

Une banque de données pour le calcul de barrage

A data bank for dam computation

N. NEDJAT

Chercheur, EDF-CNEH*, Ecole Centrale Paris**

J.-J. FRY

Ingénieur d'études et développement hydraulique à EDF-CNEH*

Rev. Franç. Géotech. n° 60, pp. 71-81 (juillet 1992)

Résumé

L'objet de cet article est la définition des domaines de variation d'un certain nombre de paramètres mécaniques concernant les différents matériaux des barrages en enrochement. L'outil de base est une banque de données qui collationne entre autres les paramètres de DUNCAN. Les résultats trouvés restent en accord avec ceux déjà connus en mécanique des sols et ils permettent également de suggérer des résultats qui peuvent donner matière aux réflexions futures.

Abstract

This paper points out the fields of variation of some typical mechanical parameters used to describe rockfill dam materials. A data bank collecting various parameters, in particular DUNCAN parameters, serves as a basis for the present report. Naturally, the discovered results are in harmony with the usual knowledge of soils mechanics, but furthermore, these results suggest other results which open new prospects for future studies.

* Centre national d'équipement hydraulique, 73373 Le Bourget Cedex.

** Ecole centrale des arts et manufactures, 92295 Châtenay-Malabry Cedex.

INTRODUCTION

Le projeteur confronté dès l'avant-projet à la conception d'un ouvrage, sans avoir la possibilité de connaître l'ensemble des propriétés du remblai et de sa fondation est amené à justifier son projet à partir d'un calcul paramétrique. L'expérience montre que ce calcul est plus rapide et plus représentatif si les paramètres sont issus d'études antérieures sur des ouvrages similaires. La variété des situations incite alors à emmagasiner l'expérience acquise sous forme de banque de données.

Une banque de données concernant principalement les barrages en enrochement regroupe plus de 170 grands barrages dans le monde (décrits pour la plupart dans les comptes rendus de la CIGB) ; 750 matériaux constitutifs y sont répertoriés ; 124 paramètres définissent le comportement des matériaux et du barrage.

Une première exploitation succincte est présentée ci-après. L'accent est mis sur le lien entre les paramètres physiques d'identification (densité, granulométrie) et les paramètres mécaniques issus de la loi de DUNCAN. Cette dernière a été choisie en raison notamment de l'utilisation internationale intensive qui nous a permis de retrouver un volume conséquent de données.

1. RAPPEL CONCERNANT LA LOI DE DUNCAN

La première formulation de cette loi est due à KONDNER (1963) qui a proposé que la courbe triaxiale contrainte déviatoire fonction de la déformation axiale soit approximée par l'hyperbole :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1}$$

où :

$$a = \frac{1}{E_i} \text{ et } b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$$

avec :

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$$

et $(\sigma_1 - \sigma_2)_f$: déviateur maximal.

La formulation complète de cette loi est donnée par DUNCAN en 1970. Les paramètres sont définis de la manière suivante.

Le module initial est donné par la relation :

$$E_i = K \text{ Pa} \left(\frac{\sigma_3}{\text{Pa}} \right)^n \text{ où : Pa} = 0,1 \text{ MPa}$$

Un module tangentiel est obtenu en dérivant l'équation de l'hyperbole :

$$E_t = K \text{ Pa} \left(\frac{\sigma_3}{\text{Pa}} \right)^n X^2$$

$$\text{où : } X = 1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \Phi)}{2 c \cos \Phi + 2 \sigma_3 \sin \Phi}$$

avec : c : cohésion
 Φ : angle de frottement
 σ_3 et σ_1 : contraintes principales
 K, n : coefficients sans unité

Le coefficient de Poisson est défini par une autre relation hyperbolique entre la déformation axiale ϵ_1 et la déformation radiale ϵ_3 :

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_3}{F + D \epsilon_3}$$

Les coefficients de Poisson initial ν_i et tangentiel ν_{ot} sont définis de la même manière par :

$$\nu_i = G - F \log_{10} \left(\frac{\sigma_3}{\text{Pa}} \right)$$

et :

$$\nu_t = \frac{G - F \log_{10} \left(\frac{\sigma_3}{\text{Pa}} \right)}{(1 - D(\sigma_1 - \sigma_3)/K \text{ Pa}(\sigma_3/\text{Pa})^n X)^2}$$

avec : G, F, D : coefficients sans dimension.

Et enfin, l'angle de frottement peut suivre une variation suivant la contrainte de confinement :

$$\Phi(\sigma_3) = \Phi - \Delta\Phi \log_{10} \left(\frac{\sigma_3}{\text{Pa}} \right)$$

Les paramètres principaux sont ceux qui caractérisent :

— la résistance : Φ (angle de frottement pour 0,1 MPa de confinement) et $\Delta\Phi$ (décroissance de l'angle de frottement entre 0,1 et 1 MPa) ;

— le module K (sans unité, mais en pratique équivalent au module d'YOUNG pour 0,1 MPa puisque si on prend $\text{Pa} = \sigma_3 = 0,1 \text{ MPa}$ dans la formule de E_i , on obtient $E = K$ en 0,1 MPa) et n (exposant de la loi d'accroissement du module fonction de la contrainte).

2. CLASSES DE MATÉRIAUX

2.1. Typologie étudiée

Un remblai en terre est composé de matériaux aux fonctions bien distinctes comme le précise le tableau 1. Par conséquent, une première exploitation de la banque consiste à rechercher le comportement moyen, typique de chaque classe. La description granulométrique de chaque matériau est synthétisée par la figure 1 qui représente les principales classes en fonction de la taille de la portion fine ($\log_{10}(\text{Cu})$), avec $\text{CU} = d_{60}/d_{10}$ où d_{60} est le diamètre de grain correspondant à 60 % de passant en poids).

Il apparaît que l'étalement de la granulométrie augmente avec la finesse du matériau. Ainsi on note une évolution continue de l'enrochement au drain, puis au filtre jusqu'au sol de noyau. Les matériaux de transition recouvrent, bien sûr, les filtres et les drains.

BARRAGES EN ENROCHEMENT

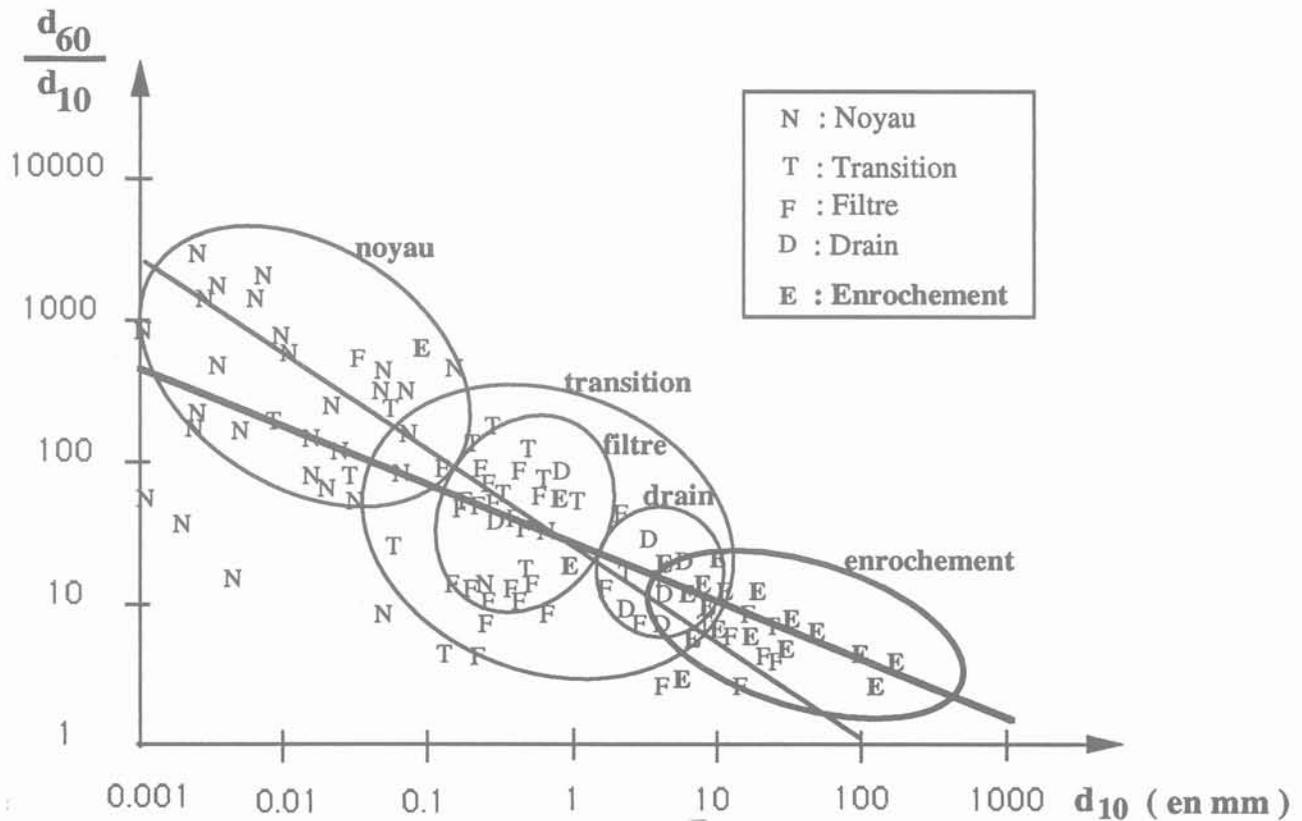


Fig. 1. — Variation de d_{60}/d_{10} en fonction de d_{10} (en échelle logarithmique).

Tableau 1. — Typologie des matériaux constitutifs d'un remblai en terre.

Fonction	Matériau
Etanchéité	noyau
Lutte anti-érosion	filtre
Drainage	drain
Stabilité	recharge
Transition	transition
Stabilité et insensibilité à l'eau	enrochement

2.2. Résistance fonction de classe

Les tableaux 2 et 3 montrent la répartition de Φ pour trois classes de matériaux au sein du barrage. Deux types de données concernant l'angle de frottement sont disponibles dans la banque :

- celles qui sont liés à $\Delta\Phi$ (tableau 2) ;
- et celles qui sont en dépendance étroite avec la cohésion c (tableau 3).

Sur les deux tableaux, la décroissance de l'angle de frottement interne de l'enrochement jusqu'au noyau avec plus de 50 % de fines, est nette.

Tableau 2. — Evolution de l'angle de frottement suivant la classe du matériau.

L'angle de frottement à $\sigma_3 = Pa = 0,1$ MPa correspondant à l'expression de Φ_1 donnée par :

$$\Phi(\sigma_3) = \Phi_1 - \Delta\Phi \log_{10} \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)$$

Classe	$\Phi_1(^{\circ})$			tg Φ_1		
	moyenne m	écart-type σ	σ/m	m	σ	σ/m
Enrochement	45,91	5,21	0,11	1,05	0,21	0,20
Filtre	39,83	5,63	0,14	0,85	0,18	0,21
noyau (f < 50 %)	36,39	7,78	0,21	0,75	0,20	0,26
noyau (f > 50 %)	30,00	2,30	0,08	0,58	0,04	0,06

On remarque sur le tableau 3 que l'angle de frottement lié à la cohésion est plus faible par rapport au cas où cet angle est lié à $\Delta\Phi$ et ceci pour toutes les classes de matériaux.

Tableau 3. — Evolution de l'angle de frottement suivant la classe du matériau.

L'angle de frottement correspondant à l'expression de Φ_1 donnée par :
$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \Phi$

Classe	$\Phi_1(^{\circ})$			$\operatorname{tg}(\Phi)$		
	moyenne m	écart-type σ	σ/m	m	σ	σ/m
Enrochement	42,00	2,94	0,07	0,90	0,09	0,10
Filtre	36,67	3,79	0,10	0,75	0,11	0,14
noyau (f < 50 %)	28,31	8,52	0,30	0,55	0,19	0,34
noyau (f > 50 %)	24,67	8,55	0,34	0,47	0,18	0,38

La décroissance de l'angle de frottement avec la contrainte est d'autant plus grande que le matériau est grossier, comme le montre le tableau 4. Elle varie de 9 degrés pour les enrochements, à 2 degrés pour les argiles fines du noyau. On note deux types de noyaux : ceux en argile et ceux en sable et grave argileux. La frontière entre les deux est $\Phi = 30^{\circ}$.

L'expression :

$$\Phi_{10}/\Phi_1 = (\Phi_1 - \Delta\Phi) / \Phi_1$$

du tableau 4 mesure la variation relative de Φ entre 0,1 MPa et 1 MPa.

2.3. Déformabilité des matériaux

Le module K varie considérablement suivant l'emplacement des matériaux. Les enrochements et les drains ont des valeurs moyennes voisines de 800, alors que les noyaux sableux et graveleux descendent à 330, et les noyaux d'argile fine atteignent la valeur de 50 (tableau 5).

Ce résultat met en évidence le risque de fissuration des barrages en enrochement à noyau argileux.

Tableau 4 — Décroissance de $\Delta\Phi$ de la recharge vers le noyau.

Classe	$\Phi_1(^{\circ})$		$(\Phi_1 - \Delta\Phi) / \Phi_1$		
	moyenne m	écart-type σ	m	σ	σ/m
Enrochement	9,6	4,0	0,85	0,11	0,13
Filtre	6,8	5,7	0,81	0,07	0,08
noyau (f < 50 %)	2,3	2,8	0,79	0,11	0,14

La croissance du module avec la contrainte est cependant d'autant plus forte que le pourcentage de fines augmente. Le tableau 5 montre un exposant n compris entre 0,25 et 0,4 pour les matériaux grossiers, et un exposant supérieur à 0,6 pour les matériaux de noyau. Ce phénomène est heureusement bénéfique car il diminue la déformabilité différentielle entre le noyau et les filtres ou drain qui reste cependant très forte pour les barrages de taille modeste.

L'écart-type du module K est très grand, car des valeurs très fortes ont été répertoriées. Cette dispersion est à la fois symptomatique de la difficulté de mesurer le module et de sa grande variabilité.

Le paramètre Rf présenté dans le tableau 5, est en moyenne soit 0,7 (enrochement, transition, recharges), soit 0,8 (filtre et drain).

Le tableau 6 donne une idée des valeurs de G, F et D pour les différents emplacements du barrage. On y note toutefois une valeur moyenne de G variant de 0,30 à 0,35, et une valeur moyenne de D qui varie de 6,5 à 9.

3. INFLUENCE CONJUGUÉE DE LA GRANULOMÉTRIE ET DE L'INDICE DES VIDES

3.1. Densité fonction de la granulométrie

La densité des échantillons ne devrait en fait dépendre principalement que de la granulométrie. En effet,

Tableau 5. — Evolution des paramètres définissant le module d'YOUNG en fonction des classes.

Classe	Rf		K		n	
	moyenne m	écart-type σ	m	σ	m	σ
Enrochement	0,71	0,10	813	691	0,40	0,21
Recharge	0,71	0,15	762	793	0,50	0,22
Transition	0,71	0,10	1 225	1 041	0,25	0,46
Drain	0,85	0,10	860	589	0,28	0,21
Filtre	0,81	0,11	941	583	0,46	0,21
Noyau (f < 50 %)	0,80	0,12	340	247	0,60	0,35
Noyau (f > 50 %)	0,69	0,10	50	40	0,70	0,10

Tableau 6. — Evolution des paramètres définissant le coefficient de Poisson en fonction des classes.

Classe	G		F		D	
	moyenne m	écart-type σ	m	σ	m	σ
Enrochement	0,34	0,08	0,16	0,10	6,69	3,66
Recharge	0,33	0,11	0,10	0,10	7,13	3,42
Transition	0,32	0,08	0,14	0,08	8,95	6,34
Drain	0,30	0,06	0,28	0,15	7,30	3,81
Filtre	0,35	0,03	0,16	0,10	6,52	3,02
Noyau (f < 50 %)	0,32	0,12	0,10	0,10	7,28	14,34

la plupart des matériaux sont compactés à l'énergie proche du Proctor Normal. Ainsi l'indice des vides devrait suivre l'évolution définie par BIAREZ et

ROPERS (1980) en fonction de l'étalement de la granulométrie et de la forme des grains, mais l'on note des variations importantes (fig. 2).

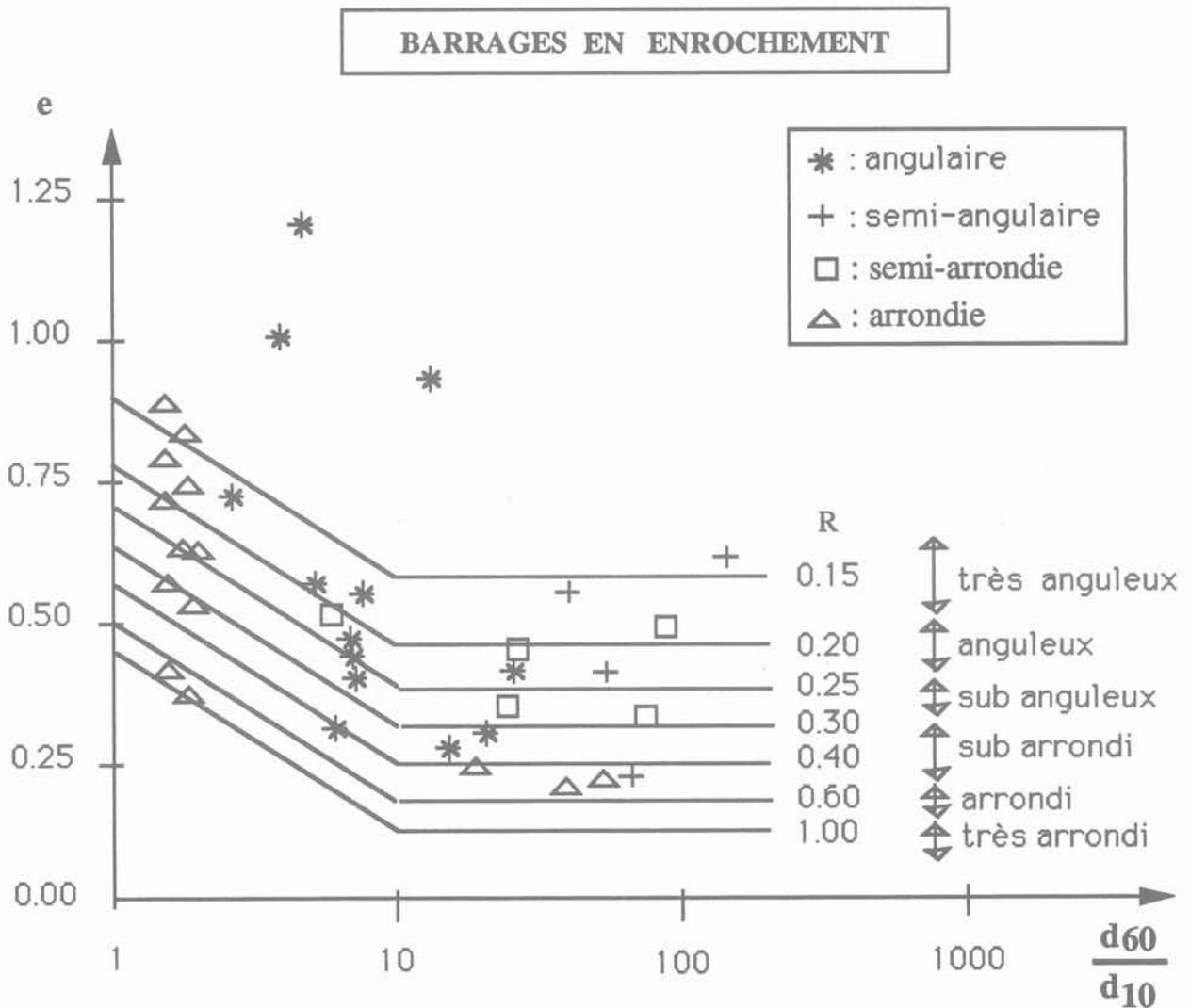


Fig. 2. — Variation d'indice des vides en fonction de $\frac{D_{60}}{d_{10}}$ et de l'angularité (sols avec moins de 10 % de fines ($d_{10} < 80$ microns)). Les droites proviennent de l'analyse de ROPERS.

Au-delà de $d_{60}/d_{10} = 15$, l'indice des vides ne devrait dépendre que de l'angularité ; en fait on constate seulement que les particules arrondies créent les arrangements les plus denses.

3.2. Résistance

a. Le rôle de l'indice des vides

La figure 3 représente la variation de l'angle de frottement interne du noyau, du filtre et de l'enrochement, avec l'indice des vides après compactage. Il semblerait que l'indice des vides n'ait d'influence significative que sur les matériaux du noyau, car en augmentant, il fait chuter l'angle de frottement.

b. Le rôle du pourcentage de fines

La figure 4 montre une décroissance linéaire de l'angle de frottement avec le pourcentage des fines. Cette tendance est confirmée malgré une dispersion importante.

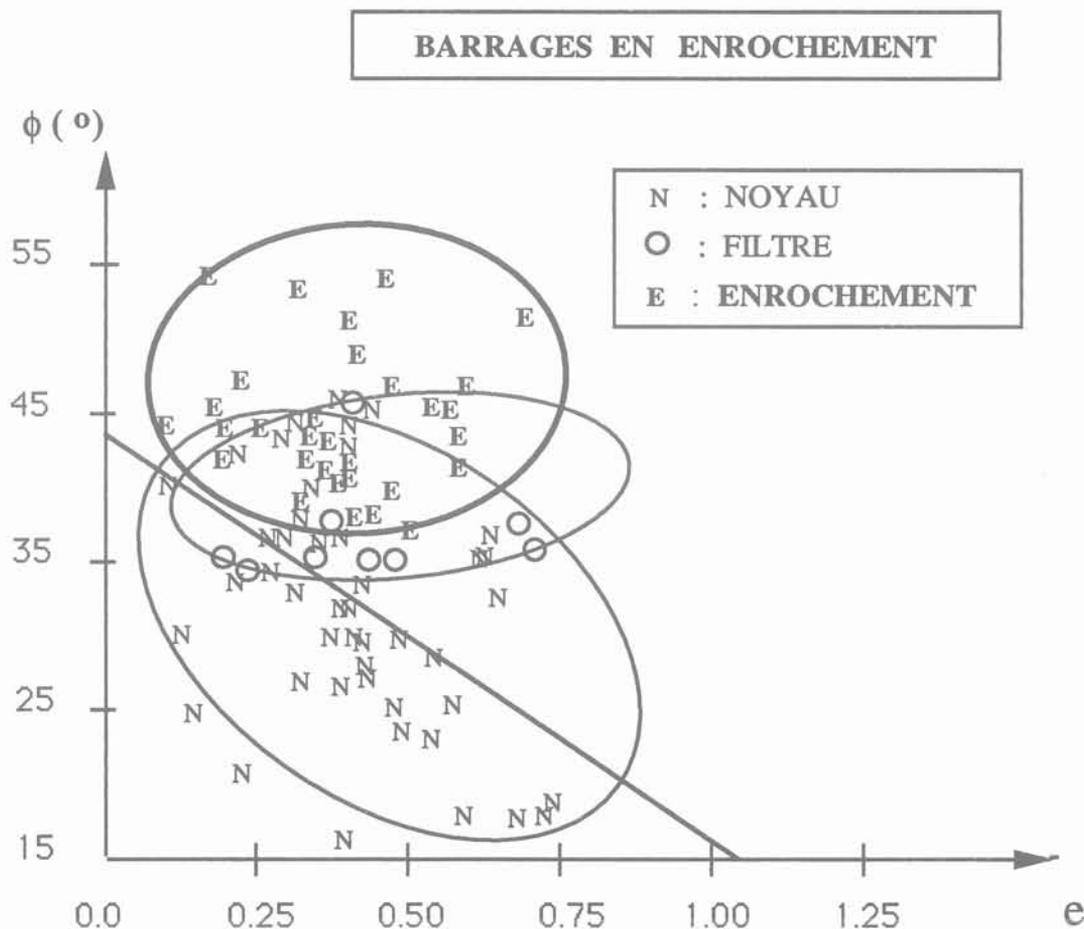
c. Le rôle de la limite de liquidité W_L

Nous observons sur la figure 5 que l'angle de frottement décroît quand W_L augmente. Ce graphique prend en compte les matériaux ayant une valeur de

$d_{10} < 20$ microns (en fait ce graphique reste presque inchangé pour $d_{10} < 80$ microns). Nous vérifions que :

- la plupart des points se situent au dessus de la courbe Φ_{pp} de l'angle de plasticité parfaite (TAIBI) ;
- la courbe de l'angle de frottement résiduel, Φ résiduel, se trouve encore plus en dessous de Φ_{pp} . Ce qui est conforme au fait que les résistances de cette banque ne correspondent pas aux Φ résiduels, mais au pic ;
- il existe un point particulier (point entouré) qui correspond au matériau du noyau du barrage de Mrica (d'une hauteur de 110 m, situé à Java, en Indonésie) dont quelques caractéristiques sont données au tableau 7.

La faible valeur de K (50) et un angle de frottement fort pour un noyau (30°) font de ce matériau un matériau particulier, d'autant plus que sa valeur de $W_L = 84\%$ est une valeur extrême de la banque de données. En fait ce matériau est représentatif des sols résiduels andosols et autres argiles riches en halloisite qui possèdent une grande résistance malgré des limites d'Atterberg importantes et une grande déformabilité.



BARRAGES EN ENROCEMENT

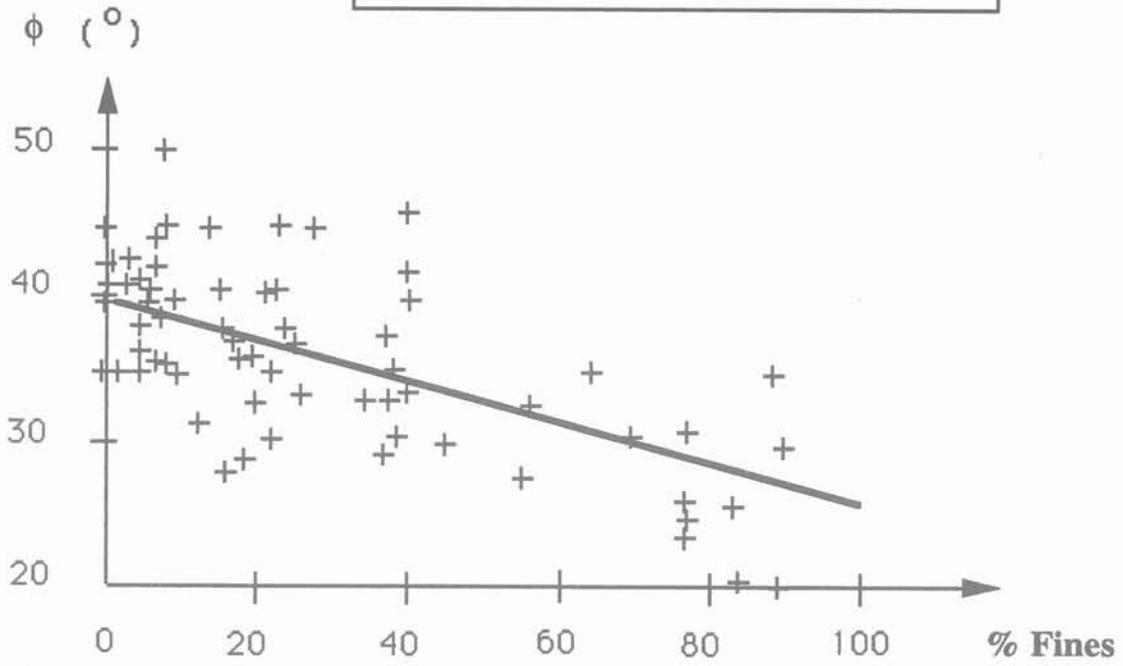


Fig. 4. — Variation de ϕ en fonction de pourcentage de fines (tous les matériaux du barrage).

BARRAGES EN ENROCEMENT

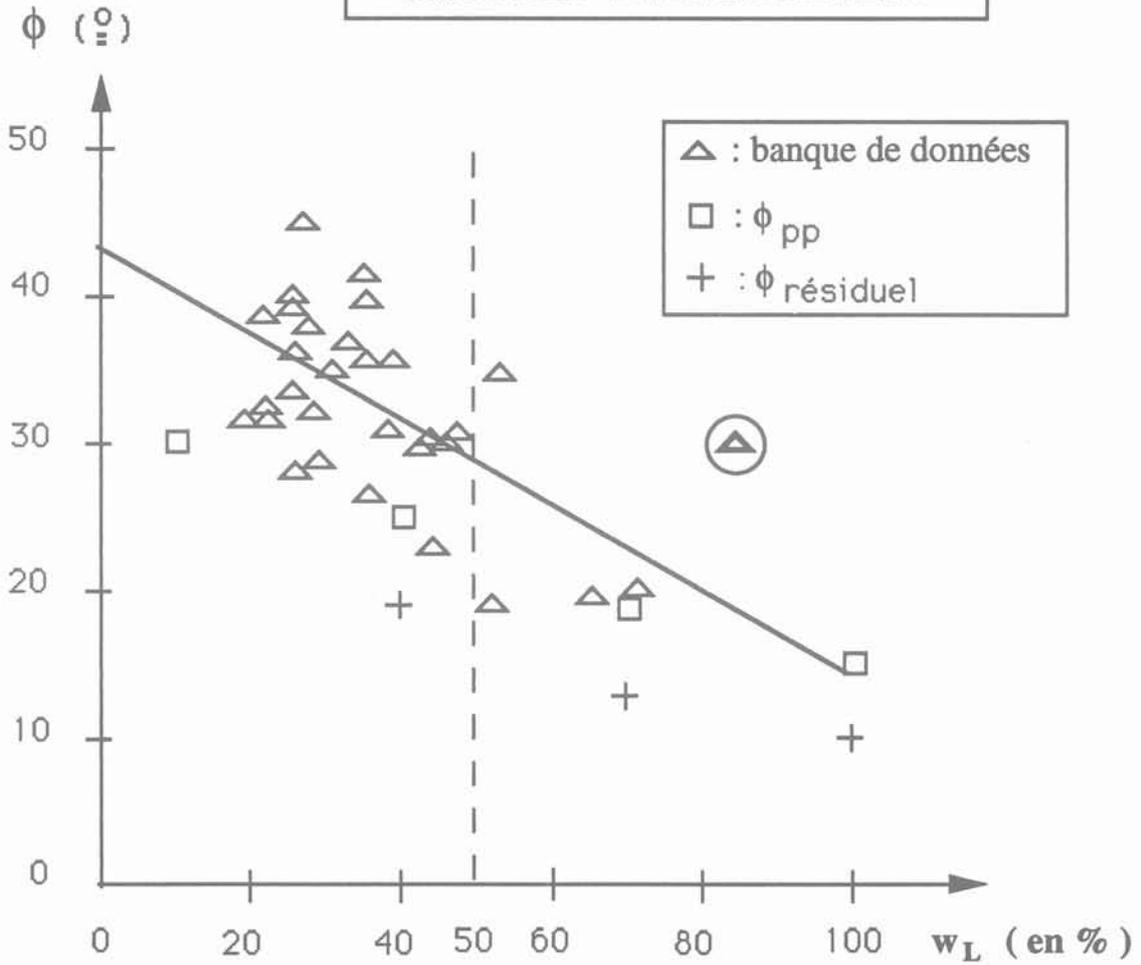


Fig. 5. — Variation de ϕ en fonction de w_L . (Les matériaux avec $d_{10} < 20$ microns).

Tableau 7. — Caractéristiques du matériau de noyau du barrage de Mrica.

Caractéristiques du sol					Paramètres de DUNCAN			
Type du sol	W_L	W	c (MPa)	Φ	Kur	K	n	Rf
Argile haloïsité	84	57,5	0,01	30	150	50	0,7	0,69

d. Le rôle de la taille des grains

Il est intéressant de noter une évolution en forme de cloche (fig. 6) qui laisserait supposer qu'au-delà d'un certain diamètre, l'angle de frottement diminue (à l'échelle d'un milieu continu). C'est sans doute parce que pour d_{10} grand e est grand aussi.

L'angle de frottement maximal est constaté pour $d_{10} = 1$ mm.

e. Paramètre $e.tg\Phi$ en fonction de d_{60}/d_{10} et de l'angularité

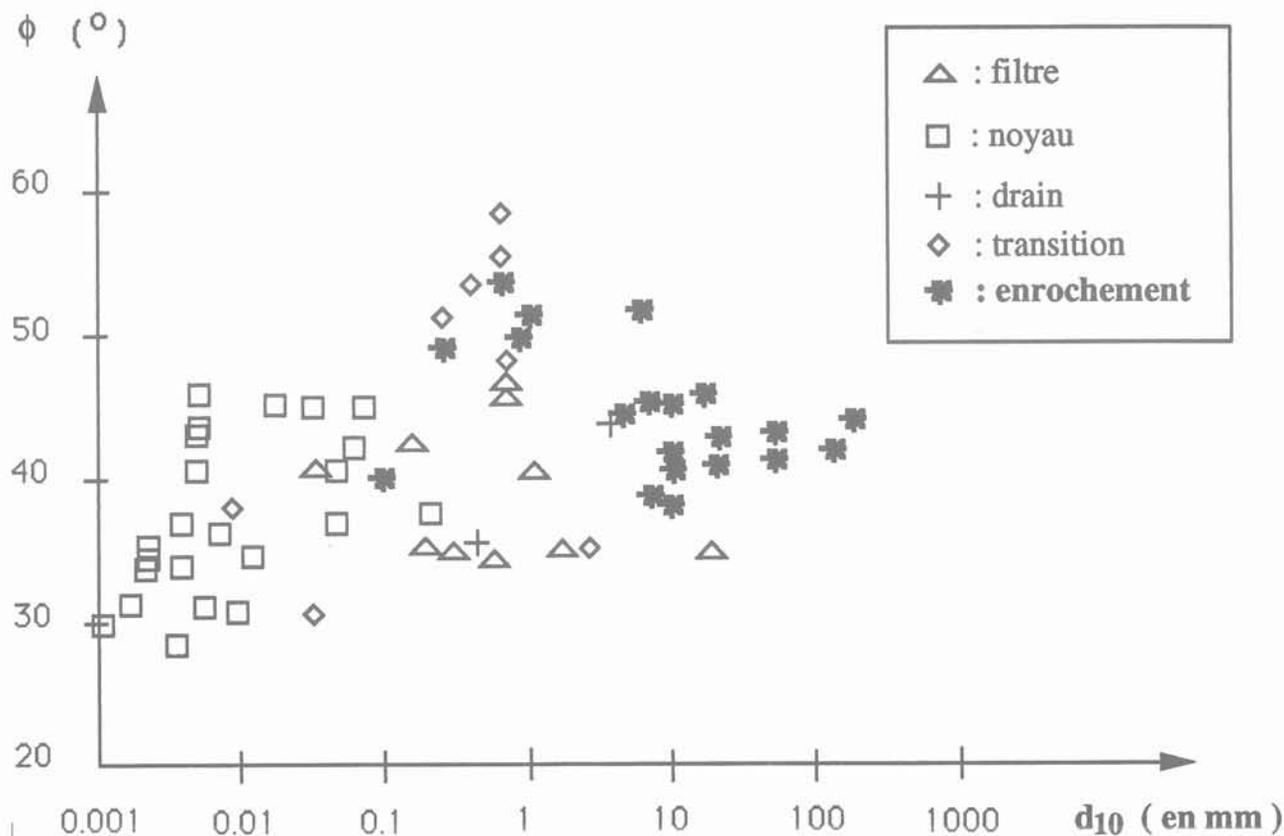
De même, sur la figure 7 nous avons remplacé e par $e.tg\Phi$ pour voir son évolution en fonction de d_{60}/d_{10} . Nous voyons les allures de courbes sembla-

bles à celles de e fonction de d_{60}/d_{10} . Nous vérifions un résultat intéressant annoncé par AL-ISSA pour le sable d'Hostun, à savoir $e.tg\Phi = 0,5$. En fait il existe une légère décroissance avec d_{60}/d_{10} jusqu'à $d_{60}/d_{10} > 15$. Là, est sous-jacente l'idée d'un arrangement optimum des petits grains dans les vides laissés par les gros.

D'autre part, le paramètre $e.tg\Phi$ varie peu pour un sol donné et il dépend non seulement de d_{60}/d_{10} et de l'angularité, mais également de la minéralogie du sol en question.

L'intérêt de cette expression est de déterminer, pour certains types de matériaux, la variation d'angle de frottement en fonction du compactage.

BARRAGES EN ENROCEMENT

Fig. 6. — Variation de Φ en fonction de d_{10} .

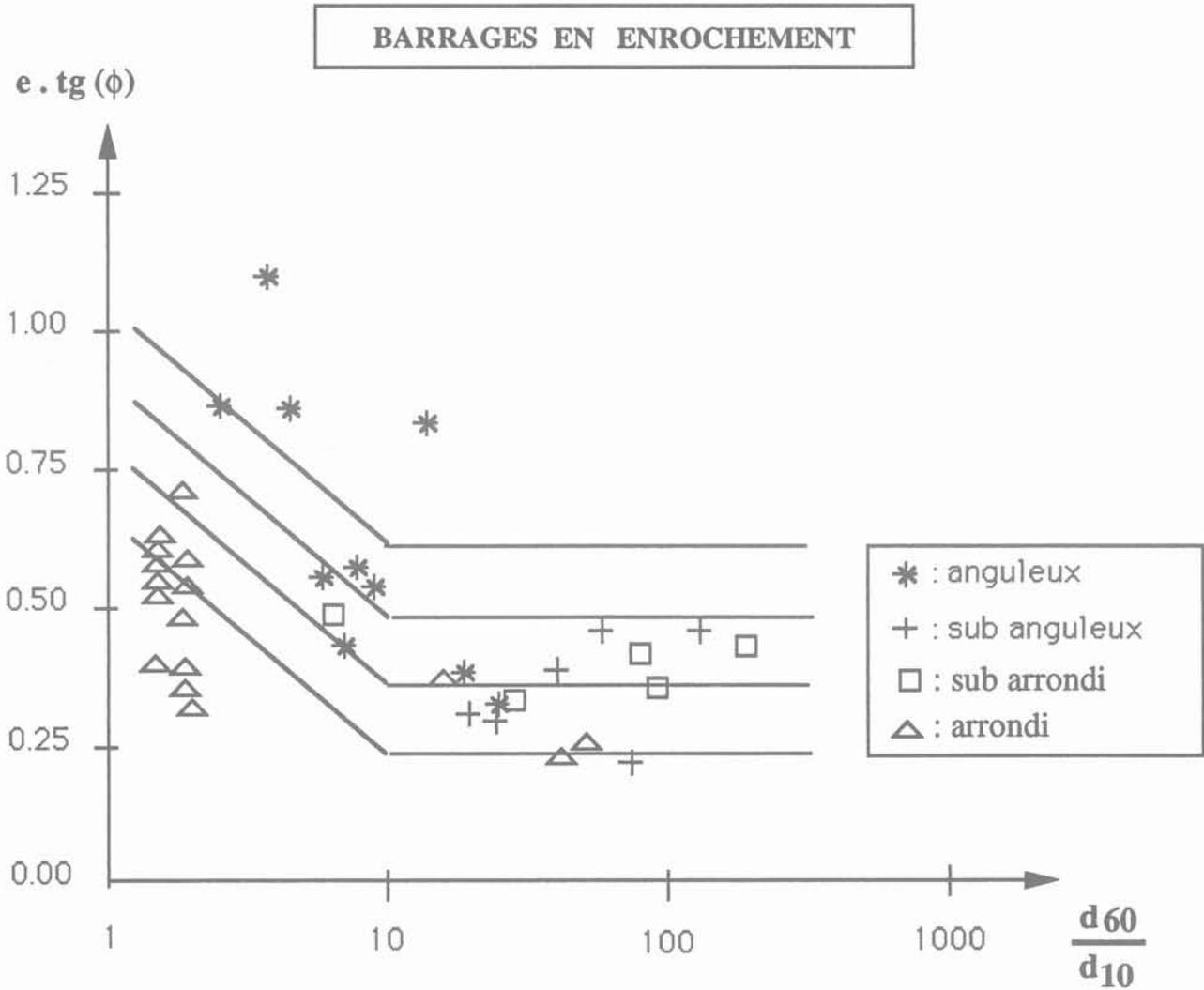


Fig. 7. — Hypothèse sur la variation de $e.tg(\phi)$ en fonction de $\frac{d_{60}}{d_{10}}$ et l'angularité (sols avec moins de 10 % de fines ($d_{10} < 80$ microns)).

3.3. Déformabilité

a. Le rôle de l'indice des vides

La figure 8 montre la baisse linéaire du module K avec l'indice des vides. Cette décroissance s'effectue de manière similaire pour le noyau d'une part, le filtre, le drain et la transition d'autre part.

La dispersion des valeurs de n dans la banque était telle que nous ne pouvions rien conclure sur la variation de n en fonction des vides pour l'ensemble des matériaux. Par contre, nous tirons profit du classement par catégorie de ces matériaux, comme nous le montre la figure 9.

La croissance est assez forte pour le noyau. En revanche, l'enrochement a un exposant décroissant qui traduit une tendance à module constant. En effet, après une rigidité initiale forte à moyenne d'enrochement, l'écrasement des particules limite la rigidification du matériau.

On remarque sur la figure 9 que pour des faibles valeurs d'indice des vides, la valeur de n est non loin de 0,5 pour le noyau et l'enrochement.

b. Le rôle de d_{10}

La figure 10 représente la variation de K en fonction de d_{10} . On remarque deux zones distinctes :

- dans la première zone où $d_{10} < 0,4$ mm, K croît avec d_{10} ;
- dans la zone où $d_{10} > 0,4$ mm, K décroît.

Mais on voit qu'il y a des valeurs de K entre :
 $0,1 \text{ mm} < d_{10} < 1 \text{ mm}$ ($100 < K < 4000$)
 qui sont supérieures à celles des autres zones :
 ($100 < K < 1000$).

Ce graphique nous amène aux remarques suivantes :
 — pour les matériaux d'enrochement, drain, filtre et transition (matériaux grossiers), K décroît avec d_{10} .

BARRAGES EN ENROCHEMENT

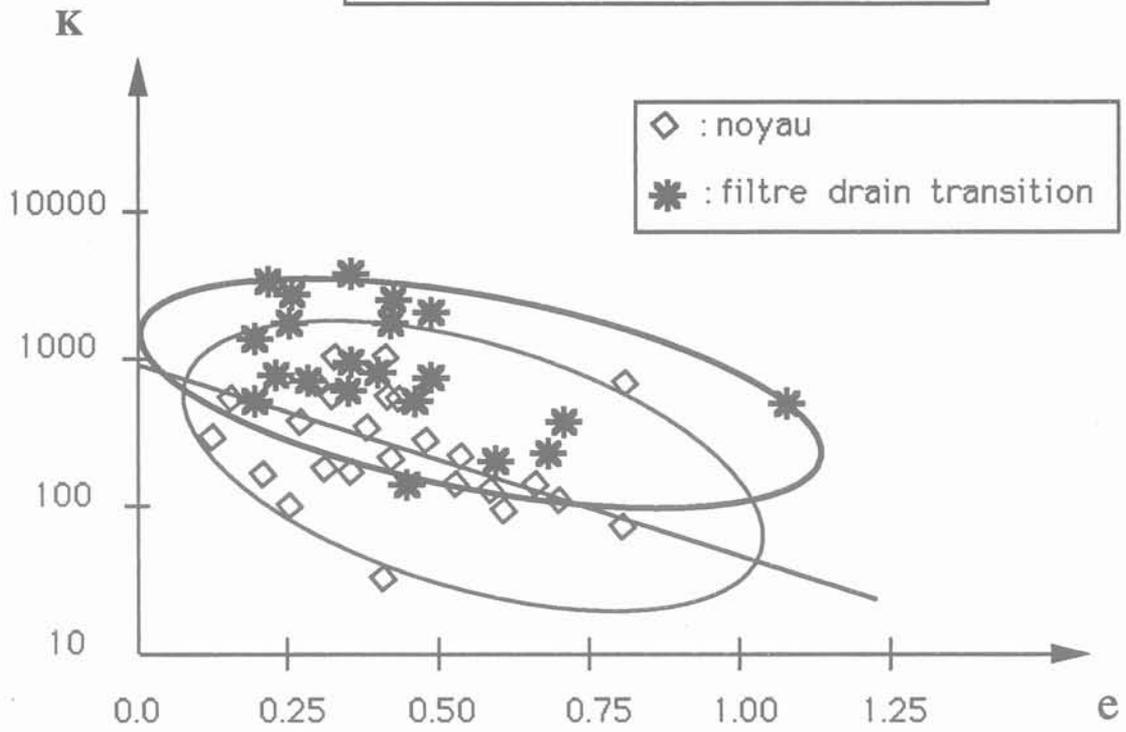


Fig. 8. — Variation du module K en fonction de l'indice des vides.

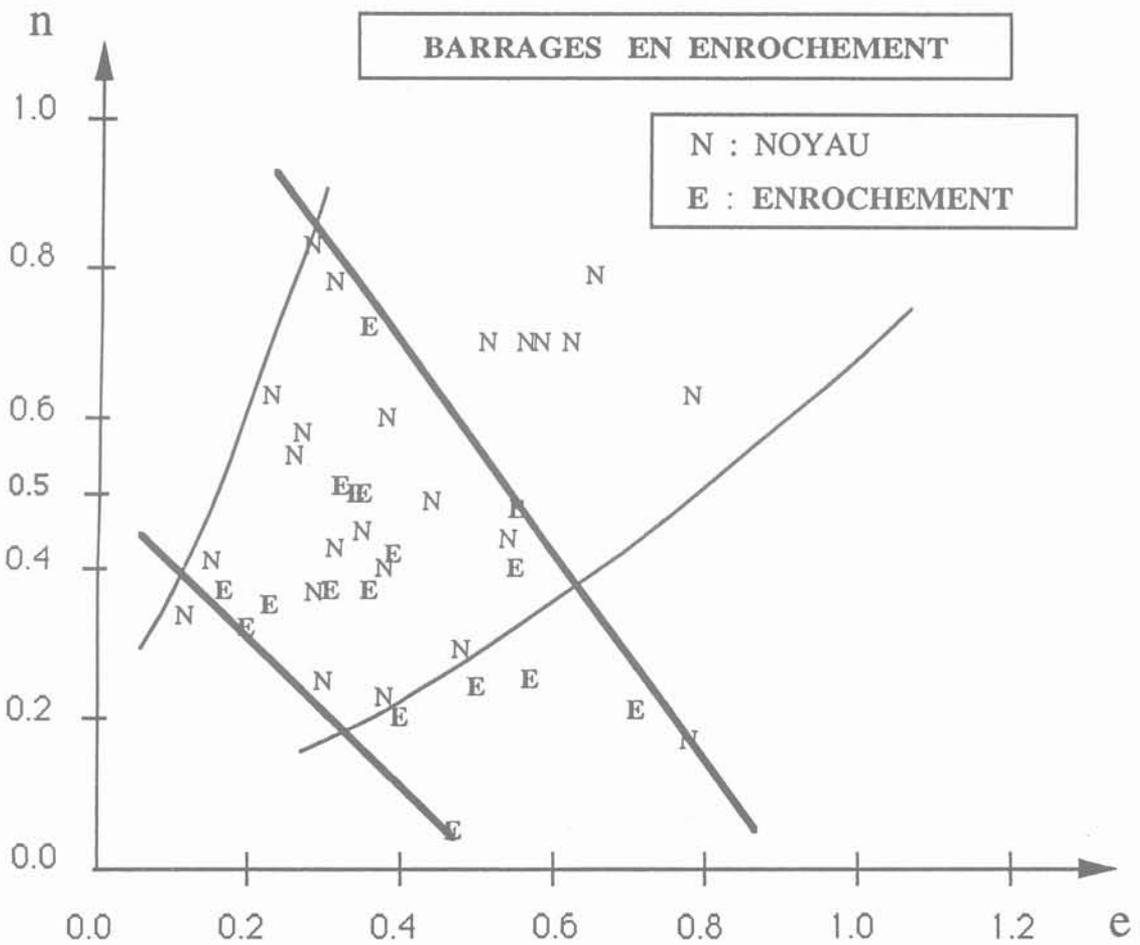


Fig. 9. — Variation de n en fonction de l'indice des vides.

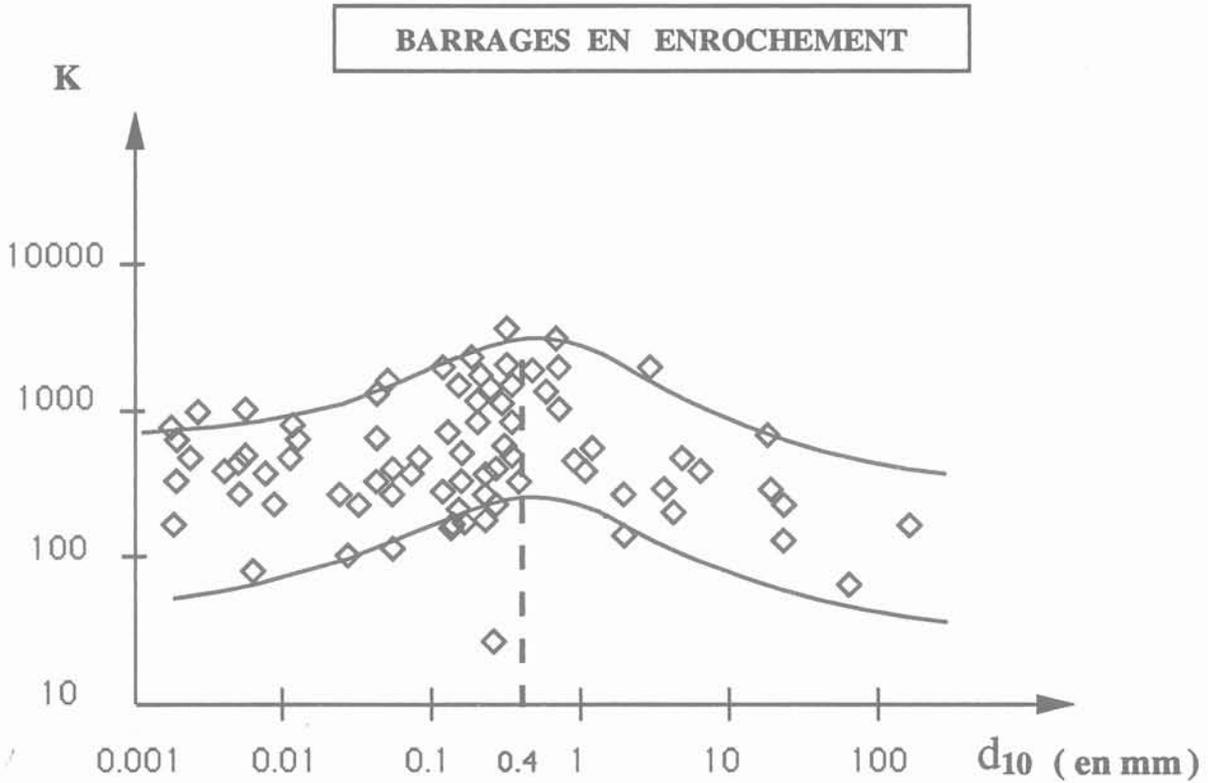


Fig. 10. — Variation du module K en fonction de d_{10} (tous les matériaux).

Cette décroissance est due à l'angularité des matériaux et aussi au manque de fines ;

— en revanche, K croît avec d_{10} pour les matériaux fins comme celui du noyau. Nous savons en effet que le module de Young E diminue avec le pourcentage de fines.

CONCLUSION

Quelques phénomènes essentiels concernant le comportement des sols ont été retrouvés et chiffrés par exploitation statistique de cette banque.

L'intérêt majeur de cette banque est de fournir un échantillon de paramètres suffisamment étoffés sur des matériaux difficiles à mesurer, pour en connaître leur ordre de grandeur et leur domaine de variation, ainsi que d'identifier le sens de variation de chaque paramètre en fonction des autres.

Cependant, si ces grandes tendances sont utiles pour des études d'avant-projet, elles sont à affiner par une analyse de cas, afin de réduire une importante dispersion.

BIBLIOGRAPHIE

AL-ISSA M. (1973), *Recherche de lois contrainte-déformation des milieux pulvérulents. Analyse de la validité des lois hyperboliques. Application aux pieux et barrages.* Thèse de Docteur Ingénieur, ECP.

BIAREZ J., HICHER P.Y. (1990), *Lois de comportement des sols remaniés et des matériaux granulaires.* Notes de cours (tome 1) ECP.

BIAREZ J., TAIBI S. (1991), *Classement des paramètres en mécanique des sols.* Séminaire ECP, 18-22 novembre.

CHANG C.Y., DUNCAN J.M. (1970), *Analysis of soil movement around a deep excavation.* Proc. ASCE Vol. 96, n° SM5.

CHARLES J.A., SOARES M.M. (1984), *Stability of compacted rockfill slopes,* Géotechnique, 34, p. 61-70.

FRY J.J., FLAVIGNY E., MAMBA M. (1989), *Classification et propriétés des enrochements : cas d'un grès.* Proceeding of the 12th. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio De Janeiro, p. 713-714.

JANSSON S., NILSSON A. (1991), *Experience of halloysitic clay in damfills and foundations at the Mrica dam, Indonesia.* CIGB 1991, Vienne, Q 61 R 1.

KONDNER R.L. (1963), *Hyperbolique stress-strain response : cohesive soils.* ASCE. J. Soil Mech. and Found. Div., N° SM1, p. 115-143.

NEDJAT N. (à paraître), *Lois de comportement des barrages en enrochement.* Thèse de Doctorat, ECP.

ZERVOYANNIS C. (1982), *Etude synthétique des propriétés mécaniques des argiles saturées et des sables sur chemin œdométrique et triaxial de révolution.* Thèse de Docteur Ingénieur, ECP.