



# INFLUENCE DE L'ECRASUREMENT DES GRAINS SUR L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE DES MATERIAUX GRANULAIRES

B. MELBOUCI, K. GHOUILEM

Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement

Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

BP 17 RP, Tizi- Ouzou 15000, Algérie.

Reçu le : 25/02/2008

Accepté le : 12/03/2008

**Résumé** - Les matériaux granulaires, dans leur comportement mécanique au cisaillement, se caractérisent par des paramètres importants, à savoir l'angle de frottement interne, la dilatance et l'écrasement des grains. L'étude expérimentale menée à la boîte de cisaillement sur les trois types de matériaux (granite, schiste et grès) a montré que l'angle de frottement dépend non seulement du réarrangement des grains et de l'effet de la dilatance sous la gamme de contraintes [0 à 100 kPa] mais aussi du phénomène d'écrasement sous la gamme de contraintes normales [150 à 500 kPa].

Pour mieux mettre en évidence cette évolution de l'angle de frottement en fonction de l'écrasement des grains, une relation non linéaire a été utilisée entre  $(\phi_{pic})$  et le paramètre de dégradation granulaire Bg. Les résultats obtenus ont montré une bonne corrélation pour les trois matériaux.

**Mots clés** : Cisaillement, angle de frottement, écrasement, réarrangement, dilatance.

**Abstract** - The granular materials, in their mechanical behavior with shearing, are characterized by significant parameters, namely the angle of internal friction, the dilatancy and the crushing of the grains. The experimental study undertaken to the shear test on the three types of materials (granite, schist and sandstone) showed that the angle of friction depends not only on the rearrangement of the grains and the effect of dilatancy under the range of stresses [ 0 to 100 kPa ] but also of the crushing phenomenon under the range of normal stresses [ 150 to 500 kPa ].

For better highlighting this evolution of the angle of friction according to the crushing of the grains, a nonlinear relation was used between  $(\phi_{pic})$  and the granular parameter of degradation Bg. The results obtained showed a good correlation for three materials.

**Key words**: Shearing, angle of friction, crushing, Rearrangement, dilatancy.

## 1, Introduction

Le comportement mécanique d'un sol, est en grande partie contrôlé par sa résistance au cisaillement (shear strength). Celle-ci est nécessaire pour calculer la stabilité externe des ouvrages, tels que les murs de soutènement, les pentes et / ou talus naturels et artificiels. Au cours de la compression et du cisaillement, plusieurs grains ont subi des cassures de leurs arêtes ou même des écrasements s'ils sont soumis à des contraintes élevées. Cet effet d'écrasement a été déjà pris en compte dans l'exploitation des problèmes de barrages de grande hauteur, des pieux de fondations profondes et des explosions nucléaires souterraines (Maksimovic, 1996).

Cette résistance développée au cours des essais de cisaillement est généralement traduite par des paramètres intrinsèques, caractérisant l'état du matériau. Ils sont définis par l'angle de frottement interne et la cohésion. Dans le cas des milieux granulaires, les matériaux ne sont caractérisés que par l'angle de frottement interne. Nous tenterons dans cette étude de lier l'effet de l'écrasement des grains à l'angle de frottement interne des matériaux granulaires locaux, sous faibles et moyennes contraintes. Les matériaux granite, schiste et grès de part leur abondance dans la région, représente aujourd'hui les éléments clés de substitution pour le sable et le gravier, d'où l'importance

de procéder à leur étude et de connaître ainsi leurs caractéristiques intrinsèques. Pour ce faire, ils sont soumis au cisaillement à la boîte de Casagrande sous des contraintes normales variant de 20 à 500 kPa.

## 2, Généralité sur l'écrasement des grains.

Le comportement mécanique des matériaux granulaires dépend non seulement des propriétés des grains les constituant et de leur arrangement mais aussi de l'écrasement des grains engendrant ainsi la fragmentation de ses derniers en fines particules. Le pourcentage de dégradation des grains dépend de leur composition minéralogique, de leur dureté, de leur forme et de leur taille. La rupture contractée par des grains, suite à des sollicitations mécaniques, a fait l'objet de plusieurs études. Tabor et Bowden (1956) sont les premiers à montrer les désordres occasionnés par les contacts inter-granulaires (figure 1).

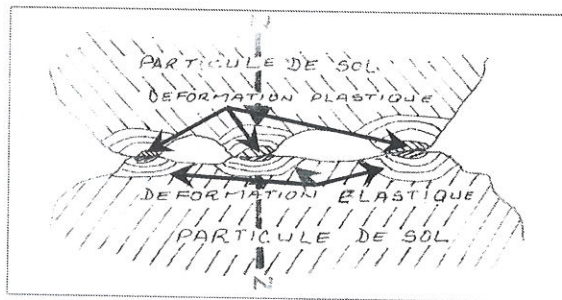


**Figure 1 :** Déformations au niveau des points de contact de deux particules, sous chargement statique, d'après BOWDEN et TABOR 1956

Ramamurthy.T.(1969) a donné une classification des différents types d'écrasement des grains (Figure 2). Guyon et Troadec (1994) ont réduit cette classification à trois modes de rupture : la fracture, l'écaillage et l'abrasion. La fracture : un grain se casse pour en donner de nouveaux ayant une taille sensiblement égale ou inférieure à celle du grain original. L'écaillage : un grain se casse pour donner un gros grain et plusieurs de petites tailles. L'abrasion : le résultat donne un grain sensiblement de même taille que l'original avec une production de particules très fines.

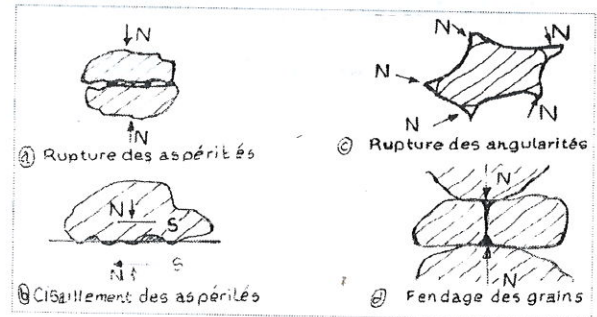


**Fig.N° 2 :** Différents types de rupture des grains selon Ramamurthy T., en 1969.

Le phénomène de contact inter-granulaire est régi par un phénomène physique qui est représenté par le frottement grains - grains. L'angle de frottement interne est donné en fonction de plusieurs angles dont l'estimation est la suivante.

## 3, Estimation de l'angle de frottement.

L'angle de frottement a fait l'objet de plusieurs estimations. L'une des premières estimations est présentée au 2<sup>ème</sup> congrès international de Rotterdam en 1948, sous la forme du tableau suivant.

**Tableau 1 :** Valeurs de l'angle de frottement interne des milieux pulvérulents présentés au 2<sup>ème</sup> congrès international de Rotterdam 1948

| $\phi = 36^\circ + \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4$ |          |                                                 |                                    |
|-------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------|------------------------------------|
| Compacité                                             | $\phi_1$ | Lâche<br>Moyenne<br>Serrée                      | * - 6°<br>* 0°<br>* + 6°           |
| Forme et rugosité des grains                          | $\phi_2$ | Aigues<br>Moyenne<br>Arrondies<br>Très arrondie | * + 1°<br>* 0°<br>* - 3°<br>* - 5° |
| Grosseurs des grains                                  | $\phi_3$ | Sable<br>Gravier fin<br>Gros graviers           | * 0°<br>* + 1°<br>* + 2°           |
| Granulométrie                                         | $\phi_4$ | Uniforme<br>Moyenne<br>Étalée                   | * - 3°<br>* 0°<br>* + 3°           |

Plusieurs auteurs ont donné des expressions différentes de l'angle de frottement, on peut citer :

-Bishop en (1954) a donné une expression de l'angle de frottement à la rupture :

$$\tan^2(45 + \phi_r / 2) = \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)^{1/2} \dots \dots \dots 1$$

-Vesic et Clough (1968) ont donné une formule de l'angle de frottement sécant :

$$\varphi_s = \arcsin \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) \dots\dots\dots 2$$

-Koerner (1968) a proposé la relation de l'angle de frottement au pic, dans le cas où il n'y a pas de « cohésion » entre les grains :

$$\varphi_{\max} = \varphi_u + \varphi_{\text{deg}} + \varphi_{\text{recor}} + \varphi_{\text{dil}} \dots\dots\dots 3$$

-Barton (1981) a proposé une équation similaire à celle de Koerner (1968). Il propose l'équation suivante :

$$\varphi_{\max} = \varphi_B + \varphi_{\text{has}} + \varphi_{\text{dil}} \dots\dots\dots 4$$

-Bolton (1986) qui stipule que l'angle de frottement peut se décomposer en deux composantes à savoir :

$$\varphi = \varphi_{\text{crit}} + \varphi_{\text{dil}} \dots\dots\dots 5$$

-Maksimovic en (1996), propose dans le cas du cisaillement direct, comme relation entre l'angle de frottement sécant et l'état de contraintes augmenté de l'angle de frottement basique, la formule suivante :

$$\varphi_s = \varphi_B + \frac{\Delta\varphi}{1 + \sigma_n / P_n} \dots\dots\dots 6$$

En conclusion, chaque auteur n'a pris en compte qu'un nombre limité de paramètres.

#### 4, Appareillage et caractérisation des matériaux utilisés.

##### 4.1, Appareillage de cisaillement direct

L'appareil comporte un dispositif de chargement qui permet d'appliquer une charge verticale par l'intermédiaire d'un piston. L'essai consiste à tirer horizontalement sur la demi-boîte supérieure de façon à cisainer le matériau suivant un plan horizontal. On mesure l'effort horizontal en fonction du déplacement de la demi-boîte.

##### 4.2- Caractéristiques des matériaux étudiés

Les matériaux utilisés sont des matériaux locaux extraits dans la localité de Tizi-Ouzou. Il s'agit du grès, du granite et du schiste satiné. Le grès est une roche sédimentaire à gros grains composée de masses consolidées de sable. Le granite est une roche magmatique de structure grenue très grossière de texture cristalline visible à l'œil nu. Les schistes sont

des roches métamorphiques, dans lesquelles les cristaux du minéral principal sont disposés en couches parallèles et forment un grand nombre de feuillets bien développés, proches les uns des autres, provenant de la transformation des argiles par déshydratation et sous l'action de pressions orientées. Le schiste utilisé est un schiste satiné de résistance assez élevée.

#### 5, Présentation des résultats

Les résultats des différents essais effectués à la boîte de cisaillement direct, obtenus pour les trois matériaux (granite, schiste et grès) aux classes granulaires (0/5) et (5/8) sont illustrés sous la forme de figures de type :

- Contraintes – Déformations (%) [ $\tau = f(\varepsilon_h)$ ].
- Déformations (%) – Changement de volume [ $(\varepsilon_v = f(\varepsilon_h))$ ].

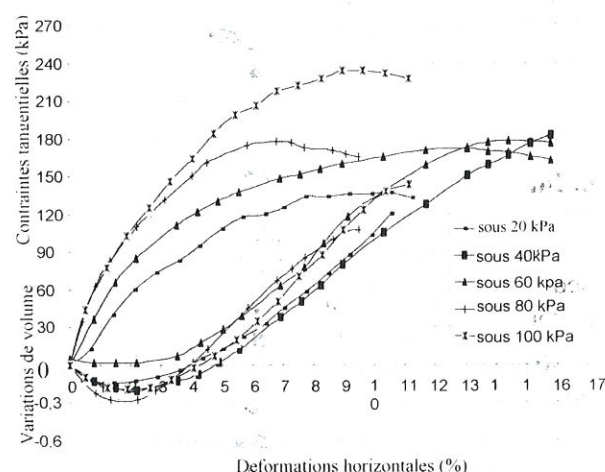


Fig 3 : Granite sec (0/5)

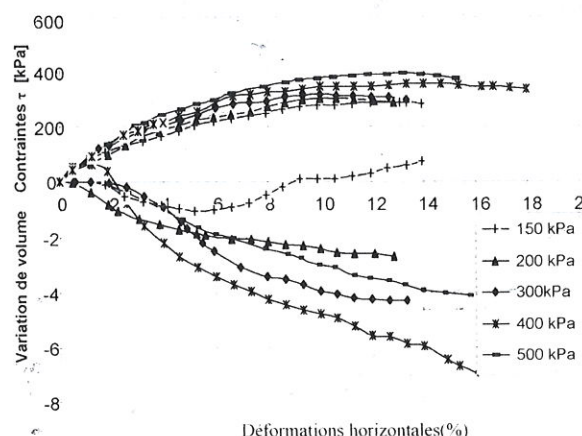


Fig 4: Grès sec (5/8)

Des courbes obtenues, nous pouvons conclure que :

\* la dilatance s'est développée pour des faibles contraintes inférieures à 200 kPa. Au-delà de cette contrainte, c'est la contractance qui prédomine.

\* L'humidification des matériaux (non présentée dans cet article) donne une contrainte de cisaillement plus ou moins faible que dans un état sec lâche, car la présence d'eau a tendance à ramollir les croûtes superficielles des grains.

\* La résistance au cisaillement diminue, et ce en fonction de l'augmentation de la classe granulaire pour tous les matériaux, en passant de la classe (0/5) à la (5/8). Les grains de tailles élevées, se fracturent plus facilement que ceux de petites tailles.

\* La résistance au cisaillement des matériaux décroît successivement du granite au schiste et au grès. Cela peut s'expliquer par la composition minéralogique des matériaux. En effet, le granite contient un pourcentage (%) élevé de quartz.

## 6, Interprétation des résultats

Les essais de cisaillement nous permettent de déduire la caractéristique mécanique de nos matériaux granulaires qui est l'angle de frottement interne. Habituellement celle-ci est obtenue en traçant la courbe intrinsèque qu'on assimile à une droite. Dans la réalité, celle-ci n'est pas une droite et l'évolution de la contrainte de cisaillement ( $\tau_{max}$ ), en fonction de la contrainte normale ( $\sigma_N$ ), prend l'allure d'une courbe, qu'on a simulée par un polynôme de Lagrange de degré 2 suivant :

$$\tau = \alpha \sigma^2 + \beta \sigma + \gamma \dots \dots \dots 1$$

Les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sont définis comme suit :

$$\alpha = \left( \frac{\tau_3}{\sigma_3^2} - \frac{\tau_1}{\sigma_1^2} + \frac{\tau_2}{\sigma_2^2} \right).$$

$$\beta = \left( \frac{-\sigma_3 \tau_3}{\sigma_3^2} + \frac{\sigma_1 \tau_1}{\sigma_1^2} - \frac{\sigma_2 \tau_2}{\sigma_2^2} \right).$$

$$\gamma = \tau_1.$$

Les figures 5, 6 et 7 suivantes illustrent cette évolution :

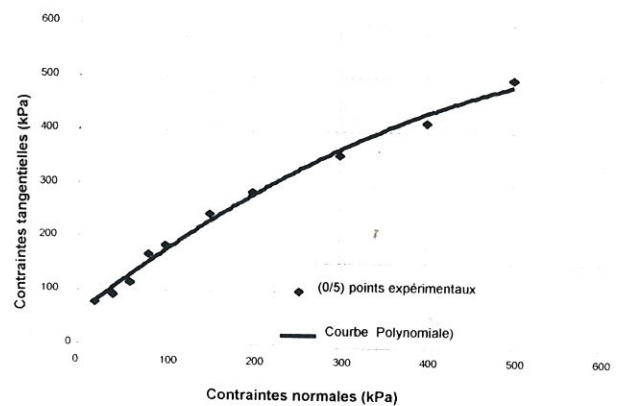


Fig N°5 : Courbe enveloppe du granite humide (0/5)

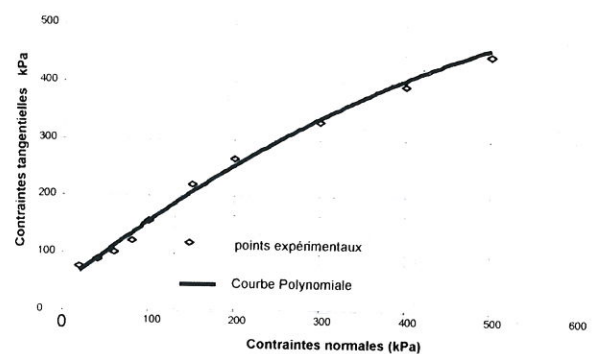


Fig N°6 : Courbe enveloppe du granite humide (5/8)

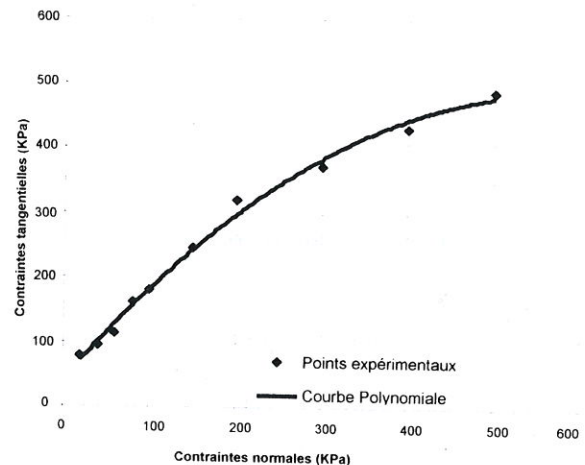


Fig N°7 : Courbe enveloppe du grès humide (0/5)

Pour la détermination des angles de frottement, on assimilera ces courbes à deux droites correspondantes à deux intervalles de contraintes normales [0 à 100 kPa] et [150 à 500 kPa].

Dans l'intervalle [0kPa, 100kPa] de contraintes normales, les grains n'ont pas subi de dégradation. Les charges appliquées ne provoquent qu'un réarrangement des grains, ce

qui engendre une augmentation de l'angle frottement interne. Cet angle est donc égal à l'angle de frottement grains - grains ( $\varphi_u$ ) augmenté de l'angle de dilataance ( $\Phi_{dil}$ ) dont la formule est la suivante :

$$\varphi_{réar} = \varphi_u + \Phi_{dil} \dots\dots\dots 8$$

$\varphi_u$ : Correspond aux pentes des droites intrinsèques données dans les figures 8 et 9 suivantes :

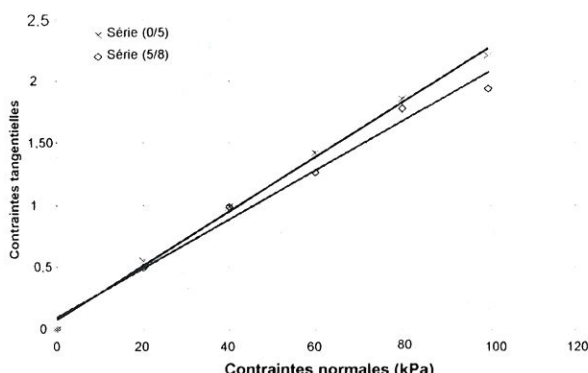


Fig N°8 : Droites intrinsèques du granite sec

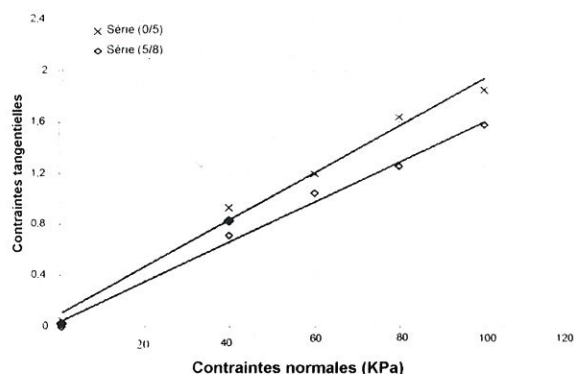
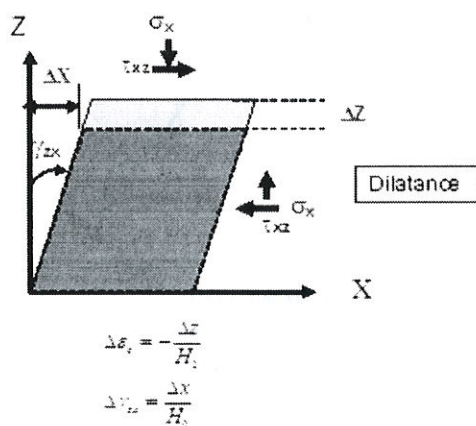


Fig N°9 : Droites intrinsèques du granite humide

L'angle de dilataance est déterminé comme suit :



$$\tan \alpha = \frac{-\Delta z}{\Delta x} = \frac{-\Delta z / H_0}{\Delta x / H_0} = \frac{-\Delta \varepsilon_z}{\Delta \gamma_{zx}}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{-\Delta z}{\Delta x} = \tan^{-1} \frac{-\Delta \varepsilon_z}{\Delta \gamma_{zx}}$$

Dans l'intervalle [150kPa à 500kPa] de contraintes normales, les grains ont subi une rupture, cela engendre une diminution du frottement inter-granulaire, les droites à la rupture caractérisant la dégradation des grains, ne sont plus intrinsèques. La dégradation des grains est caractérisée par l'angle de dégradation noté :

$$\varphi_{deg} = \varphi_{réar} - \varphi_{rup} \dots\dots\dots 9$$

$\varphi_{rup}$  : Correspond aux pentes des droites de rupture.

La figure 10 montre les différents angles considérés et le tableau 2 regroupe les valeurs des angles de frottement obtenus pour les trois matériaux.

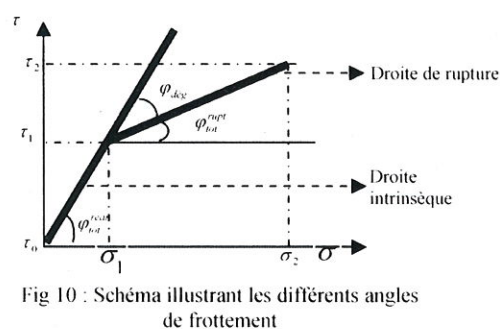


Fig 10 : Schéma illustrant les différents angles de frottement

Tableau 2 : Angles de frottement au pic avant et après écrasement des grains.

| matériaux         | classes | $\sigma_N$<br>[kPa] | $\varphi_{pic}$ état<br>sec | $\varphi_{pic}$ état<br>humide |
|-------------------|---------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| granite           | 0/5     | <150                | 49                          | 47                             |
|                   |         | 200 à 500           | 49 à 43                     | 47 à 40                        |
|                   | 5/8     | <150                | 46                          | 44                             |
|                   |         | 200 à 500           | 46 à 39                     | 44 à 37                        |
| Schiste<br>satiné | 0/5     | <150                | 48                          | 46                             |
|                   |         | 200 à 500           | 48 à 39                     | 46 à 36                        |
|                   | 5/8     | <150                | 46                          | 45                             |
|                   |         | 200 à 500           | 46 à 36                     | 45 à 32                        |
| grès              | 0/5     | <150                | 47                          | 45                             |
|                   |         | 200 à 500           | 47 à 39                     | 45 à 37                        |
|                   | 5/8     | <150                | 43                          | 40                             |
|                   |         | 200 à 500           | 43 à 37                     | 40 à 34                        |

## 7, Evolution de l'angle de frottement au pic ( $\phi_{pic}$ )

Une étude paramétrique de l'évolution de l'angle de frottement au pic ( $\phi_{pic}$ ), est menée en fonction de l'indice de dégradation Bg. L'idée de calcul d'un coefficient mesurant la dégradation des grains (Bg) pour les matériaux granulaires a été introduite en 1973 par Marsal. C'est B. Indraratna (1998) qui a lié ce paramètre à l'angle de frottement interne au pic par la relation suivante :

$$\phi_{pic} = a(Bg)^b \dots\dots\dots 10$$

Nous tenterons dans ce qui suit d'étudier l'influence de la nature du matériau, de la teneur en eau et de la granulométrie sur la liaison entre Bg et l'angle de frottement interne au pic ( $\phi_{pic}$ ).

### 7.1, Influence de la nature du matériau.

La figure 11 suivante illustre l'influence de la nature du matériau sur l'évolution de ( $\phi_{pic}$ ) en fonction de (Bg).

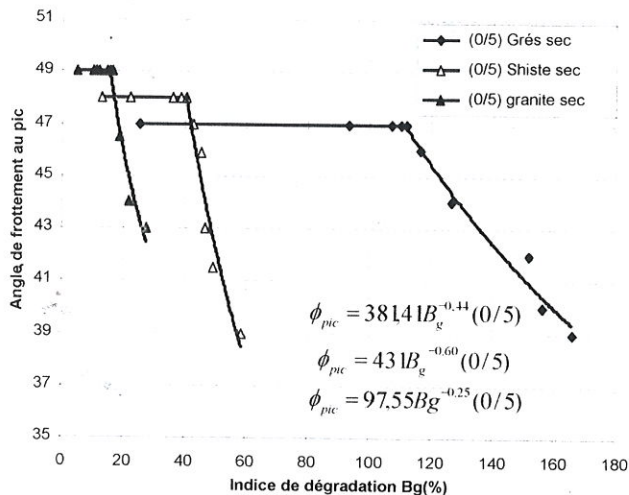


Fig 11: Evolution de l'angle de frottement au pic en fonction de Bg Grès, Schiste et Granite sec (Classe (0/5))

Pour les contraintes faibles [20, 40, 60, 80 et 100] kPa, l'angle de frottement reste quasiment constant, ce qui donne une évolution linéaire

de l'angle de frottement interne en fonction de l'indice de dégradation Bg. Au delà de 100 kPa, les grains se dégradent et donnent une évolution décroissante de l'angle de frottement en fonction de Bg.

### 7.2, Influence de la teneur en eau

La figure 12 montre l'influence de la teneur en eau sur l'évolution de  $\phi_{pic}$  en fonction de Bg.

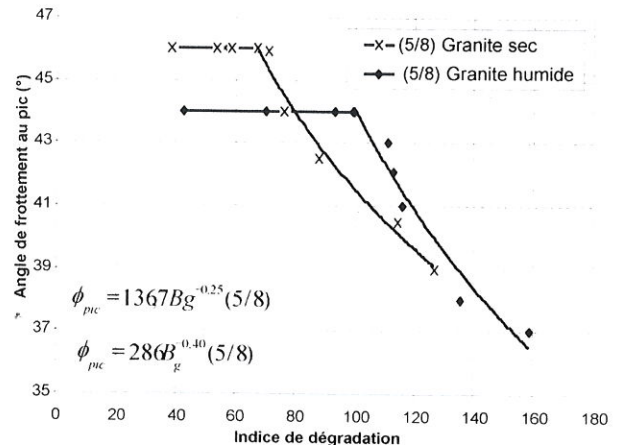


Fig N°12: Evolution de l'angle de frottement au pic pour le granite sec et humide (5/8)

Comme l'état humide favorise la dégradation des grains, l'angle de frottement diminue. Cette baisse évolue en fonction de Bg et prend une allure décroissante à partir de la contrainte normale égale à 100kPa.

### 7.3, Influence de la granulométrie

Les figures 13 et 14 illustrent l'évolution de  $\phi_{pic}$  en fonction de l'indice de dégradation Bg en tenant compte des deux classes granulaires.

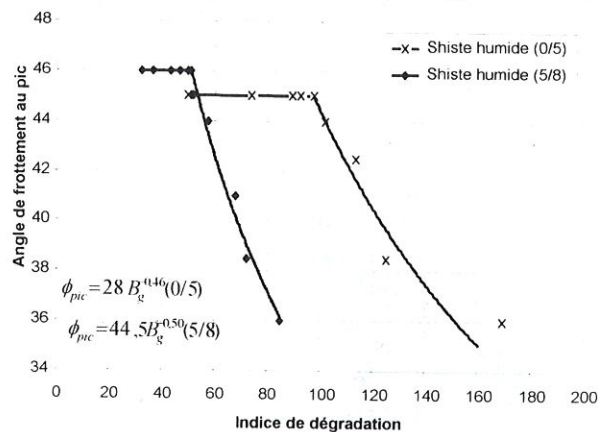


Fig N°13: Evolution de l'angle de frottement au pic pour le Schiste humide (0/5) et (5/8)

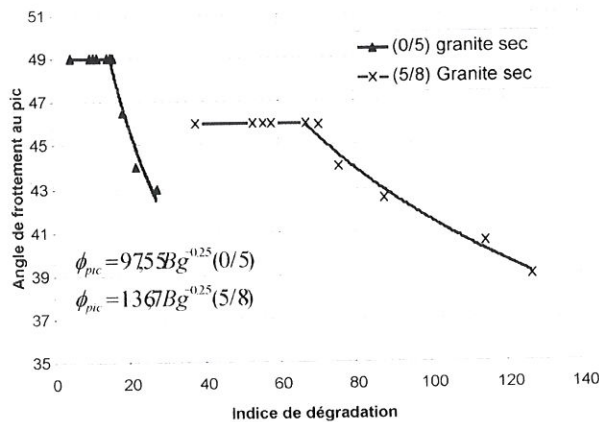


Fig N°14: Evolution de l'angle de frottement au pic pour le Granite sec

Dans la classe granulaire (0/5), les valeurs des angles de frottement ( $\phi_{pic}$ ) sont plus élevées par rapport à celles de la classe (5/8) où l'indice Bg est plus important. L'angle de frottement au pic décroît en fonction de l'augmentation des valeurs de l'indice de dégradation Bg (figures 13 et 14).

### Conclusion.

L'angle de frottement est un paramètre qui dépend de plusieurs paramètres. Cette étude expérimentale a montré que le matériau granite présente une meilleure résistance à l'écrasement, suivi du schiste et du grès. Ce qui justifie que ( $\phi_{pic}$ ) dépende de la nature minéralogique de ces matériaux.

Cette étude a également mis en évidence le fait que l'angle de frottement interne ( $\phi_{pic}$ ) diminue en fonction de l'évolution de l'écrasement des grains. Dans l'intervalle de contraintes normales allant de [0, 100] kPa, il n'y a qu'un réarrangement des grains. L'angle ( $\phi_{pic}$ ) croît sous l'effet du réarrangement des grains et de la dilatance. Dans l'intervalle de [150 à 500] kPa de  $\sigma_N$ , les grains subissent un écrasement ce qui nous a permis d'estimer l'angle de dégradation ( $\phi_{deg}$ ).

La liaison de ( $\phi_{pic}$ ) avec Bg nous a permis d'étudier l'évolution de ( $\phi_{pic}$ ) avec la dégradation des grains. Cette corrélation est une fonction non linéaire du type  $\phi_{pic} = a y^b$  pour des contraintes normales supérieures à 100 kPa.

### Bibliographie

- J. BIAREZ, (1962) : « Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols et des matériaux pulvérulents ». *Thèse de Doctorat es Sciences, Faculté des Sciences de Grenoble*. 1962.
- J. BIAREZ, et P. Y. HICHER, (1997) : « Influence de la granulométrie et de son évolution par ruptures de grains sur le comportement mécanique de matériau granulaires ». *Revue française de génie civil, vol 1, N° 4*.
- A.W. BISHOP, and D.L. HENKEL, (1962) : « The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. » 2<sup>nd</sup> Edition, *Edward Arnold (pub.) Ltd., London*.
- A.W. BISHOP, (1966) : « The strength of soil as engineering materials ». *Géotechnique, vol 16, N°2, pp 91-128*
- F. P. BOWDEN, and D. TABOR, (1956) : « Friction and lubrication » *Methuen's Monographs on physical Subjects, Oxford*.
- D. KOERNER, (1968) : « Effect of particle characteristics of soil strength ». *Journal of the soil mechanics and foundations divisions. Vol 96*.
- B. INDRARATNA, & H.D. CHRISTIE, (1998) : « Shear Behavior of Railway Ballast Based on Large-Scale Triaxial Tests ». *Journal of geotechnical and geo-environmental engineering / Mai 1998*
- M. MAKSIMOVIC, (1996) : « A family of non linear failure envelopes for non cemented soils and rocks discontinuities ». *Electronic Journal of geotechnical Engineering*.
- T. RAMAMURTHY, (1969) : « Crushing phenomena in Granular Soils. » *Journal of the Indian National Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering – Vol 18*.
- P.W. ROWE, (1962) : « The Stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact ». *Department of engineering, University of Manchester*.
- A.S. VESIC, and G.W. CLOUGH, (1968) : « Behaviour of granular materials under high stresses ». *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions », ASCE, VOL 94*.