Reconstitution d'éprouvettes de sable
Appareils de pluviation

D. LEVACHER
Laboratoire de Mécanique des Fluides et Génie civil
Université du Havre
Quai Frissard, BP 265
76055 Le Havre
Laboratoire de Mécanique et Géomécanique
Université de Nantes
2, rue de la Houssinière
44072 Nantes cedex 03

J. GARNIER
Section Mécanique des Sols et Centrifugeuse
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
BP 19 44340 Bouguenais

P. CHAMBON
Laboratoire de Génie civil,
École Centrale de Nantes
1, rue de la Noë
44072 Nantes cedex 03

Résumé

Les méthodes de reconstitution d'éprouvettes de sable ont déjà fait l'objet de nombreuses études. Cependant elles n'offrent pas de garanties suffisantes sur les résultats obtenus : absence de procédure, contrôle de la densité *a posteriori*, hétérogénéité... Une méthode de reconstitution par pluviation peut pallier ces inconvénients. Une analyse détaillée de l'influence des paramètres significatifs (hauteur de chute, débit) a permis de définir et d'établir les principes d'un appareil à pluviation. Différents appareils sont alors présentés ainsi que les premiers résultats relatifs à des essais de cisaillement.

Preparation of sand samples
Pluviated sand apparatus

Abstract

Among the available procedures for obtaining reconstituted laboratory sand samples, the raining method appears to best simulate the natural processes of sand deposits. Effects of some components of the sample preparation equipment on the relative density of the sample have been studied.
They leaded to provide a guid-line for design different pluviated sand apparatus. The paper concerns the results of an investigation on these effects and on the design of a suitable laboratory sand rainer.

1

Introduction

Les essais de cisaillement sur les sables ne peuvent être réalisés que sur des échantillons reconstitués. Cette contrainte est responsable des dispersions très importantes observées lors d'essais croisés effectués sur un même matériau par des laboratoires différents. Si les techniques d'essai de cisaillement sont le plus souvent correctement maîtrisées, il n'en va pas de même des méthodes de reconstitution des éprouvettes (absence de méthode standardisée, impossibilité de reconstituer plusieurs échantillons identiques à densité prédéterminée, hétérogénéité des éprouvettes, imprécision sur les poids volumiques).

Les recherches en mécanique des sols nécessitent pourtant des essais de cisaillement de plus en plus rigoureux, par exemple pour la détermination des paramètres des différentes lois de comportement utilisées dans les modèles numériques. Mais pour les études géotechniques courantes, une mauvaise évaluation des résistances au cisaillement peut également avoir de graves répercussions sur le dimensionnement des ouvrages. Ainsi, pour le sable de Fontainebleau qui obéit à une loi de type

$e\ tg\phi = 0{,}50$, une imprécision de 3 % sur le poids volumique ($\gamma d = 16{,}48\ kN/m^3$ au lieu de $16\ KN/m^3$) conduit à une erreur de 5,6 % sur l'angle de frottement interne et respectivement de 45 et 17 % sur les facteurs de portance Nq et Nγ, soit une surestimation de 35 % de la capacité portante d'une fondation superficielle.

Il est donc paru souhaitable de rechercher une méthode de reconstitution d'éprouvettes de sable qui évite, ou tout au moins réduise, ces imprécisions.

2

Bref rappel historique

La détermination des porosités minimale et maximale des sables semble être à l'origine du développement des techniques de pluviation. Kolbuszewski [1] a tout d'abord recherché les facteurs fondamentaux qui affectent la mise en place des sables laches.

Ses premières observations ont montré l'influence déterminante de la vitesse de chute de grains et de l'intensité du dépôt sur la porosité finale. Suite à ces travaux, Kolbuszewski a proposé un mode opératoire pour la mesure des porosités minimale et maximale [2].

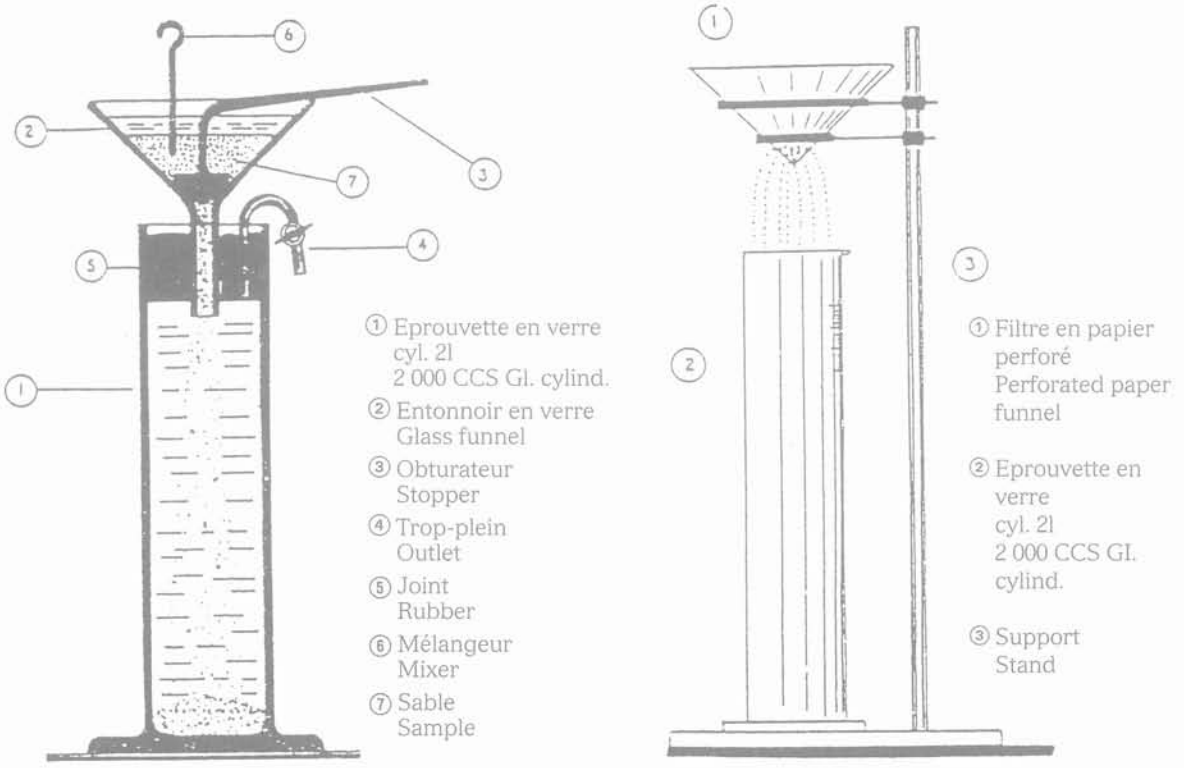
Un système de pluviation rudimentaire a été développé au cours de ces expériences, à l'Impérial Collège de l'Université de Londres [3]. Ce matériel reproduit sur la figure 1 semble être l'un des premiers pluviateurs.

Par la suite, la pluviation dans l'air ou dans l'eau s'est révélée être l'une des techniques possibles de reconstitution d'éprouvettes et de massifs de sable [4].

2.1

Éprouvettes de laboratoire

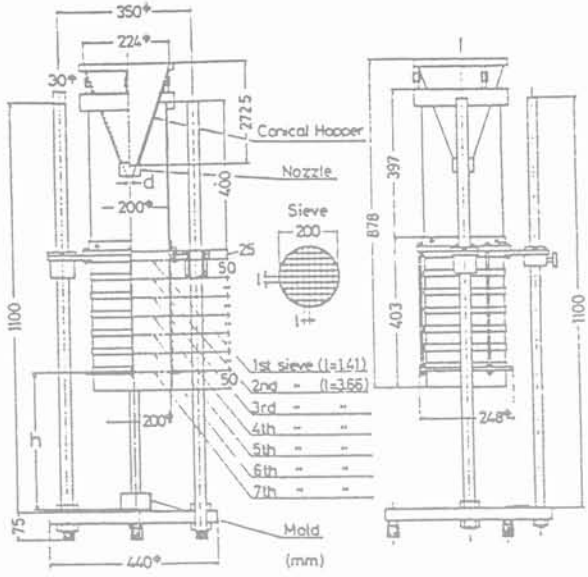
De nombreux laboratoires ont utilisé des méthodes de pluviation diverses pour la confection d'échantillons destinés à des essais de cisaillement en laboratoire, mais les développements les plus poussés sont dus à Kildalen et Stenhamar du NGI [5], à Tatsuoka, Toki et Miura de l'Université de Hokkaido [6], et à Rad et Tumay du NGI [7].



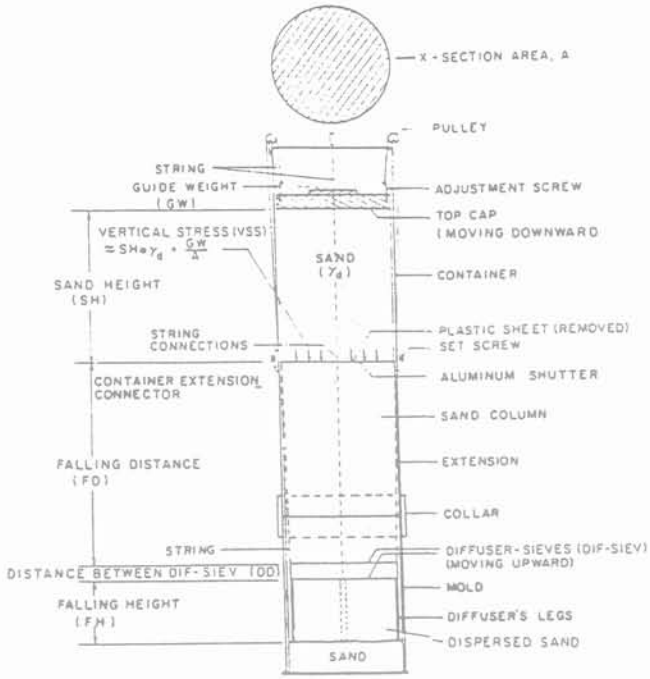
a) Pluviation dans l'eau
a) *Raining in water*

b) Pluviation dans l'air
b) *Air-pluviation method*

FIG. 1 **Vues du premier pluviateur (Kolbuszewski [3]).**
Schematic diagram of the first rainer.



a) D'après Miura et Toki [8]
a) *After Miura and Toki [8]*



b) D'après Rad et Tumay [7]
b) *After Rad and Tumay [7]*

FIG. 2 **Pluviateur à diffuseurs.**
Multiple – sieve rainers.

Tous les pluviateurs dérivés de ces recherches sont constitués d'un corps cylindrique à l'intérieur duquel le sable tombe en chute libre jusqu'à des diffuseurs (succession de sept tamis étagés pour le dispositif de Miura et Toki [8]). Sous ces diffuseurs est placé le moule dans lequel le sable se dépose.

Des études détaillées ont été effectuées sur la répétitivité de la méthode, sur l'homogénéité et sur l'anisotropie des éprouvettes, sur l'influence des différents paramètres (débit, hauteur de chute, espacement, nombre et ouverture des tamis). Le problème souvent évoqué avec ce type de matériel concerne les perturbations provoquées sur l'écoulement du sable par les turbulences de l'air, la chute du sable mettant en effet l'air en mouvement à l'intérieur du pluviateur.

Par ailleurs, le paramètre de réglage qui permet de modifier la densité de l'éprouvette à reconstituer est le débit de sable (par un jeu de grilles de différentes ouvertures) et non la hauteur de chute ce qui réduit la plage des indices de densité accessibles.

Les pluviateurs développés dans la présente étude apportent sur ces deux points, des améliorations par rapport à ceux qui ont été évoqués ci-dessus.

2.2

Massifs d'essai

La pluviation est également très utilisée pour la construction de massifs d'essais (cuves, modèles réduits centrifugés, chambre de calibration) mais deux systèmes sont le plus souvent proposés. Le premier est dérivé des petits pluviateurs de laboratoire et comprend toujours un réservoir fixe au-dessus de la cuve d'essai et des diffuseurs. Le second est celui du rideau de sable. Il est constitué d'une trémie mobile qui se déplace horizontalement au-dessus du conteneur à remplir. Le sable s'écoule en rideau continu de cette trémie et tombe en chute libre jusqu'à la surface du massif.

Le LCPC a mis au point, sur ce principe et avec la collaboration de D. Shields (Université de Winnipeg), un équipement de pluviation très performant, installé dans une salle spéciale et destiné à la confection des massifs de sable pour modèles centrifugés [9]. Malgré la taille importante des massifs ainsi préparés (L = 1,2 m, l = 0,8 m et h = 0,3 m à 0,8 m), leur homogénéité reste très bonne, les écarts sur la valeur de la densité du massif n'excède pas 1 % et la répétitivité est assurée à moins de 0,5 % près sur la densité.

Il est rapidement apparu souhaitable d'exploiter l'expérience acquise au LCPC avec ce matériel, et de tenter de l'étendre à la reconstitution d'éprouvettes pour essais de cisaillement en laboratoire, ainsi un premier pluviateur a été conçu dès 1988.

3

Conception d'un appareil pour éprouvettes de laboratoire

3.1

Principes généraux

• *Idées de base*

Il s'agit de disposer d'une méthode automatique de préparation d'éprouvettes de sable. Le dispositif et la méthode de préparation envisagés devaient :

– garantir la répétitivité ;

– produire des échantillons les plus homogènes possibles ;

– permettre la préparation d'éprouvettes, directement dans les moules d'essais (boîte de cisaillement, triaxial), à des poids volumiques prédéterminés ;

– ne pas être sensible au facteur opérateur ;

– être si possible simple, rapide et ne nécessitant qu'un matériel d'encombrement et de coût réduits.

La possibilité d'obtenir une densité fixée à l'avance présente un double avantage. Elle permet de préparer plusieurs éprouvettes successives identiques, ce qui est indispensable pour toute étude expérimentale du comportement des sables. Elle dispense en outre de la mesure *a posteriori* de la densité de l'échantillon confectionné, qui est très difficile et peu précise.

Cette méthode nécessite par contre un étalonnage préalable de l'appareil de pluviation, en fonction du matériau et des dimensions de l'éprouvette à réaliser.

Le dispositif devait aussi s'affranchir des problèmes de turbulence causés par l'écoulement du sable à l'intérieur de guides fermés.

Par ailleurs, le réglage de la densité, obtenu à la fois par la hauteur de chute et par le débit, a permis d'éliminer les séries de tamis ou diffuseurs retenus par différents auteurs [5, 6, 7, 8].

• *Considération théorique*

Elle s'appuie sur la chute libre d'une particule isolée, en prenant en compte l'évolution du coefficient de trainée [10]. Les courbes donnant la variation de la vitesse de la particule en fonction de la hauteur de chute sont présentées sur la figure 3, pour des grains sphériques de dimension équivalente à d_{50}. Elles ont toutes la même allure avec mise en évidence d'une vitesse de chute limite. Ces vitesses maximales sont atteintes pour des hauteurs de chute limites dépendant surtout de la taille des particules.

• *Interprétation physique de l'effet des paramètres*

La présence d'un palier horizontal dans la relation densité-hauteur de chute représentée sur la figure 4, pour un sable et un pluviateur donnés, est tout à fait logique. Il correspond en effet à des hauteurs de chute pour lesquelles la vitesse limite est atteinte.

L'énergie cinétique emmagasinée par les grains durant la chute est utilisée pour le placement des grains à la surface de l'éprouvette. Ainsi la densité obtenue est d'autant plus importante que l'énergie cinétique, donc la hauteur de chute l'est. Si la hauteur de chute correspondant à la vitesse limite est atteinte, l'énergie cinétique n'augmente plus et la densité non plus, d'où les paliers observés tant sur les courbes de vitesse (Fig. 3) que sur les courbes de densité (Fig. 4) et ceci pour un débit donné. Le mécanisme est en fait plus complexe car les particules ne sont pas isolées mais interagissent pendant la chute et lors de l'impact. On constate que si le débit devient important, la valeur de la densité relative tend à diminuer. En effet, les particules s'entrechoquent et perdent ainsi une partie de leur énergie lors de l'impact. Elles n'ont plus la possibilité d'atteindre des positions stables qui conduiraient à des arrangements plus compacts. Cette influence du débit déjà décrite par Kolbuszewski [1] permet d'élargir la plage des densités obtenues (Fig. 4). Par contre le résultat (densité relative) est alors plus fortement dépendant de la hauteur de chute. Un débit variable peut être assuré par des grilles interchangeables percées de trous de différents diamètres.

3.2

Appareils à hauteur de chute variable : PSA1 - PSA2

Ces deux premiers appareils se composent d'un socle, d'une colonne verticale et d'une trémie cylindrique qui sert de réservoir à sable. Cette trémie est mobile et la cote par rapport au moule est réglable. Son remplissage préalable s'effectue par le haut. La trémie est munie à sa base d'une plaque en aluminium ou tiroir qui assure l'ouverture et la fermeture du réservoir. Cette plaque est percée, selon un maillage prédéterminé, de trous identiques. Leur diamètre a été défini après des essais de pluviation afin d'éviter, d'une part des turbulences perturbant l'écoulement dans l'air et d'autre part une mauvaise distribution spatiale des débits. L'ouverture et la fermeture sont effectuées par l'opérateur. Le pas du maillage de la grille est fonction de la granulométrie du sable utilisé et des plages de densité désirées. Le prototype « PSA1 » est présenté sur la figure 5.

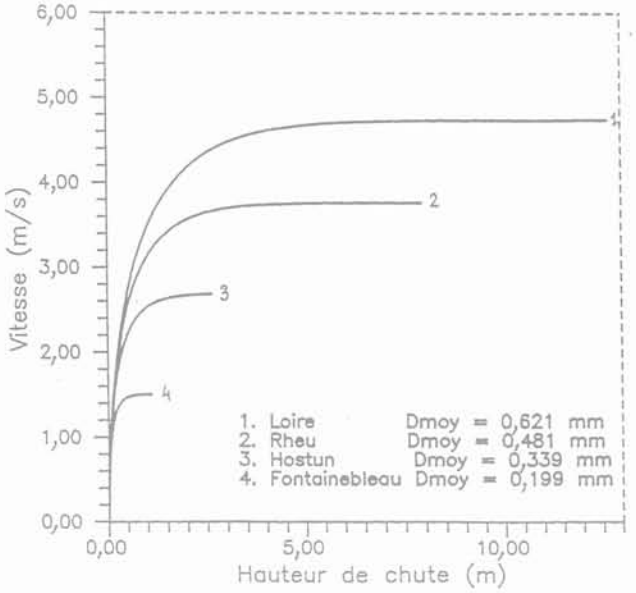


FIG. 3 **Relation vitesse – hauteur de chute des grains.**
Velocity – drop height of grains curves.

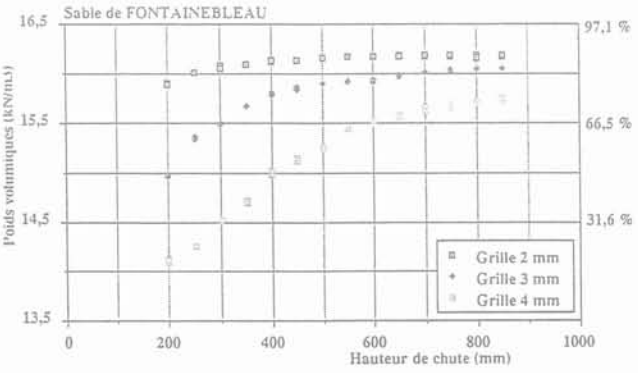


FIG. 4 **Effet de la hauteur de chute.**
Effect of the drop height.

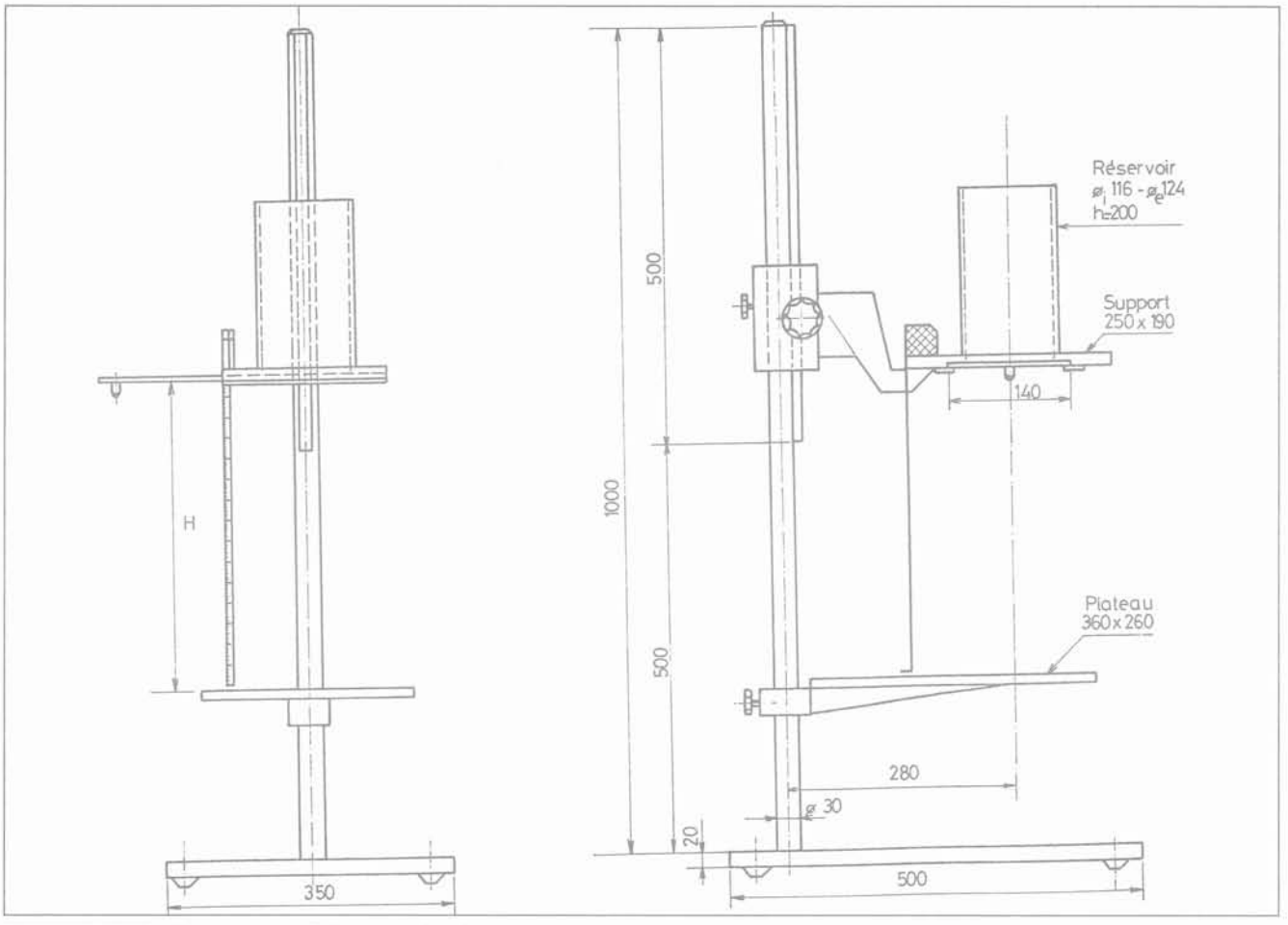


FIG. 5 **Plan et caractéristiques du pluviateur PSA 1.**
Schematic diagram of the PSA1 rainer.

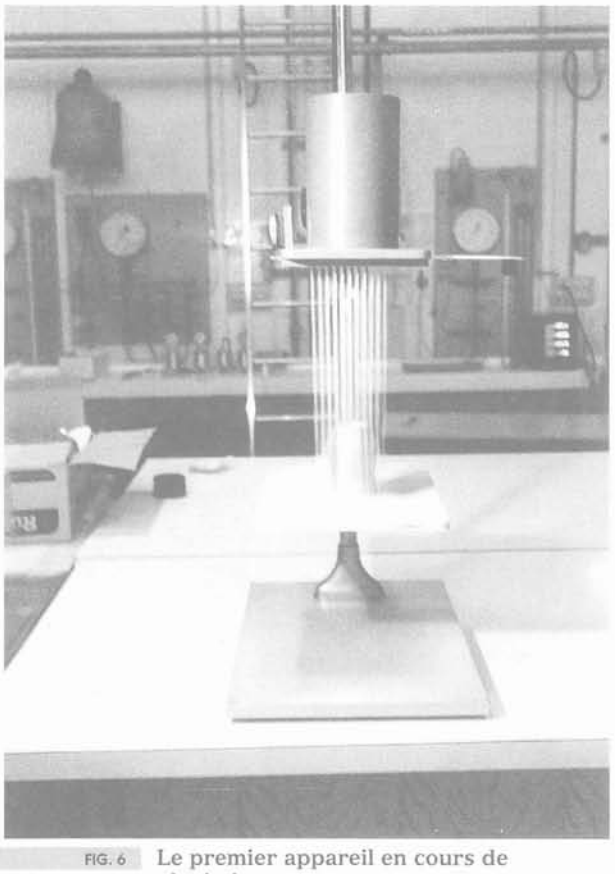


FIG. 6 **Le premier appareil en cours de pluviation.**
The first PSA1 rainer during pluviation.

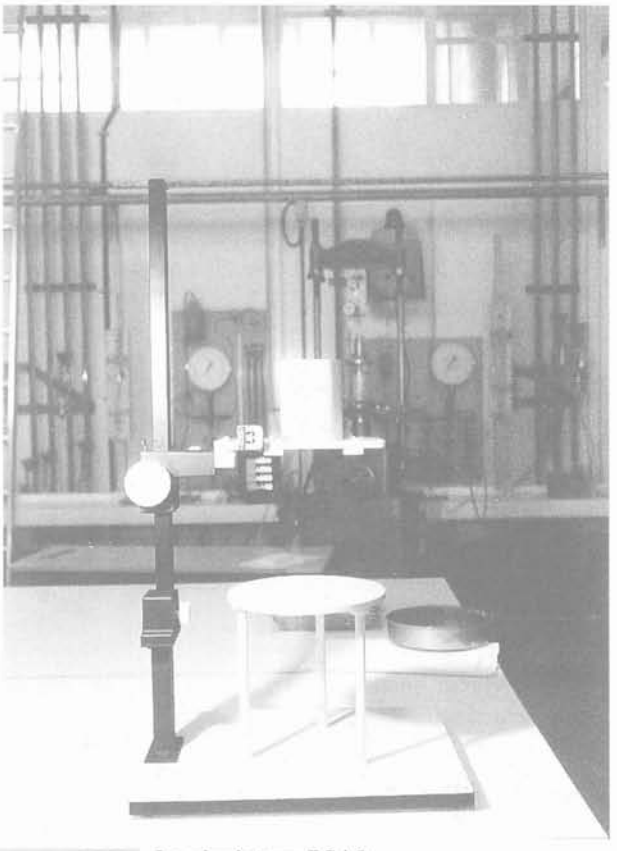


FIG. 7 **Le pluviateur PSA2.**
The PSA2 rainer.

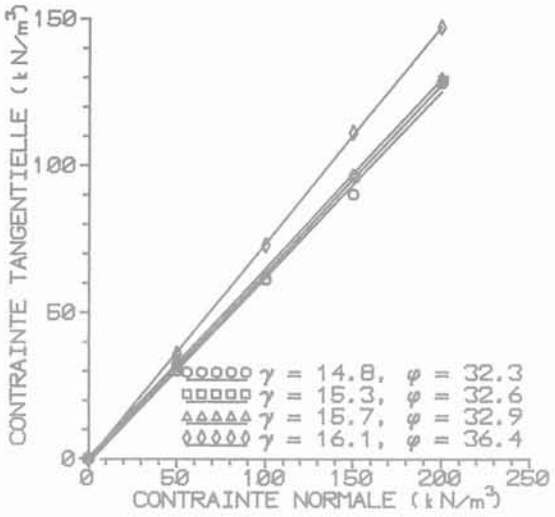


FIG. 8-a **Essais de cisaillement pour plusieurs états de densité (sable de Fontainebleau).**
Shear tests for different densities (Fontainebleau sand).

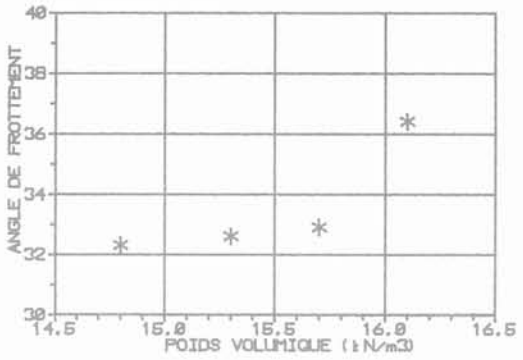


FIG. 8-b **Évolution de l'angle de frottement en fonction du poids volumique (sable de Fontainebleau).**
Angle of internal friction versus volumic weight (Fontainebleau sand).

TABLEAU I **Exemple de dispersions obtenues, cas d'une boîte carrée (60 mm x 60 mm) et d'une grille de 3 mm (sable de Fontainebleau).**
Scatter of results with the use of a square box (60 mm x 60 mm) and 3 mm diffuser sieve (Fontainebleau sand).

H (mm)	Première série γ_1	Deuxième série γ_2	Écart ‰
700	15,98	16,05	4,4
600	15,96	15,90	3,8
500	15,80	15,87	4,4
400	15,55	15,53	1,3
300	15,51	15,49	1,3
200	14,77	14,86	6,1
150	14,56	14,52	2,7

Deux appareils similaires existent actuellement (Fig. 6 et 7). Le premier appareil (Fig. 6) a d'abord été utilisé pour des essais de cisaillement réalisés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, voir les figures 8-a et 8-b, puis pour des essais triaxiaux au laboratoire 3 S de l'Institut de Mécanique de Grenoble qui ont donné lieu à des calages de paramètres de la loi de Nova [11]. Il est depuis lors, couramment mis en œuvre par la section Géotechnique routière du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées pour la préparation d'éprouvettes en vue d'essais de cisaillement à la boîte ou au triaxial.

Des essais de répétitivité ont confirmé l'intérêt de la technique de pluviation comme l'illustre l'exemple du tableau I où les écarts de densité des éprouvettes, entre deux séries de mesure, restent inférieurs à 7 °/₀₀.

Durant le remplissage, le réservoir étant fixe, la hauteur de chute varie. Ceci n'affecte ni la répétitivité ni la densité moyenne mesurée mais conduit à des échantillons plus lâches en tête.

3.3

Appareils à hauteur de chute constante : PSA 3 - PSA 4

Pour pallier l'inconvénient dû à la hauteur de chute variable, différents asservissements ont été envisagés (ressort, vérin, moteur électrique...) dont le plus simple, l'asservissement par ressort, a été retenu et a donné lieu à une deuxième génération de pluviateurs (voir Fig. 9). Le principe de ces appareils consiste à suspendre le réservoir à un ressort dont la raideur K a été convenablement choisie en fonction du poids volumique moyen γ_m du matériau et de la section du réservoir S ($K = S \cdot \gamma_m$) et dont la surcharge et l'allongement maximal doivent être en accord avec les chargements attendus (réservoir plein).

Hormis quelques modifications de détail (réglage du point d'accrochage du ressort, fenêtre de visualisation du niveau de sable dans le réservoir, barres antivibratoires), les caractéristiques de ces pluviateurs – PSA 3 PSA 4 – restent les mêmes que celles de la première génération. Deux appareils sont actuellement en fonctionnement l'un réalisé par l'École Centrale de Nantes, l'autre par l'Université de Nantes (Laboratoire de Mécanique et Géomécanique) pour le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Le pluviateur PSA 3 a, par exemple, été utilisé pour obtenir des échantillons de sable d'Hostun de poids volumiques différents, à savoir 15,5 kN/m³ et 16,3 kN/m³. Des essais de cisaillement CD à l'appareil triaxial ont été réalisés dans le but d'évaluer la répétitivité de la préparation, sur la détermination des caractéristiques mécaniques (Fig. 10). Malgré les écarts

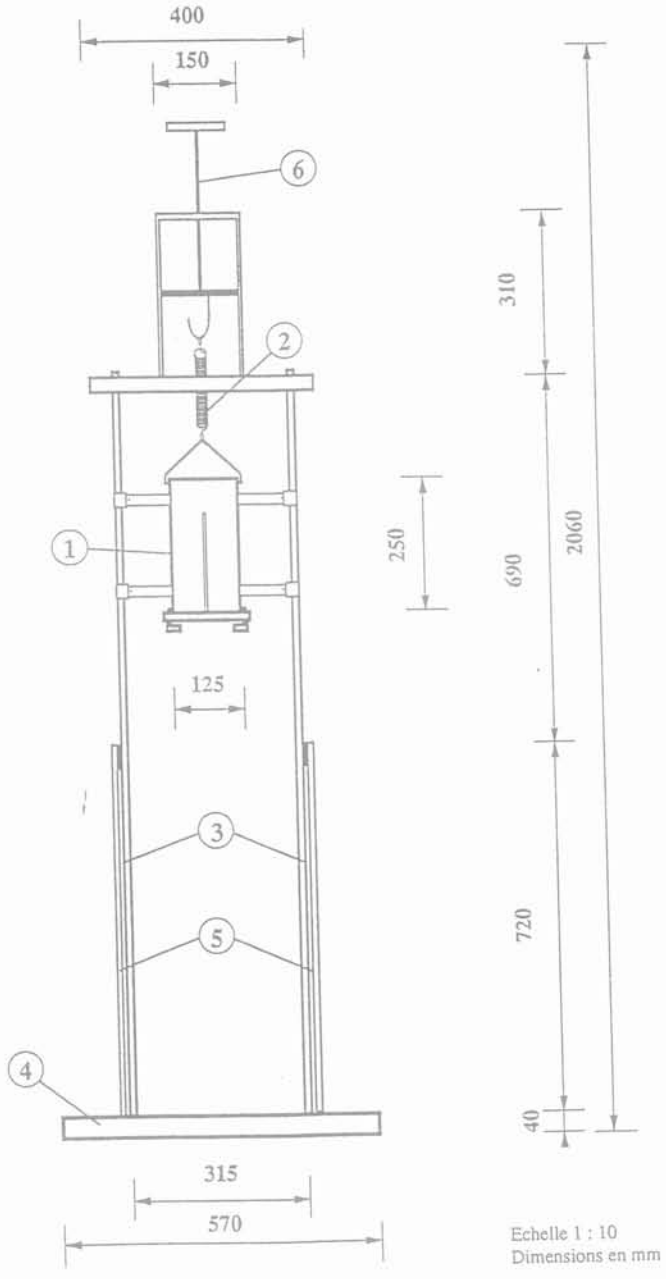


FIG. 9 **Le pluviateur à ressort PSA 4.**
Spring sans rainer PSA.

TABLEAU II **Écarts sur les valeurs de φ (sable d'Hostun).**
Scatter of φ values (Hostun sand).

γ_d(kN/m³)	15,5			16,3		
φ (°)	33,0	33,0	33,3	34,1	33,9	34,3

imputables à la mise en œuvre de l'essai triaxial lui-même, les figures permettent de distinguer très nettement le comportement des sables à forte et moyenne densité.

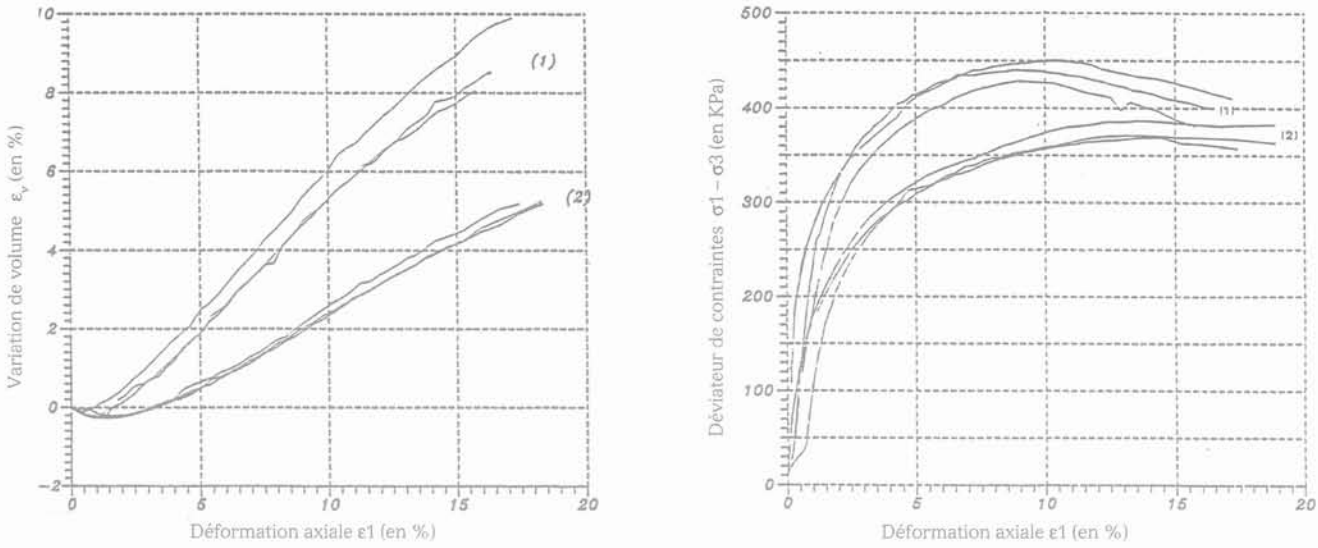
Si, en première approximation, l'angle de frottement sécant φ est calculé par la relation :

$$\text{tg}\,\varphi = \left[\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}\right]$$

le tableau II donne une idée des écarts obtenus sur l'angle de frottement φ.

4 Conclusions

L'intérêt de la technique de pluviation pour la reconstitution d'éprouvettes de sable en vue d'essais de cisaillement est évident. En effet, la densité de



(1) Courbes avec $\gamma_d = 16{,}3$ KN/m^3
(2) Courbes avec $\gamma_d = 15{,}5$ KN/m^3

a) $\varepsilon v = f(\varepsilon_1)$ *b)* $\sigma_1 - \sigma_3 = f(\varepsilon_1)$

FIG. 10 **Essais triaxiaux répétés de cisaillement drainé (sable d'Hostun).**
Repeated drained triaxial tests on the Hostun sand.

l'échantillon ainsi reconstitué est totalement prédéterminée par le choix de la grille et de la hauteur de chute. Il est toujours possible d'effectuer une mesure globale par pesage de l'éprouvette mais cette détermination reste imprécise et ne peut fournir *a posteriori*, qu'un ordre de grandeur grossier.

L'intervention de l'opérateur étant limitée, la répétitivité est très bonne et les écarts observés, par rapport à la valeur de densité souhaitée, sont inférieurs à 1 %.

La plage des densités accessibles avec les pluviateurs actuels va d'indices de densité I_D de 25 % à près de 95 %, pour les sables fins mis en œuvre dans cette étude.

L'homogénéité verticale et horizontale des échantillons reconstitués ont fait l'objet de travaux de recherche menés au Laboratoire de Mécanique et Géomécanique de l'Université de Nantes.

Les pluviateurs, du PSA 1 au PSA 4, sont utilisables pour des sables fins dont les plus gros grains ont un diamètre inférieur à 2 mm. Pour des sables plus grossiers, des problèmes d'écoulement au travers des grilles apparaîtraient. En outre les hauteurs de chute limites nécessaires pour obtenir les fortes densités seraient supérieures aux possibilités des pluviateurs actuels. Lorsque le pourcentage d'éléments grossiers n'est pas trop élevé, il est possible d'écrêter le matériau sans modifier de façon sensible sa résistance au cisaillement. Un pluviateur de plus grande hauteur, destiné aux sables grossiers est envisageable, mais une autre limite due à la taille des grains est imposée par les dimensions des boîtes de cisaillement et des éprouvettes triaxales courantes.

L'utilisation de cette méthode de reconstitution d'échantillons par pluviation nécessite le respect de certaines procédures d'essai et un projet de mode opératoire est en cours d'élaboration.

Bibliographie

[1] Kolbuszewski J.J. – General investigation of the fundamental factors controlling loose packing of sands, 2nd International Conference on Soils Mechanics and Foundation engineering, Rotterdam, vol. 2, pp. 47-49, 1948.

[2] Notes on the deposition of sands ; Research supplement 3-10, pp. 478-483, 1950.

[3] Kolbuszewski J.J. – An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands, 2nd International Conference on Soils Mechanics and Foundation engineering, Rotterdam, vol. 2, pp. 158-165, 1948.

[4] Kolbuszewski J.J., Jones R.H. – The preparation of sand samples for laboratory testing, Symposium on granular soils, Proc. of the Midland Soil Mechanics and Foundation engineering society, vol. 4, pp. 107-123. 1961.

[5] Kildalen S., Stenhamar P. – NGI Laboratory rainer, Internal report 51505-15, Norwegian Geotechnical Institute, 20 p., 1977.

[6] Tatsuoka F. – Some factors affecting cyclic undrained triaxial strenght of sand, *Soils and Foundations*, vol. 24, n° 3, pp. 99-116, 1986.

[7] Rad N.S., Tumay M.T. – Factors affecting sand specimen preparation by raining, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 10, n° 1, pp. 31-37, 1987.

[8] Miura S., Toki S. – A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation – strenght properties of sand, *Soils and Foundations*, vol. 22, n° 1, pp. 61-71, 1982.

[9] Corte J.F., Garnier J. – La centrifugeuse, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 146, pp. 5-28, 1986.

[10] Vaid Y.P., Negussey D. – Relative density of pluviated sand samples, *Soils and Foundations*, vol. 24, n° 2, pp. 101-105, 1984.

[11] Mestat P., Degny E., Chambon P. et Sekkat Z. – Détermination des paramètres du modèle de Nova à partir d'un essai triaxial, 25e colloque du groupe français de Rhéologie, Rhéologie des matériaux de Génie civil, Grenoble, pp. 173-184, 1990.