

## Chapitre 6.

### Discussion

Dans cette section, l'analyse concerne tout d'abord, les résultats des essais pour trouver les effets de la taille sur le comportement des sols granulaires dans le domaine des grandes déformations ainsi que leur comportement élastique dans le domaine des petites déformations. Ensuite, l'influence de la forme des particules sur le comportement des matériaux grossiers sera également évaluée.

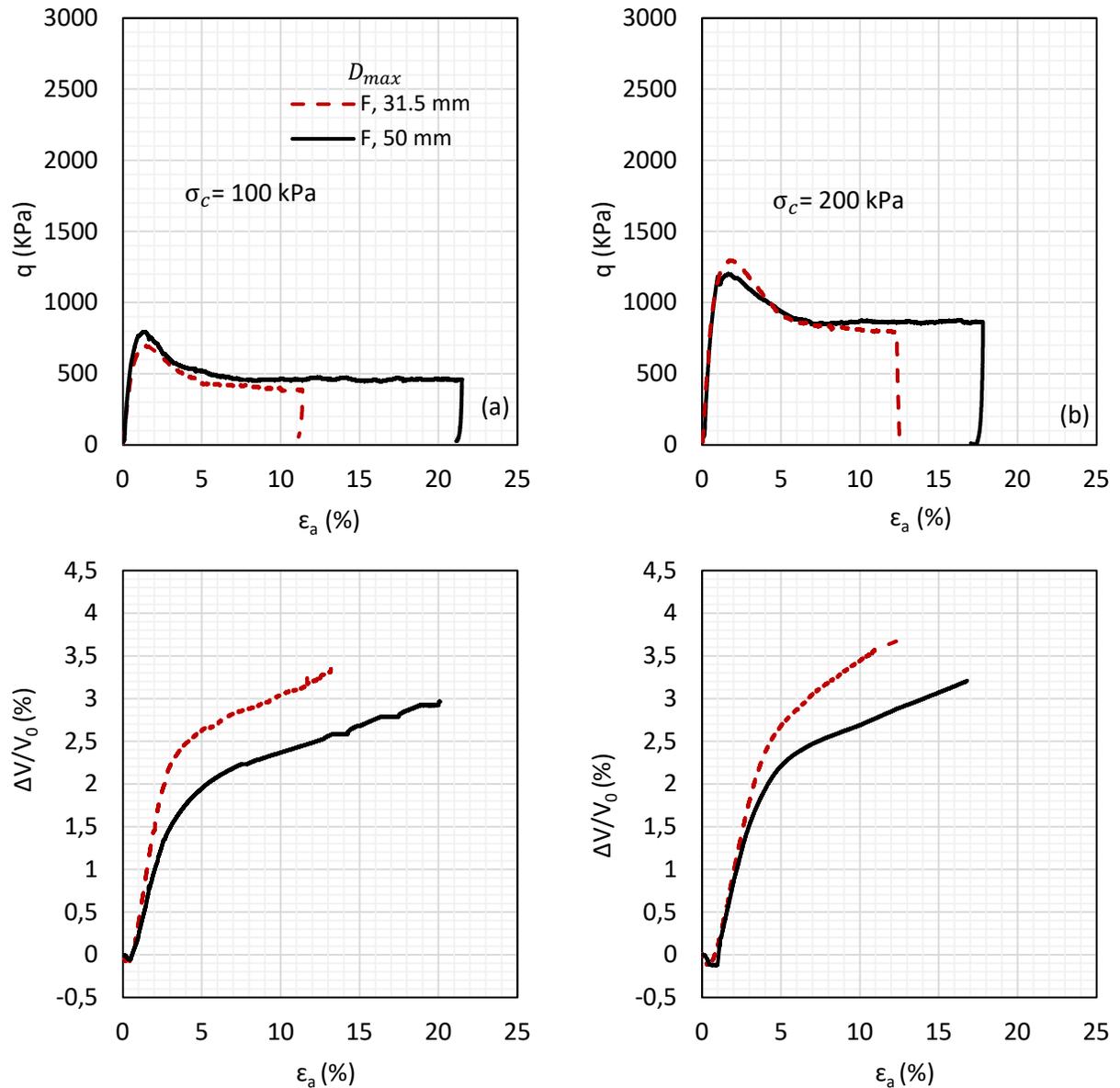
#### 6.1. Effet de la taille

Les résultats de la compression triaxiale et des tests RLT seront présentés pour étudier le rôle des tailles des particules sur les propriétés mécaniques des matériaux granulaires. Pour évaluer les effets de la taille, les résultats des échantillons avec des ratios de taille similaires seront comparés. Ainsi, dans cette section, seuls les échantillons avec des ratios de taille de 3 et de 3,2 seront évalués.

##### 6.1.1. Comportement de cisaillement drainé

La Figure 6-1 montre le comportement contrainte-déformation drainé et le comportement volumétrique des échantillons du filtre avec  $D_{\max} = 31,5$  et 50 mm. Comme on peut le voir, l'ensemble des échantillons présente un comportement dense.

La comparaison de la résistance au cisaillement entre les échantillons avec  $D_{\max} = 31,5$  et 50 mm sous  $\sigma_c = 100$  et 200 kPa ne montre aucune différence significative aux pics et aux grandes déformations.

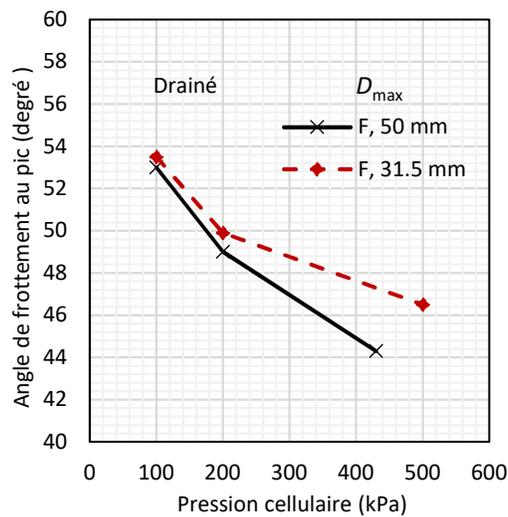


**Figure 6-1 Effet de taille sur le comportement contrainte-déformation drainé et le comportement volumétrique des matériaux du filtre**

L'effet de la taille sur l'angle de frottement maximal ( $\phi'_p$ ) dans les essais de cisaillement drainé pour les matériaux du filtre est présenté à la Figure 6-2. Les résultats montrent que  $\phi'_p$  diminue à mesure que la contrainte de confinement augmente. En fait, la contrainte de confinement appliquée supprime la rotation et le glissement des particules les unes sur les autres, provoquant une réduction de  $\phi'_p$ . De plus, la Figure 6-3 montre l'influence de la taille de l'échantillon sur le composant de dilatation obtenu à partir de  $\phi'_p$  –

$\varphi'_{cr}$ . Comme attendu par la variation des angles de frottement, l'augmentation de la contrainte confinée met fin à la dilatance.

Dans la Figure 6-2, on peut également voir que les matériaux plus grossiers présentent des angles de frottement maximaux et de dilatance légèrement plus faibles que ceux obtenus avec les matériaux plus fins. Néanmoins, selon la Figure 6-4, la pente des CSL (M) ne change pas avec l'augmentation de la taille des particules. Une explication possible pourrait être donnée par le rapport de taille relativement faible des échantillons. D'une manière ou d'une autre, les particules n'avaient pas assez d'espace pour se déplacer. Des résultats similaires ont été rapportés par Ovalle et al. (2014).



**Figure 6-2 Effet de la taille de l'échantillon sur angle de frottement maximal**

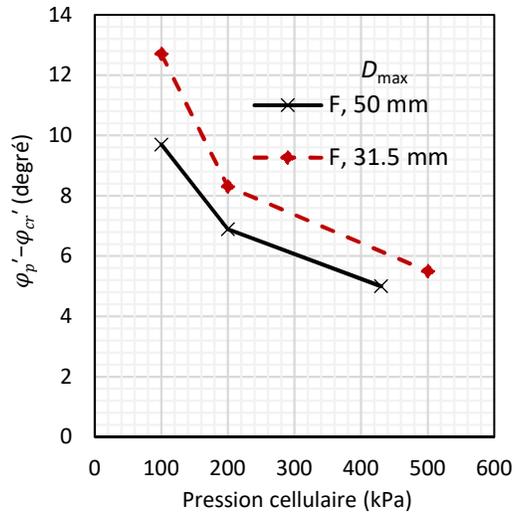


Figure 6-3 Effet de la taille de l'échantillon sur la dilatance

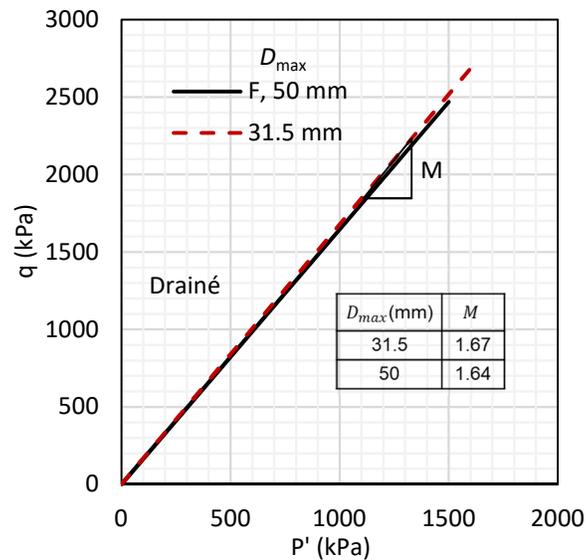
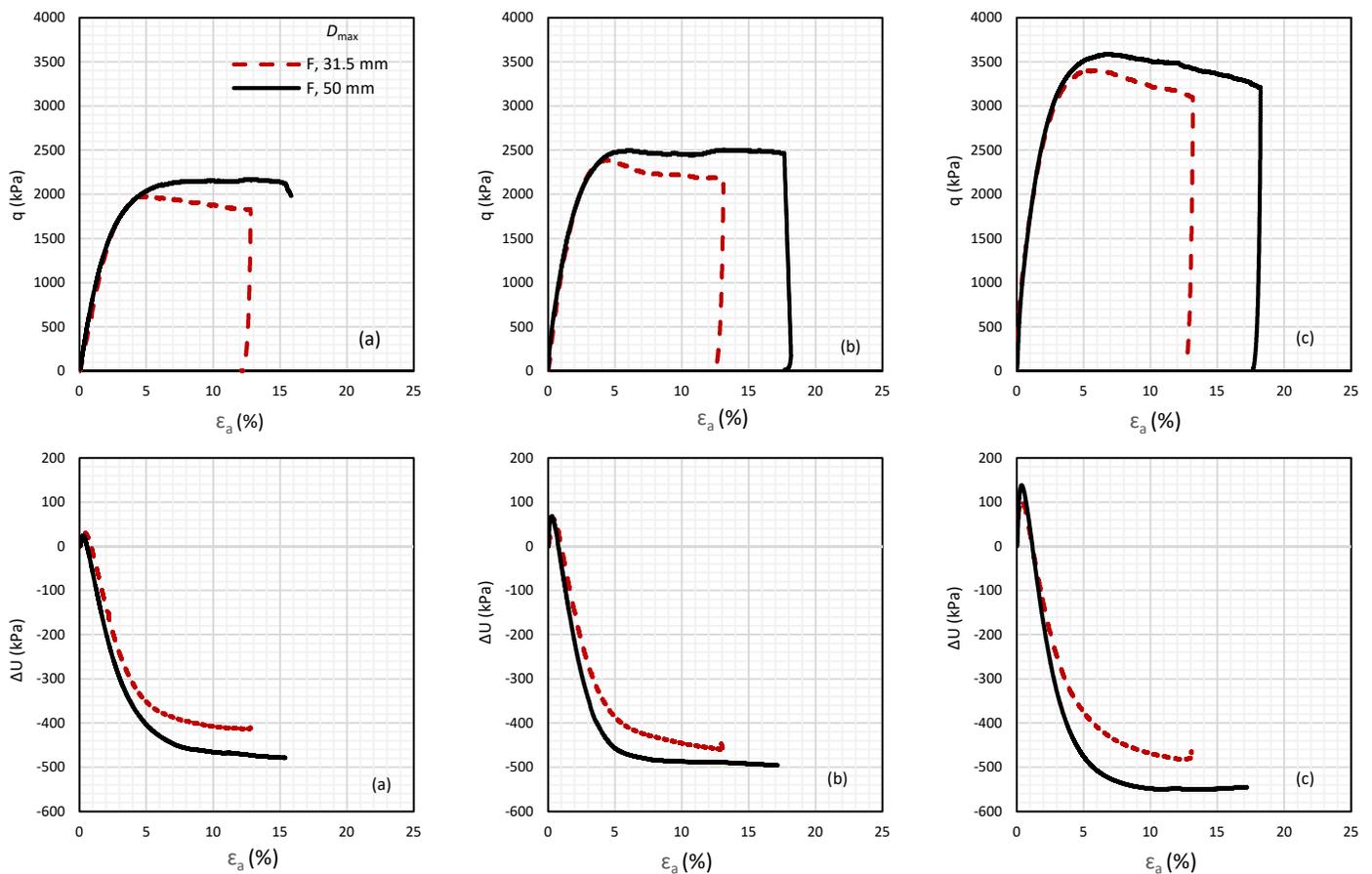


Figure 6-4 Effet de la taille de l'échantillon sur la pente des CSL des matériaux du filtre en conditions drainées

### 6.1.2. Comportement de cisaillement non drainé

La Figure 6-5 montre l'effet de la taille sur la réponse contrainte-déformation non drainée et sur la réponse de l'excès de pression interstitielle des échantillons du filtre sous différentes contraintes de confinement. Comme on peut le voir, tous les échantillons se contractent initialement, mais se dilatent jusqu'à atteindre les grandes résistances. La

Figure 6-6 présente l'influence de la taille sur  $\varphi'_p$  sous condition non drainée pour les matériaux du filtre. Comme pour les tests de cisaillement drainé, les résultats montrent que le  $\varphi'_p$  diminue à mesure que la contrainte de confinement augmente. Bien que les valeurs de  $\varphi'_p$  pour les échantillons avec  $D_{\max} = 50$  mm soient légèrement inférieures à celles des échantillons avec  $D_{\max} = 31,5$  mm, la Figure 6-7 montre que la taille n'affecte pas la pente des CSL.



**Figure 6-5 Effet de taille du comportement de contrainte-déformation non drainé et de l'excès de pression interstitielle des matériaux du filtre sous  $\sigma_c =$  (a) 100, (b) 200 et (c) 400 kPa**

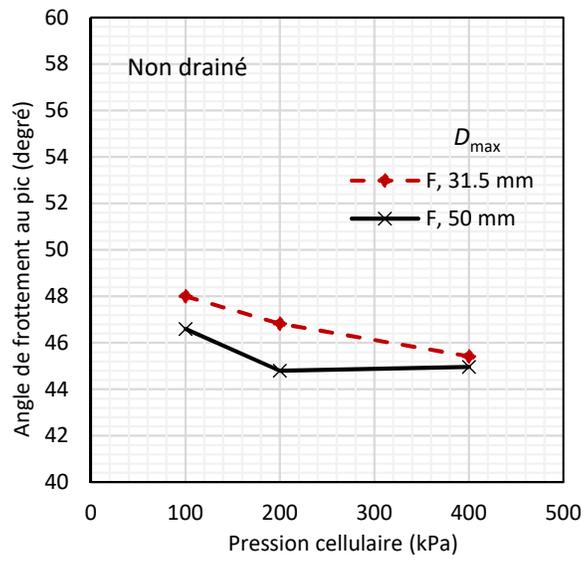


Figure 6-6 Effet de la taille de l'échantillon sur  $\phi'_p$  dans les essais non drainés

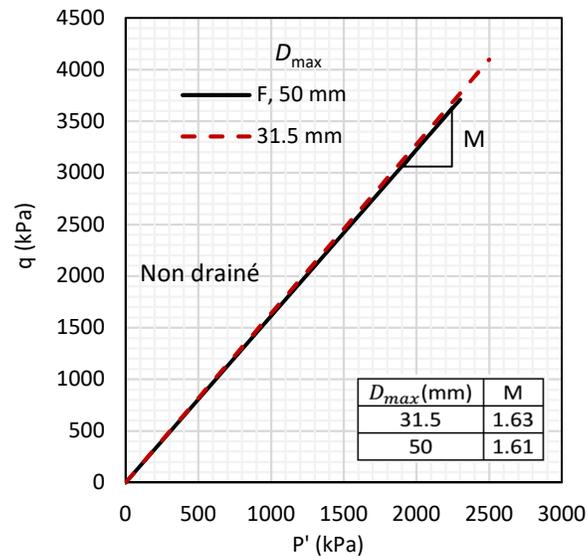
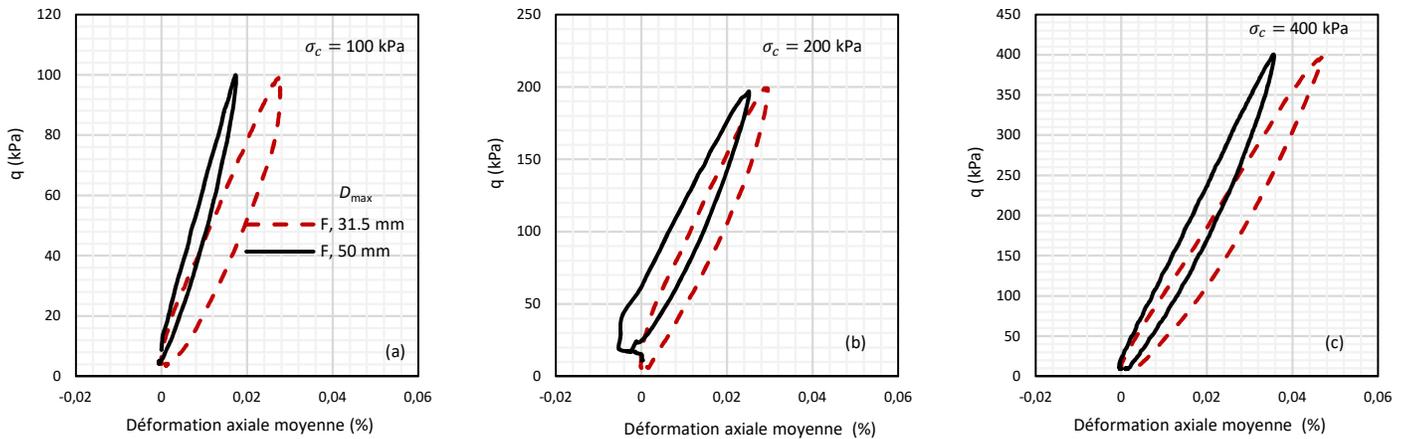


Figure 6-7 Effet de la taille de l'échantillon sur la pente des CSL dans les essais non drainés

### 6.1.3. Comportement à petites déformations

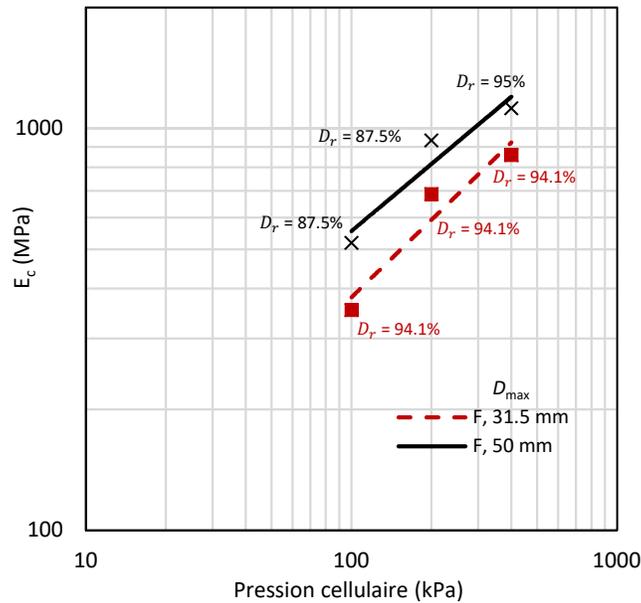
Les résultats des tests RLT sont présentés ici pour connaître l'effet de la taille des particules sur les propriétés élastiques des matériaux granulaires. La Figure 6-8 montre le troisième cycle des tests RLT. On voit que, en général, avec l'augmentation de la taille des

grains, les cycles deviennent plus raides, c'est-à-dire que les spécimens plus gros sont plus rigides.



**Figure 6-8 Effet de la taille des particules sur les réponses contrainte-déformation des échantillons du filtre aux tests RLT sous  $\sigma_c =$  a) 100, b) 200 et c) 400 kPa**

Hardin and Richart Jr (1963) et Menq (2003) ont souligné l'importance des effets de la distribution granulométrique et de la densité sur le module de Young. Donc, la Figure 6-9 illustre l'impact combiné de la taille des particules et de la densité relative sur le module chargement-déchargement ( $E_c$ ) pour le dernier cycle (défini dans la section 5.2). Les valeurs de densité relative varient de 87,5 % à 95 %; ce qui indique que ces échantillons sont préparés dans un état assez dense. Comme on peut le voir, le module chargement-déchargement augmente avec la contrainte de confinement. De plus, les résultats montrent que ce module augmente avec l'augmentation de  $D_{max}$ . L'explication possible peut être, qu'à faible niveau contrainte-déformation, si l'on considère qu'aucune forte résistance mobilisée résultante des contacts inter-particulaires n'a eu lieu, que seule la rigidité des particules et des agrégats joue un rôle et doit être considérée. Ainsi, pour un même volume, les plus grosses particules, qui possèdent une plus grande rigidité, montrent un module chargement-déchargement plus élevé. Les résultats de Payan, Senetakis, et al. (2016) ont confirmé que le module de Young des sables à petites déformations augmente avec l'augmentation de la taille des particules.



**Figure 6-9 Effet de la taille de l'échantillon sur le module chargement-déchargement**

De plus, la Figure 6-10 montre la variation du module chargement-déchargement en fonction du diamètre maximal de particule ( $D_{max}$ ) basé sur ce même module obtenu à partir d'échantillons avec  $D_{max} = 10, 31,5$  et  $50$  mm. Dans cette figure, trois courbes ajustées de  $E_c$  sont présentées pour trois contraintes de confinement différentes de  $100, 200$  et  $400$  kPa. Donc, l'équation suivante peut être exprimée par une régression non linéaire pour estimer le module de chargement-déchargement des matériaux de la zone de filtre du barrage Romaine-3:

$$E_c = 151.028 \times D_{max}^{0.333} \times \left(\frac{\sigma_c}{P_a}\right)^{0.5} \quad 6-1$$

Où  $P_a$  est la pression atmosphérique =  $1$  atm

La Figure 6-11 montre que la comparaison entre les valeurs mesurées et estimées de  $E_c$ . Comme on peut le voir sur cette figure, les  $E_c$  estimés à partir de l'équation 6.1 sont à  $\pm 25$  % des  $E_c$  mesurés. Les valeurs du coefficient de détermination ( $R^2$ ) et de la

racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont de 0,871 et 87,51 MPa, respectivement.

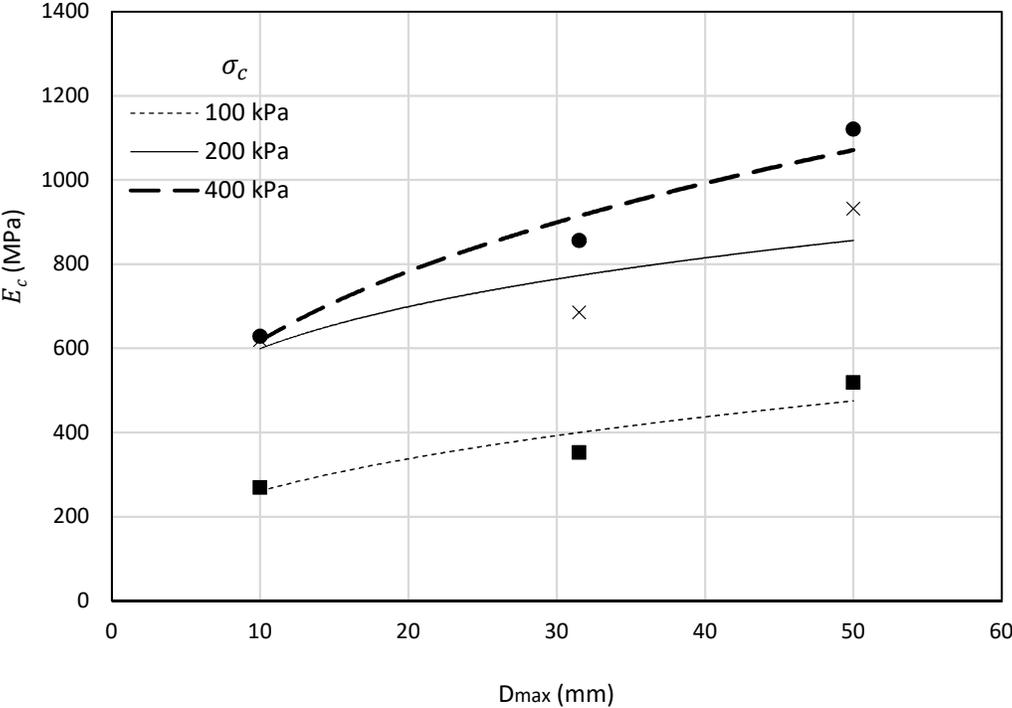
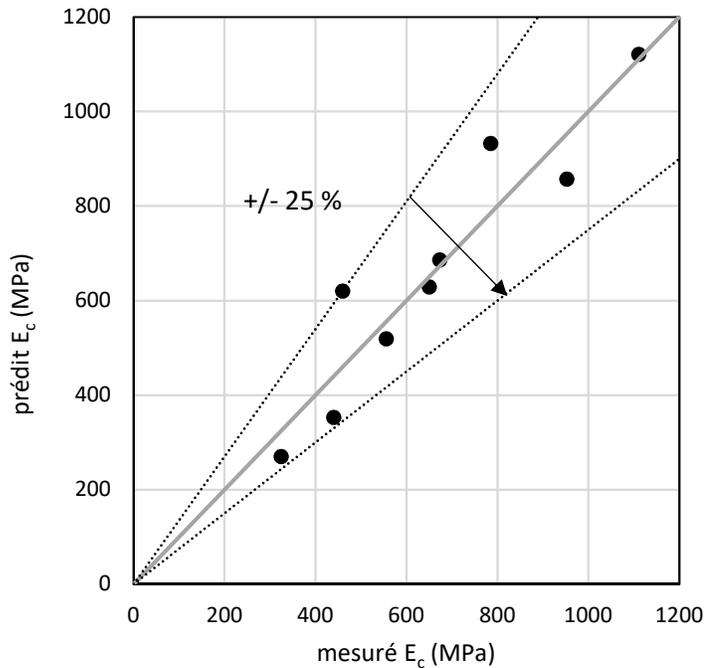


Figure 6-10 Variation du module chargement-déchargement en fonction de la variation du  $D_{max}$



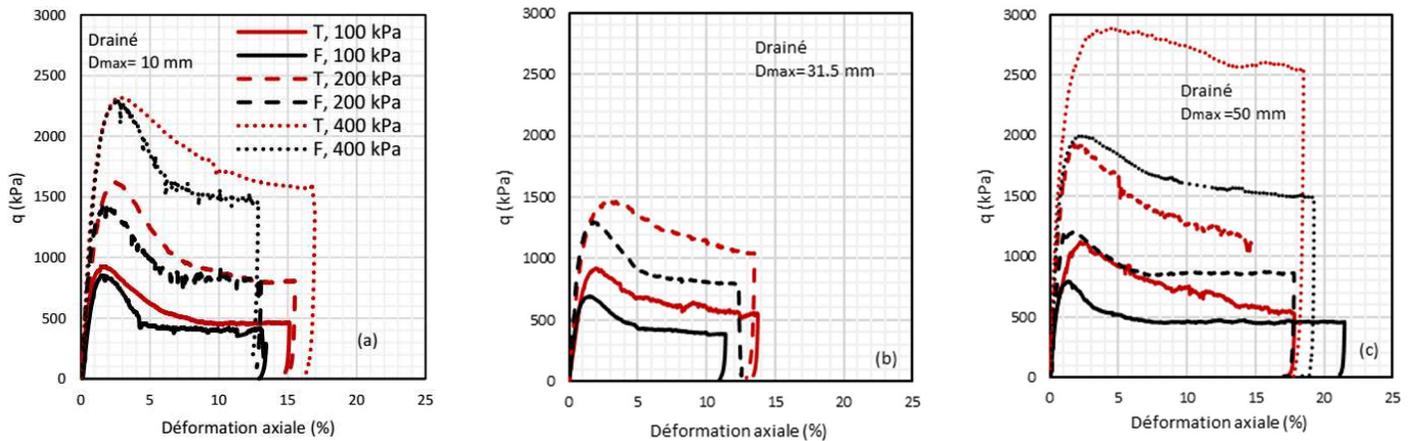
**Figure 6-11 Comparaison entre les valeurs prédites et mesurées de E<sub>c</sub>**

## 6.2. Forme des particules

Dans cette section, les résultats de la compression triaxiale et des tests RLT sont présentés pour étudier la manière dont la forme des particules influence les propriétés mécaniques des matériaux d'enrochement.

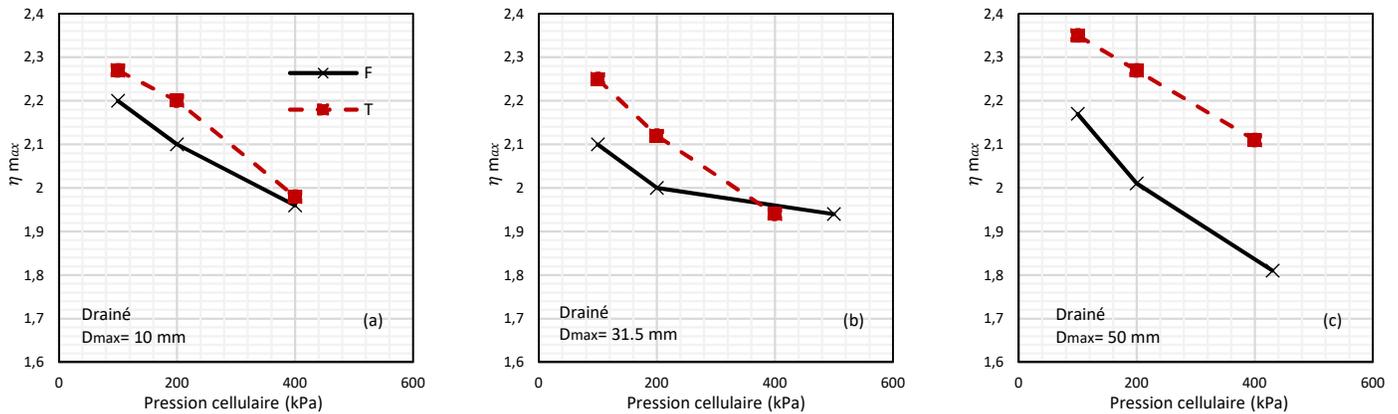
### 6.2.1. Comportement de cisaillement drainé

La Figure 6-12 montre l'effet de la forme des particules sur le comportement contrainte-déformation drainé des matériaux grossiers. Les résultats montrent que la forme des particules a un effet considérable sur la résistance des matériaux. On constate que les plus grandes contraintes déviatoriques sont mobilisées dans les échantillons angulaires (de transition).



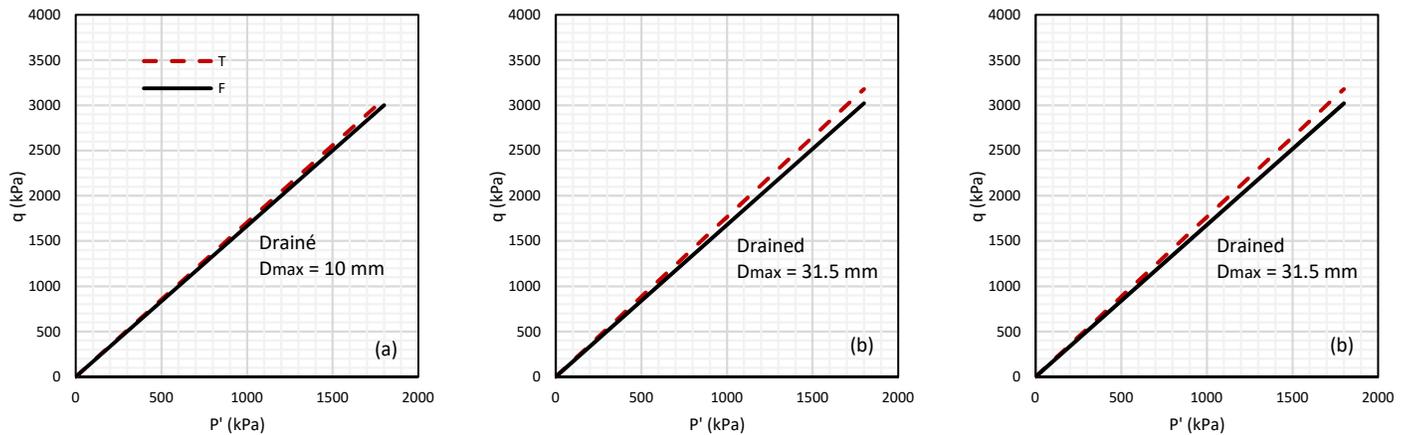
**Figure 6-12 Effet de la forme des particules sur le comportement contrainte-déformation drainé des échantillons avec  $D_{max} =$  a) 10, b) 31,5 et c) 50 mm**

Pour clarifier l'influence de la forme des particules sur le comportement contrainte-déformation drainé, la Figure 6-13 présente l'évolution du rapport de contrainte maximale dans lequel la contrainte déviatorique maximale est normalisée par rapport à la contrainte effective moyenne, c'est-à-dire,  $\eta_{max} = (q/p')_{max}$ . En comparant les résultats des matériaux du filtre (arrondis) et de transition (angulaires) avec  $D_{max} = 10, 31,5$  et  $50$  mm, on note que les matériaux angulaires, en général, ont un rapport de contrainte maximale plus élevé ( $\eta_{max}$ ) que les matériaux arrondis. Ce comportement est dû au fait que les particules angulaires (de transition) s'imbriquent plus que les particules rondes (du filtre), ce qui entraîne une plus grande résistance au cisaillement. Des résultats similaires ont également été observés dans la pente des CSL (Figure 6-14) et dans l'angle de frottement correspondant à l'état critique ( $\varphi'_{cs}$ ) (Tableau 6-1).



**Figure 6-13 Effet de la forme des particules sur  $\eta_{max}$  des échantillons avec  $D_{max} =$  a) 10, b) 31,5 et c) 50 mm dans des conditions drainées**

Selon le Tableau 6-1, il n'y a pas de différence dans  $\varphi'_{cs}$  pour les matériaux du filtre avec une taille de particules différentes, tandis que  $\varphi'_{cs}$  des matériaux de transition (angulaires) augmente avec la taille des particules.



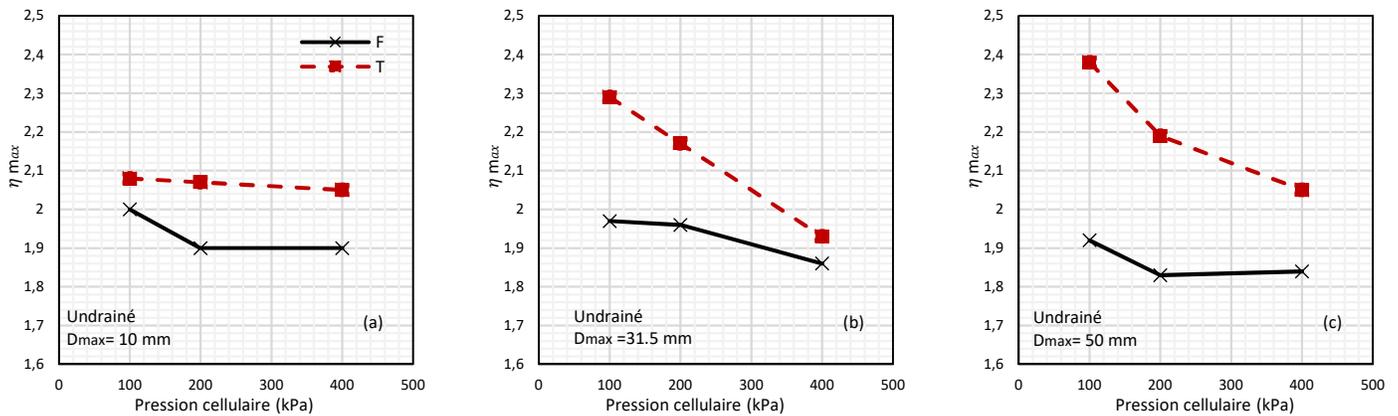
**Figure 6-14 Effet de la forme des particules sur la pente des CSL des échantillons avec  $D_{max} =$  a) 10, b) 31,5 et c) 50 mm dans un état drainé**

**Tableau 6-1 Angles de frottement critiques des matériaux du filtre et de transition avec différentes tailles de particules maximales en conditions drainées**

$D_{max}$ (mm)	$\varphi'_{cs}$ (°)	
	Filtre	Transition
10	40,7	41,6
31,5	40,9	43
50	40,7	48,3

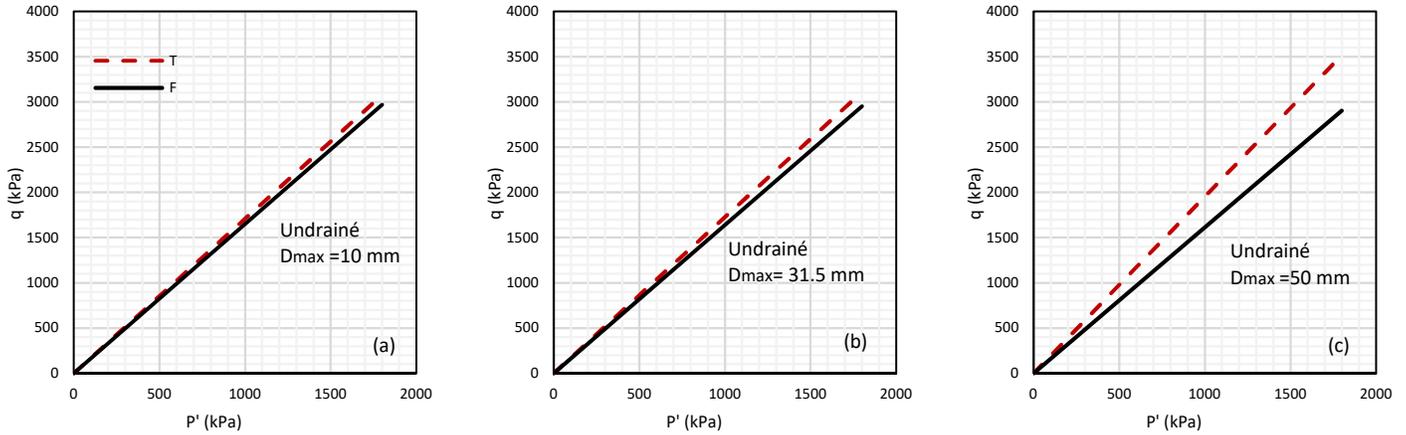
## 6.2.2. Comportement de cisaillement non drainé

Pour quantifier l'influence de la forme des particules sur la résistance au cisaillement non drainé, les évolutions du rapport de contraintes maximales par rapport à la contrainte de confinement sont présentées à la Figure 6-15. Similairement aux résultats obtenus des essais de cisaillement drainé,  $\eta_{max}$  est influencé par la forme des particules lors des essais de cisaillement non drainé. En réalité, les matériaux angulaires montrent une plus grande valeur de  $\eta_{max}$  que les matériaux arrondis.



**Figure 6-15 Effet de la forme des particules sur  $\eta_{max}$  des échantillons avec  $D_{max} =$  a) 10, b) 31,5 et c) 50 mm sous des conditions non drainées**

La Figure 6-16 révèle que le CSL plus raide appartient aux spécimens de transition. De plus, selon le Tableau 6-2, l'angularité des plus gros spécimens a une plus grande influence sur le comportement des échantillons de transition. Les résultats de Cho, Dodds et Santamarina (2004) ont confirmé que la forme des particules a des effets considérables sur la résistance des sables. Leurs résultats ont montré que la diminution de la rondeur des particules conduit à une augmentation de l'angle de frottement à l'état critique. Les résultats concordent aussi bien avec ceux rapportés par Yang et Luo (2015), et Keramatikerman et Chegenizadeh (2017).



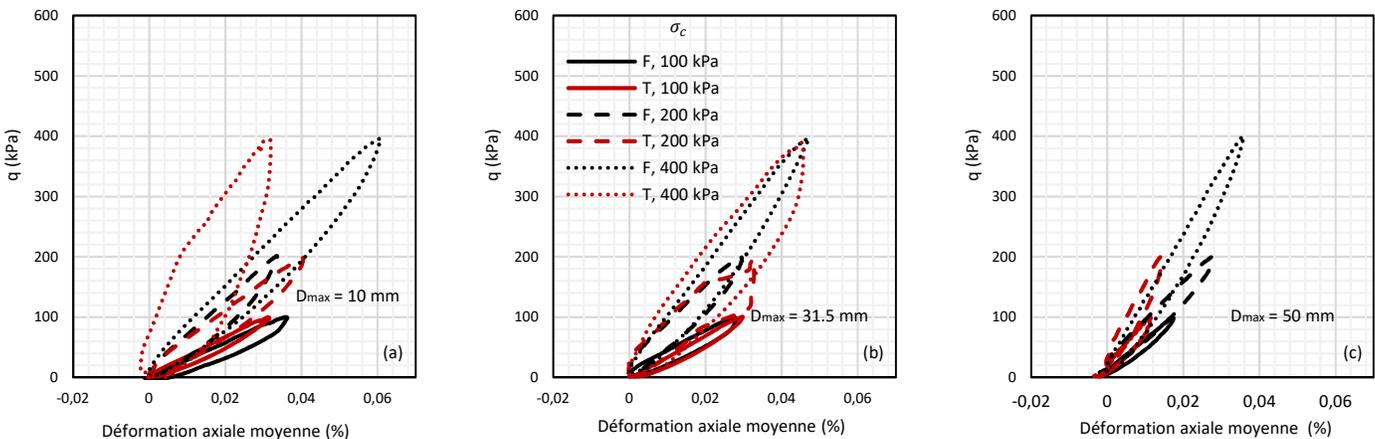
**Figure 6-16 Effet de la forme des particules sur la pente des CSL des échantillons avec  $D_{max}$  = a) 10, b) 31,5 et c) 50 mm dans des conditions non drainées**

**Tableau 6-2 Angles de frottement critiques des matériaux du filtre et de transition avec différentes tailles de particules maximales dans des conditions non drainées**

$D_{max}$ (mm)	$\varphi'_{cs}$ (°)	
	Filtre	Transition
10	40,3	41,7
31,5	40	42,1
50	39,4	47,5

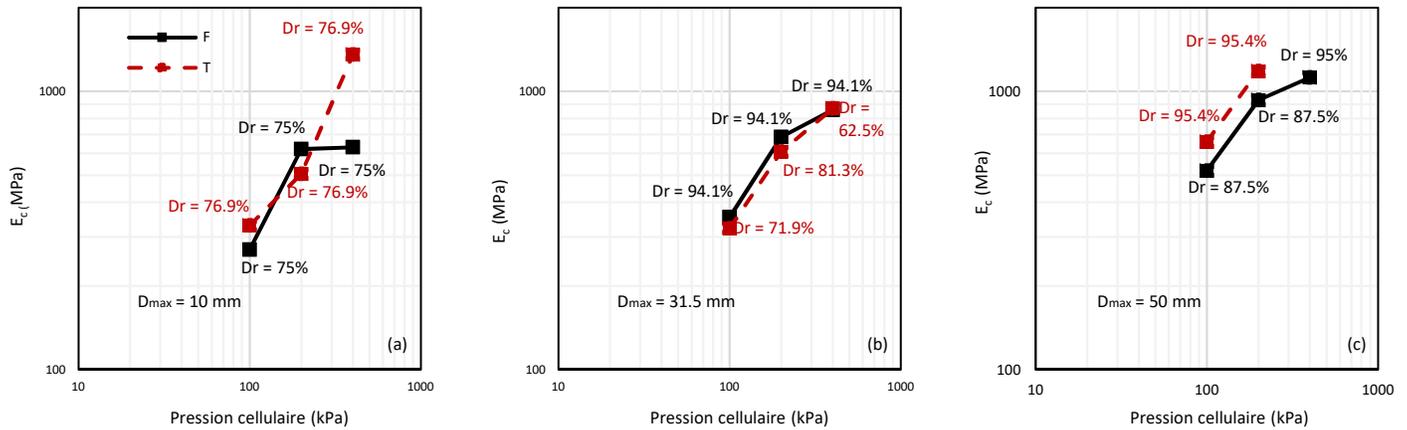
### 6.2.3. Comportement aux petites déformations

La Figure 6-17 montre les troisièmes cycles contrainte-déformation obtenus à partir des tests RLT sur les échantillons du filtre et de transition avec  $D_{max} = 10, 31,5$  et  $50$  mm. On peut observer que l'inclinaison des courbes de chargement augmente avec l'augmentation de la contrainte de confinement.



**Figure 6-17 Effet de la forme des particules sur le comportement contrainte-déformation des échantillons avec  $D_{max} =$  a) 10, b) 31,5 et c) 50 mm à petites déformations**

Pour évaluer l'effet de la forme des particules sur les propriétés élastiques, la variation du module de chargement-déchargement est représentée à la Figure 6-18. La comparaison entre les matériaux de transition et du filtre ne montre aucune tendance nette, donc, à travers cette étude, il ne peut pas être possible d'obtenir une relation particulière entre la forme des particules et les propriétés élastiques des matériaux grossiers.



**Figure 6-18 Effet de la forme des particules sur le module chargement-déchargement des échantillons avec  $D_{max} = a) 10, b) 31,5$  et c) 50 mm**