'autant plus haut sur le rideau que la dite charge s'éloigne.

Une faible déformation de l'appui en tête ($a \leq 0,06 H$) n'exerce une influence sur l'état d'équilibre du massif que pour les charges proches du rideau ($x \leq 0,65 H$); une grande déformation de l'appui ($a \geq 0,1 H$ — correspondant pratiquement à une avarie) peut reporter sur la palplanche une charge éloignée de plus de $1,34 H$, car la figure de rupture correspondante change de caractère.

Les essais n'étaient pas terminés lors de l'élaboration du rapport; nous espérons que les auteurs nous communiqueront les résultats ultérieurs des essais lors de la discussion au Congrès.

L'intérêt de ces essais est qu'ils matérialisent l'influence des charges ponctuelles sur le rideau; ce problème n'a pas trouvé jusqu'à présent une solution théorique satisfaisante, les diverses théories fournissant des résultats très différents.

Le Prof. P. W. ROWE et M. A. BRIGGS (5/16) nous ont présenté une nouvelle série d'essais sur modèle réduit, faisant suite aux brillants essais effectués depuis quelques années à l'Université de Manchester.

Pour cette fois on nous a fourni des résultats d'essais sur un modèle d'écran souple formant blindage d'une excavation. On a mesuré les forces sur les appuis, les déformations de l'écran et les contraintes dans le sable, celles-ci avec des cellules d'un nouveau type à diaphragme dont la flexion ne dépasse pas $1/200$ du diamètre. Le nombre des niveaux des appuis changeait graduellement de un à quatre. Les dimensions du modèle étaient 1 m en profondeur, sur 2 m de largeur environ, l'échelle des essais n'était pas alors trop réduite ($1/5$ environ). En conclusion les auteurs se sont bornés à une constatation générale que les essais démontrent le principe du transfert des contraintes des éléments flexibles aux éléments rigides, et que dans le cas d'un écran souple étayé, il faut séparer le problème de déformation de celui de rupture, le premier étant décisif pour le calcul de poussée quand il y a plusieurs niveaux d'étais, l'autre — quand il n'y en a qu'un. Le calcul de butée se trouve être dans les deux cas une question de déformation. Un rapport direct a été constaté entre le déplacement des appuis et la valeur de l'angle de cisaillement mobilisé. Ces conclusions importantes nous donnent quelques indications pour la solution du problème, posé par le professeur Kérisel au Congrès de Londres.

M. M. E. DI BIAGIO et B. KJAERNSLI (5/5) nous montrent les résultats des mesures exécutés sur des palplanches en vraie grandeur, formant blindage d'une excavation du métro à Oslo. Ces études forment un supplément intéressant aux essais précités de M. M. Rowe et Briggs. L'étaient se composant de quatre niveaux d'étaisons, on a mesuré les contraintes dans les étais, à mesure de l'approfondissement de l'excavation, ainsi que les déformations et les tassements du rideau et du sol.

En comparant les résultats des mesures avec ceux du calcul théorique basé sur les méthodes de R. Peck et de J. Brinch Hansen, on a constaté que la première méthode (celle de Peck) donne pour des excavations peu profondes des valeurs des contraintes dans les étais un peu trop basses. Pour les excavations profondes (dont la profondeur atteint la valeur

égale à $\frac{4c'}{\gamma}$) la méthode de Peck donne des résultats plus approchés, bien que les contraintes dans les étaisons supé-

rieurs calculées selon Peck, soient sous-estimées et celles des étaisons du niveau inférieur surestimées.

La méthode Brinch Hansen donne de bons résultats, mais ici aussi les contraintes dans les étais du niveau inférieur sont surestimées.

Les auteurs ont constaté aussi que la température constitue un facteur important dans ce problème.

Les proportions des ouvrages étant différentes de celles utilisées dans les essais de Rowe et Briggs (5/16), on ne peut pas comparer les résultats immédiatement, mais d'une façon générale, les mesures norvégiennes confirment les résultats des recherches britanniques.

L'intéressant rapport de M. M. L. HEYMAN et L. BOERSMA (5/8) ne rentre pas exactement dans le cadre du groupe de rapports considéré ici, car il concerne les moments de flexion qui se produisent dans des pieux soumis à la poussée. Le problème, toutefois, est similaire.

On a étudié trois pieux en acier, à section fermée, d'une longueur de 12,5 m, enfoncés dans un sol compressible entre deux couches de sable. L'épaisseur de la couche compressible (tourbe, argiles plastiques, etc.) forme 75 pour cent de la longueur des pieux. Après avoir battu ceux-ci sur un rang à une distance l'un de l'autre de 5 m, on a soutenu leurs extrémités supérieures au moyen d'étais horizontaux posés en surface du sol et appuyés à leur tour sur une poutre massive en béton, fondée sur des pieux inclinés.

Sur le terrain on a élevé à une distance initiale de 30 m des pieux, un remblai de sable, d'une hauteur de 7 m. On a élargi ce remblai vers les pieux au fur et à mesure du cours de l'expérience. En même temps on a mesuré les déformations des pieux en 8 points de chacun d'eux, les contraintes provoquées dans les étais, les déformations du sol (et en particulier de la couche de tourbe) et les pressions interstitielles.

Les essais ont démontré que dans les pieux chargés comme il est dit ci-dessus il se produit des contraintes qui excèdent les contraintes admissibles dans les matériaux constitutifs des pieux normalement utilisés. Déjà dans le cas d'une distance de 10 mètres entre le rang de pieux et la base du remblai on a mis en évidence des moments de flexion dans les pieux atteignant 14 tm et des déformations du sol jusqu'à la profondeur de 10 m. Les conclusions pratiques de ces constatations s'imposent d'elles-mêmes.

En passant, il y a lieu de souligner que les observations des déformations et des contraintes dans des constructions existantes et des modèles en vraie grandeur (1 : 1) constituent le mode de recherche donnant les meilleurs résultats. Leur inconvénient est qu'elles sont onéreuses et c'est la raison pour laquelle elles sont rarement réalisées. En outre, elles concernent en règle générale des conditions du sol particulières et il serait difficile de généraliser leurs résultats. Ces résultats néanmoins constituent des éléments précieux qui permettront peut-être dans l'avenir une grande synthèse. C'est pourquoi il conviendrait d'encourager les chercheurs à entreprendre des essais de ce type et de publier leurs résultats, dans les limites les plus étendues.

Les trois derniers rapports de ce groupe s'occupent de description des blindages exécutés dans divers pays par des méthodes diverses.

M. M. GOLDER, HARDING et SEFTON JENKINS (5/7) décrivent le blindage d'une excavation exécutée à Londres, d'une profondeur de 12 mètres. Un détail intéressant, qui a permis des économies dans le nombre et les dimensions des étais était la stabilisation du sol sous la fondation d'un immeuble qui touchait l'excavation. Le rapport contient beaucoup de détails de construction intéressants et des observations pratiques instructives.

Le rapport élaboré par trois groupes ou sociétés italiennes : EDISON, SADE et SIMA Co (5/6) renferme une brève description de 20 écrans (diaphragmes), exécutés pendant la période de 1951-1960 en 10 localités en Italie. Ces écrans ont été

réalisés dans des buts multiples (pour la plupart comme blindages des excavations). Du fait de l'évolution des procédés de construction, on est passé des rideaux constitués par des pieux en béton, forés tout près l'un de l'autre, aux palplanches en béton armé, d'une épaisseur de 50 cm environ. Le rapport traite et discute de l'application des types définis d'écrans dans diverses conditions et, sur la base des exemples présentés, analyse leur exécution, les caractéristiques des matériaux, les études sur modèle, la vérification de leur stabilité et leur comportement du point de vue statique ou de l'étanchéité.

MM. T. D. J. LEECH et E. B. PENDER (5/12) présentent une description de soutènements constitués par des boulons d'acier fixés au sol par un coulis spécial expansif. Ces soutènements servent de support permanent aux parois d'excavations du rocher. Les auteurs décrivent quatre types de boulons, la composition du coulis ainsi que les essais destinés à mettre en évidence le meilleur mode d'exécution et la résistance des boulons. Les résultats des recherches ainsi que le bon comportement des boulons ont provoqué un grand développement de ce mode de soutènement en Australie.

Il résulte de cette courte revue des contributions présentées, que les problèmes des écrans souples ne cessent pas d'inquiéter les chercheurs. Cela est dû au fait, que la théorie de Coulomb, à laquelle jusqu'à présent les ingénieurs font confiance en raison de sa concordance avec la réalité, ne donne pas les résultats espérés dans les calculs statiques des parois souples ; les ingénieurs praticiens s'en rapportent aux scientifiques pour résoudre enfin ce problème compliqué.

Comme nous le savons bien, il existe un grand nombre de méthodes de calcul des parois souples en palplanches et les ingénieurs ressentent dans leur activité un certain embarras du fait de cette richesse, d'autant plus qu'il y a une divergence d'opinion à cet égard, parmi les plus éminents chercheurs.

Et pourtant ceux-ci travaillent à toute vapeur. Les essais mémorables effectués à une grande échelle par le Professeur Tschebotarioff [1949] Président de notre Section et sa méthode bien connue de calcul des parois souples, une monographie fondamentale du prof. J. Brinch Hansen [1953] sur la poussée et la butée avec également une méthode de calcul des palplanches, les essais très instructifs sur modèles réduits du prof. P. Rowe (1952) couronnés par l'élaboration d'une nouvelle méthode de calcul, et les grandes séries de mesures des déformations des palplanches des quais de New York, commencées récemment par le prof. Tschebotarioff [1957 et 1958] au moyen d'inclinomètres de Wiegmann, sont les étapes de ce développement du problème dans ces dernières 10 années, étapes qui sont bien connues de nous tous.

Ajoutons à cette liste les résultats intéressants des essais exécutés en U.R.S.S., et les propositions des nouvelles méthodes exécutées en U.R.S.S., et les propositions des nouvelles méthodes de calcul, publiés en langue russe (par exemple, Gontcharov [1959], Dubrova [1958 et 1959], etc.) ainsi qu'une méthode numérique américaine publiée tout récemment [Richart, 1960] qui offre à l'ingénieur un nouvel instrument de calcul, non utilisé jusqu'à présent dans les problèmes des parois en palplanches — et nous devons reconnaître qu'un ingénieur praticien a des raisons pour demeurer perplexé, devant tant de méthodes entre lesquelles choisir.

Il nous manque toujours encore une synthèse et je crois que c'est dans ce sens que doivent s'orienter nos recherches futures. Les monographies du genre de celle du prof. Brinch Hansen [1953], et les recherches comparées comme par exemple celles d'Edelman et autres [1958], Zweck [1958], Schultze [1959], etc., constituent les moyens les plus propices pour atteindre le but visé, c'est-à-dire élaborer un mode de calcul synthétique.

Poussée sur les fondations et les murs de soutènement

Dans ce groupe important on n'a adressé que 3 rapports.

MM. J. BIAREZ et J. F. CAPELLE (5/1) des Laboratoires de Mécanique des Fluides à l'Université de Grenoble décrivent les très intéressants essais sur la rotation des fondations rigides dans un milieu pulvérulent homogène et isotrope, traité comme un problème plan. Les essais ont été effectués sur un appareil-modèle type Schneebeli, et se réfèrent à la contribution présentée à la Conférence de Bruxelles [Biarez, 1958]. On a étudié l'équilibre limite sur deux modèles : un cylindre de révolution à surface rugueuse à génératrice horizontale, soumis à un couple de même axe, et un massif de fondation, soumis à une force horizontale. Les photos des essais en particulier sont très instructives car elles donnent une idée claire sur le comportement du sol dans l'entourage de la fondation, pendant sa rotation. On peut constater sans peine qu'il y a deux zones du sol qui se meuvent lors du mouvement de la fondation : une d'elles plus basse piriforme solidaire de la fondation, l'autre plus élevée correspondant aux coins de glissement et de refoulement qui se produisent des deux côtés de la fondation.

Les auteurs ont étudié la valeur du moment de rotation en fonction de la profondeur quand le niveau de la surface du sol est le même de chaque côté de la fondation et quand il y a une différence de niveau du sol des deux côtés de la fondation. Ils ont discuté la position du centre de rotation, qui en général se trouve aux trois-quarts de la profondeur de la fondation et est légèrement déplacé dans le sens de la force horizontale.

Ce rapport est une contribution de grande importance pour l'étude de la stabilité des fondations des piles de ponts et d'autres ouvrages de ce genre. Il forme à mon avis une confirmation des conclusions tirées de la théorie de Sokolowski ainsi que (pour les fondations larges) de la méthode approximative de calcul de la stabilité des fondations en sol pulvérulent de Krey.

En étudiant le rapport précité ainsi que la contribution de M. M. Verdeyen et Roisin, qui se servaient dans leurs essais du même appareil-modèle type Schneebeli, je ne puis m'empêcher d'écrire quelques observations sur la méthode, qui comme nous nous le rappelons bien a été présentée, il y a 4 ans, au Congrès de Londres [Schneebeli, 1957]. Comme les deux rapports précités nous en ont persuadés, et comme cela a été constaté par M. de Josselin de Jong [1959], la méthode de Schneebeli rend de grands services pour la perception visuelle de la marche des phénomènes cinématiques dans les sols pulvérulents, et dans le cas d'un problème plan. L'image obtenue est si claire qu'on peut espérer que plusieurs problèmes encore inexplicables, trouveront leur solution grâce à cette méthode. Les essais ne sont pas onéreux et l'appareil n'exige pas beaucoup de place. L'opinion énoncée par M. Schneebeli au Congrès de Londres, disant que la nouvelle technique expérimentale ouvre d'intéressantes perspectives, me semble être juste, particulièrement en ce qui concerne les problèmes de poussée et butée.

L'autre rapport du groupe discuté, celui de MM. C. CHAZY et P. НАВИВ (5/3) traite la question de butée à l'intérieur d'une pile préfabriquée creusée, havée dans un milieu pulvérulent, selon un procédé mis au point lors de la reconstruction des quais du port du Havre. Grâce à ce procédé la pile s'enfonce dans le sol en laissant en place le terrain naturel qui emplit alors l'intérieur de celle-ci.

Les auteurs décrivent de très intéressants essais sur un modèle réduit à une grande échelle (1/14 environ). Ces essais ont démontré que la répartition des pressions internes s'étend sur une hauteur égale aux 3/4 du diamètre intérieur de la pile, environ. On a de même étudié la répartition des contraintes dans le sol au-dessous de la pile et on a mis en évidence, qu'elle est pareille à la répartition des contraintes sous une fondation rigide, avec base rugueuse. Les observations sur le parcours des lignes de glissement au-dessous de la pile sont également intéressantes. Pour vérifier les résultats des

essais on a équipé une pile du quai, ce qui permettra de mesurer les contraintes de l'ouvrage réel.

Le troisième rapport de ce groupe, celui des professeurs R. B. PECK et H. O. IRELAND (5/13) analyse les résultats d'un essai de charge de la partie inférieure d'un mur de soutènement construit comme un modèle en vraie grandeur. Ce mur étant fondé sur pieux de type classique, le rapport intéressera de même les participants de la section 3/B de notre Congrès.

Les efforts de poussée étant remplacés par des charges artificielles, le rapport n'apporte pas de contribution au problème de poussée des terres.

Il est cependant d'une grande valeur pour les ingénieurs, car les auteurs ont constaté en cours d'essai que les méthodes classiques de calcul de la stabilité des murs sont très satisfaisantes et fournissent un coefficient de sécurité égal à 2 environ.

Hors de la Conférence de Bruxelles où l'on a présenté 7 rapports sur la question de poussée sur des fondations rigides, il n'y a pas eu beaucoup de publications parues depuis 1957 et consacrées à ce problème.

Un livre très intéressant mentionné déjà ci-dessus, celui de Dubrova [1959] a paru il y a deux ans. Il traite en principe des méthodes de réduction des frais relatifs à la construction des ouvrages de soutènement relatifs à la réduction des charges. En examinant ce problème le Prof. Dubrova a passé en revue les méthodes de calcul de poussée et de butée sur les murs de soutènement rigides, utilisées en U.R.S.S. [Sokolowski, 1947, Goluchkievich, 1948, Prokofiev, 1947] et une méthode grapho-analytique propre, basée sur la théorie de l'équilibre-limite. Au surplus l'auteur présente quelques méthodes originales de calcul de poussée dans les cas compliqués. Par exemple il considère le cas de surcharge composée, pour lequel il propose une méthode dite "de miroir torré". Il propose une autre méthode pour le calcul de poussée exercée sur un mur s'appuyant sur une paroi rocheuse.

Plusieurs cas de parois souples y sont également examinés, mais cela plutôt selon les méthodes devenues classiques [Blum].

Le Professeur Széchy [1960] a présenté au Congrès de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes à Stockholm une très intéressante contribution dans laquelle il s'occupe du calcul plus précis des culées des ponts. Pour résoudre cette tâche le Prof. Széchy a exécuté une série d'essais sur modèles réduits de culées à ailes parallèles, dont les premiers résultats auraient pu être rapportés. Le Prof. Széchy a constaté que la répartition de la poussée sur la culée dépend de la rigidité de cette dernière, formant avec les ailes un portique horizontal. On a mis en évidence qu'au milieu de la culée il se produit dans un remblai pulvérulent une réduction des contraintes et vers les bords, au contraire, une augmentation par rapport à une valeur moyenne. Bien que l'objet principal de ce rapport soit surtout l'analyse des méthodes de calcul au point de vue constructif, il fournit cependant des observations intéressantes concernant des contraintes dans le sol contenu dans un espace limité de trois côtés.

Le calcul des efforts exercés sur les ouvrages rigides (ou semi-rigides) est moins compliqué que celui des parois souples, mais il pose aussi quelques problèmes qui ne sont pas encore expliqués. Un des plus inquiétants est le degré de mobilisation de la résistance au cisaillement du sol exerçant une butée sur les parois d'un mur rigide lors de sa rotation sous l'influence d'une charge oblique. Dans le calcul de stabilité d'un mur de soutènement ou d'une fondation rigide se pose le problème du coefficient de sécurité dépendant de l'angle de rotation admissible, ainsi que le problème de la répartition réelle de la butée.

En considérant les résultats des essais de MM. BIAREZ et CAPELLE (5/1) on peut supposer que la butée se produit

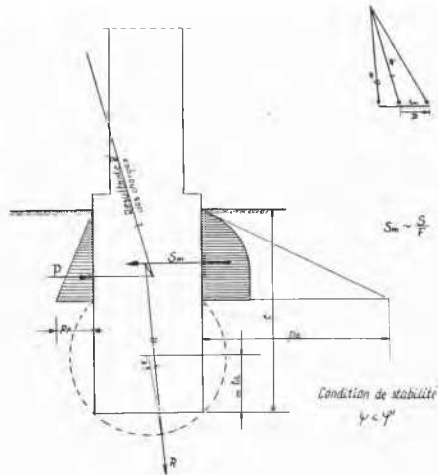


Fig. 1 Schéma de calcul de stabilité d'une fondation.

P : poussée (p_2 : contrainte maximum de poussée);
 S : butée (p_1 : contrainte maximum de butée); F : coefficient de sécurité; S_m : butée mobilisée; l : profondeur de la fondation; ψ : angle de déviation de la résultante et du rayon de cercle de rotation; R : résultante des charges et du poids mort; R' : résultante de R' et de $(S_m - P)$.

seulement sur la partie supérieure de la fondation. Le schéma de calcul de stabilité d'une fondation se présente alors comme à la Fig. 1. La stabilité dépend du degré de mobilisation de la butée. Il semble que la continuation des investigations en ce sens soit importante.

(a) *Butée en fonction des déplacements de l'ouvrage et la question de frottement "parois-terre"*. — S. HUECKEL et J. KWAŚNIEWSKI (5/9) traitent des essais sur modèles réduits ayant pour but la détermination d'une formule empirique pour la capacité d'ancrage d'éléments rigides horizontaux enfouis dans le sable de dune. La formule à laquelle ils aboutissent pourrait être utile pour calculer les ancrages de quais en rideaux de palplanches, des murs à échelle, etc. Elle n'est toutefois qu'une formule de travail. Par contre le résultat le plus intéressant des essais est la description de la marche des phénomènes qui se produisent lors du déplacement d'un élément horizontal enfoncé dans le sable sous l'influence d'une force croissante, et les observations des relations entre le frottement de la terre sur la surface de l'élément et la valeur de la butée sur la face de cet élément. Ce problème a été analysé en détail dans un article publié par ailleurs [Hueckel, 1960].

M. A. N. SCHOFIELD (5/17) donne une description des essais sur modèle réduit avec une plaque rugueuse enfoncée dans le sol, à l'origine verticale puis soumise à la rotation autour d'un axe horizontal au niveau du terrain.

Le but de l'expérience était la détermination des relations entre la valeur et la direction de la butée en avant de la plaque et la valeur de l'angle de rotation de celle-ci. On a mis en évidence qu'à mesure de l'augmentation de l'angle de rotation la valeur de la butée augmentait et l'angle entre le vecteur de butée et la normale aux parois diminuait.

L'auteur analyse les causes des changements de la valeur de l'angle précité et suggère que ce sont les pressions de gonflement des sables provoqués par les changements de

la structure du sol à cause de la rotation de la plaque, qui sont responsables du phénomène observé.

La tendance à la dilatation au voisinage de la plaque, est freinée par le poids de la couche superposée et par la rugosité de la surface, ce qui provoque la pression de gonflement orientée vers le haut et en conséquence la diminution de l'angle en question.

Le rapport de M. Schofield constitue une importante contribution à la question du degré de mobilisation de la butée en fonction de la valeur de l'angle de rotation d'une fondation.

Dans ce groupe de rapports, comme dans celui des contributions théoriques, on peut constater, que les communications fournies au Congrès ne représentent qu'une faible partie des questions absorbant les chercheurs dans le domaine des relations entre les valeurs de la poussée et la butée et le déplacement de l'ouvrage. Ce problème étant d'une importance éminente, la suggestion du Comité d'Organisation, précisée dans le Bulletin N° 1, de choisir ce thème comme objet principal de la discussion, était fort juste.

Il semble que ce soient uniquement Franzius [1928] et Petermann [1933] qui aient jusqu'à présent essayé de déterminer une formule donnant les relations entre la butée et le déplacement d'une paroi ou d'une plaque, mais ils se sont bornés à la fixation d'un rapport entre le déplacement limite (se produisant au moment de la formation du coin de refoulement) et les dimensions (hauteur) de l'élément en cause.

Les autres chercheurs observaient seulement la marche des phénomènes et dressaient les courbes de déplacement en fonction de résistance du sol, ne cherchant pas à déduire de formule mathématique.

Il semble que les résultats des essais sur modèles réduits des plaques verticales, soumises aux forces horizontales [Buchholz, 1930-1931, Petermann, 1933, Hueckel, 1958] puissent être utiles pour se rendre compte des limites de l'application des diverses méthodes de calculs de poussée et de butée.

Considérons une courbe de butée en fonction de déplacement d'une plaque verticale rapportée par la Fig. 2. On peut distinguer sur cette courbe la zone des déplacements élastiques et sa limite supérieure correspondant à la limite de proportionnalité (point A), puis la zone des déformations plastiques

se terminant au point B correspondant à l'équilibre limite (rupture), c'est-à-dire à la valeur de pointe (peak value) de la courbe.

Le degré de mobilisation de la résistance contre le cisaillement est réparti dans les différentes zones, étant mobilisé partiellement ou totalement, et les limites d'application des méthodes de calcul de butée selon la théorie d'élasticité, la théorie de plasticité et la théorie de l'équilibre-limite sont marquées (voir Fig. 2). Une pareille courbe pourrait être obtenue en examinant les relations de poussée et de déplacement.

Comme le Prof. ROWE vient de le confirmer récemment (5/16), quand on considère les questions de *poussée*, on peut soit admettre qu'il s'agit d'un problème de déplacements élastiques, soit qu'il s'agit d'un problème de rupture et il est possible d'appliquer les méthodes basées sur la théorie d'élasticité ou celles basées sur la théorie d'équilibre limite. Ceci découle du fait que le déplacement limite correspondant à la poussée limite n'est pas grand et ne constitue pas un danger pour l'ouvrage.

Mais quand nous considérons une question de *butée*, elle sera le plus fréquemment, un problème de déplacements élastiques, car dans le cas de rupture les déplacements sont si considérables qu'on devrait s'attendre à une avarie de l'ouvrage.

Dans certains cas toutefois on peut calculer la butée selon la condition d'équilibre limite, mais pour éviter les dégâts il faut appliquer un coefficient de sécurité, et ici se fait jour un autre problème, extraordinairement important pour l'ingénieur : comment faut-il déterminer ce coefficient ?

Si nous désignons par S_{lim} et S_{prop} , respectivement les forces à la limite de rupture et à la limite de proportionnalité (selon la Fig. 2), nous pouvons admettre, que le coefficient de sécurité est égal au rapport de ces deux valeurs :

$$F = \frac{S_{lim}}{S_{prop}}$$

En appliquant ce coefficient de sécurité nous nous trouvons dans la zone des déformations élastiques et nous pouvons être rassurés en ce qui concerne la stabilité de notre ouvrage.

Si l'ouvrage n'est pas aussi sensible au point de vue des déplacements, on peut au lieu de S_{prop} , remplacer le dénominateur de la formule précitée par un autre, de valeur plus

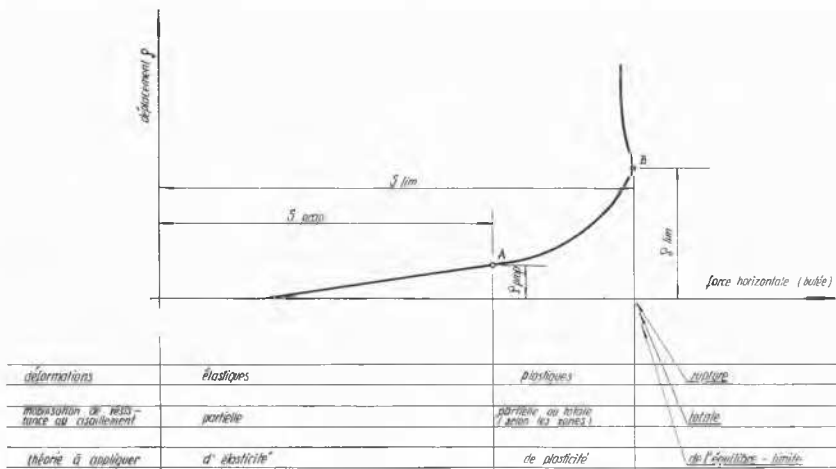


Fig. 2 Diagramme de butée exercée sur une plaque verticale en fonction du déplacement.

élevée, correspondante au déplacement admissible de l'ouvrage.

Dans le cas d'une plaque d'ancrage la question du choix de la méthode de calcul paraît alors être en principe résolue. Dans les autres cas, ce sont les essais qui peuvent répondre à la question, comme nous l'a démontré le rapport du Prof. Rowe.

Le Prof. J. Brinch Hansen [1957] étant rapporteur général de la Section 3B au Congrès de Londres, nous a présenté les principes de détermination du coefficient de sécurité dans les problèmes de mécanique des sols, selon ses suggestions comprises dans un article écrit en danois [Brinch Hansen, 1956]. Il y proposait de considérer un état nominal de rupture dans lequel les charges réelles doivent être multipliées par certains coefficients partiels de sécurité, en même temps que les contraintes réelles dans le sol et dans le matériau de l'ouvrage doivent être divisées par un autre coefficient de sécurité partiel. En cet état nominal de rupture, l'équilibre doit être assuré. M. Brinch Hansen propose d'appliquer les coefficients comme suit ; pour le poids mort : $F_p = 1,0$, pour la charge utile $F_p = 1,5$, pour la pression de l'eau $F_w = 1,2$, pour la cohésion $F_c = 1,5$ à $2,0$, et pour le frottement (résistance au cisaillement) $F = 1,2$.

Les éléments de construction doivent être dimensionnés selon les forces et moments trouvés pour ledit état nominal de rupture, mais les contraintes admissibles doivent être acceptées 1,5 fois plus grandes que dans le cas normal.

Il me semble qu'il y aurait lieu d'associer les propositions du Prof. Brinch Hansen et les suggestions présentées ci-dessus et de déterminer les valeurs des coefficients partiels de sécurité selon la relation : déplacement limite-déplacement admissible. Dans le cas contraire nous ne saurons jamais dans quelle zone se trouve notre ouvrage.

Pressions dues au fluage et au gonflement des sols

Le Prof. L. SUKLJE et M. S. VIDMAR (5/18) présentent les résultats de leurs essais effectués sur les effets du fluage de sol. Sur un écran ces essais ont été réalisés au moyen de consolidomètres ayant un fond mobile et dans une cuve d'essai avec une paroi transversale mobile. Les mesures des forces exercées par le sol en mouvement sur les éléments mobiles des dispositifs d'essai à des phases diverses de l'expérience, ont permis de calculer les contraintes tangentielles correspondantes, mobilisées le long des parois des appareils. Les auteurs ont mis en évidence que la poussée due au fluage dans une argile d'une compressibilité moyenne correspond à une réduction (atteignant 60 pour cent environ des contraintes tangentielles, dépendant des conditions, parmi lesquelles la hauteur du dispositif se trouve influer dans une certaine mesure.

Le Prof. Suklje [1958] a donné à la Conférence de Bruxelles dans son rapport général de la Section 2 une brillante revue des investigations sur les questions de fluage des sols. Depuis 1958 je n'ai pas eu l'occasion de prendre connaissance des publications concernant le thème des pressions dues au fluage et je suppose que, durant cette période, aucune autre contribution importante dans ce domaine n'a été apportée. Il y a lieu de souligner, néanmoins, que le phénomène du fluage joue un rôle important pour les questions de poussée et ne doit pas être négligé dans les recherches de la stabilité des ouvrages soumis à la poussée des sols cohérents.

M. G. KASSIF et le Prof. J. G. ZEITLEN (5/11) étudient la question des pressions dues au gonflement des argiles et exercées sur les conduites souterraines. Le gonflement, comme on le sait, dépend des variations dans l'humidité du sol et provoque des pressions, qui sont considérables dans les argiles grasses.

Les auteurs ont élaboré et présenté une méthode simple qui permet de prévoir la valeur de pression précitée, la validité de cette méthode étant vérifiée par une série d'essais en place.

La méthode est basée sur les résultats d'une série d'essais en laboratoire, au cours desquels on a mesuré le gonflement maximum des échantillons libres, ainsi que la valeur des pressions dues au gonflement retenu. Les essais en place sur les conduites souterraines ont confirmé les résultats des calculs exécutés en se basant sur cette méthode.

La question du gonflement et des pressions correspondantes est encore peu explorée. Dans ces dernières années c'est à l'Institut Technologique à Haïfa qu'on a travaillé sur ce problème, en publiant quelques rapports (entre autres deux thèses de doctorat) énumérées dans la liste des références du rapport (5/11). Il serait intéressant d'avoir quelques détails sur ces travaux au cours de la discussion, le problème étant de haute importance pour les questions de poussée.

Les deux groupes suivants : celui des Silos, et celui des Tunnels sont représentés chacun par un rapport. Ce nombre n'est pas en rapport avec l'importance de ces questions, chaque groupe constituant un domaine distinct de sciences et de techniques, très vaste et auquel on pourrait consacrer des Congrès spéciaux. Il me semble que c'est une chose impossible pour le Rapporteur Général de la Section 5 de passer en revue le développement de ces vastes domaines dans les limites si restreintes de son rapport et j'espère être absout si je me borne seulement à un compte rendu des rapports présentés.

Silos

MM. BUISSON et COMERRE (5/2) décrivent des essais sur modèle réduit des silos, ayant pour but l'explication des phénomènes qui se produisent lors de la vidange d'un silo. On a exécuté les essais sur des modèles de silos à section horizontale circulaire, carrée ou rectangulaire, les dimensions de celles-ci (diamètre ou longueur du côté) étant 19 et 38 cm, la hauteur du modèle 1,5 m environ. On a étudié des modèles avec des parois intérieures lisses, et rugueuses, respectivement, des modèles avec ou sans trémie, vidés symétriquement ou asymétriquement etc. On a étudié l'influence de la rigidité des parois, en faisant varier le nombre des épaisseurs de tôle qui les forment, pour déterminer l'épaisseur la plus favorable. On a élaboré des méthodes de mesure des forces et des contraintes très précises, et perfectionnées au cours des essais, adaptées graduellement à la détection des causes des irrégularités de la marche des processus observés.

Les auteurs ont mis en évidence, que la pression moyenne à l'intérieur des silos lors de la vidange est pratiquement constante à une hauteur assez grande du silo. La pression limite a été atteinte sur toute la hauteur des silos à l'exception de sa partie inférieure dont l'étendue change selon les dimensions du silo et la position de l'orifice de vidange. A part cela on a effectué un nombre d'observations très instructives pour les constructeurs de silos.

Tunnels

M. F. J. M. DE REEPER (5/15) rend compte du mode et des résultats de mesures des contraintes apparaissant dans le revêtement en béton d'une galerie souterraine. Le rapport contient la description de l'appareillage employé et son mode de fixation. Il prend en considération l'isolation des dispositifs de l'humidité, détail d'importance particulière pour les essais à long terme. On a de même reproduit les courbes représentant les résultats des mesures pendant une période de 2 ans, mais l'auteur a laissé ces données sans commentaire.

Mesures des contraintes dans le sol

MM. D. H. TROLLOPE et I. K. LEE (5/19) de l'Université de Melbourne donnent une description des essais où ils ont mesuré les contraintes qui se produisent dans le sol lors

de chargements et déchargements répétés. Les auteurs ont utilisé 4 types de jauges. Une description de l'appareil servant à la vérification de ces jauges et le mode d'utilisation de ce dispositif sont présentés en détail. La question importante de la rigidité du diaphragme des jauges est discutée et les conditions qu'il doit remplir sont examinées.

M. P. H. D. SILVA WIKRAMARATNA (5/21) de l'Université de Ceylan présente une description d'un nouveau type de jauge adapté aux mesures des pressions dans les conditions de laboratoires. La sensibilité de la cellule dont le diaphragme montre une déflexion égale à une 1 : 10 000 partie du diamètre est remarquable. Les mesures s'effectuent au moyen d'un dispositif pneumatique permettant un agrandissement de 35 000 fois des lectures. L'auteur a donné une description détaillée de la cellule et du dispositif de vérification.

MM. M. ICHIHARA et S. TAKAGI (5/10) présentent une jauge extraordinaire à sept faces servant aux mesures de l'état des contraintes dans le sol. L'orientation mutuelle des faces est telle, que l'appareil ou bien peut mesurer du premier coup toutes les composantes du tenseur des contraintes, ou bien qu'il permet de les calculer sans peine. Jusqu'ici on a éprouvé la valeur de cette jauge en laboratoire, actuellement on l'essaie en place.

Ces relations très intéressantes, auraient pu être présentées aussi à la Section 2, car ces jauges peuvent être employées non seulement à la poussée et à la butée mais aussi à des questions plus générales.

Chaque Congrès nous apporte un nombre de descriptions de nouveaux dispositifs destinés aux mesures de pressions dans le sol. Selon leur caractéristiques ces jauges donnent des résultats qu'on peut interpréter d'une manière différente. Une standardisation serait désirable.

Conclusions à la discussion

A vrai dire tous les rapports présentés méritent une discussion, et si le temps des séances le permet j'approuverais une ample discussion sur toutes les conclusions des rapports particuliers, et surtout sur celles citées dans mon rapport.

Il y a néanmoins à mon avis un nombre raisonnable de questions d'une importance particulière, dont la résolution constituerait une contribution sérieuse au progrès de notre science et technique. J'en vois quatre, à savoir :

1. Les limites d'application des diverses méthodes de calcul de la poussée et de la butée, basées sur la théorie de l'élasticité, sur la théorie de la plasticité et de celle de l'équilibre limite, ainsi que des méthodes empiriques.

2. Les critères de la détermination des coefficients de sécurité, dans les problèmes de poussée et de butée.

3. Les perspectives de méthodes basées sur la théorie de probabilité et leurs applications aux problèmes de poussée et de butée.

4. Le relevé des points communs des diverses méthodes actuelles de calcul des parois souples en palplanches servant de point de départ à l'élaboration d'une méthode (ou d'un système de méthodes) synthétique.

Conclusions and proposals for discussion

In fact all the papers submitted to this Division deserve to be discussed, and if the time allowed to each Session is long enough, I should suggest a full discussion of the conclusions of each paper, especially of those mentioned in my report.

However, I feel that there are number of valuable problems which to solve would seriously contribute to the progress of science and technique. They are the following ones :

1. Possibilities of the various measurement methods on active and passive earth pressure based on the theory of elasticity, the theory of plasticity, the theory of rupture, as well as on empiric methods.

2. Criteria of factors of safety measurements in connection with active and passive earth pressure problems.

3. Prospects of methods based on the theory of probability and their applications in connection with active and passive earth pressure problems.

4. The statement of similar conditions in the various present computation techniques for flexible sheeting walls as a basis for a synthetical method.

Références

- [1] BIAREZ, J. (1958). *Remarques sur la rotation des massifs de fondation*. Communication à la Conférence de Bruxelles 1958 sur les problèmes de pressions de terres. Rapports, Vol. III, p. 217.
- [2] BRINCH HANSEN, J. (1953). *Earth pressure calculation*. Copenhagen, 1953.
- [3] — (1956). *Brudstadieregning og partialsikkerheder i geoteknikken*. (Calcul des limites et du coefficient de sécurité partiel en mécanique des sols). Copenhagen, 1956.
- [4] — (1957). *Rapport general*, division 3/A, Proc. of the Fourth Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London, Vol. II, p. 446.
- [5] BUCHHOLZ, W. (1930-31). *Erdwiderstand an Ankerplatten*. (Butée sur les plaques ancrantes). Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 12 Band (1930-31), V.D.I. Vlg. Berlin.
- [6] DUBROWA, G. A. (1958). *Razpriedelenie davleniya grunta na gibkiye i deformiruyuschiesya sooruzheniya* (Répartition de poussée sur les structures souples et déformables). Revue : « Rietchnoy Transport » (Transport Fluvial), Moskwa, 1958, No. 10.
- [7] — (1959). *Mietody oblegcheniya i udiechveniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy*. (Les méthodes de réduction de chargement et de prix des ouvrages hydrotechniques). Moskwa, 1959.
- [8] EDELMAN, T., JOUSTRA, K., KOPPEJAN, G., VAN DER VEEN, C. et VAN WEELE, A. F. (1958). *Comparative Sheet Piling Calculations*. Rapports de la Conférence de Bruxelles 1958 sur les problèmes de pression de terres. Vol. II.
- [9] FRANZIUS (1928). *Erdruckversuche im natürlichen Masstab*. (Essais sur la poussée à l'échelle naturelle). Bauingenieur 1928. No. 43 et 44.
- [10] GOLUCHKIEVICH, S. S. (1948). *Ploskaja zadatcha teorii priedelnovo ravnoviesiya sypuchey sriedy*. (Le problème plan de la théorie de l'équilibre-limite de milieu pulvérulent). Moskwa, 1948.
- [11] GONTCHAROV, Y. M. (1959). *K voprosu o primenienii teorii Kulona dla opriedietleniya davleniya grunta na gibkiye stienki*. (Du problème d'application de la théorie de Coulomb à la détermination de la poussée de sol sur les parois souples). Revue « Osnovaniya, Fundamienty i mechanika gruntov » (Sol, fondations et mécanique des sols). Moskwa, 1959, No. 4.
- [12] HUECKEL, S. (1960). *Zdolnosť kotwica sztywnych elementów poziomych pograzonych w gruncie sypkim*. (Capacité ancrante des éléments rigides horizontaux enfoncés dans le sable). Rev. : *Archiwum Mechaniki Sposowanej*. Varsovie. Tom VII, Z.3.
- [13] DE JOSSELIN DE JONG, G. (1959). *Statics and kinematics in the failable zone of a granular material*. Delft.
- [14] KÉRISEL, J. L. (1957). *Rapport general*. Poussée de terres sur les ouvrages et tunnels. Comptes Rendus du IV^e Congrès International de Mécanique des Sols et Fondations. Londres, 1957. Vol. II, p. 461.
- [15] KÉZDI, A. (1961). *Erdrucktheorien*. (Les théories de poussée et de butée). Springer Vlg. Berlin.
- [16] LITWINSYN, J. (1956). *Application of the equation of stochastic processes to mechanics of loose bodies*. Rev. : « *Archiwum Mechaniki Sposowanej* », Varsovie, Vol. VIII, No. 4.

- [17] PETERMANN, H. (1933). *Bewegung und Kraft bei Ankerplatten*. (Butée sur dalles d'ancrage en fonction du déplacement). Der Bauingenieur 1933. H.43/44.
- [18] PROKOPEV, I. P. (1947). *Davleniye sypuchevo tiela i raschiot podpornykh stienok*. (Poussée d'un corps pulvérulent et calcul des parois de soutènement). Moskwa, 1947.
- [19] RICHART, F. R. (1960). *Anchored bulkhead design by numerical method*. Proc. A.S.C.E. Journal of the Soil Mech. a. Found. Div., Vol. 86, No. SM 1, Febr. 1960, p. 1.
- [20] ROWE, P. W. (1952). *Anchored Sheet-Pile Walls*. Proc. Inst. Civil Eng. Vol. 1, Janv. et sept. 1952.
- [21] SCHNEEBELI (1957). *Une analogie mécanique pour l'étude de la stabilité des ouvrages en terre à deux dimensions*. Comptes Rendus du IV^e Congrès Int. de Méc. des Sols et Fondations. Londres. Vol. II, p. 228.
- [22] SCHULTZE, E. (1959). *Die Ergebnisse der Europäischen Erddrucktagung in Brüssel 1958*. (Les résultats de la Conférence européenne sur la poussée et la butée à Bruxelles 1958). Mitteilungen aus dem Institut f. Wasserbau, Grundbau und Bodenmechanik der T. H. Aachen. Heft. 20. Baugrundkursus 1959. Pages 21, 24 et 25.
- [23] SOKOLOVSKI, V. V. (1954). *Statika siputchey sriedi*. (Statique du milieu pulvérulent). Moskwa, 1954.
- [24] ŠUKLJE, L. (1958). *Rapport général de la section 2 et 3*. Rapports de la Conférence de Bruxelles 1958 sur les problèmes de pressions de terres. Vol. III.
- [25] STROGANOV, A. S. (1958). *Plane plastic deformation of soil*. Rapports de la Conférence de Bruxelles 1958 sur les problèmes de pression de terres. Vol. I.
- [26] SZÉCHY, K. (1960). *Wirtschaftlichere Gestaltung und genauere Berechnung der Brückenwiderlager*. (Détermination d'une forme plus économique et calcul plus précis des culées des ponts). Publication préliminaire du VI^e Congrès de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes. Stockholm, 1960.
- [27] VAN TNACH, N. (1960). *Sur le calcul approché de la répartition de contraintes le long d'un écran de butée contre un massif cohérent à faible frottement interne*. Note présentée par M. A. Caquot. Comptes Rendus des séances de l'Académie de Sciences. T. 251 (1960).
- [28] TSHEBOTARIOFF, G. P. (1949). *Final report on large-scale earth pressure tests with model flexible bulkheads*. Princeton, 1949.
- [29] — (1957) and WARD, E. W. *Measurements with Wiegmann Inclinator in Five Sheet Pile Bulkheads*. Compte Rendus du IV^e Congrès Intern. de Mécanique des Sols et des Fondations. Londres, 1957. Vol. II.
- [30] TSHEBOTARIOFF, G. P. (1958). *Communication à la discussion*. Rapports de la Conférence de Bruxelles 1958 sur les problèmes de pression de terres. Vol. III, p. 229.
- [31] WACK, B. (1960). *Etude de la butée d'un écran plan contre un massif cohérent par la théorie des caractéristiques*. (Thèse de Doctorat de Spécialité de 3^e cycle). Grenoble, Janv. 1960.
- [32] ZWECK, H. (1958). *Communication à la discussion*. Rapports de la Conférence de Bruxelles 1958 sur les problèmes de pression de terres. Vol. III, p. 227.