

ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT DES GRAINS DU MATERIAU GRES A L'ECRASEMENT

B. MELBOUCI : Laboratoire Géomatériaux, Environnement et Aménagement, Faculté du génie de la construction, Département de Génie civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou, BP N°17 RP 15000 Tizi ouzou.

RESUME : *Devant la diminution des ressources en matériaux d'origine alluvionnaire qui constituent l'essentiel des matériaux exploités en génie civil, il convient de mettre en place des solutions de remplacement. Les matériaux grès pourraient fournir les quantités nécessaires, si nous avions une meilleure connaissance de ce matériau. Dans ce sens, cette étude repose sur la compréhension et la caractérisation expérimentale du comportement du matériau grès sous différentes sollicitations : cisaillement, compression et compactage.*

Au cours de ces essais, l'accent a été particulièrement mis sur l'influence de la granulométrie initiale (classe granulaire 0/6, 6/10 et 10/14) sur le comportement du matériau grès, de l'état de compacité (sec lâche, dense et humide) et de l'écrasement des grains. Il en ressort qu'après les différents essais, le paramètre significatif pour les grains de grès est l'étalement granulométrique qui régit l'amplitude des ruptures et leur influence sur les différents chemins de contraintes.

SUMMARY : *In front of the reduction in the material resources of alluvial origin which constitute the main part of materials exploited in civil engineering, it is advisable to set up solutions of replacement. The sandstone materials could provide the necessary quantities, if we had provided that we know their physical and mechanical characteristics. This study is based on the comprehension of the behaviour of sandstone and their experimental characteristics under various stresses: shearing, oedometric compression and compaction.*

During these tests, we are mainly interested on the influence of initial granulometry (size range 0/6, 6/10 and 10/14) on the behaviour of sandstone material, the state of compactness (dry, dense and wet) and of the crushing of the grains. These tests reveal that, the significant parameter for the sandstone grains is the granulometric spreading out which governs the amplitude of the ruptures and their influence on the various ways of stresses.

Mots clés : grès, grains, écrasement, granulométrie, chemins de contrainte, compacité.

1- INTRODUCTION

L'effet de l'écrasement des grains sur les essais mécaniques, sous faibles et fortes contraintes, est un phénomène nouveau dans le domaine de la mécanique des sols. Ce phénomène apparaît lorsque des engins lourds sont utilisés dans la construction de hauts barrages en terre et en enrochement pour répondre aux exigences de la densité élevée ou dans le cas de pieux de fondations profondes. L'écrasement est souvent rencontré lorsque les grains sont soumis à divers chemins de contraintes tels que la compression et le compactage.

La rupture des grains est généralement limitée aux points de contact comme elle peut se prolonger vers l'intérieur du grain.

L'importance de l'écrasement dépend de la dimension des granulats, de leur rugosité, de leur forme, de la présence d'eau, de l'état de compacité et de leur module d'élasticité. Quand les grains sont solides, durs et assez arrondis, ils peuvent reprendre de grandes contraintes ; par contre, Les grains de forme anguleuse de matériaux de carrière fraîchement extraits subissent la fragmentation due à la cassure des aspérités sous des contraintes moins importantes. En fait, la résistance mécanique peut être rattachée à la nature minéralogique des grains, et à leur état d'altération.

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 l'état de

surface des grains et une modification de la distribution granulométrique.

2- IDENTIFICATION DU MATERIAU GRES

Le grès est un matériau très abondant à l'échelle nationale et on le retrouve surtout sur le littoral notamment à Dellys, Menacer, Tipaza et Bejaïa. A l'intérieur du pays, il est localisé à plusieurs endroits particulièrement à Médéa, Bordj-Bou-Arridj et à Sidi-Aïssa. Au niveau de la Wilaya de Tizi ouzou, il est localisé à Tizirt, Azzeffoun, Bouzeguène, et Azazga.

Les échantillons ont été prélevés dans la région d'Azzeffoun, au gisement des grès siliceux de Aït-Rhouna. Le gisement est formé de quatre crêtes alignées d'Ouest à l'Est avec une épaisseur moyenne de 65 m sur une superficie de 0.82 km². Ces grès sont à grains fins à gros fortement cimentés de couleur gris claire à blanchâtre.

Les principaux minéraux constituant ces grès sont : le quartz à 98% qui est le minéral dominant, le mica à 1%, le feldspath, la tourmaline et l'oxyde de fer dont le pourcentage est inférieur à 1%.

Après concassage manuel des blocs de grès, des échantillons ont été soumis au séchage dans une étuve à la température de 105 °C pendant 24 heures. Par la suite, une étude d'identification a été réalisée au laboratoire. Le matériau obtenu est à grains de forme très anguleuse.

Nous résumons les caractéristiques physiques des échantillons de grès dans le tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques physiques du matériau grès étudié.

Caract. Echant	w (%)	γ_d (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)	e	Sr (%)
grès	2,85	1,7	2,63	0,56	21,08

Tableau 2 : résultats de l'essai proctor et de l'essai CBR pour le grès étudié.

essais Echant	Proctor modifié		Indice CBR (%) à	
	$(\gamma_d)_{opt}$ (g/cm ³)	W_{opt} (%)	92 % de compacité	98 % de compacité
grès	1,76	8,33	29	36

Les courbes Proctor ont une allure légèrement aplatie, ce qui nous permet de dire que nos

matériaux sont peu sensibles à l'eau. $(\gamma_d)_{opt}$ augmente avec le degré de compacité de la structure interne du matériau, de la densité des minéraux majeurs les constituant et de leurs pourcentages relatifs. Tandis que la w_{opt} (%) dépend du pourcentage des minéraux instables présents et de leur degré d'instabilité. Dans notre cas, le minéral dominant est le quartz à 98% et les minéraux instables sont inférieurs à 2%, ce qui nous donne un gonflement quasi nul. Le matériau grès a donc une portance favorable pour une éventuelle utilisation dans le génie civil.

3- PHENOMENE D'ECRASEMENT DES GRAINS

De nombreux chercheurs se sont penchés sur le phénomène de rupture des grains. Celui-ci se produit dans des ouvrages de géotechnique tels que les fondations profondes, les pieux battus, les barrages en enrochements ou lors du compactage des couches de chaussées. Les premières études menées ont permis de comprendre comment ce phénomène se manifeste et quels sont les facteurs qui interviennent dans ce processus. En effet, lorsque les ouvrages sont soumis à des contraintes élevées, ces dernières conduisent à des ruptures importantes de grains qui modifient le comportement rhéologique du matériau granulaire. Ces ruptures sont généralement limitées aux points de contacts (force-surface) comme elles peuvent se prolonger vers l'intérieur des grains. Certains chercheurs ont proposé des facteurs permettant de quantifier la rupture des grains qui s'est produite durant un chargement.

Les principaux paramètres susceptibles d'influencer l'écrasement des grains sont:

- La présence d'eau : L'eau a une influence considérable sur le comportement mécanique des grains. A partir d'une série d'essais, Marshal (1967) a montré que la résistance du matériau est plus faible en présence d'eau. Mura et al. (1983) ont montré que l'effet de l'eau est plus marqué pour les grains dont la résistance individuelle est faible que pour les grains de résistance individuelle élevée.

- L'altérabilité des grains : l'histoire de formation des grains et leur état d'altération peuvent avoir un rôle considérable sur la résistance des grains à la rupture. Mitchell

(1976), cité par Lee et Coop (1995) , a montré que les altérations physiques conduisent à une rupture de particules, réduisant la taille moyenne des grains et augmentent le nombre de micro-fissures.

- La répartition granulométrique : l'étalement granulométrique détermine le nombre de contacts entre grains qui varie également selon la forme et la compacité du matériau. Plus l'étalement granulométrique diminue, plus le nombre de points de contact augmente et plus l'intensité des forces de contact entre les grains augmente et, par conséquent, accentue le phénomène de rupture des grains.

- La forme des grains , la taille des grains : la forme anguleuse favorise les concentrations des contraintes et la résistance à la rupture des grains est plus rapidement atteinte dans ce cas que pour les grains plus arrondis. De plus les grains aplatis sont susceptibles de se rompre s'ils sont soumis à un effort de traction par flexion. Quant à la taille des grains, plus elle augmente, plus la probabilité de présence de zones de faiblesse dans le grain augmente. Ces micro-fissures se propagent à un chargement élevé et peuvent se rejoindre, ce qui est une cause importante de rupture des grains.

- La compacité : pour un matériau granulaire donné, une faible valeur de densité relative initiale conduit à un écrasement des grains plus important qu'une forte valeur de densité initiale. En outre, l'écrasement des grains est important au début du chargement pour un milieu peu dense à grains anguleux puis devient semblable à celui du milieu dense.

- Influence de l'état de déformation : Ramamurthy et al. (1974) et Kim (1995) ont montré que pour une même contrainte moyenne, plus la déformation axiale est élevée et plus il y a écrasement des grains. Il a, en outre, constaté que l'écrasement des grains se poursuit après le pic des contraintes .

3-1- Définition du paramètre quantifiant l'écrasement des grains

On utilisera le paramètre C_u pour quantifier l'écrasement des grains de notre matériau aux différents essais étudiés.

C_u est le coefficient d'uniformité ou de Hazen défini par :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D_{60} : c'est le diamètre à travers lequel on a 60% du tamisât cumulé.

D_{10} : c'est le diamètre à travers lequel on a 10% du tamisât cumulé.

Si $C_u > 5$ la granulométrie est dite étalée (continue)

Si $C_u < 2$ la granulométrie est dite étroite (uniforme)

4- ESSAIS REALISES

Le matériau grès est soumis à différents chemins de contrainte : le cisaillement, la compression oedométrique et le compactage à l'essai Proctor. Au cours de ces essais , nous avons fait varier :

- la granulométrie où on a utilisé trois classes granulaires 0/6, 6/10 et 10/14 ;
- la compacité (état sec lâche, dense et humide à l'optimum Proctor) ;
- l'intensité des contraintes pour les différents essais.

Pour obtenir des granulats de dimensions souhaitées, notamment pour les chaussées ou les voies de chemins de fer, des morceaux de roches sont broyés par différents processus industriels.

4.1. Essai de cisaillement à la boîte de Casagrande

Ces essais ont pour but de suivre l'évolution du comportement mécanique des différents échantillons soumis à un chargement statique. Les courbes efforts déformations obtenues sont portées sur les figures 1 et 2. La figure 1 montre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale appliquée. Le pic n'apparaît clairement que pour l'état dense et l'état humide à l'optimum Proctor donne une meilleure résistance qu'à l'état sec lâche (figure 2).

Pour la granulométrie 0/6, le matériau grès se dilate pour les contraintes normales de 100, 200 et 300 kPa et se contracte pour 400 kPa. Par contre, pour les granulométries 6/10 et 10/14, le matériau est dilatant pour la

contrainte normale de 100 kPa et devient contractant à partir de la contrainte normale de 200 kPa. Cette contractance s'accroît au fur et à mesure de l'augmentation de cette contrainte.

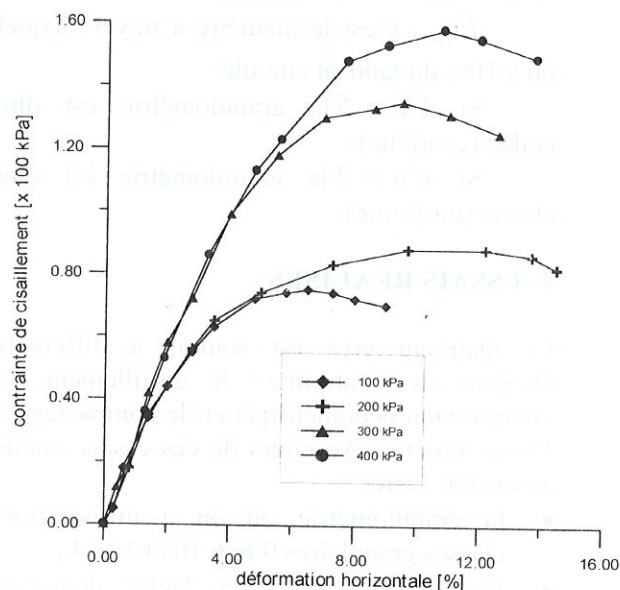


Figure 1 : courbe effort-déformation à l'état dense du matériau grès.

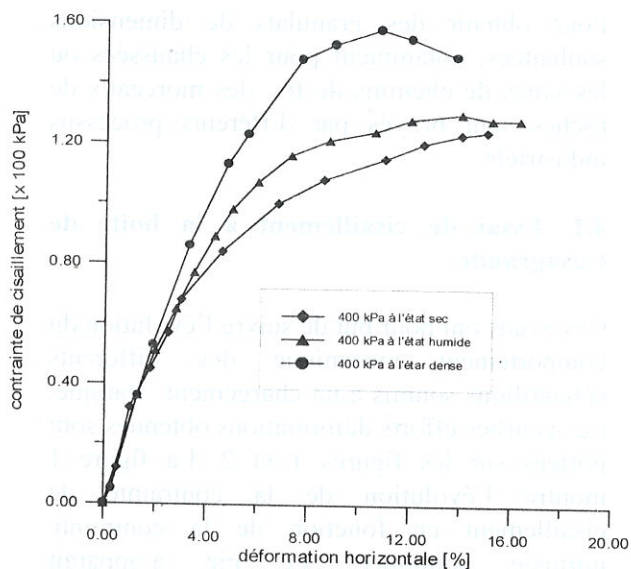


Figure 2 : évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de l'état de compacité du grès

4.2. Essai oedométrique

Deux séries d'échantillons ont été étudiées : une avec des grains à l'état sec lâche et une autre à l'état humide à l'optimum Proctor. Les

résultats obtenus montrent que le grès présente un indice des vides plus élevé particulièrement pour la classe 10/14. L'indice de compression C_c est compris entre 0.02 et 0.05, c'est donc un matériau qui n'est pas compressible et les valeurs de C_g comprises entre 0.06 et 0.09 montrent que le gonflement est pratiquement négligeable. Les trois cycles de chargement-déchargement ont montré que le comportement du grès est différent d'une granulométrie à une autre (figure 3).

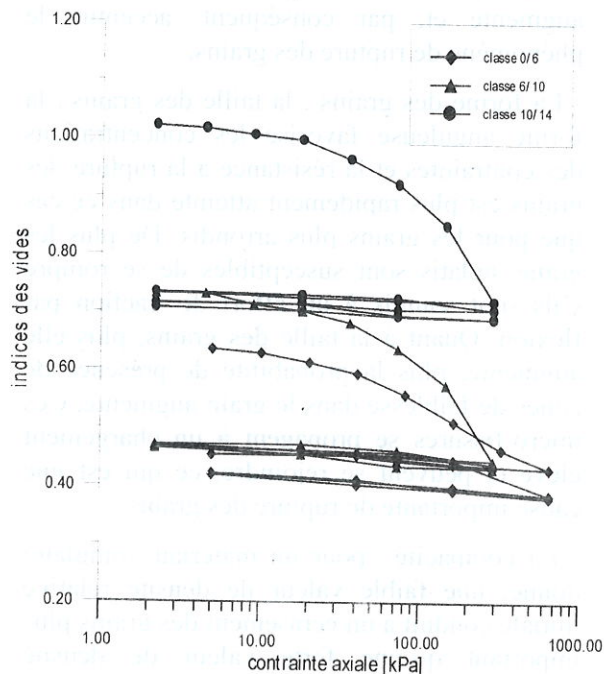


Figure 3 : courbes oedométriques de chargement-déchargement pour les trois classes granulaires 0/6-6/10-10/14.

4.3. Essai Proctor

L'essai Proctor permet de reproduire les effets des engins de compactage sur l'état des grains du matériau grès. Des engins lourds ou des compacteurs lourds sont utilisés dans certains domaines du génie civil et particulièrement dans la construction de hauts barrages en terre ou en enrochement pour répondre aux exigences de la densité élevée. Cette dernière est obtenue en augmentant l'effort de compactage où l'écrasement se manifeste. Au cours des différents essais réalisés, nous avons mis en évidence le phénomène d'écrasement des grains tout en faisant varier la granulométrie et l'énergie de compactage.

5. RESULTATS ET INTERPRETATION

Le degré d'écrasement est apprécié par la comparaison des courbes granulométriques avant et après essai. La figure 4 montre que le degré d'écrasement évolue en fonction de l'augmentation de la contrainte appliquée. En effet, plus la contrainte augmente, plus l'étalement de la courbe granulométrique s'accroît.

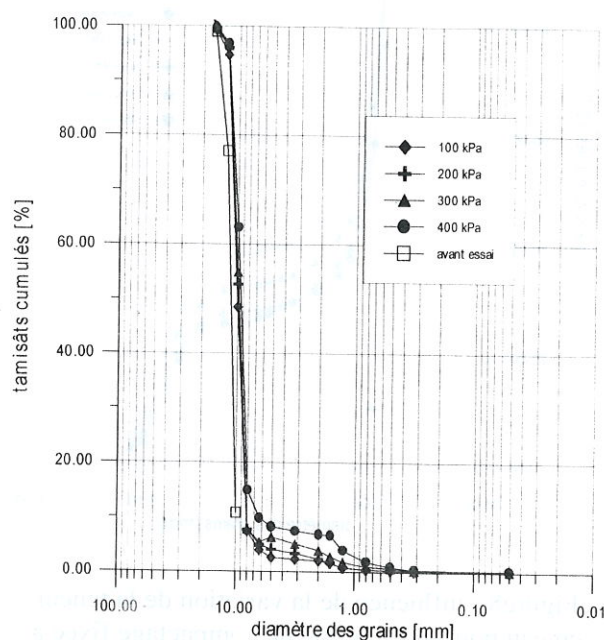


Figure 4 : Evolution du degré d'écrasement en fonction de la contrainte de cisaillement pour la classe granulaire 10/14.

L'influence de la granulométrie initiale sur le degré d'écrasement est très importante. En effet, l'écrasement augmente avec la taille des grains ; plus la classe granulaire présente de gros grains telle que la 10/14, plus les grains sont susceptibles de se casser plus facilement. Quelle que soit la classe granulaire, l'étalement granulométrique croît avec la charge ou la contrainte normale appliquée.

Le phénomène de dilatance et de contractance, lié à celui des variations de volume, est dû à des modifications de la structure du grès. L'écrasement des grains conduit à une augmentation de la contractance. C'est la classe granulaire la plus élevée (10/14) qui se contracte le plus et c'est l'incrément de forte ampleur qui favorise et accentue la contractance.

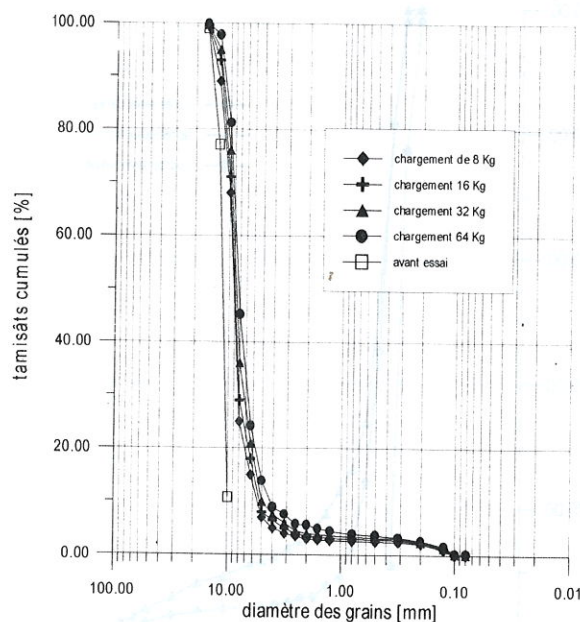


Figure 5 : Evolution du degré d'écrasement en fonction de la charge appliquée à l'essai oedométrique.

La figure 5 montre que l'étalement granulométrique évolue avec la contrainte appliquée. Plus la contrainte augmente plus la courbe granulométrique se décale davantage et provoque davantage d'écrasement et ceci quelque soit la classe granulaire et quelque soit l'état de compacité.

La succession de charges et décharges créent un compactage progressif du matériau grès. Pour un nombre donné de cycles, le compactage augmente avec l'amplitude de la contrainte. Sous l'influence de trois cycles de chargement déchargement, nous avons constaté que les grains se sont fracturés, même pour la granulométrie 0/6. Le pourcentage de fines au fond des tamis a largement augmenté comparativement aux essais à un seul cycle.

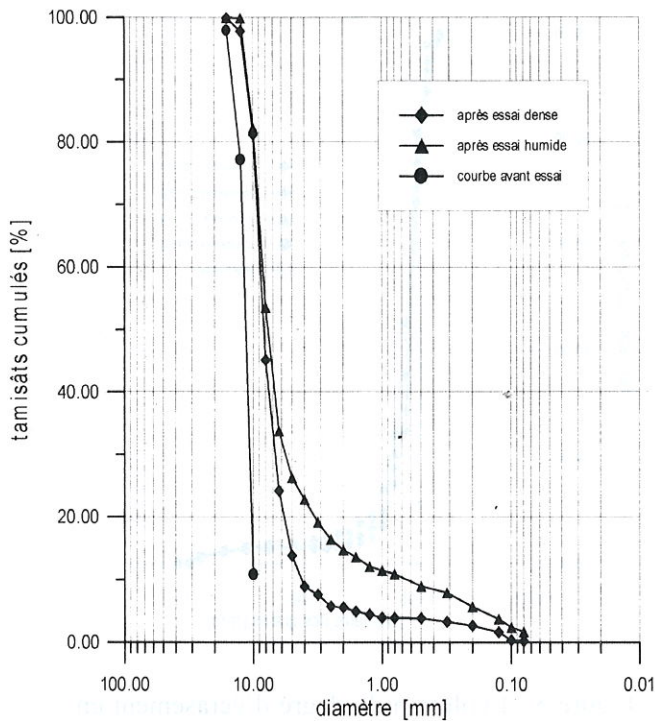


Figure 6 : courbes granulométriques aux états sec et humide soumise à l'essai oedométrique

L'écart existant entre les courbes granulométriques pour les deux états dense et humide (figure 6) justifie que la présence d'eau a une influence sur la rupture des grains. En effet, l'eau fragilise la partie superficielle des grains et les rend facile à l'effritement.

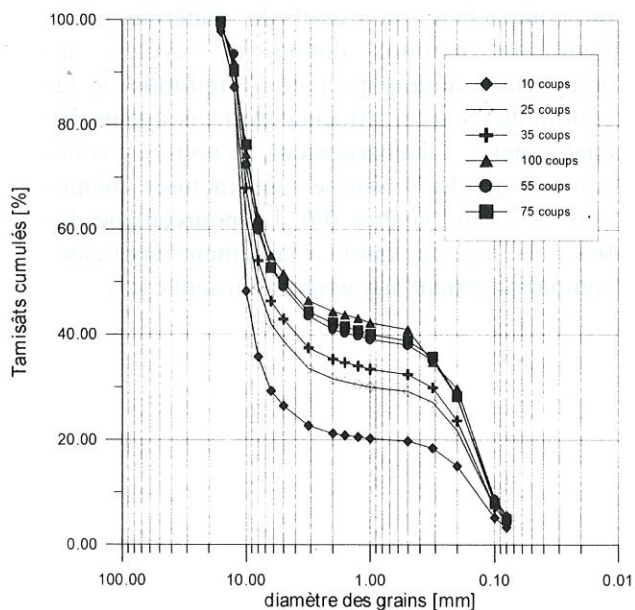


Figure 7 : Influence de l'énergie de compactage à l'essai Proctor.

La figure 7 montre l'évolution de l'étalement des courbes granulométriques en fonction de l'énergie de compactage. Cet étalement correspond à l'écrasement des grains. Plus la courbe granulométrique est étalée plus l'écrasement est important.

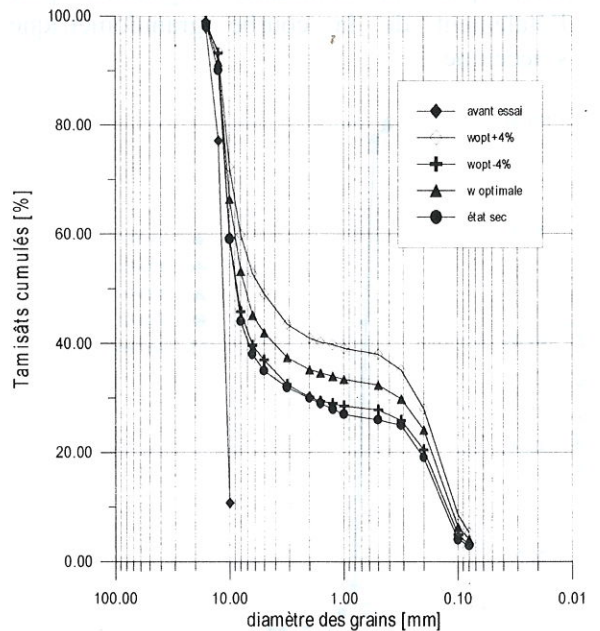


Figure8 : influence de la variation de la teneur en eau pour une énergie de compactage fixée à 75 coups

La teneur en eau joue un rôle très significatif dans le phénomène d'écrasement des grains du matériau grès. Le matériau à l'état sec et avec une teneur en eau égale à ($W_{opt} - 4\%$) donne des courbes granulométriques sensiblement identiques. Dès que la teneur en eau dépasse la teneur en eau optimale l'écrasement devient plus important (figure 8).

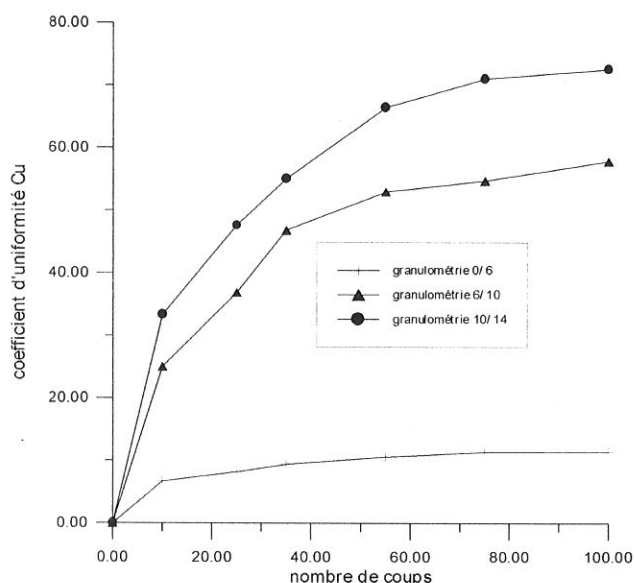


Figure 9 : Evolution du paramètre Cu en fonction de l'énergie de compactage à l'état humide pour les trois classes granulaires.

Le paramètre Cu montre bien que l'écrasement des grains évolue avec la taille des grains, particulièrement avec les classes granulaires (figure 9) en fonction de l'énergie de compactage. Cu n'évolue que très peu dans le cas de la classe 0/6, ce qui confirme que les grains les plus petits sont les plus résistants.

6. CONCLUSION

Les différents essais réalisés ont permis d'évaluer le degré d'écrasement des grains du matériau grès sous diverses sollicitations et ont montré que :

- l'influence de la granulométrie (taille des grains) est très significative sur le phénomène d'écrasement des grains. Plus la taille des grains augmente, plus le degré de rupture est important ;
- la présence d'eau est un paramètre qui favorise l'écrasement des grains, particulièrement lorsque la teneur en eau dépasse la teneur en eau optimale ;
- à l'essai oedométrique, l'écrasement des grains augmente avec le nombre de cycles ;
- Le coefficient Cu confirme l'évolution du degré d'écrasement en fonction de l'intensité de la contrainte normale appliquée, de l'énergie de compactage et des classes granulaires ;

7. BIBLIOGRAPHIE

- J. Biarez., 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, p 607-631
- B. Cambou (1972), *Compressibilité d'un milieu pulvérulent, influence de la forme et de la dimension des particules sur les propriétés mécaniques d'un milieu pulvérulent*. **Thèse de docteur de spécialité- université scientifique et médicale, Grenoble 1972**.
- E. Guyon., J.P. Trodec (1994), *Du sac de billes au tas de sables*. **Editions Odile Jacob, Sciences, 1994**.
- M. M. Hagerty , D. R. Hite. ,C.R. Ullich. et D. J. Hagerty. (1993), *One dimensional high pressure compression of granular media*. **Journal of Geotechnical Engineering**, Vol 119 N°1, January 1993, pp 1 – 17.
- M. S. Kim (1995), *Étude expérimentale du comportement mécanique des matériaux granulaires sous fortes contraintes*. **Thèse de doctorat de l'École Centrale de Paris - décembre 1995**.
- P. V. Lade,J. A. Yamamuro., et al., (1996), *Significance of particle crushing in granular materials*. **Journal of Geotechnical Engineering**, vol. 122, N° 4, 1996 pp 3109-3116.
- I. K.Lee and M. R. Coop (1995), *The intrinsic behaviour of a decomposed granite soil*.**Geotechnique 45** N°1, P. 117-130.
- R. J. Marshal. (1977), *Research on granular materials*. **Experimental work compiled for the IX int. Conf on Soils. Mechanics and Found. Eng. June. Tokyo 1977**, pp 1 – 78.
- G. R. Mc Dowell. Et M.D. Bolton. (1998), *On the micromechanics of crushable aggregates* . **Geotechnique 48**, N°5, 1998.
- B. Melbouci et N. E. Hannachi (2002), *Etude de l'écrasement des grains de pegmatite à l'essai oedométrique*. **Annales du Bâtiment et des travaux publics N°4, septembre 2002**.
- N. Miura and S.O-Hara (1979),*Particle crushing of a decomposed granite soil under shear stresses*. **Soil and Found., Tokyo, Japan 19(3)**, P. 61-76.