

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.

Routes, pistes d'envol et voies ferrées

Roads, Runways and Rail-tracks

RAPPORT GÉNÉRAL

Rapporteur Général : G. MORALDI, Professeur de Mécanique des Sols à l'Université de Rome

Introduction

Le nombre toujours croissant des communications présentées au Congrès (vingt-six) a conduit le Rapporteur Général à classer par catégories les différents thèmes traités.

En outre, dans chaque catégorie, il a paru opportun de faire tout d'abord un bref résumé des communications présentées par ordre d'importance, puis de procéder à un examen critique de leur contenu.

Parmi les 26 rapports présentés, quatorze sont consacrés au problème du calcul de l'épaisseur des chaussées souples et rigides, et à la détermination des tensions et des déformations dans les couches de fondation des sols ; trois traitent des problèmes concernant l'humidité et la gélivité ; quatre autres abordent les différents aspects de la stabilisation ; un seul étudie le compactage tandis que les cinq derniers se rapportent à différents sujets.

Toutefois, le nombre et le contenu des communications ne donnent qu'une faible idée de l'évolution subie pendant ces dernières années par la géotechnique routière, car d'une part, divers travaux ont fait l'objet de publications en dehors du Congrès ; certains, d'autre part, n'ont pas donné lieu à des communications. C'est le cas notamment de l'auscultation dynamique des chaussées et de certains aspects de la stabilisation des sols.

Calcul des chaussées, répartition des tensions et des déformations dans le sol et dans les couches de fondation

Parmi les quatorze communications classées sous cette rubrique, onze concernent les chaussées souples et trois seulement les revêtements rigides.

Chaussées souples. — Dans leur exposé CRONEY et SALT (4/3) donnent les résultats des observations, au cours de neuf années de service, du comportement de trois tronçons expérimentaux de chaussée soumis à un trafic intense, selon la méthode classique utilisée par le Road Research Laboratory.

Les trois tronçons ont été construits sur des sols de faible portance (CBR = 4 — 6 pour cent). Chaque tronçon a été divisé en un certain nombre de sections recouvertes de couches de fondation, de base et de surface d'épaisseur différente construites avec différents matériaux.

Ces résultats ont confirmé l'influence de la nature du revêtement sur la tenue de la chaussée. En effet, aucune faiblesse n'est apparue dans la partie recouverte d'un béton bitumineux, même lorsque l'épaisseur du revêtement était inférieure à celle prévue par les diagrammes CBR de calcul. Par contre, là où le revêtement n'était constitué que d'un enduit superficiel sur macadam bitumineux, des désordres

sont apparus, même lorsque l'épaisseur de la couche dépassait celle prévue par les diagrammes.

La communication de REICHERT (4/17) étudie le comportement des sols et des couches de fondation soumis à des essais de charge répétés et rapides avec plaques. Il s'agit sans doute de l'étude la plus approfondie que nous ayons eu l'occasion de voir à ce sujet, et qui a demandé plusieurs années de travail.

Reichert a défini, par analogie avec la formule de Boussinesq, non seulement un module de déformation totale au premier chargement ainsi qu'un module d'accroissement des déformations en fonction du nombre des répétitions, mais aussi un module de déformation élastique, qui serait indépendant, entre de larges limites, du nombre des répétitions, de la valeur de la charge et du diamètre de la plaque. En se servant des formules d'Odemark et de Jeuffroy-Bachelez, il détermine aussi le module de déformation élastique de la fondation pour différents matériaux (pierraille, sables tablisés). Celui-ci serait indépendant de l'épaisseur de la couche et du diamètre de la plaque.

Au moyen de cellules, il a étudié ensuite, la distribution des pressions dans le sol, et l'influence exercée par les couches de fondation et par le revêtement bitumineux sur la répartition des efforts.

Enfin, il a examiné aussi la validité de la relation semi-logarithmique bien connue :

$$z_n = z_1 + \beta \log n$$

en concluant que, pour des valeurs limitées de la pression, "β" se maintient constante, tandis que, pour des valeurs plus élevées de la pression, "β" subit généralement des accroissements en fonction du nombre de répétitions ; parfois aussi, mais plus rarement, des diminutions.

La question de la distribution des charges par effet des couches de fondation de nature différente a également fait l'objet du rapport (4/22) de SOWERS et VESIC.

Les expériences ont été réalisées dans une fosse d'essai, au moyen de roues pneumatiques et de plaques. Il s'agissait d'un sol limoneux et de couches de fondations en sable, en macadam à l'eau et en sol-ciment. Les modules de déformation étaient déterminés au moyen d'essais avec plaques et d'essais triaxiaux, sur des échantillons intacts ou remaniés.

Voici les principales conclusions obtenues :

— Pour des charges très réduites, l'empreinte des pneus peut être considérée comme circulaire ; mais pour des charges élevées, elle doit être considérée comme rectangulaire. Les couches de fondation en sable et en macadam répartissent

les charges suivant la théorie de Boussinesq appliquée à des surfaces de charge rectangulaires, et non pas selon la théorie de Burmister, bien que les valeurs des modules de la fondation aient été de 8 à 12 fois celles du sol. Les couches de fondation en sol-ciment répartissent les charges d'une manière bien plus efficace, conformément à la théorie de Burmister.

TURNBULL et MAXWELL (4/25) ont également beaucoup utilisé les cellules de pression, et de plus, les déformètres. D'après leurs expériences, ils ont pu déterminer à divers endroits la distribution des tensions et des déformations à l'intérieur de deux sols, constitués l'un par une couche de limon argileux, l'autre par du sable sec. Les charges étaient appliquées au moyen de plaques munies d'une chambre hydro-pneumatique de contact, afin de réaliser une distribution uniforme des pressions sur le sol.

Ces mesures ont permis d'établir la valeur des modules de déformation élastique et du coefficient de Poisson, ce dernier étant apparu égal à 0,5 pour le limon et à 0,3 pour le sable. Les résultats en ce qui concerne les tensions se sont montrés conformes à la théorie de Boussinesq ; mais il n'en fut pas de même pour les déformations. Les auteurs ont donc été amenés à penser que la valeur des tensions avait une influence probable sur le module.

Le rapport d'IVANOV et TSCHERKASSOV (4/10) relate les plus récents développements des méthodes utilisées pour le calcul des chaussées souples en U.R.S.S.

La méthode officielle qui avait fait l'objet de communication au 4^e Congrès et au 11^e Congrès de la Route à Rio en 1959, a été développée ultérieurement en se basant, non plus sur des modules de déformation totale, mais sur des modules de déformation élastique, déterminés au moyen d'essais de charge rapides et d'essais de charge à la plaque. Cette application est valable pourvu que le sol et les couches de fondation n'accusent que des déformations plastiques négligeables.

Il est intéressant d'observer que la déflexion relative " λ " en surface, sur routes à trafic intense, a été admise égale à 0,003, ce qui correspond à une déflexion d'à peu près 1 mm et concorde avec les résultats des essais du W.A.S.H.O. Le rapport donne aussi quelques valeurs de modules des sols mesurés, et des informations sur la dispersion de ces déterminations.

L'exposé de MAC LEOD (4/14) peut être considéré comme la suite des communications présentées aux précédents Congrès. Il se base sur des essais avec plaques à 10 répétitions de la charge, et contient des diagrammes qui permettent de calculer l'épaisseur d'une chaussée en fonction des charges, de la pression des pneus, de l'intensité du trafic, et de la déflexion maximum admise.

Le développement d'une méthode rationnelle de calcul des chaussées a retenu l'attention des ingénieurs portugais NASCIMENTO, SEGURA DA COSTA, et PINELA qui dans leur communication (4/15) nous exposent leur méthode basée également sur le schéma bicouche de Burmister, moyennant quelques hypothèses ultérieures simplificatrices. Il est intéressant d'observer qu'un coefficient de distribution de la charge à l'intérieur des différentes couches de fondation, y est introduit. Il est fonction de l'angle de distribution : ce qui nous conduit aux toutes premières méthodes de calcul des chaussées. Ce coefficient dépend du rapport des modules de déformation de la fondation et du sol, et peut être déterminé au moyen d'un diagramme.

Portugais également sont les auteurs FERREIRA et CAMPINOS qui présentent deux expressions analytiques (4/8) pour l'interprétation des diagrammes de calcul CBR pour routes et pistes. Ces formules, contrairement à celles fournies par Turnbull et Ahlvin [1957] seraient valables pour des CBR compris entre 2 et 80 pour cent.

Le rapport de SCHNITZER et BOLLIER (4/19) est d'un intérêt particulier puisqu'il remet à l'ordre du jour les revêtements type sandwich, déjà expérimentés par les Hollandais à Schi-

phol. Ces auteurs démontrent à la fois théoriquement par les formules d'Odemark, et pratiquement par des essais de charge avec plaques, avec emploi de cellules de pression, l'avantage qu'il y aurait à mettre directement en contact avec des sols de très faible portance une fondation en sol-ciment au lieu de la disposer au-dessous de la dalle en béton. Entre le sol-ciment et la dalle, est interposée une couche de grave compactée. Cette solution, qui a été adoptée sur les aéroports de Genève et de Berne, aurait l'avantage pratique d'assurer le passage des engins de chantier, de permettre un meilleur compactage de la couche de gravier et d'éviter la transmission en surface des fissures du sol-ciment. Elle produirait aussi une meilleure répartition des charges sur le sol et une diminution de la déformabilité de la chaussée.

TAKESHITA nous entretient aussi dans sa communication (4/23) de l'aptitude des couches de fondation à répartir les charges.

Le problème est résolu toutefois différemment car l'auteur étudie l'accroissement que subit le module de réaction " k " obtenu avec une plaque de 30 cm de diamètre. Les essais sont effectués, soit sur le chantier, soit sur des modèles de grandeur naturelle, placés dans une cuve d'essai de 1,50 m de diamètre. En interprétant les essais au moyen des modules de déformation et de la théorie de Burmister, Takeshita obtient des diagrammes donnant l'épaisseur de la fondation, en fonction des rapports des modules de réaction.

Il est intéressant de noter qu'au Japon les critères de projet des couches de fondation exigent que " k " soit au moins égal à 28 kg/cm³, ce qui correspond à la valeur requise de $Me = 800$ kg/cm² par les normes V.S.S. Suisses.

Enfin, la dernière communication concernant les chaussées souples est celle de WISEMAN et ZEITLEN (4/26) qui ont étudié la possibilité de mettre en rapport le CBR d'un sol argileux avec sa résistance au cisaillement, exprimée, soit au moyen d'essais in situ avec pénétromètre, soit au moyen d'essais avec moulinet à palettes.

Revêtements rigides. — Des trois communications présentées sur cette question, deux peuvent être groupées en une seule. Ce sont les rapports de HEIJNEN et BATTEKE (4/9) et de JONKER et Van NIEUWENHUYZEN (4/11), le premier contenant la description des appareils de chargement et des instruments de mesure employés.

Les auteurs présentent en outre les essais réalisés sur l'aéroport de Schiphol, en vue de la construction de nouveaux revêtements en béton, à simple et à double couche, pour avions dont le poids total est de 300 tonnes. Avant de construire des dalles d'essais de grandeur naturelle, on a procédé à l'étude de la position la plus critique des charges et on a recherché l'endroit le plus approprié pour le placement des instruments de mesure, à l'aide de deux modèles : l'un en plastique, l'autre en béton.

Les renseignements fournis sur les premiers résultats manquent de conclusions. Nous espérons vivement que les auteurs nous donneront quelques informations complémentaires, au Congrès, sur un sujet aussi intéressant.

La communication de SINITZYN, GLUSHKOV, RAJEV-BOGOLOVSKY, MANUELOV, MIKHAILOV et TOLMACHEV (4/21) porte à notre connaissance les plus récentes méthodes concernant le calcul des revêtements en béton de ciment en U.R.S.S.

Les méthodes de calcul les plus courantes sont esquissées : il en est ainsi notamment pour la méthode basée sur un double module de réaction, et des formules pour la détermination des effets de température. Ces indications sont malheureusement trop brèves et incomplètes.

Des résultats sont donnés sur des essais de rupture au moyen de charges mobiles allant jusqu'à 100 tonnes sur différents types de structures : béton précontraint, double dalle, dalle simple avec et sans goujons. Ces résultats ne diffèrent pas, en principe, de ceux connus en Occident. Par contre, est nouveau le système constructif qui consiste à armer les bords

des dalles dépourvues de goujons, avec 4-5 barres en acier de 12 mm de diamètre.

Après examen des communications faisant partie de cette catégorie ainsi que des rapports publiés sur ce thème et des comptes rendus du dernier Congrès International de la Route, on remarque une orientation décisive certaine vers l'emploi de méthodes rationnelles de calcul pour les revêtements flexibles. Ces méthodes, que nous pourrions appeler empiriques-rationnelles, définissent les propriétés physiques du sol et des matériaux de la superstructure par leurs modules de déformation ou d'élasticité, et par leur coefficient de Poisson.

Ce qui est le plus significatif, c'est que cette tendance se manifeste en même temps dans les pays les plus divers. On peut affirmer ainsi qu'il s'agit d'une évolution bien précise de la pensée dans cette branche de la géotechnique.

Il en résulte que la séparation actuellement existante entre les méthodes de calcul des revêtements flexibles et rigides tend à disparaître, et qu'on s'achemine lentement vers une unification des méthodes.

Nous croyons que la cause principale de cette évolution est l'impossibilité démontrée par les méthodes classiques d'évaluer à leur juste mesure la différence d'aptitude à répartir les charges dans les matériaux employés pour le revêtement et pour les couches de fondation, aptitude qui a été mise bien en évidence par les essais du W.A.S.H.O. d'abord, et que plusieurs communications (4/3), (4/17), (4/22) confirment.

Tous les rapports présentés sur ce thème se basent sur la distribution des pressions dans le sol selon la théorie de Boussinesq, et sur la schématisation bicouche du sol et du revêtement. Les déformations et les tensions sont déterminées, soit par les formules de Burmister, soit par celles d'Odemark ou de Ivanov et Krivisky qui sont identiques entre elles. Lorsqu'il s'agit de plusieurs couches, on a recours à la théorie des couches équivalentes. Seul REICHERT, dans son rapport (4/19), applique la méthode de la triple couche de Jeuffroy et Bachelez [1957].

Les caractéristiques des sols et des matériaux sont déterminées, soit au moyen des modules de déformation (4/18), soit au moyen des modules d'élasticité (4/10) ; le coefficient de Poisson étant supposé égal à 0,5.

La valeur des modules est déterminée expérimentalement (méthodes dites empiriques-rationnelles) au moyen d'essais de chargement avec plaques : essais statiques s'il s'agit d'un module de déformation totale déterminé à la première application de la charge (4/18) ; essais répétés dynamiques, s'il s'agit d'un module d'élasticité (4/17) et (4/10).

SOWERS et VESIC (4/22) mentionnent qu'ils ont pu déterminer les modules des matériaux de fondation par des essais triaxiaux, sans fournir plus de détails à ce sujet. TAKESCHITA (4/23) a recours, lui, à un essai de compression pseudo-triaxiale, réalisé dans un moule spécial CBR sur des échantillons intacts ou remaniés. SCHNITZER et BOLLIER (4/19) ont déterminé le module du sol-ciment au moyen d'essais de compression sur cubes.

Tout naturellement, on se pose la question : quelle confiance devons-nous accorder à ces méthodes ? Et sommes-nous déjà arrivés à un point d'application pratique tellement avancé pour pouvoir considérer les méthodes classiques comme périmées ?

Nous nous trouvons sans doute à un tournant décisif, et ce sont là les méthodes de l'avenir, mais nous estimons qu'un examen critique des résultats obtenus s'impose, ne serait-ce que pour mieux nous orienter sur la direction à suivre pour nos recherches futures.

Un premier examen nous amène à considérer la validité des théories qui ont servi de base à ces méthodes puisqu'une théorie n'a de valeur que si elle est confirmée par l'expérience. Or, les conclusions auxquelles sont parvenus SOWERS et VESIC (4/22) semblent indiquer que la théorie de Burmister ne

concorde bien avec les résultats expérimentaux que lorsque les rapports entre le module d'élasticité de la fondation et du sol sont élevés. De même, le rapport (4/24) de TURNBULL, MAXWELL et AHLVIN nous met en garde contre l'adoption, peut-être trop simpliste, d'un coefficient de Poisson égal pour tous les matériaux.

Il conviendrait donc d'éclaircir ces points par de nouvelles expériences, afin de savoir si les théories elles-mêmes sont à revoir, ou si ces anomalies peuvent s'expliquer par la non homogénéité et la non élasticité des matériaux. Il semble toutefois que la théorie de l'élasticité représente assez bien la réalité lorsque les charges sont roulantes [Baker et Papazian, 1960]. La voie adoptée par les expérimentateurs (4/17 et 4/10) qui se réfèrent uniquement aux déformations élastiques et aux modules d'élasticité, paraît donc justifiée.

Mais il ne faut pas oublier non plus la présence des déformations plastiques, ni que celles-ci peuvent jouer un rôle prépondérant dans le cas de véhicules arrêtés sur la chaussée.

Il est donc indispensable qu'un calcul, basé sur la théorie de l'élasticité, soit précédé d'un contrôle pour s'assurer que chaque couche du revêtement se trouve suffisamment loin de l'écoulement plastique.

Un second examen nous conduit à considérer l'influence que peut avoir sur les résultats, la méthode choisie pour déterminer les modules, et les erreurs qui peuvent en découler.

Il est un fait bien connu que, même avec les matériaux à comportement élastique, la détermination de ce paramètre donne lieu à plusieurs incertitudes dans l'interprétation : par exemple, la valeur du module déterminée au moyen d'ultrasons est différente de celle déterminée sur une éprouvette soumise à tension ou compression statique. Or il est à prévoir qu'avec des matériaux à déformation élasto-plasto-visqueuses, comme les sols, le problème sera encore plus compliqué.

Même si on ne se réfère qu'aux déformations élastiques et aux modules d'élasticité, le rapport (4/10) nous rappelle qu'il faut se servir toujours du même processus expérimental, c'est-à-dire des essais de charge in situ, et non pas, par exemple, de la méthode de mesure de la vitesse de propagation des ondes élastiques, car elle conduit à des valeurs exagérées. Nous pouvons penser en outre que les anomalies constatées par SOWERS et VESIC (4/22) sont dues à la manière particulière de déterminer les modules d'élasticité de la fondation, au moyen d'essais triaxiaux.

En conséquence, faute d'études de corrélation plus approfondies, il ne devrait pas être permis d'employer des modules déterminés en laboratoire ; par contre, il serait souhaitable d'aboutir à une normalisation de l'essai in situ.

Enfin, un troisième examen nous amène à considérer l'influence des conditions climatiques et ambiantes sur la valeur critique des modules des revêtements.

Le rapport (4/10) nous informe que dans les pays froids les conditions de plus basse résistance se vérifient au printemps, à l'époque du dégel. Dans d'autres pays, cette situation pourra se manifester à d'autres époques de l'année.

Heureusement, nous possédons désormais une méthode simple pour déterminer les conditions critiques d'une chaussée au moyen de la mesure des déflexions en surface poursuivies pendant différentes saisons de l'année [Nau, 1959].

Quant à la question que nous avons posée au début de cet exposé, à savoir si ces nouvelles méthodes devaient nous faire considérer les méthodes classiques comme déjà périmées, la réponse est négative.

L'abondance des données statistiques sur lesquelles elles se basent et la simplicité d'exécution des essais rendront ces méthodes toujours précieuses lorsqu'il s'agit d'établir des avant-projets.

Il est toutefois significatif de constater la disparition de la méthode des Indices de Groupe (à vrai dire trop simpliste) alors que la méthode CBR est toujours en application. Mais

on tente également de la rationaliser : soit qu'on veuille exprimer les diagrammes CBR au moyen de formules mathématiques (4/18), soit qu'on veuille relier le CBR à la valeur des modules (4/17 et 4/10), [Nascimento et Simoes, 1957]. Nous croyons qu'il faudra insister dans ce sens, pour arriver à une corrélation plus précise des méthodes.

Et pour finir, nous ne pouvons pas passer sous silence le développement que, pendant ces dernières années, ont eu les méthodes d'auscultation dynamique des chaussées, bien qu'aucun rapport n'ait été présenté au Congrès sur ce sujet, comme nous le remarquons précédemment. La méthode, introduite pour la première fois par les hollandais [Nisboer, 1957], a fait aussi l'objet d'une étude ultérieure de la part du Road Research Laboratory [Jones, 1960] et d'applications pratiques jusqu'aux U.S.A.

Nous pensons que ces appareils peuvent apporter une importante contribution à l'étude des problèmes concernant les chaussées, mais qu'il est nécessaire d'établir une corrélation avec la valeur des modules d'élasticité déterminés par les essais de charge avec plaque.

Humidité et gélivité des sols

Ces problèmes préoccupent particulièrement l'ingénieur routier puisque souvent, dans les pays à climat froid, la fonction antigel de la fondation l'emporte sur celle de la distribution des charges.

La communication de AITCHISON et HOLMES (4/1) nous informe sur la possibilité de prévoir l'humidité qui va s'établir dans un sol revêtu, au moyen des profils de succion capillaire.

Ils démontrent, en effet, qu'il peut se produire, soit une augmentation, soit une diminution d'humidité dépendant du climat et des conditions ambiantes.

La communication de RENGMARK, HEAD et GANDAHL (4/18) nous expose une recherche effectuée en Suède pour éviter la formation de fissures longitudinales dans le revêtement de certaines chaussées, pendant la période du gel.

On a constaté que ces fissures sont dues à un gonflement inégal du sol qui s'explique par le fait que le gel pénètre différemment dans le sol suivant qu'il se situe sur les côtés (protégés généralement par la neige) ou sur la partie centrale de la chaussée.

On peut supprimer cet inconvénient en augmentant l'épaisseur de la fondation vers le milieu ou en y disposant une couche isolante de tourbe.

SCHNITTER et ZOBRIK, dans le rapport (4/20) traitent le calcul de la profondeur de pénétration du gel et de son contrôle au moyen de thermomètres à résistance. Ils ont évalué, dans différentes localités de la Suisse, la profondeur de pénétration du gel dans un matériau type de fondation (gravier-sable), et ont procédé ensuite à des vérifications sous la surface de chaussées, de patinoires et de barrages en terre.

Une partie de la communication (4/10) d'Ivanov et Tscherkassov, déjà examinée, s'intéresse aussi à la pénétration du gel.

On y retrouve une formule proposée par Toulaev pour le calcul de l'épaisseur de la couche anti-gel, en fonction du gonflement uniforme et du gonflement différentiel admis (1,3-1,5 cm).

Stabilisation des sols

Les quatre communications présentées sur ce sujet concernent la stabilisation au ciment.

Ainsi, le rapport (4/7) de DUTRON et CLOES étudie l'influence de l'humidité et du degré de compactage, sur la résistance du mélange pour deux sols types de la Belgique : un sable et un limon argileux.

La seconde communication de DUTRON et CANFYN (4/6) nous renseigne sur les résultats obtenus avec les mêmes

sols, en employant différentes qualités et différents dosages de ciment.

Les rapports obtenus entre la résistance à la compression, à la flexion et à la traction brésilienne, ainsi que la valeur des CBR y sont donnés.

Les auteurs ont aussi étudié un procédé rapide de conditionnement des éprouvettes, qui consiste à les tenir à température de 65° pendant les premières 24 heures.

Le rapport de MACLEAN et SHERWOOD (4/13) s'occupe d'un tout autre problème et précisément de l'influence de la teneur en matières organiques sur la résistance du sol-ciment.

Une analyse approfondie des réactions qui empêchent l'hydratation du ciment, porte les auteurs à proposer un essai, basé sur la détermination du pH, pour établir a priori, l'aptitude d'un sol à être stabilisé. Les sols ayant un pH inférieur à 7 devraient être écartés.

Le dernier rapport sur ce thème est celui de DOS SANTOS (4/5) d'un intérêt pratique remarquable puisqu'il relate l'expérience acquise au Mozambique pendant dix ans.

Il nous renseigne sur la mise au point d'une méthode, de détermination rapide de la teneur en ciment, qui se traduit par des diagrammes liant celle-ci à une constante particulière "a" du sol, qui dépend de la surface spécifique des grains.

Cette constante a déjà fait l'objet d'une communication au 3^e Congrès [Dos Santos, 1953] et peut être déterminée facilement au moyen de l'analyse granulométrique.

Selon Dos Santos les prescriptions de l'A.S.T.M. pour la détermination de la quantité de ciment seraient plus valables que les prescriptions anglaises, et si l'on a recours à des essais CBR, il faut atteindre au moins une valeur de 200 pour cent.

Le fait que les communications reçues traitent uniquement des problèmes concernant la stabilisation au ciment, ne doit toutefois pas nous faire croire que les autres formes de stabilisation ne présentent aucun intérêt. Au contraire, l'emploi de graviers stabilisés mécaniquement, à la place des fondations traditionnelles en blocage, est devenu courant et ne soulève plus de problèmes.

Il faut cependant remarquer qu'une évolution s'est toutefois produite ; on tend en effet à employer des matériaux de plus en plus maigres, et même à indice de plasticité nul quand il s'agit de couches de fondation au-dessous d'un revêtement imperméable.

En ce qui concerne la stabilisation avec liant hydrocarboné, il faut noter l'emploi de tout-venant stabilisé avec du bitume à chaud lorsqu'il s'agit de construire les couches de base des autoroutes et des routes à grand trafic.

La stabilisation avec des produits chimiques spéciaux (tensio-actifs, résines, etc.) n'a pas donné lieu non plus à des communications ; il semble toutefois que cette forme de stabilisation soit réservée pour des applications particulières dans les régions tropicales.

Compactage

Un seul rapport a été présenté sur cette question : celui de LEWIS (4/12) qui revêt toutefois une importance considérable, puisqu'il nous renseigne sur le rendement qu'on peut attendre en employant les plus récents moyens de compactage : les engins vibrants. Les expériences de Lewis ont été réalisées en grandeur naturelle, sur différentes qualités de sols, allant de l'argile grasse à une grave, au moyen de rouleaux et de plaques vibrantes pesant jusqu'à 3,7 tonnes.

Quelques-uns des résultats obtenus sont déjà bien connus, quelques autres le sont moins : par exemple, l'équivalence d'un rouleau vibrant à un rouleau normal ayant environ 4 fois son poids brut ; l'épaisseur des couches qui ne doit guère dépasser 25 cm pour les rouleaux et 30 cm pour les

plaques ; et la possibilité d'améliorer le rendement en accouplant à la vibration une action de choc.

Ces résultats sont pourtant partiellement contredits par un récent rapport des Hollandais Heynen et Wever [1959] qui prétendent avoir compacté convenablement des remblais en sable jusqu'à 1 m de profondeur.

Problèmes divers

BONNARD, MAJOR et RECORDON (4/2) décrivent les études géologiques et géotechniques préliminaires à l'exécution du projet de l'autoroute Genève-Lausanne.

Une première prospection géologique, au moyen de photographies aériennes, a été suivie par une prospection géotechnique par sondages carottés et au pénétromètre exécutés, tous les 160 m environ, le long du tracé.

Cette étude préliminaire a permis de suggérer une variante au tracé, pour éviter une vaste étendue de sols particulièrement douteux, et de localiser, avant de procéder à l'adjudication des travaux, les matériaux aptes à constituer les remblais et les couches de fondation.

PELTIER (4/16) expose les résultats obtenus par des essais de cisaillement à grande échelle dans du sable.

Ces essais avaient pour but de déterminer le coefficient de frottement sur la fondation en sable d'une dalle en béton précontraint de 70 m de long sur 7,50 m de large. On a fait glisser la dalle à l'aide de vérins pneumatiques prévus pour la précontrainte.

Le glissement se manifestant dans la couche de sable, il s'agissait d'un essai de cisaillement à grande échelle, et on a pu comparer les résultats avec des essais sur le même sable, réalisés en laboratoire, au moyen de l'appareil de Casagrande.

Il est intéressant d'observer qu'un coefficient de frottement de 1,1 a été obtenu lors de ces essais ; ce résultat concorde avec les valeurs de 1,1-1,3 que nous avons pu relever lors d'essais semblables effectués sur des dalles de 1 m² de surface [Moraldi, 1959].

TURNBULL et MAWELL (4/25) et IVANOV et TSCHERKASSOV (4/10) ont étudié la viabilité des sols naturels non revêtus.

Le rapport 4/25 se préoccupe de la détermination de la portance de ces sols pour admettre le trafic d'avions de transports.

On a réalisé des essais de trafic accéléré, au moyen de charges roulantes ainsi qu'avec les avions eux-mêmes, et on a mesuré le CBR des sols et l'effort de pénétration par un pénétromètre spécial.

Les résultats ont été élaborés sous forme de diagrammes liant la valeur du CBR in situ avec la charge transmise au sol et la pression de gonflage des pneus, compte-tenu d'un nombre de passage de 1 à 100.

La communication (4/10) précise les principes et les formules sur lesquels se basent les critères de viabilité des sols naturels en U.R.S.S. Les mesures in situ sont effectuées par un pénétromètre muni d'une pointe et d'un moulinet à palettes, qui permet de mesurer, de deux manières, la résistance au cisaillement.

Enfin DA COSTA NUNES et DIRCEU DE ALENCAR VELLOSO exposent (4/4) les problèmes géotechniques rencontrés pendant la construction des remblais d'accès aux ponts qui traversent le fleuve Guaiaba au Brésil.

Il est question de remblais d'une hauteur considérable, établis sur des couches compressibles d'argile molle. La construction a été précédée par une étude détaillée en laboratoire et sur modèles, de la compressibilité, de la résistance au cisaillement et de la sensibilité de l'argile.

Les remblais ont été construits progressivement, la stabilité étant assurée à l'aide de bermes, de drains verticaux en sable ou par ces deux systèmes.

Les auteurs indiquent également les tassements constatés, comparés avec ceux prévus.

Conclusion et propositions pour la discussion

Les communications qui traitent des méthodes rationnelles pour le calcul des chaussées souples, et de la distribution des tensions et des déformations dans le sol et dans les couches de fondation, sont du plus haut intérêt.

Les rapports présentés sur la stabilisation sont incomplets car seule la stabilisation au ciment y est étudiée et il aurait été souhaitable que la stabilisation de tout-venant avec du bitume à chaud qui a pris un grand essor, y fut traitée également.

Le compactage des sols a fait l'objet d'un seul rapport qui nous apporte des informations parfois en contradiction avec les conclusions fournies par d'autres auteurs.

Nous pensons convenable que la discussion porte sur les points suivants :

1° Accord entre la théorie et l'expérience en appliquant les méthodes rationnelles de calcul ;

2° Influence de la méthode d'exécution des essais sur la valeur des modules d'élasticité : propositions pour l'adoption d'un essai in situ normalisé ;

3° Influence du climat, des conditions ambiantes sur la valeur critique des modules ; sa détermination au moyen de mesures systématiques des déflexions en surface ;

4° Possibilité offerte par les moyens d'auscultation dynamique et corrélation des résultats avec les essais de charge sur plaque ;

5° Rendement des engins vibrants de compactage.

Conclusions and proposals for discussion

The most important conclusion which we can draw from the examination of the papers presented at this Congress, is a very conspicuous trend towards the adoption of rational design methods for flexible pavements.

Still more significant is the fact that such a trend originates from completely different countries, so we can state that it represents a very definite evolution of human thought in this branch of soil mechanics. In consequence the division which until now existed between flexible and rigid pavement design methods tends to disappear, and we are actually on the way towards unification.

We think that the principal cause of such a trend is the incapacity of conventional methods to evaluate the load spreading attitude of the various materials used in surface and base course layers ; incapacity which the W.A.S.H.O. tests and quite a few recent works, have confirmed beyond any doubt.

All the reports presented on this subject are based on the assumption of Burmister's two layered system theory of approach (4/22), (4/24), (4/15), (4/23), or on similar formulae : Odemark (4/8) (4/19), Ivanov and Krivisky (4/10). When it is the question of multi layered systems, the method of equivalent thickness is adopted.

The properties of the soil, of the pavement and of the base course materials, are expressed by means of the deformation (4/15) or of the elasticity moduli (4/10) ; Poisson's ratio being assumed equal to 0.5.

The value of the modulus is determined usually by means of static (4/15) or dynamic (4/10) plate bearing tests. Sowers and Vesic (4/22) have determined the elasticity moduli of the base course by means of triaxial tests, while Takeshita (4/23) recurs to pseudo-triaxial tests in a special CBR mould. Schnitter and Bollier (4/19) instead, use compression tests on cubes of soil cement.

The question which now arise are the following :

— First, how much can we rely on such methods?

— Secondly, should we already consider classical methods to be obsolete?

As far as the first question is concerned we think that these

are the methods of the future, but that a critical examination of the results already obtained is necessary to direct further research.

One should first consider the validity of the theories upon which these methods are based, as the conclusions at which Sowers and Vesic (4/22) arrive, seem to point out that Burmister's theory is not in agreement with experimental results when the base course and soil moduli ratio is low. Turnbull and Ahlvin (4/24) also state that the assumption of a constant Poisson's ratio, equal to 0.5 for all materials, is not correct.

Further studies are therefore necessary to ascertain the agreement between theory and experience, and to see if the hypothesis of elasticity is correctly applied. This hypothesis should be valid when rapidly moving loads are considered [Baker and Papazian, 1960]; it is therefore fully justifiable to refer to elasticity moduli instead of deformation moduli, provided that plastic deformations are negligible (4/10). But we must not forget either the existence of such deformations, which can assume a prevailing influence when vehicles stop on the pavement.

For this reason it seems to us absolutely necessary that design based on the theory of elasticity, should be complemented by a verification of the absence of plastic flow in each layer of the pavement and soil.

Secondly we must ascertain what influence is exercised on the results by the method adopted to determine the moduli. It is a well known fact that even with elastic materials the determination of such a parameter can give rise to doubts in interpretation: for instance the value of the modulus determined by soniscope tests differs from the value determined by static compression tests.

It is most likely that with materials subject to elasto-plastoviscous deformations, the problem will be much more involved. In fact paper (4/10) draws our attention, to the necessity of always referring to plate bearing tests, and not to vibration or seismic tests. The anomalies found by Sowers and Vesic (4/22) may be due to the particular way of determining the moduli.

We are inclined therefore to assume that, at the present moment, lacking further knowledge on the subject, laboratory methods should not be adopted. We think also that it would be opportune to normalize the plate bearing test in situ.

Thirdly we must consider the influence of climatic and environment conditions on the critical value of the moduli of a pavement.

Paper (4/10) states that in cold countries, such a value occurs in early spring, during the thaw; in different countries this may take place in other seasons.

Fortunately we have now at our disposal an easy way of resolving this problems, i.e. by performing elastic deflection tests during different seasons of the year, without the necessity of damaging the pavement [Nau, 1959].

Insofar as regards the second question: i.e. should we already consider classical design methods obsolete; the answer is no.

At the moment we cannot ignore the value of the experimental statistical accumulated data, and the simplicity of the tests on which such methods are based: we should try therefore to correlate as much as possible the two systems. Attempts in this direction have already been made with promising results (4/10), [Nascimento and Simoes, 1957].

It is significant to observe however that the Group Index method is seldom used nowadays, and the CBR method only, is most employed.

Finally we cannot conclude this subject without mentioning the dynamic vibration and seismic methods, which, although they have not been mentioned in papers at this Congress, have lately been rather extensively studied and applied [Nijboer, 1955], [Jones, 1960].

We think that such methods are a valuable source of information regarding the properties and the behaviour of pavements, but need to be correlated with the conventional moduli and deflection values.

For what regards other arguments we observe that papers presented on stabilization deal only with soil-cement (4/7), (4/6), (4/13), (4/5). No mention is made of hot mixed bituminous stabilization, which however is very extensively used in Europe. It looks like that stabilization with special chemical admixtures has not made much progress.

The paper presented on compaction (4/12) includes results which are not shared by other authors [Heynen and Wever, 1959] and are worth discussion.

As subject for discussion we propose:

1° Agreement between theory and experience in the application of rational design methods;

2° Influence of the experimental procedure used on the determination of deformation and elasticity moduli; proposal for the adoption of a standard in situ test;

3° Opportunity of operating methodical deflection surveys to collect statistical data on the critical value of the moduli of a pavement;

4° Evaluation of the possibilities offered by vibration and seismic wave propagation methods, and their correlation to other rational design systems;

5° Efficiency of dynamic compaction equipment.

Références

- [1] BAKER, R. F. and PAPAZIAN, H. S. (1960). The effect of stiffness ratio on pavement stress analysis. *Proc. High Res. Board*, Vol. 39.
- [2] DOS SANTOS, M. P. P. A new soil constant and its applications. *Comptes Rendus du III^e Congrès Intern. de Mécanique des Sols*, Vol. I, p. 47.
- [3] JEFFROY, G. et BACHELEZ, J. (1957). Essai d'explication méthodique des expériences du W.A.S.H.O. *Revue Générale des Routes*, n° 308, Sept.
- [4] HEYENEN, W. J. et WEVER, J. (1959). Quelques remarques concernant les études du compactage des remblais de sable. *Comptes Rendus du XI^e Congrès Intern. de la Route*, Rapport n° 13.
- [5] JONES, R. (1960). Measurement and interpretation of surface vibrations on soils and roads. *Bull. Inst. of Physics*, Aug., p. 197.
- [6] MORALDI, G. (1959). Resistenza di attrito sul piano di posa di lastre di pavimentazioni in calcestruzzo. *Le Strade*, n° 1, Genn.
- [7] NASCIMENTO, U. and SIMOES, A. (1957). Relation between CBR and modulus of strength. *Comptes Rendus du IV^e Congrès Intern. de Mécanique des Sols*, Vol. II, p. 166.
- [8] NAU, A. (1959). Expériences routières en Moselle. Mesure de déflexion. *Revue Générale des Routes*, n° 331, août.
- [9] NIJBOER, L. W. (1955). Dynamic investigations of road constructions. *Shell Bitumen Monograph*, n° 2.
- [10] TURNBULL, W. J. and AHLVIN, R. G. (1957). Mathematical expression of the CBR relations. *Comptes Rendus du IV^e Congrès Intern. de Mécanique des Sols*, Vol. II, p. 181.