

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.

Contrôle de la compacité d'un remblai en cendres volantes

Check of the compacity of a fly ash embankment

A. DE HENAU, Chef de Service, Centre de Recherches Routières, Bruxelles, Belgique

M. THIJS, Chercheur-assistant, Centre de Recherches Routières, Bruxelles, Belgique

RESUME

Les cendres volantes, résidus captés dans les fumées des centrales électriques alimentées au charbon, appartiennent à la catégorie des matériaux qui présentent un danger de liquéfaction en masse, dans certaines conditions de sollicitation et de saturation quand ils sont mis en remblai insuffisamment compactés.

La compacité critique au-delà de laquelle la liquéfaction est peu probable, se détermine par des essais triaxiaux en laboratoire, qui ne permettent pas de suivre les cadences rencontrées sur un chantier.

La présente communication propose une méthode rapide basée sur l'essai de cisaillement direct pour situer la compacité atteinte sur chantier par rapport à la compacité critique sans en connaître la valeur exacte.

MISE EN REMBLAI DES CENDRES VOLANTES

En Belgique, les centrales électriques thermiques utilisant de la houille pulvérisée comme combustible emportent dans leurs fumées des cendres volantes silico-alumineuses qui ont des propriétés intéressantes pour la construction.

Cependant, mises en remblai, les cendres volantes peuvent présenter un danger d'instabilité par mise en liquéfaction du massif dans certaines conditions de saturation, de compactage insuffisant et de sollicitation (Calembert, Dantinne, 1964; Goelen, 1982; Thijs, 1984).

Ces cendres volantes se présentent comme un matériau pulvérulent à granulométrie étroite (1-100 μm) à grains fins et arrondis (voir photo CRR n° 1790/10, Fig. 1).

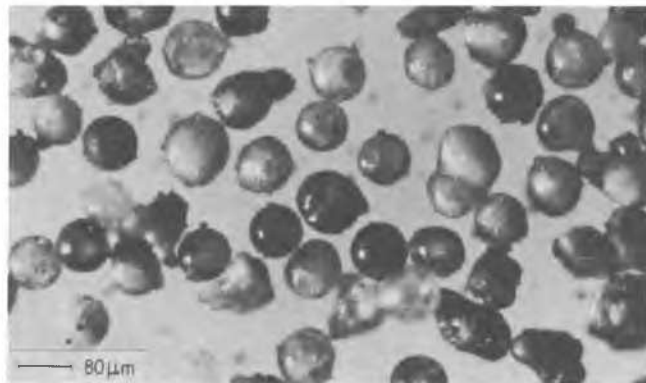


Fig. 1 Aspect corpusculaire des grains (fraction 75-90 μm).

Un cisaillement localisé dans un massif de cendres volantes insuffisamment compacté provoque un rapprochement des grains (voir $\Delta Z < 0$, Fig. 2) et tend à augmenter la pression interstitielle. Cette augmentation se propage dans la phase liquide en produisant un effet d'instabilité entraînant une mise en liquéfaction en masse.

Au contraire, dans un massif suffisamment compacté, le cisaillement provoque un écartement des grains avec une diminution de la pression interstitielle, ce qui produit un effet stabilisant.

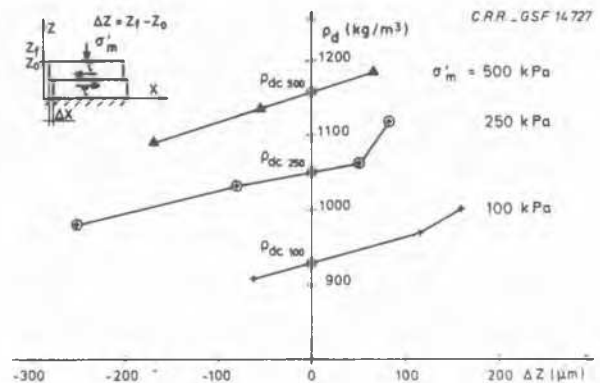


Fig. 2 Variation de volume au cours du cisaillement direct estimé par ΔZ en fonction de ρ_d et σ'_m .

Pour chaque état de contrainte (σ'_m) dans le massif, il existe une compacité critique pour laquelle le cisaillement se produit sans changement de volume (voir ρ_{dc} , Fig. 2).

Pour limiter les risques de liquéfaction dans les zones où le remblai peut être en contact avec l'eau, il est nécessaire de pousser le compactage du matériau au-delà de la compacité critique en chaque point. Mais en chaque point du massif la masse volumique ρ_{dc} correspondant à la compacité critique n'est pas connue. Elle dépend du matériau et de l'état de contrainte appliquée, comme l'ont montré De Beer et Winterkorn (De Beer, 1968; Winterkorn, 1971). Il est donc difficile d'établir un critère pratique sur cette base pour conduire un chantier.

CHOIX D'UNE METHODE DE MESURE

La masse volumique critique ρ_{dc} se détermine en laboratoire par des essais de cisaillement, dans une cellule triaxiale ou dans une boîte à cisaillement, sous une contrainte de consolidation σ'_m à choisir en fonction des caractéristiques intrinsèques du matériau, de son degré de saturation, de l'endroit considéré dans le remblai et d'une hypothèse relative à l'état des contraintes du matériau compacté dans le remblai.

En exprimant la contrainte effective moyenne σ'_m appliquée à un élément de volume situé à une profondeur h sous la surface du remblai en fonction de la contrainte effective verticale σ'_1 et en posant $\sigma'_2 = \sigma'_3$ dans le plan

horizontal, par $\sigma'_m = \sigma'_1 \frac{1+2K}{3}$ avec $K = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}$ variant de 1 à 3, on peut écrire :

$$\sigma'_m = \frac{1+2K}{3} \left[\rho_d + \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \cdot \rho_w \cdot S_r \right] g \cdot h = A \cdot h \quad (1)$$

avec :

ρ_s = masse volumique des grains,

ρ_d = masse volumique du matériau sec compacté,

ρ_w = masse volumique de l'eau,

S_r = degré de saturation,

g = accélération de la pesanteur,

h = hauteur du remblai au-dessus du point considéré.

On voit que le choix de σ'_m pour déterminer ρ_{dc} par un essai de cisaillement dépend donc du choix de K et de ρ_d à atteindre sur chantier tel que $\rho_d > \rho_{dc}$.

On a choisi comme valeur de ρ_d la valeur de ρ_{dOPM} résultant de l'essai Proctor Modifié, valeur généralement accessible en pratique sur chantier. Ce choix est justifié par le Tableau I qui donne des valeurs comparées de ρ_{dc} et ρ_d maximum de l'essai Proctor Modifié (Thijs, 1984).

TABLEAU I

Variation de ρ_{dc} / ρ_{dOPM}

pour différents échantillons de cendres volantes

Cendres volantes		σ'_m	ρ_{dc}	ρ_{dOPM}	ρ_{dc} / ρ_{dOPM}
Centrale	Année	(kPa)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)
A	1965	1000	1290	1330	97
A	1972	100	1260	1410	89
		500	1300	1410	92
		1000	1320	1410	94
A	1977	100	1190	1390	86
		1000	1300	1390	94
B	1977	300	1110	1140	97
B	1977	100	1010	1230	82
		300	1080	1230	88
C	1977	100	1160	1390	84
C	1981	250	1220	1330	92
D	1981	250	1380	1430	97
E	1981	250	1280	1370	93

Une étude, menée au Centre de Recherches Routières en Belgique, sur les cendres volantes de 10 centrales électriques a permis de mettre en évidence la variation des propriétés géotechniques de ces matériaux. Elles sont reproduites dans le Tableau III (Huet, Choquet, Verhasselt, 1981; Thijs, 1984).

Sur base de ces données et dans l'hypothèse où $K = 1$, puis $K = 3$, on a calculé respectivement les valeurs du facteur A dans (1) pour le matériau saturé $S_r = 1$.

On a trouvé :

TABLEAU II

Facteur A (kPa/m) dans la relation (1)

K	Cendres volantes n°									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	16,5	16,9	17,3	17,0	17,1	18,2	17,1	16,4	17,0	17,3
3	38,5	39,5	40,3	39,6	39,9	42,6	39,9	38,2	39,6	40,2

On constate que pour la base d'un remblai de 6 m de haut, par exemple, la contrainte de consolidation σ'_m varie entre 98 kPa = 16,4 x 6 et 255 kPa = 42,6 x 6 suivant le type de cendres considéré et la valeur du coefficient (K) choisie.

Une étude approfondie de deux des échantillons de cendres volantes considérés a montré la validité de la théorie de Winterkorn sur ce type de matériau (Dufrasne, 1984). On peut donc caractériser un échantillon de cendres volantes par une droite liant la contrainte de consolidation σ'_m à l'indice de vide critique $e_c = (\rho_s / \rho_{dc}) - 1$, et ainsi, ayant choisi une valeur pour σ'_m on peut en déduire ρ_{dc} correspondant.

Les modes opératoires pour estimer la masse volumique critique par un essai triaxial T ou de cisaillement direct D sont différents et ne conduisent pas a priori aux mêmes résultats. Néanmoins, comme le montre la Figure 3, réalisée pour $\sigma'_m = 250$ kPa sur quelques uns des échantillons étudiés, les écarts sont faibles.

Cependant, le cisaillement direct est beaucoup plus simple et rapide que l'essai triaxial. C'est pourquoi on a retenu le premier pour un contrôle pratique.

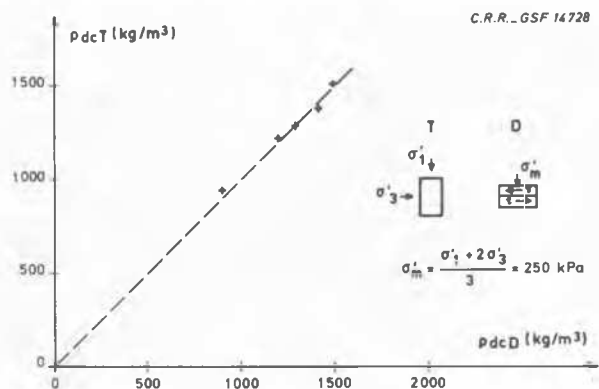


Fig.3 Comparaison de la masse volumique critique ρ_{dcT} par l'essai triaxial et ρ_{dcD} par cisaillement direct.

RESULTATS OBTENUS

Pour les 10 échantillons de cendres volantes étudiés on a déterminé la masse volumique ρ_{dc} à l'aide de l'appareil de Casagrande pour $\sigma'_m = 100$ et 500 kPa (voir Tableau IV). D'une part, on constate que, pour un même état de contraintes (σ'_m) la compacité critique varie en fonction des caracté-

TABLEAU III
Propriétés géotechniques des cendres volantes prélevées en 1979

Numéro de l'échantillon			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
PROPRIÉTÉS ÉTUDIÉES			Unité	RÉSULTATS DES ESSAIS									
Teneur conventionnelle en CaO libre		%	0,2	0	0	0,1	0,3	0	0,2	1,6	0	0,1	
Perte au feu		%	3,8	9,8	3,9	4,5	6,3	1,8	4,8	4,6	3,6	4,6	
Solubilité dans l'eau	après 1 extr.	%	1,1	0,4	1,1	0,8	1,1	0,6	0,8	2,0	0,9	0,7	
	après 5 extr.	%	2,6	0,8	1,4	1,8	2,2	0,9	1,9	3,6	1,8	1,4	
Composition granulométrique (refus)		%	0,8	0,4	0,5	1,4	1,1	0,5	0,8	0,7	0,4	2,9	
Par tamisage (mm)	0,177	%	9,5	8,5	8,2	13,2	13,4	7,6	10,0	5,4	4,1	13,5	
	0,075	%	14,0	11,5	13,0	17,5	17,0	13,0	13,5	9,5	6,5	19,0	
Par sédimentation (mm)	0,060	%	25,0	19,5	23,0	26,5	25,0	24,5	24,5	18,5	15,0	29,5	
	0,040	%	51,5	44,5	45,0	51,5	47,5	52,5	50,5	38,3	36,0	47,5	
	0,020	%	75,5	72,0	72,0	73,0	68,5	77,5	76,5	68,5	63,5	69,5	
	0,010	%	97,0	92,5	92,0	93,0	94,0	100	98,0	93,0	90,0	98,0	
	0,002	%											
Masse volumique	ρ_s	g/cm ³	2,14	2,24	2,31	2,17	2,16	2,23	2,24	2,22	2,30	2,32	
Après Proctor Modifié	ρ'_s	g/cm ³	2,15	2,26	2,22	2,20	2,19	2,23	2,24	2,20	2,30	2,21	
Surface spécifique Blaine		cm ² / g	2823	2988	3179	2710	3457	2661	2922	3941	3769	2919	
Coefficient de perméabilité	k (10°C)	10 ⁻⁷ m/s	5,6	8,0	3,6	6,7	2,6	6,4	5,2	5,2	5,8	4,6	
Pourcentage de vides	n	%	43	45	42	42	40	40	43	49	47	42	
Sensibilité au gel (ρ_h = 100% OPM)													
Coefficient de gonflement	R _h	%	49	41	33	38	30	23	53	49	54	55	
Coefficient de ségrégation	R _w	%	42	42	28	32	29	23	47	45	46	41	
Aptitude au compactage	OPM	g/cm ³	1,26	1,31	1,37	1,35	1,38	1,37	1,37	1,22	1,29	1,37	
	w _{OPM}	%	25	24	20	20	19	19	21	31	28	20	
	OPS	g/cm ³	1,22	1,30	1,37	1,35	1,36	1,41	1,33	1,14	1,24	1,38	
	w _{OPS}	%	27	25	22	22	22	20	22	35	30	22	
Portance													
CBR maximum		%	44	30	43	31	60	29	49	66	49	42	
w (de compactage) au CBR maximum		%	23	23	19	19	16	17	19	31	27	15	
Après immersion													
CBR maximum		%	42	13	5	2	43	1	19	105	16	6	
w (de compactage) au CBR maximum		%	26	29	21	21	16	20	19	37	25	21	
Gonflement linéaire maximum		%	3,4	4,4	9,5	4,2	2,4	5,7	3,4	1,8	2,4	4,5	
Hauteur de succion s	pour S _r = 50%	m	-	6,0	6,5	5,9	-	5,5	-	-	-	-	
	70%	m	4,8	4,0	4,4	4,0	5,7	3,6	5,3	6,6	5,7	4,9	
	90%	m	2,3	-	-	-	-	-	2,5	4,9	3,4	-	
Limites d'Atterberg													
Résistance à la compression simple													
0% de chaux													
sans immersion	R' _c	MPa	0,37	0,13	0,13	0,11	0,54	0,12	0,25	3,48	0,26	0,24	
avec immersion	R' _{ci}	MPa	0,29	0	0	0	0,40	0	0	3,55	0	0,22	
1% de chaux													
sans immersion	R' _c	MPa	0,99	0,18	0,85	0,69	1,25	1,12	1,11	4,61	0,82	1,06	
avec immersion	R' _{ci}	MPa	1,01	0	0,66	0,74	1,15	0,94	0,90	3,44	0,59	0,98	
Essais de cisaillement direct (CD)													
Angle de frottement interne	ϕ	°	34	30	31	26	36	27	29	45	33	29	
Cohésion	c	kPa	20	4	0	6	9	5	19	16	18	7	

ristiques des cendres volantes. Celles-ci varient non seulement d'une centrale à l'autre, mais aussi au cours de la production dans une même centrale (voir Tableaux I et III). D'autre part, comme on s'y attendait, pour un même échantillon, la compacité critique varie en fonction de σ'_m .

Compte tenu des valeurs de ρ_s présentées dans le Tableau III, on a calculé les valeurs e_c correspondantes, et par application de la théorie de Winterkorn, on a tracé les droites présentées pour chacun des échantillons de cendres volantes à la Figure 4. Ces droites permettent d'estimer une valeur de ρ_{dc} pour toutes autres valeurs de σ'_m .

TABLEAU IV

ρ_{dc} (kg/m³) Fonction de σ'_m (kPa).

σ'_m	CENDRES VOLANTES n°									
	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100	1050	1140	1200	1210	1140	1410	1130	800	1030	1210
500	1220	1300	1410	1400	1370	1550	1370	1170	1230	1390

1* prélèvement de 1981 différent de celui du Tableau III.

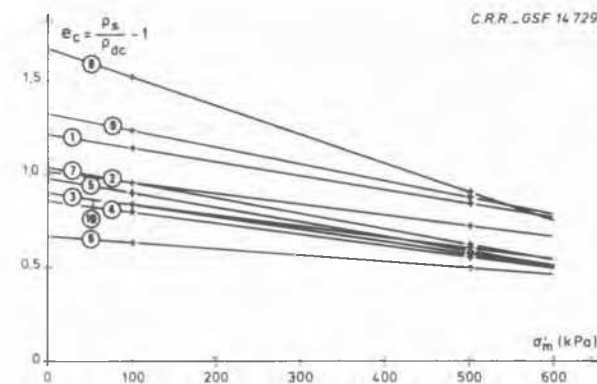


Fig. 4 Droites de Winterkorn.

Cependant, étant donné cette variation, il sera difficile, voire impossible d'établir un critère basé sur une mesure de la masse volumique critique (ρ_{dc}) pour conduire le compactage d'un remblai en cendres volantes. Pourtant, il n'est pas nécessaire de connaître cette valeur. Il suffit pour rester du côté de la sécurité de s'assurer que le matériau en place soit compacté au-delà de la compacité critique.

Aussi on propose ici un nouveau critère pratique basé sur un essai de cisaillement direct, qui vise à limiter le risque des tassements suite à un cisaillement.

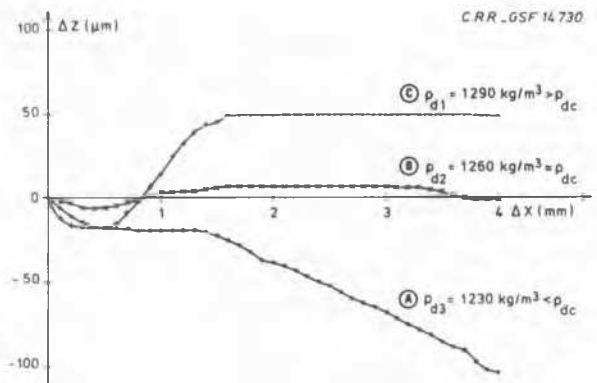
METHODE DE CONTROLE PROPOSEE

La méthode rapide décrite ci-après permet à l'aide d'un essai de cisaillement direct de se rendre compte de la compacité suffisante d'une couche de cendres volantes.

- Sur chantier, dans la couche compactée, on prélève un échantillon de matériau non remanié, à l'aide d'une douille de section carrée de dimension appropriée. Il est monté entre les plaques poreuses non striées dans la boîte à cisaillement installée au laboratoire de chantier.
- La consolidation de l'éprouvette sous la contrainte σ'_m considérée pour le remblai est poursuivie jusqu'à assurer une vitesse de tassement résiduel inférieure à $1 \mu\text{m}$ par heure, jugée négligeable ici, ce qui prend généralement 10 minutes.
- Le cisaillement de l'éprouvette s'effectue à une vitesse constante de $0,21 \text{ mm/min}$ choisie pour réduire la durée de l'essai tout en assurant le drainage de l'éprouvette.
- On lit la déformation verticale ΔZ quand la contrainte de cisaillement résiduelle reste constante, ce qui est généralement le cas après un déplacement horizontal relatif des deux demi-boîtes $\Delta X = 4 \text{ mm}$.

L'interprétation est la suivante; si pour $\Delta X = 4 \text{ mm}$, la valeur trouvée pour ΔZ est supérieure à $+30 \mu\text{m}$ (gonflement), on considère que l'éprouvette initiale était compactée au-delà de la compacité critique correspondant à σ'_m . En suivant ce mode opératoire, on peut estimer en moins d'une heure sur un chantier l'état de compactage d'une couche de cendres volantes, pour autant que le laboratoire de chantier puisse être équipé d'un appareil de cisaillement.

Si au cours du cisaillement on a relevé ΔZ en fonction de ΔX , on peut dresser une courbe telle que celle représentée à la Figure 5.

Fig. 5 Essai de cisaillement rapide pour 3 valeurs de ρ_d .

Si l'allure de la courbe est celle de C, l'échantillon est compacté au-delà de la compacité critique.

Dans le cas contraire (courbe A ou B), le compactage de la couche sur chantier doit être poursuivi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Calembert, L., Dantinne, R. (1964). L'avalanche de cendres volantes survenue à Jupille (Liège) le 3 février 1961. Amici et Alumni - Université de Liège.
- De Beer, E.E. (1968). Het begrip kritieke dichtheid, het begrip drijfzand. Wijze van bepaling van de kritieke dichtheid en van de aanwezigheid van drijfzand. Mededelingen van de Koninklijke Vlaamse Academie voor Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten van België, (5), 4 - 37.
- Dufasne, D. (1984). Etude de la densité critique des cendres volantes. Travail de fin d'études, Institut Supérieur Industriel de l'Etat à Mons.
- Goelen, E.H.G. (1982). De certaines caractéristiques des cendres volantes utilisées comme matériaux de remblai. Amici et Alumni, Em. Prof. Dr. ir. De Béer, pp. 157 - 164, Brussel.
- Huet, J., Choquet, F., Verhasselt, A. (1981). Les cendres volantes belges. Leurs qualités de filler routier. Compte rendu de recherche CR 16/81, Centre de recherches routières, Bruxelles.
- Thijs, M. (1984). Etat des connaissances relatives à l'utilisation en remblais routiers de cendres volantes de fraîche production provenant d'une ou de plusieurs centrales électriques. Compte rendu de recherche CR 21/84, Centre de recherches routières, Bruxelles.
- Winterkorn, H.F. (1971). Analogies between macro-meritic and molecular Systems, and the mechanical Properties of Sand and Gravel Assemblies. Chemical Dynamics, Papers in Honour of Henry Eyring, Wiley Interscience, pp. 751 - 766, New-York.