

# Effets d'échelle dus à la rupture des grains sur la résistance au cisaillement d'enrochements

## Size effects due to grain crushing in rockfill shear strength

Frossard E.

*Tractebel Engineering - Coyne et Bellier, France*

Ovalle C.<sup>1,2</sup>, Dano C.<sup>1</sup>, Hicher P-Y.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*GeM, Ecole Centrale Nantes, CNRS UM 6183, Nantes, France*

<sup>2</sup>*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile*

Maiolino S.

*CETE de Lyon, France*

Hu W.

*State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu U. of Technology, China*

**RÉSUMÉ:** Des preuves expérimentales de l'effet d'échelle sur la résistance au cisaillement de petits enrochements et son lien avec la résistance à l'écrasement des granulats de roches sont présentées et analysées. Les relations d'effet d'échelle qui décrivent ce lien, portent une application pratique directe : une nouvelle méthode pour l'évaluation de la résistance au cisaillement d'enrochements.

**ABSTRACT:** Experimental evidence of size effects in rockfill shear strength and the link with the crushing strength of rock aggregates is presented and analyzed. The scale effect relations describing this link bear a direct practical application: a new method for the evaluation of rockfill shear strength.

**MOTS-CLÉS:** Effet d'échelle, Ruptures des grains, Enrochement, Grande cellule triaxiale, Weibull.

**KEYWORDS:** Size effect, Grain crushing, Rockfill, Shear strength, Large triaxial, Weibull.

### 1 INTRODUCTION

L'étude de la résistance au cisaillement des matériaux granulaires grossiers, largement utilisés dans le génie civil, présente des défis expérimentaux et théoriques considérables. Une méthode originale pour résoudre ce problème réside dans l'utilisation des effets d'échelle issus de la mécanique de la rupture des grains. Ainsi, pour tout matériau fragile existe un effet d'échelle sur la résistance à l'écrasement des granulats eux-mêmes (McDowell & Amon, 2000). Cela signifie que la contrainte à la rupture est fonction décroissante d'une dimension caractéristique de l'échantillon. L'explication physique en a été donnée par Griffith (1921), qui a montré que la probabilité de trouver des défauts internes d'une taille donnée augmente avec la taille de l'échantillon. Ce phénomène est à l'origine des effets d'échelle sur la résistance au cisaillement des assemblages granulaires. Ainsi, lorsque la taille des particules augmente, il y a (1) une augmentation du taux de rupture des grains, (2) une augmentation de la contractance volumique et (3) une diminution de l'angle de frottement au pic (Marachi et al., 1969).

L'objectif principal du présent article est de présenter des preuves expérimentales de la relation entre l'effet d'échelle sur la résistance à la rupture de particules individuelles, et l'effet d'échelle sur la résistance au cisaillement de l'assemblage granulaire, ainsi que de la formulation théorique exprimant cette relation.

### 2 EFFETS D'ECHELLE DANS LA RESISTANCE A LA RUPTURE DE GRANULATS DE ROCHE

La théorie statistique de la résistance des matériaux de Weibull (1939) est basée sur le concept du maillon faible (WLC). Elle décrit la probabilité de survie d'un matériau de taille  $d$  soumis à une contrainte de traction  $\sigma$  par:

$$P_s(d) = \exp\left[-\left(\frac{d}{d_o}\right)^{n_d} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^m\right] \quad (1)$$

où  $\sigma_o$  est la résistance caractéristique ( $P_s = 37\%$  pour un échantillon de taille  $d_o$ ) et  $m$  donne la dispersion des données. Le concept de maillon faible est basé sur l'idée que, pour qu'une chaîne de longueur  $d$  survive sous une contrainte uniaxiale, chaque élément de longueur  $d_o$  doit aussi survivre. Le terme  $(d/d_o)^{n_d}$  est le rapport d'échelle indiquant combien de liens forment la chaîne. D'après Bazant et Planas (1998),  $n_d$  est la dimension de similitude géométrique du problème mécanique:  $n_d = 1, 2$  ou  $3$ , pour une similarité linéaire, surfacique ou volumique, respectivement. Pour une probabilité de survie donnée et des paramètres empiriques connus, une relation d'effet d'échelle est obtenue entre la contrainte de traction induite à la rupture ( $\sigma_f$ ) et la taille caractéristique de l'échantillon ( $d$ ):  $\sigma_f \propto d^{-n_d/m}$ . Pour les granulats, la taille caractéristique est un diamètre des particules  $d$ . Pour les applications pratiques,  $n_d$  est simplement calé sur des données expérimentales, afin de pouvoir utiliser l'Eq. 1 comme un outil statistique phénoménologique.

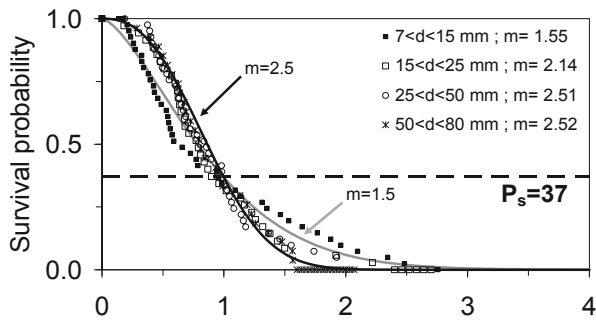


Figure 1. Distributions de Weibull pour les granulats CP.

144 essais d'écrasement des particules, de diamètres compris entre 7 à 80 mm, ont été réalisés sur un enrochement calcaire (CP) provenant d'une carrière située à Préfontaines, France (Hu et al., 2011). Les essais ont été effectués entre deux plaques rigides parallèles à l'aide d'une presse de 10 kN et une vitesse de chargement de 0,1 mm/min. Les particules sont posées sur le plateau inférieur fixe, selon leur plus grande dimension afin d'assurer leur stabilité. Les résultats ont été analysés statistiquement en distinguant chaque fraction de taille. La résistance à la traction induite est considérée comme

$\sigma_f \propto f_f / d^2$  (où  $f_f$  est la force d'écrasement). La figure 1 montre (i) les valeurs de  $m$  pour chaque fraction granulaire, avec une valeur moyenne  $m_{avg}=2,18$ , et (ii) les probabilités de survie avec un très bon accord avec la distribution de Weibull.

La même analyse statistique a été faite à partir de 100 essais d'écrasement sur un enrochement de schiste quartzitique (STV) de la carrière des Trois Vallées, France. Le module moyen est  $m_{avg}=1,57$  et on a eu également un bon ajustement de la distribution de Weibull. La figure 2 montre la résistance à l'écrasement pour l'ensemble des essais sur CP et STV, la résistance caractéristique  $\sigma_o$  et la prédiction obtenue à partir de l'Eq. 1 ( $\sigma(d)=\sigma_o(d/d_o)^{nd/m}$ ; avec  $n_d=1$ ).

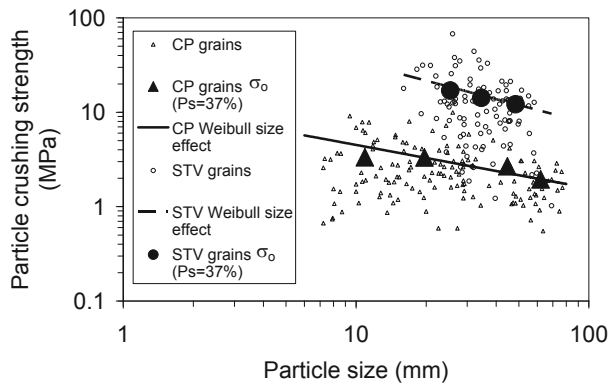


Figure 2. Résistance à l'écrasement des grains et prédictions de Weibull.

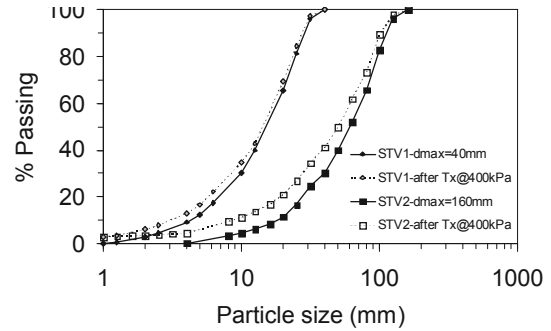
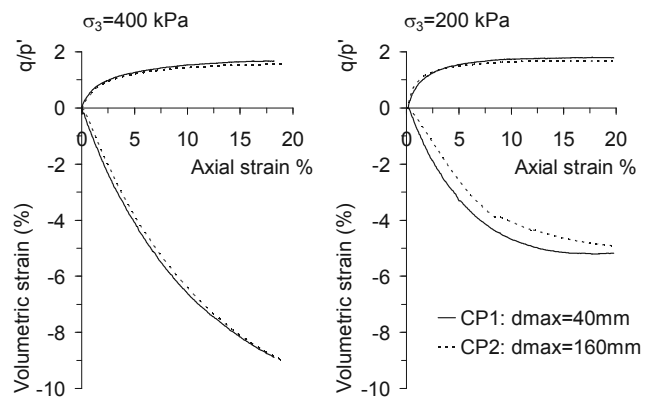


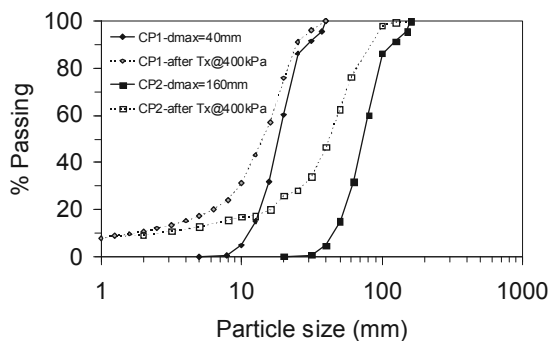
Figure 3. Granulométries avant et après essais triaxiaux.

### 3 ESSAIS TRIAXIAUX

Pour chaque enrochement (CP et STV), on a effectué une série d'essais triaxiaux drainés sur du matériel sec en utilisant deux granulométries homothétiques avec un diamètre maximal  $d_{max}$  de 40 et 160 mm respectivement (Figure 3), compactés à la même densité. Les matériaux de  $d_{max}=40$  mm sont appelés CP1 et STV1 et ceux de  $d_{max}=160$ mm CP2 et STV2. On suppose que la forme des particules et la minéralogie sont préservées entre les deux matériaux homothétiques, parce que chacun a été obtenu par broyage de la même roche-mère en carrière. Les essais sont conduits sur deux grandes cellules triaxiales. Pour  $d_{max}=40$ mm, les échantillons ont un diamètre de 250 mm, une hauteur de 375 mm et sont protégés par deux membranes en néoprène de 1 mm d'épaisseur. Pour  $d_{max}=160$ mm, les échantillons font 1 000 mm de diamètre, 1 500 mm de hauteur et sont protégés par deux membranes en PVC de 1,5 mm d'épaisseur et une couche de géotextile. La plus petite des deux cellules (échantillon de 250 mm) a été conçue pour être placée sous un vérin de 500 kN. Pour les essais sur du matériel sec, les variations de volume sont mesurées à partir du volume de fluide de confinement échangé entre la cellule et le contrôleur pression-volume.



(a)



(a)

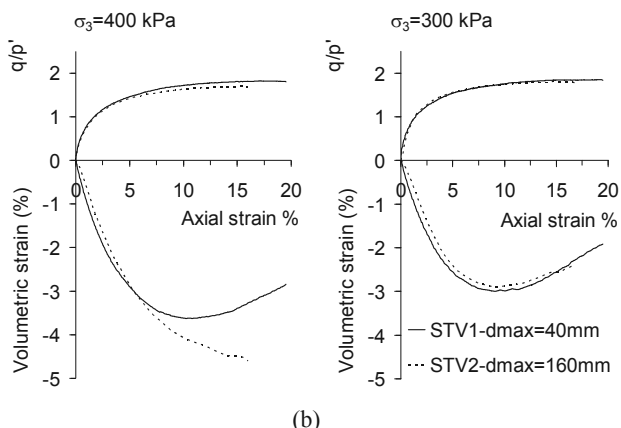


Figure 4. Courbes de contrainte-déformation pour (a) CP and (b) STV

La grande cellule triaxiale (1 000mm) a été conçue pour supporter des charges verticales jusqu'à 2 000 kN. Le système est composé d'une base en acier rigide fixée sur une dalle en béton précontrainte. La cellule peut supporter une pression de confinement de 1,5 MPa. L'enveloppe cylindrique de la cellule est constituée d'une double paroi. Un système de contrôle-commande en continu maintient la même pression dans les deux chambres, en permettant les échanges à l'aide d'une servovalve automatique. Par conséquent, le cylindre intérieur reste indéformable pendant l'essai et la variation de volume d'eau dans le compartiment intérieur est uniquement due à la déformation volumique de l'échantillon et à la pénétration du piston. Une description exhaustive des appareils triaxiaux se trouve dans Hu et al. (2011).

Les échantillons sont préparés par couches successives, compactées par vibrations à l'aide d'une aiguille vibrante. Les indices des vides initiaux sont de  $0,854 \pm 0,03$  pour CP et de  $0,493 \pm 0,03$  pour STV. La Figure 4 montre la réponse mécanique lors des essais de cisaillement drainés à une contrainte effective de confinement  $\sigma'_3$  entre 200 et 400 kPa. La Figure 3 montre les granulométries associées avant et après les essais à  $\sigma'_3=400$  kPa. Sur les Figures 3 et 5, on voit qu'il existe un effet d'échelle sur la résistance mécanique des deux enrochements, avec un taux de rupture des grains plus élevé (Figure 3) et un angle de frottement au pic inférieur (Figure 5) pour les matériaux plus grossiers. Ceci est cohérent avec l'effet d'échelle sur la résistance à l'écrasement des particules (voir Figure 2). Néanmoins, nous n'avons pas observé un effet d'échelle significatif dans la réponse volumique (Figure 4). Marachi et al. (1969) montrent des résultats similaires lorsqu'ils comparent des enrochements de granulométries homothétiques. Une explication possible de cette évolution particulière de la déformation volumique pourrait être le rapport relativement élevé entre  $d_{max}$  et le diamètre de l'échantillon (environ 1/6). De même, les essais sont conduits jusqu'à une déformation axiale de 20% : les particules grossières pourraient ne pas se déplacer suffisamment pour se démêler après la rupture et ainsi permettre plus de contractance. En fait, comme le montre la Figure 6, nous avons observé, après essai, plusieurs grosses particules cassées qui semblent être intactes sans déplacement des fragments brisés.

#### 4 METHODE PREDICTIVE

En considérant que les ruptures individuelles de granulats affectent la résistance au cisaillement de l'ensemble du milieu granulaire, Frossard (2009) (voir aussi Frossard et al., 2012) a proposé une méthode rationnelle afin de prédire les effets d'échelle sur les enveloppes de résistance au cisaillement des enrochements. Il a considéré deux granulométries homothétiques ( $G_1$  la plus fine et  $G_2$  la plus grossière) sous le

même type de chargement, avec la même compacité, la même minéralogie et la même forme initiale des grains, et cherché quelles conditions assuraient un même taux de ruptures dans les deux milieux granulaires sous contraintes. Pour cela, une même probabilité de survie doit être assurée pour deux granulats homologues de  $G_1$  et  $G_2$ , et l'on dispose de la relation suivante pour la résistance à l'écrasement:  $\sigma_{G2} = \sigma_{G1} (d_2/d_1)^{-nd/m}$  (d'après l'Eq.1) où  $\sigma_{G1}$  et  $\sigma_{G2}$  sont les résistances à l'écrasement des granulats de  $G_1$  et  $G_2$ , respectivement.

Frossard (2009) a ensuite montré que pour obtenir le même taux de rupture dans les matériaux granulaires sous cisaillement, la relation précédente doit être vérifiée par les états de contrainte  $\{\tau, \sigma_n\}$  des enveloppes de cisaillement des deux assemblages granulaires homologues:

$$\tau_{G2} = \tau_{G1} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{-n_d/m} \quad \text{et} \quad \sigma_{n-G2} = \sigma_{n-G1} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{-n_d/m} \quad (2)$$

En faisant l'hypothèse, pour le matériau  $G_1$  avec des paramètres calés  $A_{G1}$  et  $b_{G1}$ , d'une enveloppe de rupture telle que celle proposée par De Mello (1977) [ $\tau = A \cdot \sigma_n^b$ ], une enveloppe de rupture peut être prédite pour  $G_2$  en utilisant l'Eq.2 :

$$\tau_{G2} = A_{G1} \cdot \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{-n_d(1-b_{G1})/m} \cdot (\sigma_{n-G2})^{b_{G1}} \quad (3)$$

On remarque que dans l'Eq.2, l'effet d'échelle affecte le coefficient  $A$ , mais pas l'exposant  $b$ .

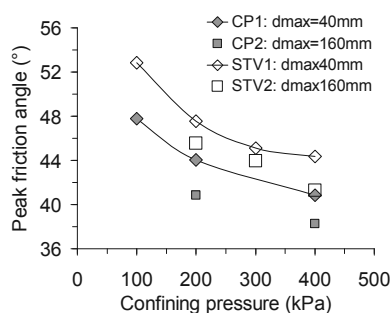


Figure 5. Angles de frottement au pic



Figure 6. Gros granulats de STV récupérés après essai triaxial.

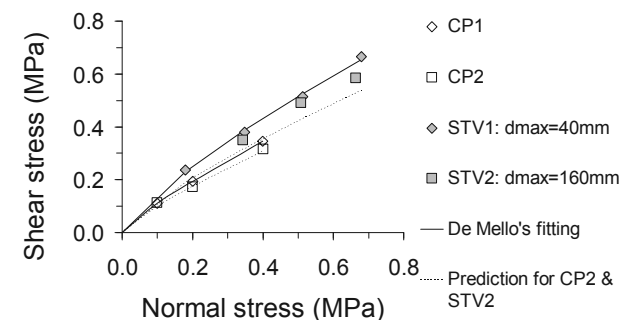


Figure 7. Effet d'échelle sur la résistance au cisaillement

La Figure 7 montre la comparaison entre mesures et prédictions pour les enveloppes de cisaillement pour les deux matériaux CP et STV : en partant du meilleur calage de l'expression de De Mello sur les mesure réalisées sur CP1 et STV1 ( $d_{max}=40$ mm), on a réalisé la prédiction issue de l'Eq. 2 pour CP2 et STV2

( $d_{max}=160$  mm). En comparant aux points de mesures effectuées par ailleurs sur CP2 et STV2, on constate que la méthode de Frossard (2009) prédit correctement les effets d'échelle dans les deux cas, même si elle reste conservatrice dans le cas de STV2.

## 5 CONCLUSIONS

L'effet d'échelle sur la résistance à l'écrasement de granulats rocheux est responsable d'effets d'échelle sur le taux de rupture dans les assemblages d'enrochements, et de là sur la résistance au cisaillement d'ensemble des milieux granulaires correspondants. Même si l'on utilise de très grands appareils de cisaillement au laboratoire, l'échantillon sera toujours réduit d'un ordre de grandeur, ou plus, par rapport aux enrochements de barrage. Dans ce cas, une méthode rationnelle de prédiction devient nécessaire.

Les grandes lignes d'une telle méthode sont établies dans ce travail et largement présentées dans Frossard (2012). Cette référence détaille aussi par ailleurs les incidences sur la stabilité d'ouvrages en enrochements de cet effet d'échelle matériel sur la résistance au cisaillement, et de là les incidences sur la conception des ouvrages en enrochements.

## 6 REMERCIEMENTS

Ce travail fait partie du projet de recherche ECHO (Effets d'Echelle dans les Ouvrages en Remblais du Génie Civil), financé par l'Agence Nationale Française de la Recherche (ANR).

## 7 REFERENCES

- Bazant, Z.P., Planas, J. (1998): Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. CRC Press, USA.
- De Mello, V.F.B. (1977). Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams. *Géotechnique*, Vol. 27, No.3, pp. 281-355
- Frossard, E. (2009): Scale effects in granular fill shear strength and in stability of large rockfill structures. Proc. XVIIth ICSMFE, Vol 1, 97-101, Alexandria, Egypt, 5-9 Oct., 2009
- Frossard, E., Hu, W., Dano, C., Hicher, P.Y. (2012): Rockfill shear strength evaluation: a rational method based on size effects. *Géotechnique* 62(5), 415-428
- Frossard, E. (2012): Granular materials in Civil Engineering: recent advances in the physics of their mechanical behavior, and applications to engineering works. *in* Multiscale Geomechanics- From soil to Engineering Projects- Ed. by P.-Y. Hicher, ISTE/Wiley, 35-81, Jan 2012, ISBN 978-1-84821 – 246-6
- Griffith, A.A. (1921): The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 221, 163-198
- Hu, W., Dano, C., Hicher, P.-Y., Le Touzo, J.-Y., Derks, F., Merliot, E. (2011): Effect of sample size on the behavior of granular materials. *Geotech. Test. J.* 34(3), 186-197
- Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B., Duncan, J.M. (1969): Strength and deformation characteristics of rockfills materials. Report No. TE-69-5, Dept. of Civil Engineering, Univ. of California, Berkeley.
- McDowell, G. R., Amon, A.: (2000) The application of Weibull statistics to the fracture of soil particles. *Soils Found.* 40(5), 133–141
- Weibull, W. (1939): A statistical theory of the strength of materials. *Proc. Roy. Swedish Inst. Eng. Res.* 151