

Le problème des vibrations dans les travaux de génie civil

Autor(en): **Kérisel, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **98 (1972)**

Heft 17

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-71556>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Le problème des vibrations dans les travaux de génie civil ¹

par J. KÉRISEL

Malgré les progrès des appareils d'enregistrement dynamiques, on ne sait pas plus mesurer les pressions dynamiques que les pressions statiques au sein du sol, et par conséquent il est difficile d'apprécier la transmission et l'amortissement des ondes ; on est toujours confiné à opérer en surface. Ensuite, l'effet d'échelle intervient d'une façon majeure. De cette question, j'ai fait mon sujet de conférence de clôture au Congrès panaméricain de mécanique des sols en 1967 à Caracas. Cet effet est absolument évident en matière de fondations superficielles ou profondes dans le sable ou dans l'argile soumis à des efforts statiques. Les résultats donnés par de petits modèles sont toujours viciés par les effets de paroi. C'est pourquoi j'accueille personnellement avec une certaine réserve toutes les mesures faites sur tables vibrantes ou dans des œdomètres soumis à des efforts verticaux périodiques, et je pense qu'il ne faut prendre en considération les résultats qu'en pensant à leur côté qualitatif.

J'ai commencé à m'intéresser aux vibrations à Abidjan. Il s'agissait, il y a une quinzaine d'années, de faire des pieux forés de 1,50 m de diamètre sur la lagune d'Abidjan à travers 10 m d'eau et 30 ou 40 m de vase, en les fichant dans un sable assez serré se trouvant au-dessous de la couche de vase ; on employait alors un matériel très solennel : grosse machine Benoto avec des gros tubes d'acier provisoires soumis à un mouvement de louvoisement. Une inattention ou une panne de matériel supprimant ce mouvement de louvoisement pendant quelques minutes dans les sables, il fut impossible de récupérer le tube et j'ai eu là la connaissance sensible de la diminution incontestable du frottement par renversement du mouvement rotatif, et l'entrepreneur en eut la connaissance financière.

J'y ai cru encore plus après avoir observé l'allure très satisfaisante des tassements de l'usine de Dunkerque.

Il s'était agi là d'une des plus importantes applications de la vibroflottation de l'après-guerre et je n'avais pris parti pour ce procédé qu'après avoir vu ce qu'avait fait le D^r Lackner à Brême. Nous consultâmes d'ailleurs à la fois le D^r Lackner et le professeur Barkan en URSS.

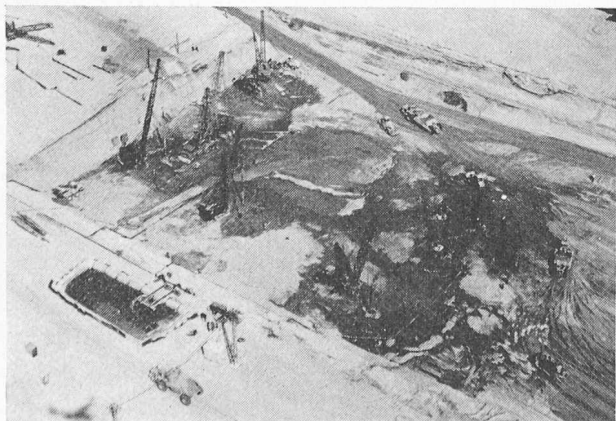


Fig. 2.

Nous utilisâmes au départ deux procédés :

— celui de la vibration en tête, consistant à pousser dans le sol par vibration un tube et à le remplir de sable de temps en temps ; ce procédé fut loin de donner satisfaction (fig. 1) ;



Fig. 1.

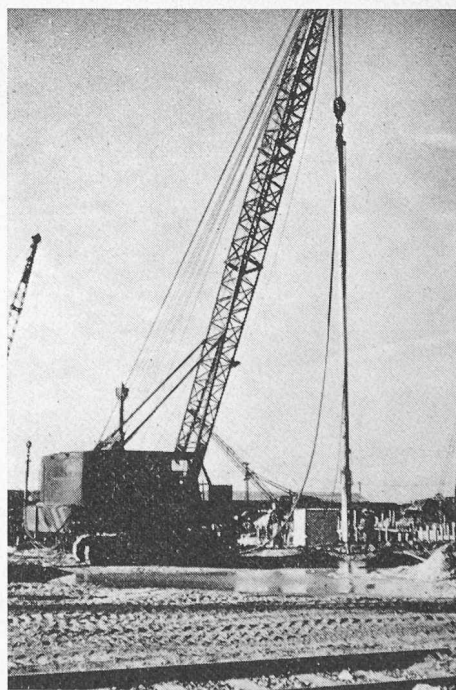


Fig. 3.

¹ Exposé présenté à la réunion d'automne 1969 de la Société suisse de mécanique des sols et des travaux de fondation (Lucerne, novembre 1969).

— l'autre procédé fut celui de la pervibration, ou plus exactement de la vibroflottation, dont vous connaissez tous le principe et qui a l'avantage de produire sa vibration au sein même du milieu.

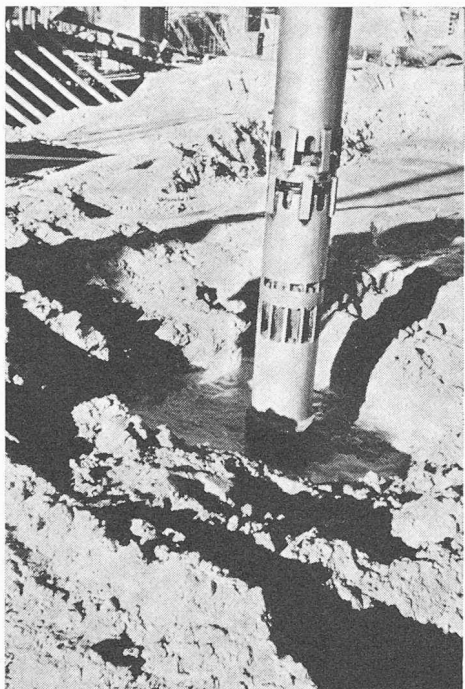


Fig. 4.

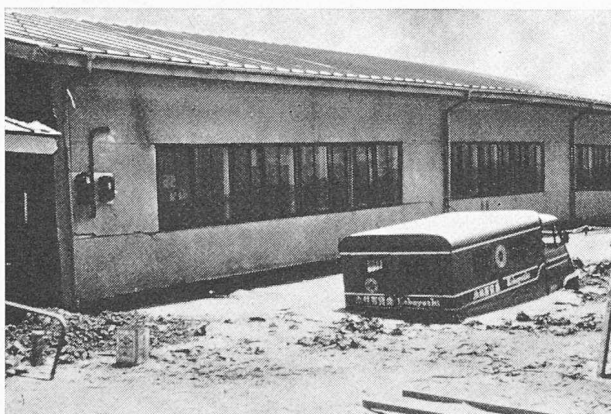


Fig. 5.

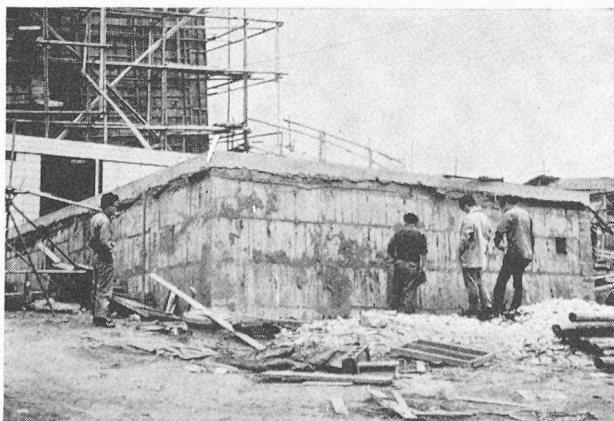


Fig. 6.

Grâce à ce système (fig. 2, 3, 4), nous avons exécuté des pieux simples, des pieux doubles en sable vibré, ainsi que des pieux simples et des pieux doubles en ballast.

Pour une sidérurgie, ce procédé a des avantages très grands, car c'est la masse qui est compactée, et on dispose encore d'une certaine marge de liberté pour l'implantation, alors que les fondations sur pieux amènent des contraintes très grandes pour les changements d'implantation ultérieurs, avec toutes les complications de poussée latérale amenées par la présence de stocks. Néanmoins, les initiateurs du procédé allèrent trop loin par la suite dans leurs tentatives d'implantation, et je me suis opposé personnellement à la généralisation de ce procédé dans des argiles en surface notamment, la vibration ne pouvant amener que des affaiblissements de la structure dans les corps cohérents, dès que le pourcentage d'éléments fins dépasse un seuil qui n'est d'ailleurs pas très élevé.

Récemment, à Lyon, la Société Sofrepik a fait une application spectaculaire et originale de la vibroflottation en réalisant des pieux de ballast à travers des dépôts d'ordures ménagères, en vue de réduire le volume de celles-ci et d'augmenter la portance de l'ensemble.

Enfin, le troisième fait expérimental qui m'a impressionné est celui du tremblement de terre de Nijata. Au cours de ce tremblement de terre, des masses de sable à relativement faible profondeur se sont liquéfiées ; voici (fig. 5) l'affaissement d'un immeuble et d'une automobile dû à la liquéfaction du sable. En sens inverse (fig. 6), un égout avait été soulevé ; par contre (fig. 7) les réservoirs d'essence construits sur sol stabilisé n'ont subi aucun dommage. On remarquera (fig. 8) les geysers d'eau qui sont arrivés jusqu'à la surface à travers le sable liquéfié en drainant finalement celui-ci. Enfin, la figure 9 représente un classique concernant les mouvements horizontaux sur les piles d'un pont isostatique qui ont transformé celui-ci en un château de cartes.

Et ceci m'amène, pour mieux comprendre les vibrations, à m'intéresser aux procédés de compactage par explosion en URSS.

Consolidation du sol par explosion

La consolidation du sol par explosion a été surtout employée en URSS dans les sables non cohérents et dans les loëss. Elle consiste à se placer à une profondeur telle et avec une charge telle qu'il n'y ait pas de cratère en surface. Les premières expériences eurent lieu au barrage Gorki, en 1953, pour une couche de sable de 8 m d'épaisseur. Le tassement moyen observé, obtenu avec charges de 5 kg d'explosif, fut de 45 à 60 cm. Le traitement porta sur 150 000 m³ de sable. Cette méthode a connu de nom-

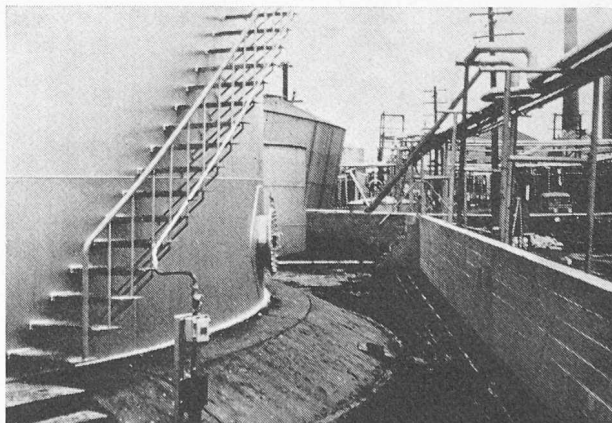


Fig. 7.

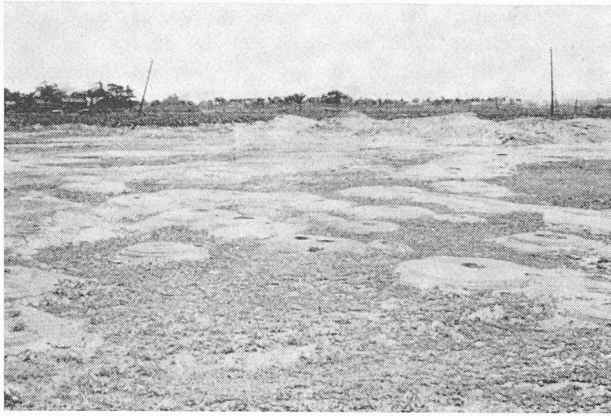


Fig. 8.

breuses applications par la suite au barrage de Tcharدارin et à celui de Bratsk pour la consolidation de remblais hydrauliques, tant sous la nappe (tassement obtenu : 50 à 70 cm) qu'au-dessus de celle-ci (tassement obtenu : 7 à 9 cm).

Les Soviétiques ont expérimenté en 1964 les premières explosions sous l'eau dans la région de Novorosisk : une charge de trolite de 20 kg suspendue à une bouée flottant à 2,50 m au-dessus de la surface d'un fond sablo-graveleux à compacter, et sous 8 m d'eau, a provoqué les tassements indiqués par la figure 11 (mesures par nivellements de plots en béton). Ils étaient de 25 cm à la verticale, 20 cm à 2 m, etc. (fig. 10 et 11).

Voici quelques aperçus sur la théorie d'Ivanov¹.

La matière qui explose est transformée en un temps très court en un gaz à haute pression (50 à 150 000 bars) et à haute température (3000° C). Par exemple, 1 cm³ de trolite produit 1110 cm³ de gaz (sous les conditions normales de pression et température), avec une chaleur de 0,9 à 1,8 kilo calorie par gramme d'explosif. Les gaz produisent une onde de choc et se détendent en comprimant le sol sans doute, mais aussi en détruisant sa structure dans les zones proches. Les Russes ont établi des formules empiriques entre charges et pression maximum à toute distance du point d'explosion.

Point très important à signaler, le phénomène est hautement influencé dans les sols saturés par leur teneur en gaz.

Dans le cas général, les sols saturés forment un système à trois composants : le solide, l'eau et le gaz, ce dernier étant soit à l'état adsorbé, soit dissous dans l'eau, soit libre. La teneur en gaz dissous influence beaucoup la compressibilité de l'eau interstitielle. Mais surtout, c'est le gaz adsorbé qui régent le phénomène. Un sable déversé humide non saturé et que l'on recouvre d'eau peut contenir provisoirement jusqu'à 8 % de gaz, tandis qu'un sable déversé par refoulement hydraulique n'en contient que 1 %. De même, les zones sableuses soumises au battillage, c'est-à-dire à des variations saisonnières de l'eau, peuvent contenir des pourcentages de 4 à 6 % : ces pourcentages ont été observés par les Soviétiques par prélèvements de carottes gelées.

Dans les sols à faible teneur en gaz, l'impulsion due à l'explosion est très brève : 1 milliseconde, à l'intérieur d'un rayon de 20 m. Alors que s'il y a une forte teneur en gaz, la chute se fait plus lentement. A fortiori, dans les sols non saturés.

Par contraste, on a les deux schémas représentés par les figures 12 et 13.



Fig. 9.

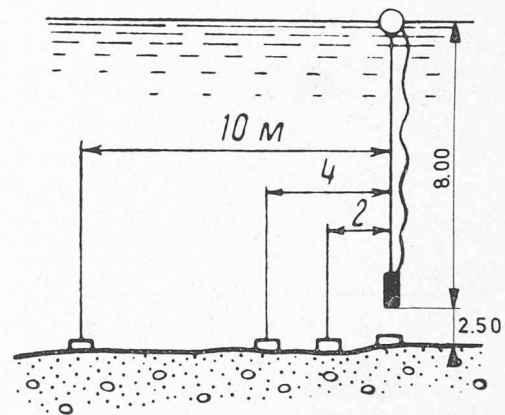


Fig. 10. — Schéma du dispositif de la charge explosive sous l'eau.

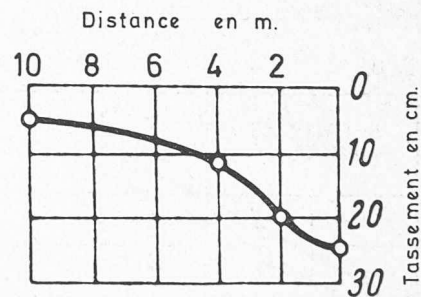


Fig. 11. — Tassement en fonction de la distance à la verticale de la charge explosive.

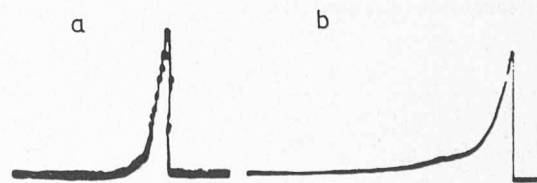


Fig. 12. — Schéma de l'onde dans un sol sans gaz.

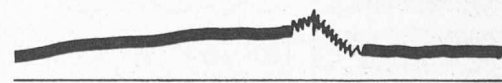


Fig. 13. — Transmission d'une onde dans un sol comportant du gaz.

¹ IVANOV : *La consolidation des sols sans cohésion par explosion*. 1967. Traduction par Damitio.

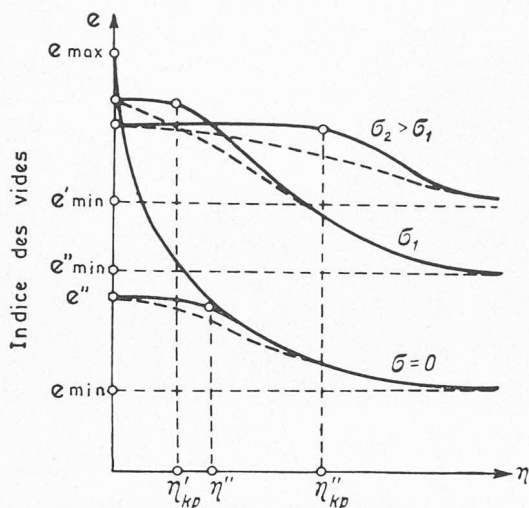


Fig. 14. — Diminution de l'indice e sous action dynamique lorsque le sol est soumis à la compression verticale σ de l'œdomètre.

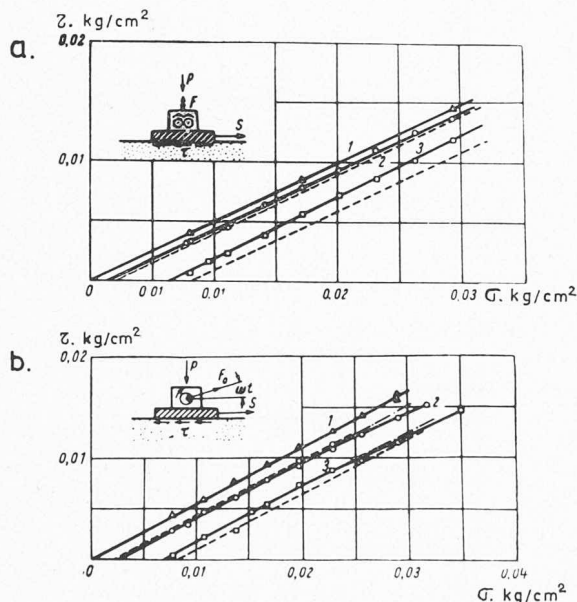


Fig. 15. — Courbes intrinsèques τ, σ avec accélérations verticales comprises entre 0,01 et 0,2 g.

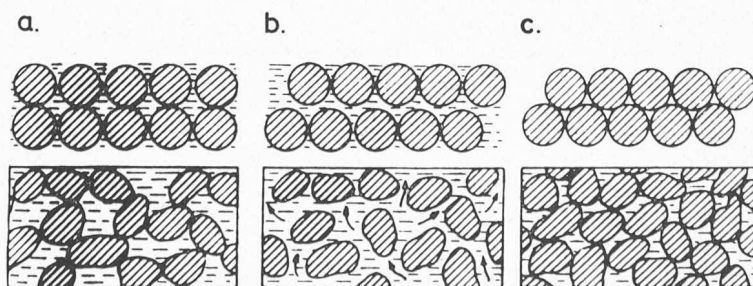


Fig. 16. — a) Etat initial
b) Etat liquéfié
c) Etat densifié après liquéfaction

Dans les sols saturés, on admet pratiquement qu'il n'y a aucun écoulement de l'eau ni de gaz. La dissipation de la pression est conditionnée par les compressibilités du squelette, de l'eau et du gaz adsorbé. Pratiquement, dans les sols non tassés et sans gaz, c'est l'eau qui prend toute la pression, à l'inverse des sols tassés avec gaz, ce dernier augmentant la compressibilité de l'eau, qui n'est plus disproportionnée avec celle du squelette.

Après une explosion dans les sols saturés, les poches gazeuses, qui ont une forme sphérique, remontent graduellement vers la surface, en même temps que le sol au-delà de la paroi de la poche sur une certaine profondeur peut ou non se liquéfier.

Lorsque dans un œdomètre (fig. 14) on comprime un échantillon avec action dynamique, on obtient une certaine courbe caractéristique d'un sol donné, puis avec des actions dynamiques $\eta = A\omega^2$: A amplitude, ω fréquence, on a des courbes différentes. A chaque valeur σ de la contrainte statique et de l'indice des vides initial correspond une intensité critique η de l'action dynamique, à laquelle commence la destruction de la structure et la consolidation du sol. Lorsque σ augmente et lorsque l'indice des vides initial diminue, l'intensité critique η de l'action dynamique augmente, d'où diminution des possibilités de destruction de la structure par actions dynamiques. Au contraire, ces possibilités sont très grandes pour des sols non serrés sous-consolidés. Mais ceux-ci sont vulnérables à la liquéfaction.

Lorsqu'il y a action dynamique, y a-t-il diminution de l'angle de frottement? Les essais à la boîte de cisaillement avec application de forces normales vibratoires entretenues semblent montrer que non. La figure 15 est empruntée à l'ouvrage d'Ivanov: toutes les droites τ, σ ayant la même inclinaison, quelle que soit l'accélération verticale qui avait été variée systématiquement entre 0,01 et 0,2 g (g = accélération de la pesanteur); mais il s'agit d'essais à une dimension avec zéro d'extension latérale qui ne nous paraissent pas démonstratifs. Ce serait d'ailleurs négliger l'aspect afférent à la dégradation lorsque le déplacement augmente:

Mais par-dessus tout, ce sont les forces de filtration considérables engendrées par la mise en pression de l'explosion qui paraissent les plus destructives de la structure. Elles dépassent généralement dans le sens vertical ascendant le gradient critique égal, comme on le sait, au poids spécifique immergé divisé par le poids spécifique de l'eau. Et, dans les autres directions, elles sont suffisantes pour passer (fig. 16) de l'état (a) à l'état (b) liquéfié, avant de retrouver finalement la structure plus dense de l'état (c) après un temps plus ou moins long.

Ivanov a posé, compte tenu de la présence de gaz adsorbé, les équations générales fondamentales du phénomène et il a trouvé évidemment que le temps de séjour dans l'état liquide augmente lorsque le coefficient k de Darcy est faible. Mais on est pratiquement dans l'impossibilité de déterminer les frontières de la zone liquéfiée.

Le tremblement de terre de Nijata montre bien que cette zone de liquéfaction peut atteindre des volumes considérables.

Les expériences faites à l'Institut polytechnique de Leningrad montrent très nettement que lorsque l'explosion est suffisamment profonde dans un sol saturé meuble, il y a toujours consolidation. Il n'en va pas de même en surface.

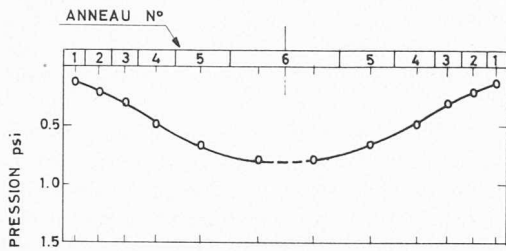


Fig. 17. — Appareil du type Faber à anneaux, utilisé par Richard.

Plus le sol est meuble et fin, plus grande est la tendance à la liquéfaction. Les Soviétiques procèdent alors par explosions successives, la deuxième série d'explosions ayant lieu après la stabilisation qui intervient par remontée de l'eau en surface. Mais les couches de surface restent plus longtemps que les autres dans l'état fluide, on a là une limitation, tout au moins dans le temps, de la méthode dont le remède ne peut se trouver que dans la mise en place préalable d'une surcharge sur le sol à consolider.

Sur huit des quinze très grands chantiers cités par Ivanov de 1936 à 1966, la dépense d'explosifs était comprise entre 10 à 30 kg par mètre cube de sol.

En résumé, il s'agit d'une solution brutale simple, applicable aux travaux publics, ne nécessitant pas de gros investissements pour le compactage rapide de grandes masses de sols non cohérents en des lieux suffisamment éloignés de toute vie civilisée. Malgré la grande dépense d'explosif, les Soviétiques la jugent nettement moins coûteuse que les techniques classiques de consolidation.

Le développement de la méthode est lié à une meilleure connaissance de l'effet des explosions dans les sols saturés. Il ne semble pas que cette étude soit encore très avancée. De l'aveu des Soviétiques, il s'agit d'une méthode en pleine évolution, dont chaque application nécessite une étude particulière.

Aux USA, la méthode a reçu beaucoup moins d'applications qu'en URSS.

Ainsi donc, sous une accélération croissant de zéro à plusieurs g , la vibration produit successivement quatre effets dans les sables saturés :

- Stabilité dynamique (avec notions d'accélération dynamique — Maslov, critique 1957).
- Compactage (Mogami et Kubo — 1953).
- Liquéfaction (Ivanov — 1962).
- Déplacement du sable (Kroll — 1954) avec compactage puissant.

Ces quatre stades sont atteints successivement en vibroflotation, avec de faibles accélérations ; on s'arrête au stade I (fondations bien connues soumises à des vibrations de machines).

Ces stades apparaissent mal lorsque l'on fait des enregistrements sous semelles. Mais, tout au moins ceux-ci permettent-ils de voir quelle est la complexité des pressions dynamiques de contact.

Richard, utilisant le dispositif en anneaux concentriques déjà utilisé par le Suisse Faber en 1933 (fig. 17), a montré aussi que les pressions dynamiques au contact sont déphasées par rapport au déplacement vertical, ce déphasage variant avec la distance au centre (fig. 18). On voit en particulier qu'au bord, dès lors que la fréquence dépasse 200 cycles par seconde, on est en opposition de phase avec le déplacement. Les amplitudes maxima des forces de contact varient en chaque point du contact avec la fré-

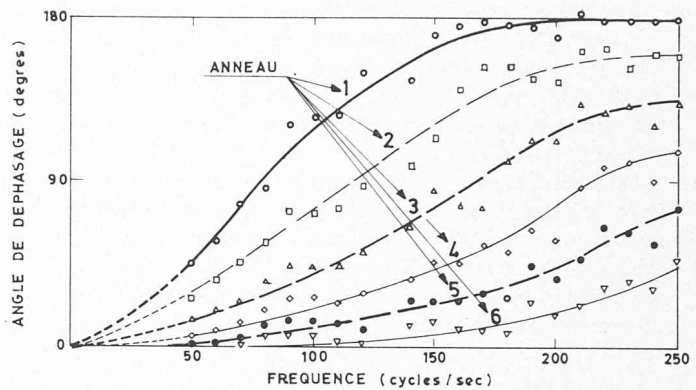


Fig. 18. — Déphasage des contraintes par rapport au déplacement vertical, suivant l'anneau et suivant la fréquence.

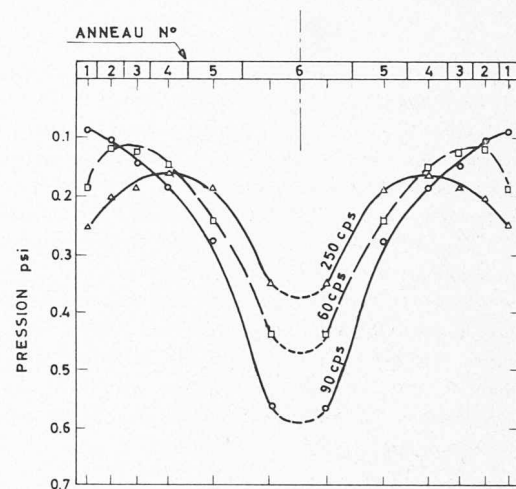


Fig. 19. — Répartition des contraintes suivant la fréquence et la pression.

quence, les distributions les plus uniformes correspondant aux plus grandes fréquences (fig. 19). Par ailleurs, plus faible est la pression de contact statique, toutes choses égales d'ailleurs, et plus uniforme est la pression dynamique ; inversement de grandes pressions et de faibles fréquences correspondent à des distributions inégales, avec pointes très accusées au centre.

Il y a donc loin entre cette réalité assez complexe et le schéma dans lequel on assimile une machine vibrante et son massif de fondation à une masse M sans propriétés élastiques, tandis que le sol est assimilé à un ressort sans inertie caractérisé, comme tous les ressorts, par un coefficient K égal à la force qui produit un raccourcissement

unité, la fréquence de vibration étant $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$. Ce schéma

très simplifié, qui ne tient pas compte des inégales répartitions de pression sous la fondation et de leur déphasage, est cependant utilisé faute de mieux. K est donc égal au module de réaction du sol multiplié par la surface d'appui, et comme le module de réaction est sensiblement inversement proportionnel à son rayon moyen, K finalement est proportionnel au périmètre de la surface d'appui de la fondation.

Tout ceci n'est évidemment qu'une approximation acceptée faute de mieux.

Finalement, ce qui apparaît de plus clair tant de l'étude des explosions, des tremblements de terre ou des distributions sous semelles, c'est que les vibrations les plus dangereuses sont celles qui correspondent à des grandes accélérations et de faibles fréquences dans un sol peu chargé et saturé et vice versa.

On voit combien est dangereux un tremblement de terre de degré 9, qui correspond à une énergie de 10^{23} ergs ou 50 millions de kilowatts se transmettant dans un sol mou qui ne conserve que les ondes de faible fréquence.

Lorsque l'on utilise la vibration pour enfoncer un pieu ou une palplanche et que celle-ci bute, en pointe, sur une

couche dure, c'est bien dans ces conditions de fréquences modérées et de fortes accélérations que l'on se place en déchargeant par ailleurs le sol par injection de l'eau à la pointe.

Mais comme les masselottes tournantes, quelles que soient leurs masses et leur distance aux axes de rotation, ne produiront jamais que des énergies assez limitées et n'ayant rien à voir avec celles d'un tremblement de terre, on conçoit que la vibration pour enfoncer des fondations sera toujours un procédé limité par la section droite et la dureté du sol, les argiles denses et les sols graveleux restant rebelles.

Les travaux de la route nationale N2

Le 26 mai 1972, à l'occasion d'une visite des travaux de la route nationale N 2, M. le conseiller fédéral H. P. Tschudi a pris congé de M. Robert Ruckli, directeur du Service fédéral des routes et des digues et a présenté son successeur, M. Jules Jakob, jusqu'alors ingénieur de la ville de Lucerne. Rappelons que c'est en 1957 que M. Ruckli fut appelé à la tête de l'Inspection fédérale en chef des travaux publics, qui prit en 1960 la dénomination de Service fédéral des routes et des digues et dont la tâche la plus importante de ces dernières années fut la mise en œuvre du réseau des routes nationales. Le Bulletin technique de la Suisse romande est heureux, par ces quelques lignes, de s'associer aux remerciements et aux vœux de succès qui furent adressés à cette occasion à ces deux personnalités.

1. La route nationale N2 dans le canton de Lucerne

La route nationale N 2 peut être subdivisée en 6 sections.

1.1 Section frontière cantonale Aarau — Sursee

Longueur : 15,9 km. — Voies : 2 + 2.

Coût : 85,730 millions de francs.

Projet général : approuvé par ACF du 28 juin 1963.

Projet d'exécution : approuvé par le Département de l'intérieur le 8 novembre 1971.

Etat des travaux de construction :

Travaux en cours actuellement : 12 chantiers de passages supérieurs et inférieurs et déplacements de chemins ainsi que la construction du remblai de Teretermoos, commune de Knutwil.

A la suite des travaux d'aménagement régional et local du territoire qui ont été effectués entre-temps, il a fallu modifier le projet pour la région de Dagmersellen. Le village est maintenant évité par un tracé ouest.

Un autre tracé contesté a été celui de la « Knutwilerhöhe » pour lequel la commune a proposé une variante avec tunnel à la place du tracé à ciel ouvert. Cette variante a cependant été repoussée car le supplément de frais occasionné par un tunnel d'env. 1,5 km de long aurait atteint plus de 36 millions.

Dans les communes de Langnau, Dagmersellen, Altishofen, Uffikon et Buchs, on procède actuellement à des remaniements parcellaires globaux, ce qui facilite beaucoup l'acquisition des terrains.

La mise en service de cette section peut être prévue pour 1977.

1.2 Section Sursee — Riffig

Longueur : 16,7 km.

Coût : 93,330 millions de francs.

Projet général : approuvé par ACF du 28 juin 1963.

Projet d'exécution : mise à l'enquête publique les 27 février 1971/6 mars 1972.

Bien que le projet général ait été approuvé par toutes les communes et toutes les autorités, une vive opposition se manifesta après la mise à l'enquête du projet d'exécution. Une requête a été présentée au Conseil fédéral pour demander que l'on reconsidère l'approbation donnée en son temps au projet général et une procédure est également pendante devant le Tribunal fédéral. En outre un postulat tendant à ce que l'on réexamine le tracé choisi, a été déposé au Conseil national, appuyé par une série de conseillers nationaux. Le Conseil d'Etat et le Département des travaux publics s'en tiennent toutefois au tracé choisi mais sont d'accord d'examiner sérieusement toutes les propositions d'amélioration soutenables et de les réaliser si elles se révèlent opportunes. D'autres solutions constituant de véritables alternatives, par exemple par le Rottal (Ruswil) ou par le Eichberg, n'entrent pas en considération et personne n'invoque des raisons valables pour les appuyer. Seul un tracé par la rive gauche pourrait encore entrer en ligne de compte. Il entraînerait cependant de gros inconvénients. Par exemple, les jonctions de Sursee et Sempach au réseau des routes cantonales et aux zones industrielles et résidentielles se présenteraient de façon défavorable et les trafics de desserte et industriel s'effectueraient par de fâcheuses traversées de localités.

L'aménagement local du territoire se fait depuis des années sur la base de la conception actuelle ; un nouvel aménagement entraînerait des investissements erronés de toute nature. Sur la rive gauche, non touchée aujourd'hui par l'autoroute, se sont développées des zones de construction dans le cadre des mesures approuvées de planification locale ; ces zones seraient traversées et dépréciées.

Les intérêts de l'agriculture ont été largement pris en considération lors du choix du tracé mis à l'enquête. Une grande partie du terrain nécessaire a pu être acquise de gré à gré. Un tracé sur la rive ouest du lac causerait de sérieux préjudices parce qu'il traverserait des exploitations agricoles de grande valeur. Le versant est avec ses terrasses le long du lac permet d'adapter beaucoup plus facilement la route à la configuration des lieux. De l'autre côté, cette adaptation est rendue plus difficile par le terrain en légère