

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Les méthodes de compactage des sols peu cohérents saturés par explosion et leur coût

The cohesionless and saturated soils compaction methods and their cost

M.S.Diane – Centre de Recherche Scientifique de Conakry-Rogbané, Guinée
S.Diane – Direction Nationale du Génie Rural, Conakry, Guinée

RESUME: Le présent travail traite de l'efficacité technique et, surtout, économique du compactage des sols peu cohérents saturés par explosion. En effet, au moment de leur remblayage ces sols se déposent avec une structure meuble. Dans ces conditions il est nécessaire de prendre des mesures spéciales pour l'augmentation de la résistance des fondations des ouvrages et la diminution de leurs déformations sous l'action des charges statiques, et surtout, des forces dynamiques. Le compactage des sols sans cohésion saturés par explosion est un moyen très efficace pour atteindre ces objectifs. L'étude des particularités du processus de la consolidation desdits sols sous l'action de l'explosion a permis : -d'élaborer les principaux schémas technologiques de compactage des territoires en sols peu cohérents par explosion, ainsi que les principales recommandations relatives au compactage par explosion - d'indiquer leurs domaines d'utilisation, de montrer l'accroissement de l'efficacité économique de la méthode avec l'augmentation de la surface et du volume du sol à compacter et de préciser les masses optimales des charges d'après le coût de compactage.

ABSTRACT: This paper deals with the technical and, particularly, the economical feasibility of cohesionless and saturated soils compaction by blasting. In fact when filling up these soils, they take a movable structure. Therefore it is necessary to improve the bearing capacity of buildings foundations and to reduce the deformations due to static, and mainly, dynamic loads. The technique of cohesionless and saturated soils compaction by blasting is a very effective method to attain these objectives. The experimentation has focused on the investigation of the sandy soils by blasting. From the results: -The main technological schemas and recommendations on compacting territories from cohesionless and saturated soils by blastings and their utilisation areas are established;- The increase of the economic competitiveness with the increase of the compacting area is demonstrated and the optimal weights of the explosives from the price of the method are allowed.

1. INTRODUCTION

On est souvent conduit à compacter des couches de terrain de grande épaisseur pour améliorer leur force portante et diminuer les tassements susceptibles de les affecter sous l'action des charges qu'elles auront à supporter. Il peut s'agir, par exemple, de couches naturelles de faible compacité, de terrains artificiels mis en œuvre sous une grande hauteur d'eau ou remblayés ultérieurement sans précaution. Dans ce cas, il n'est pas possible de procéder au compactage par couches de faible hauteur par les méthodes habituelles qui visent surtout le compactage de couches de sol de faible épaisseur. On a alors recours à des procédés de compactage dynamiques dont le compactage par explosifs. A cet effet, les premières recherches systématiques en laboratoire et in situ du processus de la consolidation des sols non cohérents ont été effectuées, entre autres, par Florin (1951), Maslov (1959), Goldstein (1952, 1953), Ivanov (1962a, 1967), Dembiski et autres (1980).

Le présent travail traite de l'efficacité des différents schémas technologiques du compactage des sols peu cohérents saturés par explosion.

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Le but principal de l'expérimentation (M.S. Diané & S. Diané) est l'étude des particularités du processus de la destruction de la structure, de la liquéfaction et de la consolidation des sols peu cohérents saturés sous l'action de l'explosion et du choc. Elle a porté sur du sable fin des nouveaux quartiers de Saint Petersburg (île Vassilievski). La composition granulométrique dudit sable est donnée dans le tableau I.

2.1. Expérimentation sous l'action de l'explosion au laboratoire

L'expérimentation sous l'action de l'explosion a été effectuée dans un bac métallique (Fig. 1) de hauteur 118 cm et de diamètre 151 cm. Le sable, à l'état sec, a été versé lentement et par couches successives dans le bac de façon à obtenir la structure la plus meuble possible. Lors du chargement du bac métallique une attention particulière avait été accordée à l'uniformité de la compacité initiale. Les actions dynamiques ont été provoquées à l'aide de l'explosion d'une substance explosive de 1,5 g placée à la

TABLEAU I Composition granulométrique du sable de l'île Vassilievski (Saint Petersburg)

Masse volumique ρ , g/cm ³		Densité ρ_s , g/cm ³	Composition granulométrique, % Diamètre des fractions mm									
max	min		5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,002	< 0,002
1,95	1,49	2,67	0,9	5,3	3,8	34,4	39,0	11,3	3,4	0,3	1,0	0,6

TABLEAU II Valeurs du tassement du sable de l'île Vassilievski après l'explosion

N° des explo-sions	Tassement moyen				$\frac{\Delta n}{\Delta \delta_{n+1}}$	ρ_s g/cm ³	Degré de densité relative I_D	Variation du degré de densité relative ΔI_D
	Absolu		Relatif					
	S, mm	$\delta, \%$	$\Delta \delta, \text{mm}$	$\Delta \delta, \%$				
0	-	-	-	-	-	1,559	0,187	-
1	22,90	2,22	22,90	2,22	-	1,595	0,279	0,092
2	35,61	3,47	12,71	1,25	1,78	1,614	0,326	0,047
3	46,15	4,52	10,54	1,05	1,19	1,632	0,369	0,043
4	55,62	5,47	9,47	0,95	1,10	1,648	0,407	0,038
5	62,42	6,16	6,80	0,69	1,37	1,659	0,433	0,026
6	69,12	6,84	6,70	0,68	1,01	1,677	0,456	0,023
7	73,91	7,33	4,79	0,49	1,39	1,679	0,477	0,021
8	77,05	7,65	3,14	0,32	1,53	1,684	0,489	0,012
9	79,80	7,95	2,75	0,30	1,07	1,689	0,499	0,010
10	82,75	8,23	2,95	0,28	1,07	1,694	0,511	0,012

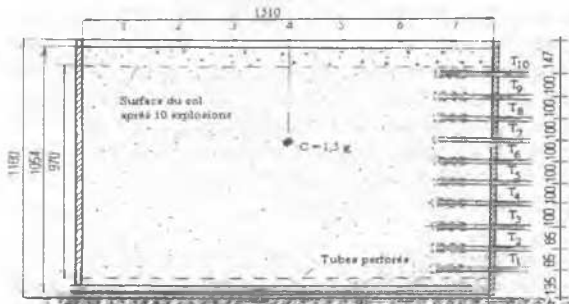


Fig. 1 : Bac pour l'essai des sables à explosion :
T₁ à T₁₀ -points de mesure de la pression interstitielle

profondeur de 30-40 cm permettant la réalisation d'une explosion camouflée. L'essentiel de la méthode fut l'utilisation de manomètres à faible inertie pour les mesures de la pression interstitielle et une méthode électrométrique pour la mesure de la porosité des sables. Le sable a été versé dans le bac de la même manière que dans le récipient de l'expérimentation sous l'action des chocs.

Dans le but de comparer les essais avec différentes compacités initiales du sol on a déterminé la valeur du tassement de la surface, c'est-à-dire le rapport $\Delta \delta_n / \Delta \delta_{n+1}$ (voir le tableau II).

2.2. Expérimentation in situ

Pour une comparaison des résultats ainsi obtenus avec ceux des recherches in situ, des essais ont été effectués sur le terrain par A.P. Kroutov (1982). Le sol de remblai était caractérisé par une teneur élevée en particules limoneuses (jusqu'à 98%). Le niveau des eaux souterraines était situé à la profondeur de 0,1-0,2 m. Les couches supérieures étaient pratiquement saturées d'eau en raison des remontées capillaires. Les études ont été menées dans une zone de grande profondeur remblayée hydrauliquement sous l'eau. Pour ce faire, des explosions profondes de type camouflé ont été provoquées avec des charges de masse 0,5-5,0 kg placées dans le sol à la profondeur de 2-5 m. Ainsi la couche de sol à étudier atteignait 7-8 m et englobait toute la zone du remblai hydraulique qui atteignait 4-7 m de rayon. Pour la mise en place de la charge explosive on a creusé des forages avec des carottiers de diamètre 108 mm qui ont été retirés avant le chargement et le remplissage du trou par du sol

TABLEAU III Résultats des explosions camouflées des nouveaux quartiers de Saint Petersburg [8]

Explosions	Nombre de charges	Profon-deur de compactage, m	Tassement moyen du sol 1 jour après l'explosion		Tassement moyen du sol 4 jours après l'explosion		Tassement moyen du sol 24 jours après l'explosion	
			Absolu cm	Relatif %	Absolu cm	Relatif %	Absolu cm	Relatif %
1ère série	20	7	13	1,8	18	2,6	-	-
2ème série	12		8	1,1	11	1,6	-	-
3ème série	16		6	0,8	-	-	14	2,0
Total			27	3,8			40	5,7

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Principaux schémas technologiques de compactage par explosion des territoires en sols peu cohérents saturés.

Comme on le sait (Ivanov 1962a, b) la condition nécessaire pour une utilisation efficace de la méthode de compactage par explosion des sols non cohérents est leur passage dans l'état de saturation complète ou quasi-complète. C'est seulement après la saturation de la zone à compacter qu'on peut passer à l'explosion des charges.

Pour le compactage des territoire remblayés, érigés au-dessus de la nappe phréatique, il est souhaitable de procéder à la saturation du sol pendant la période du remblayage. On peut réaliser le compactage par gradins au fur et à mesure de l'élévation de l'ouvrage. Les travaux d'explosion doivent être effectués immédiatement après le remblayage de la couche de sol. Pour l'obtention de la saturation effective du sol, il est possible de procéder à l'alimentation, en eau, de la carte par une installation de pompage.

En fonction de la disposition des charges explosives par rapport à la surface libre du massif à consolider, on sera amené à définir les trois procédés de compactage suivants :

- Compactage par explosion superficielle ;
- Compactage par explosion immergée ;
- Compactage par explosion camouflée profonde.

3.1.1. Compactage par explosion superficielle

Pour le compactage du sol par explosion superficielle, les charges sont disposées à même le sol ou au niveau de la nappe phréatique. C'est seulement dans ces conditions qu'on obtiendra le compactage le plus efficace. Le défaut principal du compactage superficiel est sa faible efficacité par rapport au compactage profond par la même charge. Ceci s'explique par le fait qu'il se forme dans le sol une onde d'explosion de moindre intensité par suite du dégagement libre des gaz de l'explosion dans l'atmosphère. Les paramètres principaux de l'onde de choc telles que la pression maximale au front et son impulsion s'avèrent sensiblement plus petites que lors de l'explosion des

charges profondes. De ce fait, le rayon d'action et la profondeur de compactage diminuent. C'est pourquoi le compactage par charges superficielles est pratiquement utilisée pour les sols sans cohésion jusqu'à la profondeur de 2,5 - 3,0 m environ. Pour de plus grandes épaisseurs de sol à compacter le poids des charges augmente considérablement.

Par ailleurs, un autre défaut des explosions superficielles est la destruction de la continuité des couches supérieures du sol provoquée par la formation de cratères d'explosion. Bien que, lors du compactage des sols sableux meubles et saturés, le cratère se remplit immédiatement de sol liquéfié après l'explosion, la compacité du sable déposé peut être quelque peu plus faible. L'utilisation de séries successives d'explosions avec des charges décalées entraîne le compactage du sol dans la zone du cratère, mais une certaine différence dans les compacités, particulièrement dans les zones d'explosion des charges des dernières séries, demeure.

Pour le compactage par couches la nécessité d'un tel schéma de compactage s'exclut pratiquement en raison du recouvrement des zones de compactage par des couches de remblai suivantes. Les cratères formés lors du remblayage suivant seront remplis par le courant d'eau et de pulpe. Tout cela contribue à la réalisation d'un compactage uniforme des explosions superficielles. Comme l'ont montré les essais in situ (Kroutov, 1978), dans le cas de force de cohésion en présence, par exemple, dans les limons sableux, le cratère conserve sa stabilité et se remplit peu de sol liquéfié. Dans ces cas les explosions superficielles deviennent pratiquement irrationnelles.

3.1.2. Compactage par explosion camouflée profonde

Pour la consolidation des sols par explosion camouflée profonde, les charges sont placées à une profondeur telle, qu'elles ne créent pas de cratères d'explosion et n'engendrent pas de gonflement sensible de la surface du sol. Dans ce cas les défauts de compactage décrits ci-dessus sont exclus. Par ailleurs ce procédé peut s'effectuer par un ou plusieurs gradins.

3.1.3. Compactage par explosion immergée

Le compactage des sols par explosion immergée peut également être effectué selon deux schémas : pour des épaisseurs de sol relativement faibles et une grande profondeur d'eau, il s'effectue de manière à réaliser le camoufflage de l'explosion dans l'eau, ce qui contribue à éliminer tout cratère d'explosion, alors que pour des sols de grandes épaisseurs il s'avère nécessaire d'utiliser des charges de poids supérieur à l'optimum. Dans ce cas la condition de camoufflage de l'explosion dans l'eau ne pourra pas être respectée et l'onde de choc peut, par suite du dégagement rapide des gaz dans l'atmosphère, ne pas se développer pleinement, ce qui rend moins efficace l'effet de l'explosion. L'augmentation du poids de la charge entraîne également la diminution de la couche d'eau qui la recouvre, étant donné que pour éliminer tous cratères d'explosion, il est nécessaire de disposer la charge à une grande hauteur de la surface du sol. C'est pourquoi dans ce cas une augmentation ultérieure du poids de la charge peut ne pas entraîner l'augmentation de la profondeur de traitement de la couche de sol.

Si le sol est remblayé hydrauliquement, on peut passer au compactage par couches du sol par explosion immergée. De ce fait différents schémas de compactage peuvent être proposés en fonction des conditions locales. Ainsi, pour le compactage d'une couche de grande épaisseur on peut, à part les explosions profondes à un gradin (fig. 2a), utiliser des explosions à plusieurs gradins (fig. 2b et 2c). Dans le dernier cas on peut utiliser les procédés de « destruction de la structure par couche » si on effectue l'explosion des charges du gradin supérieur avant celles du gradin inférieur.

Dans le cas de l'érection progressive de la couche par remblayage hydraulique, remblayage dans l'eau ou saturation artificielle, différentes variantes de compactage par couches de la couche érigée (fig. 2d,e,f,g) sont possibles avec l'utilisation d'explosions profondes (fig. 2c), immergées et superficielles (fig.

2d) ou leur combinaison (fig. 2e et 2f). L'épaisseur des couches à compacter peut être différente et est déterminée par le procédé utilisé. Le nombre de charges, la quantité de fil de détonation, la longueur du réseau d'explosion et la multiplicité des travaux augmentent avec l'augmentation de la masse des charges aussi bien pour le compactage de toute la couche à la fois que pour celui du compactage par couches. De même la durée des travaux s'allonge. Le coût du fonçage des charges profondes dans le sol augmente avec l'augmentation de leur masse, mais les délais d'exécution des travaux diminuent et l'organisation des travaux se simplifie. Pour le compactage par couches à l'aide de charges plus petites la fréquence des actions d'explosion dans chaque zone augmente. C'est pourquoi dans chaque projet de compactage il convient d'examiner un certain nombre de variantes et procéder à une comparaison technico-économique de celles-ci pour obtenir la meilleure solution.

C'est le nombre de séries d'explosion qui détermine le caractère de la variation de la compacité du sol. En augmentant celui-ci, on augmente le tassement et la compacité du sol. Par ailleurs, on peut conduire le processus du compactage du sol par la variation des intervalles entre les explosions. Lors de l'explosion des charges d'une série avec un intervalle de temps (t_{int}) supérieur au temps de compactage (t_{comp}) de la série précédente, on observe une certaine diminution de la compacité acquise dans les limites de h_{comp} dans une couche de sol ayant une compacité initiale identique. Dans ce cas l'inégalité de la variation de la compacité selon la profondeur est d'autant plus grande que t_{int} est plus petite. Il convient également de tenir compte du fait que pour $t_{int} < t_{comp}$, le rayon d'action et la profondeur de compactage de la série suivante d'explosions croissent, mais le degré de compactage général de la couche de sol diminue.

3.2. Principales recommandations pour le calcul, la projection et la technologie de compactage des territoires par explosion

Pour établir le projet de compactage du sol, il est nécessaire d'avoir le plan et la coupe géologique du terrain à compacter, ainsi que le niveau de la nappe aquifère, le degré de compactage à réaliser (compacité initiale et compacité moyenne exigée), les résultats des essais d'explosion isolés ou groupés. Dans le cas où on ne dispose pas de données d'essais expérimentaux, le projet de compactage s'établit directement sur le chantier selon les résultats des explosions effectuées avant le début des travaux ou pendant le processus de l'exécution de ceux-ci.

La détermination de la masse optimale de la charge pour le compactage par explosion immergée s'effectue de manière telle qu'elle ne provoque pas de cratères d'explosion et assure un camoufflage maximum de la charge dans l'eau, c'est-à-dire des conditions d'obtention de la couche d'eau nécessaire au-dessus de la charge.

La masse de la charge optimale assurant ces conditions est donnée par la formule:

$$C = K_1 H^{\beta_1} \quad (1)$$

où H - profondeur de l'eau en m; K_1 et β_1 - coefficients empiriques, pour les sols sablo-graveleux et les gravillons on a: $K_1 = 0,10$ et $\beta_1 = 2,40$

Ici et plus loin tous les coefficients empiriques sont donnés dans le cas d'utilisation de la substance explosive étalon l'amonite 6JV. Dans le cas d'utilisation d'autres types d'explosifs, la masse de la charge doit être déterminée comme suit:

$$C_c = K_c C \quad (2)$$

où C - masse de la charge d'amonite 6JV; C_c - masse de la charge en d'autres types d'explosifs; K_c - coefficient de conversion variant de 0,8 à 1,3 [5] pour laplupart des explosifs.

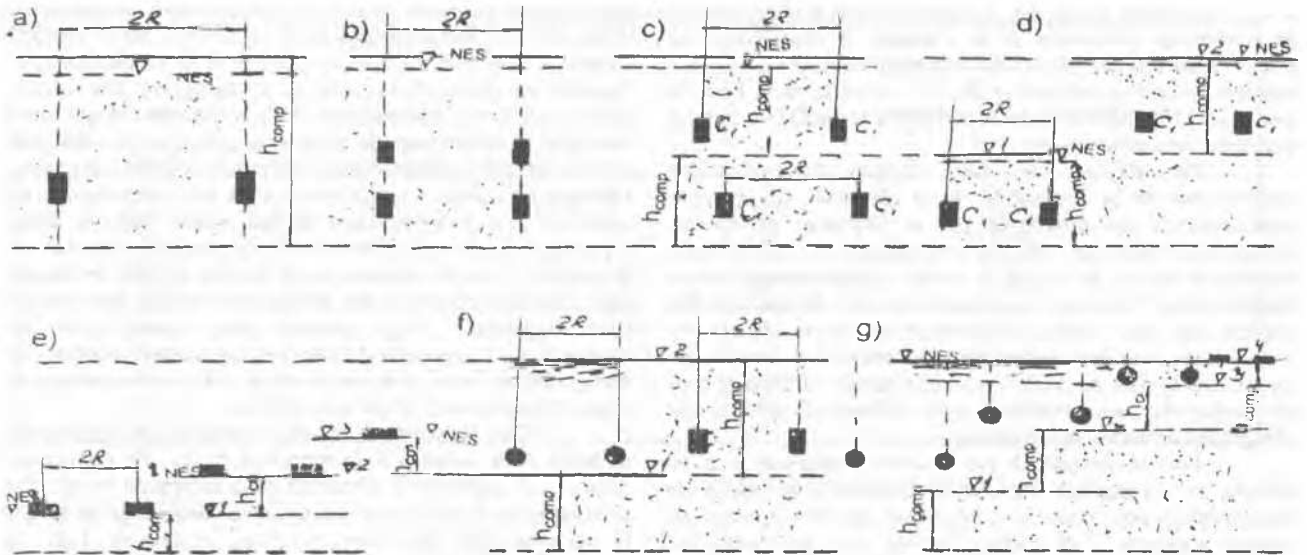


Figure 2 : Différents schémas de compactage des territoires en sols peu cohérents saturés : a - explosions profondes à un gradin ; b - explosions profondes à deux gradins avec explosion simultanée de toutes les charges ; c - explosions profondes à deux gradins avec l'explosion des charges du gradin inférieur immédiatement après celle des charges du gradin supérieur (« destruction de la structure par couches ») ; d - explosions profondes dans le cas de l'érection de l'ouvrage par couches ; e - explosions immergées dans le cas de l'érection de l'ouvrage par couches ; f, g - combinaisons possibles des explosions immergées, profondes et superficielles dans le cas de l'érection de l'ouvrage par couches sous l'eau

La position de la charge au-dessus de la surface du sol assurant l'absence de cratère est déterminée par la relation:

$$\Delta h = K_2 \left(\sqrt[3]{C} \right)^{\beta_2} \quad (3)$$

où K_2 et β_2 sont des coefficients empiriques; pour les sols sablo-graveleux et les gravillons on a: $K_2 = 0,35$ et $\beta_2 = 1,95$.

La profondeur d'eau assurant le camouflage de la charge est déterminée par la relation:

$$h_c = 2,3 \sqrt[3]{C} \quad (4)$$

Pour le compactage par explosions profondes d'une couche de sol saturé sans cohésion, la masse et la profondeur de la charge

permettant l'absence de cratères et de fissures (explosion camouflée) sont déterminées par les relations:

$$C = 0,055h^3 \quad (5)$$

Dans le cas de la présence d'une charge constituée par une couche imperméable de sol (d'épaisseur supérieure à 0,3 m) ou de couches de sol sensiblement différent des sols d'un remblai par la masse volumique du squelette $\rho_s = 2 \text{ g/cm}^3$ (par exemple la vase, les argiles denses, etc.), il convient de prendre la profondeur ci-dessous au lieu de la profondeur réelle par la relation (5):

$$h_r = \frac{h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2 + \dots + h_n \rho_n}{\rho_s}$$

où h_1, h_2, \dots, h_n - épaisseurs des couches de sol imperméable, vases et autres; ρ_1, ρ_2 - masses volumiques des mêmes sols; ρ_s - masse volumique des sols sableux saturés, prise égale à 2 g/cm^3

Pour le compactage par explosion superficielle de sols sableux, la masse de la charge est prise en fonction de l'épaisseur de la couche à compacter et se détermine par la relation:

$$C = 0,58h_{comp}^3 \quad (6)$$

où h_{comp} - épaisseur de la couche à compacter en mètres.

Pour des valeurs optimales de la masse de la charge déterminée par les relations (1), (5) et (6), la profondeur de compactage effectif du sol peut être déterminée par les relations suivantes :

-cas d'explosions immergées :

$$h_{comp} = 1,8 \sqrt[3]{C} \quad (7)$$

cas d'explosions profondes

$$h_{comp} = 3,9 \sqrt[3]{C} \quad (8)$$

- cas d'explosion superficielles:

$$h_{comp} = 1,2 \sqrt[3]{C} \quad (9)$$

Il convient de prendre la distance entre les charges égale à deux fois le rayon d'action. Au delà de cette distance on prend la moitié de la distance entre les charges pour laquelle on obtient un compactage suffisamment uniforme du sol.

Le rayon d'action est déterminé par les relations:

- pour les explosions immergées:

$$R = 2 \sqrt[3]{C} \quad (10)$$

-pour les explosions profondes

$$R = K_3 \sqrt[3]{C} \quad (11)$$

où k_3 - coefficient empirique pris égal à 3 pour les sables moyens saturés et 4,5 pour les sables fins.

-pour les explosions superficielles:

$$R = (0,5 - 0,6) K_3 \sqrt[3]{C} \quad (12)$$

Dans les relations (11) et (12), on prend les valeurs minimales de k_3 qu'on précise par la suite à partir des résultats des premières explosions. La disposition des charges en plan doit se faire conformément au plan du terrain à compacter (Fig.3). Pour l'accomplissement d'une série d'explosions successives et pour une bonne uniformité du compactage du sol, les charges de la série doivent être disposées à une distance égale au rayon d'action de l'explosion de la charge de la série précédente (Fig.3). On détermine le nombre de séries d'explosions par voie expérimentale selon les résultats d'essais au choc-compression (Diané & Diané, 1999) ou d'essais d'explosion et de sorte qu'on obtienne des tassements donnés pour un nombre minimum de séries d'explosions. Le tassement nécessaire de la surface du sol est déterminé par la relation:

$$S = h_{comp} \frac{\epsilon_i - \epsilon_f}{1 + \epsilon_i} \quad (13)$$

où h_{comp} - profondeur de compactage donnée; ϵ_i et ϵ_f - indices des vides initial et exigé après le compactage.

Ayant les données des essais de choc-compression et celles relatives au tassement du sol pendant les essais d'explosion expérimentaux, on peut choisir le nombre nécessaire d'essais d'explosions sur le territoire de sorte que le tassement moyen de l'explosion dans les limites du rayon d'action soit égal à celui donné par la relation (13). Le nombre maximum de charges explosant simultanément est déterminé par le nombre de charges mises en place et les règles de sécurité du travail. Lors de l'explosion simultanée d'un groupe de charges formant un contour fermé, les ondes d'explosion entraînent l'augmentation de la pression interstitielle dans la zone de compactage. Suivant les distances et le phénomène de propagation des ondes, il se produit dans chaque point du milieu une série d'ondes d'explosion dont les effets sur le territoire compacté, peuvent s'additionner. Les ondes d'explosion suivantes se produisent dans le sol dont la structure se trouve ainsi remaniée par la première onde d'explosion, ce qui contribue encore à une plus grande destruction de la structure et à une plus grande consolidation ultérieure du sol. De ce fait lors de l'explosion d'un groupe de charges situées à la distance de $2R$ les unes des autres, il ne se produit pas de diminution de la profondeur de la zone de consolidation même si on augmentait la distance entre les charges. Dans ce cas on prend comme rayon d'action de la charge la moitié de la distance maximale entre les charges (R) pour laquelle il se produit une consolidation suffisamment uniforme du sol. La profondeur de la variation uniforme de la compacité du sol après l'explosion sera la profondeur de consolidation effective h_{comp} .

Le temps de compactage de la couche de sol après l'explosion est essentiellement déterminé par l'épaisseur de celle-ci, la variation de la compacité et le coefficient de filtration du sol. Dans les limites des sols d'alluvions et des limons, le temps de consolidation des couches d'épaisseur 5-10 m peut varier de quelques secondes à des dizaines d'heures. Dans le cas des couches de sol non chargées, h_{comp} peut être déterminé par les formules (14), (15) (Diané & diané, 1999) et autres, en fonction de la structure et des caractéristiques des massifs à compacter.

$$r_1 = k_1 \frac{\gamma_{susp}}{\gamma} t \frac{1 - n_1}{n_1 - n_2} \quad (14)$$

$$t_f = \frac{n_1 - n_2}{1 - n_1} \frac{\gamma}{\gamma^2_{susp}} \frac{q}{k} \left(1 + \frac{\gamma_{susp} h}{q} - \sqrt{1 + \frac{2h\gamma_{susp}}{q}} \right) \quad (15)$$

où K_1 - coefficient de filtration du sol avant la destruction de sa structure ;

r_1 - épaisseur de la couche de sol redéposée ;

γ et γ_{susp} - poids volumique de l'eau et du sol en suspension dans l'eau respectivement.

q - intensité de la charge agissant sur la couche de sol.

Pendant l'expérimentation de l'explosion, le temps de consolidation t_{comp} est déterminé selon les résultats de mesure du tassement du sol en fonction du temps. La mise en place des charges devient plus compliquée et plus chère avec l'augmentation de la profondeur de compactage et, par conséquent, leur masse. C'est pourquoi, lors du compactage par explosions profondes de couches de sol de grandes épaisseurs il peut paraître plus rationnel de disposer des charges plus petites en un certain nombre de gradins en profondeur. Dans ce cas, la distance entre les charges diminue et par conséquent le nombre de

chargements augmente. Le passage ou non au compactage par

gradin est déterminé par la comparaison technico-économique des

variantes et les possibilités des installations de mise en place des

charges disponibles. Généralement ce passage est à envisager pour des

profondeurs de compactage supérieures à 7-10 m.

Si on utilise la disposition des charges en plusieurs gradins, il convient d'effectuer simultanément l'explosion des charges de tous les gradins. Dans ce cas, il est possible de procéder au déchargement du sol par l'enlèvement de la couche supérieure (« procédé de destruction par couches de la structure du sol »). On fait alors exploser d'abord les charges du gradin supérieur, ce qui provoque la destruction partielle de la structure de la couche supérieure du sol à la profondeur h_{comp} . De ce fait, le poids propre de la couche supérieure du sol n'est pas transmis au squelette de la couche inférieure et les contraintes de compression en son sein diminuent substantiellement, empêchant ainsi la destruction de la structure pendant l'explosion. C'est pourquoi, immédiatement après l'explosion des charges du gradin supérieur, on fait exploser celles du gradin inférieur, mais pas plus tard que dans l'intervalle de temps $\Delta t = 0,8 t_{comp}$. La masse (C') et le rayon d'action (R') des charges du gradin supérieur sont déterminés par les relations (5) et (11). Ceux du deuxième gradin sont pris de la même manière. La profondeur de disposition des charges du deuxième gradin est $h'' = 2h'$ et la profondeur totale de compactage est $h_{comp} = (2,3-2,4)h'$. Dans le cas de l'explosion de séries de charges décalées, il est nécessaire de conserver la disposition des charges et du réseau d'explosion de la série postérieure. Pour cela il faut établir les charges des différentes séries à des distances supérieures à $(0,3-0,2)R$ l'une de l'autre. Le même schéma est valable pour le cas d'explosion de charges du gradin supérieur avant celles des charges du gradin inférieur, comme par le procédé de (« destruction de la structure par couches »).

Pour le compactage par explosion immergée, la possibilité d'utilisation des charges de masse optimale est déterminée par la profondeur exigée de compactage du sol (7) et la profondeur de l'eau (4). A partir de la profondeur exigée de compactage, la masse de la charge doit être déterminée selon la relation (7). Dans le cas de grandes profondeurs d'eau, il peut être rationnel d'augmenter la masse de la charge jusqu'à la valeur optimale déterminée par la relation (1), ce qui conduit à l'augmentation du rayon d'action (10). Pour une profondeur d'eau insuffisante ou une grande épaisseur de la couche de sol à compacter, il est possible de prendre des charges de masse supérieure à l'optimale. Pour une diminution substantielle de la profondeur de l'eau, l'explosion immergée se rapproche, par l'effet de son action, de l'explosion superficielle. Avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche à compacter et la

diminution de la profondeur de l'eau, il peut être plus rationnel de passer au compactage par explosion profonde.

Par ailleurs, la mise en place d'un groupe de charges dans l'eau est réalisé par l'installation préalable d'une bouée d'amarrage tout autour du territoire à compacter. Les bouées sont alors reliées entre elles par des câbles en acier portant des marques. Les câbles opposés sont reliés entr'eux par des câbles transversaux en acier suivant les marques ou des câbles en chanvre portant des flotteurs à la distance de 2R pour la suspension des charges. Celles-ci sont suspendues aux marques au-dessus du sol, à la hauteur du projet. Dans le cas de présence de courant d'eau, la fixation des charges est réalisée à l'aide de poids fixés aux charges et reposant sur le sol.

La construction et la forme de la charge dépendent du procédé de compactage du sol, du type de l'explosif et de la méthode de son fonçage dans le sol (1962a, b). Pour le compactage par explosion profonde on utilise le plus souvent des charges de forme cylindrique dont la hauteur ne dépasse pas trois-quatre fois le diamètre. La préparation des charges en substances hygroscopiques nécessite leur hydroisolation.

La fabrication des charges utilisées dans l'explosion immergée est identique à celle des charges de l'explosion profonde; cependant il n'y a pas la nécessité d'obtenir une forme parfaite de la charge. Ainsi les charges en trotyle granulé et en amonite imperméable à l'eau peuvent être enveloppées dans des sacs en plastique tandis que pour les charges en substances hygroscopiques, on peut utiliser n'importe quel emballage hydroisolant.

Les charges superficielles doivent être faites, de préférence, en substances les moins chères possible avec l'utilisation d'emballages souples. L'hydroisolation des surfaces de la charge attenantes à l'eau est réalisée avec n'importe quelle matière hydroisolante. La forme de la charge doit assurer une forte adhérence à la surface du sol pendant que sa largeur doit être supérieure à sa hauteur.

3.3. Evaluation de la méthode de compactage des territoires en sols peu cohérents par explosion.

L'analyse générale du coût du compactage par explosion des sols peu cohérents est très difficile en raison du fait qu'elle dépend de plusieurs facteurs locaux variables tels que l'étendue du territoire, la profondeur de compactage, le degré de compactage exigé, la variante de compactage adoptée et autres. C'est pourquoi dans chaque cas seule la comparaison technico-économique des différentes variantes de compactage basée sur la solution optimale permet d'aboutir à des résultats concluants. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître la surface du territoire à compacter (F), la profondeur de compactage du sol (h), le nombre (N), le poids (C) et le rayon d'action (R) des charges, la productivité des installations de mise en place des charges.

Le nombre total des charges est déterminé par le degré de compactage exigé et la surface du territoire à compacter. Selon le nombre de séries d'explosions donné, on peut prendre les schémas de disposition des charges suivants (Fig. 4) : Dans le premier schéma où le compactage s'effectue par une série d'explosions, les charges sont disposées au centre de chaque carré de côté égal à 2R (Fig. 4a) et le nombre de charges est

$$N = \frac{F}{F_{comp}} \quad (16)$$

où F - surface à compacter et F_{comp} - surface compactée par une charge, égale à $4R^2$.

Pour le compactage par deux séries d'explosions (Fig. 4b), le nombre total de charges sera de :

$$N = \frac{2F}{F_{comp}} + \frac{S}{4R} + 1 \quad (17)$$

où S - périmètre du territoire à compacter.

Quand le compactage s'effectue par trois séries d'explosion, les charges peuvent être disposées, soit par le schéma de la figure (4c), soit par celui de la figure (4d); dans ces cas le nombre de charges est déterminé par:

cas de la figure (4c):

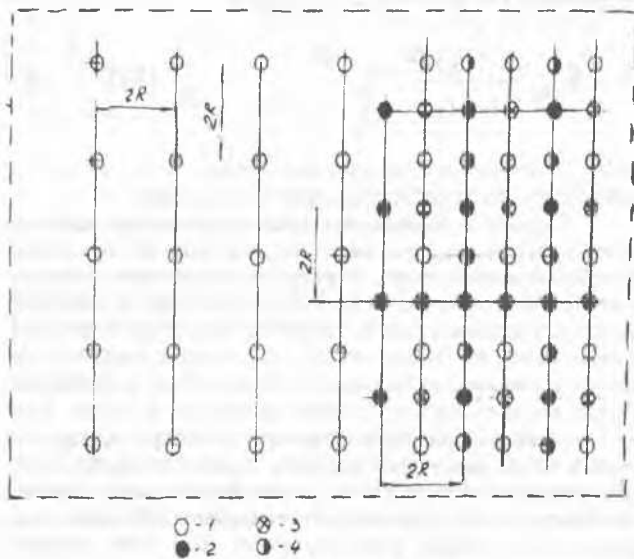


Figure 3. Exemples de disposition des charges des première (1), deuxième (2), troisième (3) et quatrième séries de charges (4) en plan.

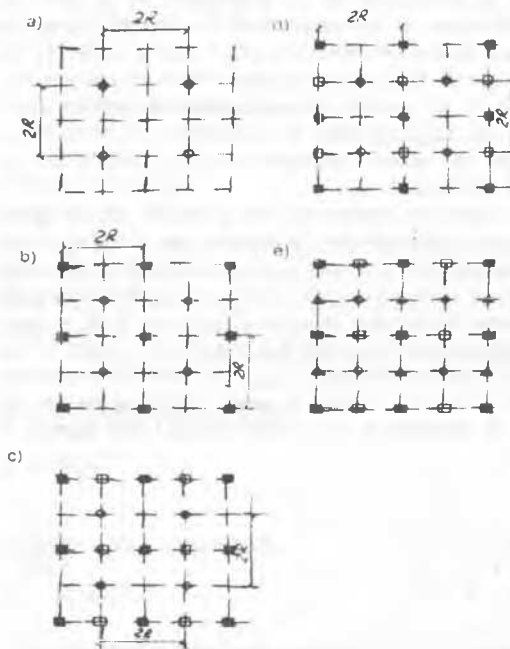


Figure 4 : Disposition des charges pour les première (a), deuxième (b), troisième (c et d) et quatrième (e) séries de charges.

$$N = \frac{3F}{F_{comp}} + \frac{S+H}{4R} + 1 \quad (18)$$

- cas de la figure (4d)

$$N = \frac{3F}{F_{comp}} + \frac{S+V}{4R} + 1 \quad (18')$$

où H et V - longueurs des limites horizontale et verticale du territoire respectivement

Pour le compactage par quatre séries (Fig. 4e) le nombre total de charge se détermine par la relation :

$$N = \frac{4F}{F_{comp}} + \frac{S}{2R} + 1 \quad (19)$$

$$F_{comp} = 2R$$

Le poids de la charge et son rayon d'action sont déterminés par les relations (5) et (11) en fonction de l'épaisseur de la couche de sol à compacter. La consommation de fil de détonation se détermine en fonction du type de la liaison des charges entre elles. Pour une liaison en parallèle elle se détermine comme suit:

$$L = N(\alpha_3 a + \alpha_4 l_s) \quad (20)$$

où N - nombre de charges; α_3 - coefficient de sécurité tenant compte de la consommation de fil de détonation de la ligne principale ($\alpha_3 = 1,1$); a - distance entre les charges en mètres; α_4 - coefficient de sécurité tenant compte de la consommation de fil de canalisation des lignes d'embouts ($\alpha_4 = 1,2$); l_s - distance entre la surface du sol et la tête de la charge.

Ayant déterminé la consommation en matériaux d'explosion et les frais de main d'oeuvre, on peut déterminer le coût du compactage des sols peu cohérents saturés. Ainsi la comparaison des coûts pour le compactage profond de trois superficies différentes; 5 000, 20 000 et 500 000 m² a montré que dans tous les cas le coût de compactage d'un mètre cube de sol diminue avec l'augmentation de la surface ou du volume du sol à compacter et, par conséquent, de la masse des charges. Le rayon d'action augmente et le nombre de charges diminue avec l'augmentation de la masse de la charge; ce qui, à son tour, entraîne la diminution de la consommation de fil de détonation et d'électrodétonateurs. La profondeur de compactage augmente également avec l'augmentation de la masse de la charge et la consommation spécifique en explosifs reste constant

La comparaison des coûts de compactage par explosion superficielle, immergée et profonde (Fig. 5) a abouti à la conclusion selon laquelle dans tous les cas l'augmentation de la profondeur de compactage ou de la masse de la charge entraîne la diminution du coût du compactage spécifique du sol (Fig. 6). La consommation en explosifs pendant ce temps reste constante, mais différente pour les trois procédés de compactage. On obtient la plus grande consommation spécifique en explosifs

pour l'explosion superficielle et la plus petite pour l'explosion profonde. Ceci s'explique essentiellement par la plus grande utilisation de l'énergie de l'explosion lors de l'explosion profonde comparativement à celle immergée et, à plus forte raison celle superficielle. La comparaison des coûts de compactage des différents procédés montre que pour de petites profondeurs de compactage le procédé le plus économique est l'explosion superficielle, suivie de l'explosion immergée. Par contre, pour de grandes profondeurs le procédé le plus

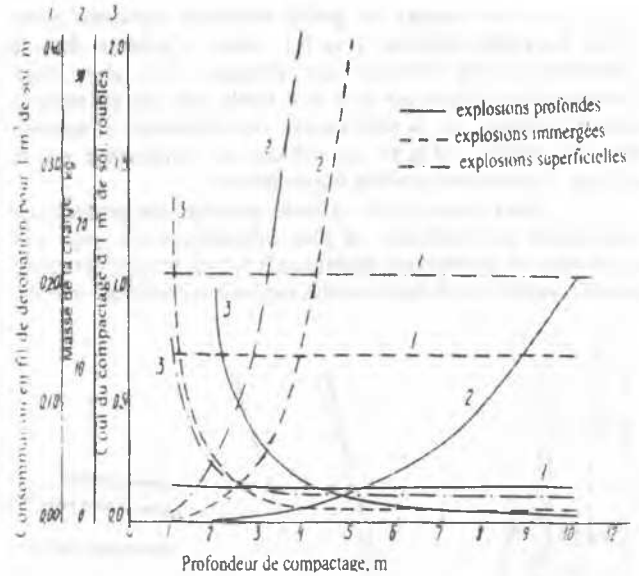


Figure 6 : Variation du coût de compactage d'1 m³ pour les différents schémas de compactage

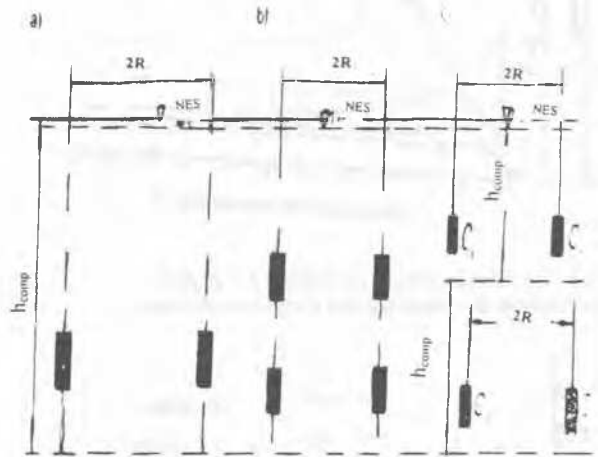


Figure 7 : Différents schémas de compactage du sol par explosions profondes: a - à un gradin, b - à deux gradins avec explosions simultanées; c - à deux gradins avec le gradin inférieur explosant immédiatement après l'explosion du gradin supérieur

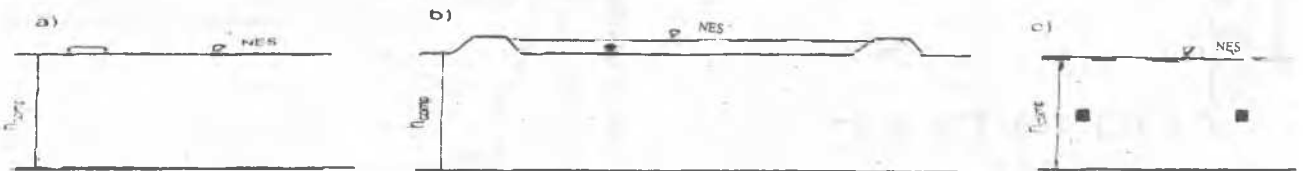


Figure 5 : Différents schémas de compactage d'une couche de sol peu cohérent saturé de faible épaisseur: a - explosion superficielle; b - explosion immergée; c - explosion profonde

économique est l'explosion profonde. Il convient de remarquer que pour des profondeurs de compactage supérieures à 4-6 m les coûts de compactage par tous les trois procédés sont proches et varient dans les limites de 0,05 à 0,15 roubles/m³.

Par ailleurs, on a examiné trois schémas de compactage d'une couche de sol d'épaisseur variant de 8 à 30 m par explosions profondes: schéma 1 (Fig. 7a)- compactage par un seul gradin de charges; schéma 2 et 3 (Fig.7b et c) - compactage par deux gradins de charges avec les charges explosant en même temps (Fig. 7b) et les charges du gradin supérieur explosant avant celles du gradin inférieur (Fig.7c), selon le schéma de « la destruction de la structure par couches ». La plus petite consommation d'explosifs et le plus faible coût ont été obtenus pour le schéma 1 et la plus grande consommation d'explosifs pour le schéma 2 (Fig.8). Le procédé du compactage par le schéma 3 occupe une position intermédiaire.

Ainsi de toutes les variantes possibles des procédés de compactage par explosion, la plus économique est, pour une profondeur de compactage supérieure à 5-6 m, le compactage de grandes superficies de terre par des explosions profondes isolées.

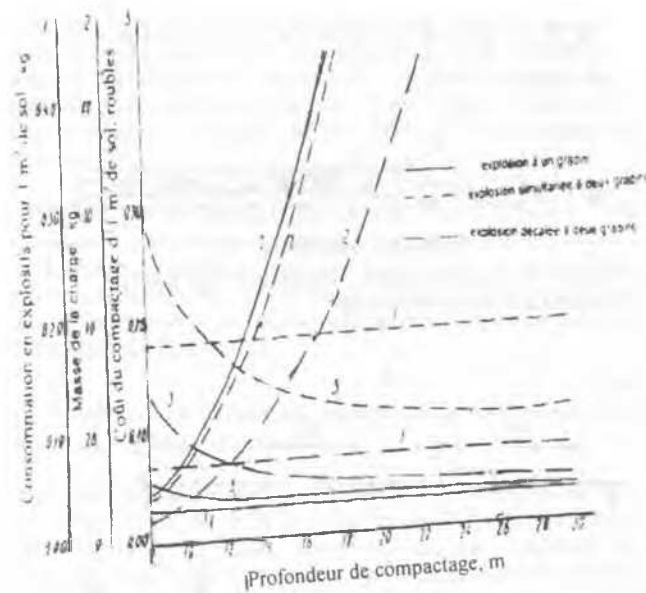


Figure 8 - Variation du coût de compactage d'1 m³ pour les trois schémas de compactage par explosions profondes.

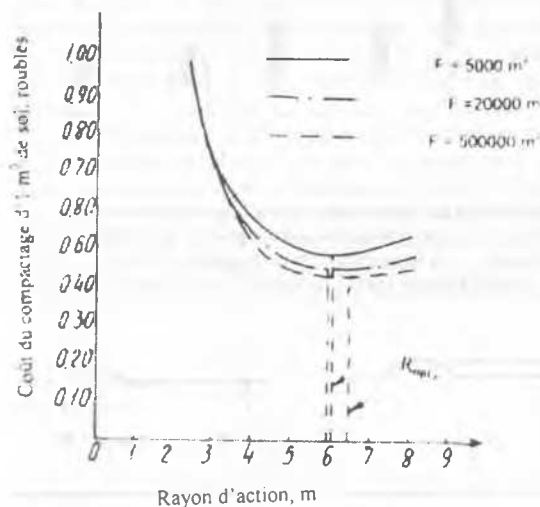


Figure 9: Variation du coût de compactage d'1 m³ de sol par explosions profondes

Cependant, la différence des coûts de compactage par explosions isolées profondes et immergées n'est pas grande. Il convient cependant de tenir compte du fait que de telles explosions immergées exigent de grandes profondeurs d'eau et que l'explosion superficielle est peu recommandable par suite de la formation d'importants cratères d'explosion.

L'analyse du coût du compactage par explosion est faite dans l'hypothèse que la profondeur de compactage varie selon la masse de la charge donnée. S'il faut faire l'analyse à partir d'une valeur donnée de la profondeur de compactage (h_{comp}), on peut trouver la masse de la charge la moins chère, c'est-à-dire la masse optimale de la charge et le rayon d'action optimum correspondant R_{opt} (Fig. 9, 10, 11) pour toutes les variantes de disposition de la charge; dès lors on peut déterminer la masse optimale de la charge selon le coût de compactage C_{opt} par les relations (10), (11) et (12).

Ainsi pour des profondeurs de compactage relativement petites (inférieures à 3-7 m), il est économiquement plus avantageux d'effectuer le compactage, non pas avec les masses de calcul (c), mais avec les masses optimales (C_{opt}) des charges. En d'autres termes, dans ce cas une certaine augmentation de la consommation spécifique en explosifs (h_{comp}) s'avère moins coûteux que les dépenses relatives à la mise en place des charges, à l'installation et à l'équipement par les moyens d'explosion plus petits obtenus par les formules (10), (11) et (12).

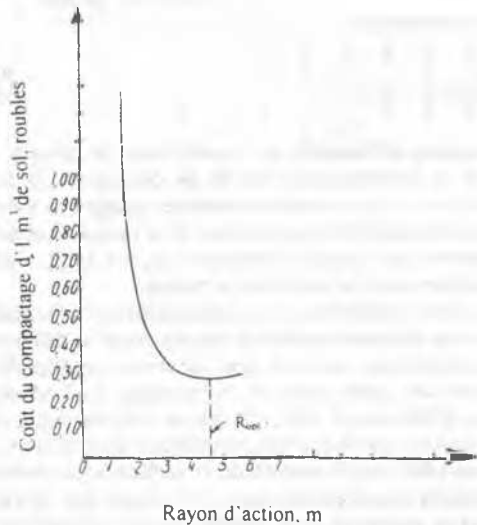


Figure 10 - Variation du coût de compactage d'1 m³ de sol par explosions immergées.

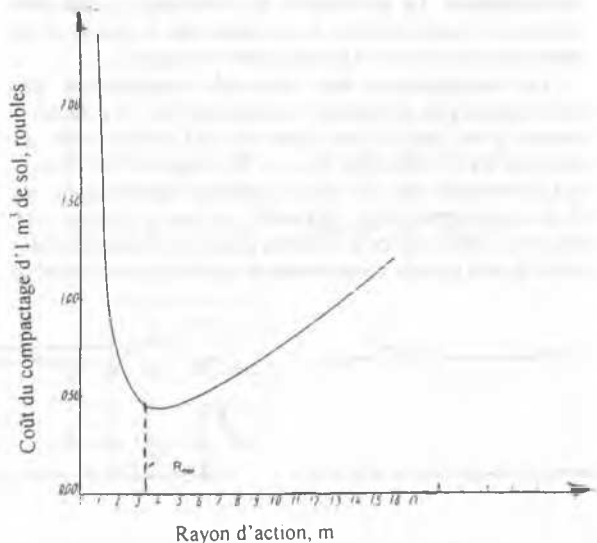


Fig. 11 : Variation du coût de compactage d'1 m³ de sol par explosions superficielles

4. CONCLUSIONS

1. La comparaison de la méthode de compactage par explosion avec d'autres méthodes de compactage profond montre sa grande compétitivité et ses perspectives d'utilisation dans les domaines de construction hydrotechnique et autres.

2. Les principaux schémas technologiques de compactage des territoires en sols peu cohérents par explosions superficielle, immergée et camouflée profonde, ainsi que les principales recommandations relatives au compactage par explosion ont été élaborées. Il en est de même de la méthodologie de prévision du degré de compactage et de l'évaluation de la durée de compactage.

3. Par la comparaison technico-économique des différents procédés de compactage des territoires par explosion on a circonscrit le domaine de leur utilisation, montré l'accroissement de l'efficacité économique de la méthode avec l'augmentation de la surface et du volume du sol à compacter et donné les valeurs des masses optimales des charges d'après le coût de compactage.

POSTFACE

Le présent travail est le fruit d'un séjour de deux ans à la chaire de Mécanique des Sols et Fondations de l'Université d'Etat de Technologie de Saint Petersburg. Feu Prof. P.L. Ivanov, alors chef de ladite chaire dirigeait les recherches sur la consolidation des sols sans cohésion par explosion. Grâce à sa grande compréhension, le premier auteur eut l'occasion de réaliser cette étude autant en laboratoire que sur la base des rapports de recherche produits par la chaire.

BIBLIOGRAPHIE

Dembiski N., Kisielowa N., Nowakowski N. et Osiecimski N. (1980) Compactage des fonds marins sableux à l'explosif, *Colloque International sur le Compactage*, Vol. 1, Paris, Avril, pp. 301-305

Diané M.S. & Diané S (1999)., Liquéfaction et consolidation des sols sableux sous l'action des charges dynamiques, dans « Geotechnics for Developing Africa », *Proceedings of the 12th Regional Conference for Africa on soil mechanics and geotechnical engineering*, Durban, South Africa, 25 - 27, pp. 527-537.

Florin V.A (1951). : De la liquéfaction des sables fins propres saturés, *Gidrotechnicheskoe stroitelstvo*, N° 7, PP. 34-36.

Goldchtéin M.N. (1952) : Liquéfaction l'instantanée du sable. *Gidrotechnicheskoe stroitelstvo*, N°8, pp. 30-33

Goldchtéin M.N. (1953) : Liquéfaction instantanée du sable (en russe), dans « problèmes de géotechnique ». DIIT, Vol. I, pp. 5-41.

Ivanov P.L : (1962), Consolidation des sols sans cohésion par l'explosion (en russe), M - L., *Gosenergoizdat*, 260 pp.

Ivanov P.L. (1962), Liquéfaction des sols sableux (en russe). M - L., *Gosenergoizdat*, 260 pp.

Ivanov P.L. 1967), Consolidation des sols sableux par explosion (en russe) - M-L., *Citroizdat*, 171 pp.

Kroutov A.P. (1978), Consolidation des sols peu cohérents saturés par l'explosion (en russe), *thèse de doctorat es sciences techniques*, L. 230 pp.

Maslov N.T. (1959), Conditions de stabilité des sables saturés (en russe), M-L *gosenergoizdat*, 327pp