

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.

L'application de la mécanique des sols dans le domaine de la construction des routes en Suisse

Application of Soil Mechanics to Road Construction in Switzerland

par Dr R. RUCKLI, chargé de cours, président du Comité National Suisse, Berne

Summary

General

As a result of its federal constitution Switzerland has no federal highways, but cantonal and district roads only. Roads under governmental control are limited to a network for the construction of which governmental subsidies have been allotted. Since Switzerland has no mining districts or heavy industry, and the highest permissible load for lorries is comparatively low, goods transport by road is not of the same extent as in most other countries. Therefore up till now soil engineers have not had much opportunity to study the problems created by heavy traffic. Owing to the geological structure of the country, the soil constituents and their stratification vary greatly within a small compass.

Administrative stipulations, traffic regulations and geological conditions make the application of soil mechanics to road construction more difficult than in other countries where the question is less complicated. The practice of soil mechanics in Switzerland takes place in the laboratories attached to the two Institutes of Technology and the Swiss Association of Road Engineers which has created a special section for problems connected with soil mechanics. This section, for the time being, is identical with the Swiss National Committee of the International Society.

Methods and soil mechanics problems in Swiss road construction

Investigation is carried out in test borings as well as by means of the penetrometer (Fig. 1). The bearing capacity of the soil is determined in plate bearing tests and by using the CBR method. The Swiss Association of Road Engineers has developed its own apparatus that may be applied for both tests (Figs. 3 and 4). Plate

bearing tests are carried out not only for the sake of investigations but also in order to control the compaction of the fill and the various layers of roads (Fig. 2). Load-settlement diagrams show whether the compaction is sufficient or whether it should be carried further, or whether a reinforcement of the superstructure is necessary. Up to date, as a result of the relatively rare occurrence of heavy loads, Switzerland has not encountered many considerable failures due to the repeated effect of traffic loads, and the pumping phenomenon of concrete surfacing is unknown. Nevertheless recent development indicates that we shall soon face soil mechanics problems similar to those encountered by our colleagues in other lands.

Tests are now being carried out at the laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology in order to throw light on the problems related to the danger of frost action in gravelly sand soils used as materials for the base courses of roads. These tests are intended to show whether *Casagrande's* frost criterion is not too restrictive in case of increasing coarse grain proportion. Under examination at the moment are a series of sand-gravel mixtures in which not only the fine grain (< 0.02 mm) proportion to the mortar (< 2.0 mm) varies, but also the coarse grain (> 2.0 mm) to the whole. Each mixture is characterized by a point in Fig. 6. In order to distinguish the sensitivity to frost, various signs such as: 0, +, X, etc. have been used. The three zones shown in Fig. 6 (0-I, non-freezable; I-II, slight frost damage; above II, serious frost damage) were drawn up on the basis of insufficient experimental results and up to date have not been confirmed by later tests as was expected. It is necessary to await further tests results to ascertain whether these zones can be maintained or not.

Généralités

Avant-propos

Avant d'entrer dans le vif de notre sujet et pour bien comprendre «l'application de la mécanique des sols dans le domaine de la construction des routes en Suisse», il est nécessaire de savoir dans quelles conditions politiques et géographiques

se situent nos constructions routières. Il est évident que ces conditions exercent une influence directe et indirecte sur la technique de construction; cela nous intéresse tout particulièrement car, à notre avis, les possibilités et les limites de cette science appliquée sont déterminées, dans une large mesure, par les conditions et l'ambiance créées par la nature et l'homme.

Pour illustrer notre idée nous citerons : l'organisation des services routiers, l'intensité du trafic sur nos routes et les conditions géotechniques et climatiques de notre pays. Pour être complètes, ces considérations générales doivent encore englober l'influence exercée par les spécialistes de la mécanique des sols sur son développement.

Organisation en Suisse des services routiers

La structure fédéraliste de la Suisse qui est due à la très grande diversité de notre population au point de vue linguistique, confessionnel, culturel, démographique et économique, se reflète également dans le domaine des routes.

La Suisse n'a pas de routes nationales ou fédérales mais seulement des routes cantonales et des routes communales, ce qui revient à dire que nous comptons dans notre pays vingt-cinq lois cantonales sur les routes, autant de services cantonaux des ponts et chaussées ainsi qu'un très grand nombre de services communaux similaires. On comprendra facilement que ces dispositions légales et administratives ne sont pas pour faciliter l'introduction de méthodes nouvelles dans la technique routière.

Mais, en Suisse comme ailleurs, le trafic routier a dépassé depuis longtemps le cadre régional et cantonal pour devenir un sujet d'intérêt national. La Confédération accorde aux cantons des subventions pour encourager l'aménagement systématique d'un réseau de routes principales, à condition que certaines normes et directives soient appliquées et respectées. Le programme prévoit, outre l'aménagement de plusieurs tronçons de route, des constructions importantes, voir même, suivant l'intensité du trafic, l'exécution d'autoroutes. La réalisation de ce vaste programme requerra l'application de la mécanique des terres sur une large échelle.

Intensité du trafic sur le réseau des routes suisses

La Suisse ne possède ni régions minières, ni industrie lourde et, par conséquent, ne connaît pas les grandes concentrations de population des pays industriels de l'Europe. En outre, aucune voie navigable ne pénètre à l'intérieur du pays pour alimenter son trafic interne. Le port du Rhin de la ville frontière de Bâle est le seul point de raccordement au réseau des voies navigables. Le trafic routier de transit n'est pas déterminé par des échanges internationaux de marchandises mais bien plutôt par le tourisme automobile utilisant nos cols alpestres. Ces conditions géographiques et économiques particulières exercent une influence directe sur le développement du trafic qui n'est pas du tout comparable à celui des régions industrielles des pays voisins où le trafic lourd a pris de grandes proportions.

La moyenne annuelle du trafic sur le réseau de nos routes principales est actuellement de 1400 véhicules par jour dont $\frac{1}{5}$ seulement de camions et autocars. Sur les parcours à très forte circulation, le nombre des essieux dont la charge dépasse 8 tonnes se monte à 180 environ.

A part les conditions géographiques et économiques que nous avons mentionnées, il est certain que la législation actuellement en vigueur a eu aussi pour effet d'entraver le développement du trafic routier lourd. En effet, la loi fédérale sur les véhicules à moteur bien qu'autorisant des charges de 10 t par essieu, ce qui peut paraître élevé, limite par contre à 13 t le poids total d'un camion, et à 20 t celui d'un train routier et stipule que ce dernier peut être composé d'un camion et d'une remorque seulement. Notons encore que le poids de l'essieu double est aussi limité à 10 t. A titre de comparaison rappelons que les accords de l'ONU (1949) concernant le trafic routier prévoient une charge totale de beaucoup supérieure, malgré la limitation à 8 t de la charge par essieu.

La fréquence des essieux lourds est ainsi restée modérée, même sur nos routes principales les plus importantes, ce qui fait que, jusqu'à présent, le constructeur de routes suisse connaît à peine le problème du trafic lourd qui, comme on le sait, est déterminé par la haute fréquence d'essieux fortement chargés. Cependant, on constate depuis quelques années un accroissement assez fort du trafic des marchandises et il est à craindre que nous ne soyons bientôt placés devant les mêmes problèmes de statique et de mécanique des terres que nos collègues étrangers.

Particularités géologiques

Conditions géotechniques. Les voies de communication évitent, dans la mesure du possible, les terrains difficiles et suivent le fond des vallées et les versants faiblement inclinés. Le sous-sol de ces zones, de même que celui de la région des Alpes et des Préalpes, est en général constitué par des formations géologiques récentes de l'époque quaternaire.

La configuration topographique et la composition géotechnique d'une grande partie du territoire suisse et, en particulier, des régions du plateau ouvertes à la circulation, datent de l'époque glaciaire. Les moraines de fond, les moraines latérales et frontales ainsi que les cônes de déjection et les alluvions dans les lacs constituent, sur de grands espaces, le sol de fondation de nos routes. Au cours de la période post-glaciaire, le terrain fortement modelé a été partiellement nivelé ou remodelé par le dépôt d'alluvions dans les vallées, par le charriage de moraines sur les versants, par les cônes de déjection et les deltas, par les éboulis, par le comblement des dépressions par des matériaux charriés ou en suspension, par la sédimentation mécanique et chimique et par la formation de marais. La structure tectonique et morphologique mouvementée des massifs montagneux qui sont à l'origine des sols pulvérulents, ainsi que les faibles distances de charriage ont engendré une extrême variété des formations diluviales et alluviales composant le sol de fondation des routes, même sur de courtes distances.

Il est à peine nécessaire de souligner qu'à cette grande diversité géotechnique correspondent des conditions hydrologiques très variées.

Conditions climatiques. Les conditions climatiques, en plus de celles de la géotechnique et de l'hydrologie, constituent les facteurs naturels déterminants à prendre en considération pour la construction des routes. A très peu d'exceptions près, toutes les régions de la Suisse enregistrent, en hiver, de longues périodes de froid dont la durée et l'intensité dépendent en premier lieu de l'altitude, la morphologie d'une région pouvant cependant être la cause de gros écarts par rapport au climat moyen. Les périodes de froid peuvent atteindre, même dans les régions basses, une durée telle que la gélivité des terrains ne peut être négligée et, dans certains cas, est un facteur déterminant les dimensions et le genre de construction de la chaussée à adopter.

Possibilités et limites de l'application de la mécanique des sols à la construction des routes en Suisse

Après ces considérations générales, nous allons essayer d'essayer les possibilités d'application de la mécanique des sols dans le domaine des constructions routières en Suisse et d'en déterminer les limites.

Le plus vaste domaine d'application de la mécanique des sols est encore actuellement, et si paradoxal que cela paraisse, l'étude locale d'un cas déterminé. Les glissements et les éboulements constituent les principaux phénomènes pour lesquels on a fréquemment recours au spécialiste de la mécanique des sols. Parallèlement à cette question qui relève de la géologie, la

construction et l'entretien d'ouvrage d'arts sur les routes et de remblais sur de mauvais terrains soulèvent constamment des problèmes de géotechnique.

Les routes étant des ouvrages d'une grande superficie, à fondation peu profonde, reposant sur les couches supérieures exposées aux intempéries et à l'action de l'eau, leur construction est un problème relevant de la mécanique des terres proprement dit; malheureusement c'est un fait que tous les constructeurs de routes n'ont pas encore reconnu.

Il n'est donc pas surprenant que les phénomènes de gélivité des sols rencontrés en Suisse aient entraîné les essais géotechniques systématiques auxquels on devrait procéder avant la construction de chaussées. La technique de ce domaine spécial de la construction de routes a été particulièrement développée. Ce n'est que plus tard, lorsqu'on s'est occupé, pour la construction d'aérodromes, du problème des dimensions à donner aux pistes d'envol, que se fit sentir de plus en plus la nécessité de fixer d'une manière rationnelle les dimensions de la superstructure à l'aide des méthodes de la géotechnique.

Finalement, la construction des routes pose, du point de vue technologique, de nouveaux problèmes de mécanique des sols. On demande à cette nouvelle discipline des critères applicables au choix des matériaux à utiliser pour la construction des chaussées; elle doit également montrer les moyens mécaniques appropriés à leur mise en œuvre; en outre, elle doit fournir au conducteur des travaux les méthodes de contrôle nécessaires à la surveillance des travaux sur le chantier.

L'application de la mécanique des sols aux constructions routières est toutefois limitée à plusieurs égards. La première limite provient des conditions créées par l'homme, car l'utilisation de notre science pour les constructions routières dépend en premier lieu de l'ingénieur cantonal ou communal. Une autre raison est le fait que, jusqu'à présent, nous connaissons à peine le problème posé par le trafic lourd et, plus particulièrement, que nos routes en béton n'ont pas encore subi de grands dommages tels que les fameux décrochements de dalles en Allemagne ou le redoutable phénomène du «pumping» (pompage) en Amérique. Ces dégâts massifs persuadent plus aisément les sceptiques de la nécessité de recherches géotechniques systématiques, que ce soit dans un but thérapeutique ou prophylactique, que la destruction lente des revêtements sous l'action du gel qui est fréquente sur les routes suisses.

En Suisse, les distances de transports de la gravière, ou de la carrière, au chantier sont en général faibles; de ce fait il nous manque le stimulant pour la construction des routes par stabilisation qu'a rendu possible la mécanique des sols.

En revanche, les limites fixées par les conditions géotechniques sont déterminées par les conditions naturelles. L'extraordinaire diversité de la constitution de nos sols et leurs variations dans les plus petits espaces opposent certains obstacles à l'application rationnelle et systématique de la mécanique des sols aux constructions routières.

Aussi les conditions d'application de la géotechnique à la construction des routes sont-elles plus défavorables en Suisse que dans beaucoup d'autres pays bénéficiant de conditions moins compliquées.

Les spécialistes de la mécanique des sols pour les constructions routières en Suisse

Etant donné que la Suisse n'a pas de routes nationales ni d'administration centrale des travaux publics, elle ne possède pas non plus un laboratoire national de géotechnique pour assurer l'uniformisation des méthodes de travail, donner des

instructions aux diverses administrations cantonales et publier des normes ou des prescriptions sur la façon de traiter les problèmes de mécanique des sols dans le domaine routier.

Les principaux spécialistes de la mécanique des sols ne sont donc pas les administrations des ponts et chaussées mais deux institutions universitaires, à savoir: Le Laboratoire de recherches hydrauliques et de mécanique des terres de l'Ecole Polytechnique Fédérale à Zurich (EPF) et le Laboratoire de géotechnique de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne (EPUL). Les constructions routières ne constituent qu'une partie du champ d'activité de ces deux instituts. Vu leur autorité scientifique, ils sont appelés comme conseils dans les cas où leur aide est reconnue nécessaire.

Jusqu'à présent, les administrations cantonales et communales hésitent encore à installer des laboratoires de recherches ou de campagne. Aussi souhaitable qu'il soit de s'adresser aux laboratoires existants dans les cas où la collaboration avec le spécialiste de la mécanique des sols s'avère nécessaire, cette manière de procéder entraîne un désavantage, c'est-à-dire que les cantons ne possèdent pas les installations nécessaires pour exécuter les recherches courantes et ne peuvent former un personnel spécialisé.

En plus des laboratoires universitaires, les ingénieurs géologues privés sont appelés en consultation par les directions des travaux publics. Cependant, jusqu'à ce jour, il est tout à fait exceptionnel que les entreprises procèdent à des essais géotechniques avant d'entreprendre la construction des routes et des revêtements.

La Confédération encourage le plus possible l'application de la mécanique des sols à l'aménagement du réseau des routes principales, soit par des conseils techniques soit en imposant l'étude des questions de géotechnique comme condition de subventionnement. Un crédit affecté à l'encouragement des recherches en matière de constructions routières met la Confédération en mesure de soutenir les études scientifiques dans le domaine de la mécanique des sols, soit par des subventions pour recherches scientifiques, soit qu'elle charge les instituts universitaires ou d'autres experts d'études déterminées ou encore qu'elle contribue à des publications dans ce domaine.

L'Union suisse des professionnels de la route est l'organisme d'avant-garde de la géotechnique appliquée au domaine routier. C'est une association typiquement suisse groupant des constructeurs de routes de toutes tendances. Cette association a confié la section de la mécanique des sols à une commission technique spéciale au sein de laquelle les laboratoires de recherche, l'administration et les entrepreneurs de routes travaillent en étroite collaboration. Sa tâche consiste à fournir aux constructeurs de routes les connaissances nécessaires en matière de mécanique des sols; l'Union publie dans ce but des normes et des directives et organise des cours spéciaux.

Etant donné que cette commission comprend un grand nombre de personnes s'intéressant à l'application de la géotechnique en Suisse, elle s'est également constituée en Comité national suisse de la Société internationale de mécanique des sols et des travaux de fondations.

Jusqu'à ce jour, l'activité du Comité national s'est concentrée sur deux problèmes pratiques importants, à savoir: premièrement la publication, aussi rapide que possible, d'un appendice à la collection actuelle des normes concernant l'application de la géotechnique à la construction des routes, et, secondement, la préparation de notre congrès. En raison des nombreux travaux qui incombent à ses membres, l'organisation du travail scientifique du Comité national n'a été qu'ébauchée.

Après ce tour d'horizon, nous allons exposer les méthodes utilisées en Suisse et fournir à l'appui quelques exemples concrets d'application de la mécanique des sols dans le domaine des constructions routières.

Méthodes de la mécanique des sols appliquées aux constructions routières en Suisse et solutions apportées à certains problèmes

Prospection et sondages

Le pénétromètre. Pour déterminer les caractéristiques géotechniques de sols dont la composition et la stratification varie aussi fortement, que ceux de la Suisse, il est nécessaire de disposer d'un réseau serré de sondages.

La classique fouille de sondage est encore la forme la plus employée pour l'investigation du sous-sol, en particulier dans les cas d'aménagement de routes existantes, lorsqu'il s'agit de déterminer la qualité des matériaux qui constituent la chaussée (infrastructure et superstructure). Mais dès qu'il s'agit de terrains peu compacts comme, par exemple, les dépôts lacustres de formation récente, la fouille est peu pratique et peu économique. Ces terrains constituent le domaine d'utilisation du nouvel appareil de prospection suisse: le pénétromètre. Cet appareil a été introduit par le Professeur R. Haefeli pour les sondages dans la neige et il joue un rôle important dans l'élaboration des pronostics d'avalanches. Après avoir subi une certaine adaptation, cet appareil a été appliqué aux recherches géotechniques.

La relation entre la résistance à la pénétration et les autres caractéristiques physiques des divers sols, telles que le module de compressibilité et la résistance au cisaillement, n'a pas encore été déterminée théoriquement. L'interprétation des résultats des recherches est donc empirique. La prospection au moyen du pénétromètre constitue un «test» permettant d'exprimer la qualité d'un sous-sol au moyen de chiffres conventionnels et comparables.

Nous citerons comme exemple de l'utilisation du pénétromètre les recherches géotechniques pour l'autoroute à quatre voies de Lucerne à Hergiswil (Fig. 1).

L'essai de charge avec plaques. Pour l'examen de la surface du sol, sol naturel ou chaussée, nous avons recours, de plus en plus, à l'essai de charge avec plaque circulaire. La plaque est chargée par un vérin qui transmet le poids de l'essieu d'un camion. Cet essai permet d'obtenir des indications sur la compressibilité du sol et sur la nécessité de procéder à des recherches géotechniques plus approfondies. Comme on le verra plus loin, le domaine d'utilisation dépasse largement le cadre de l'essai de charge traditionnel.

Constitution, dimensionnement et contrôle de la superstructure

Désignations. A la diminution des contraintes provoquées par des charges de la circulation en fonction de la profondeur devrait correspondre, pour une construction rationnelle, une amélioration, de bas en haut, de la qualité des couches constituant la chaussée. En pratique, cette fondation est constituée par le sol naturel sur lequel reposent une ou plusieurs couches portantes dans lesquelles les charges se répartissent. On désigne par infrastructure le sol naturel amélioré par un procédé quelconque, ainsi que les remblais compactés (Fig. 2).

Par superstructure on entend la totalité des couches situées au-dessus de la plate-forme de terrassement, qui sont composées de matériaux de meilleure qualité, c'est-à-dire la couche inférieure (protection contre le gel), la couche de support et le revêtement. Il est nécessaire de désigner ces couches portantes

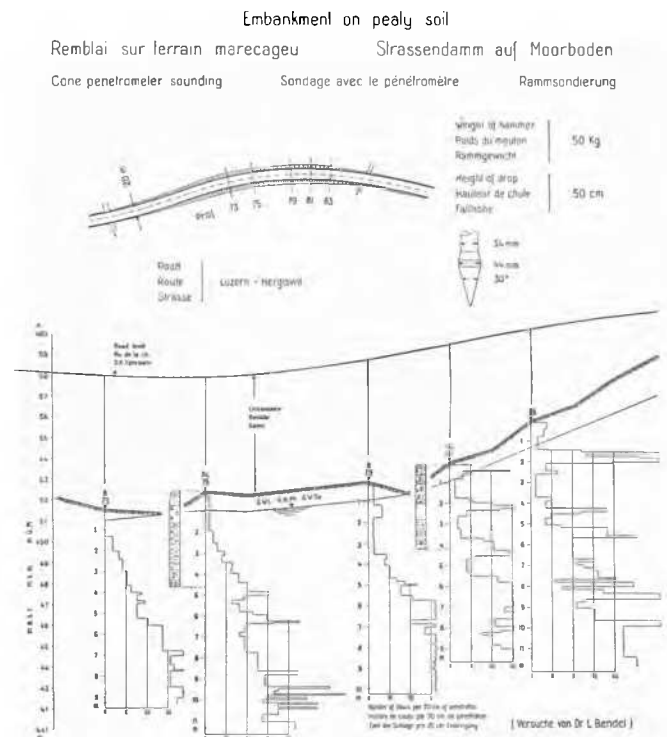


Fig. 1 Exemple d'un essai de pénétration. En raison des résultats de cet essai il a été décidé de ne pas modifier le tracé et de ne pas réduire la hauteur du remblai. Les sols pour lesquels le nombre de coups est inférieur à 15 pour une pénétration de 20 cm sont considérés mauvais pour la fondation des routes
Example of a Driving Test. On the Basis of these Results it was Decided Neither to Change the Alignment Nor to Reduce the Height of the Dam. Soils in which a Depth of 20 cm is Reached with 15 Blows or less are Considered Unsuitable for Road Foundations

de façon précise afin de pouvoir donner à la superstructure les dimensions nécessaires.

Les procédés de dimensionnement employés en Suisse. L'augmentation constante de l'intensité du trafic et du poids des charges, les hautes exigences imposées en ce qui concerne les qualités de la chaussée, et la nécessité de construire économiquement, obligent le constructeur de routes, à utiliser des méthodes techniques et rationnelles pour faire choix d'un type de chaussée. Il doit fixer les dimensions de la superstructure en fonction de la portance du sous-sol et du poids des véhicules.

Comme on le sait, la portance du sol est déterminée par deux critères statiques: Par la résistance à la compression (tassement élastique et tassement de consolidation) et par le poinçonne-

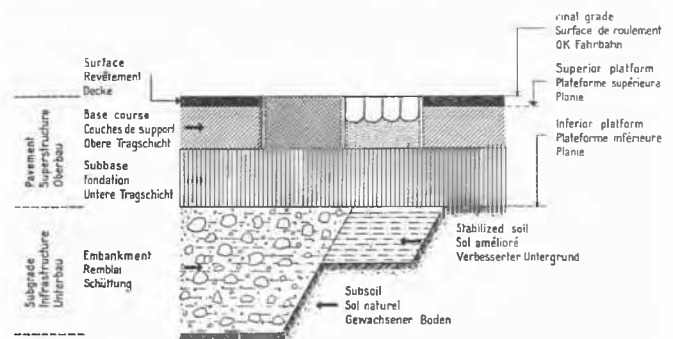


Fig. 2 Tableau des diverses couches constituant la chaussée
Table of the Various Subgrade Layers of the Road

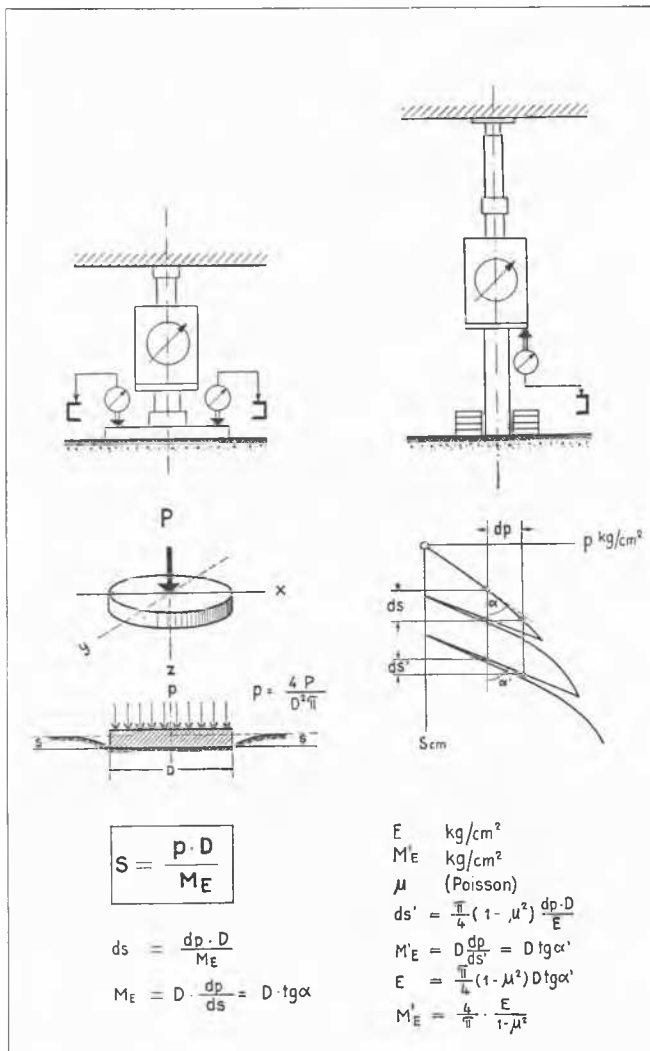


Fig. 3 Essai de charge avec plaque circulaire. En haut à gauche: appareil pour essai M_E . En haut à droite: appareil pour essai C.B.R. Les profils [désignent le bâti de référence. Les grandeurs désignées par (') se rapportent à la branche réversible de la courbe charge-tassement (état élastique idéal)

Plate Bearing Test. Top Left: Apparatus for M_E Test. Top Right: Apparatus for CBR Test. The [-Profile Represents the Stand of Reference. The Values Marked (') Refer to the Reversible Part of the Road-Settlement Curve (Ideal Elastic Condition)

ment, c'est-à-dire la déformation plastique avec reflux latéral du sol. En plus de ces deux critères statiques, il y a lieu de tenir compte de la gélivité du sol comme troisième critère pour déterminer les dimensions de la superstructure.

La résistance au poinçonnement, c'est-à-dire à la formation des zones de déformation plastique dépend de la résistance au cisaillement de l'infrastructure. Toutefois, les méthodes théoriques, fondées sur la détermination de la résistance au cisaillement en laboratoire ou sur place, ne sont pas appliquées en Suisse. Les nouvelles normes suisses recommandent plutôt de déterminer les dimensions selon la méthode empirique C.B.R., lorsque le sol examiné ne comporte pas de grains d'un diamètre supérieur à 15 mm.

Chez nous, la résistance à la compression est rarement déterminée en laboratoire sur des échantillons de sols non remaniés; on préfère exécuter l'essai de charge directement avec une plaque circulaire.

L'interprétation des résultats de l'essai de charge avec plaque se fait théoriquement et empiriquement. Si le but de l'essai consiste à fournir les bases nécessaires à un calcul statique sous forme d'un coefficient de sol, on détermine de préférence le module de compressibilité M_E . M_E peut être exprimé par la solution $M_E = p D/s$. Le module est donc proportionnel à la charge spécifique (p) et au diamètre de la plaque (D) tandis qu'il est inversement proportionnel au tassement (s) (Fig. 3).

Dans le cas idéal d'élasticité pure, il existe une simple relation linéaire entre le module d'élasticité et la valeur de M_E pour un nombre de Poisson donné ($M_E = 4/\pi \cdot E/[1 - \mu^2]$). M_E est dans ce cas une constante du sol. C'est pourquoi nous préférons le module de compressibilité M_E au module de réaction $K = M_E/D$, qui dépend du diamètre de la plaque.

Dans le cas où la dimension de la superstructure ne dépend pas de la gélivité du sol, on n'est pas en mesure de dire d'emblée si c'est la sécurité contre le tassement ou celle contre le poinçonnement qui est déterminante pour fixer les dimensions de la superstructure. C'est pourquoi, pour ces sols éventuellement instables, il y a lieu de procéder à deux essais, à savoir: la détermination du M_E et l'essai C.B.R. L'essai M_E est fondé sur le principe dit «controlled stress principle», c'est-à-dire que l'on mesure la déformation en fonction de la charge donnée; l'essai C.B.R., en revanche, est fondé sur le principe dit «controlled strain principle» selon lequel la déformation est donnée et la contrainte correspondante est mesurée.

Ces deux essais, malgré leur différence fondamentale, présentent de telles analogies dans leur réalisation pratique qu'il a été possible de construire un seul appareil pour effectuer les deux essais. La Commission des experts suisses pour la superstructure et l'infrastructure a mis au point un appareil type.

L'appareil de mesure des tassements VSS et son utilisation. Ce nouvel appareil est construit pour répondre aux besoins du constructeur de routes. Il est composé de deux plaques de support circulaires et interchangeable, de 200 cm² et 700 cm² de surface pour l'essai M_E , et d'un poinçon de 20 cm² de surface pour l'essai C.B.R. Ce poinçon sert aussi à la transmission de l'effort pour l'essai avec plaques circulaires. L'appareil est complété par des instruments enregistrant les mesures des tassements et des pressions, tels que manomètres, comparateurs et un bâti de référence (Fig. 4).

Nous pouvons nous dispenser de nous étendre sur l'essai C.B.R. que nous exécutons conformément aux normes internationales. En revanche, nous traiterons un peu plus à fond, l'essai avec plaques et son application.

On a renoncé jusqu'à ce jour à établir des courbes permettant de fixer la dimension de la superstructure en fonction des résultats d'essais. Une interprétation théorique des résultats des essais ne saurait non plus entrer en considération pour la pratique courante. Si les normes suisses donnent une si grande importance à l'essai avec plaque circulaire, si bien qu'un appareil spécial a été étudié pour cet essai, c'est que celui-ci sert à la fois de «test» ou essai conventionnel du sous-sol et de la route finie, et de contrôle de la bienfaisance du compactage de l'infrastructure (remblais) et des différentes couches de la superstructure. Depuis que l'on remplace de plus en plus le hérisson classique par des couches de macadam ou de gravier compacté il est devenu urgent de disposer d'une méthode simple pour contrôler l'exécution de la superstructure sur le chantier.

En pratique, l'on considère que, pour l'essai avec plaque circulaire, la valeur du M_E est un coefficient de qualité du sol. Cette valeur $M_E = D dp/ds$ est définie, pour une charge déterminée, par l'inclinaison de la courbe représentative de la variation du tassement en fonction de la charge appliquée.

Dans la pratique on introduit dans la formule la corde de la courbe s'inscrivant dans l'intervalle entre 0,5 et 1,5 kg/cm². Tant que l'on reste hors du domaine plastique ou tant que le poinçonnement n'est pas atteint, la courbure de la courbe tassement-charge est en général faible; pour un matériau parfaitement élastique, la ligne représentative de cette fonction serait une droite. Pour une grandeur déterminée de la plaque correspond à chaque valeur de M_E une ligne idéale tassement-charge. L'espace compris entre les directions positives des axes de la courbe charge-tassement peut être délimités en secteurs par un faisceau de courbes concourant à l'origine, et correspondant chacune à une valeur de M_E . Plus le secteur est éloigné de l'horizontale (forts tassements), plus les sols qu'il représente sont de mauvaise qualité (Fig. 5a).

Les normes suisses prévoient quatre zones ou secteurs pour l'essai avec plaque circulaire de 200 cm², à savoir:

- Zone 1: $M_E < 150$ kg/cm², mauvais sol;
- Zone 2: $150 < M_E < 400$ kg/cm², bon sol naturel ou sous-sol amélioré;
- Zone 3: $400 < M_E < 1000$ kg/cm², couches inférieures de la superstructure;
- Zone 4: $M_E > 1000$ kg/cm², couches supérieures de la superstructure.

Les normes suisses recommandent l'utilisation de la plaque circulaire de 700 cm² pour le contrôle de la superstructure terminée (Fig. 5b).

En pratique, il est superflu de calculer la valeur du M_E . Il suffit de reporter au cours de l'essai la grandeur du tassement en fonction de la charge sur un diagramme spécial indiquant les diverses zones. La situation de la courbe caractérise immédiatement la qualité du sol.

Lorsque les valeurs minima, prescrites pour les différentes couches, ne sont pas atteintes, le sous-sol ou, suivant les cas, l'infrastructure, devra être amélioré ou bien l'épaisseur de la superstructure devra être augmentée. Le compactage des différentes couches doit être poursuivi jusqu'à ce que les limites prescrites soient atteintes.

Les expériences faites jusqu'à ce jour sont encore trop peu nombreuses pour qu'un jugement définitif puisse être exprimé à ce sujet.

Problèmes dynamiques: charge répétée. Un des problèmes de constructions routières les plus urgents à élucider en matière et à la solution duquel la mécanique des sols devrait pouvoir contribuer largement, est posé par l'accroissement du trafic lourd.

Les routes sont-elles exagérément sollicitées par la circulation des véhicules lourds; les charges autorisées ont-elles atteint ou même dépassé le poids admissible; une limite supérieure peut-elle être fixée; quelles conséquences entraîneraient de plus fortes charges admissibles par essieu ou des poids de véhicules plus élevés du fait, par exemple, de l'adhésion à une convention internationale?

L'expérience montre que les routes résistent assez longtemps au trafic croissant sans montrer de signes de faiblesse et que la destruction de la chaussée se manifeste soudain sans cause apparente et sans variation notable de l'intensité du trafic. Pour les routes à revêtement souple, cette désagrégation se manifeste par l'apparition de fentes, la déformation de la surface et la destruction complète du revêtement. Dans le cas des routes en béton, les joints et les bords des dalles commencent à travailler, ensuite apparaissent des décrochements de dalles ou on voit se produire le phénomène de «pumping» (pompage), étudié par les Américains. En Suisse, jusqu'à présent, on

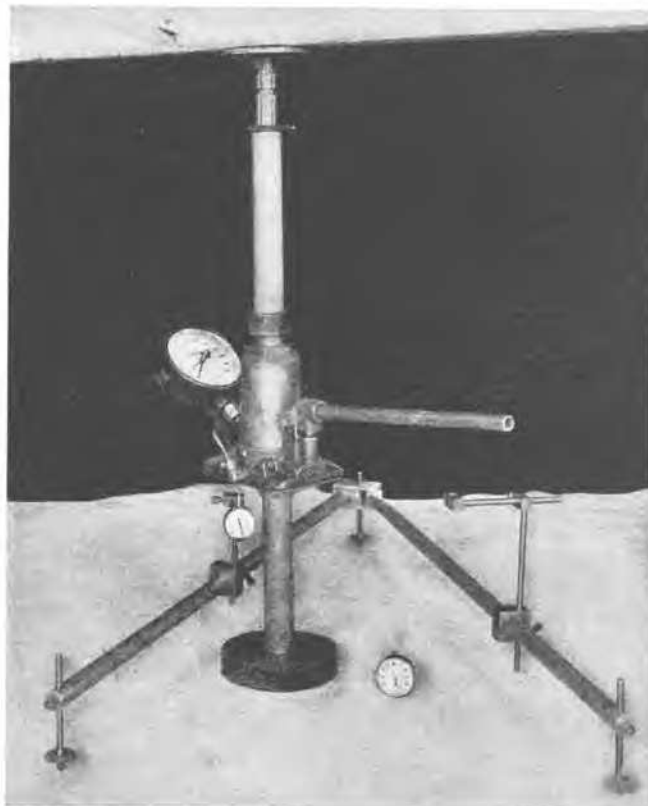


Fig. 4 Appareil d'essais de l'Union Suisse des Professionnels de la Route
Soil Test Apparatus of the Association of Swiss Road Engineers

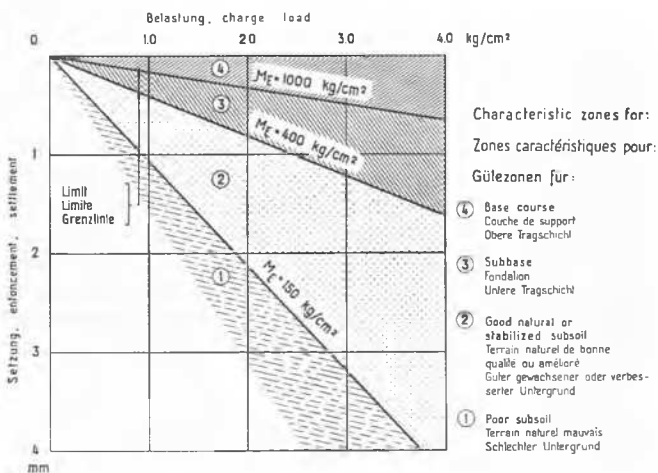


Fig. 5a Examen de sols par essai de charge avec plaque de 200 cm²
Secteurs caractéristiques pour divers sols
Soil Investigation by 200 cm² Plate Bearing Test
Characteristic Sections for Various Soils

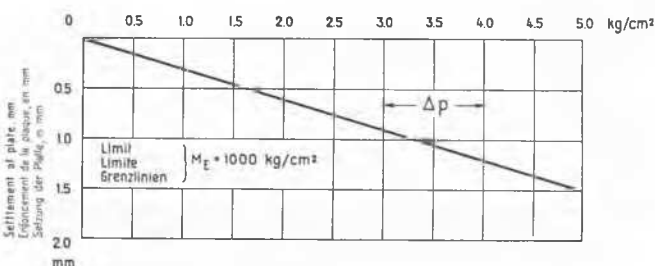


Fig. 5b Essai avec plaque de 700 cm² sur la superstructure terminée
700 cm² Plate Bearing Test on the Finished Superior Platform

ne connaît heureusement pas cette sorte de dommages causés aux routes en béton. Ils sont évidemment un phénomène de fatigue de la chaussée. Dans notre pays, les conséquences du trafic lourd se sont manifestées jusqu'à présent avant tout, sur les parcours suivis par les lignes d'autobus où la circulation passe toujours sur les mêmes traces et où la fréquence de passage des véhicules lourds est élevée.

En plus des variables qui interviennent pour le choix des dimensions des chaussées soit: la charge de roue P , l'épaisseur de la superstructure et la qualité du sous-sol caractérisée par la valeur M_E ou par la valeur du C.B.R., il y a lieu de considérer encore la fréquence des poids lourds. Se fondant sur les travaux de *Tschebotarioff* et les essais d'autres chercheurs, on peut présumer que l'apparition des phénomènes de fatigue dépend moins de la fréquence, c'est-à-dire du nombre de passages par unité de temps, que du nombre absolu de ces passages indépendamment de leur cadence. L'effet de la répétition des charges ne serait donc pas un problème dynamique au sens propre du terme pour autant qu'il ne s'agit pas d'une destruction ou modification de la structure de la chaussée.

On peut observer actuellement en Suisse l'effet de l'accroissement de la fréquence des poids lourds, abstraction faite des sections menacées par le gel, lorsque le gravier et le macadam de la superstructure sont composés de matériaux à faible résistance mécanique. Par l'effet des charges roulantes, ces matériaux sont peu à peu écrasés; la teneur en parties fines augmente et la superstructure devient finalement gélive. Ces phénomènes ont d'abord été observés sur les routes principales conduisant de Bâle (port du Rhin) vers l'intérieur du pays, en passant par le Jura. Les matériaux à disposition dans cette région, suffisants pour le trafic léger et moyen, ne sont plus assez résistants pour supporter la charge du trafic lourd. Toutefois il est possible que cette destruction mécanique ne soit pas due uniquement à l'action des charges lourdes mais également à la désagrégation naturelle des roches tendres, désagrégation accélérée par le trafic lourd.

Jusqu'à ce jour, on n'a pas trouvé de moyen permettant de tenir compte de l'effet des charges répétées pour calculer les dimensions des couches portantes de la chaussée – l'essai C.B.R. en tient compte implicitement dans une certaine mesure – et aucune recherche n'a encore été faite dans ce sens. Mais en raison de l'évolution qui s'annonce, nous suivons avec grand intérêt les expériences faites à l'étranger ainsi que la littérature publiée sur cette question importante et délicate.

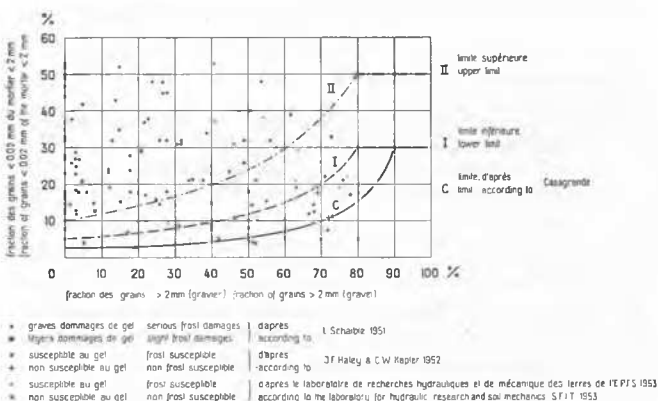


Fig. 6 Critères de gélivité pour mélanges de sable et gravier. Part admissible des grains fins (< 0,02 mm) du mortier (< 2 mm) en fonction de la part des grains > 2 mm
Frost Criteria for Sand-Gravel Mixtures. Proportion of Fine Grains (< 0,02 mm) in the Mortar (< 2 mm) versus Proportion of Grains > 2 mm

La gélivité des mélanges de sable et gravier

La principale caractéristique pour apprécier la gélivité d'un sol est sa composition granulométrique et, en particulier, sa teneur en éléments fins. Dans le cas d'éléments réguliers, la limite supérieure de la grosseur des éléments varie entre 0,05 et 0,02 mm suivant les conditions chimiques et thermiques. Les fameux critères de gélivité de *Beskow* et de *Casagrande* tiennent compte de ce fait et déterminent les parts d'éléments fins dès 0,05 ou 0,02 mm.

En Suisse, l'expérience a montré que les mélanges de sables et graviers pour lesquels les gros éléments dominent peuvent être non gélifs bien que, selon le critère de *Casagrande*, ils ne doivent pas être utilisés pour la construction de la superstructure. On peut donc se demander si ce critère n'est pas trop strict pour ce matériau. Les nouvelles méthodes de construction où le hérissson est remplacé par un gravier compacté mécaniquement ont rendu nécessaire un nouvel examen des critères de gel.

Se fondant sur les résultats d'expériences et sur des considérations théoriques, on a cru pouvoir admettre que la teneur du mortier en éléments plus petits que 0,02 mm de diamètre qui, d'après *Casagrande*, peut être de 3% à 10%, peut augmenter avec la fraction d'éléments plus gros que 2 mm, car, pour ce qui est du phénomène de gélivité, ces derniers se comportent comme une masse inerte et diminuent l'influence des éléments fins. Le problème s'est posé de déterminer dans quelle mesure la teneur de mortier en éléments fins d'un diamètre inférieur à 0,02 mm peut augmenter avec la fraction d'éléments grossiers. Pour résoudre cette question, on peut reporter graphiquement, sur un diagramme, la part d'éléments fins en fonction de la teneur en gravier pour le plus grand nombre d'échantillons possible (Fig. 6). Les mélanges qui se seront révélés bons seront désignés par une croix (x), les autres par un cercle (O). Les résultats d'observations obtenus en Suisse ne sont pas suffisants pour permettre d'établir la relation recherchée entre éléments fins et grossiers. Cependant l'interprétation d'essais granulométriques faits en Allemagne et d'observations faites en Suisse nous a conduit à déterminer la limite entre les mélanges gélifs et les mélanges non gélifs. Cette courbe donne la fraction maximum d'éléments fins en fonction de celle des éléments grossiers.

Pour répondre au vœu exprimé par les milieux intéressés qui voudraient pouvoir disposer d'un critère tenant compte de ces idées nouvelles, l'Union Suisse des Professionnels de la Route a édité une norme provisoire pour la détermination de la gélivité des mélanges de sable et gravier. Elle distingue deux courbes (I et II) séparant les trois zones qui correspondent aux mélanges non gélifs, peu gélifs et gélifs.

Il aurait été trop long d'attendre que l'on rassemblât suffisamment d'observations, aussi avons-nous décidé de vérifier notre critère à l'aide d'essais systématiques au Laboratoire de mécanique des terres de l'Ecole Polytechnique Fédérale. Le programme d'essais prévoit l'examen d'une série d'échantillons de sables et graviers qui varieront dans leur composition de telle façon que les points représentatifs du mélange soient situés dans la zone limitée par les deux courbes ou dans son voisinage.

Le matériau d'essai est un gravier brut composé d'éléments plus petits que 2 mm, fractionné en 18 composantes. La part considérée déterminante des éléments fins plus petits que 0,02 mm a été augmentée, au cours des essais, par paliers de 5%. La séparation des différents éléments fins a exigé beaucoup de temps. Les éléments fins de notre gravier brut, séparés par

décantation, peuvent être considérés comme très représentatifs des conditions suisses. On a renoncé, pour le moment, à une variation des éléments fins plus petits que 0,02 mm suivant les différentes sortes d'argile.

Les mélanges de sable et graviers sont gelés en système ouvert, système permettant la montée par aspiration de l'eau d'une nappe phréatique. Les échantillons ont un diamètre de 10 cm et une hauteur de 25 cm. La température de gel est de $-7,5^{\circ}$, celle de l'eau du bassin $+4^{\circ}$. Actuellement, seul le gonflement a été adopté pour définir la gélivité; on a distingué entre les matériaux qui permettent la formation de lentilles de glace (donc ceux qui accusent un gonflement) et ceux qui ne permettent pas la formation de lentilles de glace (donc les matériaux non gélifs). La température est constamment mesurée, à différentes hauteurs, de telle façon qu'il est possible de déterminer le gradient de température pendant l'essai. Le montage de l'installation d'essai a été entrepris au printemps de 1953. Au total 80–100 échantillons seront examinées.

Les résultats ont été reportés dans la Fig. 6. Cette figure montre les deux courbes (I et II) correspondant au critère provisoire ainsi que celle que l'on obtient en appliquant le critère de *Casagrande* (C). Aucun des 17 points représentatifs des matériaux «gélifs» n'est situé au-dessous de la ligne correspondant au critère de *Casagrande*; huit échantillons représentés sous la courbe I étaient gélifs et sont donc en contradiction avec notre critère. En revanche, quatre échantillons dont les points représentatifs sont situés au-dessus de la courbe

II se sont révélés non gélifs. Les essais faits par *Haley* et *Kaplar* aux Etats-Unis, que nous avons reportés sur la Fig. 6, montrent des anomalies semblables.

On arrive à la conclusion que les échantillons représentés par des points qui correspondent au critère de *Casagrande* sont sûrement non gélifs; si la part en éléments fins $< 0,02$ mm dépasse 3%, seuls des essais de gel peuvent permettre de dire avec certitude si un mélange de sable et gravier est gélif ou non.

La rédaction définitive des nouvelles normes devrait tenir compte de cette constatation.

La gélivité du sous-sol

En plus des recherches ayant pour but l'examen des critères de gel pour les mélanges de sable et gravier, notre programme de recherches prévoit d'autres études générales sur la gélivité des sols. Les questions scientifiques suivantes doivent retenir notre intérêt: Quelle est l'influence exercée par la température de gel et le gradient de température sur le processus de gel et sur la formation de lentilles de glace; est-il possible de prouver que la force dite d'aspiration est une constante du sol; la gélivité d'un sol peut-elle être exprimée par le produit: force d'aspiration P par perméabilité k_D ? La solution définitive de ces problèmes, que nous avons déjà étudiés partiellement, exige une installation permettant de mesurer la température et la pression interstitielle, à différentes hauteurs, dans les échantillons. Des travaux seront entrepris après l'achèvement des essais sur les mélanges de sables et graviers.