

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Rapport sur l'auscultation dynamique des terrains

Autor: Hertwig, A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-2997>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 30.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

VIII 3

Rapport sur l'auscultation dynamique des terrains.

Bericht über die dynamischen Bodenuntersuchungen.

Report on Dynamic Soil Tests.

Geh. Regierungsrat Dr. Ing. A. Hertwig,
Professor an der Technischen Hochschule Berlin.

Remarques préliminaires: Il est connu que les essais de charge statique effectués sur un sol au moyen d'apport de poids ou par la presse hydraulique présentent diverses lacunes. Les résultats dépendent principalement de la grandeur de la surface chargée. Déjà *Engesser*¹ a démontré que pour une charge spécifique donnée le tassement augmente avec l'accroissement de la surface soumise à la charge d'essai. *Kögler* (^{2, 3, 4}) et divers auteurs ont démontré expérimentalement le théorème de «*Engesser*» et pour une surface déterminée correspondant à un minimum de tassement celui-ci augmente moins vite en agrandissant la surface. Les essais effectués jusqu'à maintenant portent sur une surface de 1 m² environ et il est très difficile d'en tirer des conclusions en extrapolant les résultats des essais à des valeurs correspondant à des surfaces de l'ordre de grandeur rencontrée en pratique dans les constructions d'ouvrages. Une autre lacune des essais statiques provient du fait que les charges ont un effet que sur une petite profondeur. *Kögler*, et d'autres, ont démontré que les effets en profondeur atteignent 5 à 6 fois le diamètre de la surface chargée. Ainsi, avec de tels essais on ne peut absolument pas intéresser au tassement les couches inférieures qui peuvent influencer les résultats et l'on obtient des conclusions erronées. Cherchant à diminuer le peu de précision donné par les essais statiques, la „Deutsche Forschungsanstalt für Bodenmechanik“ (Degebo) effectue depuis 7 ans des essais par le procédé dynamique.

1^o *Description de l'appareil.*

Le terrain est essayé au moyen d'une machine qui développe des forces variables, de forme sinusoïdale, et en des directions choisies à volonté. La plus simple de ces machines consiste en poids mis en mouvement par deux axes tournant en sens inverse l'un de l'autre (voir fig. 1). On peut créer des forces, de forme sinusoïdale, normale au terrain, ainsi que des forces de directions variables et des mouvements de torsion. De telles machines (vibreurs) sont construits par la Maison Losenhausenwerk, Düsseldorfer Maschinenbau A.-G., Düsseldorf-Grafenberg. Le format de cette machine, la valeur des forces centrifuges et le nombre de tours des axes peuvent être modifiés à volonté.

¹ Les chiffres désignent les numéros correspondants de la bibliographie.

Raleigh et *Lamb* (7 et 8) ont étudié la propagation des ondes développées par une charge répartie ou concentrée agissant sur le terrain, dans un milieu non limité, homogène et élastique. Il se produit des ondes de déplacement du terrain, des ondes de compression et des ondes de surfaces dont les vitesses de propagation sont environ dans les rapports 1,7 : 1 : 0,9; les ondes sont presque uniquement observées par le Macrosismographe.

H. et *E. Reissner* ont étudié mathématiquement les ondes en fonction de la masse de la machine et pour une surface limitée de terrain. Nous reviendrons plus tard sur ces calculs. Pour l'emploi pratique des ondes destinées à reconnaître la qualité d'un terrain on admet des hypothèses simplifiées.

Dans une partie des essais on considère la machine et une partie du terrain comme un point matériel oscillant reposant sur un sol plus ou moins élastique, qui est le sol dont on fait l'essai. Dans la deuxième partie des essais on observe les ondes créées et propagées par la machine.

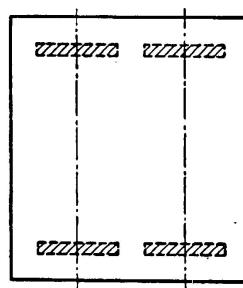
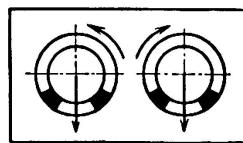


Fig. 1.
Disposition des balourds pour
l'excitation verticale.

2° La machine sur sol élastique.

Si l'on produit par cette machine des forces verticales et périodiques, on peut dans une première approximation considérer ce vibreur comme un point matériel ayant un degré de liberté suivant la verticale. Le sol produit une réaction linéaire et possède un effet d'amortissement que l'on prend en première approximation comme proportionnel à la vitesse. Tout le processus du mouvement est exprimé par une équation différentielle linéaire avec constantes

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = P \sin \omega t,$$

ou, en divisant par M :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\lambda \frac{dx}{dt} + \alpha^2 x = \beta \sin \omega t.$$

dans cette équation M est la masse oscillante

$b \frac{dx}{dt}$ la force d'amortissement et

cx la réaction élastique, $P \sin \omega t$: la force excitatrice périodique avec la fréquence ω .

Aux essais on donne à la fréquence ω toutes les valeurs possibles. Le nombre d'oscillations x est enrégistré par un vibrographe placé sur la machine. Puis on relève le décalage entre la position du balourd et celle de la machine oscillante, du fait que dans ce relevé du vibrographe la position des balourds est continuellement relevée, et en troisième lieu la puissance absorbée par la machine est aussi enrégistrée.

Dans une pareille expérience, si l'on augmente le nombre de tours on voit que l'amplitude x du point oscillant augmente de zéro jusqu'à un maximum et, si l'on continue d'augmenter le nombre de tours, cette amplitude tend vers une valeur fixe suivant une asymptote. Le relevé des amplitudes montre évidemment une zone de résonance quand la fréquence de l'excitatrice correspond à la fréquence propre α de l'onde non amortie de la masse oscillante. Cette zone de résonance se voit aussi dans le relevé de la puissance et dans celui du décalage des phases (fig. 2—5). Les amplitudes, les puissances et les phases seront intro-

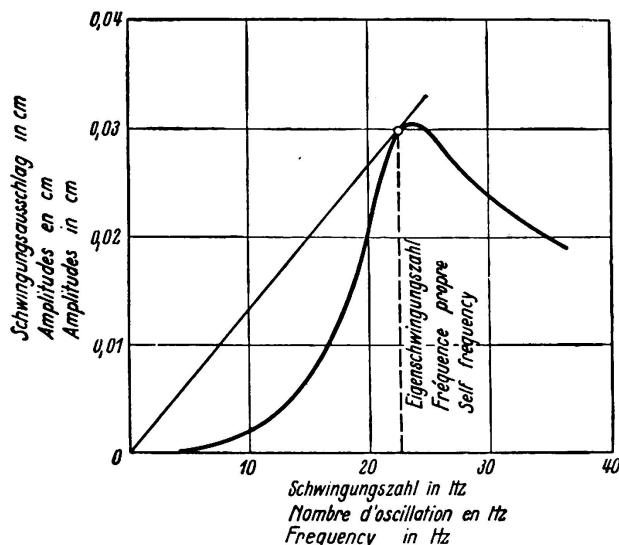


Fig. 2.
Amplitude du pulsateur sur le sol en fonction de la fréquence.

duits dans l'équation différentielle de la masse oscillante et permettront la détermination des constantes α et λ de l'équation. Ce processus de calcul, qui ne peut pas être présenté en détail ici, est décrit dans la publication du Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik cahier 1 (14). Comme les amplitudes, la fréquence et les phases sont déterminées par des instruments différents, on peut aussi déterminer l'exactitude des valeurs α et λ . L'erreur moyenne de la valeur α varie entre 3 et 5 % ; celle du coefficient d'amortissement λ par contre est sensiblement plus grande. Quant à la raison du peu d'exactitude de ce coefficient on ne peut pas entrer ici dans les détails. Ce coefficient d'oscillation

propre du système $\alpha = \sqrt{\frac{c}{M}}$ dépend des propriétés du sol élastique. Les résultats d'une grande série d'essais, effectués sur une grande variétés de terrains, sont donnés dans le tableau n° 1 et ordonnés suivant les valeurs croissantes α . Dans la 3^e colonne du tableau sont données les valeurs spécifiques connues par les expériences antérieures effectuées sur ces différents terrains. On voit par comparaison des 2 colonnes qu'il existe une correspondance entre la valeur α et

celle des charges admissibles. La valeur α croît avec les charges admissibles, de sorte que le coefficient peut servir directement d'expression pour indiquer la charge admissible d'un terrain.

Cette détermination de la charge par le nombre α , a sur la détermination des charges spécifiques obtenues par le procédé statique, l'avantage que, lors de la recherche expérimentale de α , on intéresse un volume plus grand de terrain et l'influence des couches inférieures entre en ligne de compte. En outre, la surface chargée du terrain n'a pas ici une importance primordiale comme dans les essais statiques. Actuellement pour différents essais dynamiques les coefficients α ne sont comparables entre eux que s'ils sont obtenus au moyen d'un appareillage normal, c. à d. déterminés par une machine dont on connaît le poids, la surface et la force centrifuge développée. On a la possibilité d'obtenir d'autres résultats avec des machines ayant une surface d'appui différente.

Ce coefficient d'amortissement λ dépend d'une part du frottement interne du sol et d'autre part du travail de déformation des tassements permanents non

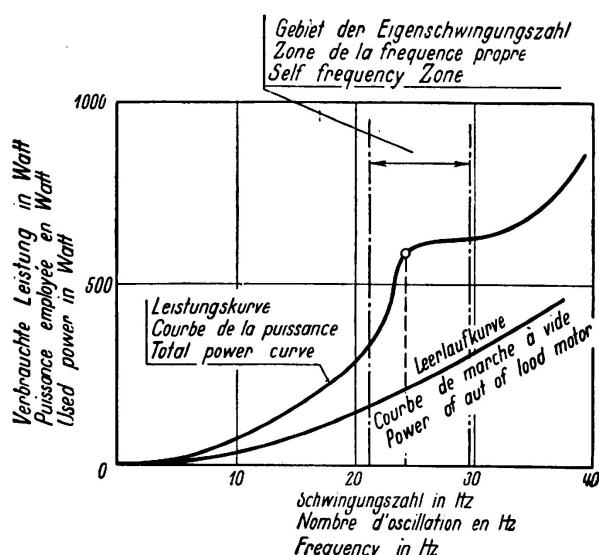


Fig. 3.
Puissance en fonction
de la fréquence.

élastiques. Si le frottement interne et le travail de déformation des tassements permanents sont grands, l'amortissement est aussi grand. Mais comme ces deux circonstances, le frottement et les tassements permanents, influencent l'amortissement, on ne peut naturellement pas tirer la conclusion que des terrains de grands amortissement doivent avoir de grands tassements permanents, car un terrain avec de grands frottements internes et sans tassement permanent peut avoir un grand amortissement.

Sur la fig. 5, la marche du tassement est représenté en fonction de la fréquence de l'excitation. Si l'on porte la marche du tassement en fonction de la courbe d'amplitude, on voit que pour beaucoup de terrains les valeurs du tassement augmentent d'abord lentement, puis croissent très fortement dans la zone de résonance et au delà de cette zone augmentent de nouveau lentement. Pour des terrains non liés, les tassements permanents proviennent principalement de l'écrasement des couches instables granuleuses. Si on excite le sol, le frottement entre les grains vibrants dans la zone de résonance, décroît tellement que

les couches granuleuses se trouvent sous charge statique et s'écrasent mutuellement jusqu'à ce que le phénomène d'oscillation produise pour finir une couche compacte de grains.

Du coefficient d'amortissement et de la marche du tassement on peut déduire une hypothèse plausible sur la tenue du terrain sollicité aux charges dynamiques et aux ébranlements.

Pour des terrains bien liés, ces charges dynamiques seules ne peuvent pas donner encore une idée complète sur l'influence du temps pour les tassements. Dans ce cas il est naturellement indiqué de faire des recherches de laboratoire, suivant les procédés connus, sur des éprouvettes de terrain lié et non ébranlé. Pour des terrains non liés et pour compléter les essais dynamiques il est aussi recommandable de faire des essais sur éprouvettes du terrain non ébranlé afin de déterminer la répartition des parties granuleuses, le coefficient de porosité et la capacité de compression.

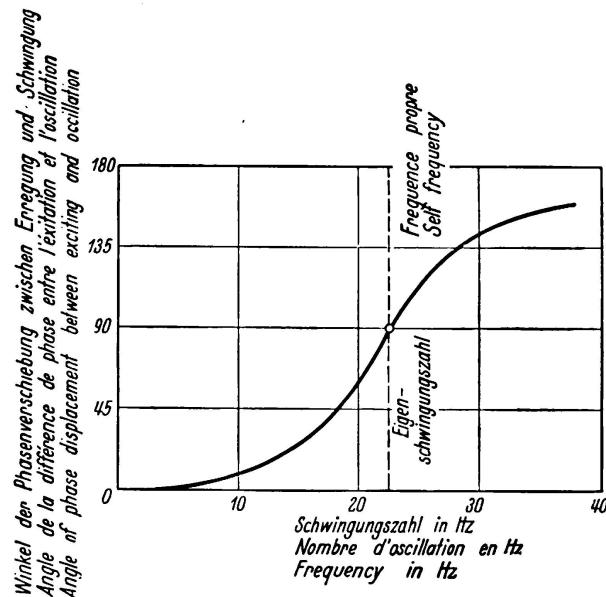


Fig. 4.
Décalage entre l'excitation et l'oscillation en fonction de la fréquence.

3° Vitesse de propagation des ondes en surface.

Le caractère des ondes produites par ce vibreur n'est pas encore complètement défini. On peut cependant faire les mesures suivantes.

Au moyen du sismographe on prend à petites distances sur une droite partant de la machine, en plusieurs points, l'amplitude d'oscillation d'une petite surface de terrain (donc d'environ un point de surface) et ceci en connaissant chaque fois la position du balourd de la machine. On suit la position d'une vague d'oscillation en fonction de la position du balourd que l'on peut relever facilement en prenant des points rapprochés; on voit que cette vague se propage avec une certaine vitesse. On peut construire un graphique de déplacement de cette vague, comme un graphique de chemin de fer. Avec un sol homogène ce graphique est une droite inclinée sur l'axe des temps (fig. 6b). La tangente de l'angle d'inclinaison donne la vitesse de propagation. Si la vague passe dans un terrain d'une autre consistance, la courbe de déplacement indique une autre vitesse; au passage d'un terrain à un autre la courbe a une brisure (fig. 6a).

Les essais ont été faits sur une grande variété de terrains et les résultats sont portés dans le tableau 1 colonne 1. On voit dans ce tableau que les vitesses croissant de 80 m/sec jusqu'à 1100 m/sec. La vitesse de propagation des vagues est donc, comme la constante d'élasticité du sol précédemment déterminée, une mesure de la valeur du terrain c. à. d. de sa capacité portante. Cette mesure est même plus sensible que la constante α .

Si on déplace la machine, sur un terrain dont on veut connaître la qualité à la surface, et que chaque fois on prenne des mesures dans différents directions, on obtient une carte des qualités de la surface du sol (fig. 7).

D'après la grandeur des vitesses, on peut se faire une idée sur le genre des ondes créées; si on mesure encore les ondes produites dans le même sol par un effet de choc, par chutes de poids ou par explosions, ces ondes ont une plus

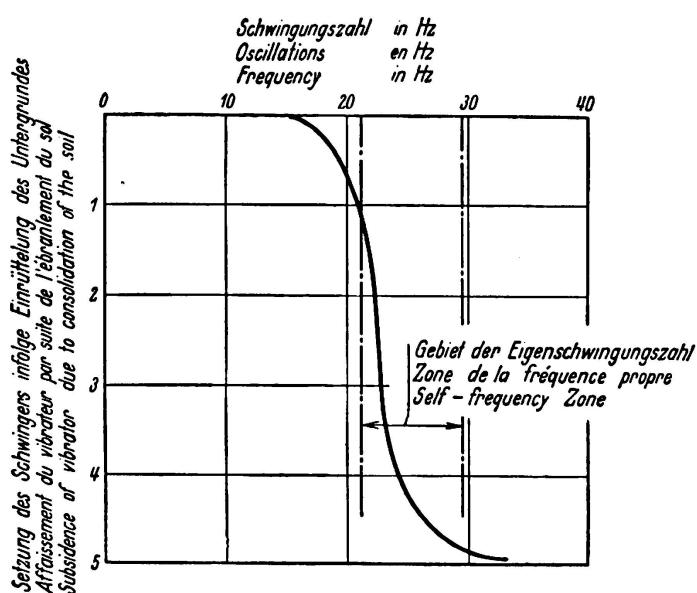


Fig. 5.

Affaissement du pulsateur par suite de l'ébranlement du sol en fonction de la fréquence.

grande vitesse et sont considérées comme pures ondes de compression. Ces ondes de surface obtenues par la machine ont une bien moins grande vitesse de propagation et sont, dans un milieu homogène essentiellement des ondes transversales ou de Rayleigh.

La tâche des recherches futures est de déterminer exactement le caractère de ces vagues.

Si l'on dessine la variation d'amplitude en un point du terrain, on voit que si la force d'excitation est sinusoïdale, la variation de l'amplitude est elle-même aussi sinusoïdale. Cette variation sinusoïdale est dérangée dans le voisinage immédiat de la machine parce qu'elle est influencée par d'autres variations de forces périodiques secondaires. La valeur de l'amplitude diminue rapidement (fig. 8a) avec l'éloignement de la machine, environ suivant une équation exponentielle. Cette manière de décroître a déjà été observée et déterminée par différentes personnes (37, 38, 39).

Les différents terrains montrent aussi une capacité d'absorption différente; les mesures faites jusqu'à maintenant montrent que l'absorption est fonction de la longueur des ondes et que cette absorption est plus forte pour les ondes

courtes que pour les ondes longues. — Le rapport entre la vitesse de propagation des ondes et la longueur des ondes a été déterminé en maintes circonstances (dispersion), cependant la complète compréhension de l'absorption et de la dispersion demande encore de plus amples essais.

4° *Les ondes dans des terrains à couches superposées.*

S'il se trouve à une profondeur de terminée une couche de terrain de consistance différente et parallèle à la courbe superficielle, et si l'absorption des ondes est plus forte à la surface que dans la couche inférieure, la courbe de la vitesse présente ainsi une brisure. En effet dans le voisinage immédiat de la

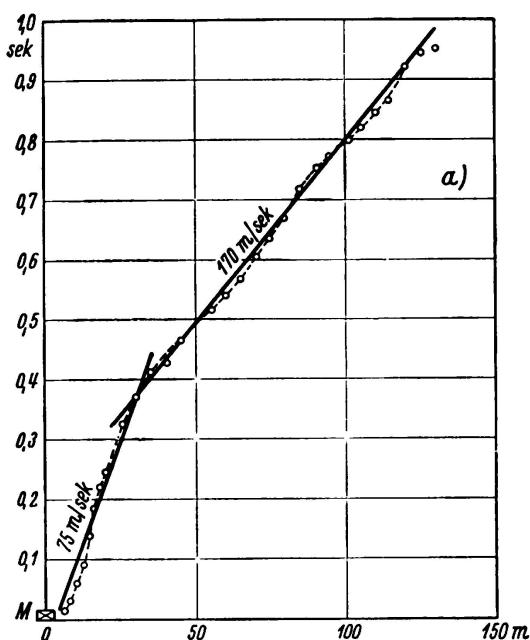
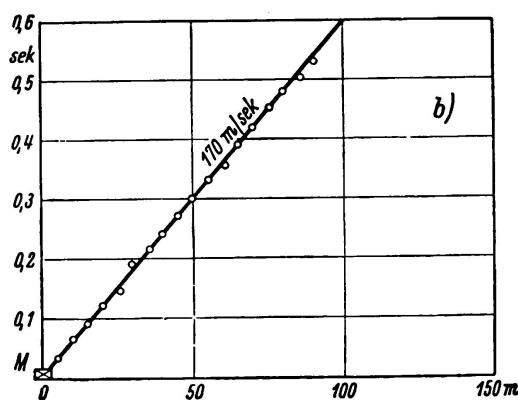


Fig. 6.

Propagation dans le sol des ondes élastiques engendrées par le pulsateur,

- a) dans un sol stratifié,
b) dans un sol homogène.



machine on a la vitesse de propagation de la couche supérieure du sol. A une plus grande distance, l'onde de fond revient à la surface. Cette explication de la propagation des ondes sera confirmée par d'autres recherches dans les couches de terrain supérieures et inférieures. Les divers fragments de la courbe des vitesses ne sont plus des lignes droites, mais des lignes sinusoïdales irrégulières. Leur sens est expliqué dans la publication Degebo cahier 4. D'après la courbe des vitesses, on peut déterminer les propriétés des couches inférieures.

Si l'on observe dans un terrain homogène les amplitudes correspondantes à divers points situés sur une droite partant du vibrateur ces amplitudes décroissent, dès la machine, suivant une équation exponentielle. Dans un terrain à couches superposées, il n'y a pas de décroissement régulier, mais à divers endroits on retrouve des maxima d'amplitude. Ces maxima peuvent avoir diverses origines. Les maxima s'expliquent, dans le cas d'homogénéité parfaite des couches, par l'interférence entre les ondes supérieures et inférieures, ou bien par la superposition des ondes. Si on détermine les maxima sur tous les rayons possibles partant du vibrateur, ces maxima se trouvent sur des cercles concentriques dont le vibrateur en est le centre, quand le sol est homogène et quand la surface de séparation des couches est parallèle à la surface du sol. Comme dans la systique pour rechercher les gîtes fait on certaines hypothèses sur le cours des ondes, nous pouvons ainsi déterminer la profondeur de la surface limite par la distance

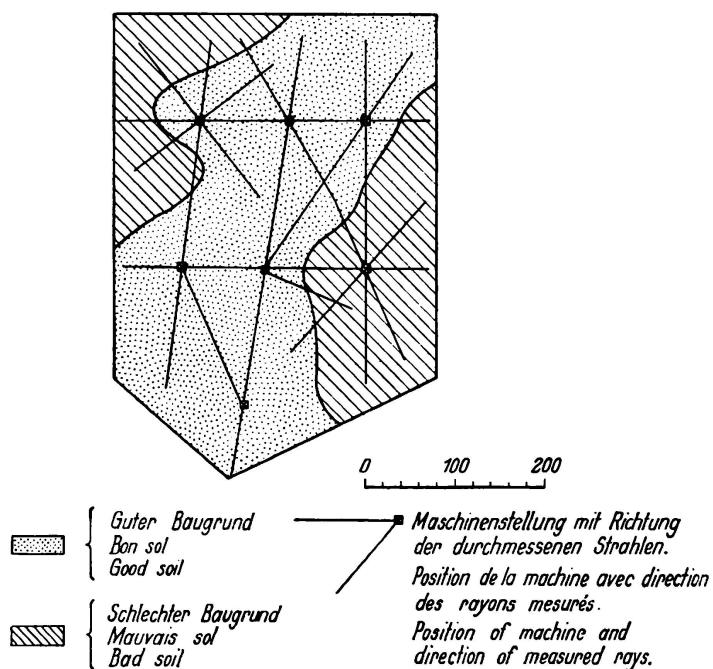


Fig. 7.

Résultat d'un examen dynamique du sol : Détermination de la limite entre un bon et un mauvais sol.

entre les zones d'interférences. Si la surface limite n'est pas parallèle au terrain supérieur, nous obtenons des courbes de forme élliptique ayant même foyer, au lieu de cercle concentrique. Des courbes déformées peuvent aussi s'obtenir si le terrain entourant la machine n'est pas homogène.

On peut séparer ces deux cas soit non homogénéité, soit surface de séparation inclinée, quand on fait des mesures suivant une droite en partant de la machine et en y revenant.

Si l'on veut connaître la nature interne du sol par le procédé dynamique, la longueur des ondes utilisées joue un rôle important. Les figures 8a et 8b montrent ce développement des amplitudes pour deux mesures faites au même endroit, une fois avec une longueur d'onde de 15 m, une autre fois avec 7,50 m. La première onde a une marche sensiblement plate, la deuxième montre un grand

nombre de maxima et de minima. Ici apparaissent les phénomènes d'incurvation, lorsque les longueurs d'ondes ne sont pas dans le rapport exact avec les dimensions des portions du sol de propriété différente; là les ondes sont brisées autour de ces points critiques. Ce phénomène joue ainsi un rôle quand on veut arrêter des ondes dans le terrain.

5° Pratique.

Dans les paragraphes antérieurs on a montré en certains endroits l'emploi de ce procédé. Décrivons maintenant quelques exemples tirés de la pratique.

1° Détermination du coefficient α et du tassement.

Soit un terrain dans lequel les soudages et l'examen du sol supérieur permettent de supposer une grande homogénéité du sous-sol, on veut, par le procédé des effets dynamiques, établir les tassements probables des différentes fondations.

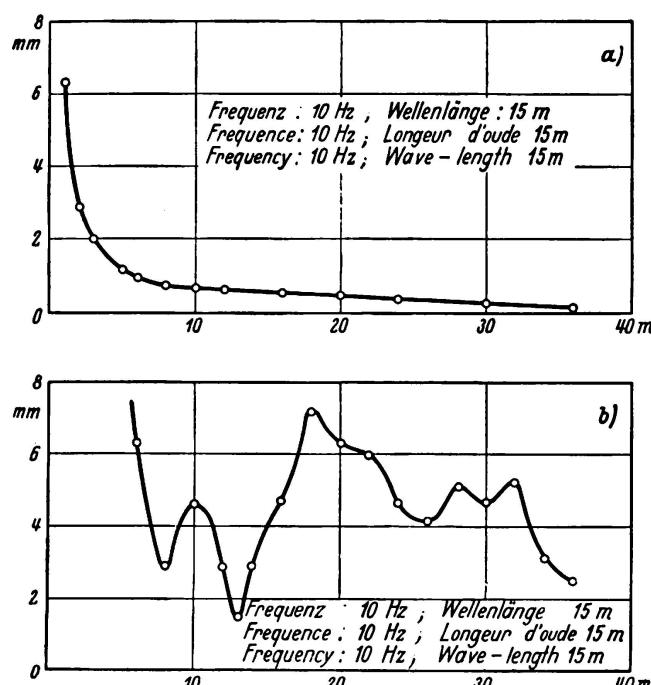


Fig. 8.
Amplitudes des oscillations du sol en fonction de la distance au foyer de perturbation
a) pour de longues ondes,
b) pour de courtes ondes.

Le plan de construction prévu et les emplacements du vibreur sont représentés à la fig. 9. A ces divers emplacements on a déterminé les courbes de puissances, d'amplitudes et les tassements. Les coefficients α varient entre 21,7 et 24 Hz. Les tassements entre 7 et 3 mm. Les essais ont été faits avec une machine normale de 1 m^2 de surface d'appui, et pesant 2700 kg et de même excentricité. Les tassements se rapportent tous à des efforts dynamiques effectués dans un temps déterminé. Les expériences de compression faites au laboratoire sur des éprouvettes de terrain non ébranlé confirment les irrégularités trouvées dans les valeurs de l'expression α et des tassements.

Sur la base des résultats ainsi obtenus, on a déterminé les charges admissibles pour tous les pieux, ceci en tenant compte de la surface de fondation et de façon à obtenir des tassements égaux.

Les pressions admissibles sur le sol furent déterminées pour une partie des fondations à 2 kg/cm^2 ; pour une autre partie, à $2,5 \text{ kg/cm}^2$. Pour des chantiers

de moindres dimensions, la détermination des coefficients α et des tassements, ainsi que l'observation de l'amortissement suffisent pour donner une idée sur la régularité du sous-sol. Pour le calcul préalable des tassements, les essais au laboratoire sur éprouvettes de terrain non ébranlé sont nécessaires pour des terrains liés, et recommandés pour des terrains non liés.

Pour la fondation des socles de turbines, on s'efforce actuellement de calculer le coefficient de la fréquence propre de la machine placée sur un appuis élastique constitué par un cadre métallique. On fait l'hypothèse que ce corps entier avec sa plaque de fondation repose sur un sol rigide. En outre on admet que l'élasticité du sol est négligeable par rapport à la déformation du cadre de fondation. Cette hypothèse n'est en aucun cas remplie. Dans le cas de pareille fondation de turbine, si les circonstances s'y prêtent, on tiendra compte de l'élasticité du sol pour le calcul des oscillations; et dans le cas de machine noyée dans le bloc de fondation on ne pourra jamais se tirer d'affaire sans connaître l'élasticité du

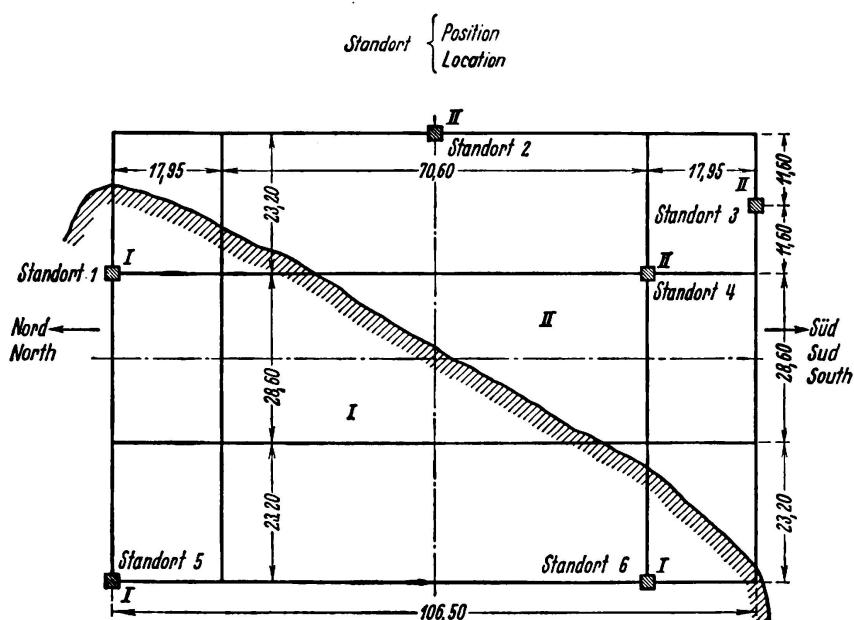


Fig. 9.

Plan de situation pour un examen dynamique du sol: Emplacement du pulsateur dans le plan de l'immeuble projeté, La ligne pointillée délimite le bon sol du moins bon.

sol. Ici la machine et le bloc de fondation forment un seul corps rigide reposant sur le sol considéré comme élastique. Les fréquences propres des 6 degrés de liberté du corps rigide dépendent de la répartition des masses et de la constante élastique du sol. Pour de pareilles fondations, les coefficients α se rapportant à la portion du terrain oscillant avec la machine, et la constante élastique ont été plusieurs fois déterminés.

En tenant compte que le plus souvent on a affaire à un corps symétrique, on ramène le calcul au cas d'un problème se rapportant à un plan, soit à une plaque à appuis élastiques avec 2 ou 3 degrés de liberté, suivant les particularités de la symétrie (35).

Les cas pratiques ont donné une parfaite concordance entre les calculs préliminaires et les mesures de fréquence propre calculées par la suite. Les fré-

quences propres sont aussi déterminées au moyen d'un vibrateur et par le rapport des courbes de résonnance. Si l'on a des instruments assez précis, on peut déterminer directement au moyen d'un vibrateur de 2000 kg les courbes de résonnance des amplitudes pour des machines et des fondations de plusieurs milliers de tonnes. L'effet de compression artificielle peut être contrôlé par les mesures des coefficients α et des tassements. Dans les fig. 10a et 10b sont reproduites les courbes d'amplitudes et de tassements qui furent faites sur une digue avant et après le pilotage. Par suite du pilotage le nombre α a passé de 22,6 à 23

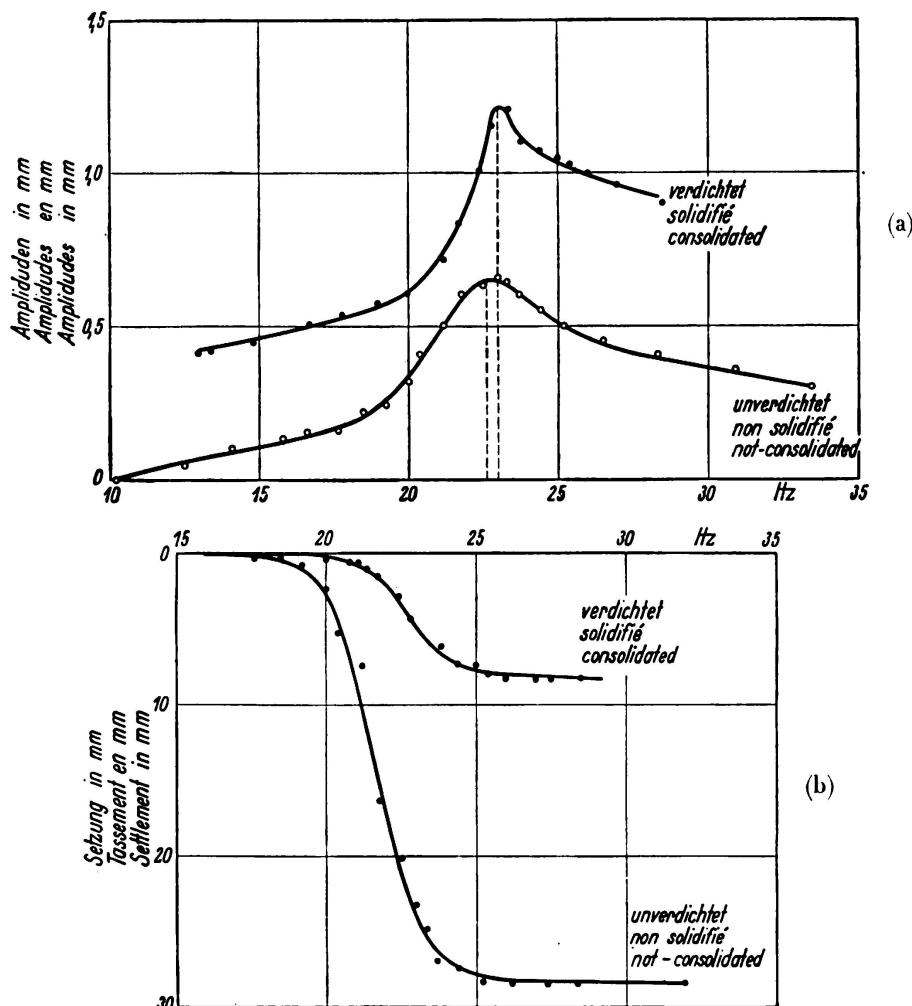


Fig. 10.
a) Amplitudes et
b) affaissement du pulsateur en fonction de la fréquence avant et après le tassement.

(fig. 10a) donc a peu augmenté. Les tassements par contre sont descendus de 28 mm à 8 mm (fig. 10b). Les courbes du tassements montrent la marche déjà connue. Le tassement se fait principalement à l'intérieur de la zone de résonance. La courbe d'amplitude du sol non solidifié présente par rapport à celle du terrain solidifié une différence remarquable. Le maximum de résonance est beaucoup plus aigu que dans le sol non solidifié, c'est un signe que l'amortissement intérieur a diminué. Dans un terrain meuble une bien plus grande partie de l'énergie est absorbée que dans un terrain rendu plus compacte et plus élastique.

2° Détermination des vitesses.

Si l'on a à étudier la qualité du sol sur une grande surface, on aura avantage à fixer ces qualités par des mesures de vitesse que l'on prend en divers endroits et suivant diverses directions (voir fig. 7). Si le sol est parfaitement régulier et non comprimé, on trouvera donc pour tous les points et pour toutes les directions les mêmes vitesses. Si le sol n'est pas uniforme, les courbes de vitesse auront des brisures (fig. 6b). Dans la fig. 7 on a dessiné, sur la base de ces mesures, un plan des diverses qualités du sol. Nous avons déjà dit que la brisure provient aussi de conclus de terrains divers. On reconnaît que c'est un terrain non homogène ou un terrain à couches superposées, par comparaison des mesures prises aux différents endroits.

La détermination de la vitesse de propagation est encore employée avec succès dans beaucoup de cas pratiques. La solidification des remblais pour routes, dignes, est aujourd'hui à l'ordre du jour. Nous avons eu le cas suivant: Il s'agissait de 2 voies ferrées supportées par des remblais en sable de la «Mark» et construits il y a 12 ans. Sur l'une des voies il n'y eu jamais de trafic et le talus ne fut soumis qu'aux influences du temps, sur l'autre il y avait un trafic normal. Les mesures de propagation de vitesse dans les 2 talus, mesures faites près de la zone d'appuis des talus sur le terrain en place, ont montré des différences très instructives. La vitesse de propagation des ondes dans le talus non tassé par le passage des trains est de 180 m/s et est moindre que celle du sol de base qui donne 230 m/s.

Pour le talus placé sous la voie utilisée et tassé jusqu'à l'écrasement, cette vitesse atteint 340 m/s. Malheureusement la vitesse pour le talus fraîchement construit est inconnue. En prenant le cas le plus défavorable, et sur la base d'autres mesures, on peut admettre cette vitesse égale à la moitié de la valeur de celle du terrain en place. Ces résultats montrent que le fait de laisser simplement un talus à l'action du temps et des intempéries n'a qu'une influence très lente sur le tassement, et que celui-ci n'atteint jamais les valeurs que lui donneraient des ébranlements.

Les mesures de vitesse ont également fait leur preuve pour reconnaître la valeur relative des divers modes de solidification de terrain par l'apport de boues, par cylindrage, pilonnage, ébranlement. Un exposé sur des expériences de ce genre est développé dans «Die Strasse» N° 18, 1935.

La mesure de vitesse rend aussi des services pour l'étude des terrains apportés supportant des chaussées, et pour l'étude de la chaussée elle-même. En général, l'effet d'une chaussée en béton sur un talus apporté est d'élever la valeur de la vitesse moyenne entre les vitesses du talus et de la chaussée en béton. Dans un seul cas on a pu établir que la chaussée et le sous-sol oscillent chacune séparément. Il s'agit ici d'un talus rapporté constitué par du ballast ayant une extraordinaire bonne répartition granuleuse, disposé en lit d'environ 30 m et comprimé par cylindrage et tamisage. Les ondes élastiques avaient une vitesse de 420 m/s dans le ballast en place à la gravière. Cette vitesse passait à 560 m/s dans le talus construit comme indiqué ci-dessus. Lorsque l'on avait une chaussée en béton de 25 cm d'épaisseur, le talus, pour une longueur d'onde de 22 m, ne donna pas de valeur nouvelle pour la vitesse de propagation des ondes (donc 560 m).

Dans d'autres cas, dans un terrain rapporté en talus, les ondes avaient une vitesse de 125 m/s; dans ce talus avec sa chaussée en béton de 25 cm cette vitesse passe à 270 m/s. De ces observations on tire la conclusion que dans le 1^{er} cas, talus et chaussée oscillent comme un corps unique, dans le 2^e cas, la chaussée en béton se trouve sur un terrain plus ou moins élastique sur lequel la chaussée exerce des ondes de flexion.

Pour finir, on fit des expériences pour étudier l'influence de l'épaisseur de la chaussée en béton pour un sous-sol donné. La fig. 11 montre l'augmentation de la vitesse de propagation des ondes pour une épaisseur de béton croissante, le sous-sol restant le même.

Si l'on avait assez de résultats d'essais, on pourrait dire, en se basant sur la vitesse obtenue dans le talus, quelle devrait être l'épaisseur minimale de la dalle en béton. Le sol d'appui du talus joue naturellement aussi un rôle dans le résultat final, mais on l'a négligé pour plus de simplicité.

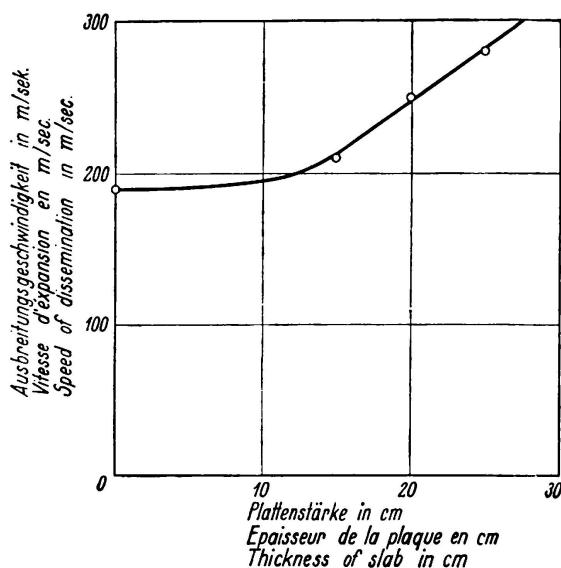


Fig. 11,

Vitesse de propagation des ondes élastiques dans un remblai de route recouvert de dalles de béton, en fonction de l'épaisseur des dalles.

3^o Etude des sols à lits superposés.

Veut-on utiliser d'une façon positive les interférences d'ondes pour déterminer l'épaisseur des divers lits de terrain, on doit faire des hypothèses diverses, comme on l'a fait jusqu'à présent, et passablement arbitraires sur l'origine de ces interférences.

Dans des cas particuliers, l'une ou l'autre hypothèse conduit à des résultats exacts. Dans d'autres cas, particulièrement lorsqu'il y a plus de deux lits, les résultats des calculs sont encore très incertains. On n'ira de l'avant que lorsqu'on aura une plus grande connaissance sur les différentes natures des ondes produites, les travaux nécessaires sont entrepris actuellement. On rapportera plus tard sur les résultats obtenus et leur emploi dans la pratique.

Remarques finales.

Après 6 ans de recherches, après de très nombreuses applications dans la pratique, nous croyons que l'étude des terrains par procédé dynamique est une méthode précieuse. Ce n'est naturellement pas une méthode qui peut donner seule

les indications complètes quand à toutes les propriétés d'un terrain. Comme nous l'avons déjà dit, pour les terrains liés, d'autres procédés et méthodes sont aussi nécessaires pour reconnaître l'influence du temps sur le tassement de tels terrains; entre autre citons les travaux de *Terzaghi* et de ses élèves (20 et 40).²

Les mesures d'amplitude, de puissance, etc. et la théorie extraordinairement simplifiée du point matériel oscillant suivant un seul degré de liberté ont donné l'explication et montré une concordance satisfaisante de beaucoup de phénomène.

Le travail d'*Erich Reissner* (36) sur: «l'oscillation stationnaire symétrique par rapport à un axe, oscillation créée par une masse en ébranlement en vue d'étudier le terrain par procédé dynamique» a confirmé la justification de la théorie simplifiée. Ce travail paraîtra sous peu dans la publication du «Degebo» cahier 5.

Littératuré.

- (1) *Engesser*: Theorie des Baugrundes, Zentralbl. d. Bauverw. 1893, p. 306.
- (2) *Kögler*: Über Baugrund-Probebelastungen. Bautechnik 1931, fasc. 24.
- (3) *Preß*: Baugrundbelastungsversuche. Bautechnik 1930, fasc. 42, 1931, fasc. 50, 1932, fasc. 30.
- (4) *Görner*: Über den Einfluß der Flächengröße auf die Einsenkung von Gründungskörpern. Zeitschr. f. Geologie und Bauwesen 1932, fasc. 2.
- (5) *Aichhorn*: Über die Zusammendrückung des Bodens infolge örtlicher Belastung. Geologie und Bauwesen 1932, fasc. 1.
- (6) *Kögler* et *Scheiding*: Druckverteilung im Baugrunde. Bautechnik 1928, fasc. 15, 17; Bautechnik 1929, fasc. 18, 52.
- (7) *Lord Rayleigh*: The theory of sound. London 1894/6.
- (8) *H. Lamb*: Phil. Trans. (A) vol. 203, 1904. Proc. Roy. Soc. A 93, London 1917.
- (9) *E. Pfeiffer*: Handbuch der Physik IV, Kap. 4, Elastokinetic.
- (10) *G. Angenheister*: Handbuch der Physik IV, Kap. 8, Seismik.
- (11) *H. Martin*: Handbuch der Experimentalphysik XVII, 1, Schwingungslehre.
- (12) *A. E. H. Love*: Probl. of Geodynamics. Cambridge 1911.
- (13) *O. Fröhlich*: Druckverteilung im Baugrund. Jul. Springer, Vienne 1934.
- (14) Veröffentlichung der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik, fasc. 1. Jul. Springer, 1933.
- (15) Veröffentlichung der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik, fasc. 4. Jul. Springer, 1936.
- (16) *A. Hertwig*: Die dynamische Bodenuntersuchung. Bauing. 12, 1931.
- (17) *A. Hertwig*: Baugrundforschung. Zeitschr. d. V.D.I. 77, 1933.
- (18) *A. Hertwig* et *H. Lorenz*: Das dynamische Bodenuntersuchungsverfahren. Bauingenieur 16, 1935.
- (19) *H. Lorenz*: Neue Ergebnisse der dynamischen Baugrunduntersuchung. Zeitschr. d. V.D.I. 78, 1934.
- (20) *W. Loos*: Praktische Anwendung der Baugrunduntersuchungen. Jul. Springer 1935.
- (21) *P. Müller*: Druckverteilung und Einsenkungen im Erdreich. Bautechnik 12, 1934.
- (22) *P. Müller*: Tragfähigkeit und Formänderungswiderstand des Bodens. Bautechnik 13, 1935.
- (23) *R. Köhler*: Zeitschr. f. Geophysik 10, 1934.
- (24) *R. Köhler*: Nachr. Geo. Wiss. II. Göttingen 1934, Nr. 2.
- (25) *R. Köhler*: Zeitschr. techn. Phys. 16, 1935.
- (26) *R. Köhler* et *A. Ramspeck*: Zeitschr. techn. Phys. 14, 1933.
- (27) *A. Ramspeck*: Zeitschr. Geophys. 10, 1934.
- (28) *G. A. Schulze*: Zeitschr. Geophys. 11, 1935.

Publications sismographiques
de l'Institut de géophysique
de l'Université de Göttingen.

² Remarque: Les procédés de recherches dynamiques de sols sont appliqués actuellement par la Société Seismos à Hannovre. Elle possède les instruments et l'expérience des mesures du fait qu'elle est spécialisée dans la recherche des gîtes suivant le précédent de «Mintrop».

- (29) *A. Ramspeck*: Dynamische Bodenuntersuchungen an der Reichsautobahn Stuttgart-Ulm, Die Straße 18, 1935.
- (30) *A. Ramspeck*: Dynamische Untersuchung von Straßendecken. Die Betonstraße 11, 1936, Nr. 2.
- (31) *R. Müller et A. Ramspeck*: Verdichtung geschütteter Dämme. Die Straße 18, 1935.
- (32) *F. Meister*: Die dynamischen Eigenschaften von Straßen. Thèse, Stuttgart, Ed. M. Boerner, Halle 1935.
- (33) *K. Schwien*: Über die Ausbreitung von Erschütterungen. Thèse, Hannover 1932.
- (34) *Hort, Martin, Geiger*: Zur Frage der Schutzwirkung eines Grabens gegen Erschütterungen. Schalltechnik 2, 1932.
- (35) *R. Rausch*: Berechnung von Maschinenfundamenten als elastisch gestützte schwingende Scheiben. Bauingenieur 11, 1930, fasc. 13—14. Z. d. V. D. I. 75, 1931.
- (36) *E. Reißner*: Über die stationäre, achsialsymmetrische, durch eine schüttelnde Masse erregte Schwingung eines homogenen elastischen Halbraumes, insbesondere in Beziehung zu dynamischen Bodenuntersuchungen. Thèse, Charlottenburg. (Paraitra prochainement.)
- (37) *L. Mintrop*: Über die Ausbreitung der von den Massendrucken einer Großgasmaschine erzeugten Bodenschwingungen. Thèse, Göttingen 1911.
- (38) *A. Heinrich*: Über die Ausbreitung von Bodenschwingungen in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Untergrundes. Thèse, Breslau 1930.
- (39) *G. Bornitz*: Über die Ausbreitung der von Großkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe. Jul. Springer, Berlin 1931.
- (40) *v. Terzaghi*: Erdbaumechanik, Leipzig 1925.

Tableau 1.

No.	Type de sol	Vitesse de propagation	Nombre de fréquence propre	Compression admissible du sol kg/cm ²
1	3 m de terre de marais sur du sable . . .	80 m/sec	4,0 Hz	—
2	Sable fin	110 ..	19,3 ..	1,0
3	Argile tertiaire, humide	130 ..	21,8 ..	—
4	Sable fin avec terre glaise	140 ..	20,7 ..	—
5	Sable moyen, humide	140 ..	21,8 ..	2,0
6	Argile jurassique, humide	150 ..	—	—
7	Ancien remblais en sable et scorie . . .	160 ..	—	—
8	Sable moyen avec eau souterraine . . .	160 ..	—	2,0
9	Sable moyen, sec	160 ..	22,0 ..	2,0
10	Sable avec terre glaise sur de la marne caillouteuse	170 ..	22,6 ..	2,5
11	Gravier avec grosses pierres	180 ..	23,5 ..	2,5
12	Terre glaise, humide	190 ..	23,5 ..	—
13	Marne caillouteuse	190 ..	23,8 ..	3,0
14	Sable fin avec 30% de sable moyen . . .	190 ..	24,2 ..	3,0
15	Terre glaise, sèche, avec des pierres calcaires	200 ..	25,3 ..	—
16	Sable moyen en position originelle . . .	220 ..	—	4,0
17	Marne	220 ..	25,7 ..	4,0
18	Loess diluvial, sec	260 ..	—	—
19	Gravier sous 4 m de sable	330 ..	—	4,5
20	Sable grossier compact	420 ..	30,0 ..	4,5
21	Grès bigarré (décomposé à l'air)	500 ..	32,0 ..	} ^{2/3} de la compression admissible
22	Grès irrigé de solidité moyenne	650 ..	—	
23	Grès bigarré (non décomposé à l'air) . .	1100 ..	—	

Résumé.

L'examen dynamique des sols peut se faire de deux manières. Premier procédé: on détermine une certaine constante d'élasticité du sol, dont la grandeur croît à peu près comme le taux de fatigue (pression admissible) du sol, basé sur l'expérience. Deuxième procédé: on mesure la vitesse de propagation des ondes élastiques contraintes car elle peut également servir de critère pour la résistance des sols. Lors de ces mesures, on détermine simultanément la courbe du tassement en fonction de la fréquence de la force perturbante; cette courbe permet de prévoir la variation du tassement sous des charges statiques et dynamiques. Cet essai dynamique est supérieur à l'essai de charge purement statique, car il a ce qu'il manque à ce dernier.