

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 Continu d'un Massif à Stabilité Critique

Permanent Control of a Mass in Critical State

E. LOUSBERG
M. LEJEUNE
J.F. THIMUS

Professeur, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique
 Professeur, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique
 Assistant, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique

RESUME L'article décrit l'appareillage de contrôle de déplacements au pied d'un massif de contrebutage retenant un remblai de cendres volantes dont la compacité est inférieure à la compacité critique et est donc susceptible de se liquéfier. Outre le contrôle au moyen d'inclinomètre et de bornes topographiques, un pendule inversé a été mis en place dont le déplacement est surveillé en permanence par un système automatique à micro-processeur. Ce système permet de mesurer des déplacements de l'ordre de quelques centièmes de millimètres et les informations sont transmises sous forme digitale à un poste centrale de contrôle par liaison hertzienne. Des lectures faites sur une période de 2 ans ont montré la fiabilité de l'appareillage et ont permis de suivre avec précision le fluage du terrain limoneux sous le poids du massif de contrebutage.

LES REMBLAIS DE CENDRES VOLANTES

Contrôle d'un site en Belgique

Le stockage des cendres volantes produites par les centrales thermiques pose des problèmes délicats de stabilité quand elle doivent être placées en remblai (Jarrije, 1971). Souvent des vallées peu peuplées sont utilisées à cet effet.

Ces cendres volantes dont la granulométrie est essentiellement comprise entre 2 et 60 μm (fig. 1), qui ne possèdent guère de cohésion et qui ont une faible perméabilité ($w \approx 20\%$) au moment de leur production.

Si le compactage est insuffisant ou inadéquat, elles se mettent en place à une compacité inférieure à la compacité critique (Casagrande, 1936) (Geuze, 1948) (De Beer, 1968) et sont dans un état instable. Si un événement extérieur (tremblement de terre, tir de mines, ...) vient provoquer un réarrangement interne des grains, le phénomène de liquéfaction peut se produire, essentiellement dans la partie située sous la nappe phréatique. Celle-ci par ailleurs ne tarde pas souvent à s'installer dans les remblais mis en place dans des vallées.

En Belgique, une telle liquéfaction d'un volume de 180000 m^3 s'est produite en 1961 à Jupille, près de Liège, qui s'est déplacé sur une distance de 650 m entraînant la mort de plus de 20 personnes (De Beer, 1968). D'autres catastrophes ont eu lieu dans de nombreux pays et de nombreux auteurs ont étudié ces dernières années plus en détail le phénomène de liquéfaction (ASCE, 1976), (Lomnitz, 1976).

Dans une vallée située également à proximité de Liège, Belgique, un dépôt de cendres volantes de 3000000 m^3 a été réalisé sur une période de 20 ans. La crête du talus a atteint une hauteur de 40 m et la pente de celui-ci était de 17°.

Présence d'une zone peu compacte

La partie inférieure du remblai, la plus ancienne, a été déversée et peu compactée tandis que la partie supérieure a été plus énergiquement compactée. La partie inférieure se trouve à une compacité critique ($\gamma_{\text{crit}} \approx 12 \text{ kN/m}^3$) tandis que la partie supérieure à un poids volumique de l'ordre de 13 kN/m^3 .

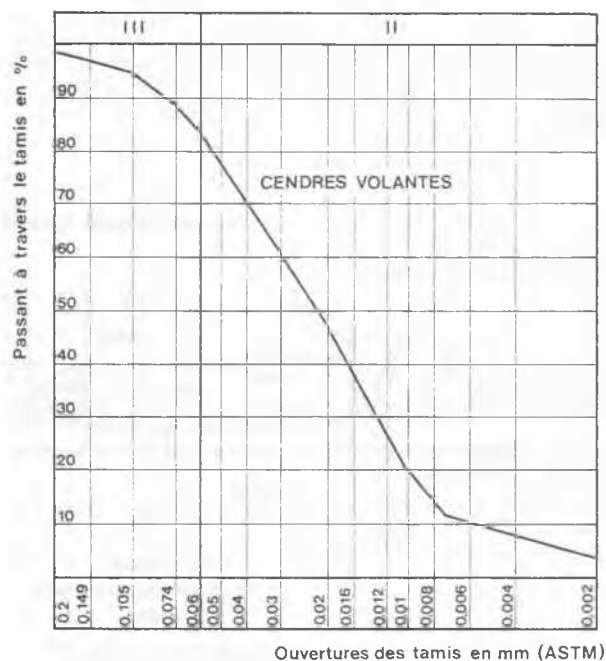


Fig. 1 Courbe granulométrique de cendres volantes

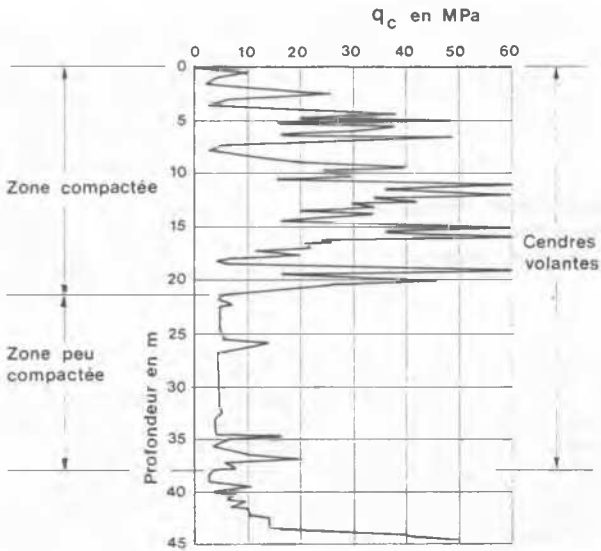
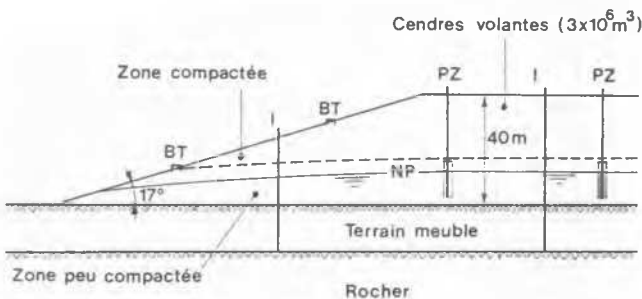


Fig. 2 Essai de pénétration CPT dans le remblai de cendres volantes

La figure 2 montre un des essais de pénétration CPT (M4) exécutés dans ce remblai montrant nettement les deux zones de même que la position de la nappe phréatique.

Contrôle et mesures de consolidation

Lorsque la présence de cette couche de faible compacité a été décelée, deux décisions furent prises : l'installation d'un contrôle permanent et la réalisation d'ouvrages de confortement.



I : Inclinomètre
 BT : Borne topographique
 PZ : Piézomètre

Fig. 3 Coupe dans le remblai de cendres volantes avant confortement

La prise de ces mesures s'imposait car un millier de personnes, habitant au pied du remblai, étaient menacées par une éventuelle mise en liquéfaction du remblai. Celui-ci se serait en effet déplacé comme une seule masse si la partie inférieure s'était liquéfiée, jouant le rôle de "roulement à billes" à très faible angle de frottement.

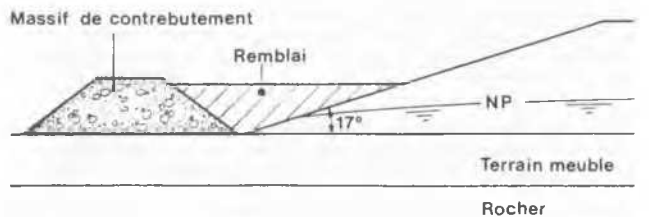
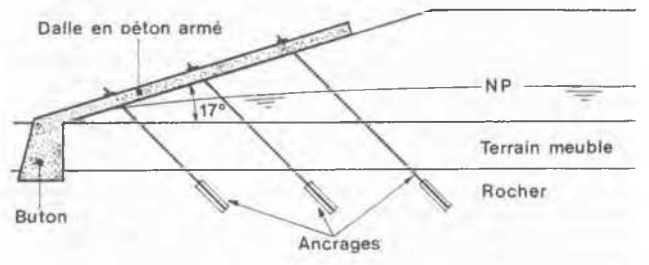
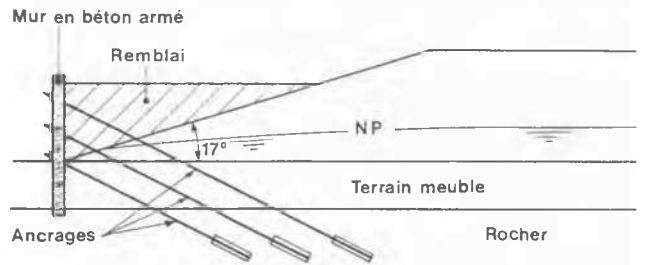
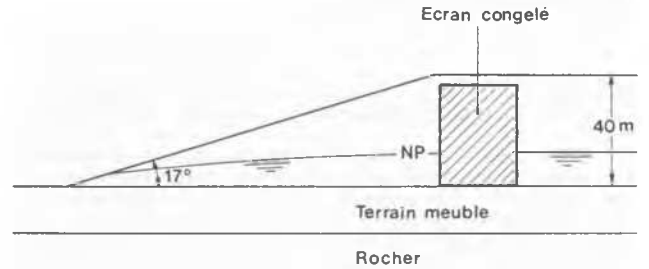


Fig. 4 Projets de confortement

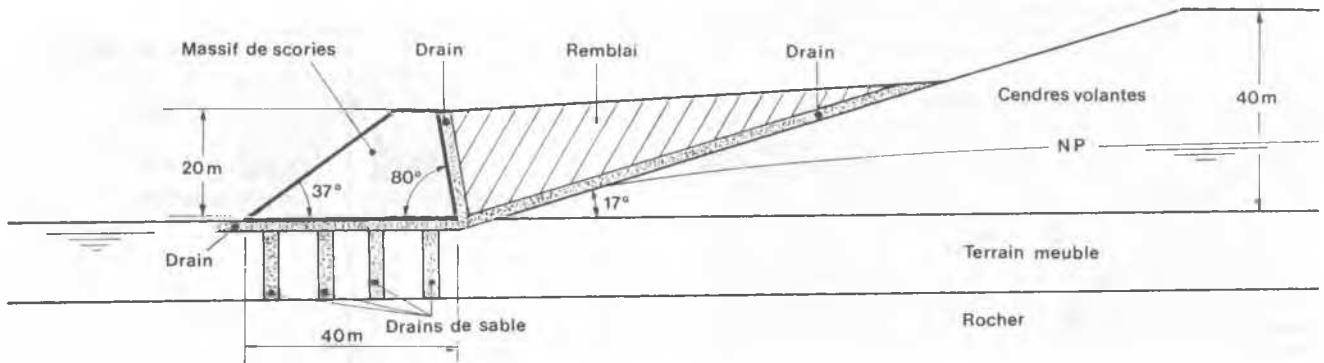


Fig. 5 Projet adopté pour le confortement

Le contrôle a consisté dans le placement d'inclinomètres et de piézomètres dans le remblai de même que de bornes topographiques sur le talus (fig. 3). Toutes les mesures ont été effectuées 1 à 2 fois par jour et un personnel de surveillance demeurait sur place 24 h sur 24 h disposant de moyens d'alarme au cas où un mouvement était décelé. Ce contrôle permanent a été maintenu jusqu'à mise en place de l'appareillage décrit ci-après.

Divers projets ont été étudiés pour assurer le renforcement du remblai (fig. 4) : réalisation d'un écran congelé dans le remblai, construction d'un mur vertical ou d'une dalle reposant sur le remblai ancrés dans le rocher subjacent, réalisation d'un massif de contrebutage devant le remblai.

Les trois premières solutions ont été écartées parce que toutes les trois nécessitaient des travaux dans le remblai instable, que la première demandait une dépense permanente d'énergie et que les autres étaient plus coûteuses. C'est la mise en place d'un massif de contrebutage en scories de haut-fourneau qui a été adoptée. La figure 5 en montre le principe : massif de scories, remblai entre le massif et les cendres volantes, couches drainantes et drains de sable.

Pendant l'exécution des travaux, les contrôles de stabilité ont été renforcés et après l'achèvement de ceux-ci, une surveillance a été maintenue.

Toutefois, malgré la présence continue de personnel et des lectures effectuées deux fois par jour, un risque subsistait car le phénomène de liquéfaction est quasi instantané alors que les signes prémonitoires sont peu évidents. C'est pourquoi il est utile de disposer d'appareils de contrôle à lecture permanente et à grande fiabilité.

Un pendule inversé situé au pied du massif de contrebutage a été équipé par un appareil de contrôle permanent tandis que les dispositifs ordinaires tels que bornes topographiques et

inclinomètres étaient maintenu en activité (fig. 6).

Il est en effet extrêmement utile de disposer de moyens de contrôle totalement indépendants les uns des autres. La figure 7 montre la disposition de ces appareils au pied du massif de contrebutage soit un pendule inversé PI, un inclinomètre I, 6 bornes topographiques B1 à B6 alignés sur des points supposés fixes BA, BB et BC.

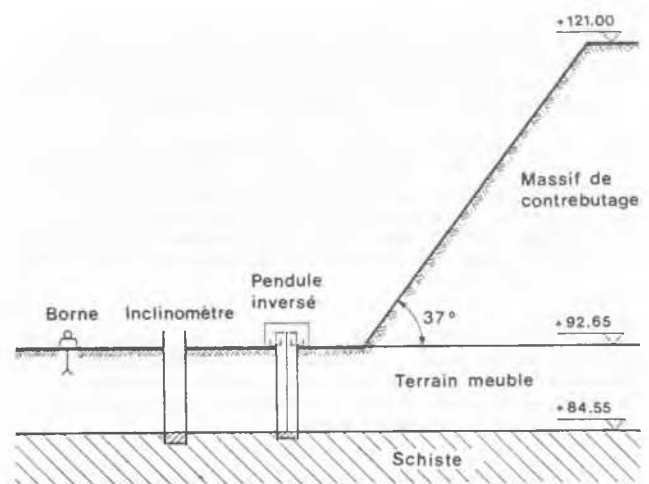


Fig. 6 Dispositif de mesures au pied du massif de contrebutage

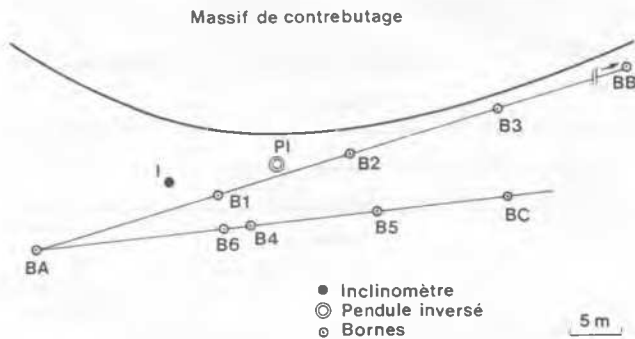


Fig. 7 Disposition des appareils de mesure de déplacement au pied du massif de contrebutage

SYSTEME DE MESURE

La figure 8 donne un schéma du pendule inversé dont le déplacement est contrôlé en permanence par un système automatique à micro-processeur. Le flotteur constituant la partie supérieure du pendule inversé est prolongé en son centre par une tige métallique qui matérialise la verticale. Le déplacement horizontal de la surface du sol est mesuré par rapport à ce repère vertical.

Plusieurs systèmes optiques classiques permettent de réaliser cette mesure. Ils présentent en général des inconvénients lors de mesures devant être réalisées pendant des périodes de temps très longues (c.-à-d. plusieurs années) :

- le faisceau lumineux est asservi au déplacement du fil : tout changement dans les caractéristiques du faisceau (atténuation, déviation, ...) fausse les mesures,
- la position du faisceau repérant le fil vertical est mesurée par l'intermédiaire de capteurs de déplacement (inductifs ou autres) : les mesures analogiques de longue durée sont très délicates et influencées par de nombreux paramètres (dérives, ...).

Le système original mis au point au Laboratoire du Génie Civil de l'Université Catholique de Louvain tente de pallier ces inconvénients. On trouvera ci-dessous une brève description de son fonctionnement.

Le faisceau optique, destiné à déterminer la position du pendule inversé, est solidaire d'une plate-forme mue par un moteur pas à pas : le simple comptage des impulsions envoyées au moteur constituera la mesure du déplacement horizontal du terrain.

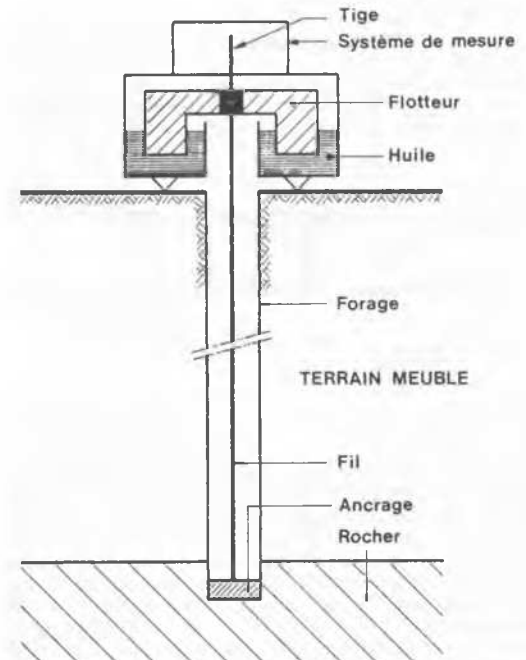


Fig. 8 Schéma du système de mesure placé sur le pendule inversé

La figure 9 schématise le fil surmontant le flotteur du pendule inversé. Deux repères R1 et R2, fixes par rapport au terrain, sont distants d'une longueur b : cette distance invariable permet de s'assurer de la parfaite validité des mesures. Celles-ci sont réalisées de la manière suivante :

- l'axe optique est mis en mouvement et coupe le repère R1 : le compteur d'impulsions est mis en route,
- l'axe optique continue son mouvement et coupe le fil vertical F et ensuite le repère fixe R2 : le nombre d'impulsions nécessaires à parcourir les distances a et b est comptabilisé.

La mesure sera considérée comme valable si la distance "repère" b correspond à la valeur théorique enregistrée dans la mémoire du processeur.

Notons enfin qu'un système électronique particulier permet d'assurer une mesure dont la précision et la stabilité sont indépendantes de la qualité de l'axe optique. Cette technique purement digitale permet d'obtenir des mesures très précises : 0.01 mm de résolution pour des déplacements supérieurs à 100 mm.

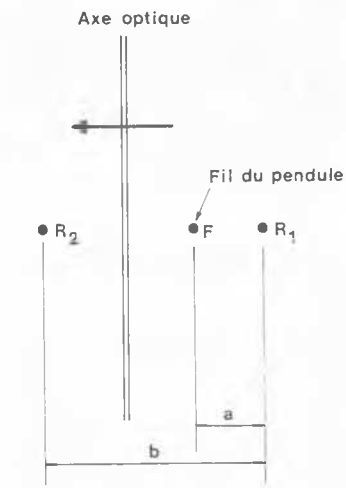


Fig. 9 Schéma de la mesure optique

Dans la pratique, un système à micro-processeur assure le pilotage automatique de la plateforme de mesure.

Les résultats (mesures a et b) sont disponibles sous forme d'un signal digital répondant aux spécifications informatiques classiques (RS-232-C, ASCII). Cette sortie permet l'enregistrement des mesures sur cassettes ou imprimante et la transmission à distance.

Le système actuellement en fonctionnement depuis plus de deux ans est situé à plusieurs kilomètres du lieu où les mesures doivent être examinées : la transmission des mesures se fait par voie hertzienne.

A cet effet un mini-ordinateur situé au poste de surveillance commande à intervalle régulier le démarrage de la mesure (une fois par heure mais pourrait être augmenté à 30 lectures par heure). La mesure terminée, les résultats sont transmis automatiquement au poste de commande. L'ordinateur de celui-ci vérifie la validité des mesures (vérification de la distance "calibre" b et test de validité des transmissions); en cas de mesures non correctes un nouvel essai est effectué avant de signaler la panne d'origine mécanique ou électrique. Si le déplacement du terrain dépasse des limites prédéterminées, une alarme est enclenchée automatiquement.

RESULTATS DES MESURES

La figure 10 donne les résultats des mesures effectuées entre juin 1978 et août 1980. On a reporté le déplacement horizontal du terrain dans la direction du thalweg en ordonnées. La ligne continue donne le déplacement mesuré toutes les heures au moyen de l'équipement adapté sur le pendule inversé tandis que l'on a reporté aussi les valeurs du déplacement mesuré sur la borne topographique B2.

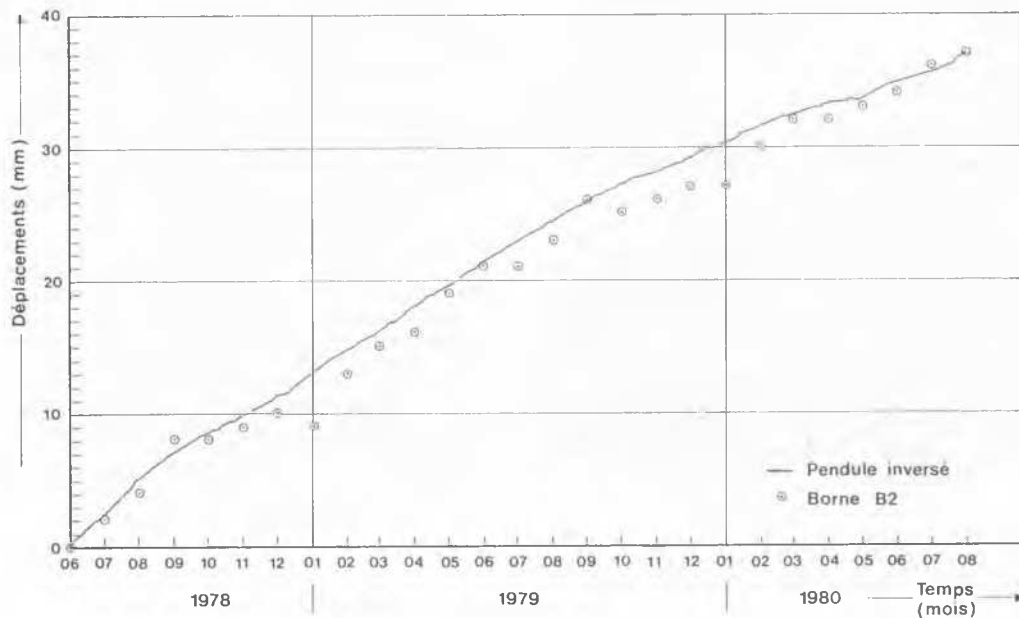


Fig. 10 Diagramme de mesures des déplacements

On constate une bonne concordance globale entre ces deux mesures tout en remarquant que la précision est moins bonne pour celles de la borne. Par contre, les déplacements déduits des mesures faites à l'inclinomètre sont beaucoup moins précis.

L'appareillage placé sur le pendule inversé a fonctionné sans défaillance et avec une très grande précision durant plus de 2 ans.

Les irrégularités apparaissant sur la ligne continue sont dues à la grande résolution des mesures : des phénomènes secondaires tels que par exemple les déformations du terrain et de l'appareillage sous l'effet de la température sont de ce fait mis en évidence.

Le déplacement enregistré au pied du talus résulte d'un fluage du terrain meuble sous l'influence du massif de contrebutage. En effet (fig. 5) le terrain a été chargé par un massif ayant une hauteur de 20 m présentant une pente de 37° et ayant un poids volumique de 28 kN/m^3 . Le terrain reposant sur le rocher est constitué de limon et d'argile de décomposition présente un fluage enregistré par les appareils de contrôle.

Le calcul de la stabilité du massif de contrebutage a supposé qu'au cas de mise en liquéfaction de la zone inférieure du remblai de cendres volantes, celui-ci transmettrait au massif un effort horizontal de 6 MN/m de largeur. Si durant le temps des mesures, cet effort devait avoir été transmis, en tout ou en partie, au massif, on aurait enregistré un déplacement horizontal se développant sur une courte période dû à la déformation du terrain lors de la mobilisation des contraintes de cisaillement entre le terrain et le massif de contrebutage.

REFERENCES

ASCE (1976). Liquefaction problems in geotechnical engineering. ASCE National Convention, Philadelphia.

Casagrande (1936). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. J. of Boston Soc. of Civ. Eng, n° 23

De Beer (1968). De kritieke dichtheid van onsamenhangende materialen. Mededelingen van de Kon. Vl. Academie voor Wetenschappen Letteren en Schone Kunsten van België. N° XXX-5 Bruxelles

Geuze (1948). Critical density of some Dutch sands. Proc 2^d Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng (3), Rotterdam

Jarrije (1971). Les cendres volantes Eyrolles, Paris

Lemnitz C. et Rosenblueth (1976). Seismic risk and engineering decisions. Elsevier Amsterdam.