

# 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: M. R. PELTIER, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, Directeur de Recherches et d'Essais au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France

#### Introduction

C'est à peine depuis un quart de siècle que les ingénieurs ont cherché à appliquer les méthodes de la mécanique des sols à la technique routière. Mais cette tendance s'est considérablement développée depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, à tel point qu'on peut la considérer actuellement comme une branche autonome de la mécanique du sol, et qu'en France notamment, on lui a donné un nom particulier: *la géotechnique routière*.

C'est au Congrès de Zurich en 1953 que, pour la première fois, une section (la section 6) a été entièrement consacrée à cette spécialité; elle avait alors fait l'objet de 6 rapports. Au présent Congrès, cette section comporte 20 rapports, sans compter ceux qui ont été éliminés, soit par le Comité Central du Congrès, soit par les Comités Nationaux. Cette forte progression est l'indice du développement considérable de la géotechnique routière dans tous les pays. Mais, à mon avis, ce développement a été plus important encore que pourrait le faire croire la simple progression du nombre des rapports, car un grand nombre de problèmes essentiels ont été étudiés ces dernières années dans les laboratoires; plusieurs d'entre eux y ont été résolus de façon satisfaisante, et pourtant ils n'ont pas fait l'objet de communications au présent Congrès.

La géotechnique routière proprement dite comprend, en fait, trois parties principales: (1) le compactage des sols; (2) la portance des sols; (3) et la stabilisation des sols.

Elle comprend aussi plusieurs parties moins importantes, mais qui n'ont pas fait l'objet de communication à ce Congrès. C'est donc dans ces trois parties principales que nous avons classé les rapports reçus, soit: 3 pour le compactage, 9 pour la portance; et 3 pour la stabilisation. Il reste alors 5 rapports qui sont pour la plupart des monographies, et que nous avons classés à part.

#### Compactage des Sols

Le compactage des sols a fait de grands progrès depuis le Congrès de Zurich. Non seulement nos connaissances théoriques se sont accrues à ce sujet, mais aussi les appareils de compactage de chantiers se sont perfectionnés; leur poids s'est sensiblement accru; et de nouveaux types d'appareils ont été mis sur le marché, comme les rouleaux vibrants lourds par exemple. Ces derniers appareils permettent de compacter rapidement et efficacement les sols graveleux et même certains sols sablonneux, et ont beaucoup accru l'arsenal des moyens mis à la disposition des ingénieurs à ce sujet.

De plus, des progrès importants ont été constatés dans les appareils de contrôle du compactage sur chantier, c'est-à-dire les appareils de mesure *in situ* de la densité des sols et de la teneur en eau. C'est ainsi qu'à côté des densitomètres classiques à sable ou à membrane de caoutchouc, sont apparus des

nucléodensito-mètres, qui permettent de mesurer la densité du sol en place par son pouvoir absorbant de rayons gamma, ceux-ci étant produits par un radio-isotope artificiel. De même, la mesure de la teneur en eau des sols peut se faire très rapidement grâce à leur pouvoir absorbant de neutrons, ceux-ci étant produits par une source radio-active appropriée.

Aucune de ces nouveautés n'a toutefois fait l'objet de communication. Les trois communications présentées traitent de problèmes plus classiques.

(1) La communication de Turnbull et Foster (4/19) expose les résultats d'essais entrepris sur un chantier expérimental, afin d'étudier le compactage d'une couche de base en matériaux concassés de granulométrie étalée. Cette expérimentation a été conduite avec des moyens puissants, notamment un rouleau à pneus de 45 tonnes. On a, en outre, contrôlé les résultats en plaçant un léger revêtement bitumineux sur la couche compactée, et en y faisant circuler un pneu lourdement chargé, figurant les avions qui fréquentent actuellement les aérodromes. On a fait varier, sur divers tronçons de la piste expérimentale, la teneur en eau du matériau et le nombre de passages du compacteur.

Les résultats observés ont montré que ce type de matériau exigeait un arrosage très abondant et un nombre assez grand de passages de rouleaux.

Je peux moi-même ajouter que ces résultats ont été confirmés par des essais analogues entrepris dans d'autres pays, et qu'on y a observé que les rouleaux vibrants permettaient d'obtenir un compactage encore plus efficace, avec un bien plus petit nombre de passages de rouleaux, et avec moins d'arrosage.

(2) Lewis (4/11) a présenté les résultats d'une étude expérimentale, sur le terrain, de l'efficacité des compacteurs par chocs. Une théorie de ces compacteurs avait été faite au préalable par l'auteur; il s'agissait alors de vérifier cette théorie, et de fournir aux constructeurs éventuels de tels appareils, des données numériques leur permettant d'en fixer rationnellement les dimensions.

(3) Goro Kuno et Takeo Mogami (4/9) proposent une méthode de calcul du tassement d'une couche de sol, lors de son compactage. Cette méthode est basée, d'une part sur la formule de Fröhlich quant à la répartition des contraintes dues au compactage dans le sol, d'autre part sur les caractéristiques de déformabilité du sol, mesurées dans une sorte d'œdomètre. D'autre part, les auteurs tiennent compte du nombre  $N$  de passages du compacteur, à l'aide d'une formule qu'ils appellent formule de Sasaki:

$$\frac{N}{a + b \cdot N} = \text{accroissement de compacité ou de tassement.}$$

Une étude de laboratoire, sur modèle semi-réduit, a permis aux auteurs de vérifier leur méthode de calcul.

## Portance des Sols

L'un des problèmes les plus importants qui se posent aux ingénieurs, qu'il s'agisse de construire une route, une piste d'envol, ou une voie ferrée, est de mesurer les caractéristiques mécaniques des sols de fondation, afin de pouvoir dimensionner en conséquence l'épaisseur de leur chaussée ou de leur ballast. Ce problème, très complexe, comporte en fait plusieurs phases et aspects distincts.

(1) Tout d'abord, les caractéristiques de portance du sol de fondation doivent être mesurées dans l'état le plus défavorable qu'aura ce sol au cours de la vie de la chaussée. Il faut donc déterminer cet état le plus défavorable, et pour cela, connaître l'évolution de cet état, sous l'effet du trafic et des variations des conditions climatologiques et géohydrologiques.

Deux communications ont été faites sur l'étude des variations de teneur en eau des sols sous les chaussées. L'une, présentée par Black et Croney (4/2), donne des résultats de chantiers expérimentaux anglais où l'on a mesuré systématiquement, à diverses profondeurs, les variations dans le temps de la pression interstitielle des sols. Un nouveau type de tensiomètre de chantier avait été mis au point à ce sujet. On a notamment observé que, sous la chaussée, le régime hydrologique tendait au bout de 2 à 3 ans vers un état d'équilibre, satisfaisant aux théories de la succion capillaire.

L'autre communication — celle de Hatherly et Wood (4/5) — expose les résultats d'observation *in situ* des variations, de la teneur en eau et de la température, sous la chaussée de la route Bagdad-Basra en Irak. Contrairement à la communication précédente, celle-ci constate que la teneur en eau varie d'une façon importante sous les chaussées, même imperméables, au cours de l'année.

Il semble que la divergence des conclusions de ces deux études puisse s'expliquer par des considérations de différences des sols, et surtout des climats. En effet, en Grande-Bretagne, pays à climat humide et très tempéré, les gradients thermiques dans les sols restent faibles; aussi les échanges d'eau, en phase vapeur, y sont-ils assez réduits; ce sont alors les échanges sous forme liquide qui sont de beaucoup plus importants, c'est-à-dire que la théorie de la succion y est applicable, et la notion d'équilibre limite par succion capillaire y a toute sa valeur.

Par contre, en Irak du sud, les gradients thermiques élevés provoquent probablement une thermo-osmose sensible et variable dans les sols, d'où des variations importantes de teneur en eau.

(2) Lorsque l'on connaît les conditions les plus défavorables que le sol aura à supporter, il reste à définir la portance du sol, ou en d'autres termes à choisir l'essai qui permettra de mesurer cette portance. Les rapports présentés ne font état à ce sujet que de deux méthodes classiques: la méthode CBR et la méthode de la plaque chargée. Il n'est pas fait mention des méthodes plus modernes et plus perfectionnées, telles que le stabilomètre de Californie, dont l'emploi semble toutefois se développer assez rapidement dans certains états.

Un seul rapport est présenté sur ce problème du choix de l'essai caractéristique: celui de Nascimento et Simões (4/15). Ces auteurs ont cherché à relier expérimentalement le CBR au module de résistance, ce dernier étant défini comme le produit du module de réaction du sol par le diamètre de la plaque d'essai. On sait que ce produit doit, d'après la théorie de Boussinesq, être une constante caractéristique du sol, si celui-ci est élastique; d'autre part, l'expérimentation *in situ*, et notamment les résultats des essais de McLeod (4/12), montrent bien que ce module de résistance est une caractéristique du sol. Admettant alors, en principe, que même pour des plaques de la dimension du piston CBR, ce module de résistance ne dépendait que du sol, les auteurs ont relié ce module au CBR grâce à de nombreux essais CBR.

C'est là une tentative intéressante pour relier les deux essais

de portance les plus classiques, et même pour relier les méthodes de calcul des revêtements rigides à celles des revêtements souples.

(3) Connaissant l'indice portant du sol (CBR) ou son module de résistance, il faut ensuite pouvoir passer au calcul de l'épaisseur à donner à la chaussée. A ce sujet, une intéressante étude a été présentée par Schiffman (4/16), sur la solution numérique du problème de Burmister dans un sol composé de trois couches. Cette résolution n'a été faite que dans certains cas particuliers; mais cependant elle a nécessité d'importants calculs numériques qui ont été exécutés à l'aide de machines électroniques.

Turnbull et Ahlvin (4/18) présentent une étude tendant à exprimer par une formule mathématique les abaques CBR. Cette formule s'écrit, dans le système métrique:

$$h = \left\{ P \cdot \left[ \frac{1}{0.582 \cdot I} - \frac{1}{p \cdot \pi} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

où  $h$  est la hauteur à donner à la chaussée (en cm);  $P$  le poids maximum par roue (en kg);  $p$  la pression de gonflage des pneus (en kg/cm<sup>2</sup>); et  $I$  l'indice portant CBR.

Cette formule ne donne toutefois des résultats parfaitement concordants avec les abaques classiques, que pour des CBR inférieurs à 12. C'est d'ailleurs le cas le plus fréquent et le plus intéressant.

(4) Deux communications ont été ensuite présentées sur l'utilisation de l'essai de plaque chargée à la détermination de la force portante des pistes d'envol. La première, présentée par McLeod (4/12), prolonge en quelque sorte la communication déjà présentée par cet auteur au Congrès de Zurich; c'est d'ailleurs le résultat d'une longue enquête, entreprise depuis 1945 par l'auteur, à la demande du Gouvernement canadien.

Cette étude, qui a porté à la fois sur la déflexion totale, la déflexion élastique et la déflexion plastique des sols et des revêtements de 9 aérodromes canadiens, fournit de précieux renseignements expérimentaux sur cet important problème.

Moraldi (4/14) expose les résultats d'essais à la plaque chargée, effectués sur des aéroports italiens. Ses essais ont donc une grande analogie avec ceux de McLeod; notamment il confirme le résultat obtenu par celui-ci, quant à la possibilité d'exécuter les essais avec un seul diamètre de plaque. Mais Moraldi a poussé son étude jusqu'à sa conclusion pratique: l'amélioration des méthodes actuellement en vigueur (Palmer et L.C.N.) pour l'évaluation de la courbe d'exploitation des pistes.

(5) Pour tous les ouvrages géotechniques, la portance se présente sous un double aspect: un critère de résistance, et un critère de déformabilité. C'est le critère de résistance qui a été retenu le premier (CBR — stabilomètre . . .), et qui est le plus employé à l'heure actuelle; mais le critère de déformabilité commence à attirer l'attention des ingénieurs, surtout depuis que l'on utilise beaucoup, pour la confection et l'entretien des routes, des couches épaisses d'enrobés denses, qui ne peuvent résister sur une fondation trop flexible. L'essai à la plaque chargée, d'ailleurs, se réfère beaucoup plus au critère de déformabilité qu'au critère de résistance. En outre, certains pays ont élaboré des méthodes de calcul des épaisseurs à donner aux chaussées, en se basant uniquement sur le critère de déformabilité. C'est le cas de l'U.R.S.S., dont la méthode est exposée sommairement dans la communication de Ivanoff, Birulya, Babkov et Puzakov (4/6).

Cette méthode est basée sur le calcul élastique de la déformation de la chaussée, moyennant quelques hypothèses simplificatrices; de plus, les coefficients du calcul sont légèrement modifiés empiriquement, pour tenir compte du fait que les sols ne sont pas parfaitement élastiques. Les caractéristiques du sol et celles des diverses couches de la chaussée interviennent alors par leur module de déformation.

Il est probable que ces méthodes de calcul basées sur le critère de déformabilité vont connaître un certain développement au cours des prochaines années.

(6) Enfin, il y a lieu de classer aussi, dans la catégorie des études de portance, celle présentée par King et Pitt (4/8) sur le calcul des fondations de voies ferrées sur sol argileux. C'est là un problème voisin de celui des routes, mais cette étude l'a résolu différemment. Les auteurs mesurent la portance de la couche argileuse à l'aide d'un appareil appelé 'pulsator', sorte d'appareil triaxial qui, en outre, reproduit le phénomène de répétition des charges. De cette portance, et d'une formule basée à la fois sur les calculs théoriques de Boussinesq et sur des résultats expérimentaux, on peut en déduire l'épaisseur de la couche de fondation en bon sol, à placer sous le ballast, pour assurer la stabilité de la voie ferrée.

### Stabilisation des Sols

La stabilisation chimique des sols consiste à incorporer au sol un produit chimique approprié, à les mélanger intimement, puis à compacter fortement le mélange. Ces méthodes ne semblent pas avoir encore pris beaucoup d'extension, sauf dans certains pays où les sols-ciment et les sols-bitume ont été assez couramment employés. On peut penser que ces méthodes se développeront davantage au cours des prochaines années, surtout si des produits chimiques spéciaux, particulièrement actifs, peuvent être mis au point dans les laboratoires.

La communication de Lambe (4/10) expose sommairement les résultats des recherches effectuées sur ces produits spéciaux à l'Institut de Technologie du Massachusetts. Il est intéressant de constater que certains produits, même dispersés dans le sol à l'état de traces, ont une action efficace, notamment pour réduire la perméabilité des sols. Ces produits jouent, en quelque sorte, un rôle modérateur vis à vis des variations de teneur en eau; aussi peuvent-ils être utilisés pour réduire la gélivité d'un sol, ou pour améliorer leur portance dans les conditions les plus défavorables d'imbibition de la fondation de la chaussée.

C'est sans doute là une technique d'avenir. Encore faudrait-il que les produits spéciaux en question aient été parfaitement étudiés en laboratoire et sur des routes expérimentales, et qu'ils soient fabriqués industriellement.

Une application de ces méthodes est indiquée dans la communication de Aichhorn et Steinbrenner (4/1), qui décrit les procédés utilisés par les auteurs sur certaines routes autrichiennes, pour réduire ou supprimer la gélivité des sols de fondations. Ces sols, constitués par du granit décomposé, ont été stabilisés vis à vis du gel par de faibles incorporations de ciment, de goudron ou de sulfite de soude.

Enfin, une étude expérimentale de l'influence du degré de pulvérisation des argiles sur la qualité des sols-ciment, a été présentée par Grimer et Ross (4/4). On sait qu'il est très difficile de pulvériser sur le chantier un sol plastique, surtout lorsqu'il est humide; le sol-ciment ainsi réalisé est souvent constitué par des petites mottes d'argile pure enrobées dans un mortier d'argile-ciment. L'étude précitée a montré que si ces mottes étaient assez petites, la résistance du sol-ciment n'en était pas affectée. Il s'agissait toutefois d'argile très lourde, exigeant pour sa stabilisation de forts dosages en ciment (15 à 30 pour cent), ce qui réduit la portée pratique de la méthode. Mais ceci constitue une extrapolation rassurante de ce que l'on rencontre sur certains chantiers.

### Autres Communications

Quatre autres communications ont été présentées, qui traitent de problèmes divers.

Van der Veen (4/20) expose les résultats d'essais de portance exécutés sur l'aéroport de Beek. En 1947, des études avaient été faites pour déterminer la portance du sol de fondation; on avait abouti à un CBR de 7 en moyenne. Après construction de l'aéroport en 1953, on a exécuté de nouveaux essais CBR *in situ* sur ce même sol, soit sous la piste, soit à côté de la piste; on a trouvé un CBR moyen de 44; ce qui est assez étonnant car

la compacité et la teneur en eau sont à peu près les mêmes dans les deux cas. Des essais de portance de la piste elle-même, par la méthode de la plaque chargée, ont confirmé l'excellente portance du sol de fondation. Il y aurait lieu sans doute, pour élucider ce problème, d'entreprendre des recherches de laboratoire sur les variations du CBR de ce sol; le fait que les échantillons de sol aient été immergés en 1947, et non immergés (essais *in situ*) en 1953, est peut-être la cause de ces divergences.

Takehita (4/17) expose les résultats de recherches sur la stabilité des routes en gravier construites sur des sols constitués par des cendres volcaniques. Il s'agit de sols plastiques, et sensibles au gel (région nord du Japon); aussi la portance de la fondation doit-elle être mesurée, au moment du dégel, c'est à dire lorsque le sol se trouve détrempe.

Egolf, Germann et Schaad (4/3) présentent un nouveau dispositif de confection de chaussée. Il comporte des dalles de béton préfabriquées de 1 m × 1 m × 10 cm posées sur le sol de fondation en double couche et à joints croisés, une mince couche bitumineuse étant interposée entre les deux couches de dalles. Un revêtement en enrobés bitumineux est enfin placé sur l'ensemble. Ce dispositif, qui a fait l'objet d'essais sur un chantier expérimental, se comporterait très bien, donnant notamment une surface très régulière.

Keil (4/7) étudie la sensibilité au gel des pierres employées dans la construction des chaussées. Ce problème très important en pratique diffère beaucoup de celui de la gélivité des sols, et ne peut être résolu par les mêmes critères, notamment celui de la granulométrie. La gélivité des pierres dépend de leur origine, de leur texture, des influences tectoniques qu'elles ont subies, et de leur composition minéralogique. Ces facteurs sont passés en revue dans cette étude qui, en outre, cherche à comparer ces roches à des sols correspondants.

Enfin, Mehra (4/13) expose les résultats d'essais et de réalisations de chaussées économiques, construites avec des agrégats tendres. L'intérêt de la méthode résulte du fait que dans certaines régions des Indes, on dispose en abondance d'agrégats locaux tendres, alors que les matériaux durs devraient être transportés depuis des carrières lointaines. La solution présentée par Mehra consiste à noyer l'agrégat tendre dans un excès de mortier en sol très plastique; on ralentit ainsi la pulvérisation par ruptures successives de l'agrégat dans la chaussée.

### Conclusions et Propositions pour les Discussions

Les communications présentées n'étudient qu'une faible partie de la géotechnique routière, et la revue rapide faite ci-dessus de ces communications ne peut nullement être considérée comme faisant le point des progrès de cette branche de la mécanique du sol depuis le Congrès de Zurich.

On peut toutefois conclure, semble-t-il, que:

(a) l'apparition sur le marché de nouveaux appareils de compactage (cylindres vibrants lourds par exemple) et les progrès accomplis expérimentalement surtout, dans la connaissance du phénomène, ont beaucoup accru les moyens dont disposent les ingénieurs actuellement pour compacter leurs sols;

(b) en ce qui concerne la portance des sols, les méthodes classiques telles que le CBR et l'essai à la plaque chargée, sont de beaucoup les plus employées, et ont fait, surtout pour cette dernière, l'objet de certains progrès. Mais on a vu apparaître et se développer de nouvelles méthodes basées sur la déformabilité du sol; on assiste même à une tendance pour relier les diverses méthodes entre elles, et notamment celles qui concernent les revêtements rigides et les revêtements flexibles;

(c) enfin, la stabilisation chimique des sols a enregistré des progrès sensibles; et l'on peut penser que l'utilisation de traces de produits chimiques spéciaux très actifs se développera beaucoup au cours des années à venir.

Il paraît difficile de proposer la discussion en priorité de

quelques sujets privilégiés. Il semble toutefois que l'on pourrait s'attacher principalement à discuter les sujets suivants:

(1) Efficacité comparée des compacteurs à pneus et des compacteurs vibrants.

(2) Classement méthodique des sols selon leur aptitude au compactage, avec les divers types de compacteurs actuels.

(3) Validité de la formule, dite de Sasaki, quant à l'influence sur le compactage du nombre de passages du compacteur:

$$\left(\frac{N}{a + b \cdot N}\right)$$

(4) Importance relative de la succion capillaire et de la thermo-osmose dans les sols de fondation.

(5) Valeurs relatives du critère de résistance et du critère de déformabilité dans l'évaluation de la portance des sols de fondation.

(6) Elaboration d'une formule rationnelle et vérifiée expérimentalement d'évaluation de la déformabilité d'une chaussée.

(7) Que penser des nouvelles tendances de la stabilisation des sols à l'aide de traces de produits chimiques spéciaux particulièrement actifs?

### Conclusions and Proposals for Discussion

The papers presented only cover a small part of the soil mechanics of roads, and the brief review of these papers given can by no means be considered as indicating the progress made in this branch of soil mechanics since the Conference at Zurich.

One must conclude, however, that it appears that:

(a) The appearance on the market of new apparatus for compaction (heavy vibrating cylinders for example) and the progress achieved, principally experimentally, in the understanding of this phenomenon have greatly improved the ways which engineers can use for compacting their soils.

(b) Of those tests which concern the bearing capacity of soils, the classical methods such as the CBR and the loaded plate test are the most used of all, and have made some progress, particularly the latter. New methods based on the deformability of the soil have appeared and have been developed, and there is at present a tendency to link different methods together, especially those which deal with rigid and with flexible pavements.

(c) The chemical stabilization of soils has shown appreciable progress, and one is able to think that the use of small amounts of special chemicals which are very active will develop greatly during the next few years.

It is difficult to suggest which subjects shall be given priority in discussion. It does seem, however, that the principal discussions should concern the following subjects:

(1) The comparable efficiency of pneumatic and vibrating compactors.

(2) The systematic classification of soils by their ease of compaction with the different types of compactors in current use.

(3) The validity of the formula, attributed to Sasaki, regarding the influence on compaction of the number of passes of the compactor:

$$\left(\frac{N}{a + b \cdot N}\right)$$

(4) The relative importance of capillary suction and of thermo-osmosis in foundation soils.

(5) The relative value of strength and deformation criteria in determining the bearing capacity of foundation soils.

(6) The development of a rational and experimentally proved formula for the calculation of the deformation of a pavement.

(7) What is to be thought of the new tendency for soil stabilization by means of traces of special chemicals which are exceptionally active.