

densification des sols par explosifs

soil densification by the explosive method

E. DEMBICKI, N. KISIELOWA

Politechnika Gdańska*

Résumé

L'utilisation d'explosif peut permettre une densification en place de matériaux sableux. Cette méthode, utilisable tant à terre, qu'en mer est souvent avantageuse par rapport aux méthodes traditionnelles.

On décrit brièvement cette technique, par son mode d'action et les paramètres à utiliser (charge, espacement, ...).

A l'occasion d'un programme d'essai sur site réel on a pu étudier l'action des explosifs. Les enregistrements de signaux sismiques sont présentés ainsi que ceux de la pression interstitielle en fonction de la distance au lieu de l'explosion.

On a pu mesurer les tassements résultants, tant en surface qu'en profondeur. L'amélioration des propriétés des sols a été contrôlée par des essais au pénétromètre dynamique.

On fournit des indications sur la méthode de calcul.

Abstract

The use of an explosive method can lead to an effective densification of sand and a cohesive material. This method is utilised both in a land and in a seabottom. In the paper the technique and the governing parameters are described.

The performed field measurement program permitted to study the explosive action. The registration of seismic signals and of the pore pressure in function of the distance from the explosion center are presented. The settlements of the soil surface and at the soil beneath have also been measured. The improved properties of the densified soil have been supervised by a dynamic penetrometer. Some information on the calculation method are also presented.

* Instytut Morski, Gdańsk, Pologne.

1. INTRODUCTION

L'un des éléments des travaux liés aux problèmes de fondations consiste à densifier le sol, ce qui permet de réduire le coût de l'ouvrage, et empêche la formation de tassements trop importants qui pourraient causer l'endommagement de la construction ou diminuer sa résistance.

Actuellement, dans la technique internationale, on applique le plus souvent les méthodes suivantes :

- drainage du sol avec surcharge statique ;
- consolidation dynamique (méthode de Ménard) ;
- vibroflotation ;
- compactage par explosifs.

La densification des sols par explosifs est l'un des thèmes principaux dans les travaux de recherche menés par l'Institut Maritime de Gdańsk et la Chaire de Géotechnique de l'École Polytechnique de Gdańsk.

Ces recherches, ainsi que de nombreux essais effectués sur le terrain, ont abouti à l'élaboration de méthodes modernes pour la densification dynamique des sols par explosifs.

Ces méthodes comprennent :

- a. compactage des sols pulvérulents à l'aide d'explosifs enfoncés :
 - en terre ;
 - dans les bassins maritimes et fluviaux.
- b. consolidation dynamique avec formation dans le sol de pieux sableux drainants.

Ces méthodes ont été appliquées, entre autres, aux ouvrages maritimes du Port du Nord de Gdańsk, dans la construction du quai d'un chantier naval de Gdynia et dans les ouvrages hydrotechniques de la centrale nucléaire de Żarnowiec.

Jusqu'à présent, les sols compactés en Pologne comptent : à terre 4 000 000 m³, en mer 200 000 m³ (dans les bassins portuaires).

2. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

La densification des sols par explosifs est possible si :

- a. la couche du sol à compacter est entièrement saturée ;
- b. la masse d'explosif dans les charges isolées est bien calculée et ne provoque pas d'éruption de sol.

Les phénomènes qui se produisent dans le sol par suite des explosions ne sont pas encore entièrement éclaircis, tant ils sont compliqués.

Afin d'obtenir de bons résultats dans la consolidation du sol, il faut que les paramètres ci-dessous soient correctement déterminés :

- type de charge : ponctuelle, linéaire, continue, interrompue ;
- masse de chaque charge ;
- propriété de l'explosif utilisé ;
- nombre total de charges explosives dans une série de tirs ;

- répartition des charges dans l'espace de la couche compactée ;
- intervalle de temps entre les tirs dans les séries successives d'explosions ;
- technique d'exécution de travaux de tirs et de forage.

Le processus de la densification du sol à l'aide d'explosifs consiste à provoquer dans le squelette du sol de grandes pressions qui se créent par suite de l'accroissement brusque de la pression interstitielle dans le sol et de sa vibration.

Ce procédé se caractérise par l'écoulement de l'eau du sol, la phase préliminaire du tassement, ainsi que par la consolidation secondaire du sol, ce qui peut durer d'un à plusieurs mois.

La densification du sol cohérent par explosifs consiste en la formation de pieux sableux — drains verticaux qui provoquent l'écoulement brusque de l'eau.

L'explosion d'une charge linéaire dans le sol cohérent forme une ouverture de forage dont le diamètre dépend avant tout de la masse de matériel explosif appliqué sur 1 m du forage, de la structure du sol, de l'état plastique et de la densité apparente du sol.

Simultanément à la formation d'une ouverture de forage d'un grand diamètre (0,5 à 1,5 m), une onde de choc entraîne dans le sol environnant l'augmentation brutale de contraintes dans le squelette du sol et une suppression de l'eau interstitielle, ce qui amorce le processus de consolidation.

Dans le cas où il existe une couche saturée de sable ou de gravier au-dessus de la couche du sol cohérent, l'explosion provoque une ouverture de courte durée et l'écoulement d'une partie du sol pulvérulent dans l'ouverture de forage ainsi créée. C'est ainsi qu'un pieu sableux qui sert de drain vertical est formé.

Le compactage de ces pieux sableux se fait au cours de l'exécution de pieux voisins.

Le processus de consolidation une fois terminé, les pieux sableux peuvent être encore compactés à l'aide de charges ponctuelles placées au-dessus des pieux dans la couche du sol pulvérulent.

3. ESSAIS SUR LE TERRAIN

La densification du sol par explosifs exige un contrôle technique constant et l'exécution d'un large programme d'essais et de mesures qui peuvent être divisés en 4 groupes :

1^{er} groupe

- les essais avant les travaux de tirs :
 - essais sismiques (afin de déterminer des zones de risque et des masses optimales de charges) ;
 - essais géotechniques de contrôle.

2^e groupe

- les essais et les mesures de contrôle en cours de travaux de tirs :

- mesure de la pression interstitielle ;
- mesure du tassement de la surface de terrain après chaque série successive de tirs ;
- mesure du tassement des repères en profondeur.

3^e groupe

— les essais de contrôle après les travaux de tirs mais pendant la consolidation secondaire :

- mesure de la pression interstitielle ;
- mesure de la surface du terrain et du tassement des repères en profondeur.

4^e groupe

— les essais des propriétés du sol compacté (après le processus de la consolidation secondaire).

3.1. Mesure de la pression interstitielle

Le but principal consiste en :

- la détermination de la durée de la consolidation du sol,
- la détermination de la variation de la surpression de l'eau dans la phase de vibration du sol.

Pour atteindre ce but, on utilise des piézomètres et des capteurs tensiométriques (de 200 à 500 kPa).

Les essais effectués sur différents sites ont démontré que la pression interstitielle augmentait brutalement pendant la vibration du sol (de 0,5 à 2 s) puis décroissait lentement (de quelques jours à plusieurs mois).

L'exemple des variations de pression interstitielle en fonction de la distance entre le lieu de mesure et le point de tir est donné en figures 1 et 2.

La valeur de surpression et la rapidité de sa chute changent en fonction de la distance entre le lieu de mesure de la pression et le point de tir.

Jusqu'à présent, on n'a pas réussi à mesurer la valeur de surpression dans la zone de la densification intense du sol immédiatement après les travaux de tirs parce qu'un capteur de 500 kPa placé à une distance de 7 m du point de tir et à la profondeur de 8,6 m au-dessous du terrain avait été endommagé. Les piézomètres installés sur place ont laissé s'écouler l'eau, et n'ont pas permis la mesure.

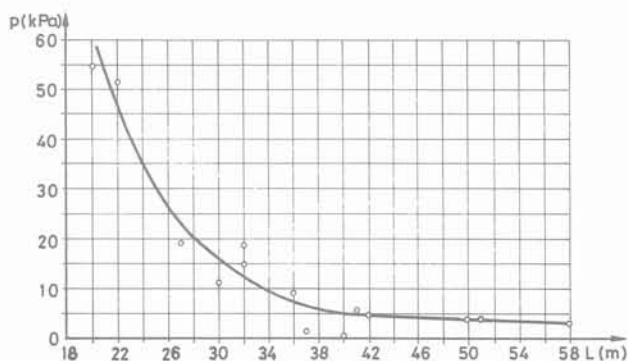


Fig. 1. — Parcours des changements de la surpression dans la phase d'oscillation en fonction de la distance du lieu d'explosion.

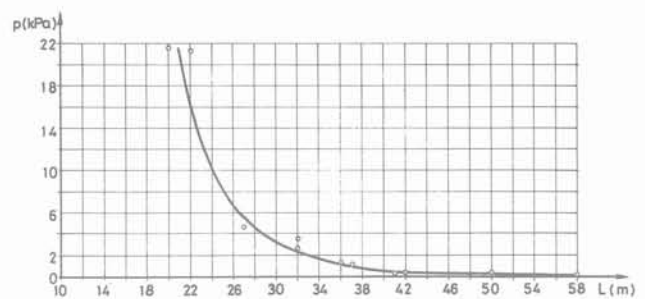


Fig. 2. — Parcours des changements de la surpression après 40 secondes à partir du moment d'explosion en fonction de la distance du lieu d'explosion.

3.2. Essais sismiques et évaluation de l'influence des paramètres de vibrations sur le processus de la densification du sol

Les essais sismiques des paramètres de vibrations dans le voisinage immédiat du lieu d'explosion ont été exécutés à l'aide de sismographes de type WBP-III destinés à enregistrer des vibrations à courte distance du lieu d'explosion.

Les déplacements enregistrés se situent entre 1 et 150 mm pour la bande de fréquence entre 1 et 100 Hz. L'enregistrement de la composante verticale a été exécuté simultanément en plusieurs points de mesure dans un intervalle de 5 à 35 m du lieu d'explosion, les points de mesure étant disposés tous les 2,5 m.

Le but des mesures de vibrations à courte distance est d'analyser les changements de l'intensité des vibrations qui se produisent à différentes distances du lieu d'explosion, ainsi que de déterminer le caractère des vibrations et leurs paramètres.

A une distance inférieure à 16 m, l'enregistrement des vibrations du sol n'est pas perturbé par la réaction des ondes réfléchies.

Au fur et à mesure de l'accroissement de la distance, la forme du sismogramme est devenue plus complexe et a été typique pour « un champs éloigné » des déplacements.

La figure 3 indique l'enregistrement des vibrations du sol en fonction de la distance pour une masse constante d'explosion de 23 kg.

Les vibrations les plus intenses ont été provoquées par les ondes longitudinales et transversales. On peut supposer qu'elles exercent une grande influence sur le processus de la densification du sol, par la déformation de sa structure primaire.

Les paramètres de vibrations du troisième et du quatrième passage des ondes réfléchies n'ont pas atteint (sauf dans quelques rares mesures) la valeur de vibrations enregistrée dans le premier et le deuxième passage.

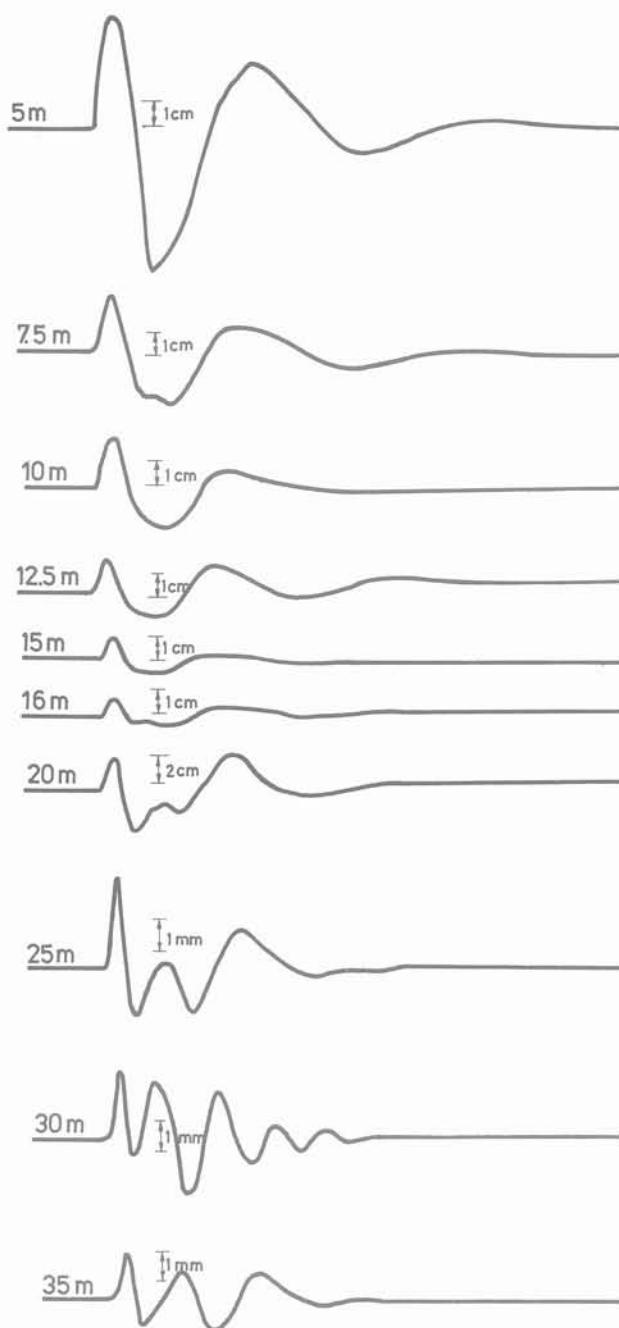


Fig. 3. — Changement du caractère d'enregistrement des vibrations en fonction de la distance.

Ces vibrations provoquent aussi un changement de la structure primaire du sol, mais leur influence sur le processus de consolidation du sol est moins important.

Il faut souligner que tous les sismogrammes enregistrés à la même distance du point d'explosion se sont caractérisés par un enregistrement de vibration très rapproché.

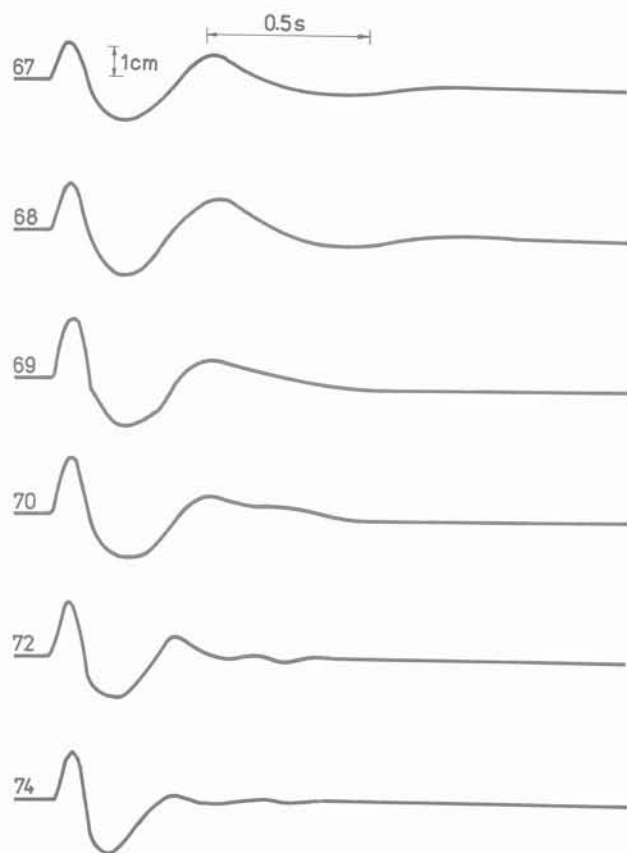


Fig. 4. — Exemple d'enregistrement des vibrations à une distance de 10 mètres du lieu d'explosion.

$Q = 23 \text{ kg}$

Tirs N°s 67, 68, 69, 70 - Enregistrement après la première série d'explosion.

Tirs N°s 72 et 74 - Enregistrement après la deuxième série d'explosion.

La figure 4 présente les exemples d'enregistrements à une distance de 10 m du lieu d'explosion pour :

- la première série de tirs : sismogrammes n°s 67, 68, 69, 70 ;
- la deuxième série de tirs : sismogrammes n°s 72, 74.

Afin de déterminer les paramètres limites de vibrations ayant une influence sur le processus de la densification du sol, on a fait un diagramme de vibrations après le passage des ondes : longitudinale et transversale. On a déterminé les paramètres limites pour les ondes longitudinales et transversales à partir des sismogrammes de vibration après le passage de ces ondes.

On a établi un rapport entre ces valeurs et la moyenne du tassement du sol à la suite de sa densification. Exemples : voir figures 5, 6, 7.

Il en résulte que dans la zone de densification effective du sol ($R = 7,0 \text{ m}$) les paramètres de vibrations ont des valeurs suivantes :

- amplitude des vibrations « A » $> 0,027 \text{ m}$;

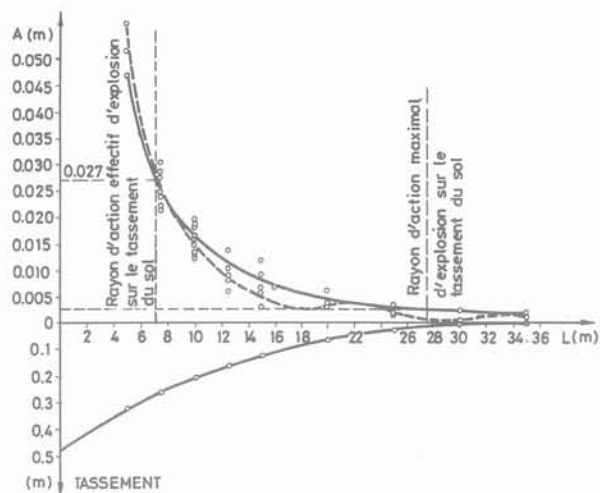


Fig. 5. — Variations des amplitudes des placements des vibrations (première et deuxième entrée des ondes sismiques).

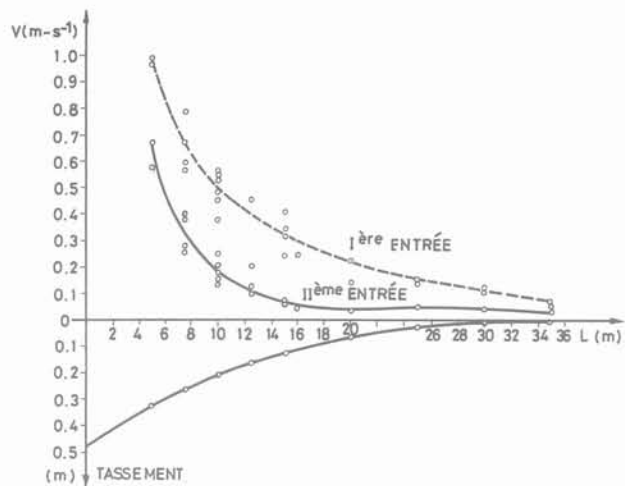


Fig. 6. — Variations des vitesses des vibrations et tassement du sol en fonction de la distance du lieu d'explosion.

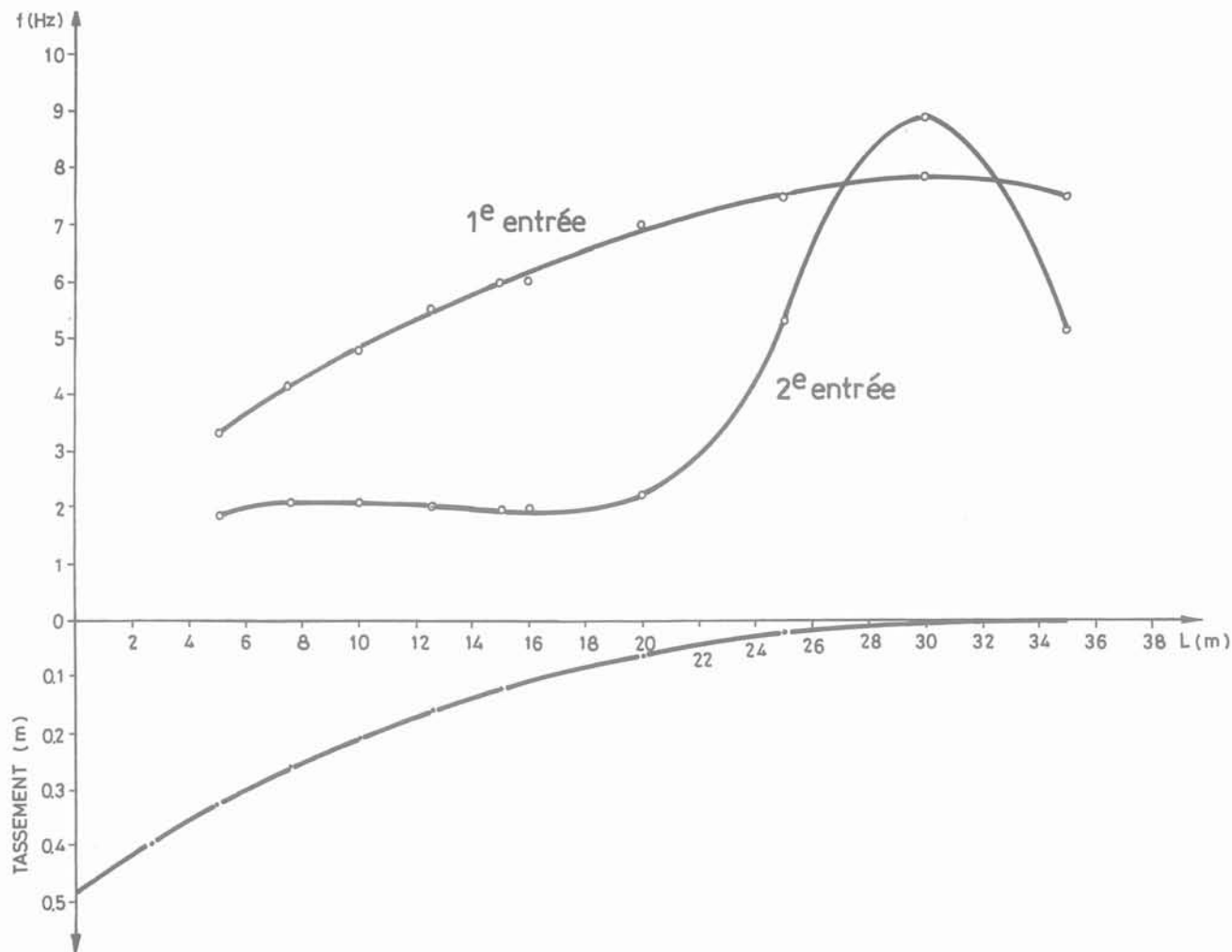
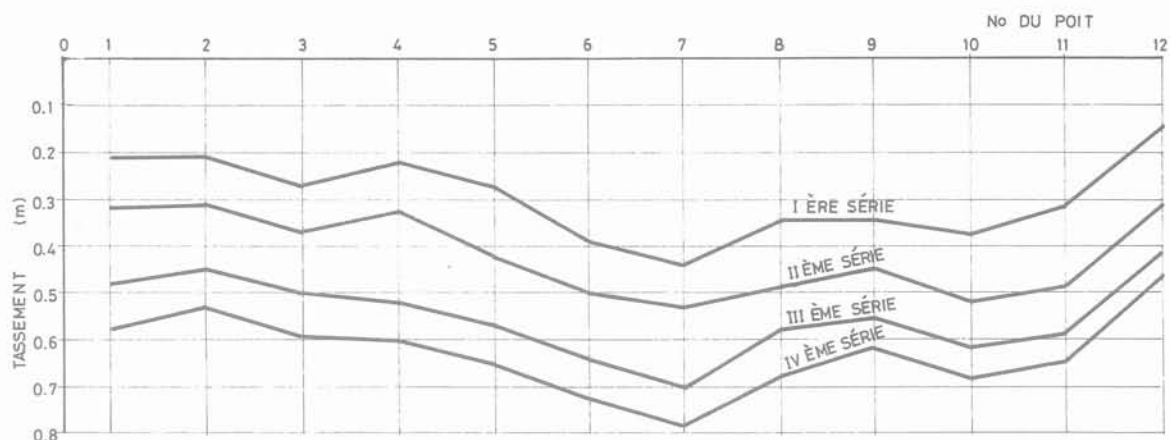


Fig. 7. — Variation de la fréquence de vibration (1^{re} et 2^e entrée des ondes sismiques) et du tassement du sol en fonction de la distance du lieu d'explosion.



DISTANCES (m)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
TASSEMENT APRÈS LA I ÈRE SÉRIE D'EXPLOSION	0.21 m	0.21	0.27	0.22	0.27	0.39	0.44	0.35	0.35	0.38	0.32	0.16
TASSEMENT APRÈS LA II ÈME SÉRIE D'EXPLOSION	0.32 m	0.31	0.37	0.33	0.43	0.50	0.53	0.49	0.45	0.52	0.49	0.32
TASSEMENT APRÈS LA III ÈME SÉRIE D'EXPLOSION	0.48 m	0.45	0.50	0.52	0.57	0.64	0.71	0.58	0.56	0.62	0.59	0.42
TASSEMENT APRÈS LA IV ÈME SÉRIE D'EXPLOSION	0.58 m	0.53	0.59	0.60	0.65	0.73	0.79	0.68	0.62	0.69	0.65	0.47

Fig. 8. — Diagramme des tassements du terrain pendant le compactage du sol par l'explosif.

— vitesse des vibrations « V_1 » $> 0,50 \text{ m/s}^{-1}$ pour les ondes longitudinales et « V_2 » $> 0,20 \text{ m/s}^{-1}$ pour les ondes transversales ;
 — la fréquence des vibrations est d'environ 4 Hz pour les ondes longitudinales et d'environ 2 Hz pour les ondes transversales.

3.3. Mesures de tassement du sol

Les mesures de tassement du sol ont été exécutées pendant et après les travaux de tirs.

On a déterminé les valeurs du tassement des couches particulièrement du sol à l'appui de :

— mesures de nivellement de la surface du sol ;
 — mesures de tassement à l'aide des repères profonds.

Domaine des mesures :

— nivellement des points sur le terrain situés dans un réseau de $10 \times 10 \text{ m}$ avant les travaux de tirs (les piquets étant enfoncés à 0,7-0,8 m en profondeur) ;
 — mesures de contrôle des points sur le terrain et des repères profonds après chaque série de tirs ;
 — mesures de contrôle six semaines après avoir terminé les travaux de tirs (fin de la consolidation secondaire).

Les exemples de tassement du sol et des repères profonds observés au cours de la densification du sol sur le terrain de la station de pompage d'eau de la centrale nucléaire de Zarnowiec sont présentés par les figures 8 et 9.

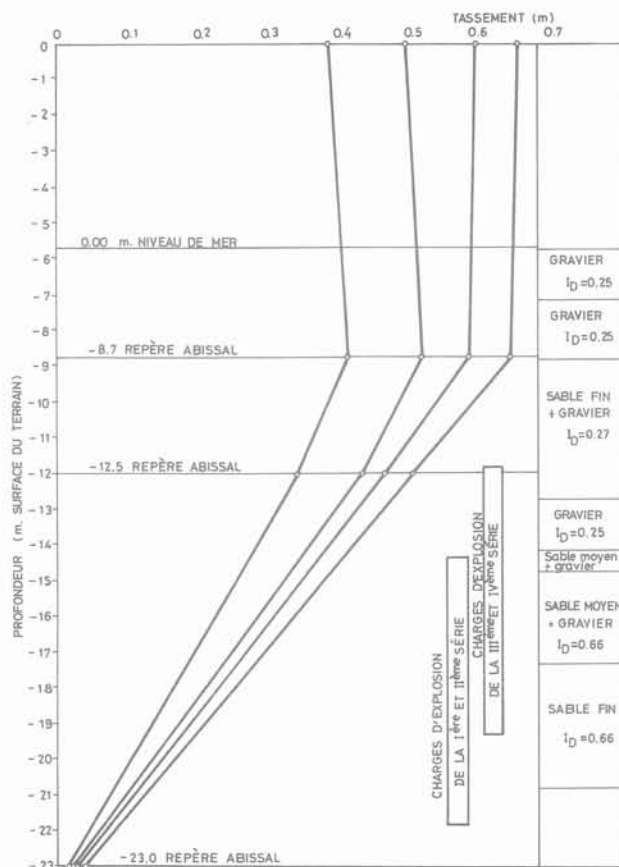


Fig. 9. — Diagramme du tassement de la surface du terrain et des repères profonds pendant le compactage du sol à l'explosif.

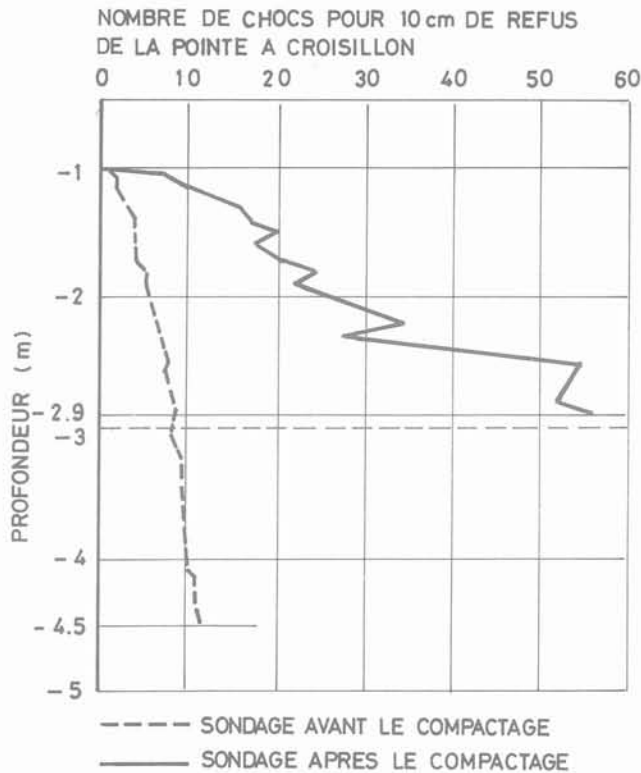


Fig. 10. — Résultats d'essais avec la sonde percussion de type ITB-ZW sur le terrain du Port du Nord à Gdańsk.

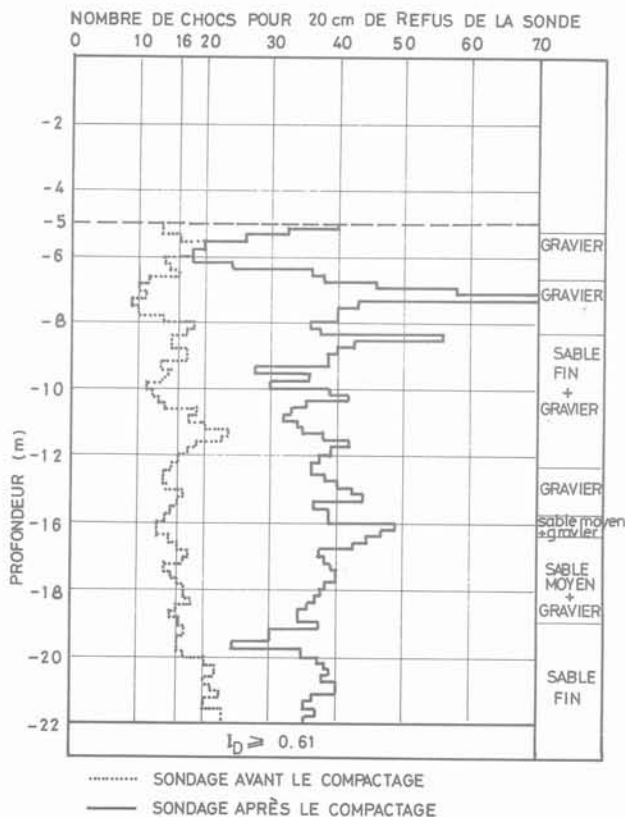


Fig. 11. — Résultat d'essais avec la sonde percussion de type de Borros sur le chantier de la centrale nucléaire.

3.4. Essais géotechniques

Le but des essais géotechniques est de définir les changements qui se produisent dans le sol par suite de sa densification. Les essais ont eu pour but l'étude du degré de compactage I_D avant les travaux de tirs et six semaines au moins après la fin des travaux de tirs.

Les essais ont été faits à l'aide d'un pénétromètre statique « Gouda », d'un pénétromètre dynamique « Borros » et d'un pénétromètre sonde légère (ITB-ZW). Un exemple de profil de sol compacté par les explosions sous l'eau est donné en figure 10, tandis que ceux concernant le terrain de la Centrale nucléaire à Zarnowic sont en figure 11.

4. TECHNIQUE D'EXÉCUTION DES TRAVAUX

Dans la densification du sol en terre on utilise des explosions contenues c'est-à-dire ne provoquant pas l'éruption du sol. Les charges explosives sont placées dans les ouvertures de forage à des profondeurs en fonction du projet et des conditions géotechniques. On procède de même pour leur masse et leur distance (fig. 12, 13).

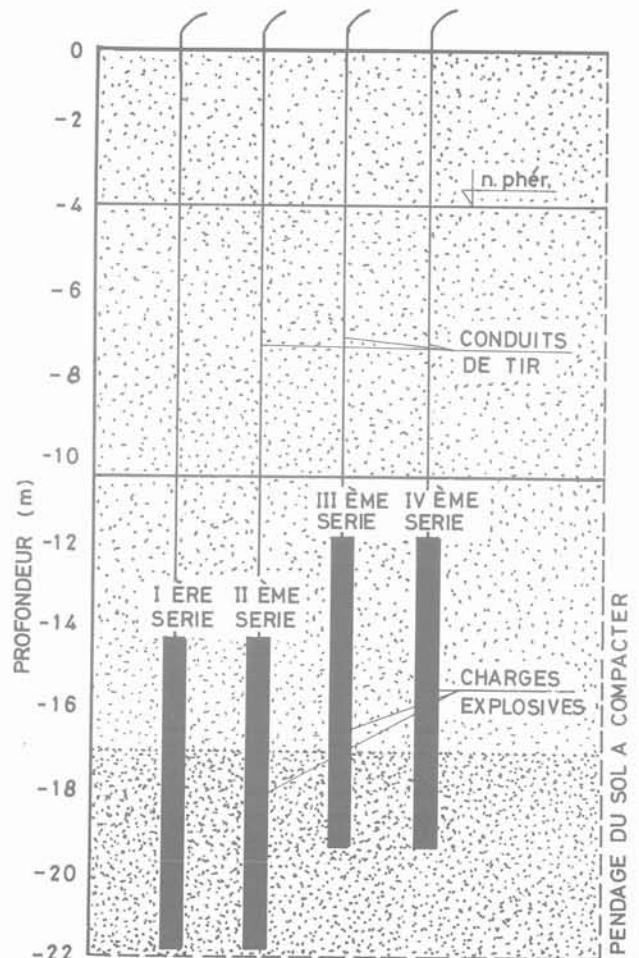


Fig. 12. — Schéma de répartition des charges explosives dans le sol.

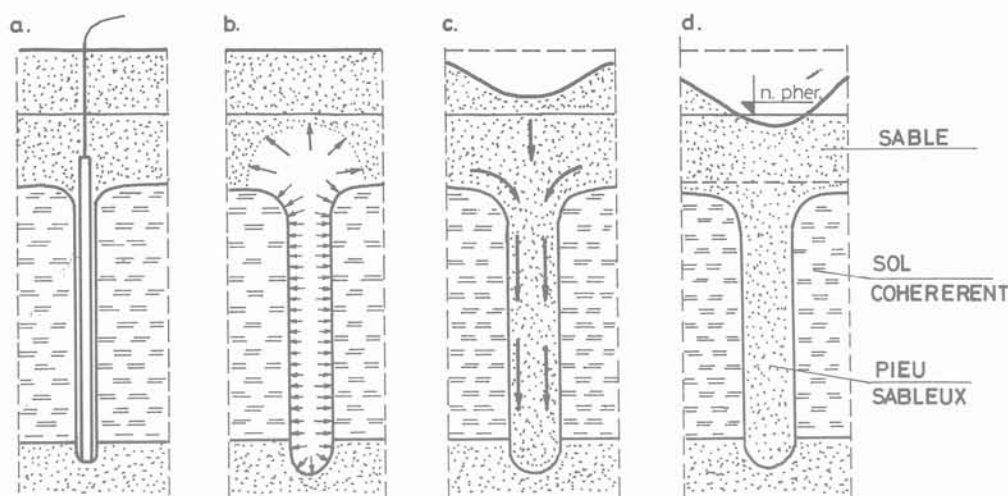


Fig. 13. — Phases de formation d'un pieu sableux au moyen des explosions.

Pour la densification du sol dans les bassins, les charges sont placées à une distance bien déterminée au-dessus de la surface ou du remblai. La distance et la masse du matériel explosif changent en fonction de la profondeur de l'eau dans le bassin et de l'ouverture d'une couche du sol compacté (fig. 14).

4.1. La forme des charges

Pour la densification du sol on utilise les charges ponctuelles ou linéaires. La longueur d'une charge ponctuelle ne devrait pas dépasser son diamètre, et sa forme doit être la plus rapprochée d'une sphère.

Les charges linéaires ont la forme d'un cylindre ou d'un tuyau flexible. Elles sont préfabriquées à terre puis placées dans les ouvertures de tirs conçues dans ce but.

4.2. Disposition de charges dans le plan

Les charges peuvent être disposées :

- en triangles équilatéraux ;
- en carrés ;
- en ligne droite.

Le système de répartition de charges dans le plan n'a pas d'influence particulière sur les résultats finaux du compactage du sol.

On recommande néanmoins d'utiliser le système de carrés pour les travaux à terre, et pour la densification du sol sous l'eau celui de la ligne droite. Ces deux systèmes sont les plus efficaces pour des travaux de densification à l'échelle industrielle.

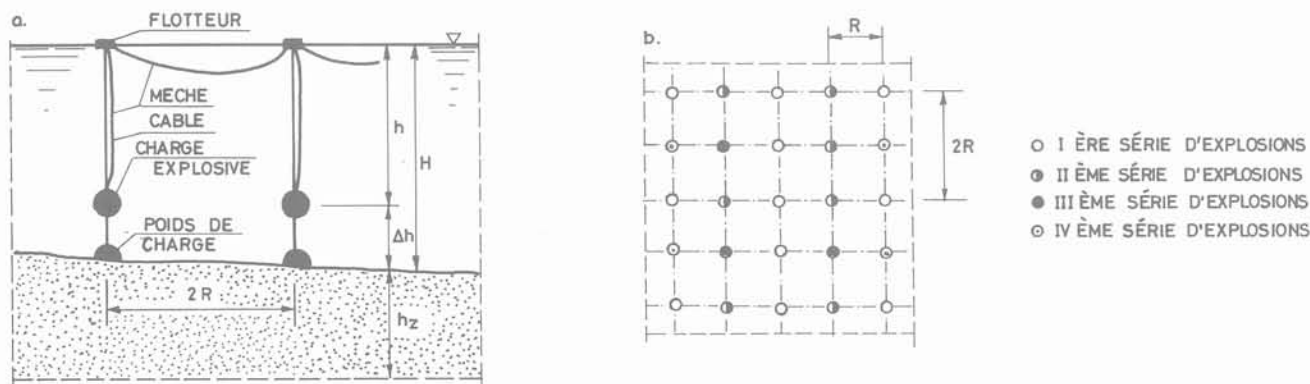


Fig. 14. — Schéma de la répartition des charges explosives sous l'eau :
a. En coupe verticale.
b. Dans le plan.

La densification du sol se fait à l'aide de plusieurs séries de tirs exécutés sur le terrain. Une série de tirs se compose d'un nombre de charges disposées uniformément sur toute la surface du sol compacté. La distance entre les charges étant $2R$, avec R — rayon d'action effectif de l'explosion.

Il est recommandé d'exécuter simultanément le plus grand nombre de tirs en utilisant le maximum de charges.

C'est d'après les essais sismiques qu'on établit leur nombre. Pour augmenter le degré de densification du sol d'une valeur $I_D \leq 0,25$ à une valeur $I_D \geq 0,4$ on exécute deux séries de tirs. Pour obtenir la valeur $I_D \geq 0,8$ on exécute au moins quatre séries de tirs.

4.3. Masse des charges

4.3.1. Densification terrestre

Dans la densification du sol pulvérulent, la masse d'une charge isolée ponctuelle peut être déterminée par la formule empirique selon P. IVANOV (1967)

$$q = 0,055 h^3 \quad (1)$$

avec : q - masse du matériel de tirs (en kg)
 h - enfoncement de charge (en m).

Dans les travaux de notre groupe de recherche, les charges ponctuelles ont été appliquées exclusivement à des charges dynamiques afin d'accélérer le processus de consolidation du sol.

Pour le compactage des couches du sol jusqu'à 30 m d'épaisseur, on a utilisé les charges linéaires ; de même que pour le sol cohérent. C'est d'après les tirs d'essais qu'on a déterminé la masse d'une charge linéaire isolée.

4.3.2. Densification dans les bassins

Dans la densification du sol pulvérulent sous l'eau, la masse d'une charge isolée peut être déterminée d'après la formule empirique suivante :

$$q = \left(\frac{h}{b} \right)^3 \quad (2)$$

avec :
 q - masse d'une charge isolée (en kg) ;
 b - coefficient d'après les essais sur le terrain $m/kg^{1/3}$

Pour le sable moyen et le gravier :

$$b = 4,5 \text{ à } 5,0$$

4.4. Rayon d'action effectif de l'explosion

Le rayon d'action effectif de l'explosion pour chaque type de charge dans la densification du sol en terre et dans les bassins peut être déterminé d'après la formule :

$$R = cq^{1/3} \text{ (m)} \quad (3)$$

avec :

R - rayon d'action de l'explosion (en m) ;
 q - masse de charge (en kg) ;
 c coefficient empirique ($m/kg^{1/3}$).

Pour le sol pulvérulent avec le degré initial en compactage $I_D \leq 0,3$, le coefficient « c » vaut 5.

Pour un sol avec un degré initial de densification supérieur à 0,5, ainsi que pour un sol silteux le coefficient vaut 2,5. Ces coefficients ont été élaborés après plusieurs années d'expérimentations sur le terrain. Leurs valeurs pour les sols pulvérulents sont très rapprochées de celles qui ont été déterminées par P. IVANOV au cours de ces essais.

Il est recommandé de déterminer ce coefficient pour les sols cohérents pendant les travaux de tirs préliminaires.

4.5. Profondeur d'installation des charges

Les charges ponctuelles doivent être placées à la profondeur :

$$L = \frac{h}{1,5} \text{ (m)} \quad (4)$$

avec :

L - profondeur d'installation des charges (m) ;
 h - hauteur de la couche à compacter (m).

Au cas où l'explosion de charge provoque une éruption du sol, il faut augmenter la profondeur qui a été déterminée d'après la formule.

Pour le compactage sous l'eau, on installe des charges à une profondeur déterminée en y accrochant des flotteurs en plastique ou en bois.

La distance minimale d'installation des charges au-dessus du fond où l'éruption ne se produit pas est déterminée par la formule de P. Ivanov :

$$l = (d \cdot g^{1/3})^{1,95} \quad (5)$$

avec :

l - distance minimale d'installation de charge au-dessus du fond (m) ;
 d - coefficient empirique ;
 $d \cong 0,35$.

5. MASSE DE SÛRETÉ DE CHARGE POUR UN TIR SIMULTANÉ

Pendant la densification en terre et dans les bassins, la masse de sûreté pour un tir simultané doit être bien déterminée et ne doit pas perturber le fonctionnement des objets placés à la proximité de travaux de tirs.

Pour les charges linéaires le rayon de la zone menacée pour les objets en bon état est déterminée par la formule :

$$L_s = 70 \sqrt[3]{\Sigma q} \text{ (m)} \quad (6)$$

avec :

Σq - masse des charges pour un tir simultané (kg) ;
 L_s - rayon de la zone menacée (m).

Les distances déterminées sont souvent approximatives. Les résultats des essais sismiques ont plusieurs fois démontré qu'il y avait eu de grandes différences dans l'étendue de la zone menacée, même pour des sols dont les caractéristiques étaient presque identiques.

Par exemple pour un sol argileux et une masse de charge de 30 kg, le rayon de la zone menacée varie entre 150 et 400 m.

Pour un sol sableux saturé ce rayon varie :

$q = 5 \text{ kg} - 74 \text{ m à } 93 \text{ m}$
 $q = 10 \text{ kg} - 98 \text{ m à } 117 \text{ m}$
 $q = 15 \text{ kg} - 120 \text{ m à } 134 \text{ m}$

Il y a donc une nécessité de faire des essais sismiques de contrôle avant tous les travaux de tirs.

Il est recommandé d'augmenter la masse de charges et leur nombre au fur et à mesure des essais, afin de pouvoir déterminer la masse optimale de charges.

6. EFFETS TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES

Les méthodes de densification du sol par explosifs sont aussi efficaces que celles de vibroflottation et de Ménard qui étaient appliquées jusqu'à présent dans la technique internationale.

Leurs avantages sont les suivants :

- progrès rapide des travaux ;
- rayon d'action illimité dans les conditions terrestres ;
- possibilité d'obtenir la valeur du degré de compactage à une profondeur quelconque ;
- frais d'exécution des travaux notablement inférieurs à ceux des autres techniques de compactage ;
- possibilité de compactage des sols sous l'eau et l'amélioration des sols cohésifs.

Par exemple :

Les frais de travaux de densification de la surface de 10 000 m² à une profondeur de 23 m sont de 2,5 FF par m³ (d'après les prix de 1984).

Ces frais comprennent :

- élaboration du projet de densification du sol par explosifs ;
- exécution de travaux de forage et de tirs ;
- essais sismiques ;
- contrôle constant de l'auteur ;
- contrôle de mesure au cours de l'exécution des travaux.

Le temps d'exécution de travaux sur la surface de 10 000 m² avec une seule foreuse est d'environ trente jours ouvrables soit 4 000 m³ par jour. Avec deux foreuses la capacité monte à 10 000 m³/jour.

Dans la densification du sol dans les bassins, c'est à l'aide de barques que les charges sont réparties et le temps d'exécution dans les conditions atmosphériques favorables est d'environ trente jours ouvrables pour 10 000 m³ de sol.

Afin de déterminer les aspects économiques de la méthode de densification du sol dans les conditions terrestres, on les a comparés avec la méthode de vibroflottation et celle des pieux FRANKI.

Dans ce but on a pris en considération les éléments suivants :

- profondeur de compactage - 17 m ;
- surface à compacter - 10 000 m² ;
- utilisation d'une seule foreuse.

Le coût comparatif de compactage par rapport à la méthode de :

- vibroflottation : environ 1,00 ;
- pieux FRANKI : environ 0,98 ;
- explosions : 0,15.

On a calculé le profit relatif de la méthode d'explosion qui est de 0,84 pour 10 000 m².

Il faut souligner que cette méthode est dix fois plus rapide. L'équipement utilisé est simple et généralement accessible et le nombre d'employés réduit (6 personnes par groupe).

BIBLIOGRAPHIE

1. DEMBICKI E., KISIELOWA N., NOWAKOWSKI H., OSIECIMSKI R., *Compactage des fonds marins sableux à l'explosif*. C.R. du Colloque sur le compactage, Paris, 1980, vol. I, pp. 295-299.
2. DEMBICKI E., KISIELOWA N., NOWAKOWSKI H., NOWAKOWSKI Z., *Consolidation dynamique des vases à l'explosif*. C.R. du Colloque sur le compactage, Paris, 1980.
3. DEMBICKI E., KISIELOWA N., *Field tests of marine subsoil improved with explosion method*. Proc. of the Sec. Europ. symp on Penetration Testing, Amsterdam, 1982, vol. II, pp. 535-54.
4. DEMBICKI E., KISIELOWA N., *Technology of soil compaction by means of explosion*. Proc. of the VIII. Europ. Conf. on soil Mech. and Found. Eng., Helsinki, 1983, vol. I, pp. 229-230.
5. IVANOV P. L., *Uplotnienie nieswiaznych gruntow wzrywami*, Leningrad, 1967.