

DETERMINATION DE LA COURBE GRANULOMETRIQUE A PARTIR DES PARAMETRES CARACTERISANT L'ECRASEMENT DES GRAINS

*Kahina DAHOUMANE et Bachir MELBOUCI
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Laboratoire Géo-matériaux Environnement et Aménagement
Email : k_dahoumane@yahoo.fr*

RESUME

La détermination de la résistance à l'écrasement des matériaux granulaires est très importante pour comprendre leur comportement dans le domaine du génie civil. En effet, cet écrasement est influencé par les dimensions de l'échantillon, sa densité, la contrainte appliquée, la taille et la forme des grains. Ces difficultés peuvent être surmontées en développant un modèle mathématique, basé essentiellement sur les propriétés du matériau, telles que la taille des grains, le coefficient de courbure (C_c), le coefficient d'uniformité (C_u), le coefficient d'écrasement (B_{10}) et la contrainte normale appliquée (σ_i). Pour ce faire, une série d'essais a été menée sur le matériau granulaire grès de classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) aux essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Les résultats ont été utilisés pour développer le modèle et une formulation, permettant de déterminer le taux d'écrasement des grains, a été proposée à partir des caractéristiques des courbes granulométriques obtenues après les essais de cisaillement.

MOTS CLES : Grès / Granulométrie / Caractéristiques / Cisaillement / Ecrasement.

ABSTRACT

The determining of the crushing strength of granular materials is very important to understand their behavior in the field of civil engineering. Indeed, this crash is influenced by the dimensions of the sample, its density, the applied stress, the grain's size and shape. These difficulties can be overcome by developing a mathematical model, based mainly on the properties of material such as grain size, the curvature's coefficient (C_c), the uniformity's coefficient (C_u), crushing coefficient (B_{10}) and the applied normal stress (σ_i). To do this, a serie of shear tests was conducted on sandstone granular classes (3.15 / 5) (5/8) (3.15 / 8). The results were used to develop the model and a formulation which determine the rate of the crushing grains was proposed from the characteristics of the grain size distribution curves obtained after shear tests.

KEYWORDS: Sandstone / Granulometry / Characteristics / Shear / Crushing.

1. INTRODUCTION

Les matériaux granulaires sont universellement répandus dans la nature et entrent dans de nombreux domaines de l'activité humaine ; ils sont omniprésents sous bien des formes et des tailles différentes dans notre environnement. La maîtrise de ces matériaux granulaires, passe par la caractérisation de ses granulats. Ces derniers font partie des structures de génie civil tels que : les barrages, les fondations, les chaussées ... etc.

Dans des conditions environnementales dures, notamment le cisaillement ou le tassement, les grains du sol subissent un phénomène d'écrasement, qui engendre leurs fragmentations sous différents aspects. Ce qui provoque une modification de la granulométrie (dimension, forme) des grains et de la porosité de ces matériaux, induisant alors une variation de leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Le pourcentage de dégradation des grains, dépend de la composition minéralogique, de leur dureté et de leur composition chimique.

Ce travail a pour objectif de déterminer la courbe granulométrique à partir des paramètres caractérisant l'écrasement des grains.

2. LE PHENOMENE D'ECRASEMENT DES GRAINS

Les grains du sol peuvent subir un phénomène de rupture ou d'écrasement sous des effets de cisaillement, de compression ou de tassement. Ce phénomène a été mis en évidence par plusieurs études qui ont permis de comprendre comment le phénomène de rupture des grains

se manifeste et quels sont les paramètres et les facteurs permettant de quantifier cette rupture.

2.1. Ecrasement des grains selon différents auteurs

Différentes classifications de la rupture des grains ont été proposées :

2.1.1. Ecrasement des grains selon (Ramamurthy, 1969) [1]

Ramamurthy en 1969, a proposé quatre modes de ruptures des grains (fig. 1):

- 1-Rupture des aspérités.
- 2-Cisaillement des aspérités.
- 3-Rupture des angularités.
- 4-Le fendage des grains de sol.

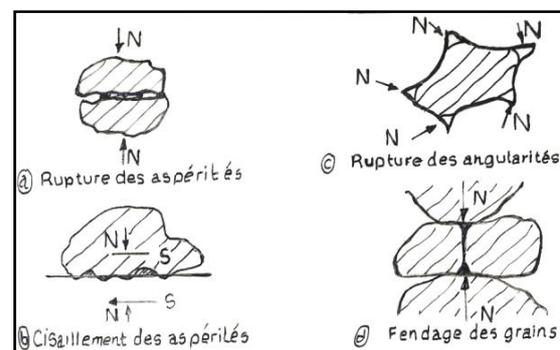


Figure 1: Différents types de rupture des grains [1].

2.1.2. Ecrasement des grains selon (Guyon et Troadec, 1994) [2]

Guyon et Troadec (1994) ont classé la rupture des grains selon trois modes : la fracture, l'écaillage et l'abrasion (fig. 2).

La fracture : un grain se casse pour en donner de nouveaux de tailles sensiblement égales et inférieures à la taille du grain original.

L'écaillage (ou l'attrition) : un grain se casse pour donner un grain de taille un peu inférieure et plusieurs de plus petite taille.

L'abrasion : le résultat est un grain ayant sensiblement la même taille que le grain original avec une production de particules de taille très fines.

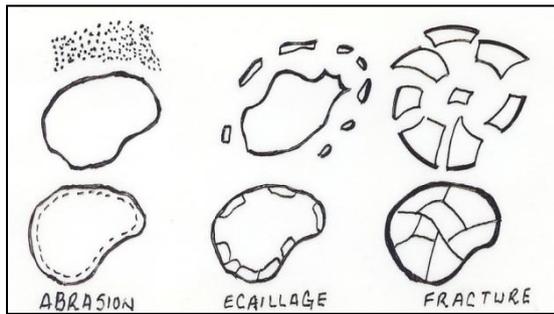


Figure 2: Différents modes de rupture des grains [2].

2.2. Paramètres influençant la rupture des grains

Les paramètres susceptibles d'influencer le phénomène de rupture des grains sont :

- 1) La forme des grains (arrondis ou anguleux).
- 2) La taille des grains.
- 3) La répartition granulométrique.
- 4) La présence d'eau.
- 5) L'altération naturelle des grains.
- 6) La compacité.
- 7) Le chemin de contrainte.
- 8) L'état de déformation.
- 9) L'écrasement en fonction du temps (fluage).

2.3. Méthodes empiriques évaluant le taux d'écrasement des grains

Plusieurs auteurs ont défini le taux d'écrasement à partir de l'évolution ou de l'étalement de la courbe granulométrique. En

fait, tous les paramètres sont déterminés à partir de l'évolution de la taille des grains avant et après essai. On s'intéressera aux deux paramètres caractérisant l'écrasement C_u et B_{10}

- **Le coefficient d'uniformité** est défini par l'équation 1:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

D_{60} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 60%

D_{10} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 10%

Ce coefficient permet de savoir si la granulométrie est étalée ($C_u > 2$) ou serrée ($C_u < 2$).

- **Lade et Yamamuro (1996) [3]** ont défini un paramètre « B_{10} » tel que ses valeurs sont comprises entre 0 (sans rupture des grains) et 1 (la taille des grains est très petite par rapport à la taille initiale) (équat. 2).

$$B_{10} = 1 - \frac{D_{10f}}{D_{10i}} \quad (2)$$

D_{10i} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 10% avant essai.

D_{10f} : diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 10% après essai.

Ce coefficient caractérise le taux de rupture des grains. Cette rupture entraîne une diminution de la taille des grains qui induit une augmentation du pourcentage des particules fines et par conséquent une modification de la distribution granulométrique et l'état de surface des grains. Le paramètre majeur influençant la rupture des grains est l'évolution de l'étalement granulométrique.

3. IDENTIFICATION DU MATERIAU DE L'ETUDE

Le matériau étudié est le grès, il est extrait au lieu dit « Yakourène », situé à 70 Km à l'Est du chef lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou. C'est une roche sédimentaire qui provient de la décomposition et de la transformation de roches anciennes. Cette roche détritique est formée de grains de nature variable (quartz, feldspaths, calcaire...). Le matériau qui lie les grains entre eux est généralement composé de silice, de carbonate de calcium ou d'oxyde de fer. La rupture de grès est caractérisée généralement par la fracture du ciment liant les grains, et rarement par la rupture des grains.

Les blocs de grès sont concassés en trois classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) représentées en figure 3.



Figure 3: Les échantillons du matériau grès utilisés pour cette étude.

3.1. Caractéristiques

Les grès d'origine miocène sont de couleur ocreuse, friables à ciment carbonaté. Il s'agit de grès silico-argileux. Les principaux minéraux des grès miocènes donnés par (l'O.R.G.M) de Tizi-Ouzou sont présentés dans le tableau (1) suivant :

Tableau 1 : Composition minéralogique du grès miocène.

Si O ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	PAF
56,18 %	1,07 %	9,20% à 14,10 %	12,58 %	12,58 %
à 76,30 %	à 2,96 %		à 14,88 %	à 13,69 %

4. ESSAIS DE LABORATOIRE : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS

Les essais de cisaillement sont menés en faisant varier les paramètres suivants :

- Les classes granulaires : (3,15/5), (5/8) et (3,15/8),
- La contrainte normale (100, 200, 300 et 400 kPa),

Les analyses granulométriques des divers échantillons ont été réalisées avant et après chaque essai de cisaillement. Les résultats sont présentés sous forme de courbes contraintes déformations. Pour mieux illustrer le comportement du matériau au cisaillement, quelques grains ont été colorés pour faciliter de suivre leur comportement sous cisaillement. Ces grains ont été déposés le long du plan séparant les deux demi- boîtes (le plan de cisaillement) (fig. 4). Après cisaillement, les grains colorés ont été écrasés et différents modes de ruptures ont été observés (fig. 5) : l'abrasion, l'écaillage, la fracture et même le fendage des grains. Il faut signaler que l'écrasement des grains induit une production de particules fines. Les photos prises après écrasement en témoignent de la cassure des grains.



Figure 4 : Grès (5/8) avant cisaillement.



Figure 5 : Grès (5/8) après cisaillement sous 300 kPa.

4.1. Courbes contraintes-déformations

La figure (6) présente les courbes $\tau = f(\Delta L)$ du matériau grès pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les contraintes normales 100, 300 et 400 KPa.

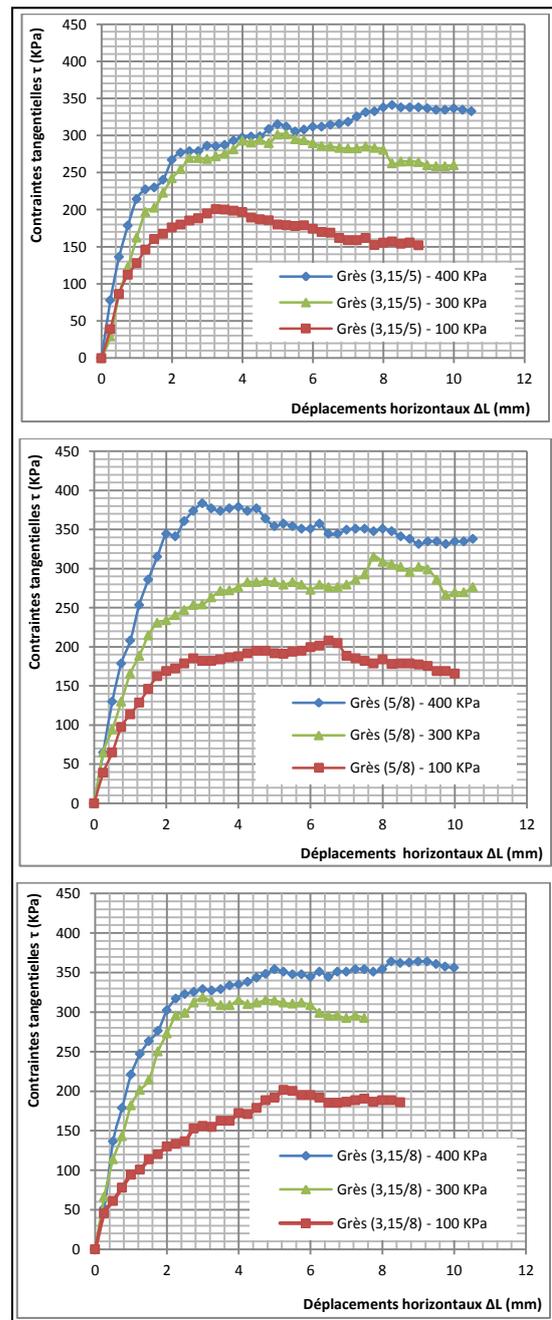


Figure 6 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8) sous les contraintes normales (100,300 et 400 kPa).

La contrainte de cisaillement augmente en fonction de la contrainte normale appliquée (fig. 6). L'application d'une contrainte normale de plus en plus importante engendre un enchevêtrement et un frottement de plus en plus important entre les grains, ce qui empêche leur déplacement horizontal les uns par rapport aux autres et seront ainsi, plus susceptibles à se casser qu'à se déplacer, tout en sachant que la force nécessaire pour casser un grain est beaucoup plus importante que celle nécessaire pour le déplacer.

La résistance au cisaillement maximale est obtenue pour la classe granulaire (3,15/8) (fig. 7). Ceci peut s'expliquer par le fait que le grès est un matériau fragile, rugueux et qu'il s'effrite facilement à cause du ciment qui lie les grains entre eux. D'où la rupture du grès est caractérisée par la fracture du ciment mais pas des grains, qui eux restent entiers.

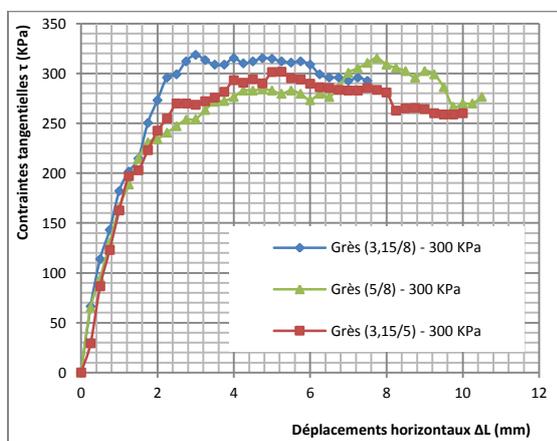


Figure 7 : Courbes contraintes - déformations du matériau grès sous une contrainte normale fixe de 300 KPa pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).

4.2. Courbes granulométriques avant et après essai de cisaillement

La figure (8) ci-après, présente les courbes granulométriques du matériau grès pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 KPa.

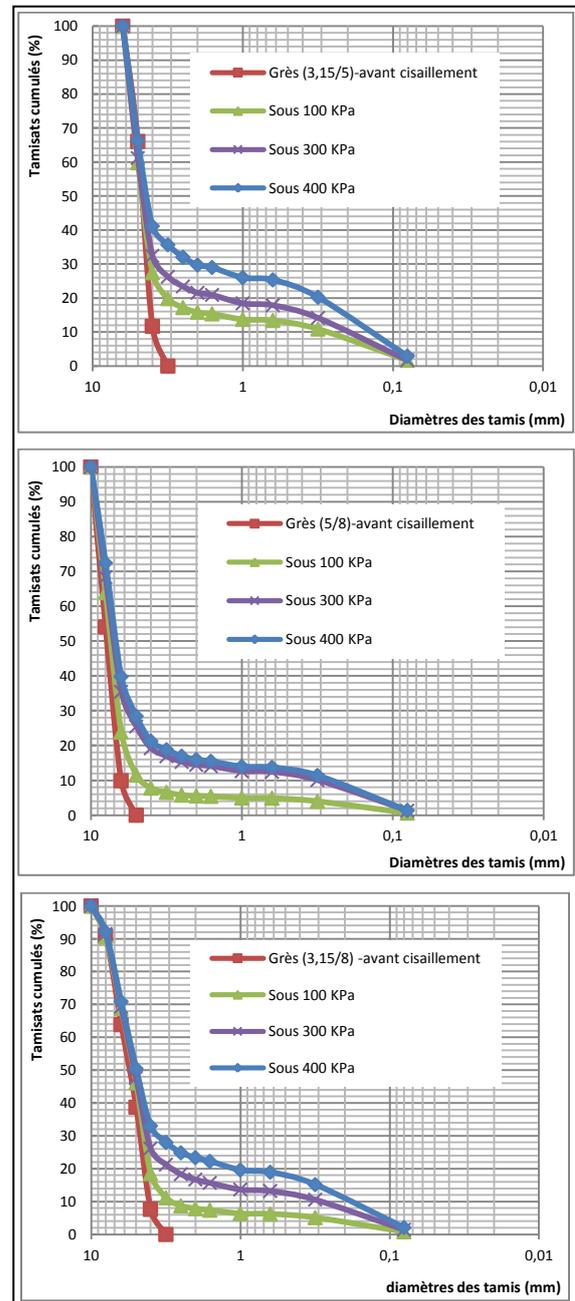


Figure 8 : Courbes granulométriques du matériau grès pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8), avant et après cisaillement sous les contraintes normales 100, 300 et 400 kPa.

L'étalement des courbes granulométriques évolue en fonction de la contrainte normale appliquée, ce qui se traduit par un écrasement de plus en plus important des grains [4]. Plus la contrainte normale augmente, plus les courbes granulométriques après essai se décalent et s'étalent davantage ; ce qui se traduit par des écrasements de plus en plus importants. En effet, les grains sont plus serrés sous les fortes contraintes normales et sont ainsi plus exposés à l'écrasement.

Les courbes granulométriques sous une contrainte normale de 300 KPa (fig. 9), montrent que c'est la courbe de la classe (5/8) qui s'étale plus par rapport aux classes (3,15/8) et (3,15/5). Ceci s'explique par le fait que les gros grains (5/8), présentent des aspérités et sont sujettes à s'écraser beaucoup plus que les grains de petites tailles [1]. Les petits grains se redistribuent dans les interstices existants et cela va provoquer une faible déformation avec un faible écrasement des grains (C'est le cas de la classe (3,15/8)). La classe granulaire est un facteur très important sur l'écrasement des grains. Notre étude concorde avec les différentes études effectuées par [5], [6] et [7]. Elles montrent qu'une granulométrie serrée (5/8) favorise plus de rupture des grains tandis qu'une granulométrie étalée (3,15/8) provoque une meilleure redistribution des forces intergranulaires, donc moins de cassure de grains.

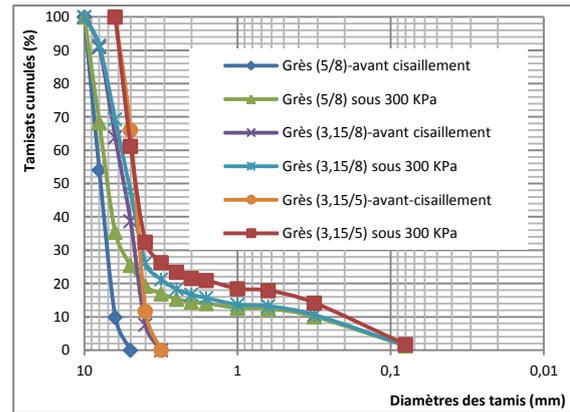


Figure 9 : Courbes granulométriques du matériau grès avant et après cisaillement sous 300KPa pour les classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).

5. PROPOSITION D'UNE FORMULATION

Pour quantifier le taux de rupture des grains observé précédemment sur les courbes granulométriques, les coefficients C_u et B_{10} ont été calculés. Une formulation, permettant de déterminer le taux d'écrasement des grains, a été proposée à partir des caractéristiques des courbes granulométriques obtenues expérimentalement.

Le principe du tracé des courbes granulométriques théoriques consiste à combiner : (le coefficient de courbure C_c , le coefficient d'uniformité C_u , le coefficient d'écrasement B_{10} et la contrainte normale appliquée σ_i), pour trouver les équations des courbes de tendance.

Pour la validation de la formulation, une évaluation statistique du calcul d'erreur entre les courbes granulométriques théoriques et expérimentales a été menée à la fin de cette étude.

5.1. Démarche suivie pour la proposition de la formulation

La formulation proposée s’inspire d’une étude récente, développée par Bartake et Singh. en 2007 [8], pour la détermination de la résistance à l’écrasement des matériaux granulaires, en développent un modèle mathématique généralisé. Cette méthodologie est basée essentiellement sur les propriétés physiques du matériau granulaire, telles que la taille des grains, le coefficient d’uniformité (Cu), le coefficient de courbure (Cc) et le coefficient caractérisant l’écrasement (B₁₀). Elle est aussi utilisée pour développer un modèle mathématique généralisé pour la détermination des taux d’écrasement des matériaux granulaires. Un tel modèle est très utile pour surmonter les difficultés associées aux enquêtes expérimentales, qui sont assez lourdes et fastidieuses.

La courbe théorique s’écrit sous la forme de l’équation 3 suivante:

$$y = Ae^{Bx} \tag{3}$$

Où : A et B sont les coefficients qui régissent cette forme exponentielle.

Les valeurs de A et B sont données comme suit :

$$A = (3B_{10} + a) \frac{C_c}{C_u} \tag{4}$$

$$B = \left(\frac{B_{10}}{\sigma_i} \sigma_1 + b \right) \tag{5}$$

Avec :

Cc est le coefficient de courbure.

Cu est le coefficient d'uniformité.

B₁₀ est le coefficient d'écrasement.

σ_i est la contrainte normale sous 1Bar (σ₁ = 1Bar).

σ_i est la contrainte normale variant de 1 à 4 Bar (σ_i = 1, 3 et 4 Bar).

En plus de ces paramètres (Cu, Cc, B₁₀, σ₁ et σ_i), deux paramètres (a et b) sont rajoutés pour permettre de mieux ajuster la courbe théorique à la courbe expérimentale.

D’où : l’équation (3) précédente s’écrit sous forme de l’équation 6 ci-dessous :

$$y = \left[(3B_{10} + a) \frac{C_c}{C_u} \right] e^{\left(\frac{B_{10}}{\sigma_i} \sigma_1 + b \right) x} \tag{6}$$

Par analogie avec les courbes granulométriques, on aura le pourcentage de tamisât cumulé donné par l’équation 7.

$$T(\%) = \left[(3B_{10} + a) \frac{C_c}{C_u} \right] e^{\left(\frac{B_{10}}{\sigma_i} \sigma_1 + b \right) D} \tag{7}$$

Les valeurs des paramètres d’ajustement (a) et (b) pour matériau grès, en fonction de la contrainte normale (σ_i) et de la classe granulaire, sont données respectivement par les tableaux (2) et (3) suivants :

Tableau 2 : valeurs du paramètre d’ajustement (a) pour le matériau grès, en fonction de la contrainte normale (σ_i) et la classe granulaire.

Paramètre « a »				
Matériaux	Contrainte normale σ _i (bar)	Classe granulaire		
		(3,15/5)	(5/8)	(3,15/8)
Grès	1	6,0759	2,2630	4,8820
	3	10,0946	8,2419	11,3645
	4	55,8914	11,7440	23,6433

Tableau 3 : Valeurs du paramètre d’ajustement (b) pour le matériau grès, en fonction de la contrainte normale (σ_i) et de la classe granululaire.

Paramètre « b »				
Matériaux	Contrainte normale σ_i (bar)	Classe granululaire		
		(3,15/5)	(5/8)	(3,15/8)
Grès	1	-0,4791	0,1362	0,1085
	3	0,0974	-0,0306	0,0018
	4	0,1079	0,0414	0,0258

6. COMPARAISON OU VALIDATION DE LA FORMULATION

Pour valider le modèle, les courbes théoriques ont été comparées aux courbes expérimentales et une évaluation statistique du calcul d’erreur a été menée.

6.1. Comparaison des courbes granulométriques expérimentales et théoriques

La figure (10) montre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques obtenues pour le matériau grès de classe (5/8) après cisaillement sous 100, 300 et 400kPa.

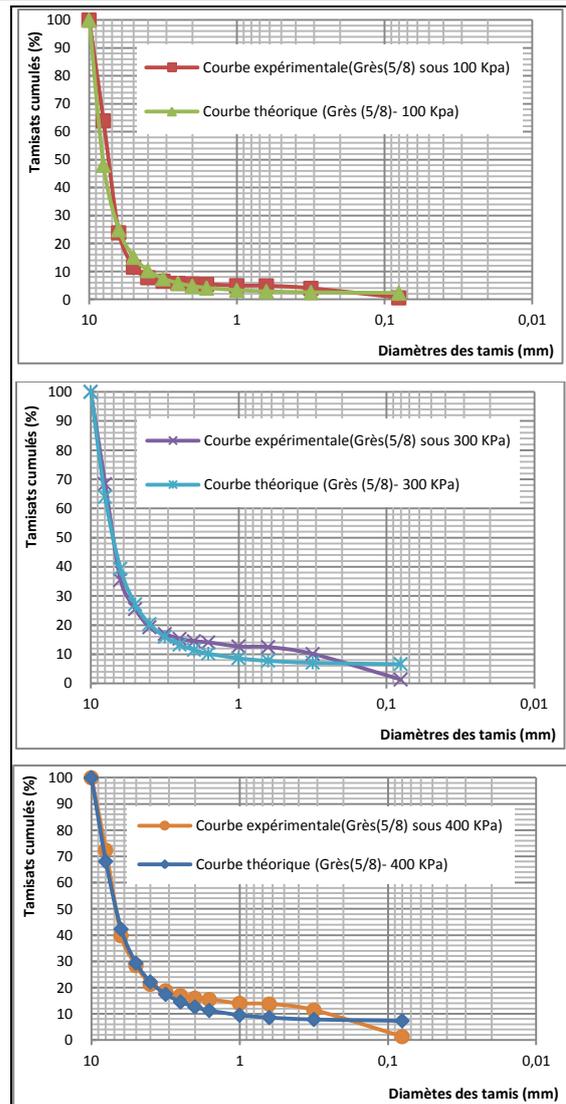


Figure 10 : Courbes granulométriques expérimentales et théoriques pour le matériau grès (5/8) sous 100, 300 et 400 kPa.

La figure (10) montre un très bon calage des courbes théoriques aux courbes expérimentales pour la classe granulométrie (5/8) et cela quelque soit la contrainte appliquée (100, 300 et 400 kPa). Les mêmes résultats ont été obtenus pour les classes granulaires (3,15/5) et (3,15/8). Les écarts types obtenus entre les courbes granulométriques théoriques et expérimentales, sont largement inférieurs à 30%. Donc on peut conclure que la

formulation proposée s'applique parfaitement au matériau étudié.

7. CONCLUSION

L'ensemble des résultats obtenus ont permis de conclure que :

- Au cours des essais de cisaillement, la déformation est plus grande pour les échantillons de classe (5/8) que pour ceux des classes (3,15/8) et (3,15/5). Plus les grains sont petits plus ils sont sains.
- La granulométrie serrée (5/8) engendre plus de rupture que la granulométrie étalée (3,15/8).
- Tous les échantillons étudiés ont montré un écrasement appréciable sous cisaillement à contrainte normale maximale de 400 kPa, particulièrement pour la classe granulaire (5/8).
- La formule proposée présente des bons résultats, car les courbes théoriques sont proches des courbes expérimentales particulièrement pour les classes granulaires (5/8) et (3,15/5).
- Plus la contrainte normale appliquée est importante, plus l'écrasement est significatif et plus il y a un bon ajustement entre les courbes granulométriques expérimentales et théoriques et cela pour différentes classes granulaires. L'ajustement est d'autant meilleur que la taille des grains est élevée. Donc la

granulométrie est un paramètre qui influe sur l'ajustement.

La formule proposée est très efficace et utile pour la détermination du taux d'écrasement des matériaux granulaires. On peut donc prédire la courbe granulométrique après écrasement avec la seule connaissance du coefficient d'uniformité (C_u), du coefficient de courbure (C_c), du coefficient d'écrasement (B_{10}) et de la contrainte normale appliquée (σ_i).

8. REFERENCES

- [1] T. Ramamurthy, (1969) « Crushing phenomena in granular soils », *Journal of the Indian National Society of Soil Mechanics and Foundation Eng* – Vol 18, 1969, pp 67 – 86.
- [2] E. Guyon et J. P. Troadec, (1994), “Du sac de billes au tas de sables”. *Editions Odile Jacob, Sciences*.
- [3] P. V. Lade, J. A. Yamamuro, (1996), « Significance of particle crushing in granular materials », *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 122, N° 4/1996, pp 3109-3116.
- [4] J. Biarez et P. Y. Hicher, (1997), « Influence de la granulométrie et de son évolution par ruptures de grains sur le comportement mécanique de matériaux granulaires ». *Revue Française de génie civil*. Volume 1- N°4/1997, pp 607-631.
- [5] A. S. Vesic et W. Clough, (1968), “Behaviour of granular material under high stresses” *J. Soil Mech. And found. Div., ASCE* 94 (3), 661-688.
- [6] M. S. Kim, (1995), “Etude expérimentale du comportement mécanique des matériaux granulaires sous fortes contraintes”. *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Paris*.
- [7] B. Melbouci, (2002), “Pegmatite de la grande Kabylie: Caractéristiques et comportement en géotechnique routière”. *Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*.



[8] P. P. Bartake, P.P. et D. N. Singh, (2007), «
A generalized methodology for determination
of crushing strength of granular materials »,
Geotech Geol Eng (2007) 25:203-213.