



HAL
open science

Effets de la corrélation de taille et de forme des grains sur la résistance au cisaillement des matériaux granulaires

S. Carrasco, Paula Quiroz Rojo, David Cantor Garcia, Carlos Ovalle

► **To cite this version:**

S. Carrasco, Paula Quiroz Rojo, David Cantor Garcia, Carlos Ovalle. Effets de la corrélation de taille et de forme des grains sur la résistance au cisaillement des matériaux granulaires. 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04281698

HAL Id: hal-04281698

<https://hal.science/hal-04281698>

Submitted on 14 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Effets de la corrélation entre les tailles et les formes des grains sur la résistance au cisaillement des matériaux granulaires

S. CARRASCO¹⁻², P. QUIROZ¹⁻²⁻³, D. CANTOR¹⁻², C. OVALLE¹⁻²

¹ Dép. des génies civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal, Québec, Canada

² Institut de recherche en mines et environnement (IRME), Québec, Canada

³ LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

carlos.ovalle@polymtl.ca

Résumé :

Dans les matériaux granulaires grossiers les grains présentent souvent des corrélations entre leur taille et leur forme. La résistance au cisaillement de ces matériaux surdimensionnés est généralement déterminée sur des échantillons à l'échelle réduite, avec une distribution granulométrique modifiée. Ceci implique que la distribution de la forme des grains pourrait également changer, avec un impact sur la résistance. À l'aide de simulations DEM 2D, nous explorons la résistance au cisaillement d'échantillons composés de particules présentant des corrélations taille-forme (allongement et angularité des grains). Nous trouvons que les corrélations ont un impact significatif sur la résistance à mesure que la granulométrie évolue. En utilisant une décomposition du tenseur des contraintes, nous sommes en mesure d'identifier les sources des différents comportements dans chaque corrélation.

Abstract :

In coarse granular materials, grains often show correlations between their size and shape. The shear strength of these oversized materials is usually determined using scaled-down specimens with a modified particle size distribution. However, such an approach could also change the grain shape distribution, affecting the shear strength. Using 2D DEM simulations, we explore the strength of samples composed of particles exhibiting size-shape correlations (elongation and grain angularity). We find that the size-shape correlation significantly impacts the strength as grading changes. Using a stress tensor decomposition, we are able to identify the sources of the different behaviors in each correlation.

Mots clefs : granulométrie, forme des grains, cisaillement, DEM

1 Introduction

L'industrie minière génère des haldes à stériles pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres de haut et composées de matériaux granulaires grossiers lâches non compactés [1][2]. La stabilité mécanique de ces très grandes structures doit être vérifiée car tout glissement de masse pourrait affecter l'environnement et l'opération minière [3]. Des essais mécaniques en laboratoire sont généralement effectués pour obtenir les paramètres de résistance au cisaillement. Pourtant, la résistance des matériaux granulaires très grossiers doit être mesurée sur des échantillons à petite échelle, dont on modifie la granulométrie en supprimant la fraction grossière (surdimensionnée) qui ne peut pas être manipulée dans

les appareils de laboratoire [4]. Les méthodes courantes pour préparer des échantillons à petite échelle sont la granulométrie tronquée ou la gradation parallèle, par exemple [5][6].

Il est bien connu que la résistance critique normalisée des matériaux granulaires lâches ne dépend pas de la densité de l'assemblage, mais uniquement des propriétés des grains [7]. De plus, des travaux récents ont montré que si tous les grains ont la même forme, quelle que soit leur taille, la résistance ne dépend pas de la distribution granulométrique [8][9][10][11][12][13]. Cela implique que, à condition que la forme des particules et la rugosité de la surface des grains restent inchangées pour les différentes tailles de grains pour un matériau donné, une résistance représentative peut être obtenue par des tests de cisaillement sur des échantillons avec différentes granulométries, tels que ceux utilisés dans les méthodes de mise à l'échelle réduite des matériaux grossiers.

D'autre part, un certain nombre d'études ont démontré que la résistance dépend fortement de la forme des particules, et les matériaux composés de grains plus anguleux et/ou allongés ont une résistance plus élevée que les grains arrondis [14][15][16][17][18][19]. Ainsi, les effets de la forme des particules pourraient invalider les méthodes de mise à l'échelle réduite basées sur la modification de la granulométrie dans les matériaux granulaires composés de clastes de roches présentant une corrélation taille-forme des particules. Par exemple, [20] ont rapporté une roche stérile composée de grains colluviaux altérés à partir de roches sédimentaires anisotropes, où plus l'agrégat rocheux est grossier, plus la forme du grain est plate. Au contraire, [21] ont décrit un matériau d'engrènement à partir de roche schisteuse où le métamorphisme a induit une foliation fine entraînant de petites particules beaucoup plus allongées que les clastes grossiers. Dans ces matériaux, la modification de la granulométrie changera nécessairement la forme caractéristique des particules, affectant ainsi la résistance [21]. Par conséquent, pour capturer la résistance des prototypes de matériaux grossiers à l'aide d'échantillons à petite échelle, les méthodes de mise à l'échelle doivent tenir compte non seulement de la taille des grains, mais également du maintien d'une distribution représentative des formes de particules. Cependant, alors que l'effet de la forme des particules a été largement étudié, l'effet du changement de forme à différentes tailles de particules dans un matériau donné reste mal compris.

L'objectif principal de cet article est d'étudier les effets combinés des distributions de la taille et de la forme des particules sur la résistance des milieux granulaires. Nous présentons des simulations numériques dans le cadre de la méthode des éléments discrets (DEM, par son sigle en anglais) d'échantillons granulaires 2D sur une large gamme de tailles de grains et de formes de grains. Pour chaque granulométrie, nous avons préparé des échantillons avec différentes corrélations taille-forme des particules, afin d'isoler l'effet de la forme sur la résistance. Nous analysons les résultats en termes de comportement macromécanique en fonction de la distribution de la taille et de la forme des particules. Grâce à des descripteurs micromécaniques, nous sommes en mesure d'identifier clairement l'effet des caractéristiques des particules sur la résistance, en analysant séparément la contribution à la résistance de chaque groupe de tailles et de formes au sein d'un échantillon.

2 Matériaux modèles et simulations numériques

Dans ce travail, nous explorons la résistance au cisaillement d'échantillons composés de particules présentant des corrélations taille-forme et nous nous concentrons sur les cas d'allongement et d'angularité des particules. Nous considérons deux scénarios opposés pour chacun des cas ; pour l'allongement des particules :

- (A1) gros grains allongés avec des grains circulaires plus fins,
- (B1) gros grains circulaires avec des grains allongés plus fins

et pour l'angularité des particules :

- (A2) gros grains circulaires avec des grains angulaires plus fins,
- (B2) gros grains angulaires avec des grains circulaires plus fins.

Pour chaque corrélation taille-forme, au moyen de la méthode d'éléments discrets en 2D, nous préparons des échantillons pour une variété de 10 granulométries dont la dispersion de tailles de grains est donnée par le paramètre $S=(d_{max}-d_{min})/(d_{max}+d_{min})=0$ jusqu'à $S=0,9$ (voir Figure 1).

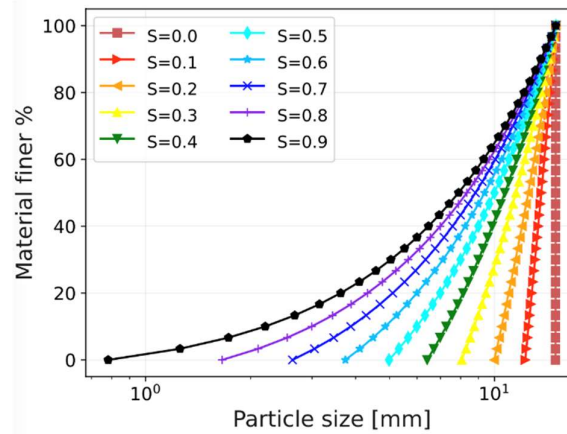


Figure 1. Granulométries en fonction de S .

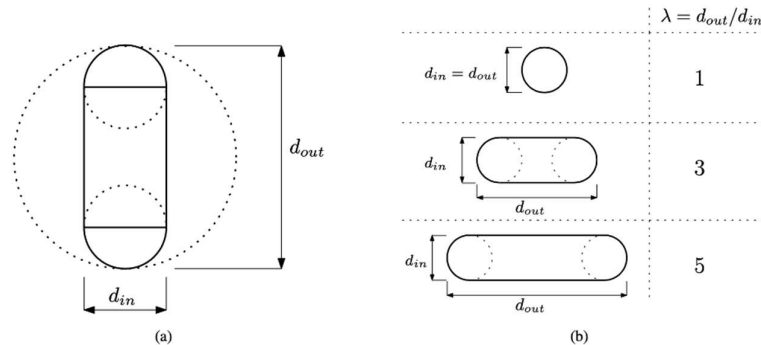


Figure 2. (a) Schéma présentant les cercles intérieur et extérieur d'une particule allongée, et (b) exemples de particules d'allongement λ égal à 1, 3 et 5.

La forme des particules allongées est donnée par le rapport d'aspect $\lambda=d_{out}/d_{in}$ (Figure 2), avec une corrélation de forme donnée par l'équation (1) pour le cas A1 et l'équation (2) pour le cas B1:

$$\lambda(d) = \lambda_{min} + \frac{d - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} (\lambda_{max} - \lambda_{min}) \quad (1)$$

$$\lambda(d) = \lambda_{min} + \frac{d_{max} - d}{d_{max} - d_{min}} (\lambda_{max} - \lambda_{min}) \quad (2)$$

En ce qui concerne les cas A2 et B2, 10 diamètres de grain différents sont définis entre d_{min} et d_{max} , et chaque diamètre est affecté d'un degré d'angularité défini au travers du nombre de sommets qui varie entre 3 et 64 (voir Figure 3). Pour un échantillon avec un S donnée, le nombre de particules de chaque taille est généré de sorte de maintenir la surface totale des particules constante pour chaque forme. Une caractéristique distinctive de cette méthodologie de génération de particules est qu'elle conduit à des échantillons dans lesquels la distribution granulométrique peut être la même, mais la forme des particules pour chaque grain varie fortement (voir Figures 4 et 5).

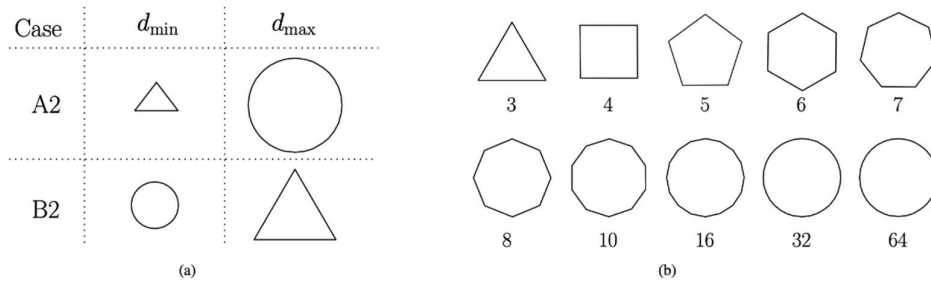


Figure 3. (a) Schéma présentant les formes de particules et (b) familles de formes de 3 à 64 sommets.

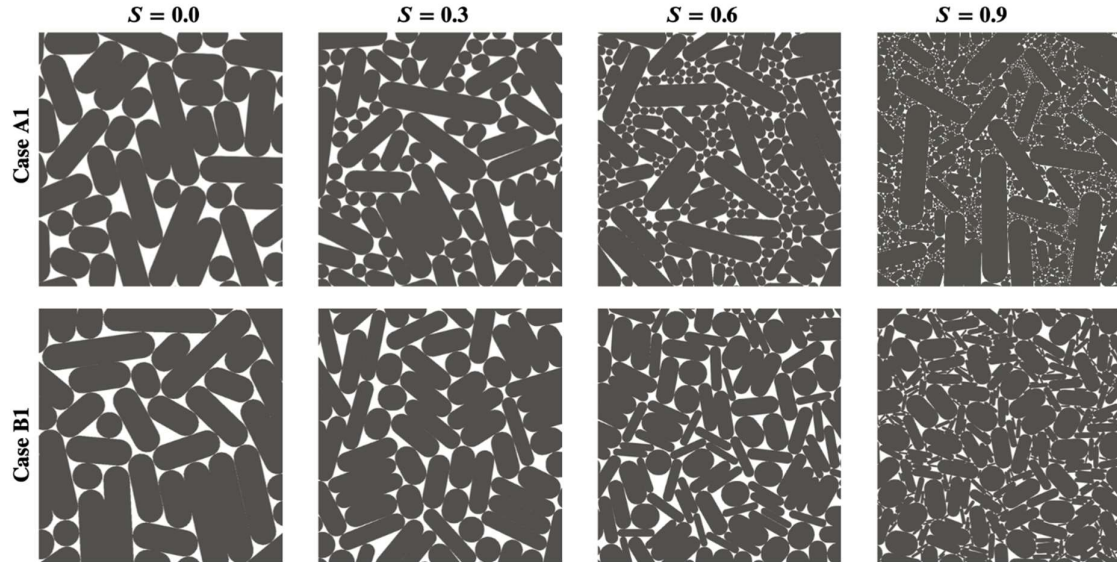


Figure 4. Échantillons pour le cas A1 (en haut) et le cas B1 (en bas) pour les plages de taille de particule $S=0,0$, $S=0,3$, $S=0,6$ et $S=0,9$.

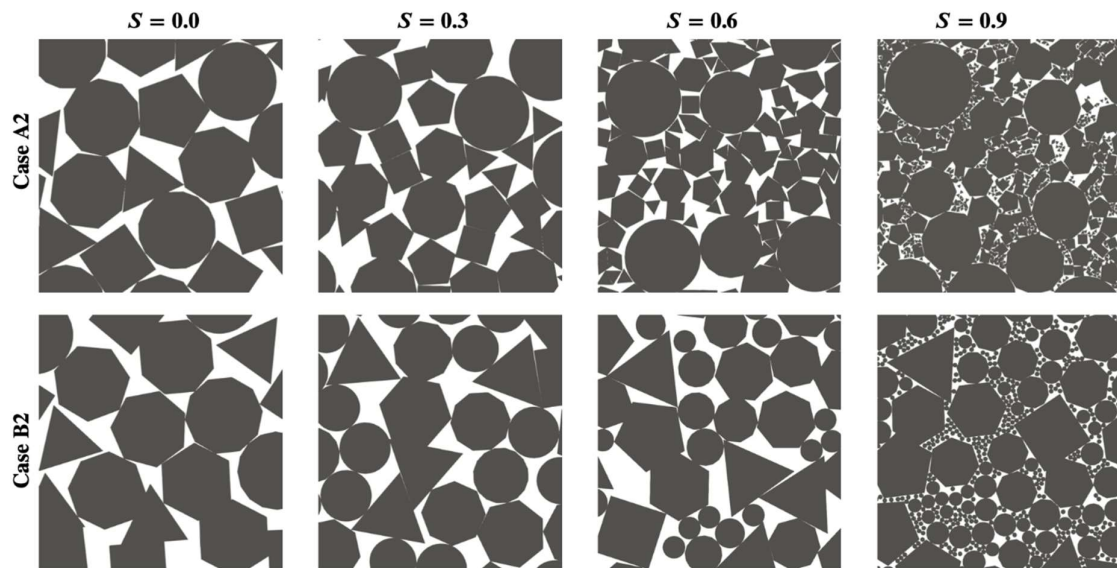


Figure 5. Échantillons pour le cas A2 (en haut) et le cas B2 (en bas) pour les plages de taille de particule $S=0,0$, $S=0,3$, $S=0,6$ et $S=0,9$.

Nos échantillons sont constitués de $Np \approx 10\,000$ particules qui sont placées dans des boîtes en utilisant un algorithme de dépôt basé sur des règles géométriques. On comprime initialement les échantillons à l'aide d'une pression isotrope $P=10$ kPa via des parois rigides autour des assemblages jusqu'au point où la fraction solide $v=A_s/A$ (soit A_s l'aire des grains et A l'aire de l'échantillon) ne présente que des fluctuations inférieures à 0,1% de la valeur moyenne pour chaque échantillon.

Nous avons utilisé des conditions aux limites périodiques le long de la direction horizontale pour les essais de cisaillement simple, impliquant que toute particule au bord de la limite de la boîte sera virtuellement en interaction avec les particules du côté opposé de l'échantillon. Ensuite, les tests de cisaillement sont entrepris en déplaçant la paroi supérieure et inférieure le long de l'axe horizontal à une vitesse constante v , tout en appliquant une charge P le long de l'axe vertical. La vitesse de cisaillement v est définie pour suivre une condition d'écoulement quasi statique, imposée par le nombre d'inertie $I=\gamma\langle d\rangle\sqrt{\rho P}\ll 1$, où $\langle d\rangle$ est le diamètre moyen des particules, ρ la densité des particules et $\gamma=v/h_0$, h_0 étant la hauteur de l'échantillon au début du test. Dans toutes nos simulations, le nombre inertiel a été fixé à $I=1\times 10^{-3}$. Nous avons cisailé nos échantillons jusqu'à une déformation de cisaillement cumulée $\gamma=400\%=\delta/h_0$, avec δ le déplacement cumulé des parois.

Les simulations ont été réalisées avec le code open-source LMGC90 [22] qui utilise l'approche par éléments discrets connue sous le nom de dynamique de contact (CD), qui considère des ensembles de corps rigides interagissant avec des contacts de frottement unilatéraux [23][24][25]. Dans tous les tests, le coefficient de frottement entre les particules a été fixé à 0,4 et la gravité a été négligée. Des vidéos des tests de cisaillement peuvent être trouvées dans le lien suivant <https://youtu.be/ZX3hl28u4TI>. Plus de détails sur les simulations numériques se trouvent dans [26].

3 Comportement macroscopique

Le comportement au cisaillement macroscopique est caractérisé à l'aide de l'évolution de la fraction solide v et de la résistance au cisaillement q/p (q est la contrainte déviatorique et p est la pression moyenne du tenseur des contraintes granulaires σ). Ce tenseur se trouve à l'aide de l'expression suivante [27]:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{vc} f_i^c \ell_j^c \quad (3)$$

avec f et ℓ les vecteurs de force et de branche (c'est-à-dire le vecteur joignant le centre de masse des particules qui se touchent aux contacts c). Nous calculons $q=(\sigma_1-\sigma_2)/2$ et $p=(\sigma_1+\sigma_2)/2$, avec σ_1 et σ_2 les contraintes principales de σ . Notez que $q/p = \sin(\phi)$ à l'état critique, ϕ étant l'angle de frottement macroscopique du matériau. Nous caractérisons l'état critique en faisant la moyenne des différents paramètres pour les 20% dernières données de déformation sur le total de 400 %. Nous avons observé des valeurs stables pour v et q/p dès $\gamma = 200\%$; cependant, nous avons appliqué plus de déformation pour laisser d'autres paramètres structurels se stabiliser.

La Figure 6a montre l'évolution de la fraction solide à l'état critique en fonction de la dispersité granulométrique S pour les cas A1 et B1. Pour le cas A1, on observe que v augmente progressivement avec S car les grains arrondis plus petits sont capables de remplir les pores laissés par des cavités créées par des grains allongés plus gros. Étonnamment, le cas B1 ne montre pas un comportement analogue. Dans ce cas où les plus petites particules présentent des formes allongées, la fraction solide ne semble être que peu affectée par la distribution granulométrique et varie selon une tendance parabolique avec une fraction solide minimale de $v \approx 0,8$ pour $S=0,4$. En d'autres termes, ces échantillons sont incapables de développer des cavités suffisamment grandes pour permettre aux plus petites particules allongées de

s'intégrer. Ce n'est qu'après $S > 0,6$ que la dispersion de taille peut créer des configurations plus denses. Toujours à l'état critique, la Figure 6b présente l'évolution de q/p avec S pour les cas A1 et B1. Pour le cas A1, nous observons que la résistance au cisaillement diminue progressivement avec S malgré l'augmentation de la fraction solide que nous avons soulignée dans la figure précédente.

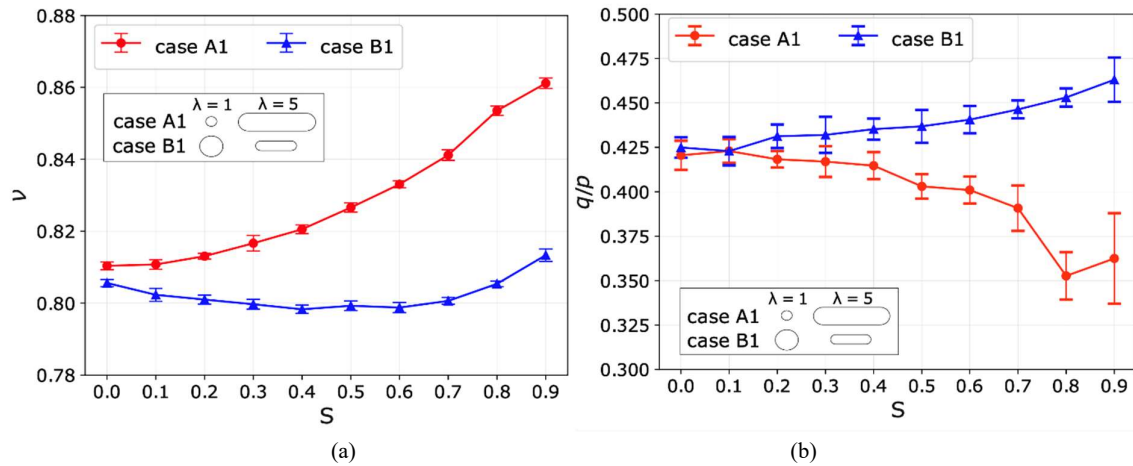


Figure 6. Évolution de (a) la fraction solide ν et (b) de la résistance au cisaillement q/p à l'état critique, en fonction de la dispersion granulométrique S pour les cas A1 et B1. Les barres d'erreur affichent l'écart type des données pour les 20% dernières données de déformation.

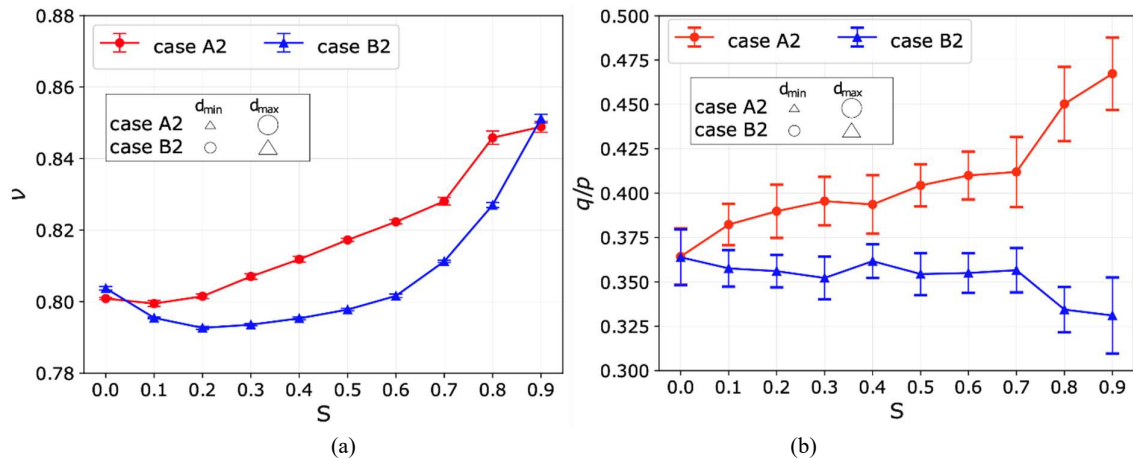


Figure 7. Évolution de (a) la fraction solide ν et (b) de la résistance au cisaillement q/p à l'état critique, en fonction de la dispersion granulométrique S pour les cas A2 et B3.

La Figure 7a montre l'évolution de la fraction solide à l'état critique en fonction de la dispersité granulométrique S pour les cas A2 et B2. Dans les deux cas, on observe que ν augmente progressivement avec S car les grains plus petits remplissent les pores laissés par des cavités créées par des grains plus gros. Pourtant, l'évolution entre les valeurs extrêmes de S n'est pas la même, dû aux différences dans la distribution des formes de grains. Il est aussi remarquable que la fraction solide dans le cas B2 est seulement capable d'augmenter substantiellement après $S > 0,6$. De manière analogue aux observations sur les particules allongées, des échantillons à grosses particules angulaires ne peuvent pas développer de pores assez grands pour contenir les petites particules qu'après une dispersité granulométrique S importante. La Figure 7b présente l'évolution de q/p à l'état critique en fonction de S pour les cas A2 et B2. Pour le cas B2, nous observons que la résistance au cisaillement diminue légèrement avec S , alors qu'elle augmente significativement dans le cas A2. Notez que d'après plusieurs études, les grosses particules normalement se trouvent les plus chargées et contribuent fortement au développement de

résistance dans un milieu granulaire. En parallèle, les particules anguleuses sont aussi clairement capables de développer plus de résistance que des grains circulaires. Il n'est donc pas évident que les échantillons à gros grains ronds puissent résister plus que les échantillons à gros grains anguleux. Ce comportement doit être considéré rigoureusement afin d'identifier les mécanismes microstructuraux à la source de telles variations de résistance.

4 Description microstructurale

Nous caractérisons la configuration moyenne des échantillons à l'état critique en utilisant des informations relatives aux particules et leurs contacts. La connectivité est donnée par le nombre moyen de contacts par particule ou nombre de coordination, défini comme $Z=2N_c/N^*_p$ (N_c est le nombre total de contacts porteurs de force, et N^*_p le nombre effectif de grains transmettant des forces). La figure 8a montre Z en fonction de l'étendue de la granulométrie pour les cas A1 et B1. Alors que pour les particules circulaires, Z devrait rester proche de 4, indépendamment de S , l'inclusion de particules allongées est connue pour affecter la valeur de Z à l'état critique [14]. Lorsque l'étendue de la granulométrie augmente, les cas A1 et B1 présentent des évolutions opposées, avec une hausse de Z pour les assemblages contenant de grosses particules allongées (cas B1) et une baisse de connectivité pour les échantillons contenant de grosses particules circulaires (cas A1). Dans la figure 8b on constate que Z reste pratiquement constant autour de 3,7 pour le cas A2, alors que Z diminue avec S de 3,7 à $S=0$ jusqu'à 3,2 à $S=0,9$. Ceci serait dû à une meilleure connectivité des particules grosses circulaires du cas A2, tandis que les gros grains angulaires du cas B2 sont moins connectés.

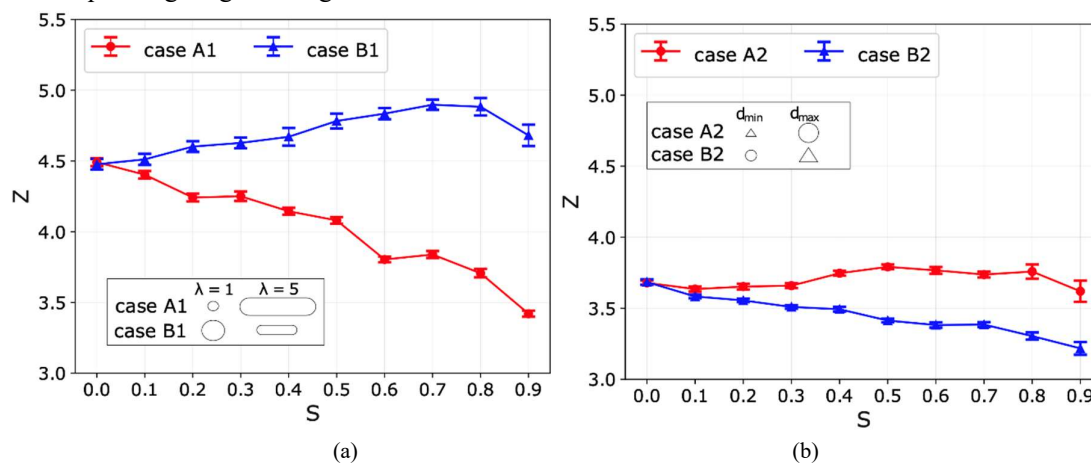


Figure 8. Évolution du nombre de coordination à l'état critique en fonction de la dispersion granulométrique S pour les cas (a) A1 et B1, et (b) A2 et B2.

Ces résultats montrent que les corrélations taille-forme des particules modifient profondément la texture granulaire et les mécanismes de transmission des efforts. Avant tout, cela suggère également que les méthodes de mise à l'échelle courantes pour les matériaux granulaires grossiers devraient éviter de rejeter certaines classes granulométriques uniquement basées sur la taille des particules, mais devraient également se concentrer sur la représentativité de la forme des particules sur des échantillons à petite échelle. Afin de comprendre le comportement observé dans nos expériences, nous devons explorer les caractéristiques microstructurales des échantillons et les contributions de chaque classe de taille/forme à la résistance macroscopique.

La figure 9 montre l'évolution de la proportion de particules flottantes $c_0=N^0_p/N_p$, avec N^0_p étant le nombre de particules flottantes, en fonction de S . Le cas A1 montre que c_0 augmente progressivement avec S comme indiqué dans la littérature [8][11][16]. Le cas B1 présente une évolution non linéaire

inattendue de c_0 avec S , diminuant d'abord avec S jusqu'à $S=0,6$, puis augmentant à nouveau rapidement. Ceci est en effet lié au fait que de petites particules peuvent remplir les pores laissés entre les grains plus gros. Les cas A2 et B2 montrent une évolution similaire de c_0 avec S , ce qui est surprenant étant donné les fortes différences macroscopiques mentionnées précédemment.

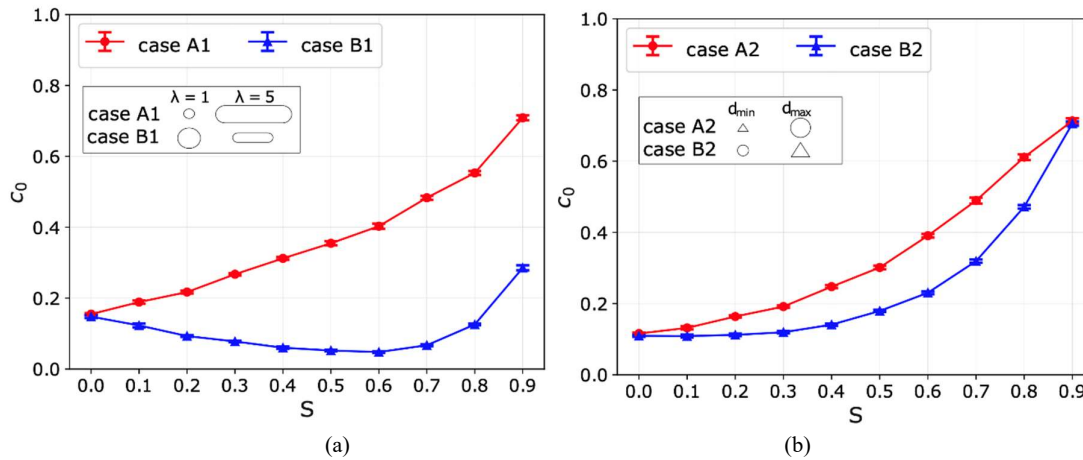


Figure 9. Évolution du nombre de particules flottantes à l'état critique en fonction de la dispersion granulométrique S pour les cas (a) A1 et B1, et (b) A2 et B2.

Étant donné que le rôle de chaque forme de particule dans une granulométrie donnée peut largement varier pour un matériau granulaire donné, on peut explorer les contributions à la résistance de chaque famille de grains au travers d'une décomposition du rapport de cisaillement q/p selon l'expression suivante [28]:

$$q/p = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^{N_{sc}} q_i \quad (4)$$

où q_i est la composante déviatorique de chaque classe de taille. La valeur correspondante q_i est trouvée en utilisant le tenseur des contraintes granulaires (équation 3), mais en ne prenant en compte que les grains appartenant à une classe de taille particulière. Les figure 10 et 11 présentent les contributions déviatoriques (q_i/p à l'état critique) des classes de forme à q/p en fonction de S . Pour les cas A1 et B1 (figure 10), nous regroupons les classes de forme dans des intervalles de rapport d'aspect λ de 1 ; par exemple, les indices dans λ_{1-2} signifient qu'une telle valeur rassemble q pour l'intervalle d'allongements de particules $\lambda \in [1,2[$. Pour les cas A2 et B2 (figure 11) nous regroupons les classes de forme par nombre de sommets (de 3 à 64).

Pour le cas A1, dans lequel les particules plus grosses sont allongées, nous nous attendions à ce que les grains circulaires (c'est-à-dire λ_{1-2}) contribuent relativement moins à la résistance au cisaillement à mesure que S augmente. Ceci est en effet observé dans la figure 10a lorsque la valeur q_i pour λ_{1-2} diminue avec S . Les contributions des classes de forme λ_{2-3} et λ_{3-4} ont également tendance à diminuer avec S . En revanche, les contributions des gros grains allongés λ_{4-5} , restent quasiment indépendantes de S et, pour les portées de grande taille de grains S , ce sont bien les particules qui contribuent le plus à la résistance au cisaillement. Ces courbes aident à comprendre que la chute de q/p dans le cas A1 est due à une diminution de la résistance au cisaillement apportée par les grains les moins allongés. Pour le cas B1 (figure 10b), alors que q_i pour λ_{2-3} , λ_{3-4} et λ_{4-5} sont pratiquement indépendants avec S , la contribution des grains les plus circulaires (c'est-à-dire λ_{1-2}) augmente progressivement avec S et reste le support principal de la résistance au cisaillement parmi toutes les classes de forme.

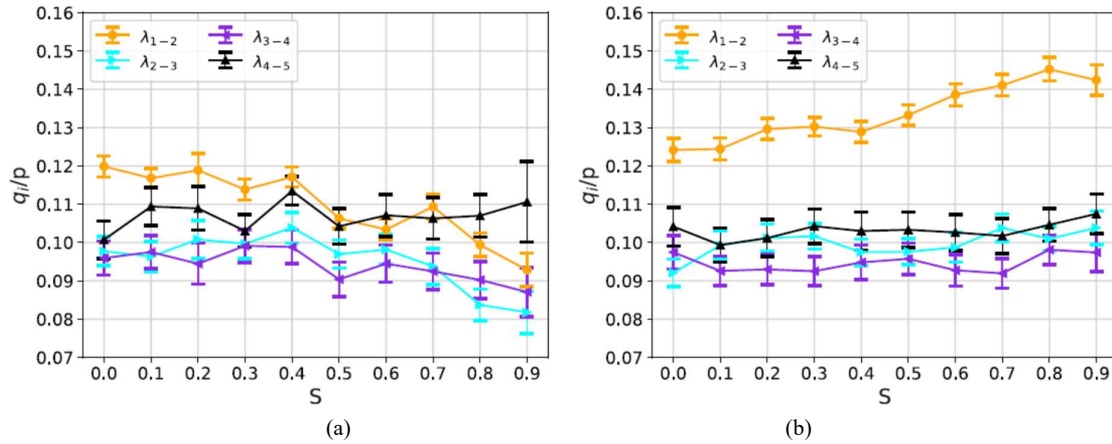


Figure 10. Décomposition de la composante déviatorique des contraintes par rapport d'aspect λ pour les cas (a) A1 et (b) B1 en fonction de l'étendue granulométrique S .

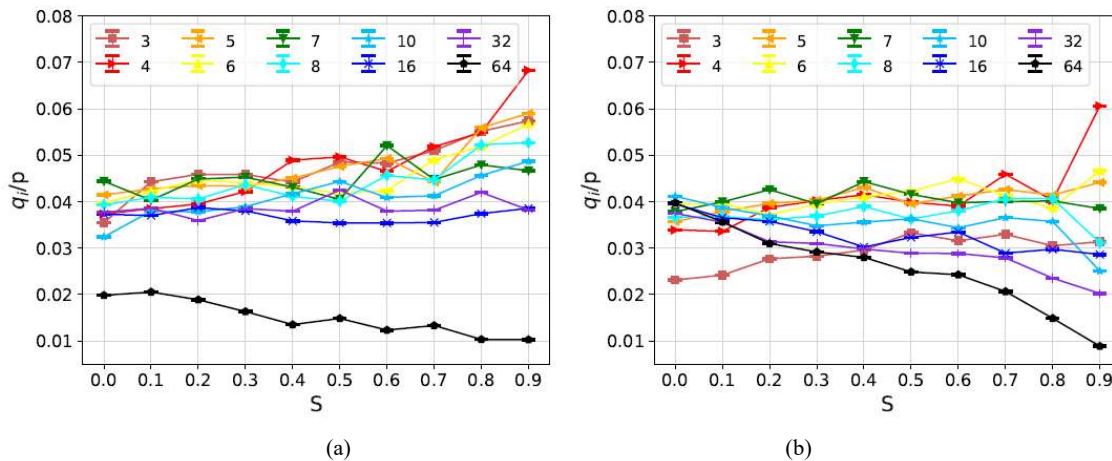


Figure 11. Décomposition de la composante déviatorique des contraintes par famille de formes pour les cas (a) A2 et (b) B2 en fonction de l'étendue granulométrique S .

Pour le cas A2, dans lequel q/p augmente avec S (voir figure 7b), la figure 11a montre que ce sont les particules angulaires (3 à 8 sommets) qui prennent une proportion plus grande de q/p lorsque S augmente, malgré qu'il s'agit des grains les plus petits dans les échantillons. En revanche, les contributions des gros grains moins angulaires restent quasiment indépendantes de S , sauf pour les grains à 64 sommets où q_i/p diminue légèrement. Pour le cas B2, la légère diminution de q/p avec S (voir figure 7b) est portée principalement par une diminution de q_i/p dans les particules quasi-circulaires plus fines. Il est également inattendu que les petites particules jouent un rôle si important dans la source de résistance mais ceci apparaît naturellement lorsqu'on considère des corrélations entre les tailles et les formes des grains.

5 Conclusions

Dans cet article, nous avons étudié des assemblages granulaires avec des corrélations taille-forme. Nos assemblages granulaires varient en taille de grain allant des systèmes monodisperses aux systèmes polydisperses dans lesquels le rapport $d_{max}/d_{min}=19$. En utilisant une approche par éléments discrets, nous avons testé ces assemblages granulaires sous des conditions de cisaillement quasi-statique jusqu'à une déformation de cisaillement cumulée $\gamma = 400\%$.

Nous avons caractérisé la résistance au cisaillement critique en fonction de la taille des grains. Nous avons observé que, contrairement aux résultats de la littérature où la résistance au cisaillement s'avère indépendante de la granulométrie, les corrélations taille-forme modifient profondément la réponse mécanique des assemblages. En particulier, les systèmes dans lesquels les grains plus gros sont allongés et les petits grains sont circulaires présentent une diminution de la résistance au cisaillement à mesure que l'étendue de la granulométrie augmente. La corrélation inverse, dans laquelle les gros grains sont circulaires et les petits grains sont allongés, a montré que la résistance au cisaillement augmente à peine avec la granulométrie. Pour des corrélations d'angularité et taille de grains, les matériaux avec des grains gros angulaires et des petits grains circulaires présentent une augmentation significative de la résistance au cisaillement à mesure que l'étendue de la granulométrie augmente. En revanche, avec une corrélation inverse, dans laquelle les gros grains sont circulaires et les petits grains sont angulaires, la résistance au cisaillement diminue très légèrement avec la dispersion granulométrique. Ces observations soulignent l'importance de considérer la forme des grains lorsqu'il s'agit de méthodes de mise à l'échelle en géotechnique.

Pour comprendre le comportement différent dans les corrélations tailles/formes étudiées, nous avons entrepris une analyse microstructurale. Nous avons montré que le nombre moyen de contacts par grain ou coordination le nombre Z évolue de manière similaire à la résistance au cisaillement pour les corrélations grains ronds-allongés (A1 et B1). Un tel comportement n'est pas retrouvé pour les tests avec les corrélations entre grains angulaires-ronds (A2 et B2). Ensuite, nous avons décomposé la résistance au cisaillement q/p par des contributions de différentes classes de forme. Cette analyse a montré que, pour les corrélations de forme liées à l'élongation des grains, les particules plus grosses ont tendance à contribuer davantage à la résistance au cisaillement à mesure que la granulométrie est plus étendue. Ceci est moins évident, cependant, lorsque les particules plus grosses sont allongées. Dans les deux cas A1 et B1, les particules arrondies semblent systématiquement jouer un rôle important dans la résistance au cisaillement indépendamment de leur classe granulométrique. Dans le cas des corrélations A2 et B2, le rôle des grains anguleux n'est plus évident. Malgré leur capacité de générer plus de résistance, nous avons observé que les grains fins dans ces corrélations permettent d'expliquer les variations de résistance au niveau macroscopique.

Références

- [1]. Bard E, Anabalón ME, Campaña J. Waste rock behavior at high pressures: dimensioning high waste rock dumps. In *Multiscale geomechanics*, edited by P.-Y. Hicher, pp. 86-112. London: ISTE/Wiley. 2012:
- [2]. Aubertin M, Maknoon M, Ovalle C. Waste rock pile design considerations to promote geotechnical and geochemical stability. *Canadian Geotechnique - The CGS Magazine*: Fall. 2021;2(3):44-47.
- [3]. Hungr, O., Dawson, R., Kent, A., Campbell, D., and Morgenstern, N.R., 2002, Rapid flow slides of coal-mine waste in British Columbia, Canada. In Evans, S.G., and DeGraff, J.V., eds., *Catastrophic landslides*. Geological Society of America, Vol. 15.
- [4]. Ovalle C, Linero S, Dano C, Bard E, Hicher PY, Osses R. Data compilation from large drained compression triaxial tests on coarse crushable rockfill materials. *J Geotech Geoenviron*. 2020; 146:06020013.
- [5]. Marachi N. *Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials*. Berkeley: University of California; 1969.

- [6]. Ovalle C, Frossard E, Dano C, HuW, Maiolino S, Hicher PY. The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data. *Acta Mech.* 2014;225:2199-2216.
- [7]. Biarez J, Hicher PY, et al. *Elementary Mechanics of Soil Behaviour: Saturated Remoulded Soils*. Balkema, Rotterdam; 1994.
- [8]. Voivret C, Radjai F, Delenne JY, El Youssoufi MS. Multiscale force networks in highly polydisperse granular media. *Phys Rev Lett.* 2009;102:178001.
- [9]. Wood DM, Maeda K. Changing grading of soil: effect on critical states. *Acta Geotech.* 2008; 3: 3-14.
- [10]. Azéma E, Linero S, Estrada N, Lizcano A. Shear strength and microstructure of polydisperse packings: the effect of size span and shape of particle size distribution. *Phys Rev E.* 2017;96.
- [11]. Cantor D, Azéma E, Sornay P, Radjai F. Rheology and structure of polydisperse three-dimensional packings of spheres. *Phys Rev E.* 2018;98(5):052910.
- [12]. Li G, Ovalle C, Dano C, Hicher PY. Influence of Grain Size Distribution on Critical State of Granular Materials. In: *Springer.* 2013:207-210.
- [13]. Yang J, Luo XD. The critical state friction angle of granular materials: does it depend on grading? *Acta Geotech.* 2018;13:535-547.
- [14]. Azéma E, Radjai F. Stress-strain behavior and geometrical properties of packings of elongated particles. *Phys Rev E.* 2010;81(5):051304.
- [15]. Matsushima T, Chang CS. Quantitative evaluation of the effect of irregularly shaped particles in sheared granular assemblies. *Granul matter.* 2011;13(3):269-276.
- [16]. Nguyen DH, Azéma E, Sornay p, Radjai F. Effects of shape and size polydispersity on strength properties of granular materials. *Phys Rev E.* 2015;91:032203.
- [17]. Altuhafi FN, Coop MR, Georgiannou VN. Effect of particle shape on the mechanical behavior of natural sands. *J Geotech Geoenviron.* 2016;142(12):04016071.
- [18]. Xiao Y, Long L, Matthew Evans T, Zhou H, Liu H, Stuedlein AW. Effect of particle shape on stress-dilatancy responses of medium-dense sands. *J Geotech Geoenviron.* 2019;145:04018105.
- [19]. Linero S, Azéma E, Estrada N, Fityus S, Simmons J, Lizcano A. Impact of grading on steady-state strength. *Geotech Lett.* 2019; 9(4):328–333.
- [20]. Linero S, Fityus S, Simmons J, Lizcano A, Cassidy J. Trends in the Evolution of Particle Morphology with Size in Colluvial Deposits Overlying Channel Iron Deposits. In: . 140. *EPJWeb of Conferences*; 2017:14005.
- [21]. Ovalle C, Dano C. Effects of particle size–strength and size–shape correlations on parallel grading scaling. *Geotech Lett.* 2020; 10(2):191–197.
- [22]. Dubois F & Jean M et al. LMGC90 wiki page. 2021. https://git-xen.lmgc.univ-montp2.fr/lmgc90/lmgc90_user/wikis/home [Online; Accessed 18 October 2021].
- [23]. Moreau J. *Unilateral Contact and Dry Friction in Finite Freedom Dyn.* Springer 1988:1-82.
- [24]. Jean M, Moreau JJ. Unilaterality and Dry Friction in the Dynamics of Rigid Body Collections. In: *1st Contact Mechanics International Symposium*; 1992:31-48.
- [25]. Radjai F, Richefeu V. Contact dynamics as a nonsmooth discrete element method. *Mech Mater.* 2009; 41(6):715-728. *Advances in the Dynamics of Granular Materials.*
- [26]. Carrasco S, Cantor D, Ovalle C. Effects of particle size-shape correlations on steady shear strength of granular materials: The case of particle elongation. *Int J Numer Anal Methods.* 2022; 46: 979–1000.
- [27]. Bathurst RJ, Rothenburg L. Micromechanical aspects of isotropic granular assemblies with linear contact interactions. *J Appl Mech.* 1988; 55:1723.
- [28]. Cantor D, Azéma E, Preechawuttipong I. Microstructural analysis of sheared polydisperse polyhedral grains. *Phys Rev E.* 2020; 101:062901.