

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Hassiba Benbouali de Chlef  
Faculté de Génie civil et d'Architecture  
Département de Génie civil



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT

Filière : Génie civil  
Spécialité : Géotechnique

Par  
**TAIBI Amine**

Thème :

***Etude expérimentale de l'effet des caractéristiques des particules sur le comportement mécanique et paramètres de déformation des sables traités***

Soutenue le 15/05/2025, devant le jury composé de :

LAMRI Belkacem	Professeur	UHB Chlef	Président
ARAB Ahmed	Professeur	UHB Chlef	Examinateur
MISSOUM Hanifi	Professeur	UMAB Mostaganem	Examinateur
BELKHATIR Mostefa	Professeur	UHB Chlef	Rapporteur
MAHMOUDI Youcef	MCA	UHB Chlef	Co-rapporteur
MESSAD Ali	MCB	Université de Médéa	Invité

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Mostefa Belkhatir, pour son soutien indéfectible, ses conseils avisés et son expertise précieuse tout au long de ce travail de recherche. Ses encouragements m'ont permis de surmonter les défis rencontrés et d'approfondir mes connaissances dans le domaine.

Je souhaite également remercier Docteur Youcef Mahmoudi pour sa contribution significative dans ce travail de recherche. Ses conseils fraternels, son expertise complémentaire et ses suggestions constructives ont enrichi mes réflexions et ont été d'une grande aide dans l'élaboration de cette thèse.

J'adresse mes remerciements au Docteur Abdellah Cherif Taiba pour sa guidance, sa disponibilité et son expertise. Sa contribution dans la réalisation de ce travail sera toujours appréciée.

Je remercie **Mr. Lamri** Belkacem professeur à l'université de Chlef d'avoir accepté de présider le jury d'examen. Je remercie Mr. Arab Ahmed professeur à l'université de Chlef, Mr. Hanifi Missoum professeur à l'université de Mostaganem d'avoir accepté de juger et d'examiner ce travail, je tiens à remercier également Mr. Messad Ali pour avoir accepté mon invitation à faire partie du jury de ma soutenance de thèse.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe du laboratoire LSME et le laboratoire de mécanique des sols pour le soutien technique qui a été essentiel à la réalisation de mes expériences.

Je tiens à exprimer ma gratitude au collectif enseignant de la faculté de Génie civil de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef. Leur dévouement à l'enseignement et leur disponibilité ont été des éléments clés dans la réussite de mon parcours académique.

À tous, je vous adresse mes sincères remerciements pour votre aide précieuse et votre soutien tout au long de ce parcours académique.

## **Dédicace**

*Je dédie ce travail avec tout mon amour et ma gratitude :*

*À mes parents,*

*À mes frères et sœurs,*

*À mes neveux et nièces,*

*Et à mes chers amis et collègues.*

## Liste des tableaux

### Chapitre 2

Tableau 2.1 : Propriétés physiques des mélanges sable de Chlef (CS) et de cendre volante. ...	47
Tableau 2.2 : Propriétés physiques des mélange sable de Chlef (CS-1 " $D_{\min}=0.08\text{mm}$ ") et de cendre volante. ....	47
Tableau 2.3 : Propriétés physiques des mélange sable de chlef (CS-2 " $D_{\min}=0.63\text{mm}$ ") et de cendre volante. ....	47
Tableau 2.4 : Propriétés physiques des mélange sable de chlef (CS-3 " $D_{\min}=2\text{mm}$ ") et de cendre volante. ....	48
Tableau 2.7 : Propriétés physiques des mélange sable de dune (DS) et de cendre volante. ....	48
Tableau 2.6: Propriétés physiques des mélange sable de carrière (QS) et de cendre volante .....	48
Tableau 2.7: Composition chimique de cendre volante. ....	49
Tableau 2.8: Paramètres des formes .....	51

### Chapitre 3

Tableau 3.1 : Valeurs des coefficients a, b, c, d, e, f et $R^2$ correspondants aux équations (3.1) et (3.2) .....	68
Tableau 3.2 : Valeurs des coefficients a, b, c, d, e, f et $R^2$ correspondant à l'équation (3.5) ....	73
Tableau 3.3 : Valeurs des coefficients a, b et $R^2$ correspondant aux équations (3.6), (3.7) et (3.8) .....	75

### Chapitre 5

Tableau 5.1 : Valeurs des coefficients a,b,c and $R^2$ correspondant à l'équation (5.1).....	111
Table 5.2: Valeurs des coefficients a, b, c et $R^2$ correspondant à l'équation (5.2) .....	113
Table 5.3: Valeurs des coefficients d, e, f et $R^2$ correspondant à l'équation (5.3).....	114

## Liste des figures

### Chapitre 1

Figure 1.1 : Comportements typiques observés lors du cisaillement drainé d'un sable en compression à l'appareil triaxial « schématique ». (Canou et al., 2002).....	7
Figure 1.2 : : Comportements typiques observés lors du cisaillement non drainé d'un sable en compression à l'appareil triaxial « schématique ». (Canou et al., 2002).....	8
Figure 1.3 : variation de coefficient de compressibilité global et intergranular en fonction de teneur en fines. (Monkul & Ozden, 2007) .....	9
Figure 1.4 : coefficient de compressibilité global et intergranulaire en fonction de teneur en fines. (Nougar et al., 2022).....	11
Figure 1.5 : Variation de l'indice des vides équivalent en fonction de contrainte verticale pour les échantillons de mélanges sable-limon reconstitués par pluviation à sec (a) $D_r=18\%$ ; (b) $D_r=52\%$ ; et (c) $D_r=88\%$ . (Mahmoudi et al., 2024).....	12
Figure 1.6 : Variation de l'indice des vides équivalent en fonction de la contrainte verticale (échantillons reconstitués avec damage humide) (a) $D_r=18\%$ ; (b) $D_r=52\%$ ; et (c) $D_r=88\%$ . (Mahmoudi et al., 2024).....	13
Figure 1.7 : Evolution du rapport de contrainte d'instabilité et état d'équilibre en fonction de la taille des grains et teneur en fines. (Cherif Taiba et al., 2018).....	14
Figure 1.8 : Variation de la résistance au cisaillement ultime en fonction de diamètre efficace relatif (RED) (Doumi et al., 2020) (a). $D_{10}=0.25\text{mm}$ . (b) $D_{10}=0.08\text{mm}$ .....	15
Figure 1.9 : Variation de la résistance au cisaillement maximale en fonction de la taille moyenne des grains. (Belkhatir et al., 2012) .....	16
Figure 1.10 : Evolution de la résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte effective de confinement des différents échantillons testés (Ghadr & Assadi-Langroudi, 2019).....	17
Figure 1.11 : Variation du rapport de contrainte cyclique en fonction du coefficient de courbure et d'uniformité (Yilmaz et al., 2008).....	18
Figure 1.12 : Variation de la résistance au cisaillement maximale en fonction du coefficient d'uniformité (Cherif Taiba et al., 2016) .....	19
Figure 1.13 : Variation de résistance maximale en fonction de diamètre maximale et de diamètre moyen. (Hazout et al., 2017).....	20
Figure 1.14 : Variation d'angle de frottement d'instabilité en fonction du rapport d'angularité pour les mélanges étudiés. (Cherif Taiba et al., 2022) .....	22

Figure 1.15 : Utilisation de la chaux dans les travaux de stabilisation de couche de base des voies par les romains. ....	24
Figure 1.16 : Evolution de la pression interstitielle en fonction du nombre de cycle à la liquéfaction pour les mélanges sable-cendres volantes a- FA=4%, b- FA=6%.....	25
Figure 1.17: Angle de frottement maximal en fonction de la contrainte normale et de la teneur en cendres volantes des sols testés. (a)- $D_{max} = 4,00$ mm, (b)- $D_{max} = 0,63$ mm .....	26
Figure 1.18 : stabilisation des couche de base de route par cendres volantes (Beeghly, 2003) ... .....	27
Figure 1.19 : Evolution de la contrainte non confinée en fonction de déformation pour différents temps de cure (Bhuvaneshwari et al., 2014) (a) 2% chaux, (d) 8% chaux .....	28
Figure 1.20 : Résistance à la compression non confinée en fonction de la teneur en ciment pour trois types de sol. (H. Wang et al., 2022) .....	29
Figure 1.21: Réponse mécanique des échantillons de mélanges sable-limon soumis à un chargement triaxial en condition drainée (Belkhatir, Schanz, et al., 2014).....	30
Figure 1.22 : Evolution de résistance au cisaillement maximale en fonction du rapport de contrainte d'instabilité et de rapport d'état d'équilibre. (Cherif Taiba et al., 2018) .....	31
Figure 1.23 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de la teneur en fines des mélanges de sable et de limon de Chlef ( $D_r = 52\%$ ) : a- $\sigma = 100$ kPa, b- $\sigma = 200$ kPa. (Mahmoudi et al., 2018).....	32
Figure 1.24 : influence de teneur en fine sur le comportement cyclique des mélanges sable de Rass-limon (Arab & Shahrour, 2010) .....	33
Figure 1.25 : Variation de nombre de cycle à la liquéfaction en fonction de la teneur en fines(Arab & Shahrour, 2010).....	33
Figure 1.26 : Evolution de la résistance au cisaillement non drainée en fonction du rapport de surconsolidation pour les différentes méthodes de reconstitution et densités relatives initiales (Youcef Mahmoudi et al., 2020) .....	35

## Chapitre 2

Figure 2.1 : le dispositif expérimental utilisé.....	40
Figure 2.2 : cellule œdométrique type Terzaghi (NF-P94-090-1, 1997).....	41
Figure 2.3 : Différents matériaux utilisés.....	43
Figure 2.4 : Vue microscopique des matériaux étudiés : (a) sable de Chlef, (b) sable de carrière, (c) sable de dune et (d) Cendre volante.....	44
Figure 2.5 courbes granulométriques des matériaux testés.....	45
Figure 2.6 : variation des indices des vides en fonction de teneur en cendres volantes des matériaux testés.....	46
Figure 2.7 : Schéma descriptif de la définition illustrant les paramètres de forme suivants: a- Angularité (A) ; b- Sphéricité (S) ; c- Convexité (Cx); d- Rapport d'aspect (AR).....	51
Figure 2.8 : Essais de répétabilité pour sable témoin ( $\sigma_n=100\text{kPa}$ , $D_r=50\%$ ) a-Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontal ; b-Déplacement vertical en fonction de déplacement horizontal.).....	52

## Chapitre 3

Figure 3.1 : Evolution de ( $\tau$ ) et ( $\Delta V$ ) par rapport à ( $\Delta H$ ) du sable de Chlef (FA=0%, $D_r=28\pm 3\%$ ) ; (a)- $\sigma_n=100\text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n=200\text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n=300\text{ kPa}$ .....	57
Figure 3.2 : Evolution de ( $\tau$ ) et ( $\Delta V$ ) par rapport à ( $\Delta H$ ) du sable de Chlef (FA=5%, $D_r=28\pm 3\%$ ) ; (a)- $\sigma_n=100\text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n=200\text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n=300\text{ kPa}$ .....	58
Figure 3.3 : Evolution de ( $\tau$ ) et ( $\Delta V$ ) par rapport à ( $\Delta H$ ) du sable de Chlef (FA=10%, $D_r=28\pm 3\%$ ) ; (a)- $\sigma_n=100\text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n=200\text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n=300\text{ kPa}$ .....	59
Figure 3.4 : Evolution de ( $\tau$ ) et ( $\Delta V$ ) par rapport à ( $\Delta H$ ) du sable de Chlef (FA=15%, $D_r=28\pm 3\%$ ) ; (a)- $\sigma_n=100\text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n=200\text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n=300\text{ kPa}$ .....	60
Figure 3.5 : Evolution de ( $\tau$ ) en fonction de ( $\Delta H$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r=28\pm 3\%$ , CS-1 " $D_{\min}=0,08\text{ mm}$ ") ; (a)- $\sigma_n=100\text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n=200\text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n=300\text{ kPa}$ .....	62
Figure 3.6 : Evolution de ( $\tau$ ) en fonction de ( $\Delta H$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r=28\pm 3\%$ , CS-2 " $D_{\min}=0.63\text{ mm}$ ") ; (a)- $\sigma_n=100\text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n=200\text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n=300\text{ kPa}$ ....	63
Figure 3.7 : Evolution de ( $\tau$ ) en fonction de ( $\Delta H$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r=28\pm 3\%$ , CS-3 " $D_{\min}=2.00\text{ mm}$ ") ; (a)- $\sigma_n=100\text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n=200\text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n=300\text{ kPa}$ ...	64
Figure 3.8 : Variation de ( $\tau_{\max}$ ) en fonction ( $D_{\min}$ ) et (FA) des matériaux testés ( $D_r=28\pm 3\%$ ) ; (a) $\sigma_n=100\text{ kPa}$ ; (b) $\sigma_n=200\text{ kPa}$ ; (c) $\sigma_n=300\text{ kPa}$ .....	66
Figure 3.9 : Variation des caractéristiques mécaniques en fonction ( $D_{\min}$ ) et (FA) des matériaux testés ( $D_r=28\pm 3\%$ ) : (a) Angle de frottement interne (b) Enchevêtrement des grains.....	69

Figure 3.10 : Evolution ( $\Psi_{\max}$ ) en fonction de ( $D_{\min}$ ) et (FA) des mélanges examinés ( $D_r=28\pm3\%$ ) ; (a) $\sigma_n=100$ kPa ; (b) $\sigma_n=200$ kPa ; (c) $\sigma_n=300$ kPa.....	70
Figure 3.11 : (FSE) en fonction de ( $D_{\min}$ ) et de (FA) ( $D_r=28\pm3\%$ ) des mélanges examinés : (a) $\sigma_n=100$ kPa ; (b) $\sigma_n=200$ kPa ; (c) $\sigma_n=300$ kPa .....	71
Figure 3.12 : Variation de ( $\phi$ ) en fonction de (PSI) et (FA) des mélanges ( $D_r=28\pm3\%$ ) .....	73
Figure 3.13 : Evolution de ( $\Psi_{\max}$ ) en fonction de (PSI) et (FA) des mélanges étudiés ( $D_r=28\pm3\%$ ) ; (a) $\sigma_n=100$ kPa ; (b) $\sigma_n=200$ kPa ; (c) $\sigma_n=300$ kPa.....	74
Figure 3.14 : Evolution de (FSE) en fonction de (PSI) des mélanges examinés. ....	76
<b>Chapitre 4</b>	
Figure 4.1 : Influence de (FA) sur la variation de ( $\tau$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm3\%$ ) ; (a')- $\sigma_n= 100$ kPa, (b')- $\sigma_n= 200$ kPa, (c')- $\sigma_n= 300$ kPa. ....	83
Figure 4.2 : Influence de (FA) sur la variation de ( $\tau$ ) des mélanges sable de dunes-cendres volantes ( $D_r= 87\pm3\%$ ). (a')- $\sigma_n= 100$ kPa, (b')- $\sigma_n= 200$ kPa, (c')- $\sigma_n= 300$ kPa. ....	85
Figure 4.3 : Influence de (FA) sur la variation de ( $\tau$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm3\%$ ) ; (a')- $\sigma_n= 100$ kPa, (b')- $\sigma_n= 200$ kPa, (c')- $\sigma_n= 300$ kPa. ....	87
Figure 4.4 : Evolution de ( $\phi_p$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques granulométriques des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm3\%$ ) ; (a) Diamètre moyen, (b) Diamètre efficace, (c) Coefficient d'uniformité. ....	89
Figure 4.5 : Variation de ( $\phi_p$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques des particules des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm3\%$ ). (a) angularité combinée, (b) sphéricité combinée, (c) régularité globale combinée. ....	90
Figure 4.6 : Evolution de ( $\phi_{ex}$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques granulométriques des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm3\%$ ) ; (a) Diamètre moyen, (b) Diamètre efficace, (c) Coefficient d'uniformité. ....	92
Figure 4.7 : Evolution de ( $\phi_{ex}$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques de forme des particules des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm3\%$ ) ; (a) angularité combinée, (b) sphéricité combinée, (c) régularité globale combinée.....	93
Figure 4.8 : Variation de ( $\Psi_{\max}$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques granulométriques des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm3\%$ ). (a) diamètre moyen, (b) diamètre efficace, (c) coefficient d'uniformité. ....	96
Figure 4.9 : Evolution de ( $\Psi_{\max}$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques de forme des particules des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm3\%$ ). (a) angularité combinée, (b) sphéricité combinée, (c) régularité globale combinée.....	97
Figure 4.10 : Evolution de ( $\Psi_{\max(P)}$ ) par rapport à ( $\Psi_{\max(M)}$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm3\%$ ). (a) Diamètre moyen, (b) Diamètre efficace, (c) Coefficient d'uniformité. ....	99

Figure 4.11 : Evolution de ( $\Psi_{\max(P)}$ ) par rapport à ( $\Psi_{\max(M)}$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm 3\%$ ). (a) Angularité combinée, (b) Sphéricité combinée, (c) Régularité globale. .... 100

Figure 4.12 : Variation de ( $\phi_p$ ) en fonction de ( $\Psi_{\max}$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm 3\%$ ). .... 101

## Chapitre 5

Figure 5.1 : Évolution de ( $e$ ) en fonction de ( $\sigma'$ ) pour les mélanges sables- cendres volantes ..... 110

Figure 5.2 : Evolution de ( $C_c$ ) en fonction de ( $C_u$ ) : (a) Sable de dune, (b) Sable de Chlef (c) Sable de carrière. .... 112

Figure 5.3 : Evolution de ( $C_c$ ) en fonction de ( $D_{10}$ ) : (a) Sable de dune, (b) Sable de Chlef et (c) Sable de carrière. .... 114

Figure 5.4 : Variation de ( $C_c$ ) en fonction de ( $D_{50}$ ) : (a) Sable de dune, (b) Sable de Chlef et (c) Sable de carrière. .... 115

Figure 5.5: Variation de ( $C_c$ ) en fonction de ( $S_{com}$ ) et (FA) pour les matériaux testés : (a)  $D_r=25\pm 3\%$  et (b)  $D_r=87\pm 3\%$  ..... 117

Figure 5.6 : Evolution de ( $C_c$ ) en fonction de ( $A_{com}$ ) et (FA) pour les matériaux testés : (a)-  $D_r=25\pm 3\%$  et (b)- $D_r=87\pm 3\%$  ..... 118

Figure 5.7: Evolution de ( $C_c$ ) en fonction de ( $OR_{com}$ ) et de (FA) pour les matériaux testés : (a)-  $D_r=25\pm 3\%$  et (b)- $D_r=87\pm 3\%$  ..... 120

Figure 5.8: Variation de ( $C_{CM}$ ) en fonction de ( $C_{CP}$ ) pour: (a)-diamètre efficace, (b)-Diamètre moyen, (c)-Coefficient d'uniformité ..... 122

Figure 5.9: Variation de ( $C_{CM}$ ) en fonction de ( $C_{CP}$ ) pour : (a)-Sphéricité combinée, (b)- Angularité combinée, (c)-Régularité globale combinée ..... 123

## Sommaire

Remerciements .....	II
Dédicace .....	III
Liste des tableaux .....	IV
Liste des figures .....	IV
ملخص .....	XIV
Abstract .....	XV
Résumé .....	XVI
Symboles et abréviations.....	XVII
Introduction générale.....	1

### Chapitre 1 : Etude bibliographique.

1.1. Introduction .....	6
1.2. Comportement mécanique des sols sableux.....	6
1.2.1. Comportement mécanique en condition drainée .....	6
1.2.2. Comportement mécanique en condition non drainé.....	7
1.3. Compressibilité des sables .....	8
1.4. Influence de la morphologie des grains.....	13
1.4.1. Effet des caractéristique granulométriques. ....	13
1.4.1.1. Effet du diamètre efficace ( $D_{10}$ ) .....	14
1.4.1.2. Effet du diamètre moyen ( $D_{50}$ ).....	16
1.4.1.3. Effet de coefficient de courbure et coefficient d'uniformité.....	17
1.4.1.4. Effet des diamètres extrêmes.....	19
1.4.2. Effet des caractéristiques de forme .....	21
1.5.1 Effet des cendres volantes .....	24
1.5.2 Effet de la chaux.....	27
1.5.3 Effet du ciment .....	28
1.6. Effet d'autres paramètres .....	29
1.6.1. Effet de densité relative initiale.....	29
1.6.2. Effet de teneur en fines.....	30
1.6.3. Effet des méthodes de reconstitution des échantillons.....	34
1.7. Conclusion.....	35

## Chapitre 2 : Protocoles expérimentaux et matériaux utilisés.

2.1	Introduction .....	38
2.2	Dispositif expérimentale utilisés .....	38
2.2.1	Essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande.....	38
2.2.2	Essai de compression à l'eodomètre .....	40
2.3	Matériaux utilisés .....	42
2.3.1	Description des propriétés physiques .....	42
2.3.2	Caractéristiques de forme des grains.....	49
2.4	Essais de répétabilité .....	51
2.5	Conclusion.....	52

## Chapitre 3 : Influence de la taille des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-cendre volante

3.1	Introduction .....	55
3.2	Résultats et discussion.....	56
3.2.1	Effets de la taille des particules .....	56
3.2.2	Effets des cendres volantes .....	61
3.2.3	Evolution de la résistance maximale au cisaillement ( $\tau_{max}$ ) en fonction de la taille minimale des grains ( $D_{min}$ ) et teneur en cendres volantes (FA) .....	65
3.2.4	Evolution des caractéristiques mécaniques ( $\phi$ , I) en fonction du diamètre minimal des grains ( $D_{min}$ ) et teneur en cendres volantes (FA) .....	67
3.2.5	Influence du diamètre minimal des grains et de la teneur en cendres volantes sur l'angle de frottement maximal .....	69
3.2.6	Influence du diamètre minimal des grains et teneur en cendres volantes sur le facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement des mélanges testés .....	70
3.2.7	Influence de l'indice de taille des particules et teneur en cendres volantes sur l'angle de frottement interne et l'angle de frottement maximal.....	72
3.2.8	Corrélation entre l'indice de taille des particules (PSI) et le facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement (FSE) des mélanges sable-cendres volantes .....	74
3.3	Conclusion.....	76

## Chapitre 4 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique des sables traités aux cendres volantes.

4.1	Introduction .....	80
4.2	Résultats et discussion.....	82
4.2.1	Comportement au cisaillement des mélanges : .....	82

4.2.1.1	Sable de Chlef-cendres volantes .....	82
4.2.1.2	Sable de dune-cendres volantes.....	84
4.2.1.3	Sable de carrière-cendres volantes .....	86
4.2.2	Evolution de l'angle de frottement maximal en fonction des caractéristiques de forme et taille des particules .....	88
4.2.3	Variation de l'excès de l'angle de frottement en fonction des caractéristiques de forme et taille des particules .....	91
4.2.4	Evolution de l'angle de dilatance maximale en fonction des caractéristiques de forme et taille des particules .....	94
4.2.5	Prédiction de l'angle de dilatance maximale en fonction des caractéristiques de forme et de taille des particules des assemblages testés .....	98
4.2.6	Évaluation de l'équation de Bolton pour les mélanges sable de Chlef-cendres volantes.....	100
4.3	Conclusion.....	102
	Chapitre 5 : Influence des dimensions et de la morphologie des particules sur la compressibilité des sables traités aux cendres volantes.	
5.1	Introduction .....	106
5.2	Résultats et discussion.....	108
5.2.1	Comportement œdométrique des sables étudiés .....	108
5.2.2	Effet des paramètres granulométriques sur la compressibilité des sables testés....	111
5.2.2.1	Coefficient d'uniformité.....	111
5.2.2.2	Diamètre efficace et diamètre moyen.....	112
5.2.3	Effet des caractéristiques de forme sur la compressibilité des sables étudiés.....	116
5.2.3.1	Sphéricité.....	116
5.2.3.3	Angularité.....	117
5.2.3.3	Régularité globale .....	119
5.2.4	Prédiction du coefficient de compressibilité sur la base des caractéristiques de taille et de forme des grains .....	120
5.3	Conclusion.....	123
	Conclusion générale et perspectives .....	126
	Références bibliographiques .....	130



## ملخص

تشير الدراسات المنشورة إلى أن خصائص حبيبات التربة (الحجم والشكل) تمثل مؤشراً مهماً للغاية لفهم عميق للسلوكيات المختلفة لتربة الأساس، والتي يحتاج المهندسون إلى إتقانها تمامًا من أجل حل مشاكل استقرار التربة و التي يواجهونها عند بناء مشاريع الهندسة المدنية والهندسة الهيدروليكية والأشغال العمومية. تشمل خصائص الجزيئات عادةً معايير حجم وشكل جزيئات التربة. في الواقع، فإن معرفة تأثير هذه المعايير تكون أكثر أهمية مقارنةً بالمعايير الأخرى التي تؤثر على الاستجابة الميكانيكية للتربة. تهدف هذه الدراسة المخبرية إلى تطوير فهم أساسي لتأثير خصائص الجزيئات على مقاومة القص والانضغاط للترب الرملية باستخدام ثلاثة أنواع من الرمال: "رمل الكثبان"، و"رمل شلف"، و"رمل المحجر"، والتي تم إعادة تكوينها في المختبر بكميات مختلفة من الرماد المتطاير. تُظهر النتائج المستخلصة اعتماداً كبيراً للاستجابة الميكانيكية والانضغاط على خصائص حجم الجسيمات من حيث الأحجام الدنيا للحبيبات، والمعايير المختلفة للأشكال مثل الزاوية، والكروية، والانتظام العام. تم استنتاج علاقات ذات دلالة كبيرة بين هذه العوامل والسلوك الميكانيكي للرمال المعالجة. بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام معايير جديدة مثل مؤشر حجم الجزيئات "PSI" وعامل تحسين مقاومة القص "FSE" لتقييم أداء الأتربة الرملية ضد ضغوط القص. من جهة أخرى، تؤكد البيانات المستخلصة دور مسحوق الرماد المتطاير في تحسين السلوك الميكانيكي للأتربة المدروسة، وتبرز هذه النتائج الحاجة إلى تعزيز استخدام هذا المادة في أعمال تحسين التربة.

**الكلمات المفتاحية:** السلوك الميكانيكي، حجم الجسيمات وشكلها، الرمل المعالج، خصائص حجم الجسيمات، الانضغاط.

## Abstract

Published literature indicates that particle characteristics (size and shape) represent a highly significant indicator for understanding the different behaviors of subgrade soils that engineers need to master perfectly in order to solve the problems of soil stability and excessive deformations they encounter when designing civil, hydraulic engineering and public works projects. Particle characteristics generally include the size and shape parameters of soil particles. Indeed, knowledge of the impact of these parameters represents the most important aspect compared to the other influencing parameters on the mechanical response of soils. The present laboratory study aims to develop a fundamental understanding of the influence of particle characteristics on the shear strength and compressibility of sandy soils, using three types of sand "dune sand", "Chlef sand", and "Quarry sand" reconstituted in the laboratory with different fly ash contents. The obtained results show a significant dependency of the mechanical behavior (shear and compressibility processes) on grading characteristics in terms of minimum grain size, and shape parameters such as angularity, sphericity, and overall regularity. Highly relevant correlations between these factors and the mechanical behavior of treated sands are deduced. In addition, new parameters such as the particle size index "PSI" and the shear strength enhancement factor "FSE" are employed to assess the performance of sandy soils against shear stresses. On the other hand, the collected data confirm the reliable role of fly ash in improving the mechanical behavior of the studied soils, and these results clearly highlight the potential need for such material in soil improvement work.

**Keywords:** mechanical behavior, particle size and shape, treated sand, particle size characteristics, compressibility.

## Résumé

La littérature publiée indique que les caractéristiques des particules (taille et forme) représentent un indicateur très significatif pour appréhender d'une manière approfondie les différents comportements des sols supports que l'ingénieur doit parfaitement maîtriser afin de résoudre les problèmes de stabilité et de déformations des sols qu'il rencontre lors de l'exécution d'un projet de construction dans les domaines de génie civil, hydraulique et travaux publics. Les caractéristiques des particules comportent généralement les paramètres de taille et de forme des particules des sols. En effet, la connaissance de l'impact de ces paramètres est d'autant plus importante que les autres paramètres influant la réponse mécanique des sols. La présente étude en laboratoire vise à développer une compréhension fondamentale de l'influence des caractéristiques des particules sur la résistance au cisaillement et la compressibilité des sols sableux en utilisant trois types de sables 'sable des dunes', 'sable de Chlef' et 'sable de carrière' reconstitués en laboratoire avec différents teneurs en cendres volantes. Les résultats obtenus montrent clairement une dépendance étroite de la réponse mécanique (cisaillement et compressibilité) avec les paramètres granulométriques en termes de taille minimale et ceux de la forme des grains tels que l'angularité, la sphéricité et la régularité globale. Des corrélations très pertinentes entre ces facteurs et le comportement mécanique des sables traités ont été déduites. De plus, des nouveaux paramètres ont été employés tels que l'indice de taille des particules 'PSI' et le facteur d'amélioration de résistance au cisaillement 'FSE' afin d'évaluer la performance des sols sableux contre les contraintes de cisaillement. D'autre part, les tendances obtenues confirment le rôle majeur de la poudre de cendre volante dans l'amélioration du comportement mécanique des sols étudiés nécessitant ainsi, une valorisation de ce matériau dans les travaux d'ingénierie des sols.

**Mots clé :** comportement mécanique, taille et forme des particules, sable traité, caractéristiques granulométriques, compressibilité.

## **Symboles et abréviations**

$D_{max}^F$  : Diamètre maximal du Féret

$D_{min}^F$  : Diamètre minimum du Féret

**A** : Angularité

**A** : Surface du grain

**a,b,c,d,e,f** : Coefficient d'équation

**A<sub>com</sub>** : Angularité combinée

**AR** : Rapport d'aspect

**AR<sub>com</sub>** : Rapport d'aspect combinée

**B** : Coefficient de Skempton

**B** : Surface de la partie complémentaire de grain convexe

**C<sub>c</sub>** : Coefficient de compressibilité

**C<sub>c</sub>** : Coefficient de courbure

**C<sub>cm</sub>** : Coefficient de compressibilité mesuré

**C<sub>cp</sub>** : Coefficient de compressibilité prédicte

**CS** : Sable de Chlef

**CS-1** : Sable de Chlef avec diamètre minimal égale à 0.08mm.

**CS-2** : Sable de Chlef avec diamètre minimal égale à 0.63mm.

**CS-3** : Sable de Chlef avec diamètre minimal égale à 2mm.

**CSR** : Rapport de contrainte cyclique

**C<sub>u</sub>** : Coefficient d'uniformité

**C<sub>x</sub>** : Convexité

**C<sub>xcom</sub>** : Convexité combinée

**D<sub>10</sub>** : Diamètre équivalent (diamètre équivalent à 10% de tamisat cumulé)

**D<sub>30</sub>** : Diamètre équivalent à 30% de tamisat cumulé

**D<sub>50</sub>** : Diamètre moyen (diamètre équivalent à 50% de tamisat cumulé)

**D<sub>60</sub>** : Diamètre équivalent à 60% de tamisat cumulé

**D<sub>max</sub>** : Diamètre maximal des grains

**D<sub>min</sub>** : Diamètre minimal des grains

**D<sub>r</sub>** : Densité relative

**DS** : Sable de dune

**e** : Indice des vides

**e<sub>max</sub>** : Indice des vides maximale

**e<sub>min</sub>** : Indice des vides minimale

**FA** : Teneur en cendres volantes

**F<sub>c</sub>** : Teneur en fines

**FSE** : Facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement

**I** : Enchevêtrement

**OR** : Régularité globale

**OR<sub>com</sub>** : Régularité globale combinée

**P<sub>eq</sub>** : périmètre de sphère équivalente au périmètre de grain

**Pr** : le périmètre de projection de particule

**PSI** : Indice de taille des particules

**QS** : Sable de carrière

**q<sub>u</sub>** : Résistance au cisaillement non drainé

**R<sup>2</sup>** : Coefficient de corrélation

**r<sub>i</sub>** : Rayon des petits cercles inscrit dans le grain de sable

**R<sub>ins</sub>** : Rayon de plus grand cercle inscrit dans le grain

**S** : Sphéricité

**S<sub>com</sub>** : Sphéricité combinée

**α** : Coefficient de Bolton

**γ<sub>s</sub>** : Poids volumique des grain solide

**ΔH** : Déplacement horizontal

**ΔV** : Déplacement Vertical

**σ'** : Contrainte effective

**σ<sub>n</sub>** : Contrainte normale

**τ** : Contrainte de cisaillement

**τ<sub>max</sub>** : Résistance au cisaillement maximale

**φ** : Angle de frottement

**φ<sub>p</sub>** : Angle de frottement maximal

**φ<sub>ex</sub>** : Excès de l'angle de frottement

**Ψ<sub>max</sub>** : Angle de dilatance maximale

**Ψ<sub>max(M)</sub>** : Angle de dilatance maximale mesuré

**Ψ<sub>max(P)</sub>** : Angle de dilatance maximale prédit

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

« Malheureusement, les sols sont faits partie de la nature et les produits de la nature sont toujours complexes. Dès que l'on passe de l'acier et du béton à la terre, la toute-puissance de la théorie cesse d'exister. Le sol naturel n'est jamais uniforme. Ses propriétés changent d'un point à un autre alors que notre connaissance de ses propriétés se limite aux quelques endroits où les échantillons ont été prélevés. » karl Terzaghi.

La compréhension du comportement des sols est cruciale dans la conception de projets de Génie Civil, Hydraulique et de Travaux Publics. En effet, la réponse mécanique des sols, en particulier celle des matériaux granulaires, est influencée par de nombreux de facteurs combinés. Il est donc d'une manière vitale d'identifier l'impact de chacun de ces paramètres sur les différentes caractérisations géotechniques de ces matériaux afin d'élaborer un aperçu complet de leur réponse. Une telle compréhension permet non seulement d'exploiter ces matériaux dans leurs conditions optimales, mais aussi d'assurer la sécurité et la pérennité des ouvrages construits utilisant le sol comme support ou matériaux de construction.

Parmi les facteurs déterminants qui affectent la réponse mécanique des sables face aux contraintes de cisaillement et à la compressibilité, la taille et la forme des grains se révèlent prépondérantes. En effet, ces deux paramètres jouent un rôle fondamental dans la formation du squelette du sol, qui peut être analysé à l'échelle micro ou macrostructure des échantillons de sol testés en laboratoire. En effet, la taille des grains influence directement l'ampleur des vides entre eux, affectant ainsi la manière dont les chaînes des forces sont réparties et transmises à travers la structure du sol. De même, la forme des grains — qu'ils soient angulaires, semi-angulaires, arrondis ou semi-arrondis — impacte leur capacité à s'emboîter et à résister aux forces externes. De nombreuses études ont été menées sur ce sujet depuis les travaux pionniers de Holtz et Gibbs en 1956 jusqu'à aujourd'hui. Ce travail met en lumière non seulement la complexité des interactions entre ces paramètres, mais aussi leur importance cruciale pour une compréhension approfondie du comportement des sols dans divers contextes géotechniques.

Cette étude se propose d'explorer l'impact des caractéristiques granulométriques, notamment le diamètre efficace, le diamètre moyen, le coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure. En outre, elle examinera les aspects morphologiques tels que l'angularité (la mesure de l'aspect anguleux ou arrondi des grains), la sphéricité (qui évalue à quel point un grain est proche d'une sphère parfaite), la régularité globale (qui reflète l'uniformité de la forme) et le rapport d'aspect (la relation entre les dimensions principales du grain) sur la résistance au cisaillement et la compressibilité des sables étudiés.

Comme l'affirme le dicton « le sol naturel n'est jamais uniforme », cette « non-uniformité » souligne que l'homogénéité ne peut être atteinte que dans une étude purement théorique. Les sols naturels présentent une variabilité intrinsèque quant à leurs différentes caractéristiques qui doit être prise en considération lors de toute exploration et analyse géotechnique. Ainsi, pour refléter le comportement réel des sables, ceux-ci seront traités avec des fractions bien définies de cendres volantes. En effet, les cendres volantes sont souvent considérées comme un déchet industriel, possédant des propriétés pozzolaniques induisant une amélioration significative des caractéristiques mécaniques et physiques des sables. Cette approche vise à valoriser ce matériau local souvent sous-exploité dans les domaines du génie civil et des travaux publics. Les résultats expérimentaux antérieurs démontrent déjà l'effet bénéfique de cette poudre sur l'amélioration des caractéristiques de stabilité des sables, ouvrant ainsi une voie prometteuse pour son intégration dans les pratiques d'ingénierie dans le domaine de la construction.

Le manuscrit de la thèse comporte cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, des travaux contemporains sur le comportement des sols sont présentés dans le premier chapitre, avec une attention particulière portée sur l'influence de la dimension et de la morphologie des particules sur les caractéristiques mécaniques des sables. nous examinons également les différents facteurs qui impactent la réaction mécanique des sables face à diverses sollicitations.

Le deuxième chapitre aborde une description détaillée des matériaux utilisés dans cette étude, notamment le sable de dune, le sable de Chlef, ainsi que le sable de carrière, ces matériaux ont été traité avec des fractions cendres volantes. Il inclut également une analyse des propriétés physiques des mélanges étudiés, ainsi qu'une présentation minutieuse des appareils utilisés et des protocoles expérimentaux suivis.

Le chapitre 3 est consacré à l'étude de l'impact des propriétés des particules sur la réponse mécanique des compositions de sable de Chlef et de cendres volantes dans des proportions variées. Les résultats des tests de cisaillement réalisés à l'aide de la boîte de cisaillement sur le sable de Chlef sont présentés dans cette section. Le sable a été divisé en trois classes granulaires en fonction de la taille minimale des grains, puis traité avec des proportions de cendres volantes (FA=0, 5, 10 et 15%).

Le chapitre 4 traite de l'impact de la structure des grains sur la réaction mécanique des mélanges de sable-cendres volantes. Cette analyse s'appuie sur un programme expérimental basé sur des essais de cisaillement direct effectués, avec trois types de sable ayant des formes différentes,

Enfin, le cinquième chapitre étudie l'impact des caractéristiques de forme et de taille des grains sur la capacité de compressibilité des mélanges de sable et de cendres volantes. Pour ce faire, un programme expérimental basé sur des essais de compressibilité à l'œdomètre a été mis en œuvre, impliquant trois types de sables aux formes variées.

# **Chapitre 1**

## **Etude bibliographique**

*Ce chapitre présente une synthèse bibliographique qui comporte des notions sur le comportement mécanique des sols sableux ainsi que la compressibilité des sables, puis une présentation des travaux récents sur l'effet des paramètres de taille et de forme sur la réponse mécanique **en** termes de cisaillement et compressibilité des sables suivie par un aperçu général sur le traitement des sols en mettant l'accent sur les méthodes utilisées actuellement, puis l'influence de quelques paramètres qui sont en relation avec la présente étude sont exposés.*

## 1.1. Introduction

Le comportement mécanique des sols pulvérulents a connu une vague d'études évolutives que la communauté des chercheurs dans le domaine de la géotechnique avait éclairé à travers les nombreuses publications qui ont été collectées. Cependant, le comportement des sables reste assez complexe en raison de l'interaction du grand nombre de paramètres qui peuvent affecter d'une manière ou d'une autre sa réponse mécanique sous différents types de chargements. On note que certains de ces paramètres ont été largement étudiés tels que, la teneur en fines, densité relative initiale, condition de saturation, méthode de déposition, conditions de chargement, types de fines, histoire des contraintes etc...) (Alshibli & Cil, 2018; Borhani & Fakharian, 2016; J. A. Choobbasti et al., 2014; Della et al., 2010; Y. Mahmoudi et al., 2020; Monkul & Yamamuro, 2011; Simpson & Evans, 2016; Xiao et al., 2019).

Une présentation de la littérature publiée a été abordée dans cette partie imprévisible d'élaborer une compréhension adéquate des recherches récentes sur les différents facteurs influents sur les comportements étudiés dans cette investigation expérimentale tels que la résistance au cisaillement et la compressibilité des sables ainsi que leur traitement.

## 1.2. Comportement mécanique des sols sableux

L'étude du comportement mécanique des sols en général et des sables en particulier, représente un enjeu important car on les rencontre fréquemment dans les travaux de construction comme sol support ou utilisés comme matériaux de construction (Génie Civil, Travaux Publics et Hydraulique). Il est à signaler que l'identification de leur réponse mécanique s'avère d'une importance vitale à travers les essais de laboratoire offrant ainsi une meilleure maîtrise des conditions de drainage et de chargement et qui permettent une exploration adéquate de la caractérisation mécanique de ces sols. On note que celles-ci sont à l'origine d'une influence déterminante sur leur réponse mécanique nécessitant une analyse et une compréhension approfondie.

### 1.2.1. Comportement mécanique en condition drainée

Lorsqu'une charge est appliquée et que l'eau interstitielle s'écoule librement entre les particules d'un échantillon de sol saturé soumis à un chargement en compression triaxiale. On dira que ce dernier est testé en condition drainée, ce dernier est caractérisé par des variations de volume du matériau et une pression interstitielle nulle ( $\Delta u=0$ ) au cours du chargement. Pour

qu'un comportement soit parfaitement drainé, deux conditions doivent être remplies : la charge doit être appliquée à une vitesse suffisamment lente pour éviter la surgénération de la pression interstitielle, et la durée d'application de la charge doit être suffisamment longue pour permettre la dissipation complète de toute surpression interstitielle éventuelle.

Lors d'un essai triaxial monotone en condition drainée, où une contrainte  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$  est appliquée, on observe initialement une diminution du volume de l'échantillon de sable correspondant à une augmentation du déviateur de contraintes ( $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ). Durant cette phase, le sol montre une phase de contractance qui se caractérise par le processus de l'enchevêtrement des grains de sable (voir Figure 1.1). Pour un état lâche du sol, la vitesse de déformation volumique est très lente permettant ainsi, un réarrangement adéquat des grains. En revanche, pour un sable dense, la vitesse de déformation volumique s'annule rapidement et le sens de déformation s'inverse, entraînant une courte phase contractance suivie par une large phase de dilatance. Cette phase de dilatance est essentiellement attribuée au désenchevêtrement des grains de sable.

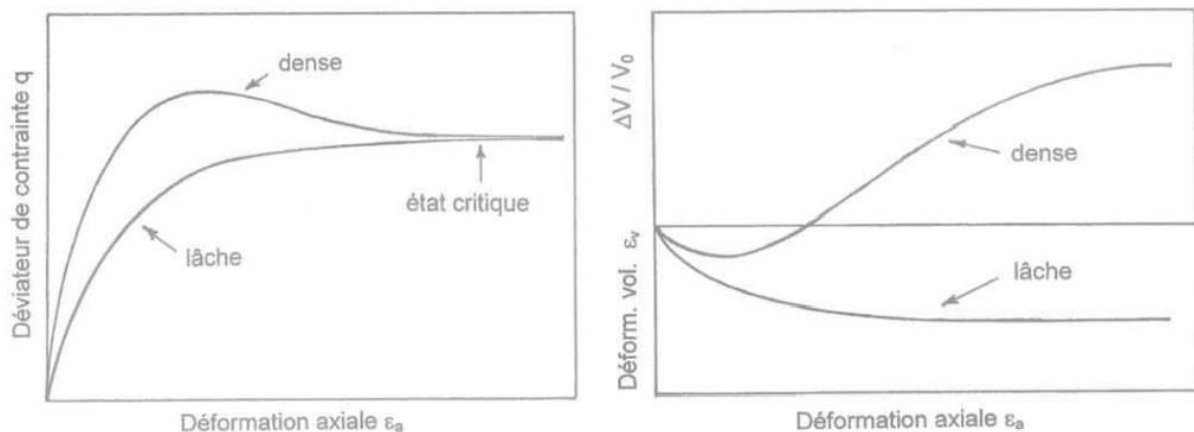


Figure 1.1 : Comportements typiques observés lors du cisaillement drainé d'un sable en compression à l'appareil triaxial « schématique ». (Canou et al., 2002)

### 1.2.2. Comportement mécanique en condition non drainé

Le comportement en condition non drainée se caractérise par l'amplification de la pression de l'eau interstitielle à l'intérieur du matériau pendant l'application de la charge. En effet, celui-ci se manifeste par un changement de volume nul induisant ainsi, une surgénération de la pression interstitielle de l'eau au cours de l'essai. Par conséquent, les phases de contractance et de dilatance peuvent être observées à travers les variations de la pression

interstitielle. La phase de contractance se traduit par une élévation de la pression interstitielle, résultant de la tendance du squelette solide à se densifier. En revanche, la phase de dilatance se manifeste par une diminution de la pression interstitielle, due à l'augmentation du volume solide.

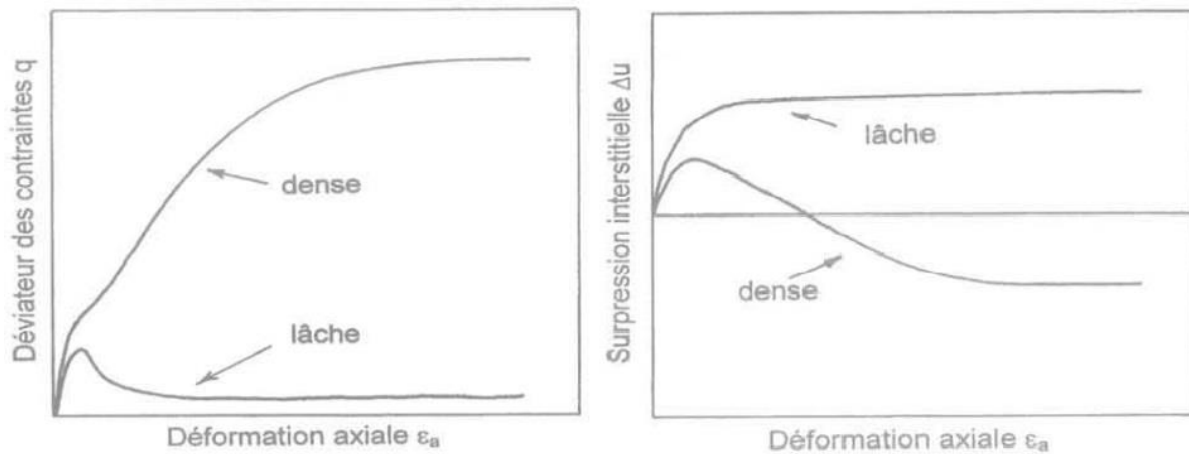


Figure 1.2 : Comportements typiques observés lors du cisaillement non drainé d'un sable en compression à l'appareil triaxial « schématique ». (Canou et al., 2002)

### 1.3. Compressibilité des sables

La compressibilité du sable désigne la capacité du sable à diminuer de volume sous l'effet d'une contrainte appliquée. Cette propriété est influencée par plusieurs facteurs, notamment la taille des grains, la teneur en eau et la densité initiale. La compréhension de ces variables est essentielle pour prédire l'ampleur des tassements et par conséquent, la stabilité des ouvrages dans les différents domaines de construction (Génie Civil, Travaux Publics et Hydraulique).

Plusieurs tentatives ont été fournies afin d'avoir une compréhension complète des facteurs influents qui induisent des tassements sous chargement oedométrique ou les premiers travaux sur ce domaine d'étude ont été initiés par (Terzaghi, 1943). Dans ce contexte, (Roberts, 1958) a constaté que les échantillons de sable contenant des particules anguleuses étaient plus compressibles que ceux contenant des particules bien arrondies. Il est à signaler que le comportement mécanique en termes de compressibilité des sols sableux peut être influencé par des facteurs similaires à ceux qui affectent le comportement des sables propres. En effet, ces facteurs comprennent la granulométrie, la minéralogie, la géochimie, la forme des grains, la microstructure, la surconsolidation et la technique de préparation des échantillons (Ishihara, 1993). (Coop & Atkinson, 1993) ont observé que l'introduction de 24% de fines non plastiques

dans le sable carbonaté reconstitué a conduit à une diminution de l'indice des vides par rapport au sable propre et à une ligne de compression moins inclinée. Les tendances observées ont été attribuées aux variations des caractéristiques granulométriques des mélanges sable-fines, ainsi qu'à la nature des fines. Plus précisément, les sables carbonatés présentent une angularité et un indice de vide initial élevé. En revanche, (Monkul & Ozden, 2007) ont examiné l'influence de la kaolinite sur les sols sableux et ont constaté que les fines de kaolin amplifient la compressibilité des mélanges sable-kaolin. Leur étude a révélé que le comportement en compressibilité des mélanges étudié peut-être examiner en trois étapes représentées par différentes zones (zone 1, zone de transition et zone 2) (Figure 1.3). Dans la zone 1, la compressibilité est principalement contrôlée par les grains de sable eux-mêmes et que la matrice de grains plus grossiers a une structure presque continue avec des contacts grain à grain et que les fines uniquement occupent les vides intergranulaires induisant ainsi, un faible comportement en compression. À partir du début de la zone de transition (ligne discontinue), le contact entre les grains de sable commence à diminuer en raison du remplissage de kaolin. Par conséquent, on peut observer une forte augmentation de la pente de la courbe du coefficient de compressibilité, à partir de la zone de transition et avec l'augmentation de la teneur en fines, les grains de sable deviennent plus dispersés, de sorte qu'il n'y a presque plus de contacts entre eux (zone 2). A ce stade, la compressibilité du sol continue d'augmenter qui devrait être principalement contrôlée par la matrice des grains plus fins étant donné que les grains grossiers flottent dans la matrice des fines. Par conséquent, on note une augmentation de la différence entre l'indice de compression global et l'indice de compression granulaire avec l'augmentation de la teneur en fines pour atteindre un maximum à la fin de la zone 2.

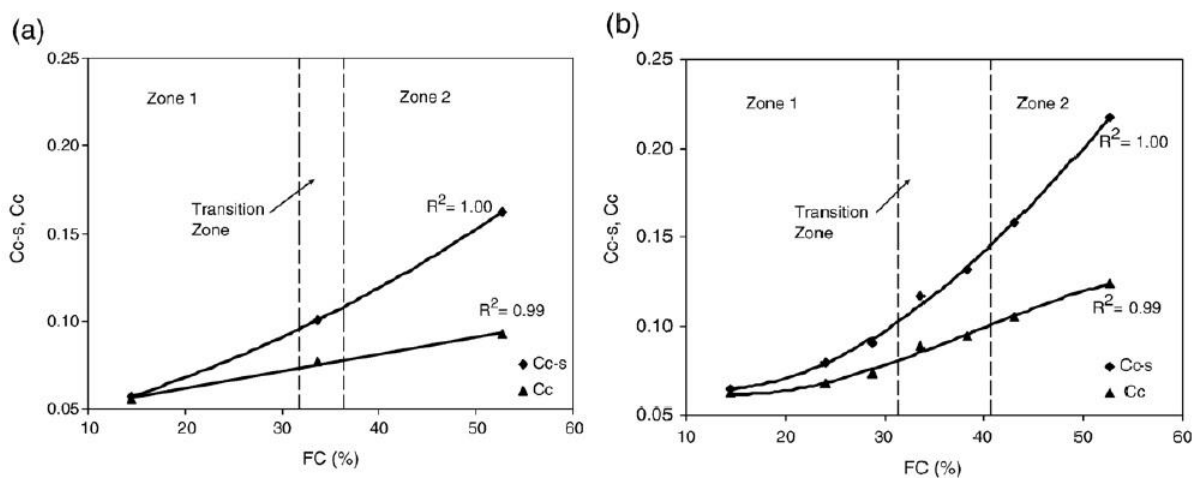


Figure 1.3 : variation de coefficient de compressibilité global et intergranular en fonction de teneur en fines. (Monkul & Ozden, 2007)

(Jamshidi Chenari et al., 2017) a constaté que la distribution granulométrique a un impact significatif sur la compressibilité des sables. En effet, les sables bien gradués présentant une courbe granulométrique étalée ont tendance à présenter une compressibilité plus faible que les sables à granulométrie uniforme, en raison de sa densité et son indice des vides réduits. (Zhang et al., 2020) ont étudié l'effet des caractéristiques de forme sur la compressibilité des sols sableux, en effectuant une série d'essais de compression unidimensionnelle sur quatre types de sables. Les résultats obtenus ont révélé que le granite complètement décomposé (le matériau le plus irrégulier parmi les sables testés) a montré des valeurs d'indice des vides initial plus élevée parmi les autres types de sable qui sont plus réguliers, tandis que, le sable le plus régulier a montré un comportement très stable en comparaison aux autres matériaux testés qui sont considérés comme moins réguliers. La tendance obtenue montre clairement la dépendance de la compressibilité des sables des caractéristiques de forme des grains.

L'effet de la teneur en fines sur la compressibilité des sols sableux de Chlef a été étudié par (Bouri et al., 2021). Ils ont trouvé que l'ajout d'une fraction de limon (dans la plage 0% - 40%) à un sable hôte (sable de Chlef) a induit une augmentation importante du coefficient de compressibilité. En outre, (Nougar et al., 2022) ont étudié l'effet du limon et d'argile sur la compressibilité du sable de Chlef. Les résultats obtenus sont présentés dans la (Figure 1.4) qui montre que l'augmentation de la teneur en limon ou en argile dans le sable hôte a induit une augmentation du coefficient de compressibilité. Il est à signaler que la compressibilité induite par l'ajout d'argile est plus prononcée que celle du limon, en raison de la différence de plasticité entre les deux matériaux. L'effet des caractéristiques de forme des grains sur la compressibilité des sols grossiers doit également être pris en considération.

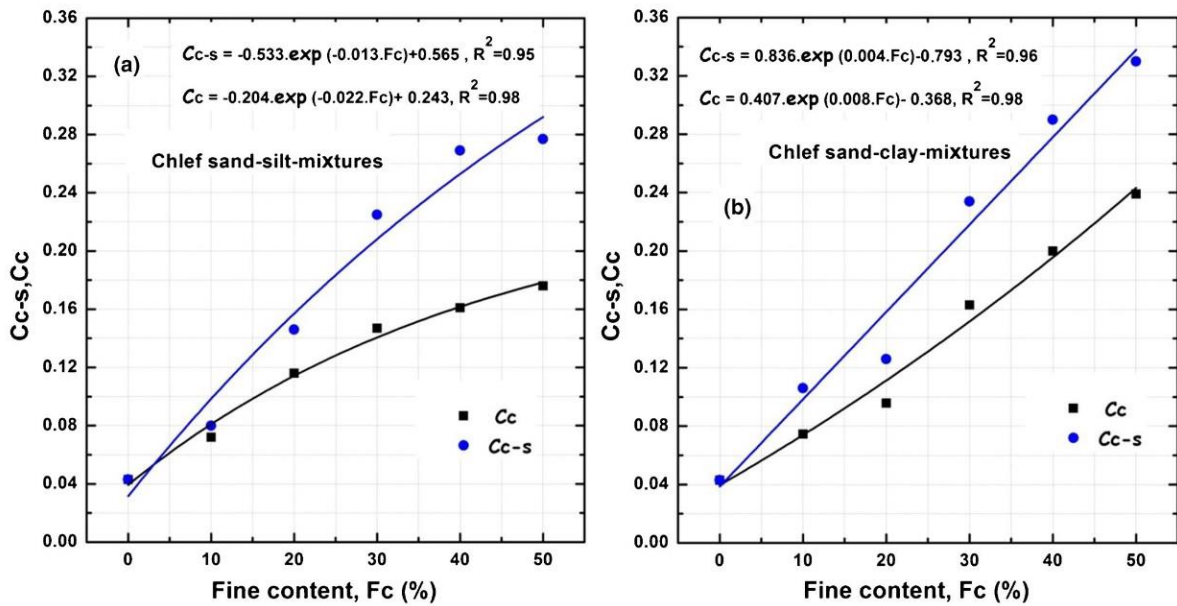


Figure 1.4 : Coefficient de compressibilité global et intergranulaire en fonction de teneur en fines. (Nougar et al., 2022)

(Mahmoudi et al., 2024) ont introduit la notion du concept de l'indice des vides équivalent pour évaluer la compressibilité du sable de Chlef. Leurs résultats indiquent que l'augmentation de la teneur en fines peu plastiques jusqu'à 40 % diminue l'indice de compressibilité des échantillons de mélanges sable-limon préparés à l'aide de la méthode de damage humide. Inversement pour ceux préparés par pluviation à sec, une augmentation de la teneur en fines entraîne une augmentation de l'indice de compressibilité pour toutes les densités relatives initiales testées (Figures 1.5 et 1.6). Cette divergence dans les tendances obtenues met en évidence l'influence des méthodes de préparation des échantillons sur le comportement des sols sableux mélangés avec des teneurs en fines peu plastiques.

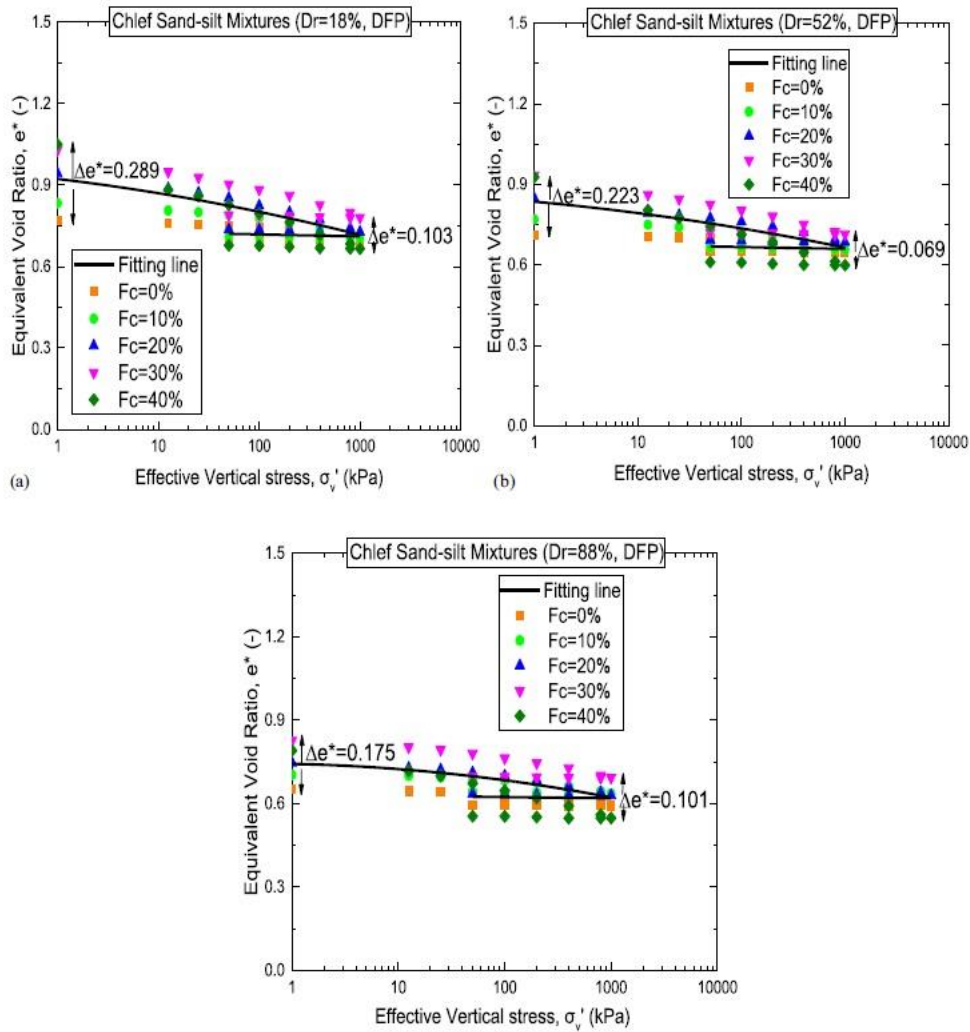


Figure 1.5 : Variation de l'indice des vides équivalent en fonction de contrainte verticale pour les échantillons de mélanges sable-limon reconstitués par pluviation à sec

(a)  $D_r=18\%$  ; (b)  $D_r=52\%$  ; et (c)  $D_r=88\%$ . (Mahmoudi et al., 2024)

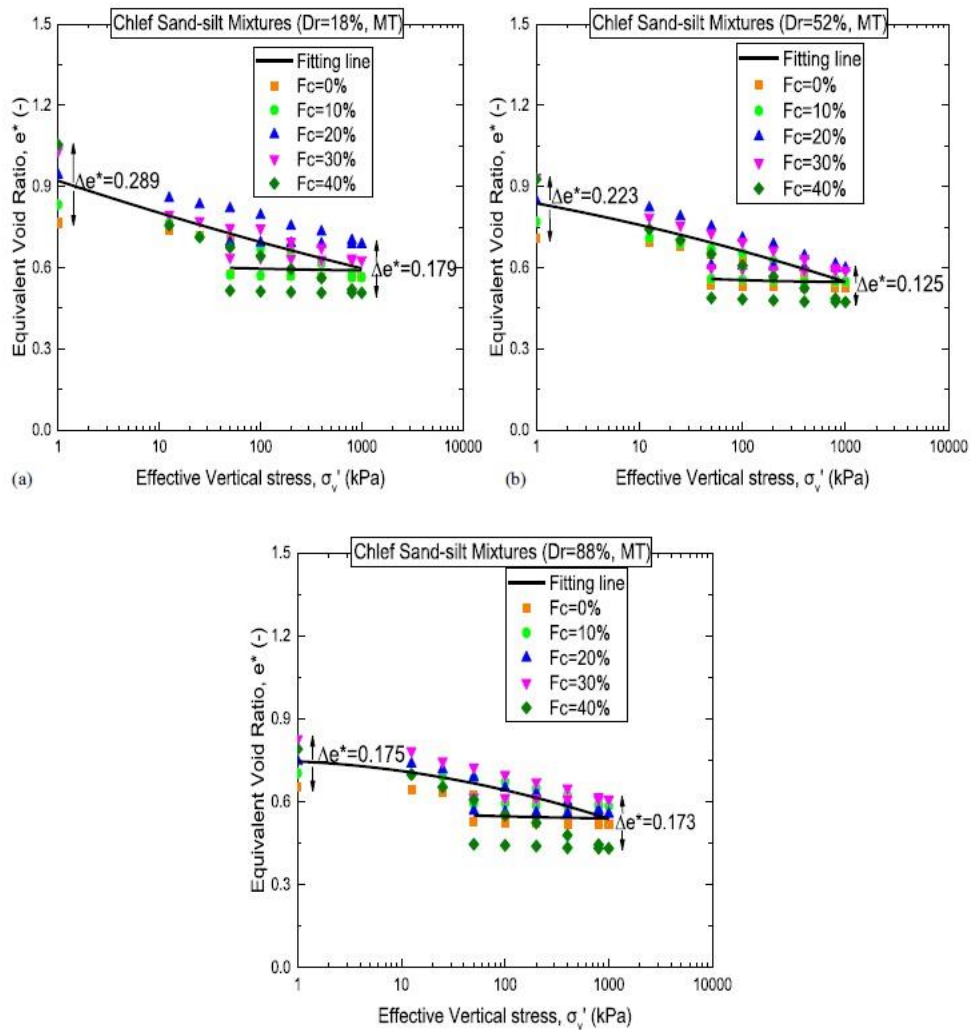


Figure 1.6 : Variation de l'indice des vides équivalent en fonction de la contrainte verticale (échantillons reconstitués avec damage humide)  
 (a)  $Dr=18\%$  ; (b)  $Dr=52\%$  ; et (c)  $Dr=88\%$ . (Mahmoudi et al., 2024)

## 1.4. Influence de la morphologie des grains

### 1.4.1. Effet des caractéristique granulométriques.

La granulométrie des sols a été toujours considérée parmi les facteurs les plus influents sur la réponse mécanique des sols. On note que son influence a été toujours prise en considération lors de l'analyse et l'interprétation des différents comportements des sables. (Lee & Fitron, 1969) ont rapporté que la résistance cyclique des sols dépend d'une manière significative des caractéristiques des particules et de leur distribution. (Tsuchida, 1970) a déclaré que les sols graveleux présentent une résistance au cisaillement plus élevée que les sols sableux. En outre, il a proposé un fuseau de courbes granulométriques dans lequel il a distingué les sols

liquéfiés de ceux non liquéfiés. Il est à signaler que (Finn et al., 1970) et (Ishihara et al., 1975) ont confirmé que la résistance cyclique augmente avec la taille des particules.

Récemment (Cherif Taiba et al., 2018) ont étudié l'effet des caractéristiques granulométriques sur le rapport de contrainte d'instabilité et le rapport d'état d'équilibre en fonction de teneur en fines des mélanges sable de fontainebleau-limon, ou, les résultats obtenus ont clairement montré que les diamètres des grains  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ , le diamètre efficace  $D_{10}$  et le diamètre moyen des grains  $D_{50}$  ont une influence significative sur la contrainte d'instabilité et le rapport d'état d'équilibre. Il a été constaté au cours de leur recherche qu'avec l'augmentation de la teneur en fines dans la gamme de 0-30% des mélanges reconstitués, l'évolution de la taille des grains  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ ,  $D_{10}$ , et  $D_{50}$  est caractérisé par une tendance baissière, induisant ainsi, une diminution de la contrainte d'instabilité et des rapports d'état d'équilibre et par conséquent augmente la susceptibilité à la liquéfaction des mélanges sable de Fontainebleau-limon.

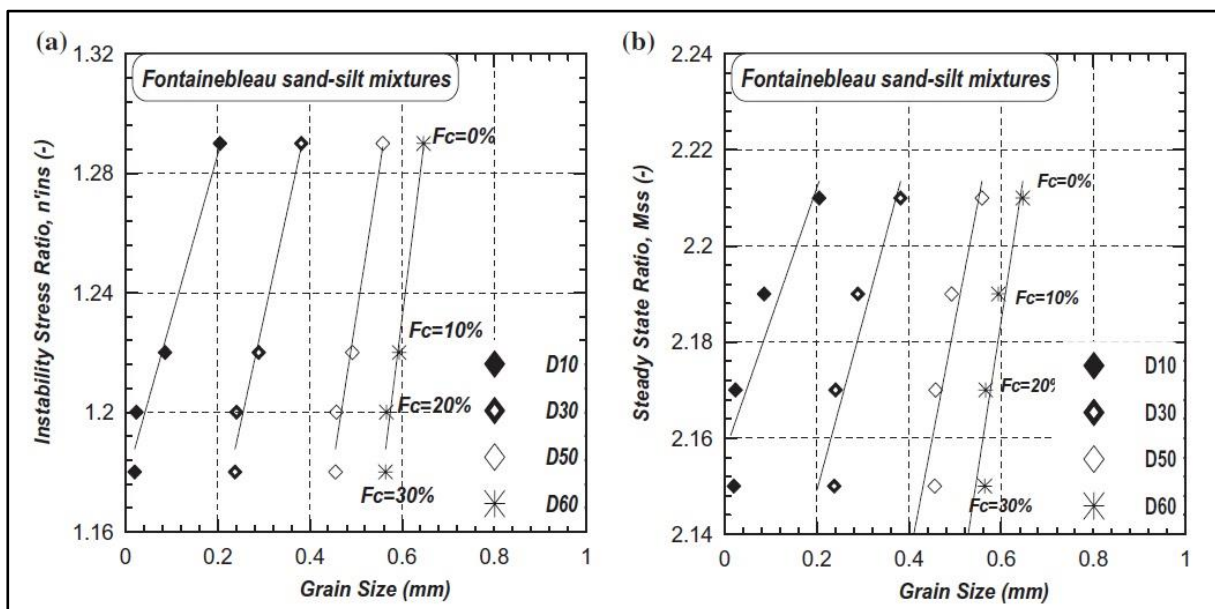


Figure 1.7 : Evolution du rapport de contrainte d'instabilité et état d'équilibre en fonction de la taille des grains et teneur en fines (Cherif Taiba et al., 2018)

#### 1.4.1.1. Effet du diamètre efficace ( $D_{10}$ )

Le diamètre caractéristique ( $D_x$ ), en mm, correspondant à un pourcentage en poids cumulés, choisi en ordonnées. Le plus utilisé est le diamètre efficace,  $D_{10}$ , obtenu par la valeur 10 % du poids cumulé. L'étude de l'influence de ce paramètres a été initié par les travaux de (Rose & Smith, 1957) dans lesquels ils ont discuté la possibilité d'exprimer la perméabilité des sols en fonction du diamètre efficace. (J. A. Choobbasti et al., 2014) ont montré que la résistance

cyclique non drainée du sol pouvait être corrélée avec les paramètres de taille des grains ( $D_{10}$ ,  $D_{30}$ , ou  $D_{60}$ ) plutôt qu'au coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) ou au coefficient de courbure ( $C_c$ ) des matériaux granulaires testés. (Doumi et al., 2020) ont effectué une série d'essais de compression non drainée à l'aide d'un appareil triaxial statique dans le but d'élucider l'influence du diamètre efficace relatif représentant un nouveau paramètre déterminé à partir du diamètre efficace [rapport entre le diamètre efficace et le diamètre maximal ( $RED = D_{10}/D_{max}$ )] sur la résistance au cisaillement des sables partiellement saturés. Ils ont constaté que le diamètre efficace relatif (RED) avait un impact remarquable sur la réponse au cisaillement des sols sableux testés. En conséquence, ils ont rapporté que dans le cas des échantillons de groupe 1 ( $D_{10}=0.25\text{mm}$ ), l'augmentation du diamètre efficace relatif induisait une diminution de la résistance ultime au cisaillement des échantillons partiellement saturés testés avec le paramètre de pression interstitielle de Skempton le plus bas ( $B=20\%$ ) en comparaison à celui de Skempton intermédiaire ( $B = 50\%$ ) et plus élevé ( $B = 90\%$ ). On note que les auteurs ont trouvé que l'augmentation du diamètre efficace a induit une amélioration de la résistance ultime au cisaillement pour les échantillons du groupe 2 ( $D_{10}=0.08\text{mm}$ ) comme le montre Figure 1.8.

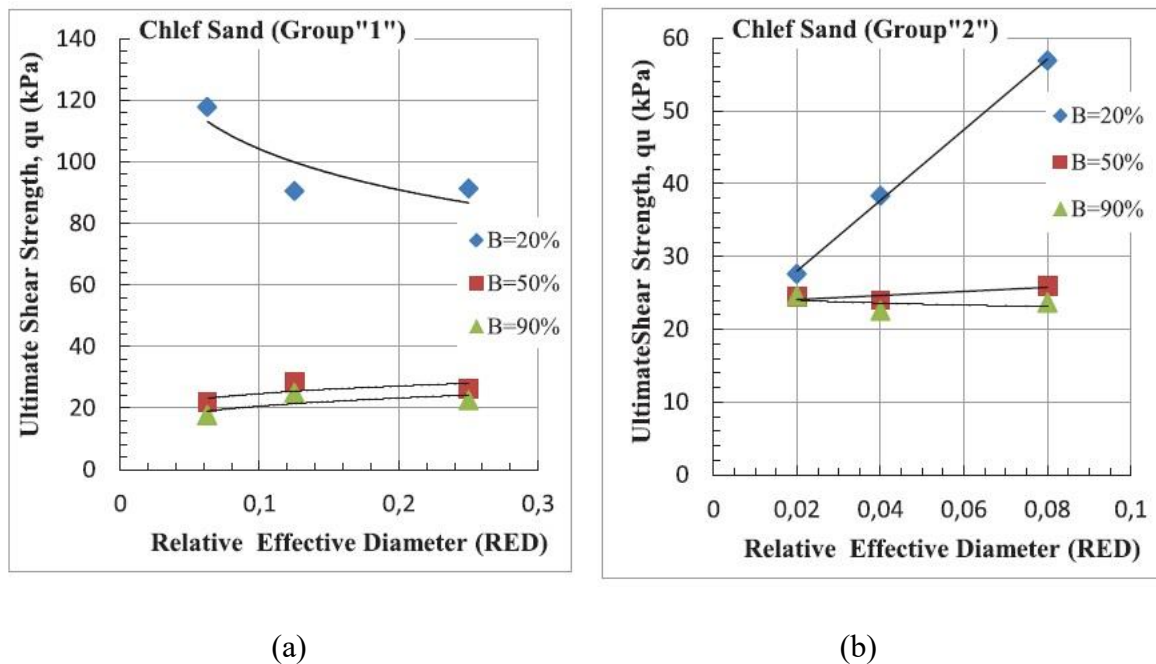


Figure 1.8: Variation de la résistance au cisaillement ultime en fonction de diamètre efficace relatif (RED) (Doumi et al., 2020)

(a).  $D_{10}=0.25\text{mm}$       (b).  $D_{10}=0.08\text{mm}$

### 1.4.1.2. Effet du diamètre moyen ( $D_{50}$ )

Le diamètre moyen,  $D_{50}$  est défini comme étant le diamètre équivalent à 50% du tamisât cumulé déterminé par la courbe granulométrique. Son influence a été étudiée dès les premiers travaux de (Taylor, 1948). (Polito, 1999) a observé que la résistance cyclique non drainée augmentait avec l'augmentation de la taille moyenne des grains ( $D_{50}$ ) des sables propres. (Monkul & Yamamuro, 2011) ont indiqué que lorsque le rapport entre la taille moyenne des grains du sable et des particules de limon ( $D_{50\text{-sable}}/D_{50\text{-limon}}$ ) était suffisamment faible, la résistance au cisaillement non drainé du sable augmentait régulièrement avec l'augmentation de la fraction de limon pour la gamme de teneur en limon (0-20%). Lorsque  $D_{50\text{-sable}}/D_{50\text{-limon}}$  augmente, la résistance au cisaillement du sable limoneux reste inférieure à celle du sable propre. (Belkhatir et al., 2012) ont constaté que le diamètre moyen des grains  $D_{50}$  a un effet significatif sur la résistance au cisaillement non drainé, l'étude a été réalisée à travers une série d'essais de compression triaxiale sur un mélange sable-limon ou, la teneur en fines ( $F_c$ ) variait de 0 à 50 %. Les résultats trouvés ont clairement montré que le diamètre moyen ( $D_{50}$ ) peut être parfaitement corrélé avec la résistance maximale au cisaillement  $q_{\text{peak}}$  et que l'augmentation du diamètre moyen  $D_{50}$  induit une amélioration du comportement mécanique du mélange sable-limoneux en termes de résistance maximale  $q_{\text{peak}}$ .

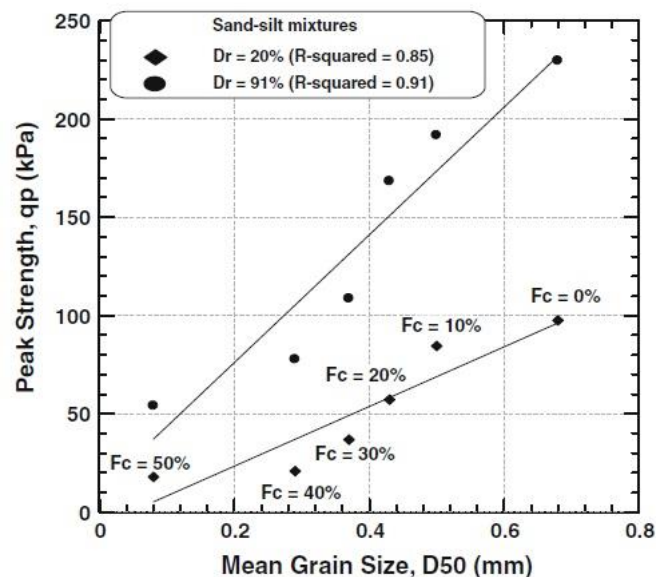


Figure 1.9 : Variation de la résistance au cisaillement maximale en fonction de la taille moyenne des grains (Belkhatir et al., 2012).

(Ghadr & Assadi-Langroudi, 2019) a étudié l'effet de la taille des particules sur le comportement en condition non drainée du sable par une campagne d'essais de compression

triaxiale sur trois sables différents: sable siliceux uniforme de Firoozkuh 161 (F161 avec  $D_{50}=0.27\text{mm}$ ) et 131 (F131 avec  $D_{50}=0.91\text{mm}$ ) et le sable Urmia Lake (UL avec  $D_{50}=0.15\text{mm}$ ). Les résultats trouvés ont montré clairement l'effet de la taille moyenne des grains ( $D_{50}$ ) sur le comportement mécanique global des sables en termes de résistance maximale, ou le sable (F131) avec  $D_{50}=0.91\text{mm}$  a montré une plus grande résistance au cisaillement maximale lorsqu'il est comparé au sable (F161) avec  $D_{50}=0.27\text{mm}$  avec la variation de la contrainte de confinement (Figure 1.10).

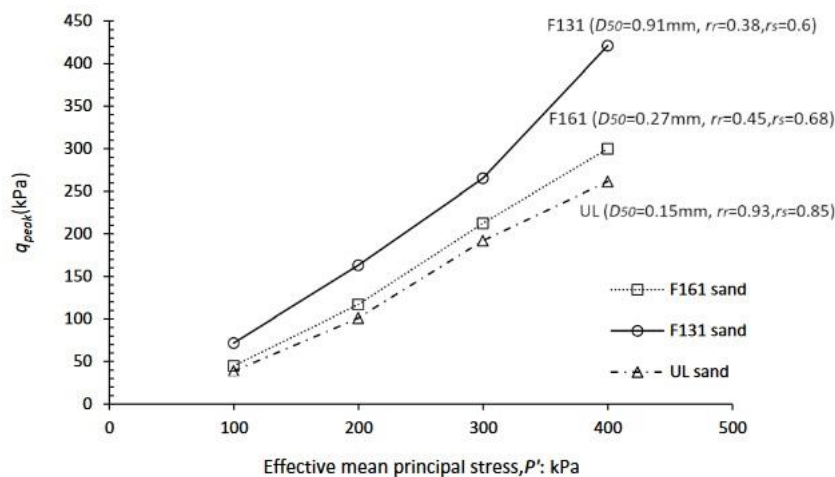


Figure 1.10 : Evolution de la résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte effective de confinement des différents échantillons testés (Ghadr & Assadi-Langroudi, 2019)

#### 1.4.1.3. Effet de coefficient de courbure et coefficient d'uniformité

On Le coefficient de courbure est un paramètre granulométrique décrivant la forme de la courbe granulométrique (Robitaille & Tremblay, 1997). En effet, on peut distinguer une granulométrie bien graduée si la valeur de coefficient de courbure est entre 1 et 3, tant qu'elle est mal graduée si la valeur n'atteint pas ou dépasse cette marge. (Yilmaz et al., 2008) ont étudié l'effet du coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) et du coefficient de courbure ( $C_c$ ) sur 12 sous-groupes de sable siliceux de Pasabahce. Chaque sous-groupe ayant été obtenu à l'aide de deux séries de tamis (supérieur et inférieur). Grâce à une série d'essais triaxiaux cycliques, il a été trouvé que la variation du coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) et du coefficient de courbure ( $C_c$ ) entre l'intervalle  $1.0 < C_u < 12.0$  et  $1.0 < C_c < 10.0$  induit une diminution du rapport de contrainte cyclique de 0.38 à 0.21 Figure (1.11).

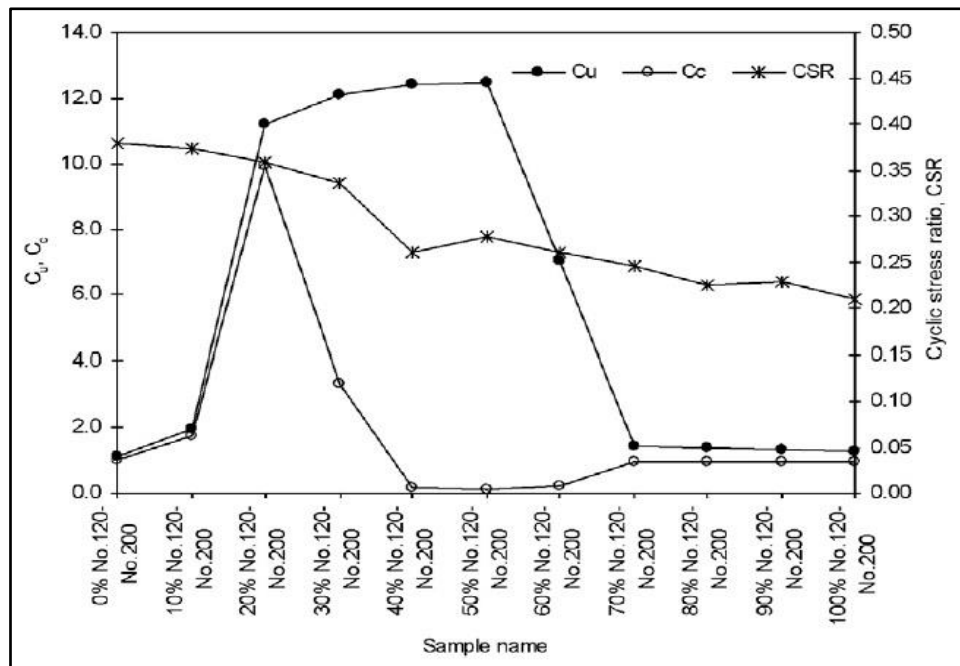


Figure 1.11: Variation du rapport de contrainte cyclique en fonction du coefficient de courbure et d'uniformité (Yilmaz et al., 2008).

(Guo et al., 2023) ont étudié l'effet de la granulométrie sur la résistance au cisaillement des sables. Ils ont observé que l'impact du coefficient de courbure n'était pas significatif en le comparant à celui du coefficient d'uniformité. Cependant, ils ont montré expérimentalement et numériquement que la résistance au cisaillement augmente avec la diminution du coefficient de courbure. (Vaid et al., 1990) ont étudié le comportement de 3 granulométries de sable à différentes densités relatives initiales variant de 22% à 73% à travers une série d'essais triaxiaux sous une pression de confinement initiale de 200kPa. Les résultats obtenus ont montré l'effet prononcé de la gradation sur le comportement mécanique du sable. Il est à signaler que le sable uniforme a montré une faible résistance au cisaillement cyclique que les sables gradués et bien gradués pour les faibles densités relatives initiales. Au-delà de  $Dr=65\%$  la tendance inverse a été obtenue. D'autre part, le sable uniforme a montré le caractère contractant pour la densité relative initiale inférieure à  $Dr=45\%$ . (Kokusho et al., 2004) ont rapporté que la résistance au cisaillement non drainée dépendait du coefficient d'uniformité pour une déformation plus importante de 20 à 25 %, indiquant ainsi, que l'augmentation du coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) entraînait une augmentation significative de la résistance au cisaillement des sols.

(Cherif Taiba et al., 2016) ont rapporté que l'augmentation du coefficient d'uniformité entraîne une diminution de la résistance au cisaillement non-drainée (résistance à la liquéfaction statique) à partir d'une série d'essais triaxiaux non-drainés sur le sable de Chlef et sable de

Fontainebleau mélangés avec le limon de Chlef de 0 à 40% (Figure 1.4). Les résultats similaires ont été annoncés par (Monkul et al., 2016), (Janalizadeh Choobasti et al., 2014) et (Wang et al., 2013).

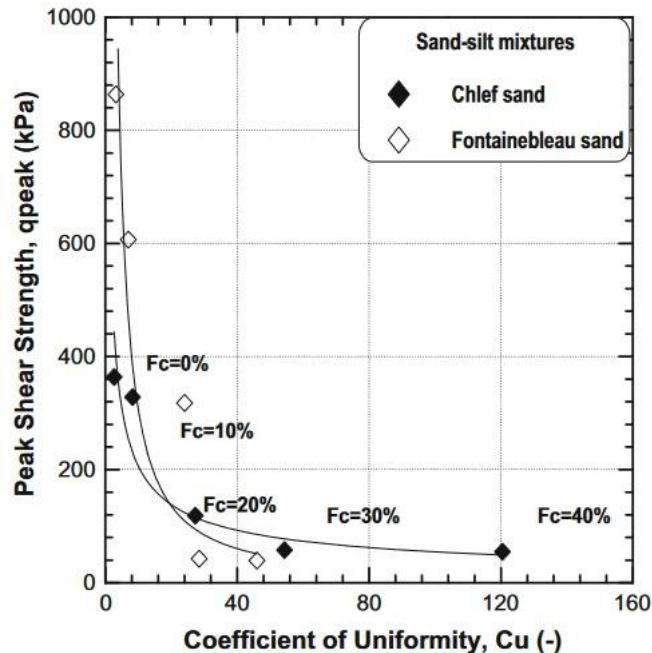


Figure 1.12 : Variation de la résistance au cisaillement maximale en fonction du coefficient d'uniformité (Cherif Taiba et al., 2016)

#### 1.4.1.4. Effet des diamètres extrêmes

(Hazout et al., 2017) a évalué les caractéristiques de liquéfaction statique du sable saturé en utilisant le diamètre moyen ( $D_{50}$ ) et les diamètres extrêmes ( $D_{max}$  &  $D_{min}$ ). Dans cette étude, il a été montré que le diamètre moyen des grains  $D_{50}$ , le diamètre maximal  $D_{max}$  et le diamètre minimal  $D_{min}$  ont un effet remarquable sur la résistance au cisaillement maximale non drainée. En effet, l'augmentation de  $D_{50}$  et  $D_{max}$  a été à l'origine d'une amplification de la résistance à la liquéfaction des sols sableux testés. Il a été trouvé que l'augmentation de  $D_{50}$  et  $D_{min}$  a induit une augmentation de la résistance maximale au cisaillement non drainée ( $q_{max}$ ).

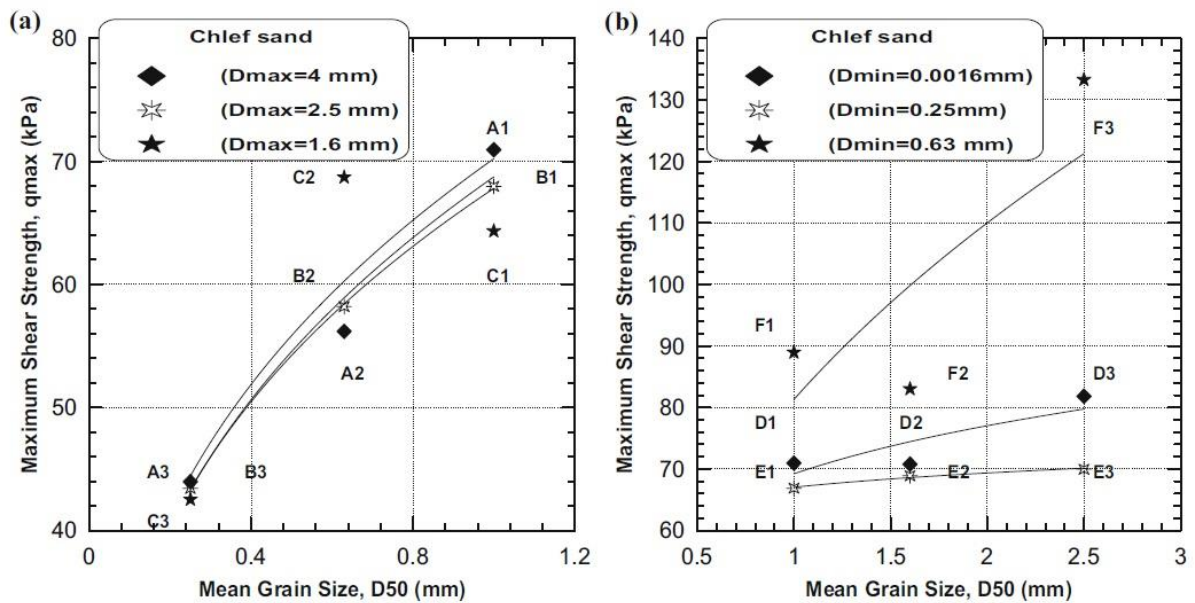


Figure 1.13 : Variation de la résistance au cisaillement maximale en fonction du diamètre maximal et diamètre moyen (Hazout et al., 2017).

(Doumi et al., 2020) ont étudié l'influence du diamètre maximal ( $D_{max}$ ) sur la résistance au cisaillement non drainée ( $q_u$ ) de deux groupes de sols sableux. Les résultats obtenus montrent clairement que le diamètre maximal ( $D_{max}$ ) a une influence significative sur la résistance au cisaillement non drainée des matériaux testés. En effet, la résistance au cisaillement non drainée augmente avec l'augmentation du diamètre maximal pour les faibles valeurs du coefficient de Skempton ( $B=20\%$ ) dans le cas des échantillons du groupe 1, tandis que la tendance inverse a été observée pour les échantillons du groupe 2, où la résistance au cisaillement non drainée diminue avec l'augmentation du diamètre maximal pour la même valeur du coefficient de Skempton ( $B=20\%$ ). La tendance observée peut être attribuée aux effets combinés du diamètre maximal et diamètre efficace pour les faibles valeurs du coefficient de Skempton ( $B=20\%$ ) dans l'augmentation et la diminution des forces interparticulaires entre les grains grossiers pour le groupe 1 ( $D_{10}=0,25$  mm, la faible quantité de fines peu plastiques  $F_c \leq 3\%$ ) et le groupe 2 ( $D_{10}=0,08$  mm), la présence de fines peu plastiques  $F_c=10\%$  conduisant à une diminution de l'imbrication des particules grossières et par conséquent à une diminution significative de la résistance au cisaillement non drainée. En revanche, des observations assez similaires ont été enregistrées pour la résistance au cisaillement ultime dans le cas des coefficients de Skempton intermédiaire ( $B=50\%$ ) et plus élevé ( $B=90\%$ ) pour tous les échantillons de sol sableux testés.

### 1.4.2. Effet des caractéristiques de forme

La relation entre les caractéristiques de forme des particules, telles que la rondeur, l'angularité et la régularité générale, et la résistance au cisaillement des sols sableux a fait l'objet d'une attention particulière de la part des chercheurs au cours des dernières décennies.

(Yang & Luo, 2015) ont trouvé que l'ajout de particules de billes de verre broyées de différentes formes au sable dans différents pourcentages pouvait influencer de manière significative le comportement général de cisaillement des mélanges. (Cherif Taiba et al., 2018) ont proposé une nouvelle combinaison mathématique de deux caractéristiques les plus importantes de la forme des particules, telles que l'angularité et la sphéricité, pour décrire l'effet de la forme couplée des grains des mélanges binaires de sable et de limon sur le comportement mécanique des sols testés. Ils ont indiqué que la résistance au cisaillement maximale diminuait avec l'augmentation de l'angularité combinée et la diminution de la sphéricité combinée des mélanges de sable et de limon étudiés. (Alshibli & Cil, 2018) ont proposé des modèles précis qui pourraient être utilisés pour la prédiction et l'évaluation des angles de frottement des sables en utilisant des essais triaxiaux basés sur les caractéristiques de forme des particules. (Yang & Luo, 2018) ont constaté qu'en plus de la gradation, la forme des particules contrôle aussi l'angle de frottement à l'état critique des sables. Ils ont trouvé que les réponses au cisaillement non drainé du sable de Fujian mélangé avec des billes de verre et des billes de verre broyées pouvaient être contrôlées par les caractéristiques de forme des particules (la sphéricité et la régularité globale). (Cherif Taiba et al., 2021) ont constaté que l'angle de frottement d'instabilité des sables et des sables limoneux est très lié aux caractéristiques de la forme des particules. Dans leur travail, ils ont indiqué que l'augmentation du rapport d'angularité (obtenu par le rapport entre l'angularité du sable et l'angularité des mélanges) a entraîné une diminution de l'angle de frottement d'instabilité pour les trois mélanges étudiés « sable-limon de Chlef », « sable d'Hostun-limon de Chlef » et « sable de Fontainebleau -limon de Chlef » (Figure 1.14). (Cherif Taiba et al., 2022) ont établi une corrélation pertinente entre les propriétés à l'état critique et les caractéristiques de forme des particules en termes de régularité globale (OR) en tenant compte des aspects de gradation et de densité d'arrangement des particules de sables naturels. Ils ont constaté que le facteur de régularité globale pouvait être corrélé aux paramètres de l'état critique (interception de l'état critique " $e_T$ ", gradient de l'état critique " $\lambda$ " et angle de frottement de l'état critique " $\phi_{cs}$ ") des sols sableux considérés.

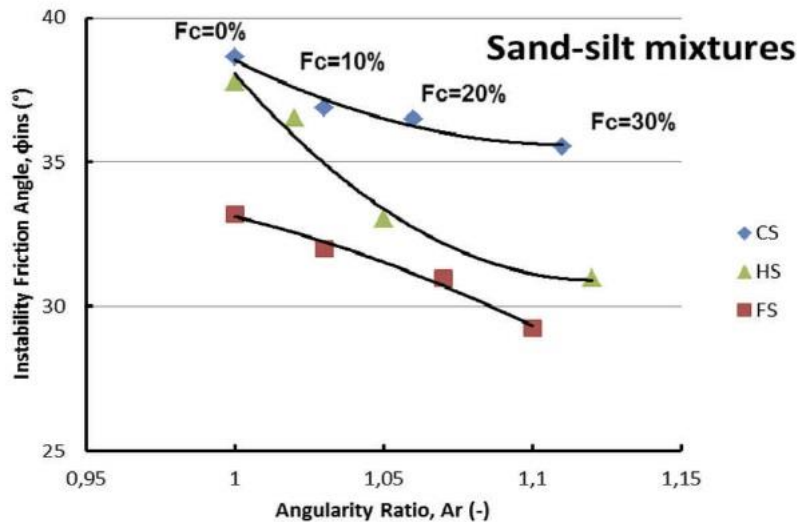


Figure 1.14 : Variation de l'angle de frottement d'instabilité en fonction du rapport d'angularité pour les mélanges étudiés (Cherif Taiba et al., 2022).

En outre, (Jozefaciuk et al., 2021) ont abordé les complexités de la forme des particules en examinant les effets de l'angularité sur la résistance au cisaillement des sols étudiés. Leurs résultats indiquent qu'une augmentation de l'angularité induit une diminution du rapport entre les contacts roulants et ceux glissants, améliorant ainsi, la résistance au cisaillement. L'étude souligne l'importance de la densité relative initiale, qui amplifie le nombre de contacts entre les particules et leur rotation induisant par conséquent une augmentation de la résistance. (Chen et al., 2022) s'appuient sur les résultats obtenus en utilisant la modélisation par éléments discrets pour analyser les effets de la sphéricité des particules sur la performance en cisaillement. Leurs recherches révèlent que sous des contraintes normales plus faibles, les particules rondes présentent la résistance au cisaillement la plus faible par rapport aux formes de particules mixtes ou irrégulières. Il est intéressant de noter que même des petites proportions de particules irrégulières peuvent améliorer de manière significative la résistance au cisaillement globale des sols sableux étudiés. Cette étude met en évidence le rôle critique de la forme des particules dans l'évolution microstructurale du sable pendant le cisaillement, en particulier la formation de bandes de cisaillement qui ont un rôle déterminant sur le comportement macro-mécanique du matériau. Les implications de la forme des particules ont été approfondies par (Zhang et al., 2023) qui ont étudié les réponses du sol lors de l'excavation d'un tunnel dans des sols sableux à l'aide de simulations numériques. Leurs travaux renforcent l'idée que la forme des particules influence de manière significative les comportements micro et macro-mécaniques. Ils font référence à diverses études de laboratoire qui démontrent qu'une rugosité accrue des particules augmente systématiquement la friction entre les particules, améliorant ainsi la résistance au

cisaillement. Leurs conclusions soulignent l'importance de prendre en compte la forme des particules dans les applications pratiques, telles que le creusement de tunnels, où le comportement du sol est critique.

### **1.5 Traitement des sols**

Le terme traitement des sols est généralement lié à l'introduction des produits de nature chimique dans la structure des sols, qui peuvent réagir dans le sens d'une éventuelle amélioration des performances des sols soumis à différents types de chargements. L'utilisation de cette technique de stabilisation a été initiée par l'emploi de la chaux dans les constructions qui a remonté à plus de 2 000 ans, notamment dans les fondations des routes romaines, une pratique qui existait probablement avant même la construction de ces voies (Figure 1.15). Les pyramides de Shensi, plus anciennes que les pyramides égyptiennes, ont également été construites avec des mélanges d'argile et de chaux. En Chine et en Inde, la stabilisation à la chaux a été utilisée dans des infrastructures telles que les ponts et barrages, montrant l'importance de ce matériau dans l'architecture ancienne. La chaux a ainsi joué un rôle clé dans l'évolution des techniques de construction à travers différentes cultures au fil des siècles (McDowell, 1959). Les travaux d'amélioration des sols ont connu des vagues évolutionnaires dans le début de XX<sup>e</sup> siècle, plus exactement en 1904 aux états unis, le ciment a été employé comme un matériau améliorant à Sarasota, Florida en 1915. Il est à signaler qu'en mi-siècle, ces travaux sont avancés d'une façon très remarquable, ou le domaine a connu l'introduction des cendres volantes pour la première fois dans les années 1950. On note que l'utilisation de ce produit révolutionnaire durant cette période a été largement considérée à cause de sa fiabilité et sa bonne performance dans l'augmentation des caractéristiques de résistance des sols (Makusa, 2012).

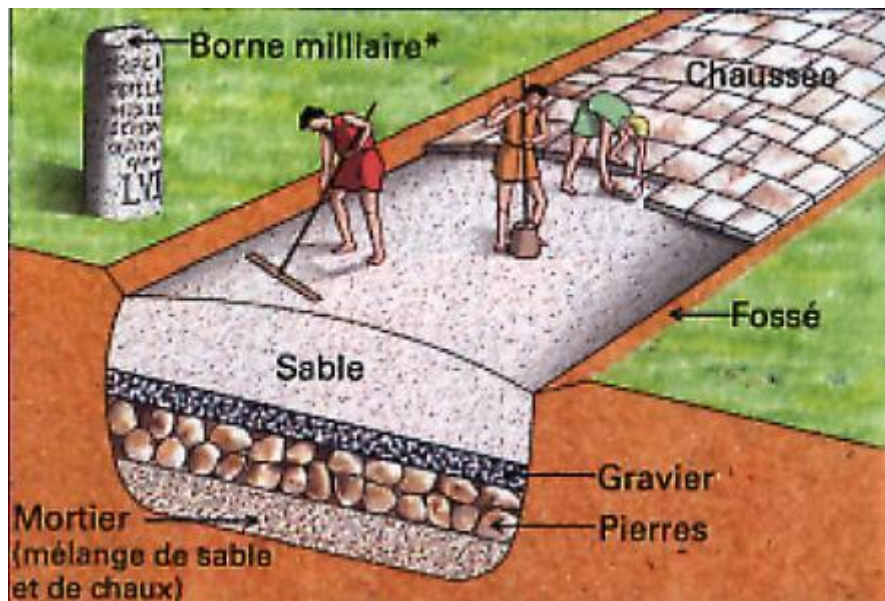


Figure 1.15 : Utilisation de la chaux dans les travaux de stabilisation de couche de base des voies par les romains. (Artisanat)

### 1.5.1 Effet des cendres volantes

La cendre volante est un matériau industriel qui résulte de tous les types d'industries basé sur les combustions. L'amélioration des sols à l'aide de cendres volantes a commencé à se développer dans les années 1960 et 1970. Les études initiales ont porté sur son potentiel en tant que matériau de remplissage léger et sur sa capacité à améliorer les caractéristiques mécaniques des sols médiocres. Selon (Sherwood, 1993), les cendres volantes ont été très utiles dans la diminution de la plasticité et du potentiel de gonflement des sols argileux. Cette première étude a posé les fondations d'une étude plus approfondie sur le rôle positif des cendres volantes dans l'amélioration de la résistance et la stabilité du sol. Récemment, (Şenol, 2012) a constaté que les cendres volantes étaient un matériau pertinent qui devrait être utilisé dans l'amélioration de la résistance au cisaillement des sols pour une utilisation possible dans différentes applications géotechniques. En outre, (Keramatikerman et al., 2017) ont montré que l'augmentation de la teneur en cendres volantes de FA=0% à FA=6% a conduit à une augmentation pivotante de la résistance au cisaillement des sols à gros grains. De plus, (Keramatikerman et al., 2018) ont rapporté que les cendres volantes jouaient un rôle important dans l'augmentation de la résistance au cisaillement non drainée des sols à gros grains, où ils ont indiqué que la résistance à la liquéfaction augmentait sensiblement avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes de FA=4% à 6% pour les mélanges sable-cendres volantes testés (Figure 1.16).

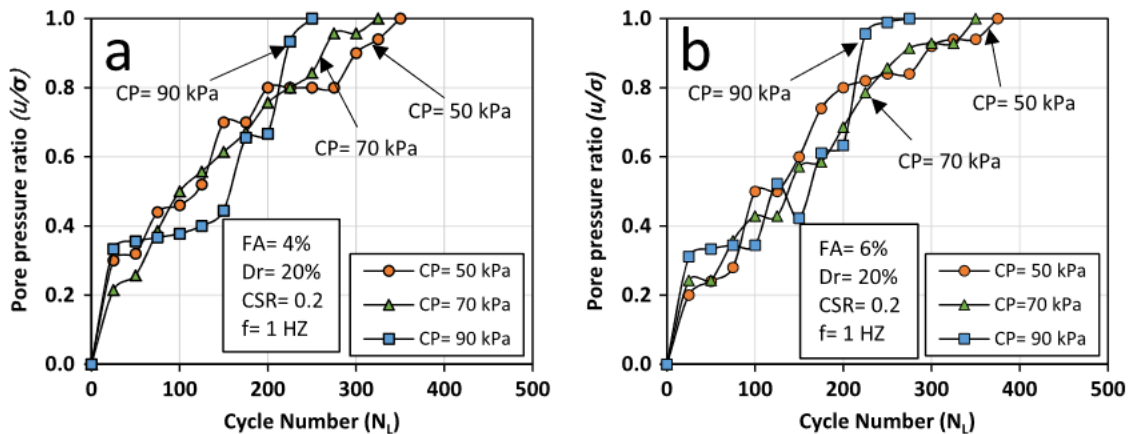


Figure 1.16 : Evolution de la pression interstitielle en fonction du nombre de cycle à la liquéfaction pour les mélanges sable-cendres volantes  
 a- FA=4%, b- FA=6%. (Keramatikerman et al., 2017)

Dans le même contexte, (Kolay et al., 2019) ont rapporté que les cendres volantes avaient de multiples effets sur le comportement du sable, ou ils ont trouvé que l'ajout de 10% de cendres volantes à du sable propre induisait une légère diminution de la résistance à la liquéfaction, au-delà de FA=10%, la résistance à la liquéfaction s'est nettement améliorée jusqu'à FA=25%. Une série d'essais de compression non confinée a été menée par (Simatupang et al., 2020) qui a mis en évidence le fait que l'augmentation de la teneur en cendres volantes à la fois dans le sable naturel et dans le sable propre réduit leur compressibilité de manière significative.

(Azaiez et al., 2021a) ont effectué une série d'essais de compactage et de cisaillement direct sur différentes classes de sable de granulométrie distincte, mélangées avec des cendres volantes. Ils ont constaté que les cendres volantes avaient un effet remarquable sur les caractéristiques de compactage et sur la réponse mécanique des mélanges sable-cendres volantes. En outre, (Azaiez et al., 2021b) ont élucidé une corrélation entre l'angle de frottement et les pourcentages de cendres volantes grâce à une série d'essais de cisaillement direct effectués sur du sable dense mélangé à des cendres volantes, dans le but de l'utiliser comme un matériau de construction pour la composition des couches de remblai et de fondation de l'infrastructure des routes. Ils ont constaté que les cendres volantes avaient une influence positive sur l'angle de frottement des sols testés, plus précisément, l'angle de frottement maximal " $\phi_p$ " (Figure 1.16), l'angle de dilatance maximal " $\psi_{max}$ " et l'excès de l'angle de frottement " $\phi_{ex}$ " qui augmentaient avec l'incorporation des portions des cendres volantes.

Les résultats présentés sur l'effet des cendres volantes sur le comportement des sols sableux soulignent également l'importance de ce matériau et son utilité bénéfique sur le comportement mécanique des sables. Cela peut être pris dans le but de valoriser ce matériau et l'incorporer dans les travaux routiers (Figure 1.17) et ceux des terrassements de bâtiments.

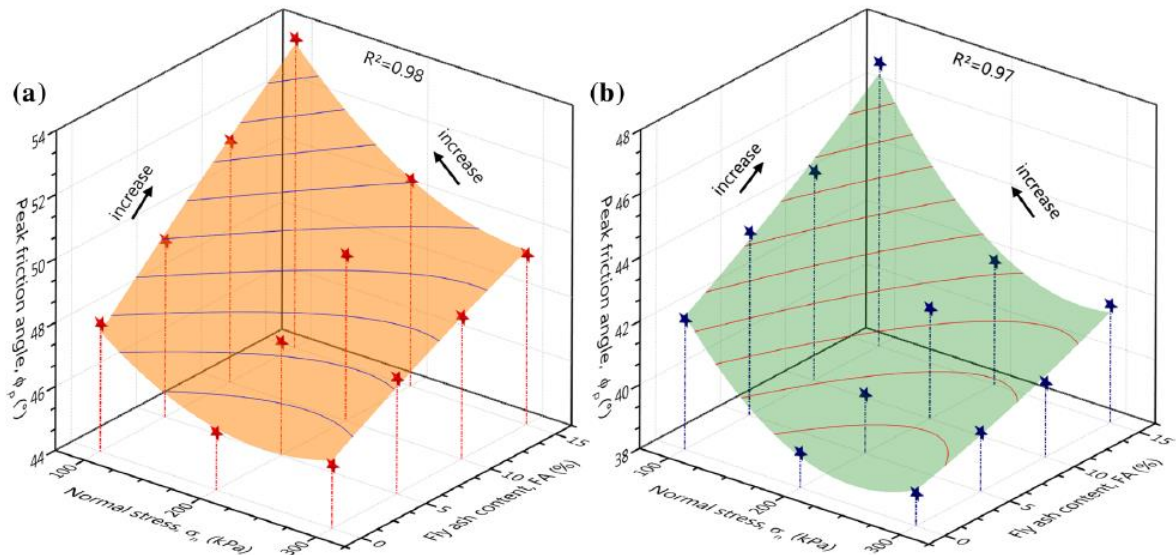


Figure 1.17: Evolution de l'angle de frottement maximal en fonction de la contrainte normale et de la teneur en cendres volantes des sols testés

(a)- $D_{max} = 4,00$  mm, (b)-  $D_{max} = 0,63$  mm (Azaiez et al., 2021b)

(Noaman et al., 2022) ont noté que les cendres volantes améliorent la résistance au cisaillement par plusieurs mécanismes : optimisation Du réarrangement des particules, réactions pouzzolaniques et développement de composés cimentaires. Ils ont souligné que la nature non biodégradable des additifs de cendres volantes garantit que les améliorations de résistance sont permanentes, ce qui en fait une excellente solution de stabilisation à long terme. (Yazıcı & Unsever, 2024) ont étudié l'effet des cendres volantes (5-25% ) avec du ciment (3%) comme activateur sur du sable mal gradué. Leurs expériences de cisaillement direct, réalisées à des densités relatives de 30% et 80%, ont montré des améliorations marquées des paramètres de résistance au cisaillement. Il ont également constaté que des quantités plus élevées de cendres volantes et des temps de cure plus longs conduisaient à une résistance accrue, avec les améliorations les plus significatives observées après 28 jours de cure.



Figure 1.18 : Stabilisation des couches de base en remblai routier par cendres volantes  
(Beeghly, 2003)

### 1.5.2 Effet de la chaux

Le calcaire est décomposé à des températures élevées pour former de la chaux (Chittoori, 2008). Il en résulte trois formes de chaux : la chaux vive (oxyde de calcium- $\text{CaO}$ ), la chaux hydratée (hydroxyde de calcium- $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ) et la boue de chaux hydratée. Les trois types de chaux sont couramment utilisés pour traiter les sols (Firoozi et al., 2017). Cette dernière forme de chaux apparaît comme technique adéquate pour stabiliser les sols. L'incorporation de la chaux dans la structure des sols induit une augmentation de la résistance au cisaillement due à la capacité d'échange cationique plutôt que l'effet cimentaire dû à la réaction pouzzolanique (Sherwood, 1993). Des études récentes indiquent que les sols traités à la chaux sont caractérisés par une amélioration significative de la résistance à la compression non confinée. Une étude de (Manzoor & Yousuf, 2020) a rapporté que les sols réactifs traités à la chaux atteignaient des valeurs de contrainte non confinée supérieures à 345 kPa, tandis que les sols propres présentaient des valeurs inférieures à cette valeur, accompagnés par des changements

remarquables en termes de plasticité et de potentiel de gonflement. Des recherches ont montré qu'un temps de cure plus important entraînait un développement plus important de la résistance des sols traités à la chaux. (Bhuvaneshwari et al., 2014) ont rapporté que plus de 50 % du développement de la résistance se produit au cours des trois premiers jours de cure lors d'une étude comprenant une série d'essais de compression non confinée sur des sables traités à la chaux aux différents pourcentages et différents temps de cure (Figure 1.18).

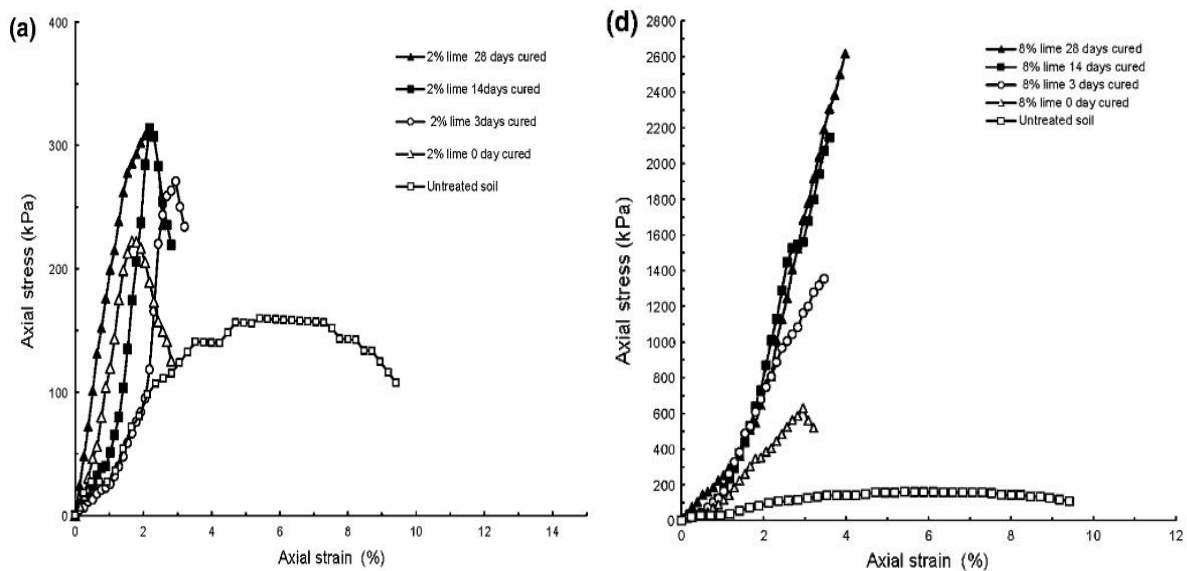


Figure 1.19 : Evolution de la contrainte non confinée en fonction de déformation pour différents temps de cure (Bhuvaneshwari et al., 2014)

(a) 2% chaux, (d) 8% chaux

### 1.5.3 Effet du ciment

La stabilisation au ciment est une technique largement utilisée en géotechnique pour améliorer les propriétés mécaniques des sols, en particulier leur résistance au cisaillement. Les premiers efforts d'utilisation de ciment dans les travaux de stabilisation ont été exécutés à Sarasota, Floride en 1915 (Firoozi et al., 2017). (S. Wang et al., 2022) ont étudié l'effet de l'ajout de ciment sur la résistance à la compression non confinée des différents types de sols (argiles, limons argileux ainsi que sables fins). Leurs résultats ont montré que l'incorporation du ciment par des portions de 25% a induit une amélioration de la résistance à la compression non confinée de 1.2 MPa à 5.4 MPa pour les sables fins, de 1.2 MPa à 2.5 MPa pour les limons et 2.3 MPa à 3 MPa pour les argiles (Figure 1.19). Il a été trouvé que le mélange contenant une proportion plus élevée de sable fin conduirait à une excellente amélioration de la résistance à la

compression non confinée. Plus le sol mélangé est limoneux, plus la tendance baissière est obtenue.

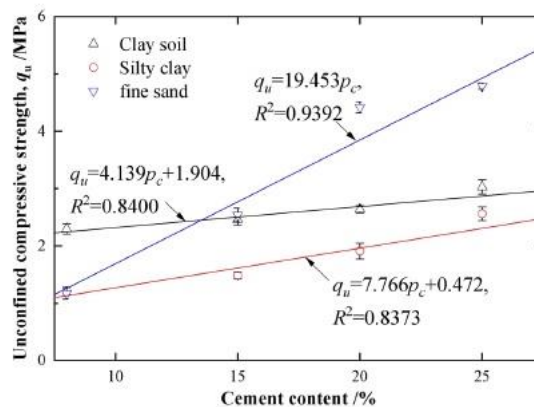


Figure 1.20 : Résistance à la compression non confinée en fonction de la teneur en ciment pour trois types de sol (H. Wang et al., 2022).

## 1.6. Effet d'autres paramètres

### 1.6.1. Effet de densité relative initiale

(Vaid et al., 1990) ont étudié le comportement d'échantillons de sable de granulométrie différente reconstitués à une variété de densités relatives initiales allant de 22% à 73% à travers une série d'essais triaxiaux sous une pression de confinement initiale de  $\sigma_c = 200\text{kPa}$ . Les résultats trouvés ont montré l'effet prononcé de la densité relative sur le comportement du sable. Ils ont constaté que l'augmentation de la densité relative augmente la résistance cyclique pour tous les échantillons testés. De plus, ils ont confirmé que pour des densités relatives faibles, le sable uniforme a montré une résistance cyclique plus faible que le sable bien gradue et que la tendance inverse a été observée au-delà de la densité relative  $Dr=65\%$ . Il est à signaler que le sable uniforme a montré un comportement contractif à des densités relatives inférieures à 45%. Récemment, (Belkhatir, Schanz, et al., 2014) ont clarifié l'effet de la densité relative initiale sur le comportement des sables limoneux à travers une série d'essais triaxiaux monotones utilisant un mélange sable-limon reconstitué avec différentes densités initiales (20%, 53% et 91%). Les résultats obtenus ont montré un effet significatif de la densité sur la résistance maximale et la pression interstitielle des mélanges. On note que les auteurs ont clairement prouvé que l'augmentation de la densité relative a induit une nette amélioration des performances mécaniques des mélanges soumis à un chargement triaxiale en condition non-drainée.

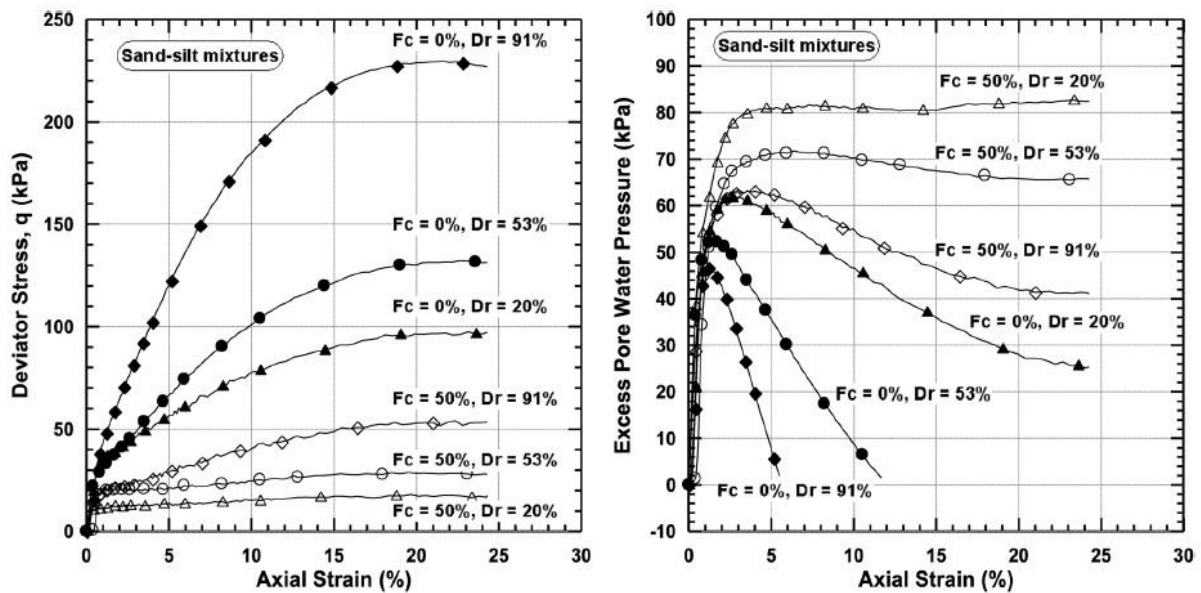


Figure 1.21: Réponse mécanique des échantillons de mélanges sable-limon soumis à un chargement triaxial en condition drainée (Belkhatir, Schanz, et al., 2014).

### 1.6.2. Effet de teneur en fines

Différentes études ont été réalisées dans le but d'étudier l'influence des fines peu-plastiques et plastiques sur le comportement des mélanges sable-fines. D'après la littérature, le comportement des mélanges n'est pas gouverné uniquement par les particules de sable mais aussi par les fines situées entre elles. (Amini & Qi, 2000; Chang et al., 1982) ont trouvé que l'ajout des portions de fines aux sables, entraîne une augmentation de la résistance à la liquéfaction du mélange sable-limon. Cependant, d'autres résultats ont démontré que la résistance à la liquéfaction diminue avec l'ajout de fines (Belkhatir et al., 2010; Throncoso & Verdugo, 1985). Autres sources tels que (Koester, 1994; Polito, 1999) ont indiqué que la résistance au cisaillement non drainée diminue avec l'ajout des fines jusqu'à un seuil ( $F_{\text{threshold}}$ ), puis augmente au-delà de ce seuil. Récemment, (Cherif Taiba et al., 2018) ont étudié l'effet de l'incorporation du limon avec le sable propre sur la résistance au cisaillement et le rapport de contrainte d'instabilité des échantillons testés ayant une teneur en fines allant de 0 à 30 % et une densité relative initiale de 52 %. Les résultats obtenus ont prouvé que l'augmentation de la teneur en fines de 0 à 30 % des mélanges reconstitués a un effet significatif sur le comportement du mélange en termes de résistance au cisaillement maximale. En effet, les auteurs ont clairement indiqué que l'augmentation de la teneur en fines induit une diminution du rapport de contrainte d'instabilité, du rapport d'état d'équilibre et de la résistance maximale au cisaillement augmentant ainsi, la susceptibilité à la liquéfaction des mélanges de sable de

Fontainebleau-limon pour les trois pressions de confinement appliquées (100, 200 et 300 kPa) (Figure 1.22).

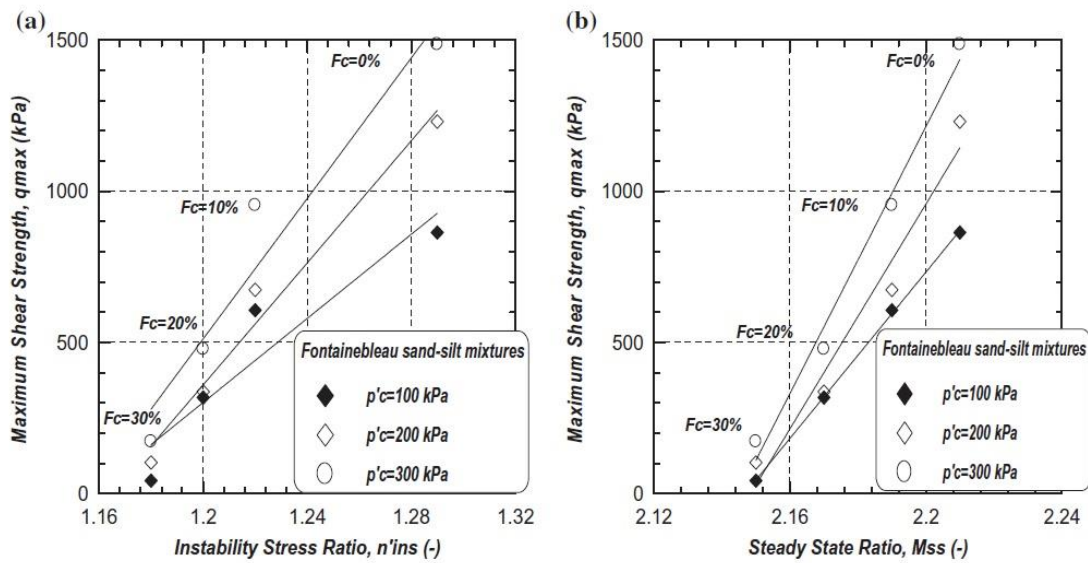


Figure 1.22 : Evolution de résistance au cisaillement maximale en fonction du rapport de contrainte d'instabilité et de rapport d'état d'équilibre (Cherif Taiba et al., 2018).

(Mahmoudi et al., 2018) ont étudié l'effet de la teneur en fines peu plastiques sur la résistance au cisaillement non drainée des mélanges sable-limon surconsolidés, L'étude comprenait une série d'essais triaxiaux monotones non drainés sur des échantillons de sable avec une teneur en fines allant de 0% à 40% sous deux pressions de confinement différentes ( $P'c=100$  et  $200$  kPa). Les résultats trouvés par les auteurs ont montré que l'augmentation de la teneur en fines induit une réduction de la résistance au cisaillement non drainée (résistance à la liquéfaction statique) et la résistance au cisaillement maximale (Figure 1.23).



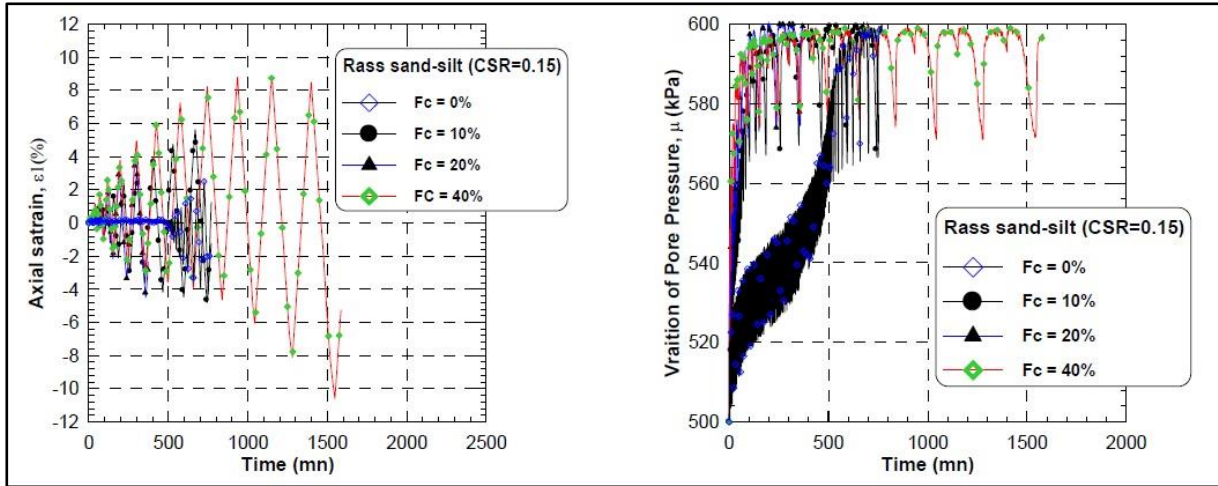


Figure 1.24: Influence de teneur en fines sur le comportement cyclique des mélanges sable de Rass-limon (Arab & Shahrour, 2010)

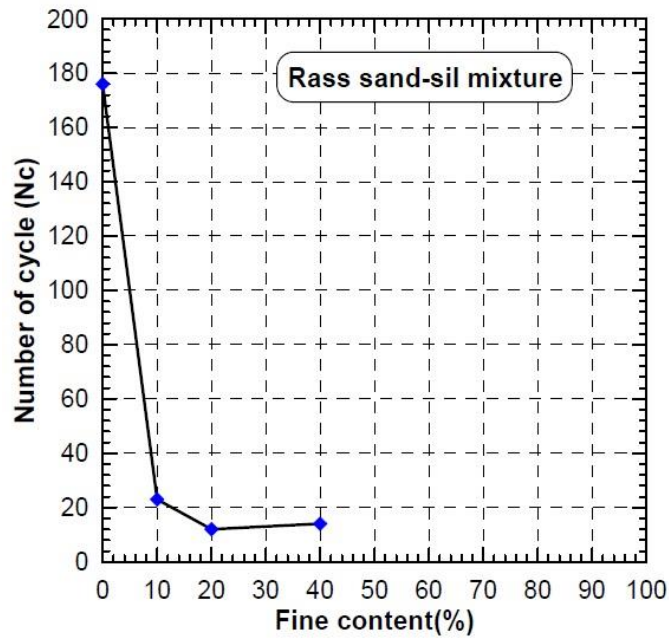


Figure 1.25 : Variation de nombre de cycle à la liquéfaction en fonction de la teneur en fines. (Arab & Belkhatir, 2012)

### 1.6.3. Effet des méthodes de reconstitution des échantillons

La méthode de reconstitution représente un facteur très déterminant dans le contrôle de la réponse mécanique d'un échantillon de sol lors d'un chargement. On note que plusieurs chercheurs ont mis l'accent sur son effet dans leurs études. (Youcef Mahmoudi et al., 2020) ont effectué une série d'essais triaxiaux monotones non drainés sur des échantillons de sable de Chlef saturé reconstitués par deux techniques : pluviation à sec (DFP) et damage humide (WD). En effet, les auteurs ont examiné l'influence des méthodes de dépôt des échantillons qui ont montré que la présence de fines et la méthode de préparation de l'échantillon affectaient de manière significative la réponse mécanique des mélanges testes, en particulier sa résistance à la liquéfaction. De plus, ils ont constaté que la résistance au cisaillement maximale pour les échantillons reconstitués par la méthode de pluviation à sec a été très élevée en comparaison avec celle des échantillons reconstitués par la méthode de déposition humide pour toutes les densités relatives initiales testées (Figure 1.25).

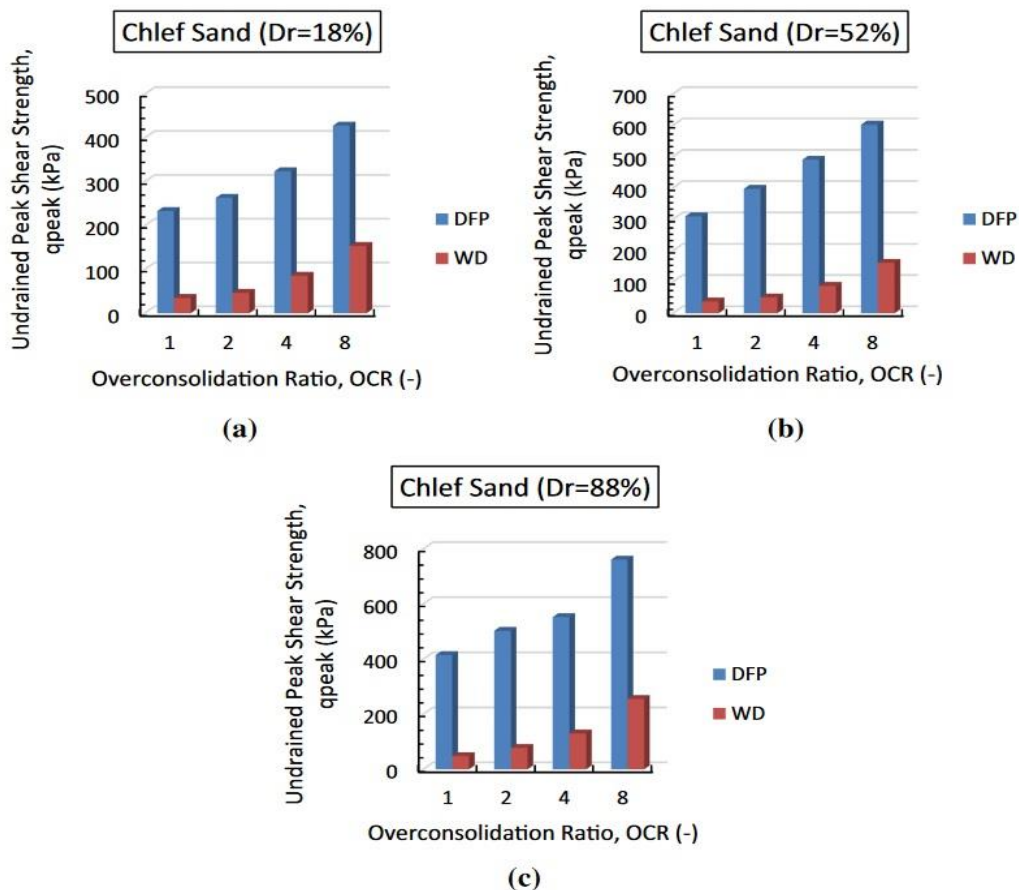


Figure 1.26 : Evolution de la résistance au cisaillement non drainée en fonction du rapport de surconsolidation pour les différentes méthodes de reconstitution et densités relatives initiales (Youcef Mahmoudi et al., 2020).

### **1.7. Conclusion**

Les caractéristiques des particules de sols qui peuvent influencer le comportement mécanique des sols sont généralement classées en deux catégories: celles de la taille et de la forme des particules. La compréhension de l'effet de chacun de ces deux paramètres est parmi les conditions indispensables qui doivent être prises sérieusement lors d'une étude géotechnique approfondie.

Les paramètres granulométriques tels que les diamètres : efficace et moyen, le coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure, ainsi que les paramètres de forme comme la sphéricité, l'angularité, la régularité globale ont un impact très important sur la réponse mécanique et la compressibilité des sols sableux. La littérature publiée confirme la dépendance du comportement mécanique et hydraulique de ces paramètres.

Le traitement des sols est une technique basée sur l'ajout des produits réactifs chimiquement au sol afin d'améliorer ces propriétés mécaniques. Dans ce chapitre, des investigations expérimentales ont été abordé en vue d'appréhender les effets de la chaux, cendres volantes et ciment afin de valoriser l'ajout de ces matériaux aux différents types de sols et par conséquent montrer les impacts positifs de l'exploitation de cette pratique dans le domaine géotechnique.

Le chapitre suivant présente une description des protocoles expérimentaux et des matériaux étudiés dans cette étude.

## **Chapitre 2**

### **Protocoles expérimentaux et matériaux utilisés**

*Ce chapitre comporte une présentation des protocoles expérimentaux et des matériaux utilisés dans la présente étude. Une identification préliminaire des paramètres physico-chimiques du sable de dune, sable de Chlef, sable de carrière et cendres volantes a été exécutée avant d'entamer l'exploration des essais mécaniques nécessaires pour évaluer la performance de ces matériaux vis-à-vis des contraintes de cisaillement appliquées et leur susceptibilité aux déformations verticales tenant compte de l'influence de certaines conditions initiales relatives à la morphologie des grains et le traitement des matériaux testés par les cendres volantes.*

## 2.1 Introduction

La caractérisation géotechnique d'un sol comme étant un matériau de construction ou support pour les ouvrages de Génie Civil, Travaux Publics et Hydraulique nécessite la réalisation d'une campagne de grande envergure sur l'étude de son comportement mécanique et hydraulique. En effet, cette dernière peut être obtenue seulement par la réalisation des programmes expérimentaux afin de tester tous les paramètres qui influent la réponse des matériaux vis-à-vis l'application des différents types de charges extérieures. On note que ces investigations sont effectivement composées par des séries d'essais sur site et/ou en laboratoire.

La présente étude a été réalisée au sein de Laboratoire Sciences des Matériaux et Environnement (LSME) de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef et le Laboratoire du plateau technique d'analyse physico-chimique, Laghouat. Elle comporte les résultats des différents types d'essais préliminaires, notamment, ceux relatifs à la caractérisation physique tels que: Analyse granulométrique, essais de détermination des indices des vides extrêmes ( $e_{\max}$  et  $e_{\min}$ ), essais de détermination de la densité du constituant des grains solides. De plus, des essais mécaniques tels que ceux réalisés à la boîte de cisaillement de Casagrande et à l'œdomètre sont exécutés dans le cadre de cette étude.

Les résultats obtenus dans le cadre de la réalisation de ces protocoles expérimentaux sont ensuite exploités, interprétés et présentés afin d'éclaircir l'effet de paramètres initiaux de taille et de forme des grains ainsi que l'effet de l'ajout progressif des fractions de cendres volantes sur la réponse mécanique en termes de résistance au cisaillement et compressibilité des matériaux sableux testés.

## 2.2 Dispositif expérimentale utilisés

### 2.2.1 Essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande

La boîte de cisaillement utilisée dans cette étude est composée de deux demi-boîtes carrées de 60mm de côté intérieur et de 30mm de profondeur. Il est à signaler ce modèle a été utilisé par Casagrande en 1932 (Robitaille & Tremblay, 1997). Au cours de l'essai l'échantillon de sol intact ou remanié (reconstitué) est placé dans une boîte composée de deux demi-boîtes selon la technique de reconstitution choisie, puis, appliquer une charge verticale ( $N$ ) qui représente la contrainte normale ( $\sigma_n$ ). À l'aide d'un moteur, une force horizontale de cisaillement  $T$  est exercée sur la demi-boîte inférieure jusqu'à la fin de l'essai. Au cours de l'essai, il est

nécessaire de noter la variation du déplacement vertical,  $\Delta V$  (mm), le déplacement horizontal  $\Delta H$  (mm) et la force de cisaillement,  $T$  (kN).

Une campagne d'essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande a été réalisée selon la norme française (NF-P94-071-1, 1994) sur des échantillons de mélanges sable-cendres volantes reconstitués en laboratoire suivant une teneur de  $FA = 0\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$  et  $15\%$  pour évaluer leur comportement mécanique vis-à-vis des contraintes de cisaillement appliquées et par conséquent élaborer des corrélations entre les propriétés mécaniques et les différents paramètres granulaires tels que les caractéristiques de taille et de forme des sables traités..

L'essai commence par l'introduction du matériau dans la boîte de cisaillement de Casagrande après avoir déterminé sa masse en utilisant l'équation 2.1. Ceci s'effectue à travers deux différentes techniques de préparation d'échantillons de dimension de  $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 25\text{mm}$ . On note que la pluviation sec a été utilisée pour l'état lâche ( $D_r = 25 \pm 3\%$ ), et le damage sec pour l'état dense ( $D_r = 87 \pm 3\%$ ). La littérature publiée a rapporté que la méthode de reconstitution des échantillons a été toujours à l'origine d'une influence considérable sur la réponse mécanique des sables (Mahmoudi et al., 2016). L'échantillon de sol reconstitué est soumis ensuite à une contrainte normale ( $\sigma_n$ ) à travers couvercle métallique ayant pour but de transmettre la charge verticale d'une façon uniforme sur la surface supérieure de l'échantillon par l'application d'une force verticale (N). Lorsque la consolidation se stabilise, on entame l'étape de cisaillement en appliquant une force tangentielle (T) qui se traduit par un déplacement horizontal contrôlé par un moteur électrique à une vitesse de cisaillement constante de  $1\text{mm/min}$ .

Au cours de l'essai, les valeurs du déplacement vertical ( $\Delta V$ ), du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) et de contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) sont enregistrées à l'aide d'un system d'acquisition de données assisté par ordinateur (Voir la Figure 2.1).

$$m_s = (V_T \times \gamma_s) / [1 + e_{\max} \times (1 - D_r) + D_r \times e_{\min}] \quad (2.1)$$

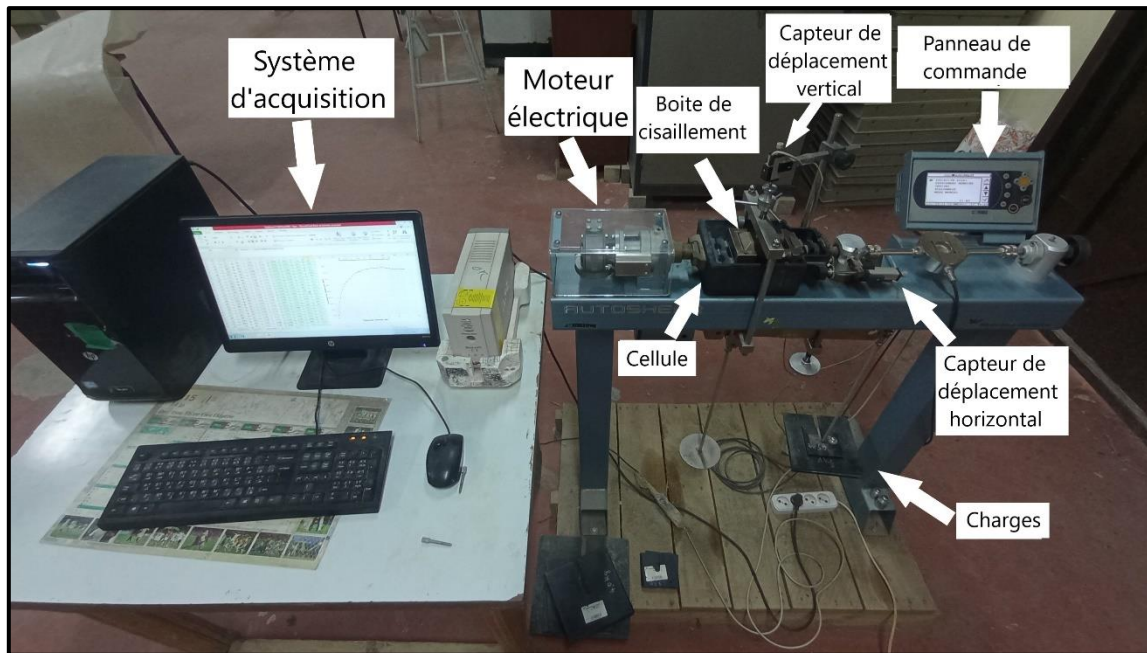


Figure 2.1 : Dispositif expérimental utilisé.

Après avoir enregistré les données expérimentales, les droites de coulomb et par conséquent, les enveloppes de rupture du sol testé sont tracées pour les différentes valeurs de la contrainte normale ( $\sigma_n = 100, 200$  et  $300\text{kPa}$ ). Les tracés des lignes de Coulomb (Enveloppes de rupture) permettent de déterminer les valeurs des angles de frottement et de l'enchevêtrement des grains.

### 2.2.2 Essai de compression à l'oedomètre

L'essai œdométrique permet d'évaluer certaines caractéristiques permettant de classer un sol vis-à-vis de sa compressibilité et par conséquent déterminer les tassements probables. Il consiste à placer un échantillon de sol saturé entre deux pierres poreuses dans une cellule oedometrique ayant une paroi rigide empêchant toute déformation latérale et le mettre sous chargement par paliers progressifs. Les valeurs de la variation de l'épaisseur de l'échantillon en fonction de la contrainte de consolidation sont mesurées pour chaque palier de chargement. On note que l'appareil utilisé dans cette étude est un modèle inventé par Terzaghi selon la norme (NF-P94-090-1, 1997) ( Figure 2.2).

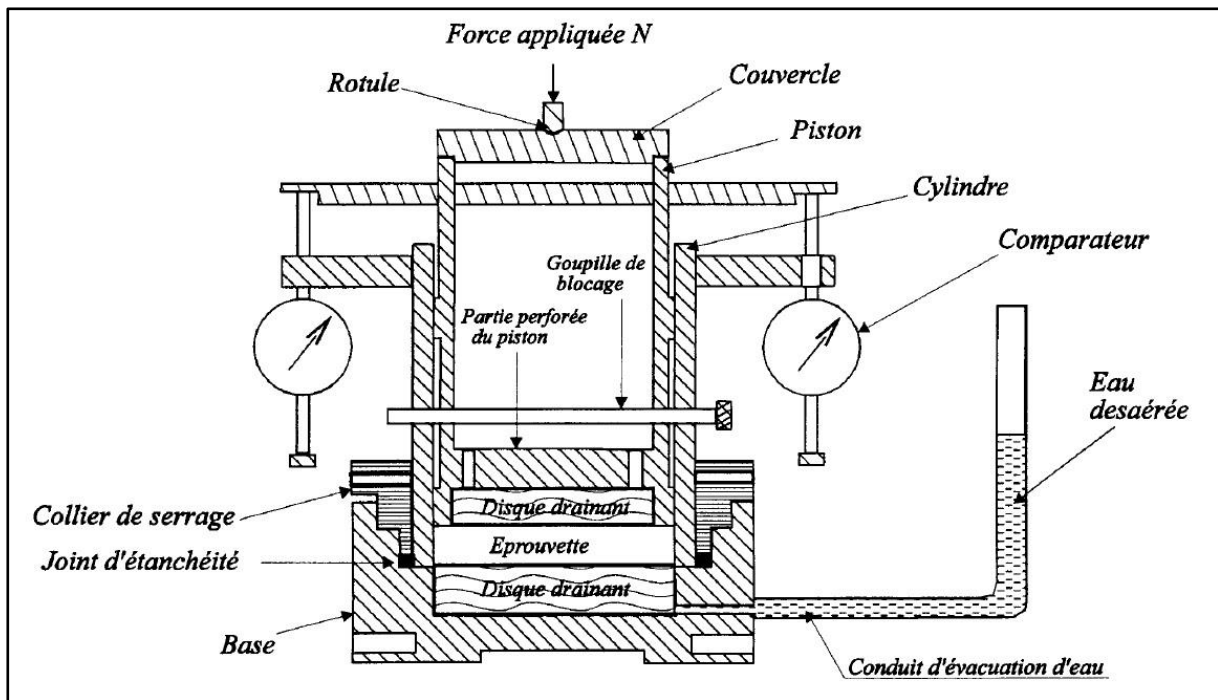


Figure 2.2 : Cellule œdométrique type Terzaghi (NF-P94-090-1, 1997)

L'essai commence par la mise en place des échantillons dans la cellule œdométrique, en utilisant deux méthodes de déposition : le damage à sec pour l'état dense ( $Dr=87\pm 3\%$ ) et la pluviation à sec à l'entonnoir pour l'état lâche ( $Dr=25\pm 3\%$ ), ensuite, on porte le sol à saturation avec de l'eau distillée pendant 24 heures sans chargement (à 0 kPa). Après avoir saturé les échantillons, la phase de chargement commence avec un poids initial de  $m=0.5\text{kg}$  équivalant à  $\sigma' = 12.74\text{kPa}$ , cette charge est doublée progressivement tous les 24 heures jusqu'à atteindre une masse de  $m=32\text{kg}$  équivalente à une pression verticale ( $\sigma' = 815.8\text{kPa}$ ). La variation de l'épaisseur de l'échantillon est enregistrée au cours du chargement de façon manuelle à l'aide d'un comparateur à aiguille ou bien automatiquement à l'aide d'un système d'acquisition assisté par ordinateur.

Les résultats obtenus sont ensuite utilisés pour tracer la courbe de compressibilité  $e=f(\sigma')$  à l'aide de l'équation 2.2, afin de déterminer les différents indices de compressibilité graphiquement pour chaque échantillon en utilisant l'équation 2.3.

$$e_n = e_i - ((1+e_i) / H_i) \cdot \Delta H_n \quad (2.2)$$

$$Cc = -\Delta e / \Delta \log(\sigma) \quad (2.3)$$

## 2.3 Matériaux utilisés

### 2.3.1 Description des propriétés physiques

La présente étude a été effectuée sur 6 différents types de sable traité avec la poudre de cendres volantes: le 1<sup>er</sup> type est celui de Chlef qui est considéré comme un sable mal gradué selon le système de classification unifié des sols (USCS) et caractérisé par une forme semi-arrondie des grains. Ce sable a été prélevé auprès des zones de dépôt de sol le long des berges d'Oued de Chlef dans la région d'Oued Fodda, située à environ 20 km à l'est du centre de Chlef. Il est nommé selon sa granulométrie par le symbole 'CS' dont les tailles extrêmes variant de  $D_{\max}=2\text{mm}$  à  $D_{\min}=0.08\text{mm}$ . De plus, trois autres sous-classes 'CS-1', 'CS-2' et 'CS-3' correspondants aux sables dont les diamètres minimaux sont ( $D_{\min}=0.08\text{mm}$ ,  $D_{\min}=0.63\text{mm}$  et  $D_{\min}=2\text{mm}$ ) en conservant le même diamètre maximal ( $D_{\max}=4\text{mm}$ ). Le 5<sup>ème</sup> type est le sable de dune (DS), caractérisé par sa forme arrondie, et sa taille des grains comprise entre  $D_{\max}=0.63\text{mm}$  et  $D_{\min}=0.08\text{mm}$ , et enfin, le 6<sup>ème</sup> type est appelé : sable de carrière (QS) caractérisé par une forme angulaire et une taille extrême des grains comprise entre  $D_{\max}=2\text{mm}$  et  $D_{\min}=0.08\text{mm}$ .

Figure 2.3 présente les matériaux utilisés dans la présente étude et leurs vues microscopiques sont montrées dans la Figure 2.4. Les dits sables ont été traité par l'ajout des différentes fractions de cendres volantes (FA=0%, 5%, 10% et 15%). Ces cendres volantes ont été obtenues au niveau de la cimenterie de Chlef. On note que cette poudre appartient de la classe C « caractérisé par un pourcentage d'oxyde de calcium supérieure à 20% » selon (ASTM-C618-19, 2019). Elle est caractérisée par sa finesse dont les diamètres extrêmes sont de ( $D_{\max}=0.08\text{mm}$  et  $0.001\text{mm}$ ) et que sa composition chimique est présentée dans le Tableau 2.6.

Les matériaux utilisés dans cette étude ont été lavés en laboratoire, puis séchés en utilisant une étuve réglée à une température de  $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Une campagne d'essais préliminaires a été réalisée afin de déterminer les paramètres physiques de ces matériaux:

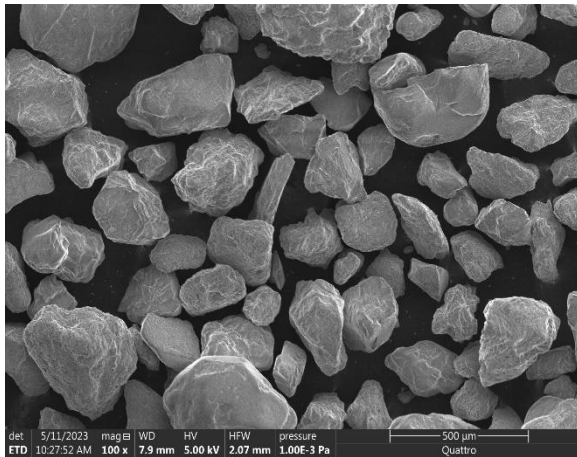
- Figure 2.5 présente les résultats l'analyse granulométrique par tamisage suivant la norme (NF-P-94-056, 1996) pour les classes granulaires dérivées du Sable de Chlef (CS, CS-1, CS-2 et CS-3), le sable de carrière (QS) et le sable de dune (DS), tandis que la granulométrie de la poudre de cendres volantes a été établie par un essai de sédimentation suivant la norme (NF-P-94-057, 1992).
- Le poids volumique du constituant solide fait partie des paramètres indispensable des matériaux granulaires, dans cette étude. Leurs valeurs ont été déterminées en appliquant

la norme (NF-P-94-054, 1991). Les résultats des essais préliminaires sur les matériaux testés sont présentés dans les Tableaux 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 et 2.6.

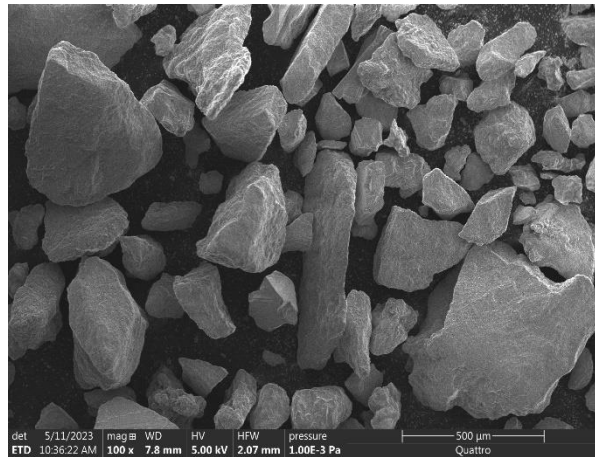
Figure 2.6 montre la variation des indices des vides extrêmes ( $e_{\max}$  et  $e_{\min}$ ) en fonction de pourcentage de cendres volantes (FA) et que les valeurs sont obtenues d'après les normes (NF-P-94-059, 2000). Il est remarqué que l'augmentation des cendres volantes induit une diminution des indices des vides extrêmes correspondants aux densités relatives initiales choisies ( $Dr=87\pm 3\%$ ) et ( $Dr=25\pm 3\%$ ). Cette diminution peut être attribuée au rôle des particules de cendres volantes jouant le rôle de remplissage des vides entre les grains de sable. (Belkhatir, Arab, et al., 2014; Bruand et al., 2005).



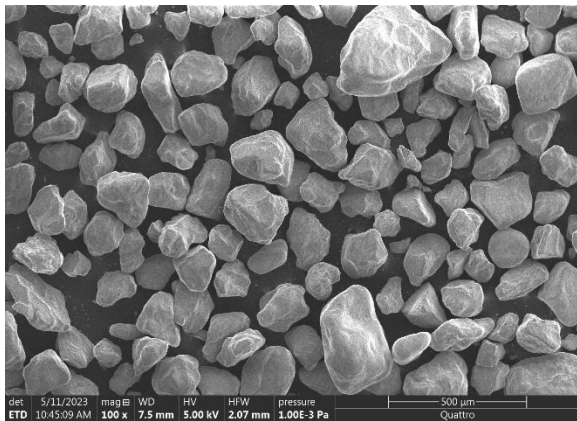
Figure 2.3 : Différents matériaux utilisés



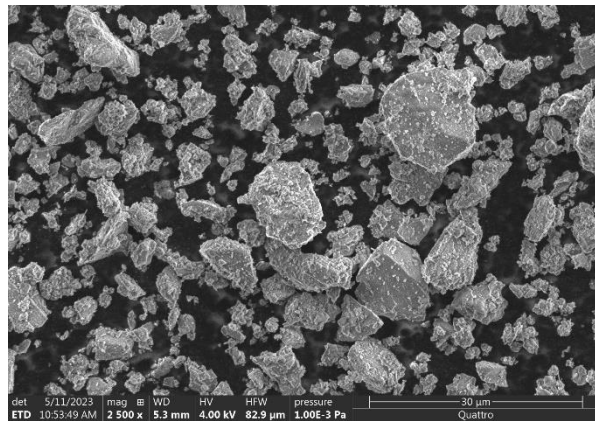
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2.4 : Vues microscopiques des matériaux utilisés

(a) sable de Chlef, (b) sable de carrière, (c) sable de dune et (d) cendres volantes.

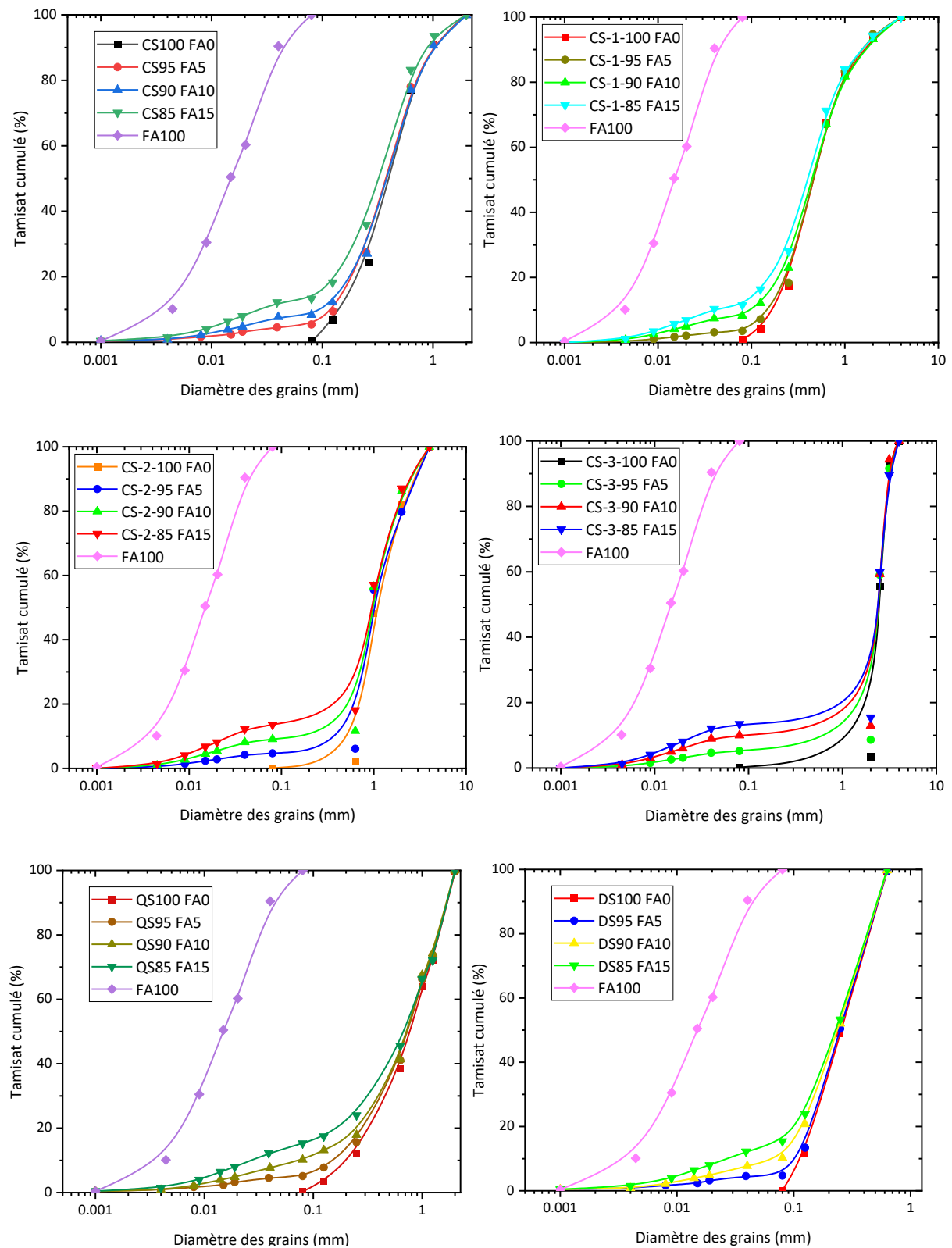


Figure 2.5 courbes granulométriques des matériaux testés

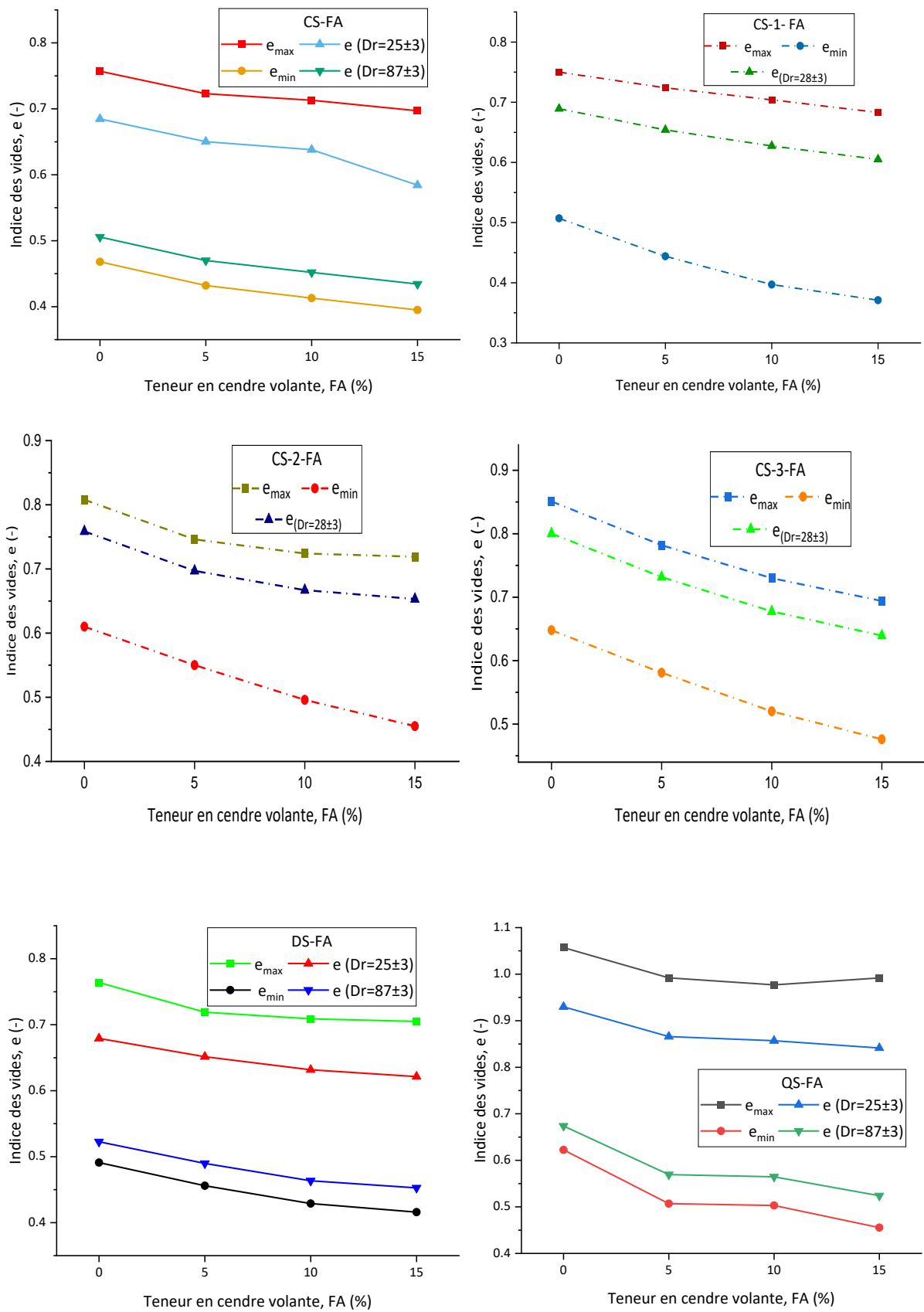


Figure 2.6 : variation des indices des vides en fonction de teneur en cendres volantes des matériaux testés.

Tableau 2.1 : Propriétés physiques des mélange sable de Chlef (CS) et de cendre volante.

Propriété physique	CS100 FA0	CS95 FA5	CS90 FA10	CS85 FA15	FA100
	FA=0%	FA=5%	FA=10%	FA=15%	FA=100%
<b>G<sub>s</sub></b>	2.640	2.662	2.684	2.710	3.08
<b>D<sub>10</sub> (mm)</b>	0.145	0.13	0.09	0.029	0.0045
<b>D<sub>30</sub> (mm)</b>	0.285	0.268	0.265	0.21	0.009
<b>D<sub>50</sub> (mm)</b>	0.428	0.419	0.417	0.365	0.015
<b>D<sub>60</sub> (mm)</b>	0.499	0.494	0.493	0.445	0.02
<b>C<sub>u</sub></b>	3.441	3.8	5.478	15.345	4.444
<b>C<sub>c</sub></b>	1.123	1.118	1.583	3.417	0.9
<b>e<sub>max</sub></b>	0.757	0.723	0.713	0.697	2.114
<b>e<sub>min</sub></b>	0.468	0.432	0.413	0.395	0.914

Tableau 2.2 : Propriétés physiques des mélange sable de Chlef (CS-1 "D<sub>min</sub>=0.08mm") et de cendre volante.

Propriété physique	CS-1-100 FA0	CS-1-95 FA5	CS-1-90 FA10	CS-1-85 FA15
	FA=0%	FA=5%	FA=10%	FA=15%
<b>G<sub>s</sub></b>	2,660	2,680	2,700	2,720
<b>D<sub>10</sub> (mm)</b>	0,180	0,157	0,100	0,038
<b>D<sub>30</sub> (mm)</b>	0,345	0,341	0,311	0,267
<b>D<sub>50</sub> (mm)</b>	0,498	0,497	0,483	0,443
<b>D<sub>60</sub> (mm)</b>	0,574	0,575	0,569	0,531
<b>C<sub>u</sub></b>	3,199	3,674	5,674	13,928
<b>C<sub>c</sub></b>	1,158	1,290	1,692	3,530
<b>e<sub>max</sub></b>	0,750	0,724	0,704	0,683
<b>e<sub>min</sub></b>	0,507	0,444	0,397	0,371

Tableau 2.3 : Propriétés physiques des mélange sable de chlef (CS-2 "D<sub>min</sub>=0.63mm") et de cendre volante.

Propriété physique	CS-2-100 FA0	CS-2-95 FA5	CS-2-90 FA10	CS-2-85 FA15
	FA=0%	FA=5%	FA=10%	FA=15%
<b>γ<sub>s</sub></b>	2,670	2,691	2,710	2,730
<b>D<sub>10</sub> (mm)</b>	0,694	0,560	0,276	0,029
<b>D<sub>30</sub> (mm)</b>	0,854	0,808	0,781	0,742
<b>D<sub>50</sub> (mm)</b>	1,055	0,958	0,946	0,932
<b>D<sub>60</sub> (mm)</b>	1,35	1,183	1,118	1,096
<b>C<sub>u</sub></b>	1,945	2,113	4,051	37,487
<b>C<sub>c</sub></b>	0,778	0,958	1,977	17,182
<b>e<sub>max</sub></b>	0,808	0,746	0,724	0,719
<b>e<sub>min</sub></b>	0,610	0,550	0,496	0,455

Tableau 2.4 : Propriétés physiques des mélange sable de chlef (CS-3 "D<sub>min</sub>=2mm") et de cendre volante.

Propriété physique	CS-3-100 FA0	CS-3-95 FA5	CS-3-90 FA10	CS-3-85 FA15
	FA=0%	FA=5%	FA=10%	FA=15%
<b>γ<sub>s</sub></b>	2,680	2,700	2,720	2,740
<b>D<sub>10</sub> (mm)</b>	2,063	1,960	1,500	0,030
<b>D<sub>30</sub> (mm)</b>	2,254	2,211	2,183	2,163
<b>D<sub>50</sub> (mm)</b>	2,446	2,410	2,399	2,387
<b>D<sub>60</sub> (mm)</b>	2,575	2,518	2,512	2,5
<b>C<sub>u</sub></b>	1,248	1,285	1,675	83,333
<b>C<sub>c</sub></b>	0,956	0,991	1,265	62,381
<b>e<sub>max</sub></b>	0,851	0,782	0,730	0,694
<b>e<sub>min</sub></b>	0,648	0,581	0,520	0,476

Tableau 2.5 : Propriétés physiques des mélange sable de dune (DS) et de cendre volante.

Propriété physique	DS100 FA0	DS95 FA5	DS90 FA10	DS85 FA15
	FA=0%	FA=5%	FA=10%	FA=15%
<b>γ<sub>s</sub></b>	2.640	2.662	2.684	2.710
<b>D<sub>10</sub> (mm)</b>	0.118	0.107	0.078	0.028
<b>D<sub>30</sub> (mm)</b>	0.182	0.177	0.159	0.144
<b>D<sub>50</sub> (mm)</b>	0.254	0.248	0.241	0.236
<b>D<sub>60</sub> (mm)</b>	0.296	0.290	0.287	0.289
<b>C<sub>u</sub></b>	2.508	2.710	3.679	10.321
<b>C<sub>c</sub></b>	0.948	1.010	1.129	2.563
<b>e<sub>max</sub></b>	0.764	0.719	0.709	0.705
<b>e<sub>min</sub></b>	0.491	0.456	0.429	0.416

Tableau 2.6: Propriétés physiques des mélange sable de carrière (QS) et de cendre volante.

Propriété physique	QS100 FA0	QS95 FA5	QS90 FA10	QS85 FA15
	FA=0%	FA=5%	FA=10%	FA=15%
<b>γ<sub>s</sub></b>	2.744	2.778	2.838	2.874
<b>D<sub>10</sub> (mm)</b>	0.209	0.157	0.097	0.026
<b>D<sub>30</sub> (mm)</b>	0.485	0.437	0.396	0.338
<b>D<sub>50</sub> (mm)</b>	0.799	0.756	0.734	0.712
<b>D<sub>60</sub> (mm)</b>	0.976	0.936	0.924	0.920
<b>C<sub>u</sub></b>	4.670	5.962	9.526	35.385
<b>C<sub>c</sub></b>	1.153	1.300	1.750	4.776
<b>e<sub>max</sub></b>	1.057	0.992	0.977	0.992
<b>e<sub>min</sub></b>	0.622	0.507	0.503	0.455

Tableau 2.7: Composition chimique de cendre volante.

Composant	Oxyde d'aluminium (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Oxyde de calcium (Cao)	Oxyde de fer (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Oxyde de magnésium (MgO)	Dioxyde de silicium (SiO <sub>2</sub> )	Dioxyde de Titane (TiO <sub>2</sub> )	Perte par calcination( LOI)
Pourcentage (%)	5.13	66.67	3.78	0.47	22.3	0.5	0.5-3

### 2.3.2 Caractéristiques de forme des grains

Les caractéristiques de la forme des particules des mélanges étudiés ont été évaluées à l'aide d'un logiciel et d'un microscope électronique à balayage (SEM "Scanning Electron Microscope"). En effet, (Cho et al., 2006) ont défini le paramètre d'angularité "A" comme une propriété qui est en relation avec le rapport entre le rayon des coins de la particule et le plus grand cercle incluant la particule de sable entière, sensible aux protubérances de la particule (Equation 2.4) comme est illustré à la Figure 2.7.a. (Yang & Luo, 2015) ont proposé de nouvelles définitions des caractéristiques de la forme des particules en termes de (sphéricité "S") qui est présentée dans la Figure 2.7.b et (Equation 2.5) , et le paramètre de (régularité globale "OR") qui est déterminé en utilisant la relation mathématique  $(OR = S + AR + Cx) / 3$ . Où "AR" est le rapport d'aspect et Cx est la convexité. La détermination de ces paramètres peut être faite à l'aide des équations (2.6) et (2.7) respectivement. Les valeurs de ces paramètres correspondants aux différents matériaux utilisés sont présentées dans le Tableau 2.6. Pour la fraction des cendres volantes ( $A = S = OR = 1$ ). En outre, les nouvelles équations combinées (2), (3) et (4) établissent clairement un lien entre ces caractéristiques de forme des particules du sable de Chlef et celles des cendres volantes.

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{R_{ins}} \quad (2.4)$$

$$S = P_{eq} / Pr \quad (2.5)$$

$$AR = \frac{D_{min}^F}{D_{max}^F} \quad (2.6)$$

$$Cx = \frac{A}{(A+B)} \quad (2.7)$$

$$OR = \frac{(S+AR+Cx)}{3} \quad (2.8)$$

Ou,  $r_i$  est le rayon des petits cercles,  $R_{ins}$  = le rayon du plus grand cercle,  $P_{eq}$  = le périmètre équivalent de sphère ( $2\pi R.$ ),  $Pr$  = le périmètre de projection de particule,  $D_{min}^F$  = Diamètre minimal de Féret,  $D_{max}^F$  = Diamètre maximal de Féret,  $A$  = Surface du grain,  $A+B$  = Surface de la coque convexe du grain.

L'évaluation des valeurs des paramètres de taille des mélanges étudiés ont été référencés par l'angularité combinée " $A_{com}$ ", la sphéricité combinée " $S_{com}$ ", rapport d'aspect combinée " $AR_{com}$ ", convexité combinée " $CX_{com}$ " et régularité globale combinée " $OR_{com}$ " qui ont été déterminés par les expressions suivantes:

$$A_{com} = A_s \times (1 - FA) + A_f \times FA \quad (2.9)$$

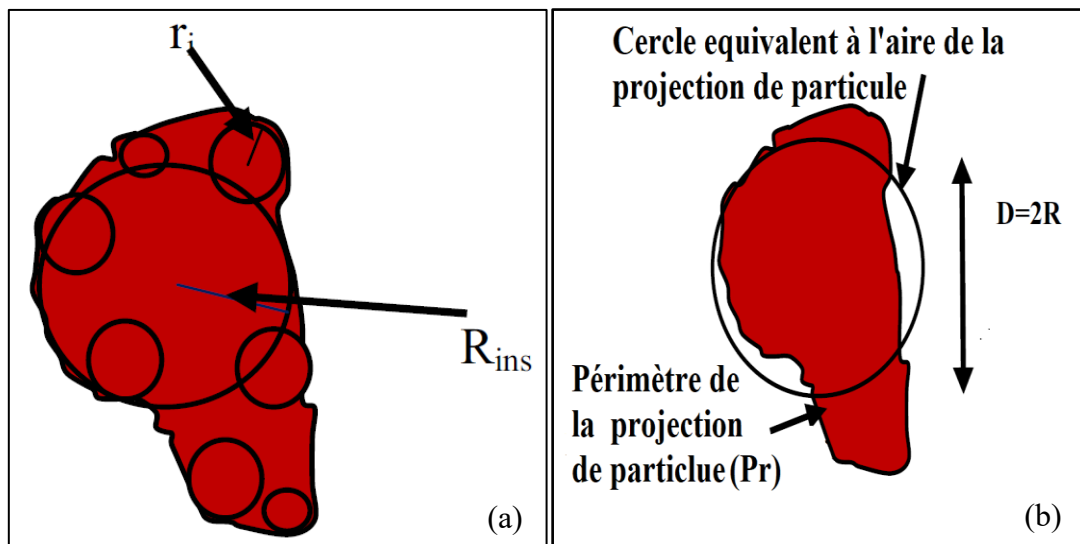
$$S_{com} = S_s \times (1 - FA) + S_f \times FA \quad (2.10)$$

$$AR_{com} = AR_s \times (1 - FA) + AR_f \times FA \quad (2.11)$$

$$CX_{com} = CX_s \times (1 - FA) + CX_f \times FA \quad (2.12)$$

$$OR_{com} = OR_s \times (1 - FA) + OR_f \times FA \quad (2.13)$$

Ou,  $A_s$ ,  $S_s$ ,  $AR_s$ ,  $CX_s$ ,  $OR_s$  sont les paramètres de forme des sables propres présentés dans le Tableau 2.7, tandis que,  $A_{fa}$ ,  $S_{fa}$ ,  $AR_{fa}$ ,  $CX_{fa}$ ,  $OR_{fa}$  représentent des paramètres de forme des grains de cendres volantes, dont les valeurs sont prises égales a 1.



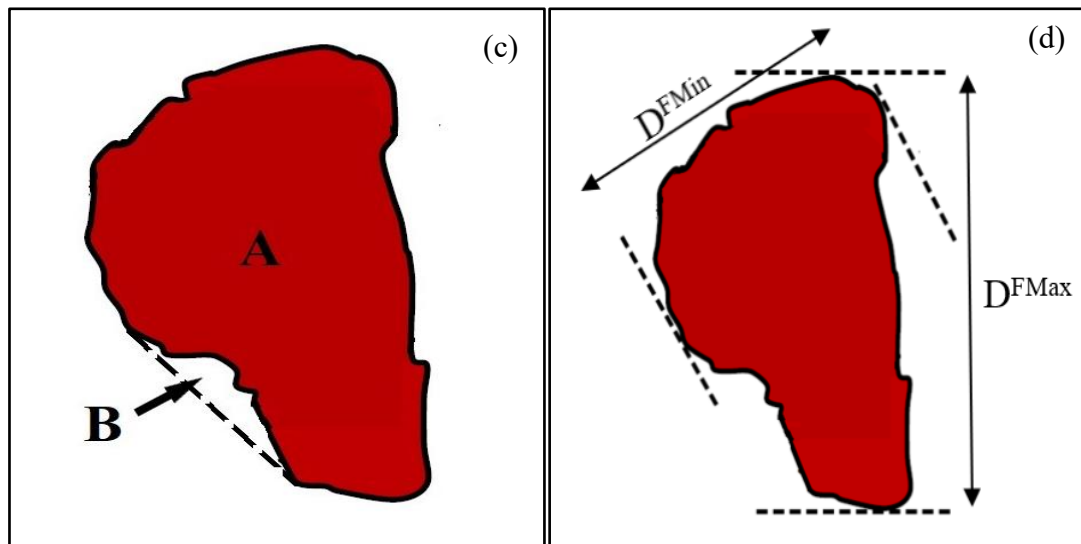


Figure 2.7 : Schéma descriptif de la définition illustrant les paramètres de forme suivants: a- Angularité (A) ; b- Sphéricité (S) ; c- Convexité (Cx); d- Rapport d'aspect (AR).

Tableau 2.8: Paramètres de formes

Paramètres	Sable de Chlef	Sable de carrière	Sable de dune
Angularité	0.453	0.283	0.489
Sphéricité	0.753	0.640	0.789
Rapport d'aspect	0.816	0.687	0.852
Convexité	0.908	0.779	0.944
Régularité globale	0.826	0.702	0.862

## 2.4 Essais de répétabilité

Avant l'exécution du protocole expérimental et pour le but de garantir le bon fonctionnement des appareils utilisés et la fiabilité des résultats obtenus, une vérification de l'étalonnage des appareils et les différents capteurs doit être effectuée, puis des essais de cisaillement à la boîte ont été exécutés sur deux échantillons de sable témoin avec une densité relative moyenne ( $D_r=50\%$ ) et des conditions initiales d'exécution similaires ont été maintenues afin de vérifier la fiabilité du dispositif et celle des résultats obtenus. Une analyse des courbes obtenues montre un excellent accord entre les deux essais, démontrant ainsi, la fiabilité du dispositif expérimental employé et du mode opératoire adopté.

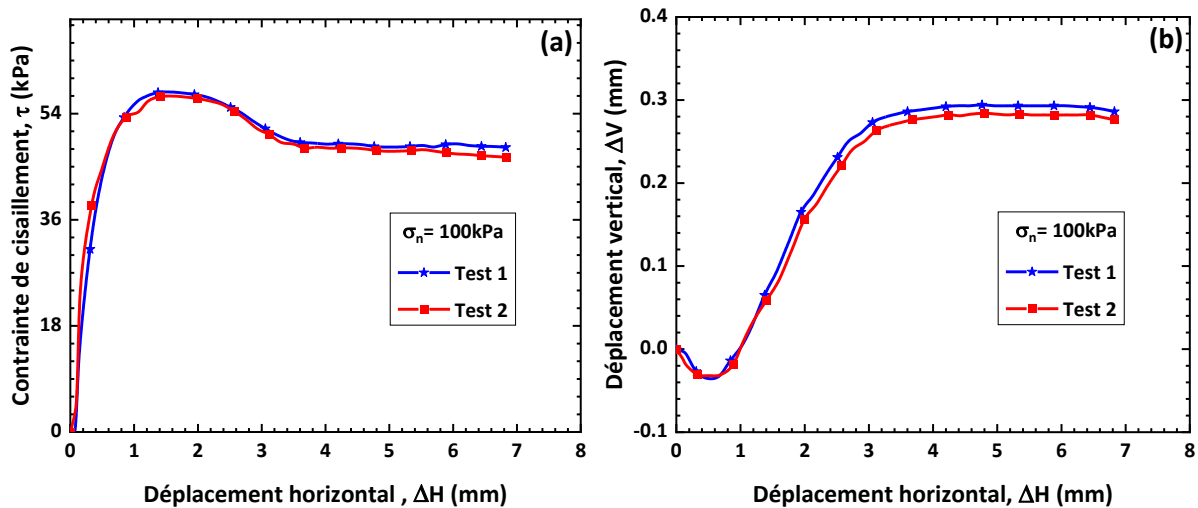


Figure 2.8 : Essais de répétabilité pour sable témoin ( $\sigma_n=100\text{kPa}$ ,  $D_r=50\%$ )

a-Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontal ;

b-Déplacement vertical en fonction de déplacement horizontal.

## 2.5 Conclusion

Ce chapitre illustre une présentation de programme expérimental et des matériaux utilisés dans cette étude. Afin d'étudier le comportement mécanique et la compressibilité du sable de Chlef, avec des différentes classes granulaires, sable de dune, sable de carrière. Les sables ont été traités avec des portions de cendre volante dans la marge de ( $FA = 0\%, 5\%, 10\%$  et  $15\%$ ), nous avons présenté les protocoles expérimentaux sur des séries d'essais de cisaillement à la boîte de Casagrande et de compressibilité à l'œdomètre, puis matériaux utilisés et ses caractéristiques physiques tel que les paramètres  $e$  taille et de forme des grains.

Le chapitre suivant traite la réponse mécanique de sable de Chlef traité aux cendres volantes en considérant l'influence de diamètre minimale des grains et d'autre paramètres.

**Chapitre 3**

**Influence de la taille des particules sur le  
comportement mécanique  
des mélanges sable-cendre volante**

*Ce chapitre aborde l'influence des caractéristiques des grains sur le comportement mécanique d'un mélange sable-cendres volantes à travers la réalisation d'une série d'essais de cisaillement à la boîte de Casagrande. Les échantillons sont reconstitués à partir du **sable de Chlef** traité avec la poudre des cendres volantes dans une gamme de 0% à 15% à une densité relative initiale ( $D_r = 28 \pm 3\%$ ) et soumis à trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n = 100\text{kPa}$ ,  $200\text{kPa}$ , et  $300\text{ kPa}$ ). Le sable de Chlef naturel a été subdivisé en trois classes granulaires selon leurs tailles extrêmes et caractéristiques granulométriques.*

### **3.1 Introduction**

La taille des grains des sols a été toujours considérée comme paramètre très influent qui doit être pris en considération lors de l'étude du comportement mécanique des matériaux granulaires, plus particulièrement les sables. Depuis 1968 et avec les travaux de (Lee & Fitron, 1969) qui ont constaté une relation étroite entre la résistance au cisaillement cyclique et la distribution granulométrique des sols étudiés. Des autres résultats ainsi que ceux de (Polito, 1999), (Monkul & Yamamuro, 2011), (Belkhatir et al., 2011), (Lim et al., 2012), (Belkhatir et al., 2012), (J. Choobbasti et al., 2014) et (Cherif Taiba et al., 2016) ont mis l'accent sur l'importance de la compréhension de l'influence des paramètres granulométriques à cause de la dépendance significative du comportement mécanique des sols sableux avec ces dernières. (Wang et al., 2013) ont observé, à travers une série d'essais de cisaillement direct et d'essais triaxiaux, que les caractéristiques granulométriques avaient des effets importants sur l'angle de frottement interne des sols à gros grains. (Belkhatir, Schanz, et al., 2014) ont constaté que les propriétés granulométriques avaient un impact notable sur la surconsolidation de la pression interstitielle des mélanges sable-limon testés. Selon leur rapport, (Cherif Taiba et al., 2016) ont déclaré que la granulométrie des particules avait une influence significative sur la résistance à la liquéfaction des échantillons de mélange de sable-limon. (Hazout et al., 2017) ont indiqué clairement que la taille extrême de particules ( $D_{max}$  et  $D_{min}$ ) combinée au diamètre moyen des grains ( $D_{50}$ ) contrôlaient substantiellement la réponse au cisaillement en condition non drainée des sols sableux considérés. (Cherif Taiba et al., 2019) ont trouvé que les angles de frottement mobilisés à l'instabilité et à l'état stable diminuent de manière linéaire avec la diminution des caractéristiques granulométriques et l'augmentation du coefficient d'uniformité pour les mélanges sable-limon testés.

(Keramatikerman et al., 2017) ont réalisé une série d'essais triaxiaux cycliques sur des échantillons sableux reconstitués mélangés avec FA=4% et FA=6% à une densité relative initiale ( $Dr=20\%$ ) et soumis à trois contraintes de confinement différentes (50 kPa, 70 kPa et 90 kPa) et à un cisaillement avec un rapport de contrainte cyclique  $CSR=0,2$ . Ils ont constaté que plus le pourcentage des cendres volantes est élevé, plus la susceptibilité à la liquéfaction est faible.

En revanche, les travaux publiés font état d'un nombre très limité de travaux de recherche visant à élucider l'effet des caractéristiques granulométriques sur les performances mécaniques des assemblages binaires de sable et de cendres volantes. Pour atteindre cet objectif, ce chapitre

résume les résultats d'une série d'essais de cisaillement direct réalisée sur trois classes granulaires dérivées du sable naturel de Chlef ayant trois diamètres minimaux des grains ("CS-1"  $D_{\min}=0,08$  mm, "CS-2"  $D_{\min}=0,63$  mm et "CS-3"  $D_{\min}=2,00$  mm) mélangés à des pourcentages de cendres volantes (FA=0 %, 5 %, 10 % et 15 %).

## 3.2 Résultats et discussion

### 3.2.1 Effets de la taille des particules

Pour but d'évaluer l'influence de la taille des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-cendre volante (FA = 5 %, 10 % et 15 %). Les échantillons ont été soumis à trois contraintes normales initiales de  $\sigma_n=100$  kPa, 200 kPa, et 300 kPa après avoir été préparés avec une densité relative initiale ( $D_r=28\pm3\%$ ). Dans l'ensemble, les résultats indiquent que le paramètre du diamètre minimal des grains ( $D_{\min}$ ) a un impact très significatif sur les performances mécaniques des mélanges sable-cendre volante pour tous les paramètres examinés. Comme on peut le voir, l'augmentation du diamètre minimal des grains de [(CS-1)  $D_{\min}=0,08$  mm à (CS-3)  $D_{\min}=2,00$  mm] induit généralement une augmentation de la résistance au cisaillement des matériaux testés. Cependant, il a été trouvé que l'effet de ( $D_{\min}$ ) sur l'augmentation de la résistance au cisaillement (4%, 5%, 6%, et 4%) est clairement visible pour la gamme de diamètre minimal des grains variant de 0.08 mm à 0.63 mm, ceci devient très prononcé pour la gamme de [(CS-2)  $D_{\min}=0.63$ mm à (CS-3)  $D_{\min}=2.00$  mm] (18%, 17%, 18%, et 21%) respectivement pour les fractions de cendres volantes considérées (FA = 0%, 5%, 10%, et 15%) (Figures 3.1a, 3.2a, 3.3a et 3.4a). En outre, les données obtenues pour la contrainte normale de ( $\sigma_n=200$  kPa) montrent que les échantillons reconstitués à partir des mélanges avec un ( $D_{\min}=2.00$  mm) présentent des valeurs de résistance au cisaillement plus élevées par rapport à celles ayant un ( $D_{\min}=0.63$  mm) ; ( $\tau_{\max} = 144.9$  kPa, 148.25 kPa, 153.16 kPa, et 157.48 kPa) et deviennent très prononcées pour les assemblages binaires ayant un ( $D_{\min}=0.08$  mm) (Figures 3.1b, 3.2b, 3.3b et 3.4b).

D'autre part, les résultats trouvés indiquent que les valeurs de la résistance au cisaillement des mélanges sable-cendres volantes soumis à une contrainte normale de ( $\sigma_n=300$  kPa) sont plus élevées que celles de ( $\sigma_n=100$  kPa et 200 kPa) en comparaison aux classes granulaires [(CS-2)  $D_{\min}=0,63$  mm et (CS-1)  $D_{\min}=0,08$  mm]. On note que les échantillons reconstitués à partir des mélanges sable-cendres volantes avec un diamètre minimal des grains «  $D_{\min}=2,00$  mm » (CS-3) montrent une augmentation notable de la résistance maximale au cisaillement de (24%, 25%, 24%, et 27%) pour les différentes fractions de cendres volantes

examinées respectivement (FA= 0%, 5%, 10%, et 15%) (Figures 3.1c, 3.2c, 3.3c et 3.4c). La partie droite du diagramme illustre l'évolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal considérant l'impact de la taille minimale des grains (figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4). Les résultats obtenus confirment le rôle du diamètre minimal des grains dans l'amplification de la phase de dilatance pour les valeurs incrémentales de ce paramètre ( $D_{\min} = 0,08 \text{ mm}, 0,63 \text{ mm}, \text{ et } 2,00 \text{ mm}$ ).

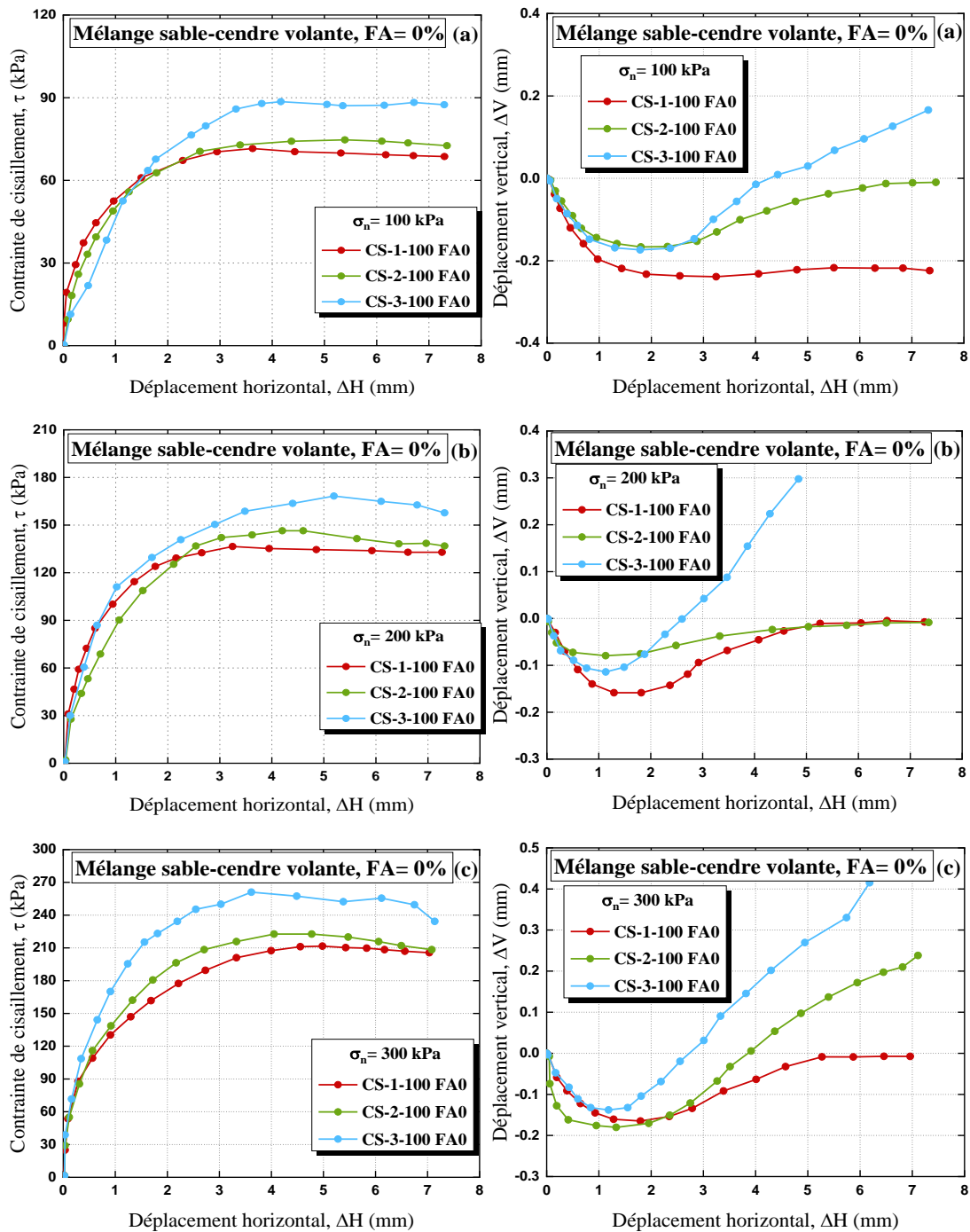


Figure 3.1 : Evolution de ( $\tau$ ) et ( $\Delta V$ ) par rapport à ( $\Delta H$ ) du sable de Chlef (FA=0%,  $D_r=28 \pm 3\%$ ) ; (a)- $\sigma_n= 100 \text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n= 200 \text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n= 300 \text{ kPa}$

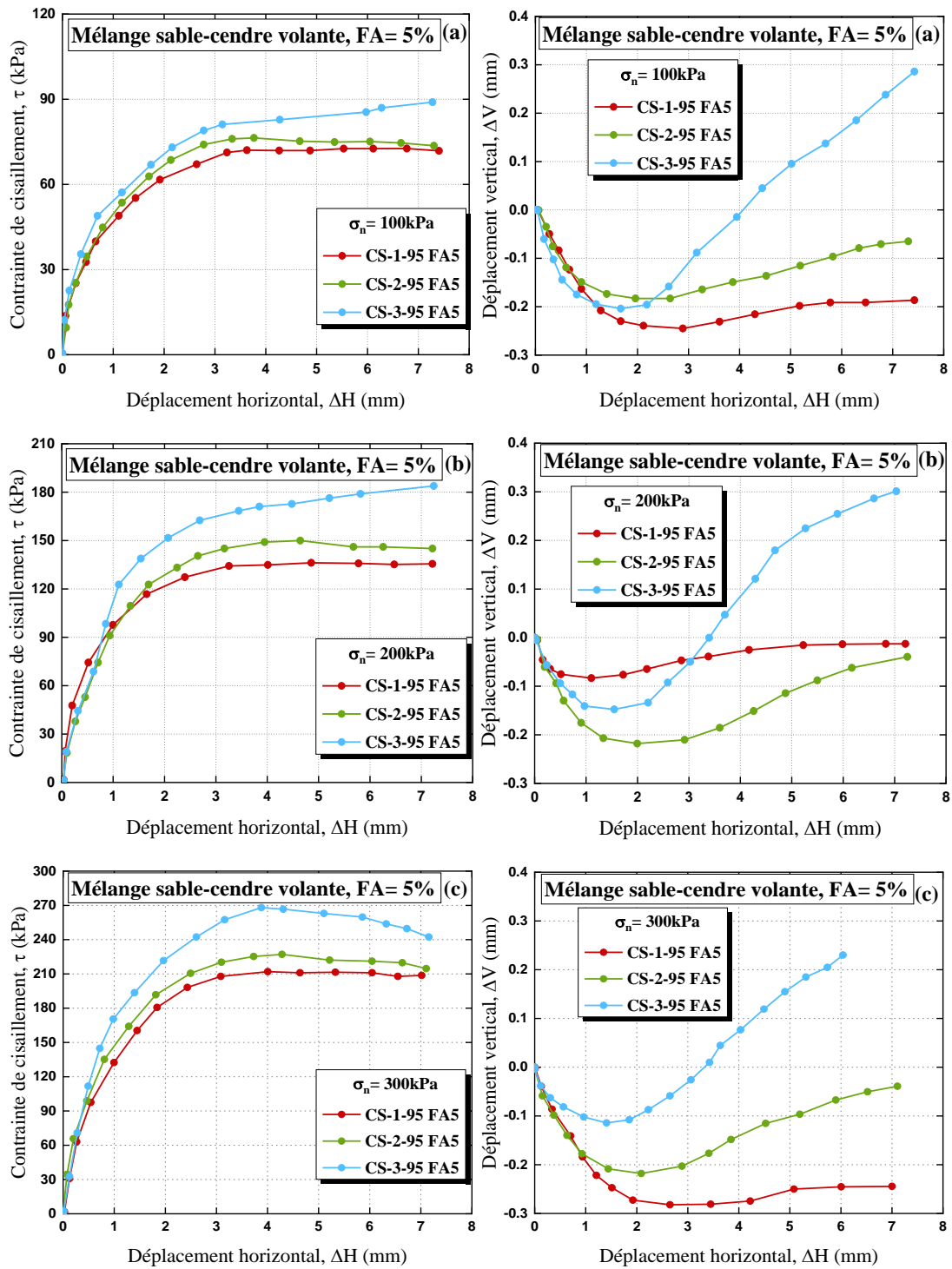


Figure 3.2 : Evolution de  $(\tau)$  et  $(\Delta V)$  par rapport à  $(\Delta H)$  du sable de Chlef (FA=5%,  $D_r=28\pm 3\%$ ) ; (a)- $\sigma_n= 100 \text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n= 200 \text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n= 300 \text{ kPa}$

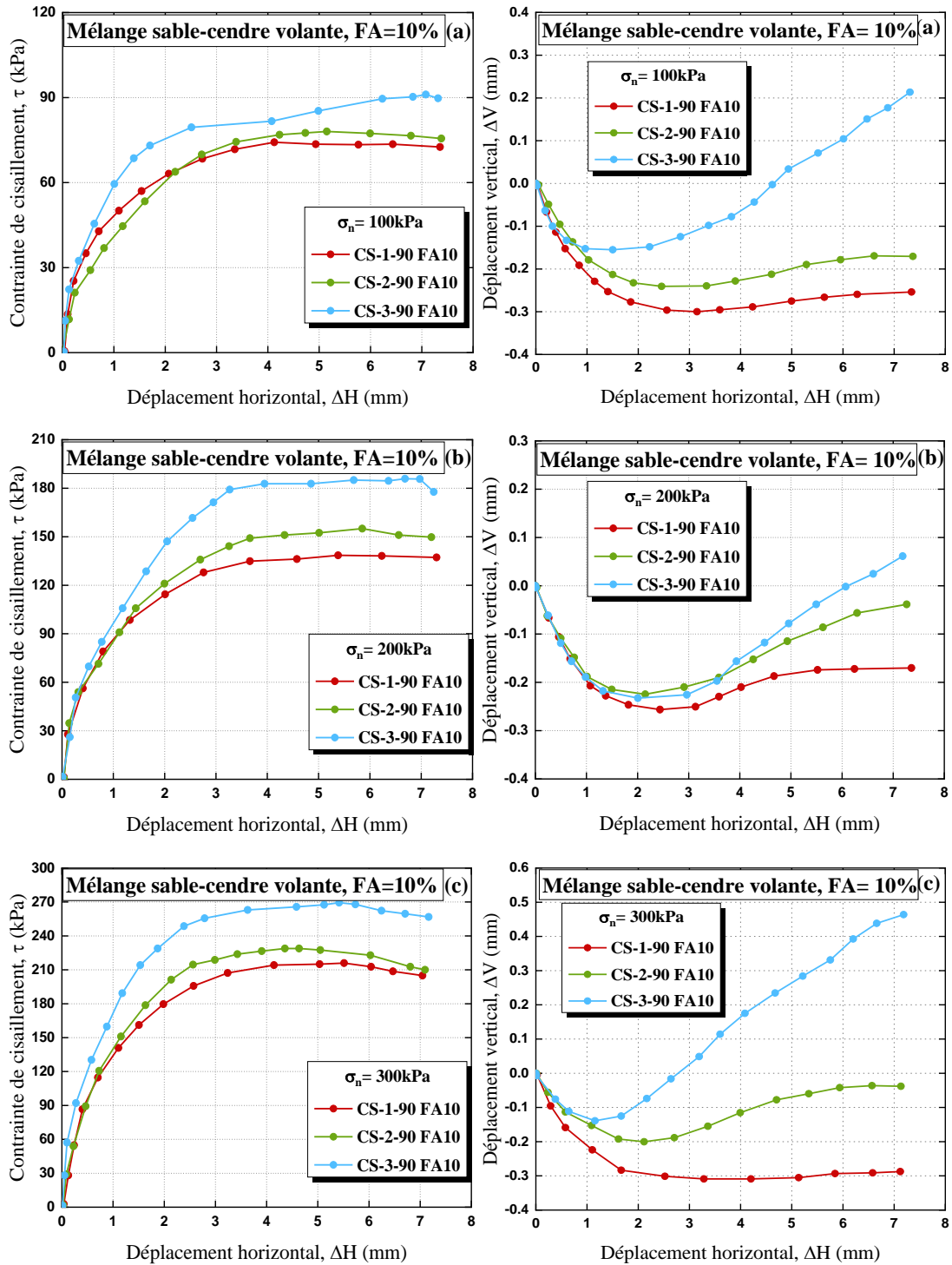


Figure 3.3 : Evolution de  $(\tau)$  et  $(\Delta V)$  par rapport à  $(\Delta H)$  du sable de Chlef (FA=10%,  $D_r=28\pm 3\%$ ) ; (a)- $\sigma_n= 100$  kPa, (b)- $\sigma_n= 200$  kPa, (c)- $\sigma_n= 300$  kPa

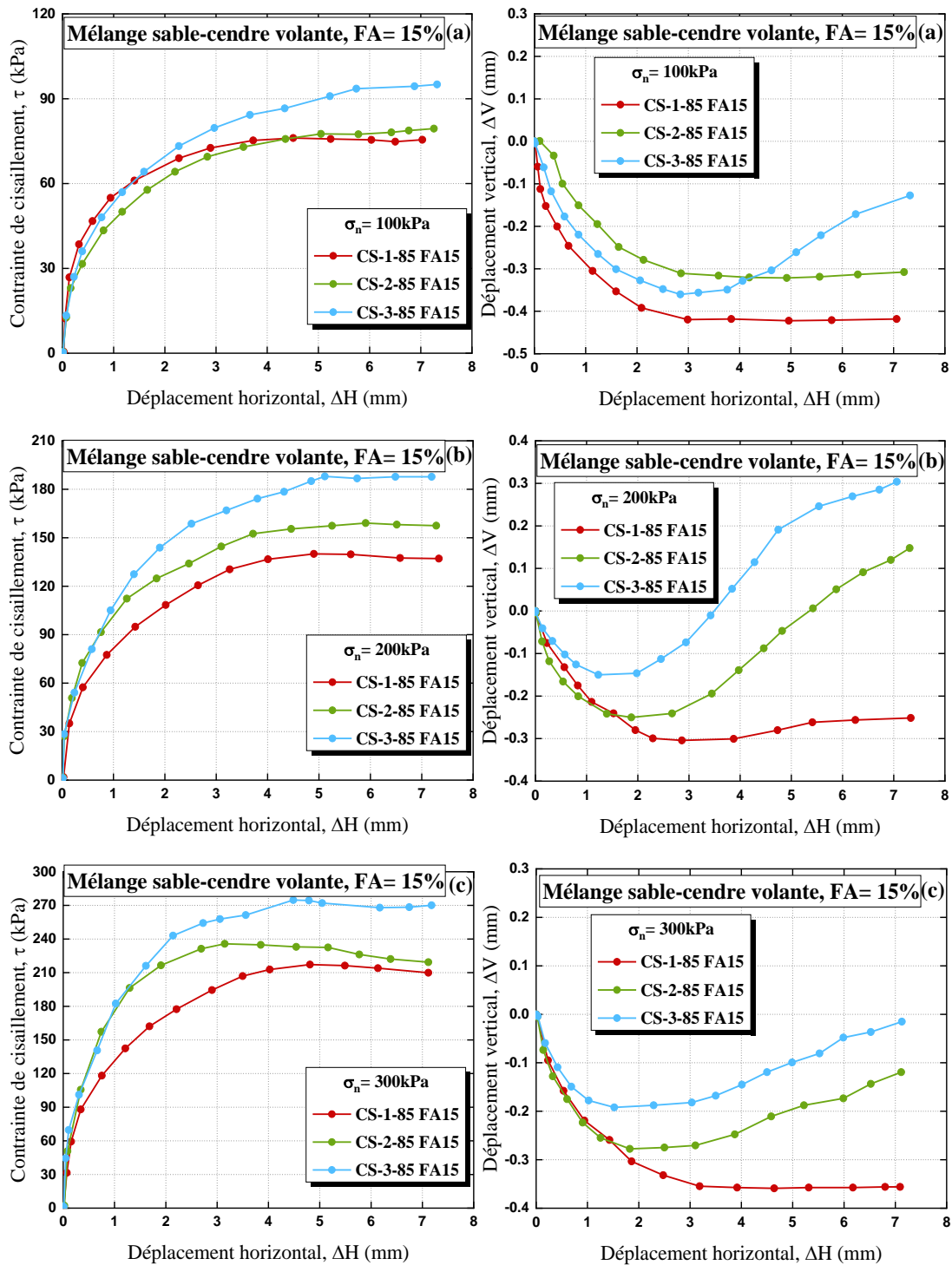


Figure 3.4 : Evolution de  $(\tau)$  et  $(\Delta V)$  par rapport à  $(\Delta H)$  du sable de Chlef (FA=15%,  $D_r=28\pm 3\%$ ) : (a)- $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n = 300 \text{ kPa}$ .

### 3.2.2 Effets des cendres volantes

Figure 3.5 montre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour la première catégorie de classe granulaire (CS-1 «  $D_{\min}=0.08$  mm ») mélangés avec différentes proportions de cendres volantes variant de FA= 0% à FA=15%. Les échantillons ont été préparés par la technique de pluviation à sec et soumis à trois différentes contraintes normales initiales ( $\sigma_n=100$  kPa, 200 kPa, et 300 kPa). Dans l'ensemble, l'ajout des cendres volantes a eu un impact significatif sur la résistance maximale au cisaillement du matériau testé. Il a été constaté que l'augmentation des cendres volantes a induit une amélioration remarquable de la résistance au cisaillement des mélanges.

Figures 3.6 et 3.7 illustrent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour les mélanges de la deuxième classe granulaire (CS-2 " $D_{\min}= 0.63$  mm") et la troisième classe granulaire ("CS-3"  $D_{\min}= 2.00$  mm). En général, la tendance obtenue indique clairement qu'une augmentation de la teneur en cendres volantes induit un effet notable sur la réponse mécanique du sol se traduisant ainsi, par une augmentation de la résistance maximale au cisaillement des matériaux testés. Une analyse minutieuse des résultats obtenus montrent clairement que l'ajout des cendres volantes a une influence positive sur la résistance maximale au cisaillement pour l'ensemble des mélanges. En effet, la résistance maximale au cisaillement atteint ( $\tau_{\max}= 88.54$  kPa, 88.94 kPa, 91.07 kPa et 95.05 kPa) pour ( $\sigma_n=100$  kPa) ; ( $\tau_{\max}= 168.26$  kPa, 178.95 kPa, 185.01 kPa et 187. 98 kPa) pour ( $\sigma_n=200$  kPa) ; ( $\tau_{\max}=261.06$  kPa, 268.04 kPa, 269.41 kPa et 274.80 kPa) pour ( $\sigma_n=300$  kPa) pour les différents teneurs en cendres volantes considérées (FA= 0%, 5%, 10% et 15%). La tendance observée peut être expliquée par la présence physique des particules des cendres volantes dans l'augmentation des forces inter-particulaires entre les grains de sable grossiers induisant ainsi, une meilleure performance au cisaillement des matériaux testés. Ces résultats confirment ceux obtenus par (Kolay et al. 2019 et Azaiez et al. 2021a, b).

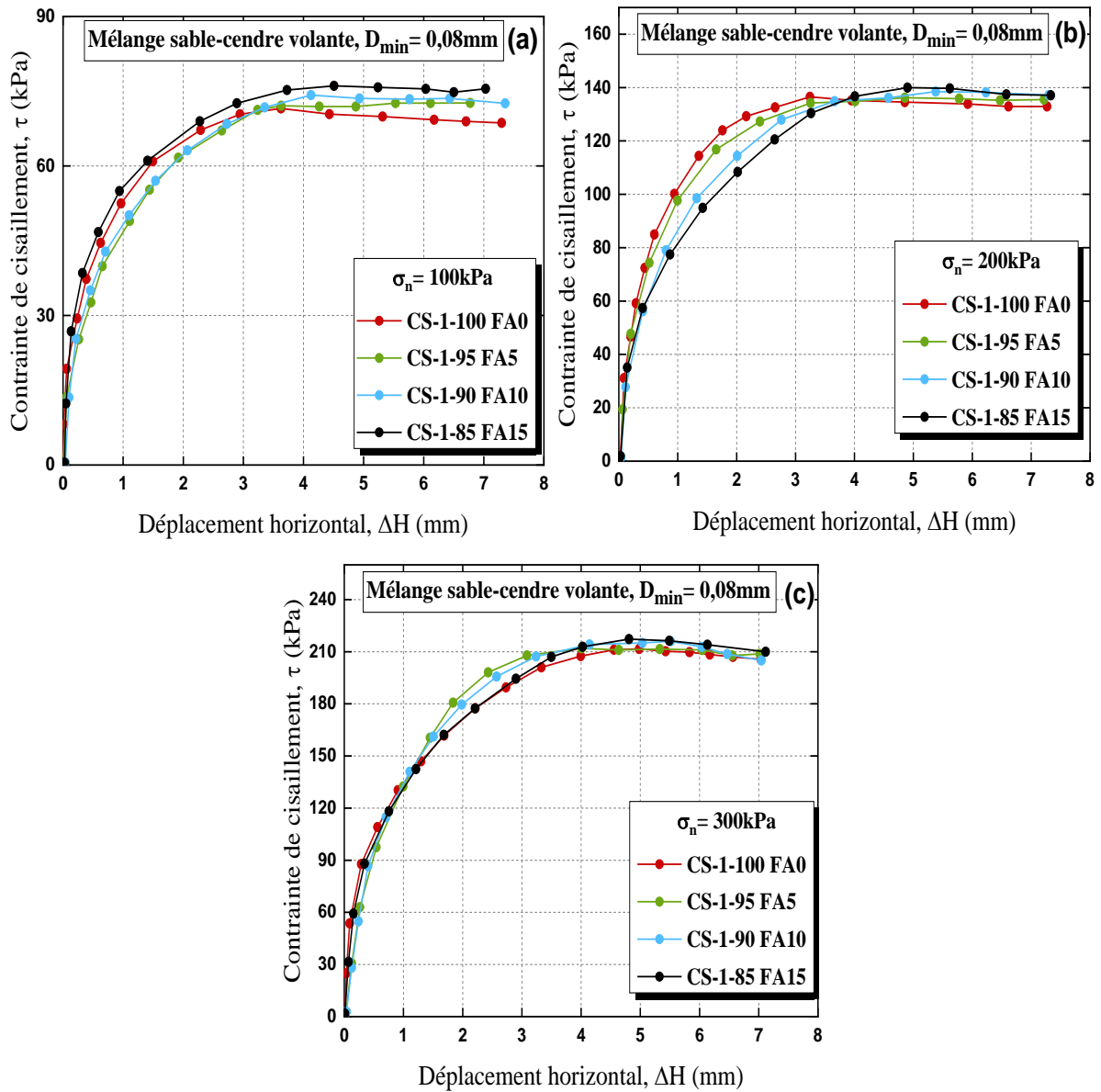


Figure 3.5 : Evolution de  $\tau$  en fonction de  $(\Delta H)$  des mélanges de sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r=28\pm 3\%$ , CS-1 "  $D_{min}= 0,08\text{ mm}$  ")  
 (a)- $\sigma_n= 100\text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n= 200\text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n= 300\text{ kPa}$ .

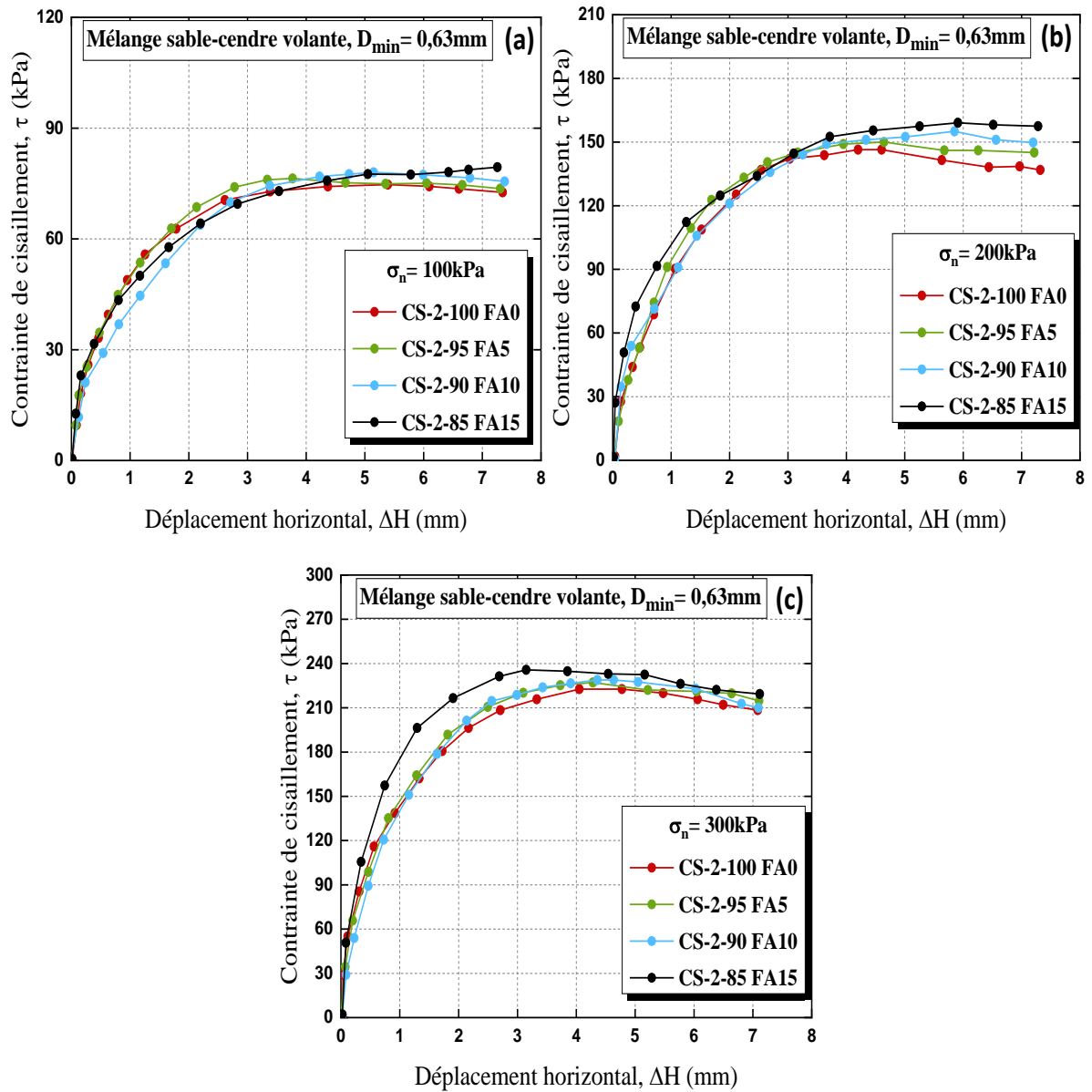


Figure 3.6 : Evolution de ( $\tau$ ) en fonction de ( $\Delta H$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r=28\pm3\%$ , CS-2 " $D_{min}= 0.63\text{mm}$ ")

(a)- $\sigma_n= 100 \text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n= 200 \text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n= 300 \text{ kPa}$

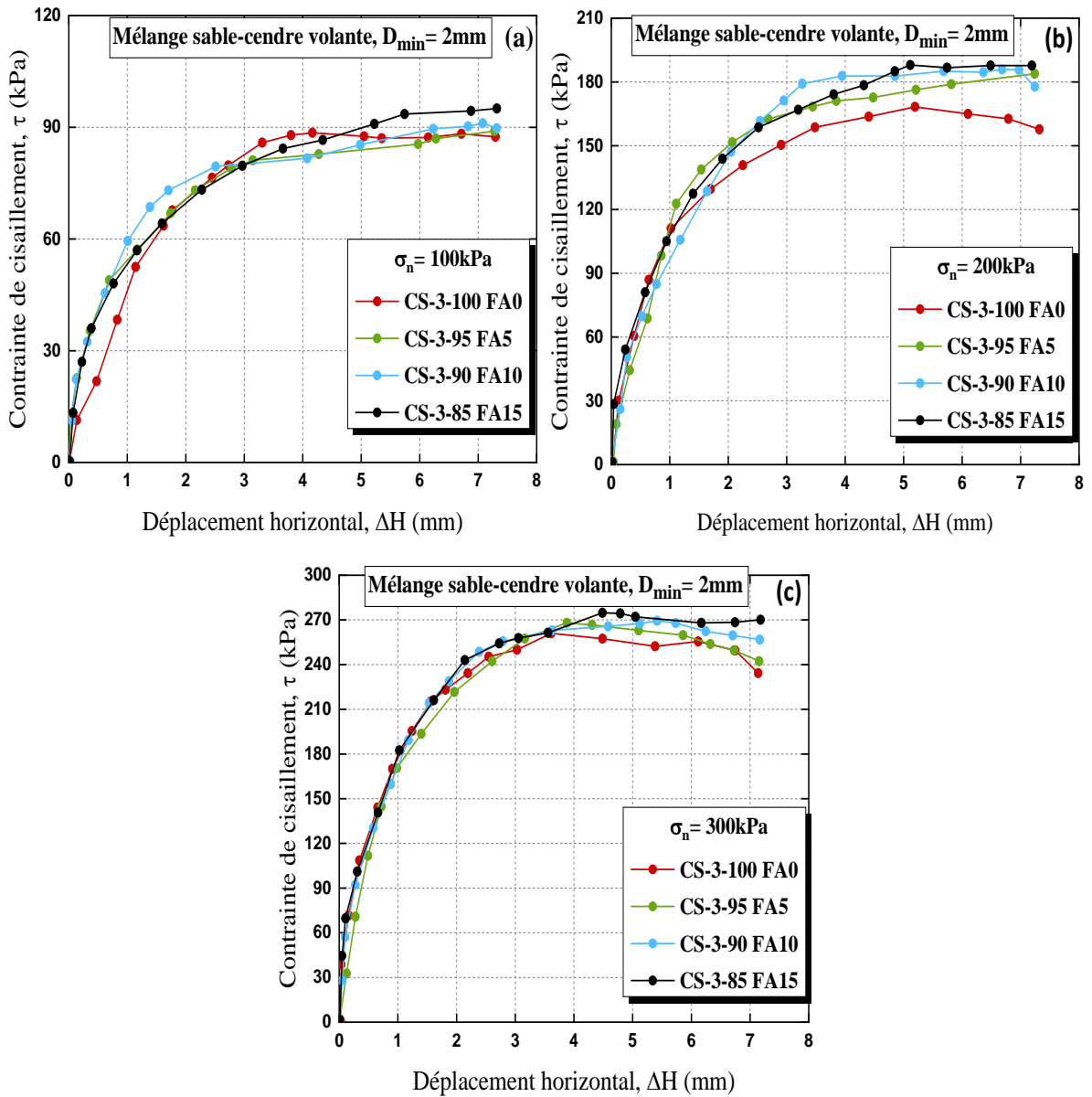


Figure 3.7 : Evolution de ( $\tau$ ) en fonction de ( $\Delta H$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r=28\pm3\%$ , CS-3 " $D_{\min}= 2.00 \text{ mm}$ ")

(a)- $\sigma_n= 100 \text{ kPa}$ , (b)- $\sigma_n= 200 \text{ kPa}$ , (c)- $\sigma_n= 300 \text{ kPa}$ .

### 3.2.3 Evolution de la résistance maximale au cisaillement ( $\tau_{\max}$ ) en fonction de la taille minimale des grains ( $D_{\min}$ ) et teneur en cendres volantes (FA)

Une analyse de la variation de la résistance maximale au cisaillement ( $\tau_{\max}$ ) des matériaux étudiés en fonction de la taille minimale des grains ( $D_{\min}$ ) et teneur en cendres volantes (FA) est représentée dans la Figure 3.8. Les résultats obtenus indiquent clairement que le diamètre minimal des grains et la teneur en cendres volantes des matériaux étudiés induisent des effets notables sur la résistance maximale au cisaillement qui se traduisent par une augmentation de la résistance maximale au cisaillement ( $\tau_{\max}$ ) avec l'augmentation du diamètre minimal des grains et pourcentages des cendres volantes ( $D_{\min}$  et FA). En outre, par rapport au premier et deuxième niveau de contraintes normales initiales ( $\sigma_n = 100$  kPa et 200 kPa), cette tendance est plus prononcée pour le troisième niveau de contrainte normale initiale ( $\sigma_n = 300$  kPa). Ce résultat démontre que l'évaluation de la corrélation entre ces indicateurs dépend systématiquement de l'augmentation du niveau de contrainte appliqué. La réponse mécanique à la boîte de cisaillement direct observée pour les différentes combinaisons binaires s'explique par le fait que les mélanges sable-cendres volantes étudiés acquièrent le caractère dilatant attribué à l'augmentation progressive de la fraction des cendres volantes facilitant, ainsi, le mouvement et l'orientation des grains de la matrice de sable. Ces résultats confirment que les paramètres testés (teneur en cendres volantes et diamètre minimal des grains) peuvent être recommandés pour l'amélioration de la résistance au cisaillement des assemblages binaires couramment utilisés dans les applications d'ingénierie géotechnique dans le domaine de Travaux Publics.

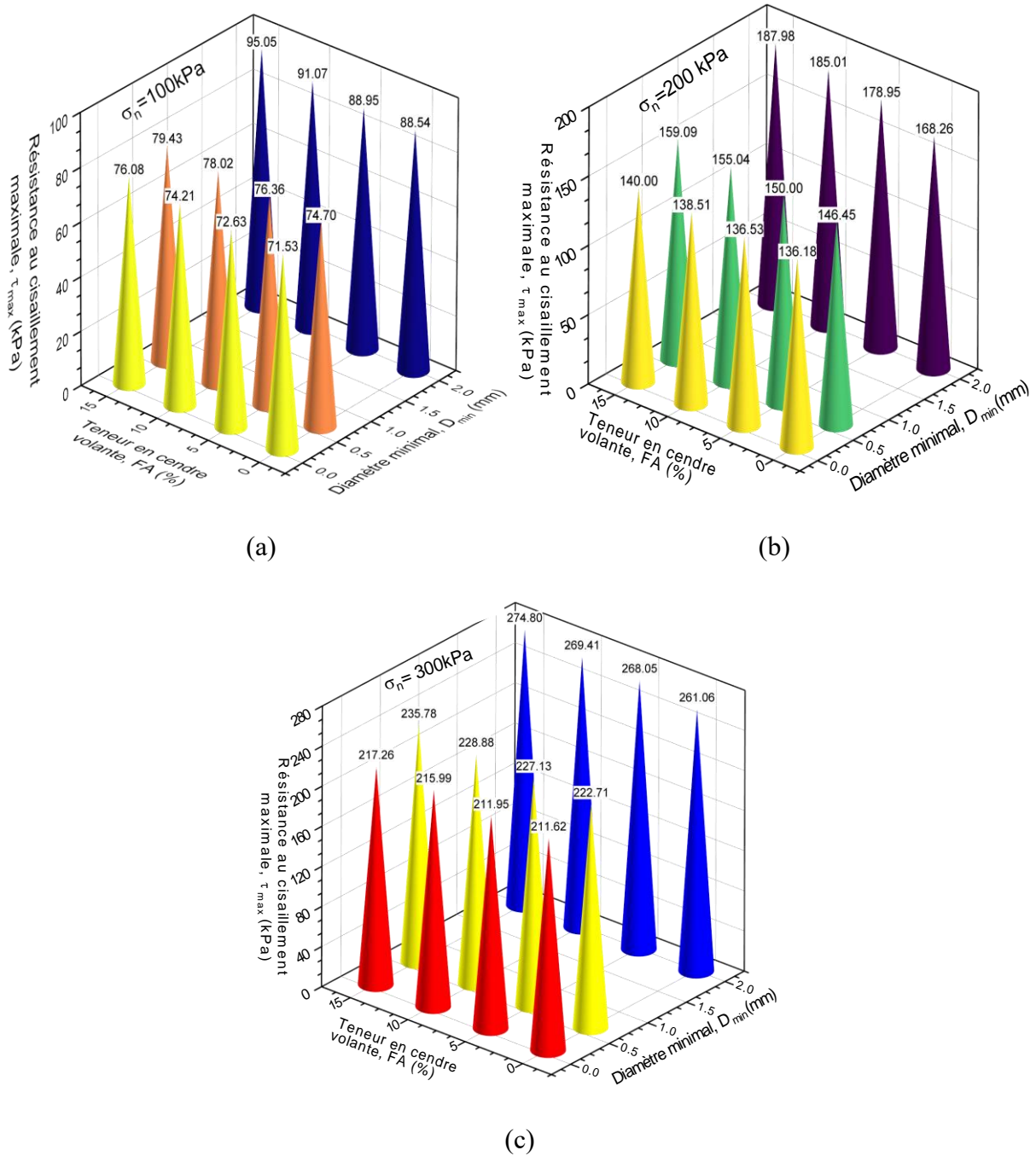


Figure 3.8 : Variation de ( $\tau_{max}$ ) en fonction ( $D_{min}$ ) et (FA) des matériaux testés ( $D_r=28\pm3\%$ )

(a)  $\sigma_n=100 \text{ kPa}$  ; (b)  $\sigma_n=200 \text{ kPa}$  ; (c)  $\sigma_n=300 \text{ kPa}$ .

### 3.2.4 Evolution des caractéristiques mécaniques ( $\phi$ , I) en fonction du diamètre minimal des grains ( $D_{\min}$ ) et teneur en cendres volantes (FA)

Figure 3.9 illustre la variation des caractéristiques mécaniques en termes d'angle de frottement interne et d'enchevêtrement " $\phi$ , I" avec le diamètre minimal des grains ( $D_{\min}$ ) et la fraction de cendres volantes (FA) des trois mélanges granulaires binaires. Pour le paramètre d'enchevêtrement, on pense généralement que la cohésion dans un sol grenus n'existe pas (Indraratna et al., 1993; Mello, 1977; Wang et al., 2019). Cependant, un grand nombre d'essais en laboratoire ont prouvé que les sols non-cohérents présentent une performance mécanique qui est couramment attribué au phénomène d'enchevêtrement en raison des effets de contact de surface entre les grains. On note que la résistance au cisaillement d'un sol granulaire est directement liée aux différents mouvements des grains caractérisés par les effets de frottement et d'enchevêtrement. Cette dernière est également le résultat de l'interception de la droite de Coulomb représentant la relation entre la contrainte de cisaillement et contrainte normale (ligne intrinsèque ou ligne de Coulomb). Pour tous les matériaux utilisés, il apparaît que la surface de tendance pourrait bien capturer effectivement la relation entre l'angle de frottement interne et l'enchevêtrement avec la teneur en cendres volantes et le diamètre minimal des grains avec ( $R^2=0,98$  et  $R^2=0,88$ ). En outre, les résultats montrent que l'augmentation du diamètre minimal des grains de ( $D_{\min}=0,08$  mm à  $D_{\min}=2,00$  mm) et de la teneur en cendres volantes de FA=0% à FA=15% augmente de manière significative l'angle de frottement interne des mélanges étudiés de  $40,13^\circ$  à  $49,42^\circ$  pour FA=0% et de  $40,44^\circ$  à  $51,49^\circ$  pour FA=15%. En outre, les résultats des essais montrent clairement que l'angle de frottement interne des mélanges (CS-2 ( $D_{\min}=0,63$  mm) et CS-3 ( $D_{\min}=2,00$  mm)) a évolué de manière significative par rapport à celui des mélanges compris entre "CS-1 ( $D_{\min}=0,08$  mm)" et "CS-2 ( $D_{\min}=0,63$  mm)" (Figure 3.9a). La tendance obtenue démontre clairement que l'augmentation de l'angle de frottement interne des échantillons des mélanges sable-cendre volante étudié dépend significativement de la taille des particules, mesurée en termes de diamètre minimal des grains.

D'autre part, la figure 3.9b montre l'évolution de l'enchevêtrement (I) en fonction de la teneur en cendres volantes (FA) et diamètre minimal des grains ( $D_{\min}$ ) des mélanges sable-cendres volantes. Les résultats obtenus indiquent que le diamètre minimal des grains et l'ajout des cendres volantes ont un effet déterminant sur l'enchevêtrement des mélanges et que celui-ci tend à augmenter avec le pourcentage croissant de cendres volantes. En outre, l'ajout successif de pourcentages de cendres volantes (de FA=0 à FA=15%) entraîne une augmentation notable de l'enchevêtrement de (0,02 kPa à 6,94 kPa) pour les mélanges de (CS-1), de (0,4 kPa à 5,18

kPa) pour les mélanges de (CS-2), et de (0,21 kPa à 6,67 kPa) pour les mélanges de (CS-3). Cette tendance peut être expliquée par l'implication des particules de cendres volantes occupant les vides entre les grains de sable entraînant systématiquement une augmentation des forces inter-particulaires conduisant, ainsi, à l'augmentation de l'enchevêtrement des grains. Afin de prévoir l'évolution de l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) et de l'enchevêtrement (I) en fonction du diamètre minimal des grains ( $D_{\min}$ ) et de la teneur en cendres volantes (FA) des matériaux étudiés, les équations suivantes (3.1 et 3.2) sont proposées:

$$\phi = a \times (D_{\min}) + b \times (FA) + c \times (D_{\min})^2 + d \times (FA)^2 + f \times (D_{\min}) \times (FA) + e \quad (3.1)$$

$$I = a \times (D_{\min}) + b \times (FA) + c \times (D_{\min})^2 + d \times (FA)^2 + f \times (D_{\min}) \times (FA) + e \quad (3.2)$$

Tableau 3.1 : Valeurs des coefficients a, b, c, d, e, f et  $R^2$  correspondants aux équations (3.1) et (3.2)

	Equation (3.1)	Equation (3.2)
e	39.25	0.36
a	5.53	-1.31
b	0.10	-0.14
c	-0.14	0.72
d	-0.0022	0.034
f	0.034	0.024
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.98</b>	<b>0.88</b>

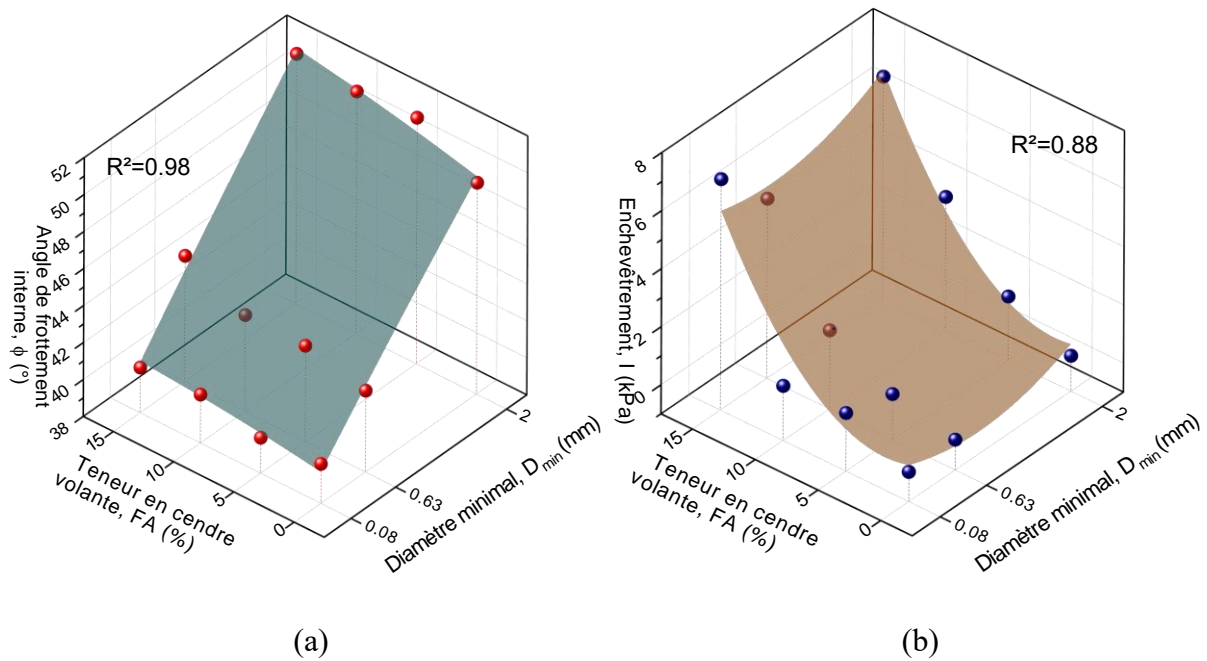


Figure 3.9 : Variation des caractéristiques mécaniques en fonction ( $D_{\min}$ ) et (FA) des matériaux testés ( $D_f=28\pm3\%$ ) : (a) Angle de frottement (b) Enchevêtrement

### 3.2.5 Influence du diamètre minimal des grains et de la teneur en cendres volantes sur l'angle de frottement maximal

Les graphes en 3D de la figure 3.10 ont été utilisés pour décrire la corrélation entre l'angle de frottement maximal ( $\phi_p$ ), [ $\phi_p=\text{tg}^{-1}(\tau_{\max}/\sigma_n)$ ], le diamètre minimal des grains ( $D_{\min}$ ) et la teneur en cendres volantes (FA). Les résultats obtenus montrent clairement l'existence d'une corrélation fiable entre l'angle de frottement maximal et le diamètre minimal des grains ( $D_{\min}$ ) et le pourcentage des cendres volantes (FA) pour l'ensemble des assemblages étudiés. Selon les résultats des essais, l'augmentation du diamètre minimal des grains de  $D_{\min}=0,08$  mm à  $D_{\min}=2,00$  mm pourrait entraîner une augmentation de l'angle de frottement maximal entre 15,7 % et 23,5 %. Il est clair que la variation du diamètre minimal des grains a un impact significatif sur l'angle de frottement maximal. En outre, l'angle de frottement maximal s'améliore par l'ajout des cendres volantes par portions de 5 %. Le fait que les particules de cendres volantes occupent les vides entre les particules de sable grossier entraînant, ainsi une diminution de l'indice des vides dans la matrice des mélanges donnant lieu à une tendance haussière de la résistance au cisaillement et par conséquent augmente l'angle de frottement maximal des mélanges binaires de sable (CS-1, CS-2 et CS-3) et cendres volantes étudiés.

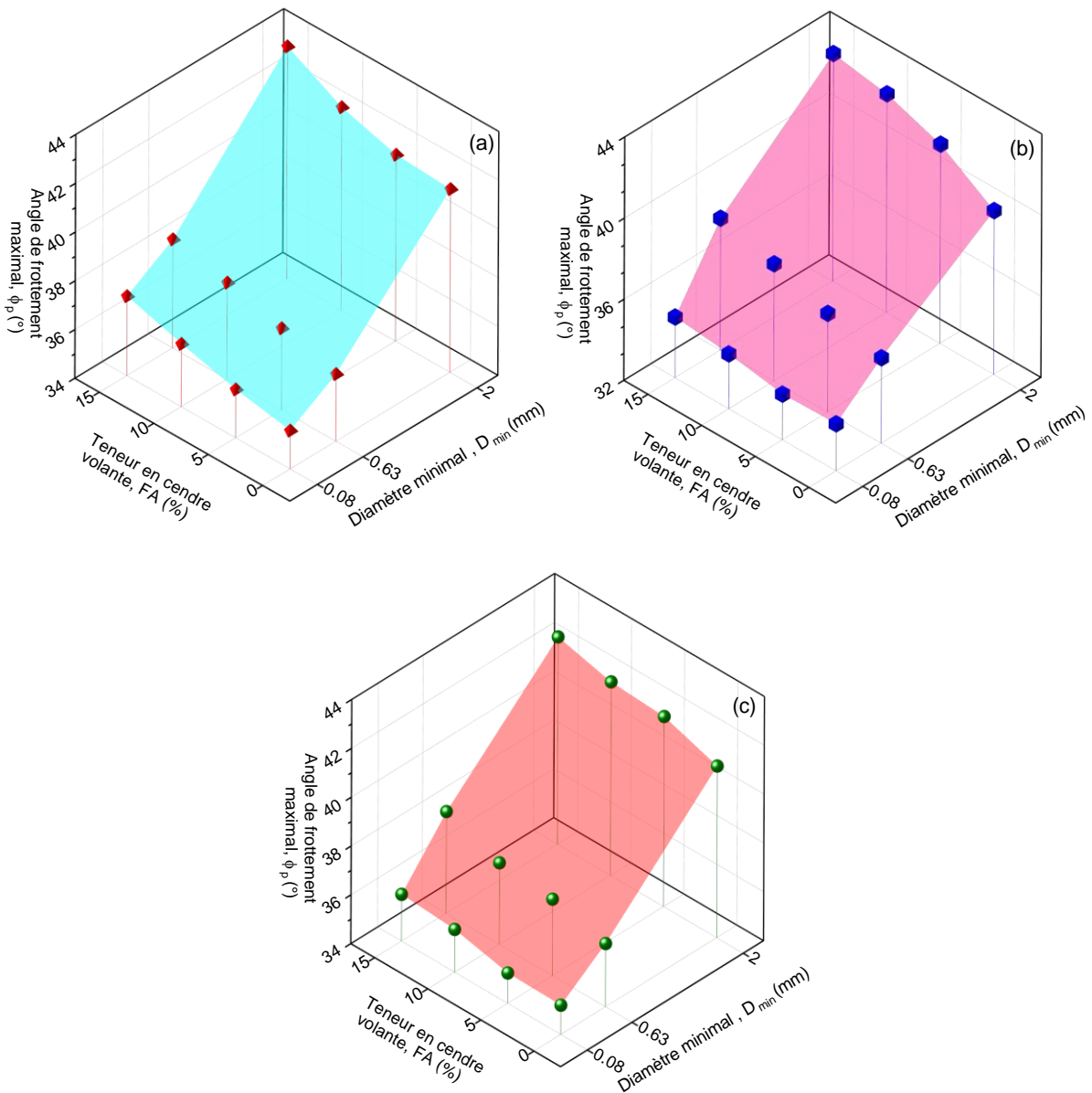


Figure 3.10 : Evolution ( $\phi_p$ ) en fonction de ( $D_{min}$ ) et (FA) des mélanges examinés ( $D_r=28\pm3\%$ ) : (a)  $\sigma_n=100$  kPa ; (b)  $\sigma_n=200$  kPa ; (c)  $\sigma_n=300$  kPa.

### 3.2.6 Influence du diamètre minimal des grains et teneur en cendres volantes sur le facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement des mélanges testés

Le facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement (FSE) est un nouveau facteur utilisé dans cette étude pour quantifier l'impact de certains paramètres sur la performance mécanique du sol étudié. Il est donc déterminé par le rapport de la résistance au cisaillement maximale du mélange sur celle du sable pur selon l'équation suivante :

$$FSE = \frac{\tau_{\max \text{ mélange}}}{\tau_{\max \text{ sable}}} \quad (3.3)$$

L'effet de la teneur en cendres volantes et du diamètre minimal des grains sur le paramètre proposé (FSE) des mélanges binaires testés est illustré dans la figure 3.11. Il est évident que le diamètre minimal des grains et la teneur en cendres volantes ont un impact significatif sur le facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement (FSE). Pour les différentes catégories de sable évaluées [CS-1 " $D_{min}=0.08$  mm," CS-2 " $D_{min}=0.63$  mm," et CS-3 " $D_{min}=2.00$  mm,"] une augmentation des pourcentages de cendres volantes conduit à une augmentation du facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement. Cependant, comparé aux autres assemblages binaires (FA=0%), (FA=5%), et (FA=10%), le pourcentage des cendres volantes (FA=15%) présente des valeurs plus élevées du facteur d'amélioration de résistance au cisaillement (FSE=1.064, 1.065, et 1.074), (FSE=1.025, 1.111, et 1.117), (FSE=1.027, 1.068, et 1.053) pour les contraintes normales initiales soumises ( $\sigma_n=100$  kPa, 200 kPa et 300 kPa). Ces observations montrent clairement que la variation du facteur d'amélioration de résistance au cisaillement (FSE) pour les mélanges sable-cendres volantes étudiés a été fortement influencée par l'ajout différentes quantités de cendres volantes considérées.

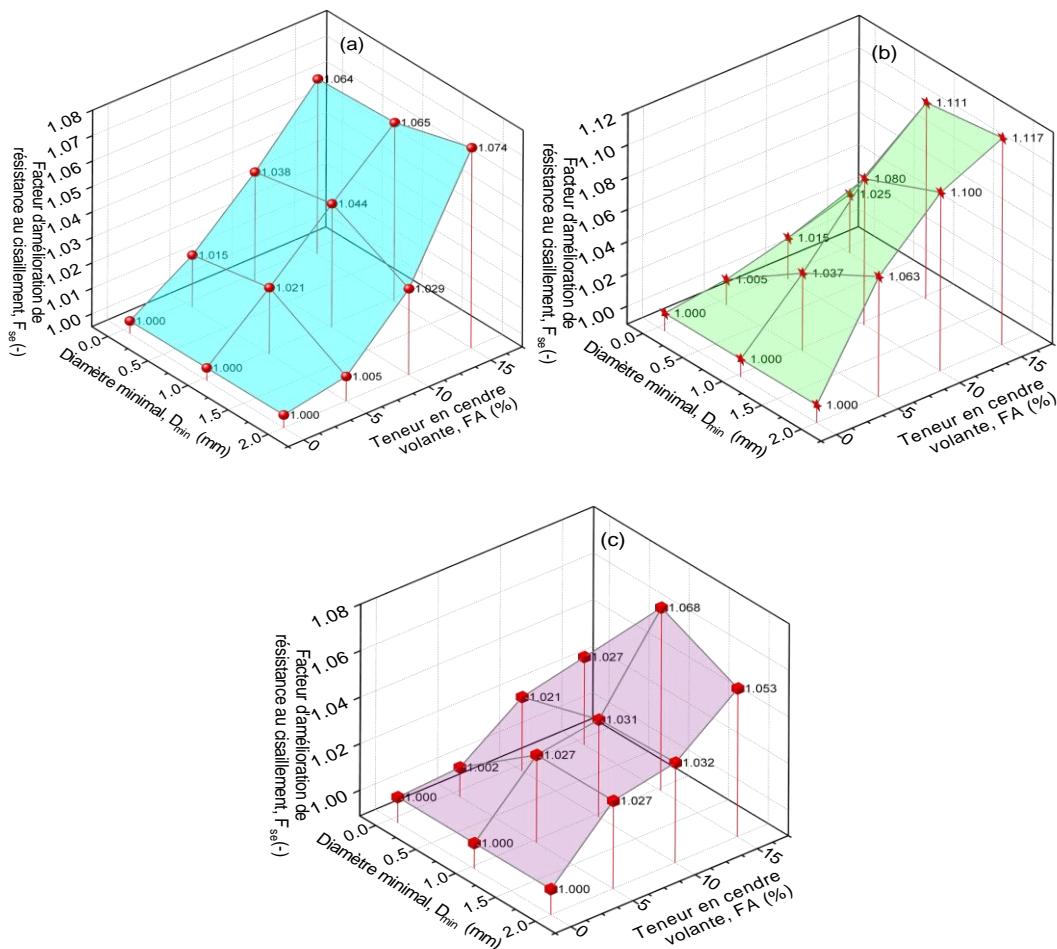


Figure 3.11 : (FSE) en fonction de ( $D_{min}$ ) et de (FA) ( $D_r=28\pm3\%$ ) des mélanges examinés ( $D_r=28\pm3\%$ ) : (a)  $\sigma_n=100$  kPa ; (b)  $\sigma_n=200$  kPa ; (c)  $\sigma_n=300$  kPa

### 3.2.7 Influence de l'indice de taille des particules et teneur en cendres volantes sur l'angle de frottement interne et l'angle de frottement maximal

Afin de mettre clairement en évidence la relation entre l'angle de frottement des matériaux testés d'une part et l'indice de taille des particules et fractions des cendres volantes d'autre part, Figure 3.12 montre l'évolution de l'angle de frottement interne en fonction du paramètre nouvellement introduit appelé indice de taille des particules. Ce dernier est défini par l'équation suivante:

$$PSI = ((D_{max} - D_{min}))/D_{50} \quad (3.4)$$

Où :  $D_{max}$  est le diamètre maximal des grains ( $D_{max}=4,00$  mm) pour le matériau étudié,  $D_{min}$  et  $D_{50}$  sont les diamètres minimal et moyen des grains, respectivement. Il est clair que l'angle de frottement interne des mélanges sable-cendre volante est notablement influencé par l'indice de taille des particules (PSI). On note que l'angle de frottement interne des matériaux employés augmente de manière significative avec la diminution de l'indice de taille des particules. En outre, il ressort clairement de ces graphiques que les échantillons de mélange de sable et de cendres volantes présentent une résistance plus forte à des valeurs plus faibles de l'indice de taille des particules en raison valeurs plus élevées de l'angle de frottement interne. Les résultats obtenus confirment une bonne corrélation entre ces trois paramètres ( $R^2=0.99$ ), de sorte que l'augmentation de l'indice de taille des particules conduit à un angle de frottement maximal plus faible des matériaux examinés pour les contraintes normales initiales testées ( $\sigma_n=100$  kPa, 200 kPa et 300 kPa). D'autre part, l'évolution de l'angle de frottement maximal en fonction de l'indice de taille des particules et de la teneur en cendres volantes est illustrée à la figure 3.13. En outre, il ressort clairement des graphes 3D que les angles de frottement maximaux des assemblages binaires testés sont plus faibles pour les valeurs du facteur suggéré "indice de taille des particules" les plus élevées. Pour les mélanges sable-cendres volantes examinés, la corrélation liant l'angle de frottement maximal ( $\phi_p$ ) à l'indice de taille des particules (PSI) et teneur en cendres volantes (FA) peut être évaluée à l'aide de l'expression suivante.

$$\phi_p = a \times (PSI) + b \times (FA) + c \times (PSI)^2 + d \times (FA) + f \times (PSI) \times (FA) + e \quad (3.5)$$

Tableau 3.2 : Valeurs des coefficients a, b, c, d, e, f et  $R^2$  correspondant à l'équation (3.5)

	$\sigma_n = 100 \text{ kPa}$	$\sigma_n = 200 \text{ kPa}$	$\sigma_n = 300 \text{ kPa}$
a	-2.51	-2.25	-2.36
b	0.14	0.31	0.15
c	0.20	0.16	0.18
d	0.002	-0.004	-0.002
f	-0.01	-0.024	-0.01
e	43.08	41.93	42.69
<b><math>R^2</math></b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>

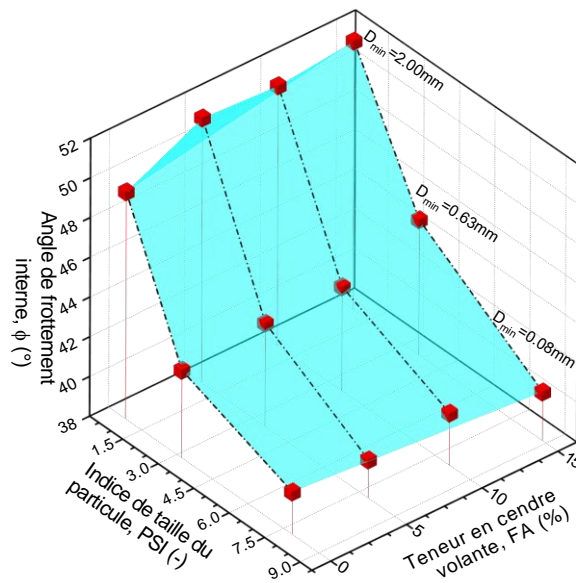


Figure 3.12 : Variation de ( $\phi$ ) en fonction de (PSI) et (FA) des mélanges ( $D_r = 28 \pm 3\%$ )

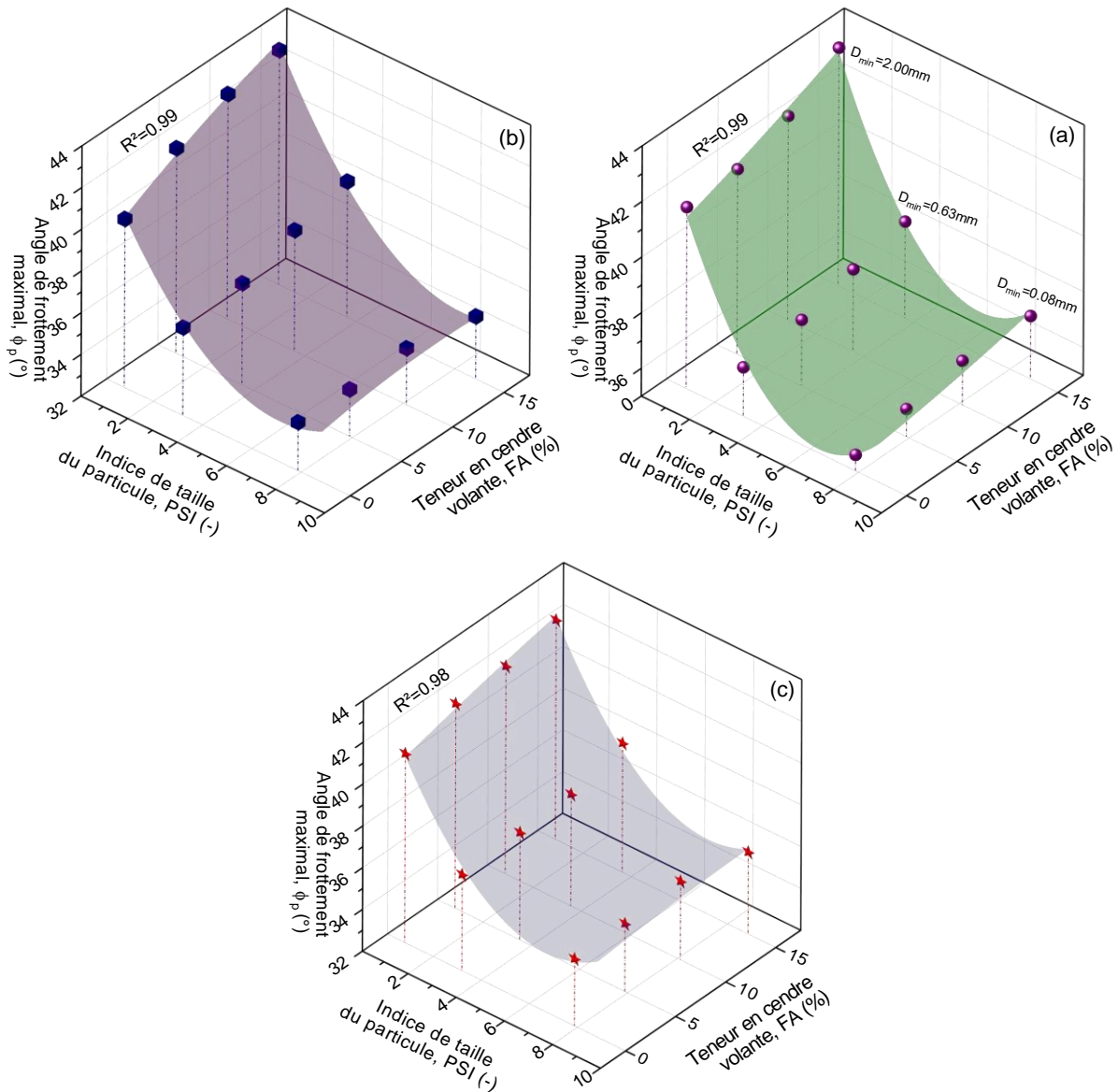


Figure 3.13 : Evolution de  $(\phi_p)$  en fonction de (PSI) et (FA) des mélanges étudiés ( $D_r=28\pm 3\%$ ) : (a)  $\sigma_n=100$  kPa ; (b)  $\sigma_n=200$  kPa ; (c)  $\sigma_n=300$  kPa.

### 3.2.8 Corrélation entre l'indice de taille des particules (PSI) et le facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement (FSE) des mélanges sable-cendres volantes

La relation entre l'indice de taille des particules (PSI) et le facteur d'amélioration de résistance au cisaillement (FSE) des mélanges sable-cendres volantes est illustrée à la figure 3.14. L'indice de taille des particules peut être utilisé comme une mesure appropriée pour prévoir le facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement des échantillons de sol testés, comme le montre ce graphique. On note que pour les matériaux testés, le facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement (FSE) augmente avec la diminution de l'indice de taille des particules (PSI), et une bonne corrélation peut être établie entre ces deux paramètres de la matrice binaire sable-cendre volante soumise aux trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n=100$  kPa, 200 kPa et 300

kPa). En outre, selon les résultats des essais, la troisième catégorie des mélanges de sable [CS-3 " $D_{\min}=2.00$  mm"] et des cendres volantes a montré des valeurs plus élevées du facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement que la deuxième catégorie de sable [CS-2 " $D_{\min}=0.63$  mm"] et la première catégorie des mélanges de sable [CS-1 " $D_{\min}=0.08$  mm"] et des cendres volantes. En revanche, pour les mélanges reconstitués à partir de particules de sable moyen et fin ( $D_{\min}=0,63$  mm et  $D_{\min}= 0,08$  mm) avec les cendres volantes considérées, cette tendance confirme que les particules de sable grossier ( $D_{\min}=2,00$  mm) mélangés avec les cendres volantes sont à l'origine de la diminution de l'indice de taille des particules (PSI) des mélanges conduisant, ainsi à l'augmentation du facteur d'amélioration de résistance au cisaillement (FSE) de ces mélanges. Ce résultat démontre clairement que la caractérisation des échantillons de mélanges sable-cendres volantes étudiés en termes d'indice de taille des particules est fortement recommandée pour évaluer leur comportement mécanique. Par conséquent, le facteur d'amélioration de résistance au cisaillement (FSE) et l'indice de taille des particules (PSI) des matériaux testés peuvent être reliés à l'aide des équations suivantes :

$$\text{Pour CS-1 « } D_{\min}=0.08 \text{ mm » : FSE= } a + b \times (\text{PSI}) \quad (3.6)$$

$$\text{Pour CS-2 « } D_{\min}=0.63 \text{ mm » : FSE= } a \times (\text{PSI})^b \quad (3.7)$$

$$\text{Pour CS-3 « } D_{\min}=2.00 \text{ mm » : FSE= } a \times (\text{PSI})^b \quad (3.8)$$

Tableau 3.3 : Valeurs des coefficients a, b et  $R^2$  correspondant aux équations (3.6), (3.7) et (3.8)

	Equation (3.6)	Equation (3.7)	Equation (3.8)
<b>a</b>	-0.27	$7.29233 \times 10^{-23}$	$6.4395 \times 10^6$
<b>b</b>	0.035	37.59	102.7
<b>R<sup>2</sup></b>	0.53	0.88	0.55

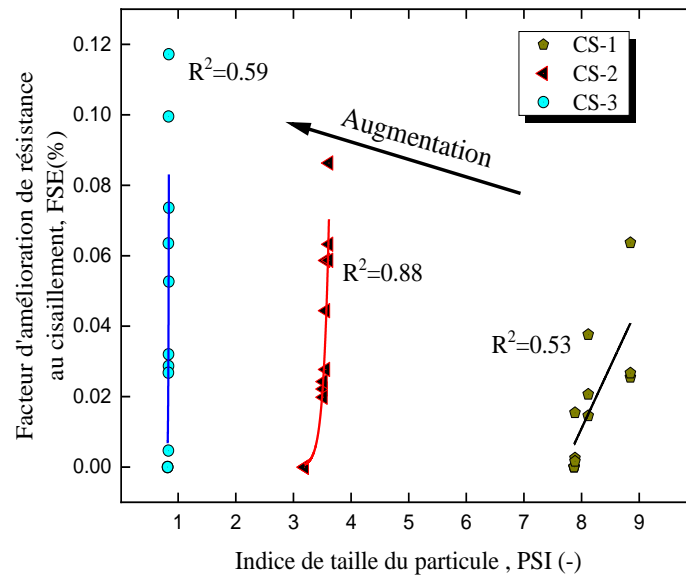


Figure 3.14 : Evolution de (FSE) en fonction de (PSI) des mélanges examinés.

### 3.3 Conclusion

L'influence de la taille des particules en termes de [diamètre minimal des grains ( $D_{\min}$ ) et d'indice de taille des particules (PSI)] et teneur en cendres volantes (FA) sur les propriétés de cisaillement des échantillons sableux propres et traités avec des fractions de cendres volantes ont été étudiées dans cette partie. Les résultats obtenus indiquent que le diamètre minimal des grains ( $D_{\min}$ ) est un paramètre pertinent pour contrôler la réponse mécanique des mélanges examinés ; par conséquent, les particules plus grossières qui ont effectivement un diamètre minimal des grains ( $D_{\min}= 2.00$  mm) améliorent la résistance maximale au cisaillement ( $\tau_{\max}$ ) des mélanges de sable et cendres volantes. En effet, l'augmentation du diamètre minimal des grains de ( $D_{\min}=0,08$  mm à  $D_{\min}=0,63$  mm) induit une augmentation notable de la résistance au cisaillement des assemblages binaires sable-cendres volantes pour toutes les conditions initiales considérées.

La variation des pourcentages des cendres volantes a un impact significatif sur la résistance au cisaillement maximale ( $\tau_{\max}$ ) et les caractéristiques mécaniques (l'angle de frottement " $\phi$ " et enchevêtrement "I"), où, ces deux caractéristiques augmentent avec l'augmentation de la fraction des cendres volantes pour tous les paramètres testés. Cependant, cette augmentation de la résistance au cisaillement conduit à une structure plus stable des mélanges sable-cendres volantes. On note que l'angle de frottement maximal " $\phi_p$ " augmente avec l'augmentation du diamètre minimal des grains ( $D_{\min}= 0,08$  mm,  $0,63$  mm et  $2,00$  mm) et teneurs en cendres

volantes utilisées (FA=0%, 5%, 10% et 15%) pour les mélanges binaires étudiés soumis à trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n=100$  kPa, 200 kPa et 300 kPa).

De plus, Deux nouveaux paramètres proposés, à savoir le facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement ( $FSE = \tau_{\max \text{ mélanges}} / \tau_{\max \text{ sable}}$ ) et l'indice de taille des particules [ $PSI = (D_{\max} - D_{\min}) / D_{50}$ ], sont introduits dans cette partie afin d'évaluer l'efficacité des cendres volantes sur les performances mécaniques des matériaux examinés. L'analyse des résultats obtenus indique que le facteur d'amélioration de résistance au cisaillement (FSE) est très bien corrélé avec le diamètre minimal des grains et teneur en cendres volantes ainsi que l'indice de taille des particules (PSI) avec l'angle de frottement interne et l'angle de frottement maximal des mélanges binaires sable-cendres volantes examinés.

Enfin, les résultats de cette étude en laboratoire confirment l'existence d'une bonne corrélation entre le facteur d'amélioration de résistance au cisaillement (FSE) et l'indice de taille des particules (PSI), où le (FSE) augmente avec l'augmentation du (PSI) pour tous les mélanges testés. Ces résultats expliquent clairement que la classification des échantillons en termes d'indice de taille des particules joue un rôle remarquable dans l'évaluation des performances mécaniques des assemblages binaires sable-cendres volantes étudiés. Ainsi, cette étude expérimentale recommande l'utilisation des cendres volantes comme matériau de construction efficace pour améliorer les propriétés de cisaillement des sols dans de nombreuses applications d'ingénierie géotechnique.

## **Chapitre 4**

**Effet de la forme des particules sur le  
comportement mécanique des sables traités aux  
cendres volantes.**

*Dans ce chapitre, on aborde l'effet de la forme des grains sur la réponse mécanique des mélanges sable de Chlef-cendres volantes a travers un programme expérimental basé sur des essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande sur trois différents types de sable de formes distinctes (sable de dune "arrondi", sable de Chlef "semi-arrondi" et sable de carrière "angulaire". Les échantillons de mélanges sable-cendres volantes ont été reconstitués a une densité relative initiale ( $D_r = 87 \pm 3\%$ ) et traités aux cendres volantes suivant des pourcentages de ( $FA=0\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$  et  $15\%$ ) et soumis aux contraintes normales initiales ( $\sigma_n=100$  kPa,  $200$  kPa et  $300$  kPa).*

## **4.1 Introduction**

Dans le domaine de la géotechnique et de la mécanique des sols, la forme des particules est considérée comme un des paramètres clés qui contrôle d'une manière rigoureuse la réponse physico-mécanique et hydraulique des matériaux granulaires, y compris la densité, l'indice des vides, la résistance au cisaillement, l'angle de frottement et la conductivité hydraulique (Alhani et al., 2022; Cabalar & Akbulut, 2016; Cho et al., 2006; Doygun et al., 2019; Haeri, 2006; Igwe et al., 2012; Nimitaj & Beyrag, 2022; Rousé et al., 2008; Simoni & Houlsby, 2006; Zheng & Hryciw, 2016).

La littérature publiée rapporte que l'ajout de particules de billes de verre concassées de différentes formes au sable avec différents pourcentages pouvait influencer, de manière significative, le comportement général au cisaillement des mélanges (Yang & Luo, 2015). De plus, (Yang & Luo, 2018) ont découvert qu'en plus de la gradation, la forme des particules contrôlait étroitement l'angle de frottement au pic et à l'état critique et par conséquent la résistance au cisaillement des sables étudiés. Ils ont étudié la réponse au cisaillement non drainée du sable de Fujian mélangé avec des billes de verre non-concassées et concassées pouvaient être contrôlées par des caractéristiques essentielles de la forme des particules, notamment la sphéricité et la régularité globale. (Alshibli & Cil, 2018) ont proposé des modèles précis qui pourraient être utilisés pour l'évaluation de l'angle de frottement des sables en utilisant des essais triaxiaux en tenant compte des caractéristiques de forme des particules. (Cherif Taiba et al., 2021) ont constaté que l'angle de frottement d'instabilité du sable et sable limoneux examiné était fortement lié aux caractéristiques de forme des particules, cependant, ils ont trouvé que l'augmentation du rapport d'angularité (rapport entre l'angularité du sable pure et l'angularité du mélange sable-fines) présentait une diminution de l'angle de frottement d'instabilité pour trois mélanges différents (sable-limon de Chlef, sable-limon d'Hostun et sable-limon de Fontainebleau). (Nimitaj & Beyrag, 2022) ont évalué l'impact de la morphologie des particules sur l'angle de frottement du sable de Firoozkouh. Ils ont constaté que si la régularité globale des particules de sable changeait d'environ 38%, l'angle de frottement se déformerait jusqu'à 91% des sols sableux testés.

D'autre part, la relation contrainte-dilatance est une propriété intrinsèque des matériaux granulaires Azaiez et al. (2021b); (Kong et al., 2016; Lo & Wardani, 2002; Nimbalkar et al., 2012; Schanz & Vermeer, 1996). Ainsi, la morphologie des particules (forme et taille) joue un rôle important dans l'étude des propriétés de résistance au cisaillement et dilatance des sols.

Guo et al. (2007) ont montré à travers des essais triaxiaux en condition drainée que l'augmentation de l'angularité induit une augmentation de l'angle de frottement maximal et caractère dilatant des sables examinés. Xiao et al. (2019) ont trouvé que la forme des particules influençait d'une manière significative la réponse contrainte-dilatance des sols à gros grains; où, ils ont signalé que le sable moyennement dense présentait des comportements typiques d'anti-écrouissage et de dilatance pour une régularité globale variant de 0,844 à 0,971. Rui et al. (2021) ont étudié l'effet de la forme des particules sur les caractéristiques de déformation du sable carbonaté en condition drainée. Ils ont constaté que le paramètre de sphéricité avait un effet significatif sur la relation contrainte-dilatance des sables carbonatés par rapport à celui du rapport d'aspect.

Cependant, l'étude de l'influence des caractéristiques de forme et de taille des particules sur la résistance au cisaillement des sols à gros grains mélangés avec des proportions de matériau de cendres volantes est l'un des sujets de recherche les plus attrayants qui devraient être étudiés. La littérature publiée indique que le matériau de cendres volantes a été trouvé comme un matériau efficace à utiliser pour améliorer les performances mécaniques des sols granulaires (Kolay et al., 2019; Nawagamuwa & Wijesooriya, 2018; Phanikumar & Nagaraju, 2018). (Azaiez et al., 2021a) ont constaté que la teneur en cendres volantes avait une influence significative sur l'angle de frottement et par conséquent sur la résistance au cisaillement des mélanges sable-cendres volantes testés. Par ailleurs, très peu de travaux de recherche dans la littérature publiée ont été rapportés évaluant, ainsi, l'effet des caractéristiques de la forme des particules (Angularité "A", Sphéricité "S" et régularité globale "OR") et propriétés granulométriques (diamètre efficace et moyen des particules " $D_{10}$  et  $D_{50}$ " et coefficient d'uniformité " $C_u$ ") sur les relations contrainte-dilatance du sable de Chlef mélangé avec différentes fractions de cendres volantes. Dans ce contexte, des séries d'essais de cisaillement direct a été réalisée sur le sable de Chlef "CS", le sable de dunes "DS" et le sable de carrière "QS" mélangés à des pourcentages de cendres volantes (FA=0%, 5%, 10% et 15%). Les échantillons de mélanges sable-cendres volantes déposés à sec ont été reconstitués à une densité relative initiale de ( $D_r = 87 \pm 3\%$ ) et soumis à trois différentes contraintes normales initiales ( $\sigma_n = 100$  kPa, 200 kPa et 300 kPa).

## 4.2 Résultats et discussion

### 4.2.1 Comportement au cisaillement des mélanges :

#### 4.2.1.1 Sable de Chlef-cendres volantes

L'influence du pourcentage de cendres volantes sur la résistance au cisaillement du sable de Chlef est discutée dans cette section. Pour atteindre cet objectif, une série d'essais de cisaillement direct a été réalisée sur le sable de Chlef mélangé avec des fractions de cendres volantes variant de (FA=0% à FA=15%). Les mélanges binaires ont été préparés avec une densité relative initiale ( $D_r = 87 \pm 3\%$ ) et soumis à trois contraintes normales ( $\sigma_n=100$  kPa, 200 kPa et 300 kPa).

Figure 4.1 présente l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal des différents échantillons testés. On note que les résultats obtenus montrent clairement que la contrainte de cisaillement atteint une valeur maximale pour un déplacement horizontal de  $\Delta H= 3$ mm, puis elle diminue légèrement jusqu'à atteindre une valeur constante appelée contrainte de cisaillement résiduelle. En effet, ces courbes illustrent parfaitement le comportement des échantillons denses sous chargement en cisaillement simple. De plus, l'influence des cendres volantes a été à l'origine d'une tendance haussière et similaire sous l'effet des contraintes normales appliquées. Ainsi, il peut être observé que l'augmentation des proportions de cendres volantes induit une amélioration des performances des matériaux testés qui se traduit par une nette amélioration des contraintes de cisaillement. Il convient de mentionner que les valeurs maximales des contraintes de cisaillement pour les mélanges sable-cendres volantes avec FA=15% ont atteint ( $\tau_{max}=112.29$  kPa, 182.88 kPa et 281.05 kPa) en comparaison à celles produites par le sable de Chlef pur (FA=0%) ( $\tau_{max}=92.49$  kPa, 164.01 kPa et 240.46 kPa) sous contraintes normales initiales ( $\sigma_n=100$  kPa, 200 kPa et 300 kPa) respectivement. Les résultats obtenus de cette étude peuvent être expliqués par le fait que les particules de cendres volantes occupent les vides entre les grains de sable les rendant très sensibles à un mouvement d'orientation et glissement facile conduisant ainsi, à une augmentation du processus de l'enchevêtrement des grains donnant lieu à une structure de sol plus résistante. On note que ce comportement est similaire à celui obtenu par (Keramatikerman et al., 2017) et (Azaiez et al., 2021a).

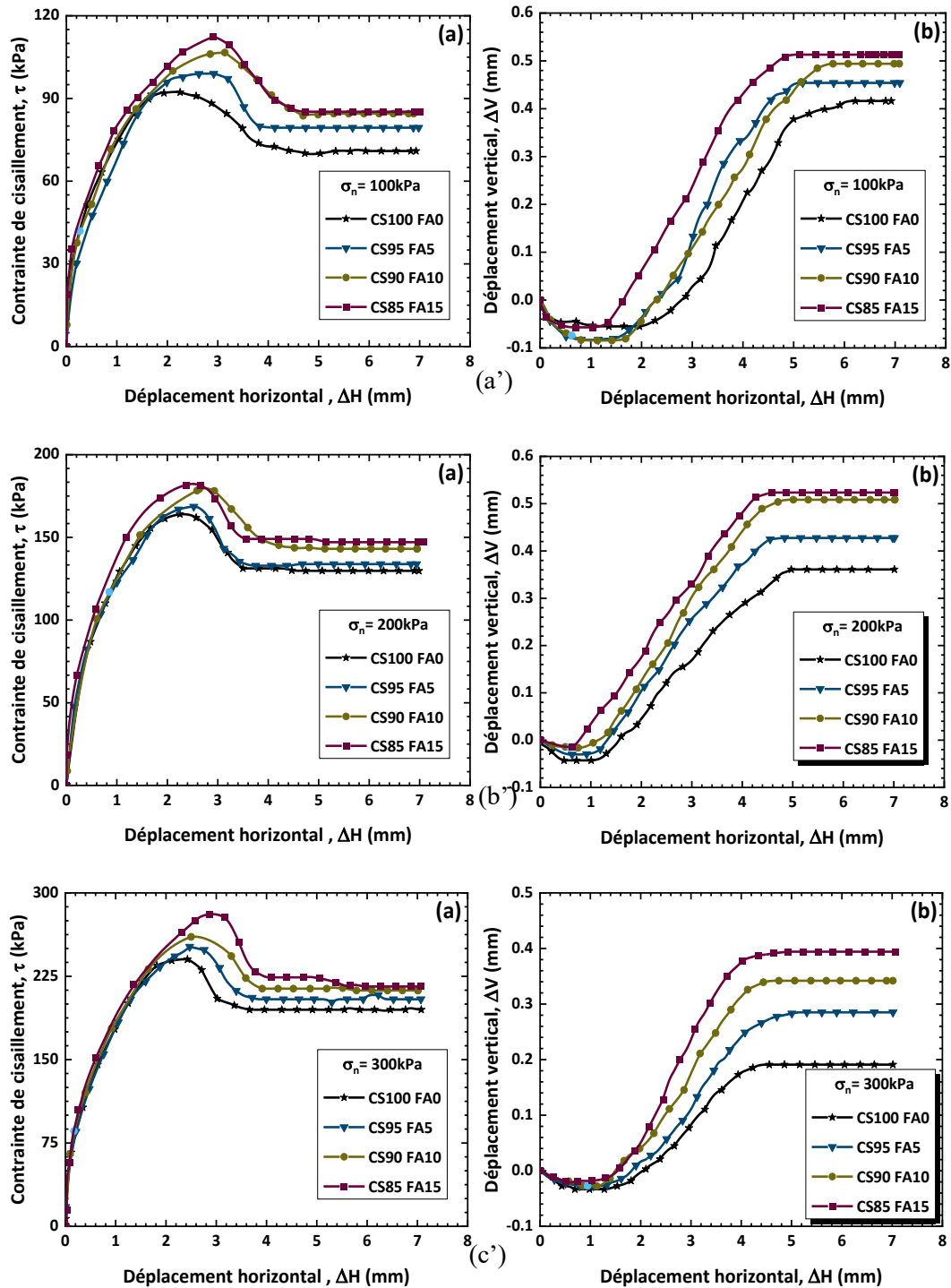


Figure 4.1 : Influence de (FA) sur la variation de ( $\tau$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r = 87 \pm 3\%$ ) : (a')- $\sigma_n = 100$  kPa, (b')- $\sigma_n = 200$  kPa, (c')- $\sigma_n = 300$  kPa.

En outre, les résultats obtenus prouvent que les mélanges sable de Chlef-cendres volantes testés sous la contrainte normale initiale de ( $\sigma_n = 300$  kPa) présentent des valeurs plus élevées de résistance au cisaillement par rapport à celles induisent par l'effet des autres contraintes normales ( $\sigma_n = 100$  kPa, 200 kPa). D'autre part, la figure 4.1.b illustre la variation du

déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal pendant les essais de cisaillement, il a été observé que la réponse du caractère dilatant des mélanges testés est étroitement liée aux ajouts de cendres volantes, d'une manière que l'augmentation de ce dernier a induit une augmentation de la phase de dilatance des assemblages binaires sous des charges de cisaillement. Ce comportement pourrait être attribué à la contribution des particules de cendres volantes rendant, ainsi, la structure du sol plus dilatante et par suite les assemblages sable-cendres volantes deviennent plus stables et plus résistants.

#### 4.2.1.2 Sable de dune-cendres volantes

Le comportement de sable de dunes propre et celui traité par les cendres volantes à des fractions variant de (FA=5%,10% et 15%) est présenté dans la Figure 4.2. Figure 4.2 (a) illustre la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour les essais de cisaillement sous contraintes normales initiales de  $\sigma_n = 100\text{kPa}$ , 200 kPa et 300kPa. D'après ces figures, il a été remarqué que les mélanges sable de dune-cendres volantes ont montré une tendance similaire à celle présentée par les mélanges sable de Chlef-cendres volantes. En effet, la contrainte de cisaillement augmente avec l'augmentation du déplacement horizontal jusqu'à une valeur maximale environ de ( $\tau_{\max} = 69.86\text{ kPa}$ , 78.44 kPa, 89.5kPa et 96.89kPa) pour les mélanges sable de dunes-cendres volantes (FA=0%, 5%, 10% et 15%) respectivement sous une contrainte normale initiale de  $\sigma_n = 100\text{kPa}$ . On note que ces contraintes de cisaillement ont la tendance d'augmenter avec l'augmentation de la contrainte normale initiale de 200kPa puis ils atteignent des valeurs plus élevées de ( $\tau_{\max} = 213.58\text{kPa}$ , 225.11kPa, 234.19kPa et 242.22kPa) pour une contrainte normale initiale de  $\sigma_n = 300\text{kPa}$ .

De plus, l'ajout des cendres volantes a contribué considérablement à l'amélioration des performances mécaniques du sable de dune en termes de contraintes de cisaillement, ou il a été remarqué que l'ajout d'une fraction de (FA=15%) de cendre volante a nettement amélioré la résistance au cisaillement par 39%, 14% et 14% pour les contraintes normales initiales considérées ( $\sigma_n = 100\text{kPa}$ , 200 kPa et 300kPa) respectivement.

D'autre côté, Figure 4.2 (b) présente la variation du déplacement vertical par rapport au déplacement horizontal des mélanges testés, pour toutes les contraintes normales initiales utilisées. On note que les graphes montrent une tendance similaire d'une manière que tous les échantillons présentent une légère phase de contractance suivie par une large phase de dilatance de plus, il a été remarqué que l'ajout des fractions de cendres volantes a amplifié le caractère dilatant pour tous les mélanges et contraintes normales initiales étudiés.

Les résultats obtenus montrent un comportement similaire à celui du sable Chlef, cette similarité peut être attribuée à la ressemblance de forme des particules entre les deux types de sable (sable de Chlef et sable de dune).

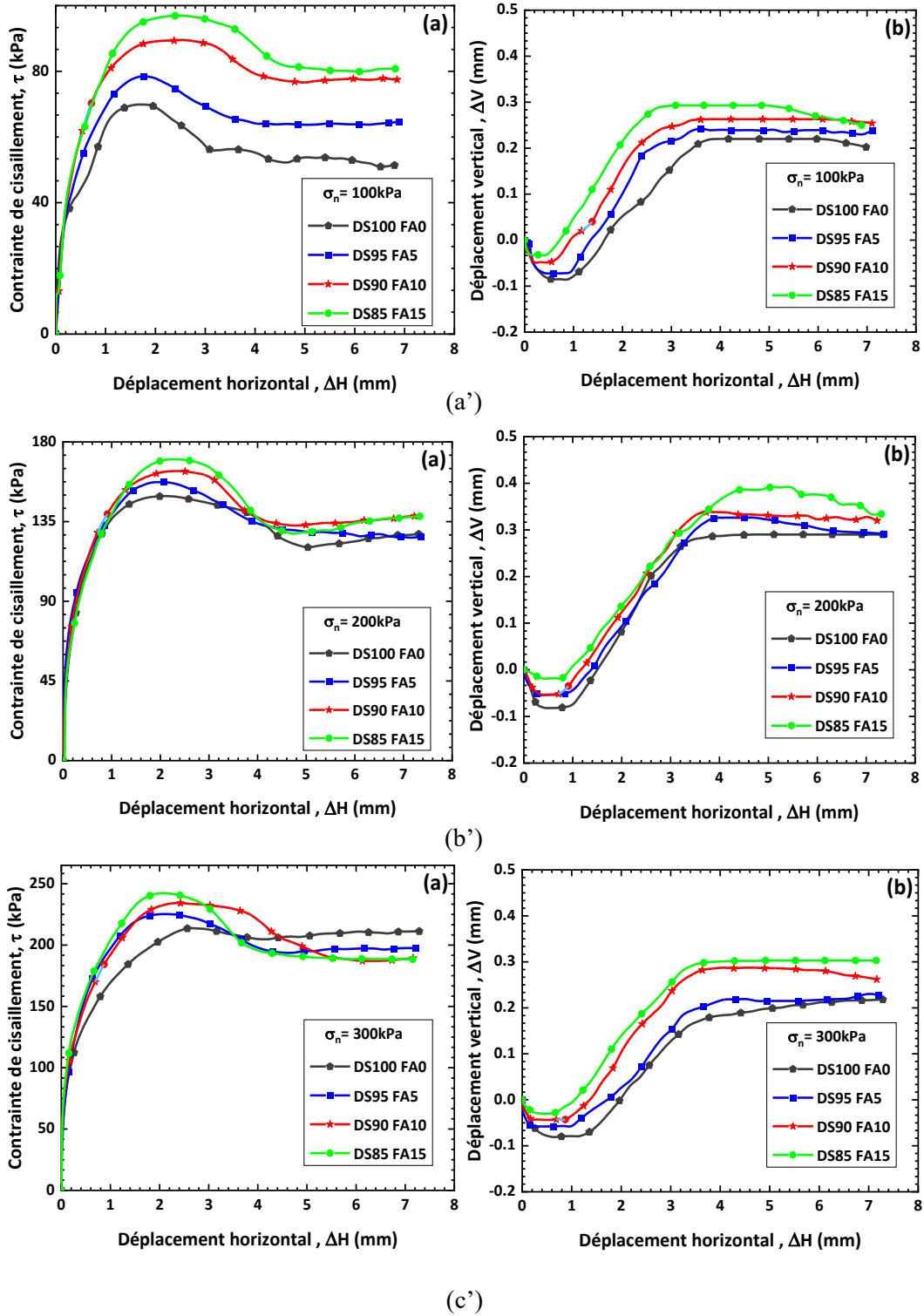


Figure 4.2 : Influence de (FA) sur la variation de ( $\tau$ ) des mélanges sable de dunes-cendres volantes ( $D_f = 87 \pm 3\%$ ) : (a')- $\sigma_n = 100$  kPa, (b')- $\sigma_n = 200$  kPa, (c')- $\sigma_n = 300$  kPa.

#### 4.2.1.3 Sable de carrière-cendres volantes

L'effet des cendres volantes sur la réponse mécanique de sable de carrière a été étudié par une série d'essais à la boîte cisaillement de Casagrande. Les échantillons étudiés sont reconstitués de sable de carrière mélangés avec des fractions de cendres volantes de (FA=0%, 5%, 10% et 15%) et soumis aux contraintes normales initiales de  $\sigma_n = 100\text{kPa}$ , 200 kPa et 300kPa. La Figure 4.3 (a) montre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal des échantillons étudiés. On note que la tendance obtenue illustre clairement une réponse typique d'un échantillon dense qui se traduit par une augmentation progressive de la contrainte de cisaillement jusqu'à atteindre une valeur maximale, suivi par une diminution légère par suite se stabilise à une valeur finale de contrainte de cisaillement résiduelle.

Il a été remarqué à travers les résultats obtenus que l'ajout des cendres volantes de (FA=0%, 5%,10%,15%) a induit une diminution importante de la résistance au cisaillement atteignant les valeurs maximales de ( $\tau_{\max} = 165.88\text{kPa}$ , 155.91 kPa, 149.94 kPa, 140.86 kPa) pour  $\sigma_n = 100\text{kPa}$ , ( $\tau_{\max} = 294.25\text{kPa}$ , 268.52kPa, 261.91kPa, 249.08kPa) pour  $\sigma_n = 200\text{kPa}$  et (400.13kPa, 394.94kPa, 384.36kPa, 361.83kPa) pour  $\sigma_n = 300\text{kPa}$  respectivement. Ce comportement peut être attribué au rôle des cendres volantes de diminuer l'ampleur des contacts entre les particules de sable et par conséquent, induisant ainsi à une diminution du processus d'enchevêtrement rendant la matrice du sable plus vulnérable au cisaillement avec l'ajout des cendres volantes pour les mélanges étudiés.

La Figure 4.3 (b) illustre l'évolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal des échantillons étudiés. D'après ces graphes, il est clair que pour toutes les contraintes normales initiales appliquées ( $\sigma_n = 100\text{kPa}$ , 200 kPa et 300kPa), l'ajout des cendres volantes a une influence remarquable sur la réponse mécanique en terme de contractance-dilatance, de manière que les échantillons de sable propre ont montré un comportement plus dilatant que celui des échantillons traités, de plus une amplification de la phase de contractance a été remarquée pour toute addition de fraction de 5% des cendres volantes. Ceci peut être expliqué par l'occupation des grains des cendres volantes de façon que les grains de sable soient éloignés les uns des autres rendant ainsi, les mélanges sable-cendres volantes plus contractive lors du chargement sous cisaillement direct.

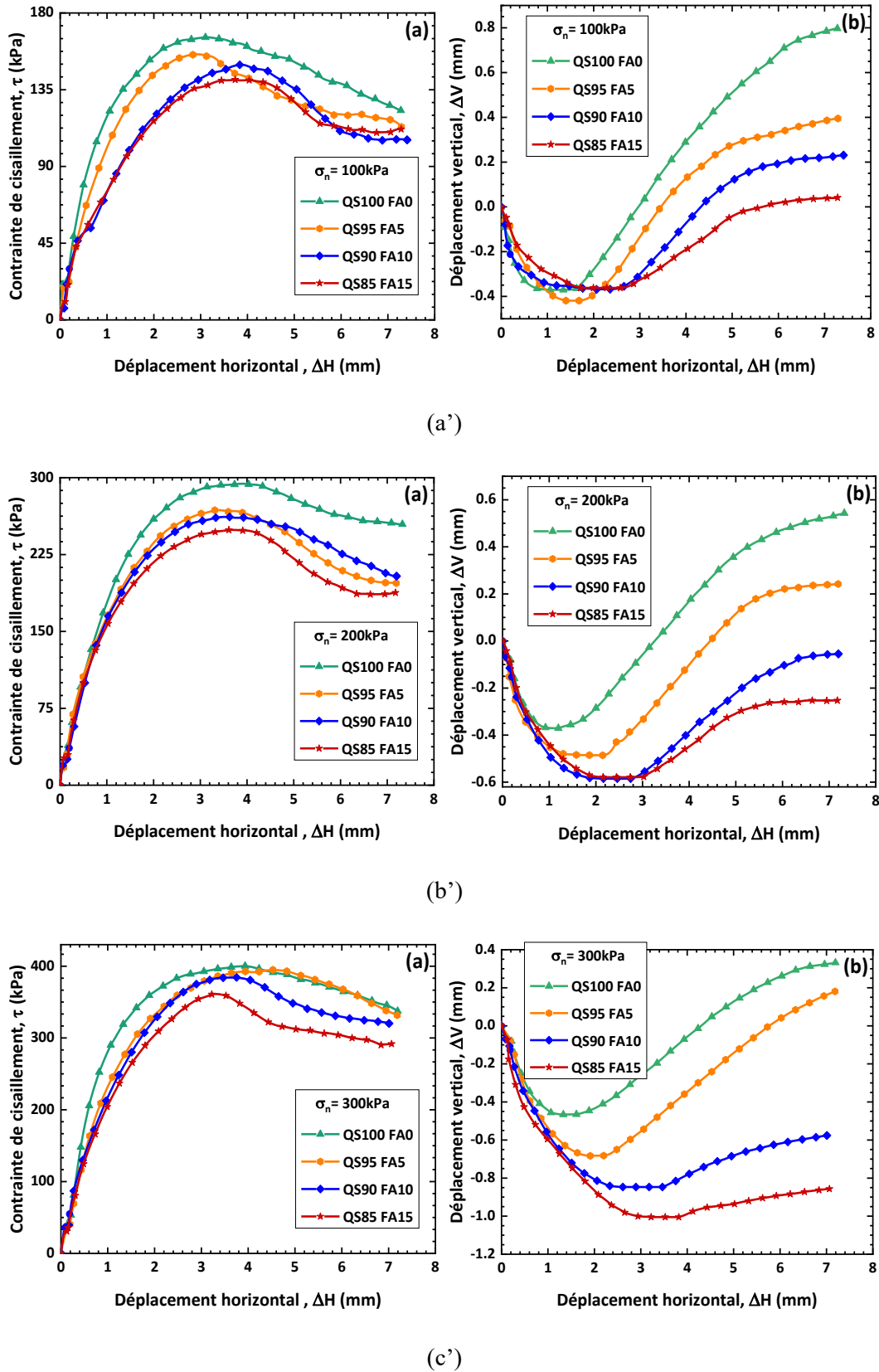


Figure 4.3 : Influence de (FA) sur la variation de ( $\tau$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r = 87 \pm 3\%$ ) : (a')- $\sigma_n = 100$  kPa, (b')- $\sigma_n = 200$  kPa, (c')- $\sigma_n = 300$  kPa.

#### 4.2.2 Evolution de l'angle de frottement maximal en fonction des caractéristiques de forme et taille des particules

L'objectif de cette partie est d'étudier l'impact des caractéristiques de forme et de taille des particules sur l'angle de frottement maximal des échantillons des mélanges sable de Chlef-cendres volantes, qui peut être calculé à l'aide des caractéristiques de l'essai de cisaillement direct : Le rapport de la contrainte de cisaillement maximale ( $\tau_{\max}$ ) sur la contrainte normale initiale ( $\sigma_n$ ) selon l'équation (4.1).

$$\phi_p = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_n} \quad (4.1)$$

La Figure 4.4 présente la variation de l'angle de frottement maximal " $\phi_p$ " en fonction des propriétés granulométriques (diamètre moyen, " $D_{50}$ ", diamètre efficace, " $D_{10}$ ", coefficient d'uniformité, " $C_u$ ") et contraintes normales initiales appliquées, " $\sigma_n$ " des mélanges sable-cendres volantes étudiés. Il peut être clairement observé que l'angle de frottement maximal " $\phi_p$ " pourrait être fortement affecté par les caractéristiques de distribution des particules ( $D_{50}$ ,  $D_{10}$  et  $C_u$ ). En effet, ce dernier augmente avec la diminution de la taille efficace et taille moyenne des grains pour tous les matériaux utilisés en considérant teneurs en cendres volantes variant de FA=0% à 15%. Cependant, l'angle de frottement maximal augmente toujours avec l'augmentation du coefficient d'uniformité des mélanges binaires sable de Chlef-cendres volantes. Cette tendance pourrait être expliquée par le fait que les particules de cendres volantes remplissant les vides entre les particules de sable de Chlef, rendant ainsi, les structures des mélanges plus denses qui se traduisent par de frottements plus importantes induisant par conséquence, une augmentation notable de l'angle de frottement maximal.

La Figure 4.5 illustre la relation entre les caractéristiques de forme des particules, la contrainte normale initiale et le pourcentage de cendres volantes. Comme premier aperçu, on peut voir que l'angle de frottement maximal semble être sensible aux variations des caractéristiques de forme des particules (l'angularité combinée " $A_{\text{com}}$ ", la sphéricité combinée " $S_{\text{com}}$ " et la régularité globale combinée " $OR_{\text{com}}$ ") ; ce qui signifie que ce dernier est étroitement lié à ces propriétés. On note que l'angle de frottement maximal augmente avec l'augmentation des caractéristiques de forme des particules (" $A_{\text{com}}$ ", " $S_{\text{com}}$ " et " $OR_{\text{com}}$ ") des assemblages testés. De plus, il est à signaler que toute addition de proportions de cendres volantes au sable de Chlef pourrait affecter les performances mécaniques des assemblages étudiés en termes caractéristiques de résistance au cisaillement. En effet, il a été constaté que l'ajout de 15% de cendres volantes au sable de Chlef présente un taux d'amélioration de 12.9 %, 7.8 % et 11.4 % de l'angle de frottement

maximal respectivement pour les contraintes normales initiales appliquées ( $\sigma_n=100$  kPa, 200 kPa et 300 kPa).

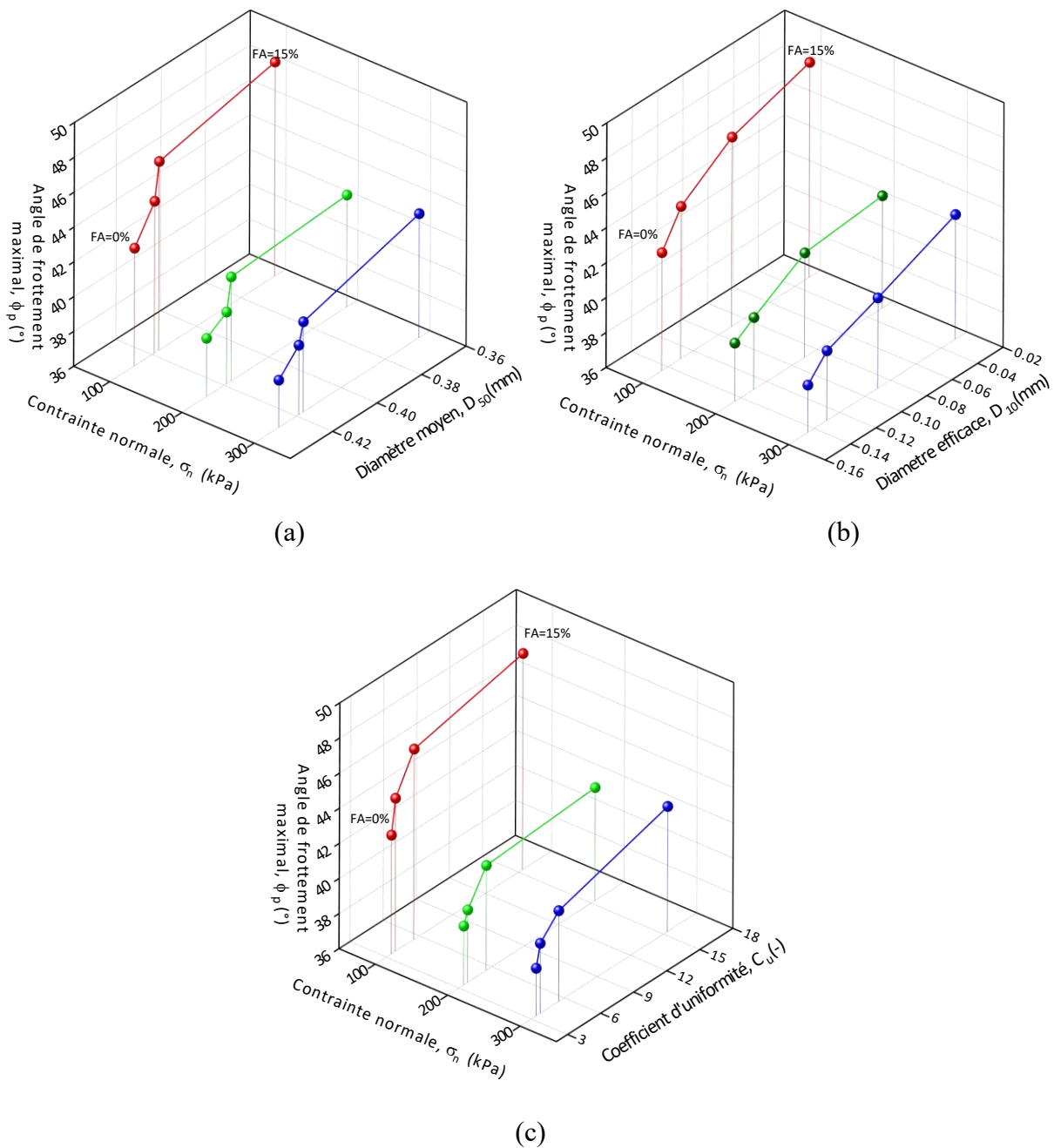


Figure 4.4 : Evolution de ( $\phi_p$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques granulométriques des mélanges sable de Chlef-cendres volantes , ( $D_r= 87\pm 3\%$ ).

(a) Diamètre moyen, (b) Diamètre efficace, (c) Coefficient d'uniformité.

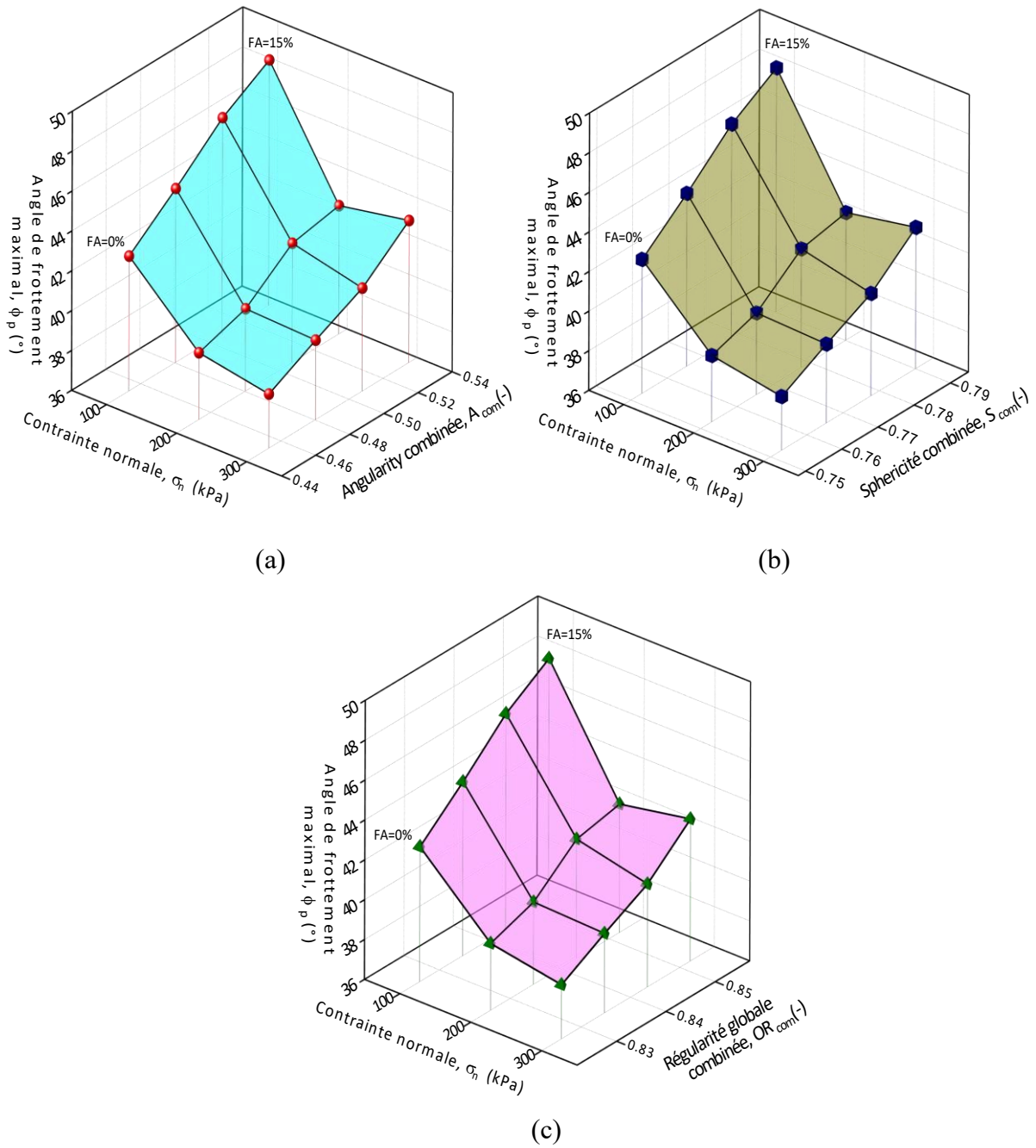


Figure 4.5 : Variation de ( $\phi_p$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques des particules des mélanges sable de Chlef-cendres volantes, ( $D_r = 87 \pm 3\%$ ).

(a) angularité combinée, (b) sphéricité combinée, (c) régularité globale combinée.

### 4.2.3 Variation de l'excès de l'angle de frottement en fonction des caractéristiques de forme et taille des particules

Les Figures (4.6 et 4.7) montrent la variation de l'excès de l'angle de frottement en fonction de la contrainte normale initiale ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques de forme et de taille des particules du sable de Chlef mélangé avec une poudre à base de cendres volantes pour des teneurs variant de (FA=0%) jusqu'à (FA=15%). Il est clairement observé sur les diagrammes à barres 3D que l'augmentation de la teneur en cendres volantes de FA=0% à FA=15% pour les contraintes normales initiales appliquées entraîne une augmentation significative de l'excès de l'angle de frottement des mélanges sable de Chlef-cendres volantes en fonction des propriétés de distribution des particules (" $D_{50}$ ", " $D_{10}$ " et " $C_u$ ") et des caractéristiques de forme des particules (" $A$ ", " $S$ " et " $OR$ ") des sols testés. Une analyse des résultats obtenus indique que les échantillons de mélanges sable de Chlef-cendres volantes (FA=15%) soumis à une contrainte normale initiale de ( $\sigma_n = 300$  kPa) présentent les valeurs les plus élevées de l'excès de l'angle de frottement par rapport à celles des autres mélanges sable de Chlef-cendres volantes (FA=0%, 5% et 10%) soumis aux deux autres contraintes normales initiales ( $\sigma_n = 100$  kPa et 200 kPa). Aussi, les valeurs les plus élevées des caractéristiques de forme des particules (angularité " $A$ ", sphéricité " $S$ " et régularité globale " $OR$ ") et du coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) présentent les valeurs les plus élevées de l'excès de l'angle de frottement par rapport à celles induites par les valeurs les plus faibles des propriétés granulométriques (" $D_{10}$  et  $D_{50}$ "). Ces résultats confirment le rôle déterminant des caractéristiques de forme et de taille des particules du sable de Chlef mélangé avec les cendres volantes dans l'évaluation de l'excès de l'angle de frottement des matériaux testés.

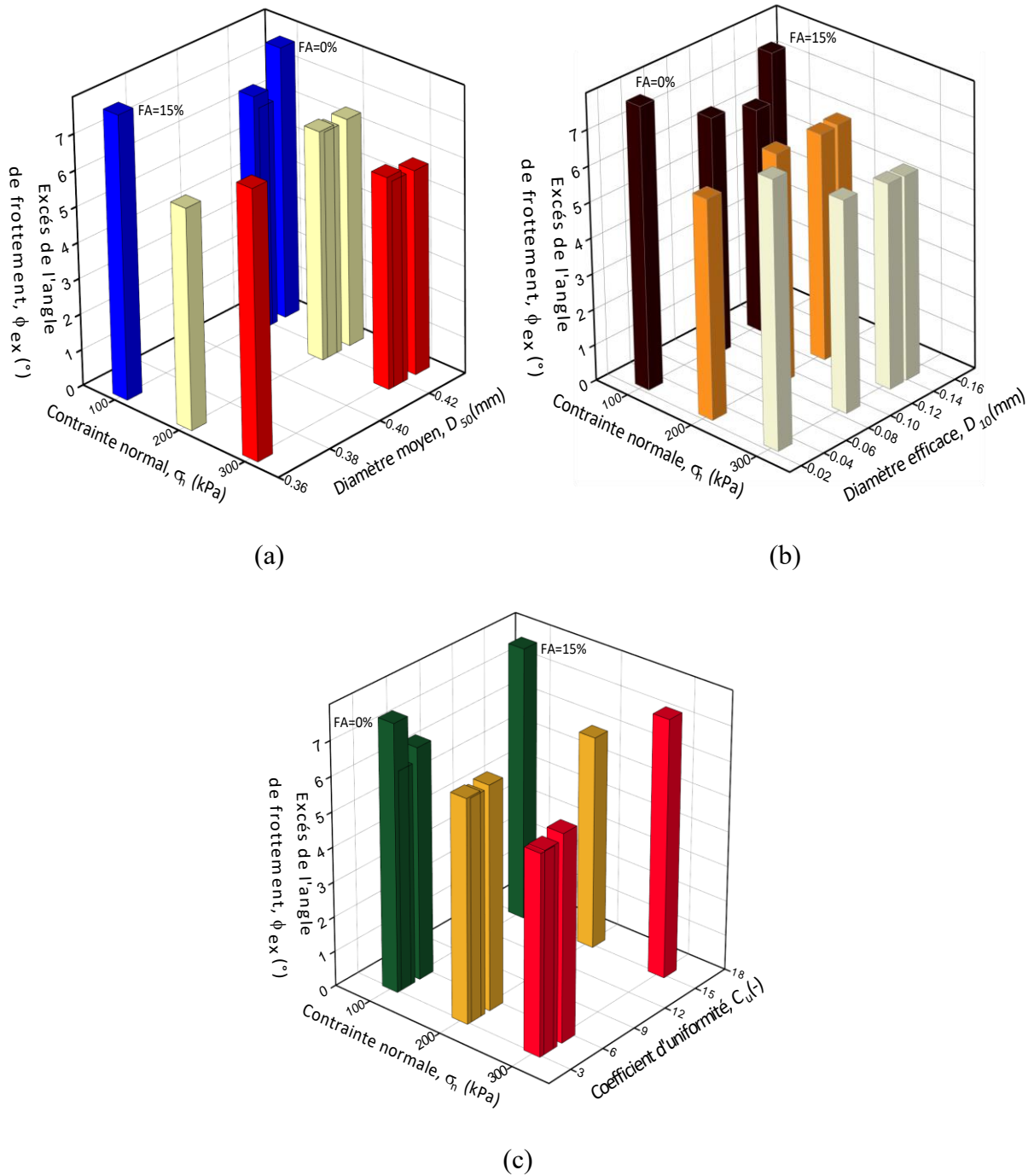


Figure 4.6 : Evolution de ( $\phi_{ex}$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques granulométriques des mélanges sable de Chlef-cendres volantes, ( $D_r = 87 \pm 3\%$ )

(a) Diamètre moyen, (b) Diamètre efficace, (c) Coefficient d'uniformité.

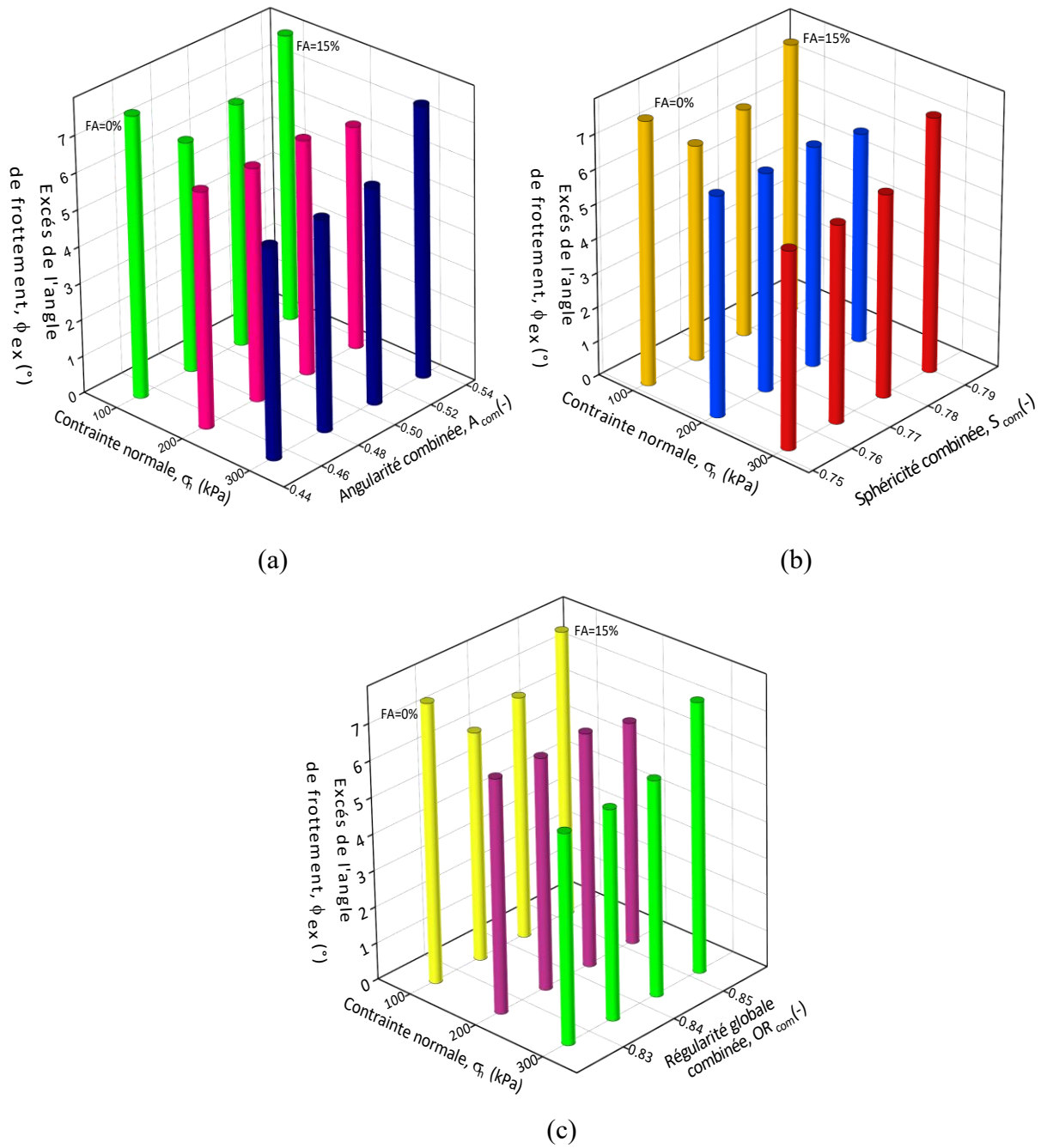


Figure 4.7 : Evolution de ( $\phi_{ex}$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques de forme des particules des mélanges sable de Chlef-cendres volantes, ( $D_r= 87\pm 3\%$ ) ; (a) angularité combinée, (b) sphéricité combinée, (c) régularité globale combinée.

#### 4.2.4 Evolution de l'angle de dilatance maximale en fonction des caractéristiques de forme et taille des particules

Les Figures (4.8 et 4.9) présentent les tracés 3D illustrant la variation de l'angle de dilatance maximale en fonction des caractéristiques de forme et taille des particules ( $D_{50}$ ,  $D_{10}$ ,  $C_u$ ,  $A_{com}$ ,  $S_{com}$  et  $OR_{com}$ ) et la contrainte normale initiale appliquée au cours des essais de cisaillement direct sur échantillons de mélanges sable de Chlef-cendres volantes pour teneurs variant de FA=0% à FA=15%. Comme on peut le voir sur ces Figures, chacune de ces propriétés a une influence notable sur l'angle de dilatance maximal des matériaux testés, de sorte que l'augmentation de la contrainte normale initiale ( $\sigma_n$ ) de 100 kPa à 300 kPa a été à l'origine d'une variation significative de l'angle de dilatance maximal (par exemple : de  $\Psi_{max} = 11.62^\circ$  à  $\Psi_{max} = 5.08^\circ$  et de  $\Psi_{max} = 17.21^\circ$  à  $\Psi_{max} = 7.47^\circ$  pour le sable de Chlef pur (FA=0%) et mélanges sable de Chlef-cendres volantes avec FA=15%, respectivement). En outre, il a été remarqué que l'augmentation des caractéristiques de forme des particules en termes (d'angularité combinée, de sphéricité combinée et de régularité combinée) a induit une augmentation significative de l'angle de dilatance maximale comme le montre la Figure 4.9.

De plus, les caractéristiques de taille des particules concernées par cette étude, tels que le diamètre moyen, le diamètre efficace et le coefficient d'uniformité, semblent être en corrélation avec les changements de l'angle de dilatance maximale. En d'autres termes, on peut conclure que la reconstitution des mélanges en changeant le pourcentage de cendres volantes a généré un changement remarquable des paramètres de forme et taille des grains, celui-ci se traduit par une augmentation du caractère dilatant de tous les mélanges étudiés. En fait, il a été constaté qu'il est possible de développer des équations de corrélation qui pourraient être extrêmement utiles pour lier l'angle de dilatance maximale ( $\psi_{max}$ ) et la contrainte normale  $\sigma_n$  avec le diamètre efficace " $D_{10}$ " [Equation (4.2) avec  $R^2 = 0.92$ ], le diamètre moyen " $D_{50}$ " [Equation (4.3) avec  $R^2 = 0.96$ ], le coefficient d'uniformité " $C_u$ " [Equation (4.4) avec  $R^2 = 0.95$ ], l'angularité combinée " $A_{com}$ " [Equation (4.5) avec  $R^2 = 0,89$ ], la sphéricité combinée " $S_{com}$ " [Equation (4.6) avec  $R^2 = 0,89$ ] et la régularité globale combinée " $OR$ " [Equation (4.7) avec  $R^2= 0,89$ ].

Les expressions suivantes ont pu être suggérées pour identifier la corrélation liant l'angle de dilatance maximale avec la contrainte normale initiale et les différents paramètres de taille et de forme des particules.

$$\Psi_{\max} = -1.21 \times 10^{-5} \times (\sigma_n)^2 + 127.68 \times (D_{10})^2 - 0.04 \times (\sigma_n) - 83.93(D_{10}) + 0.15 \times (D_{10}) \times (\sigma_n) + 22.76 \quad (4.2)$$

$$\Psi_{\max} = -1.21 \times 10^{-5} \times (\sigma_n)^2 - 958.37 \times (D_{50})^2 - 0.16 \times (\sigma_n) + 628.77 \times (D_{50}) + 0.35 \times (D_{50}) \times (\sigma_n) - 0.81 \quad (4.3)$$

$$\Psi_{\max} = -1.21 \times 10^{-5} \times (\sigma_n)^2 - 0.03 \times (C_u)^2 - 0.02 \times (\sigma_n) + 1.16 \times (C_u) - 0.002 \times (C_u) \times (\sigma_n) + 9.79 \quad (4.4)$$

$$\Psi_{\max} = -1.21 \times 10^{-5} \times (\sigma_n)^2 + 564.11 \times (A_{\text{com}})^2 + 0.05 \times (\sigma_n) - 480.69 \times (A_{\text{com}}) - 0.16 \times (A_{\text{com}}) \times (\sigma_n) + 115.25 \quad (4.5)$$

$$\Psi_{\max} = -1.21 \times 10^{-5} \times (\sigma_n)^2 + 2766.6 \times (S_{\text{com}})^2 + 0.245 \times (\sigma_n) - 4099.2 \times (S_{\text{com}}) - 0.36 \times (S_{\text{com}}) \times (\sigma_n) + 1531.27 \quad (4.6)$$

$$\Psi_{\max} = -1.21 \times 10^{-5} \times (\sigma_n)^2 + 5574.96 \times (OR_{\text{com}})^2 + 0.4 \times (\sigma_n) - 9114.296 \times (OR_{\text{com}}) - 0.51 \times (OR_{\text{com}}) \times (\sigma_n) + 3738 \quad (4.7)$$

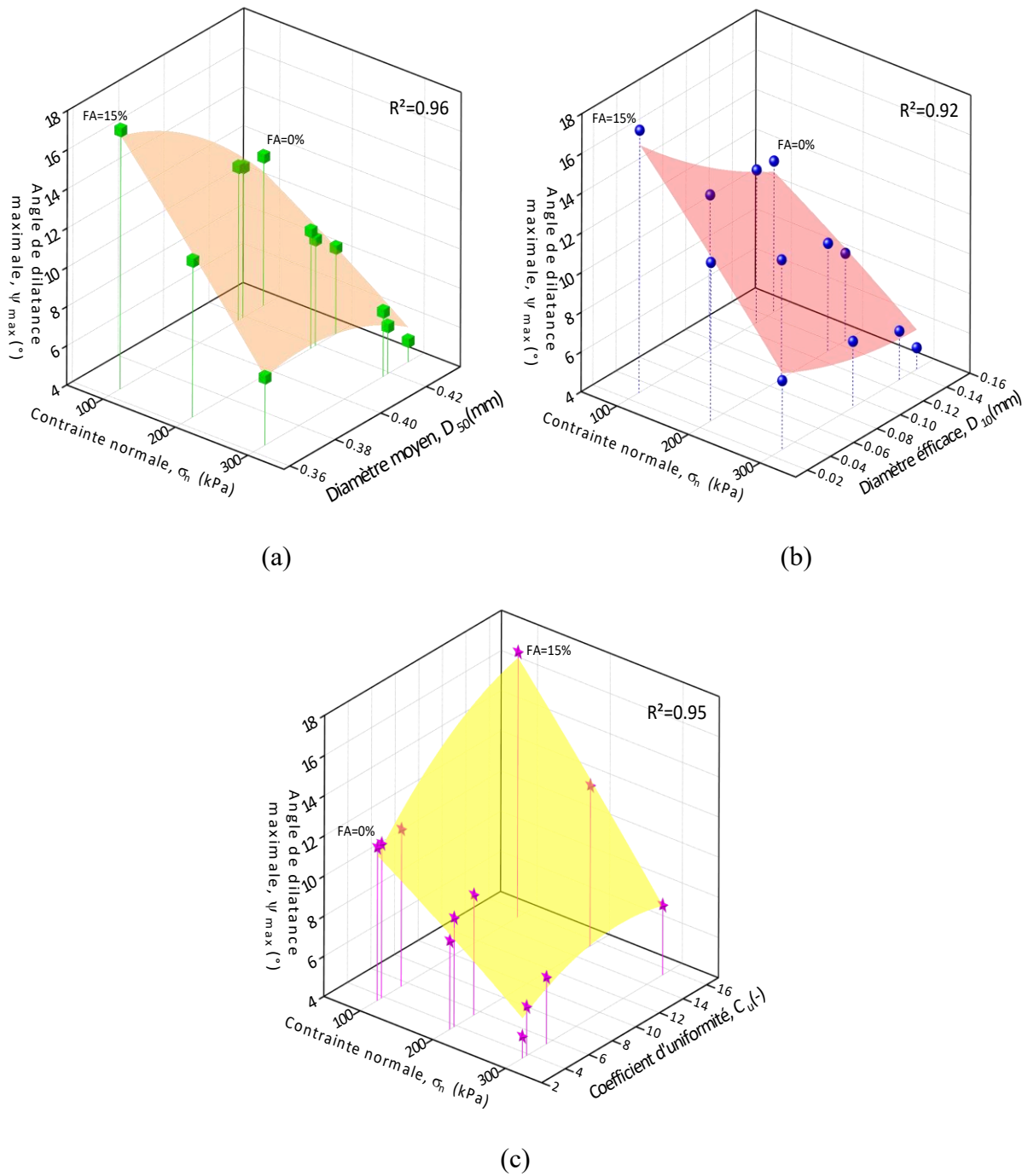


Figure 4.8 : Variation de ( $\Psi_{max}$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques granulométriques des mélanges sable de Chlef-cendres volantes, ( $D_r = 87 \pm 3\%$ ) ; (a) diamètre moyen, (b) diamètre efficace, (c) coefficient d'uniformité.

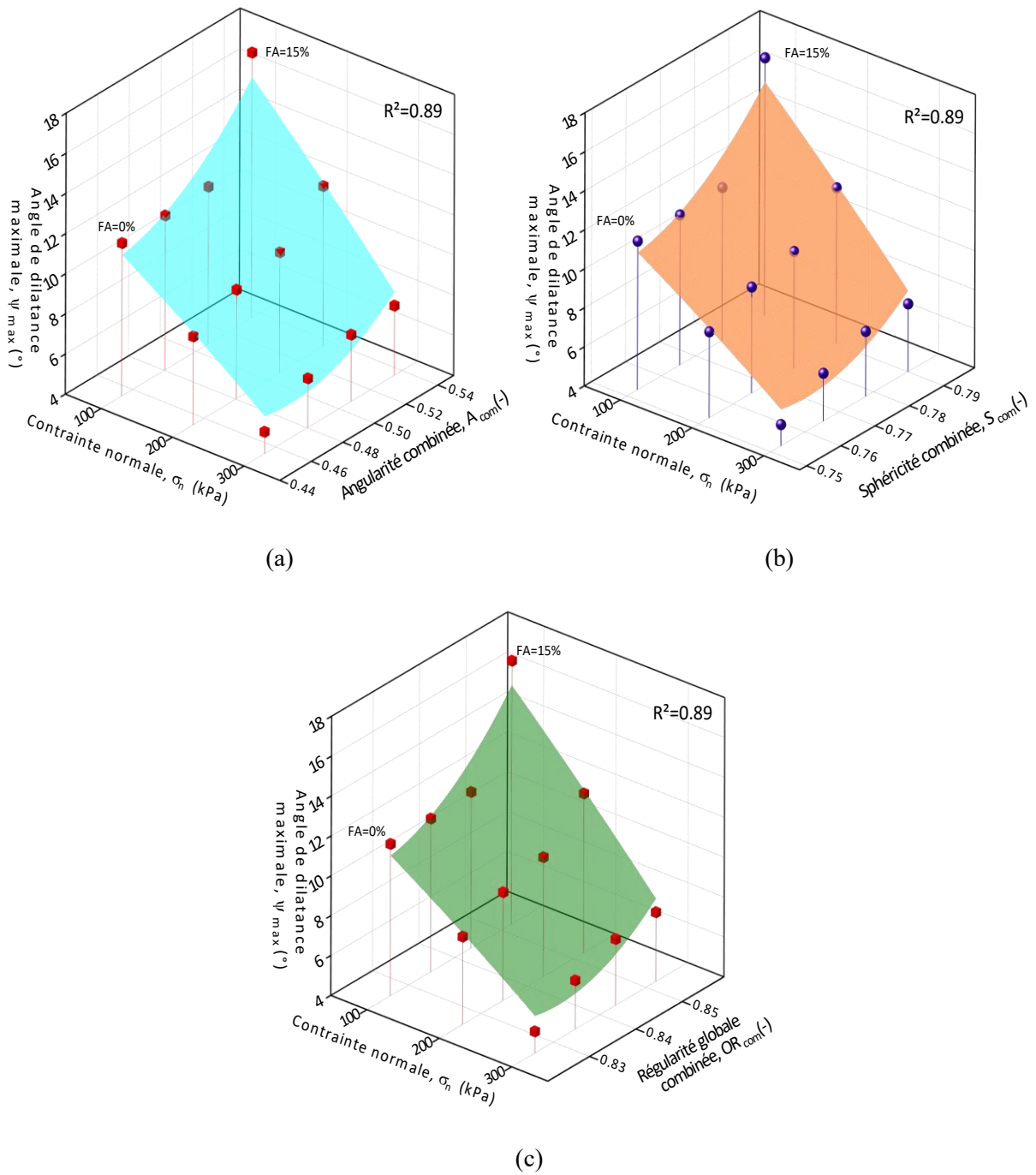


Figure 4.9 : Evolution de ( $\Psi_{max}$ ) en fonction de ( $\sigma_n$ ) et caractéristiques de forme des particules des mélanges sable de Chlef-cendres volantes, ( $D_r= 87\pm 3\%$ ).

(a) angularité combinée, (b) sphéricité combinée, (c) régularité globale combinée.

#### 4.2.5 Prédiction de l'angle de dilatance maximale en fonction des caractéristiques de forme et de taille des particules des assemblages testés

Les Figures (4.10 et 4.11) présentent les corrélations entre les valeurs mesurées de l'angle de dilatance maximale et celles prédites basées sur les propriétés granulométriques (le diamètre moyen "D<sub>50</sub>", le diamètre efficace "D<sub>10</sub>", le coefficient d'uniformité "C<sub>u</sub>") et les caractéristiques de forme des particules (l'angularité "A", la sphéricité "S" et la régularité globale "OR") des mélanges sable de Chlef-cendres volantes pour la gamme des teneurs en cendres volantes variant de FA=0% à FA=15%. Les valeurs prédites de l'angle de dilatance maximale des matériaux testés ont été déterminées par substitution des paramètres de forme et de taille des particules en plus de la contrainte normale "σ<sub>n</sub>" selon les équations précédentes (4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 et 4.7) respectivement. Les résultats générés indiquent que les valeurs prédites de l'angle de dilatance maximale sont en très bonnes corrélations avec celles mesurées, en considérant les propriétés de taille des particules, dans lesquelles les coefficients de détermination obtenus sont (R<sup>2</sup>=0.95) pour la taille efficace, (R<sup>2</sup>=0.96) pour la taille moyenne et (R<sup>2</sup>=0.97) pour le coefficient d'uniformité (Figure 4.10a, b et c). En outre, on note que les mêmes observations sont obtenues pour les caractéristiques de forme des particules, dans lesquelles les coefficients de détermination sont (R<sup>2</sup>=0.93) pour la régularité globale, (R<sup>2</sup>=0.67) pour l'angularité combinée, (R<sup>2</sup>=0.93) pour la sphéricité combinée (Figure 4.11a, b et c). Il est clair que les résultats obtenus prouvent et confirment la dépendance de la relation contrainte-dilatance des paramètres de forme et de taille des particules (D<sub>10</sub>, D<sub>50</sub>, C<sub>u</sub>, A, S et OR) des assemblages binaires de sable de Chlef et de cendres volantes étudiés. Les équations suivantes peuvent être utilisées pour évaluer l'angle de dilatance maximale prédit en fonction de l'angle de dilatance maximale mesuré :

$$\text{Pour la taille efficace (D}_{10}\text{)} : \quad \Psi_{\max} (P) = 0,9422 \times (\Psi_{\max} (M)) + 0.50741 \quad (4.8)$$

$$\text{Pour la taille moyenne (D}_{50}\text{)} : \quad \Psi_{\max} (P) = 0,98803 \times (\Psi_{\max} (M)) - 0,12831 \quad (4.9)$$

$$\text{Pour le coefficient d'uniformité (C}_{u}\text{)} : \quad \Psi_{\max} (P) = 0,97764 \times (\Psi_{\max} (M)) + 0.22421 \quad (4.10)$$

$$\text{Pour l'angularité combinée (A}_{\text{com}}\text{)} : \quad \Psi_{\max} (P) = 0,9405 \times (\Psi_{\max} (M)) + 0.58415 \quad (4.11)$$

$$\text{Pour la sphéricité combinée (S}_{\text{com}}\text{)} : \quad \Psi_{\max} (P) = 0,93984 \times (\Psi_{\max} (M)) + 0.59336 \quad (4.12)$$

$$\text{Pour la régularité globale (OR)} : \quad \Psi_{\max} (P) = 0,9405 \times (\Psi_{\max} (M)) + 0.58415 \quad (4.13)$$

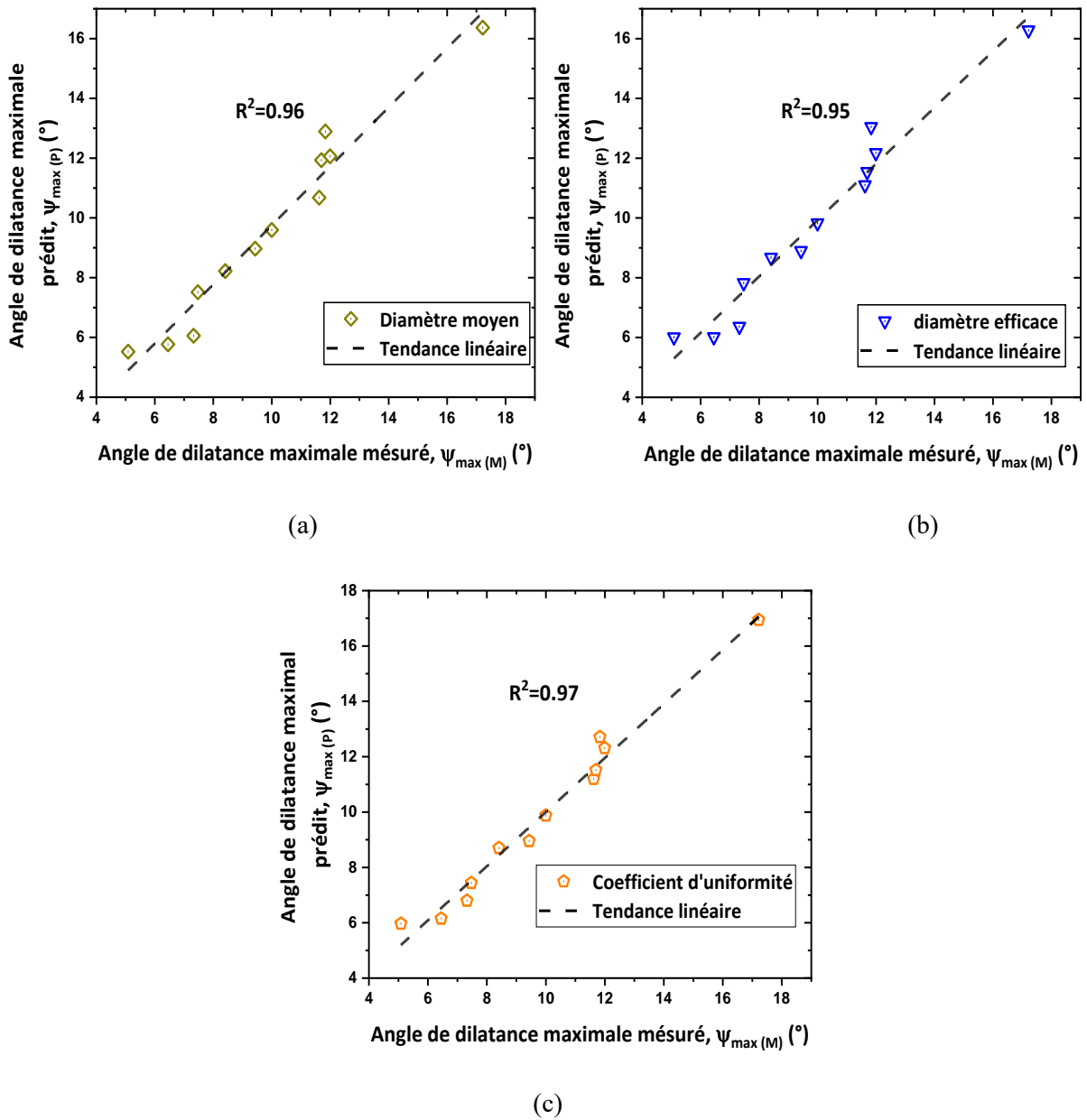


Figure 4.10 : Evolution de ( $\Psi_{\max(P)}$ ) par rapport à ( $\Psi_{\max(M)}$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r=87\pm 3\%$ ), (a) Diamètre moyen, (b) Diamètre efficace, (c) Coefficient d'uniformité.

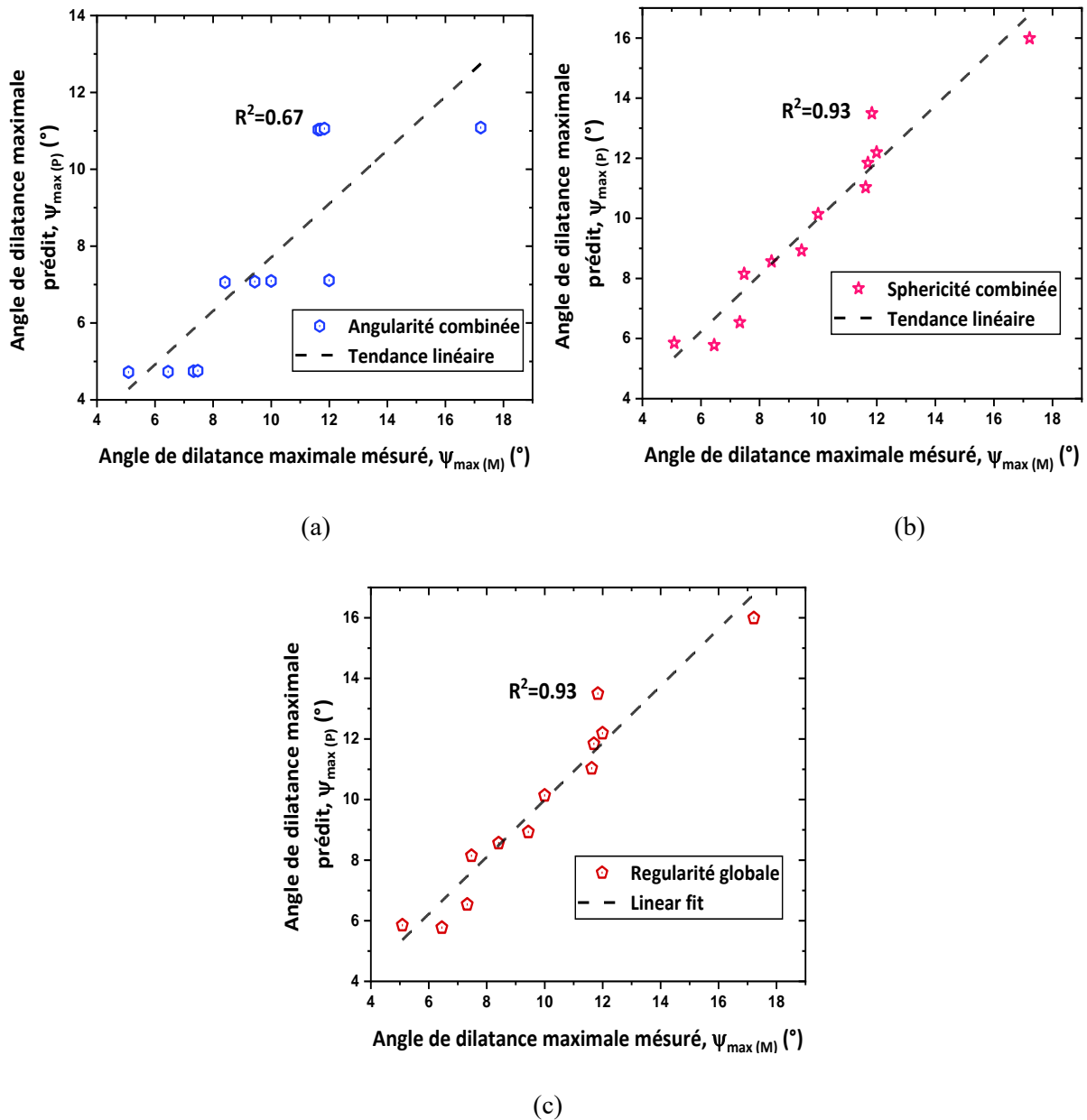


Figure 4.11 : Evolution de ( $\Psi_{\max(P)}$ ) par rapport à ( $\Psi_{\max(M)}$ ) des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r=87\pm 3\%$ ). (a) Angularité combinée, (b) Sphéricité combinée, (c) Régularité globale.

#### 4.2.6 Évaluation de l'équation de Bolton pour les mélanges sable de Chlef-cendres volantes

La relation contrainte-dilatance est une caractéristique intrinsèque des sols granulaires qui a été identifiée avec des paramètres essentiels (l'angle de frottement maximale " $\Phi_p$ ", l'angle de dilatance maximale " $\psi_{\max}$ " et le coefficient de l'équation de Bolton " $\alpha$ ") (Bolton 1986 et Xiao et al. 2017). Cependant, ils ont été rapportés que le coefficient de Bolton dépendait du type de sols tels que le sable et le sable limoneux. Ils ont constaté que ce paramètre est généralement

égale à  $\alpha=0,80$  pour le sable pur (Bolton 1986) et  $\alpha=0,436$  pour les mélanges sable-fines comme indiqué par (Xiao et al. 2017). D'autre part, l'évaluation de la relation contrainte-dilatance (en considérant le paramètre "  $\alpha$  " de l'équation de Bolton) du sable mélangé avec un liant tel que les cendres volantes est un sujet intéressant qui doit être évalué et analysé. À cette fin, la Figure 4.12 illustre la corrélation entre l'angle de frottement maximal et l'angle de dilatance maximale (valeurs mesurées) du sable de Chlef mélangé aux cendres volantes pour évaluer le coefficient de Bolton des matériaux testés. Cette corrélation peut être obtenue par l'équation suivante :

$$\phi_p = \alpha \psi_{\max} + \phi_{p0} \quad (4.14)$$

Où  $\phi_{p0}$  est l'ordonnée à l'origine de la ligne. On note que l'équation (4.14) est similaire à celle de Bolton. Il a été constaté à partir de la Figure 4.12 que le coefficient de dilatance est ( $\alpha=0.779$ ) pour tous les mélanges sable de Chlef-cendres volantes étudiés. L'interception de la ligne d'ajustement est égale à  $34,95^\circ$ . Le résultat obtenu prouve que le coefficient de dilatance de Bolton évalué peut toujours être appliqué aux mélanges sable de Chlef-cendres volantes. L'équation (4.14) peut être écrite comme suit :

$$\phi_p = 0.779 \times (\psi_{\max}) + 34.95 \quad (4.15)$$

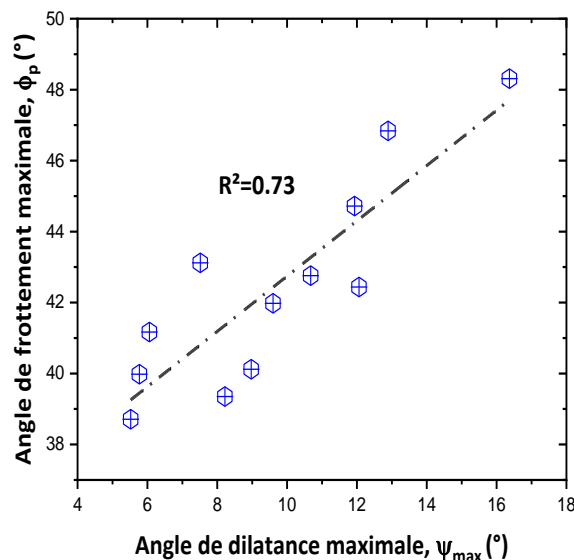


Figure 4.12 : Variation de ( $\phi_p$ ) en fonction de ( $\Psi_{\max}$ )des mélanges sable de Chlef-cendres volantes ( $D_r= 87\pm 3\%$ ).

### 4.3 Conclusion

Les relations contrainte-dilatance du sable de Chlef mélangé avec des cendres volantes sont étudiées par une série d'essais de cisaillement direct. Les échantillons sont reconstitués avec une densité relative initiale ( $D_r = 87 \pm 3\%$ ) et soumis à trois différentes contraintes normales initiales ( $\sigma_n = 100$  kPa, 200 kPa et 300 kPa). Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit :

- Les courbes contrainte-déplacement horizontal montrent que la contrainte de cisaillement à une contrainte normale initiale donnée pour les mélanges de sable de Chlef, sable de dune et sable de carrière avec une teneur en cendres volantes plus élevée sont plus grande que celle des mélanges avec une teneur en cendres volantes plus faible. Cela signifie que les proportions de cendres volantes induisent systématiquement une amélioration des performances de cisaillement des matériaux testés. Le résultat de cette étude peut être expliqué par l'occupation des vides entre les grains de sable par les particules de cendres volantes facilitant, ainsi, le glissement et le roulement des grains de sable conduisant à une augmentation de l'enchevêtrement qui résulte finalement en une structure de sol plus résistante.
- Les résultats obtenus montrent que l'angle de frottement maximal " $\phi_p$ " pourrait être fortement affecté par la variation des caractéristiques de taille et de forme des particules (la taille moyenne " $D_{50}$ ", la taille effective " $D_{10}$ ", le coefficient d'uniformité " $C_u$ ", l'angularité " $A$ ", la sphéricité " $S$ " et la régularité globale " $OR$ "). En effet, on note que l'angle de frottement maximal " $\phi_p$ " augmente avec la diminution de ( $D_{10}$  et  $D_{50}$ ) et qu'il augmente avec l'augmentation de  $C_u$ ,  $A$ ,  $S$  et  $OR$ ) pour les mélanges sable Chlef-cendres volantes testés.
- L'analyse des tendances obtenues indique que les paramètres de taille et de forme des particules de cette étude semblent être plus appropriés pour être corrélés avec les changements de l'angle de dilatance maximale. On constate également qu'il est possible de générer des équations de corrélation qui pourraient être extrêmement utiles pour relier à la fois l'angle de dilatance maximale ( $\psi_{max}$ ) et la contrainte normale initiale ( $\sigma_n$ ) avec les caractéristiques de taille et de forme des particules pour les mélanges sable de Chlef-cendres volantes. De plus, les valeurs prédites de l'angle de dilatance maximale sont très bien corrélées avec celles mesurées considérant la taille et les propriétés de forme des particules des matériaux utilisés.

- Il ressort de l'étude de la relation entre l'angle de frottement à l'état maximal et l'angle de dilatance maximale du sable de Chlef mélangé à des cendres volantes que le coefficient de l'équation de Bolton est ( $\alpha = 0.779$ ) avec un intercepte de la ligne d'ajustement égale à  $34.95^\circ$  pour les mélanges sable de Chlef-cendres volantes testés. Les résultats obtenus confirment que le coefficient de contrainte-dilatance de Bolton proposé peut toujours être appliqué aux mélanges examinés.

## **Chapitre 5**

# **Influence des dimensions et de la morphologie des particules sur la compressibilité des sables traités aux cendres volantes**

*Dans ce chapitre, on traite l'impact des caractéristiques de forme et de taille des grains sur la compressibilité des mélanges sable-cendres volantes via un programme expérimental basé sur des essais de compressibilité à l'œdomètre sur trois différents types de sables de formes distinctes (sable de dune "arrondi", sable de Chlef "semi-arrondi" et sable de carrière "angulaire"). Les échantillons de mélanges sable-cendres volantes ont été reconstitués avec deux densités relatives initiales ( $D_r = 25 \pm 3\%$ ) et ( $D_r = 87 \pm 3\%$ ) et traités aux cendres volantes suivant des pourcentages de (FA=0%, 5%, 10% et 15%).*

## **5.1 Introduction**

La compressibilité des sols sableux pose un énorme défi lors de la conception des infrastructures de transport tels que les autoroutes, les ponts, les chemins ferroviaires ...etc... En effet, le comportement des sables (sols grenus) vis à vis des charges verticales est généralement moins compliqué que celui des argiles (sols fins) à cause de l'absence de phénomène du gonflement (Zhang et al., 2023) , par contre, le phénomène de liquéfaction peut souvent apparaître dans le cas des chargements monotones et cycliques des sols sableux (Belkhatir et al., 2010; Della et al., 2010; Hazout et al., 2017), à cause de la grande aptitude de structure sableuse saturée à se réarranger. Il est très vital de comprendre le mécanisme de reconstitution de la microstructure sableuse lors du chargement sous cisaillement, ainsi que les différents facteurs qui peuvent influencer le déroulement de cette phase. Le comportement de compressibilité des mélanges sableux peut être divisé en trois types en fonction de la proportion des fines contenues dans le mélange testé. Pour les faibles fractions des fines, le comportement est généralement régi par la rupture des grains, tandis que dans le cas des fractions fines élevées, le comportement sous sollicitation œdométrique est régi par l'effondrement des pores. Ces deux différents comportements pourraient être interférés si des fractions de fines moyennes étaient adoptées (H. Wang et al., 2022). La compressibilité du sable de Chlef a été étudiée par (Nougar et al., 2022), dans leur étude ou ils ont affirmé que les caractéristiques granulométriques telles que le diamètre efficace, le diamètre moyen, le coefficient d'uniformité pourraient être parmi les paramètres qui impactent la compressibilité des sols sableux. De plus et dans le même le contexte, plusieurs travaux de recherche telles que ceux de (Azaiez et al., 2021a; Cherif Taiba et al., 2016; Doumi et al., 2020; Hazout et al., 2023) ont étudié l'effet des paramètres granulométriques sur le comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-fines En effet, leurs résultats publiés confirment que le comportement mécanique des matériaux testés est fortement lié à ses caractéristiques granulométriques,

Les sols propres ne reflètent pas toujours le comportement réel des sols naturels, ce dernier ne peut être obtenu qu'en exécutant des tests sur un sol naturel ou des matériaux similaires qui sont généralement reconstitués en laboratoire en utilisant différentes techniques de préparation et des mélanges de sols bien définis. (Coop & Atkinson, 1993) ont observé que l'introduction de 24% de fines non plastiques dans le sable carbonaté reconstitué a conduit à une diminution de l'indice des vides par rapport au sable propre et à une ligne de compression moins inclinée. Les différences observées ont été attribuées aux variations des caractéristiques granulométriques des deux types de mélanges examinés, ainsi qu'à la nature des fines. Plus

précisément, les sables carbonatés sont caractérisés par une angularité et un taux de vide initial élevé. En revanche, l'effet de la teneur en fines sur la compressibilité des sols sableux de Chlef a été étudié par (Bouri et al., 2021), où ils ont déclaré que l'ajout d'une teneur en limon (dans la plage de 0 %-40 %) à un sable hôte (sable de Chlef) a induit une augmentation importante du coefficient de compressibilité. En outre, (Nougar et al., 2022) ont étudié l'effet du limon et des argiles plastiques sur la compressibilité du sable de Chlef, les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la teneur en limon ou en argile du sable hôte a induit une amplification du coefficient de compressibilité, néanmoins, l'ampleur de la compressibilité induite par l'ajout d'argile était plus prononcée que celle présentée par l'addition de la fraction du limon, en raison du caractère contractant du sable argileux.

Il est à signaler que l'effet des caractéristiques de forme des grains a toujours été à l'origine d'induire une variation notable de la compressibilité des sols grossiers qui devrait également être pris en considération. En effet cette dernière peut être influencée par des facteurs tels que la granulométrie, la minéralogie, la forme des grains et la technique de préparation des échantillons (Ishihara, 1993). (Zhang et al., 2020) ont étudié l'effet des caractéristiques de forme sur la compressibilité des sols sableux à travers l'exécution d'une série d'essais de compression unidimensionnelle sur quatre types de sables. Leurs résultats ont révélé que le granite complètement décomposé (le matériau le plus irrégulier parmi les sables testés) a montré des valeurs d'indice des vides initial les plus élevées parmi les autres types de sables caractérisés par des formes les plus régulières. Ils ont trouvé que les sables les plus réguliers ont montré un comportement stable en comparaison à celui induit par les sables les moins réguliers. Ceci implique la dépendance du phénomène de la compressibilité des sables des caractéristiques de forme des grains.

Sur la base des résultats intéressantes rapportées sur l'influence caractéristiques des particules sur la compressibilité des sols sableux, tels que l'effet de forme et de taille des grains sur la réponse mécanique en termes de compressibilité des sables et afin d'atteindre l'objectif de cette étude expérimentale, une campagne d'essais œdométriques a été effectuée sur trois différents sables de formes et de tailles des grains distinctes traités avec des cendres volantes considérant des teneurs variant de FA= 0% à FA= 15% par pas de 5%. On note que la présente étude comporte des séries d'essais de compression à l'œdomètre effectués sur échantillons reconstitués avec deux densités relatives initiales ( $Dr=25\pm3\%$  et  $Dr=87\pm3\%$ ).

## 5.2 Résultats et discussion

### 5.2.1 Comportement œdométrique des sables étudiés

Afin d'étudier l'effet des caractéristiques de forme des grains et de teneur en cendres volantes sur la réponse mécanique sous chargement œdométrique des échantillons reconstitués à partir de trois types de sables ayant différentes formes de particules (sable de dune arrondi "DS", sable de Chlef semi-arrondi "CS" et sable de carrière anguleux "QS"). Pour atteindre cette objective, une série d'essais de compression œdométrique a été exécutée sur échantillons reconstitués avec deux densités relatives initiales ( $D_r=25\pm3\%$  et  $D_r=87\pm3\%$ ). Figure 5.1 montre l'évolution de l'indice des vides global en fonction de la pression œdométrique pour trois échantillons de mélanges sable-cendres volantes. Comme le montre clairement les Figures (5.1a, 5.1b et 5.1c), on note que l'ampleur de la compressibilité est nettement visible pour les échantillons lâches en comparaison à ceux reconstitués à l'état dense (Figures 5.1a', 5.1b' et 5.1c'). Cette constatation pourrait s'expliquer par la différence des indices des vides initiaux entre les mêmes échantillons, en d'autres termes, plus l'échantillon est lâche, plus il est susceptible d'être comprimé. Cependant, l'impact des cendres volantes sur la compression œdométrique pour l'ensemble des échantillons est assez remarquable, de telle sorte que l'ajout des fractions des cendres volantes suivant des teneurs variant de  $FA=0\%$  à  $FA=15\%$  par pas de  $5\%$  a induit une réduction de la compressibilité des matériaux étudiés d'une manière significative. Cette réponse pourrait être expliquée par le rôle des particules de cendres volantes rendant ainsi, les échantillons de mélanges sable-cendres volantes plus rigides en raison de leur état de durcissement dans des conditions humides.

Les six tracés présentent une tendance à la compression, c'est-à-dire que l'indice des vides diminue avec l'augmentation de la pression œdométrique de  $12,75\text{ kPa}$  à  $815,8\text{ kPa}$ , mais la manière dont la diminution se produit pour les trois sables est un peu distincte. En effet, le sable de dune présente des valeurs de l'indice des vides les plus faibles, cela se justifie par le fait qu'il est caractérisé par la taille maximale des grains la plus faible ( $D_{\max} = 0,63\text{ mm}$ ) en comparaison avec les deux autres types de sables. On note que pour les échantillons initialement lâches ( $D_r=25\pm3\%$ ), l'indice des vides global varie de  $0,67$  à  $0,59$  pour l'échantillon de sable de dune propre tandis qu'il oscille de  $0,62$  à  $0,58$  pour l'échantillon traité avec une teneur en cendres volantes de  $FA=15\%$ . Enfin et dans le même contexte, l'indice des vides global diminue de  $0,52$  à  $0,47$  pour le sable non traité et de  $0,45$  à  $0,44$  pour les échantillons reconstitués à l'état initialement dense ( $D_r=87\pm3\%$ ) et traités avec  $FA=15\%$ .

Il est noté que le sable de Chlef a montré une réponse similaire, où le traitement avec la fraction des cendres volantes de FA= 15% a induit un taux de diminution de l'indice des vides de 10.17% à 5.1% pour les échantillons lâches ( $Dr=25\pm3\%$ ) et de 7.92% à 6.35% pour les échantillons denses ( $Dr=87\pm3\%$ ) en comparaison avec le sable propre de Chlef. Pour le sable de carrière, l'indice des vides a diminué de 0,12 pour l'échantillon propre et de 0,05 pour l'échantillon traité (FA= 15%) à l'état lâche ( $Dr=25\pm3\%$ ), tandis que le traitement aux cendres volantes a l'état initial dense ( $Dr=87\pm3\%$ ) a induit une diminution de 0,03 et 0,02 pour les échantillons propre et traité respectivement.

On note que les tendances obtenues peuvent être résumées en plusieurs points clés. Le sable de dune a montré la plus faible compressibilité parmi les trois types de sable en raison de sa structure uniforme présentant un diamètre maximal plus faible. En revanche, le sable de Chlef a montré un caractère compressible plus important, probablement influencée par deux facteurs : la taille maximale des particules plus grande que celle du sable de dune et la forme semi-arrondie de particules. Cependant, les échantillons de sable de carrière ont montré une ampleur de tassement la plus élevée en comparaison aux deux autres sables. Cela peut être attribué à la combinaison des deux facteurs qui sont le plus grand diamètre maximal et la forme angulaire des particules. Ces deux facteurs sont à l'origine de créer des vides supplémentaires relativement considérables entre les grains induisant ainsi, des textures d'échantillons de sable de carrière plus sensibles aux tassements sous chargement œdométrique.

Quant à l'influence des cendres volantes sur les taux de déformation par tassement, on note que les résultats obtenus démontrent clairement que le traitement des différents sables testes (sable de dune, sable de Chlef et sable de carrière) avec des ajouts de cendres volantes (FA=15%) réduit d'une manière significative leur taux de compressibilité. En outre, les échantillons après chargement subissent un phénomène de cimentation qui les rend plus résistants à la déformation verticale. En effet, cette cimentation a été à l'origine de la diminution des taux de compressibilité sous chargement œdométrique.

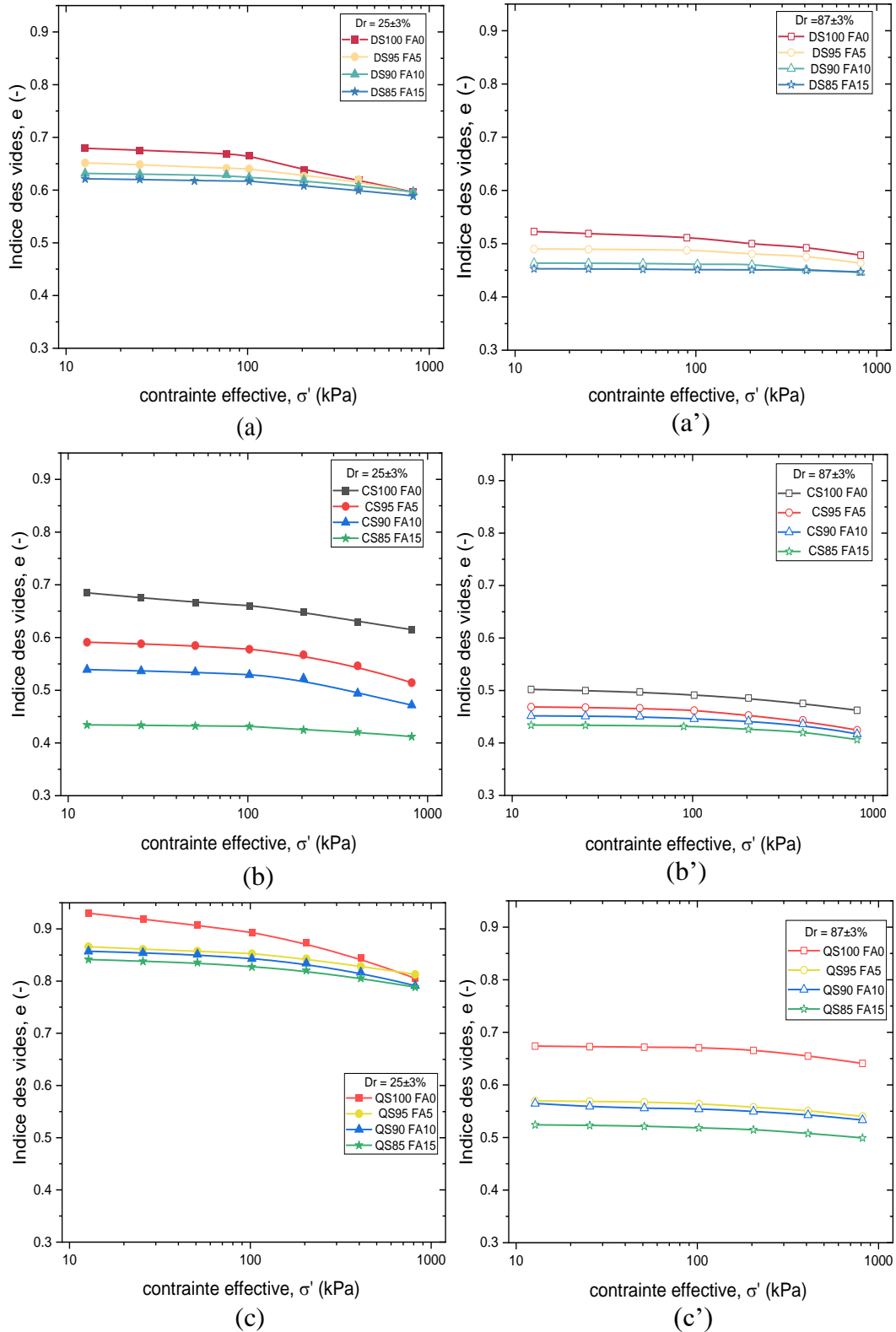


Figure 5.1: Évolution de  $(e)$  en fonction de  $(\sigma')$  pour les mélanges sables- cendres volantes

- $Dr=25\pm3''$  : (a) Sable de dune (b) Sable de Chlef (c) Sable de carrière.
- $Dr=87\pm3''$  : (a') Sable de dune, (b') Sable de Chlef (c') Sable de carrière.

## 5.2.2 Effet des paramètres granulométriques sur la compressibilité des sables testés

### 5.2.2.1 Coefficient d'uniformité.

Figure 5.2 présente la variation du coefficient de compressibilité en fonction du coefficient d'uniformité pour trois types de sables (sable de dune "DS", sable de Chlef "CS" et sable de carrière "QS") à l'état lâche et dense. Les résultats obtenus montrent que, quel que soit le type de sable, le comportement mécanique sous chargement œdométrique des différents mélanges sable-cendres volantes est presque similaire. Ainsi, une augmentation de la teneur en cendres volantes a été à l'origine d'une augmentation du coefficient d'uniformité, induisant par conséquent une réduction du coefficient de compressibilité. Cette tendance est contrastée aux résultats trouvés par (Fan et al., 2022) qui ont rapporté une augmentation de la compressibilité en fonction du coefficient d'uniformité des mélanges étudiés (sable-limon). L'équation polynomiale (équation 5.1) peut être utilisée pour déterminer le coefficient de compressibilité en fonction du coefficient d'uniformité. Les valeurs des coefficients a, b, c ainsi que les coefficients de détermination correspondant aux échantillons de mélanges reconstitués aux différentes états de densité sont présentés au Tableau 5.1

$$C_c = a \times (FA) - b \times (FA)^2 + c \quad (5.1)$$

Tableau 5.1 : Valeurs des coefficients a,b,c and R<sup>2</sup> correspondant à l'équation (5.1)

	Dr= 25±3%			Dr= 87±3%		
	DS-FA	CS-FA	QS-FA	DS-FA	CS-FA	QS-FA
<b>A</b>	-0.00742	-0.03285	-0.01321	-0.00353	-0.01411	-0.0059
<b>b</b>	2.00096E-4	0.0015	2.88636E-4	1.30899E-4	6.6793E-4	1.32239E-4
<b>c</b>	0.09858	0.1816	0.14613	0.03954	0.07485	0.06333
<b>R<sup>2</sup></b>	0.84	0.80	0.88	0.97	0.74	0.96

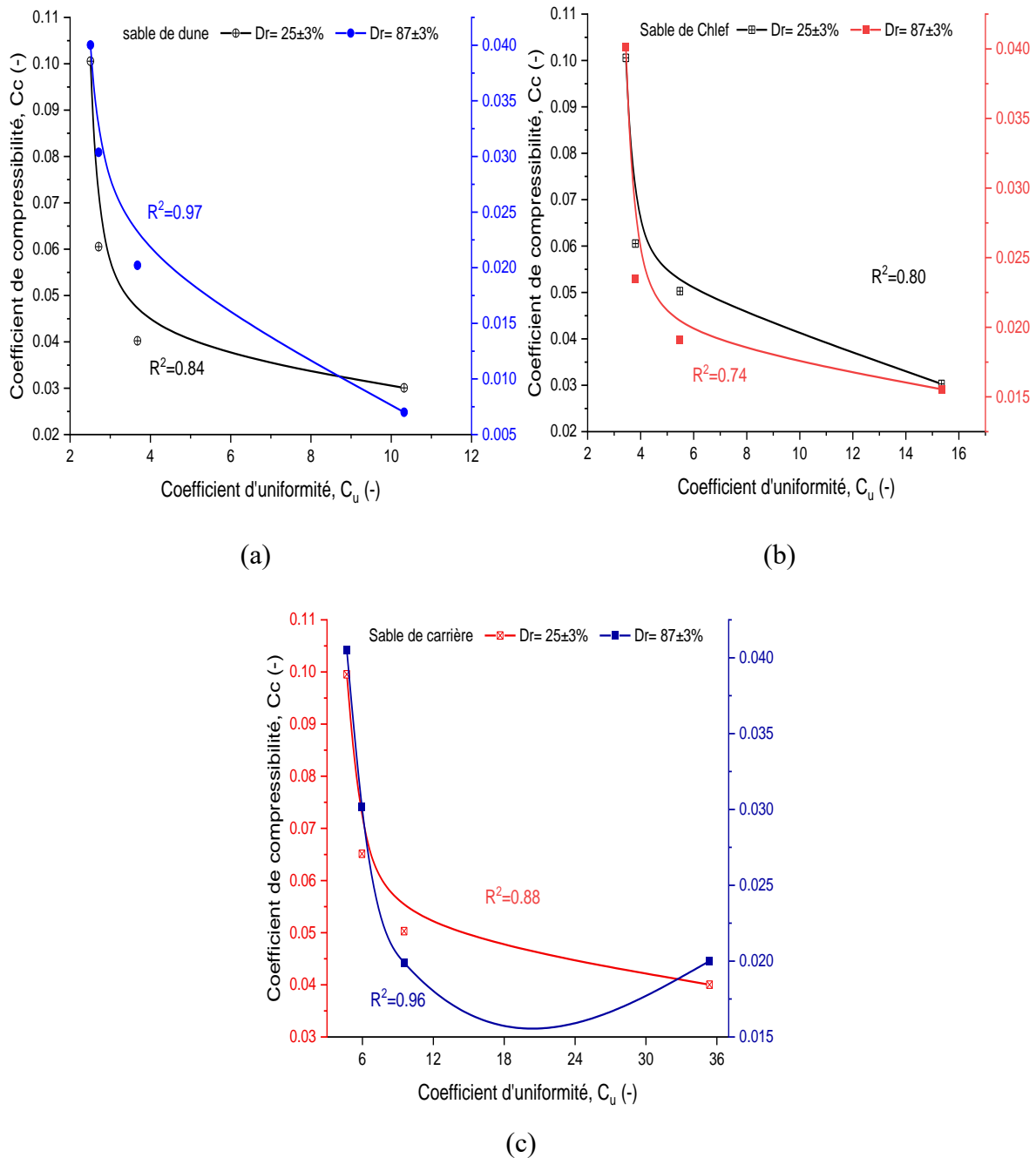


Figure 5.2 : Evolution de ( $C_c$ ) en fonction de ( $C_u$ ) :  
Sable de dune, (b) Sable de Chlef (c) Sable de carrière.

### 5.2.2.2 Diamètre efficace et diamètre moyen.

La littérature publiée a toujours indiqué que la granulométrie des sols représente un paramètre déterminant influençant le comportement mécanique sous sollicitations œdométriques, en particulier, l'ampleur de la compressibilité (Bouri et al., 2021). Par conséquent, cette étude examine l'impact du diamètre efficace ( $D_{10}$ ) et du diamètre moyen ( $D_{50}$ ) de trois types de sables distincts afin d'élucider l'importance de ces paramètres clés sur la compressibilité des sables traités avec des fractions de cendres volantes. Figures 5.3 et 5.4

présentent la variation du coefficient de compressibilité en fonction du diamètre efficace et du diamètre moyen, respectivement. Les tendances obtenues révèlent que, quelle que soit la densité relative initiale, une augmentation du diamètre efficace ( $D_{10}$ ) et du diamètre moyen ( $D_{50}$ ) induit un décrétement notable de l'ampleur de la compressibilité des mélanges testés. Cette diminution peut être attribué au rôle des particules du cendres volantes de contribuer au changement de la granulométrie globale des mélanges résultant ainsi, a une variation de la réponse des mélanges vis-à-vis la compressibilité uni-axiale. On note que cette constatation contraste avec les résultats rapportés par (Nougar et al., 2022), qui ont observé une augmentation du coefficient de compressibilité avec l'augmentation de la teneur en limon/argile des mélanges examinés. Cette divergence peut être attribuée à la nature minéralogique des ajouts considérés dans mélanges étudiés.

Il est à signaler que le coefficient de compressibilité a une très bonne corrélation avec le diamètre efficace et le diamètre moyen. Cette corrélation permet l'évaluation du coefficient de compressibilité en fonction de diamètre efficace ou de diamètre moyen pour les mélanges étudiés à l'état lâche ( $Dr= 25\pm 3\%$ ) et à l'état dense ( $Dr= 87\pm 3\%$ ) en utilisant des équations (5.2) et (5.3), Les coefficients a, b, c, d, e et f ainsi que ceux de détermination ( $R^2$ ) associés à ces équations sont présentés sur le Tableaux 5.2 et 5.3 respectivement.

$$Cc = a \times (D_{10}) + b \times (D_{10})^2 + c \quad (5.2)$$

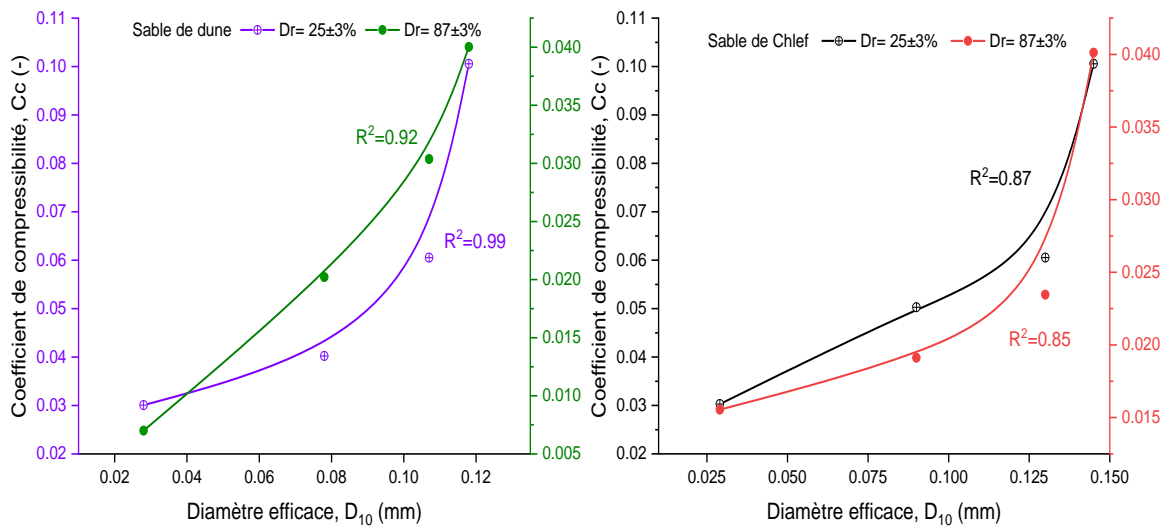
$$Cc = d \times (D_{50}) + e \times (D_{50})^2 + f \quad (5.3)$$

Table 5.2: Valeurs des coefficients a, b, c et  $R^2$  correspondant à l'équation (5.2)

	<b>Dr= 25±3%</b>			<b>Dr= 87±3%</b>		
	DS-FA	CS-FA	QS-FA	DS-FA	CS-FA	QS-FA
<b>a</b>	-1.52304	- 0.4815	-0.15035	-0.04203	-0.35594	-0.09099
<b>b</b>	15.1634	5.7363	1.97511	2.68628	3.05898	0.88207
<b>c</b>	0.06166	0.0406	0.0434	0.00623	0.02378	0.02148
<b>R<sup>2</sup></b>	0.92	0.87	0.99	0.99	0.85	0.99

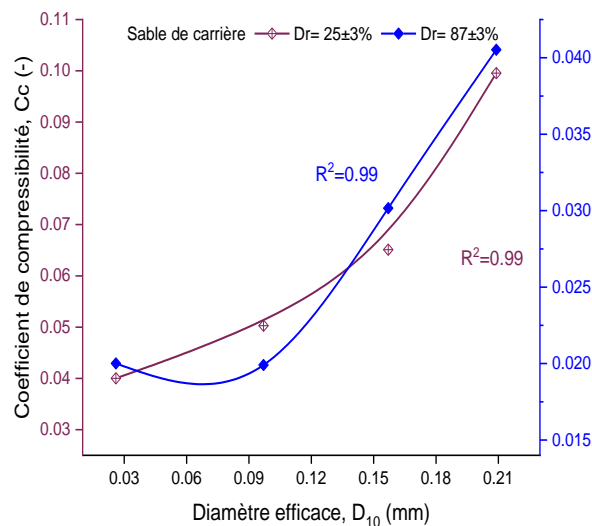
Table 5.3: Valeurs des coefficients d, e, f et  $R^2$  correspondant à l'équation (5.3)

	<b>Dr= 25±3%</b>			<b>Dr= 87±3%</b>		
	DS-FA	CS-FA	QS-FA	DS-FA	CS-FA	QS-FA
<b>d</b>	-91.20043	-50.24448	-3.605	19.92552	-22.17857	-1.4303
<b>e</b>	193.89418	64.77118	2.84086	-37.03481	28.46187	1.11402
<b>f</b>	10.75534	9.74035	1.1664	-2.63216	4.31889	0.47253
<b>R<sup>2</sup></b>	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99



(a)

(b)



(c)

Figure 5.3 : Evolution de ( $C_c$ ) en fonction de ( $D_{10}$ ) :

(a) Sable de dune, (b) Sable de Chlef et (c) Sable de carrière.

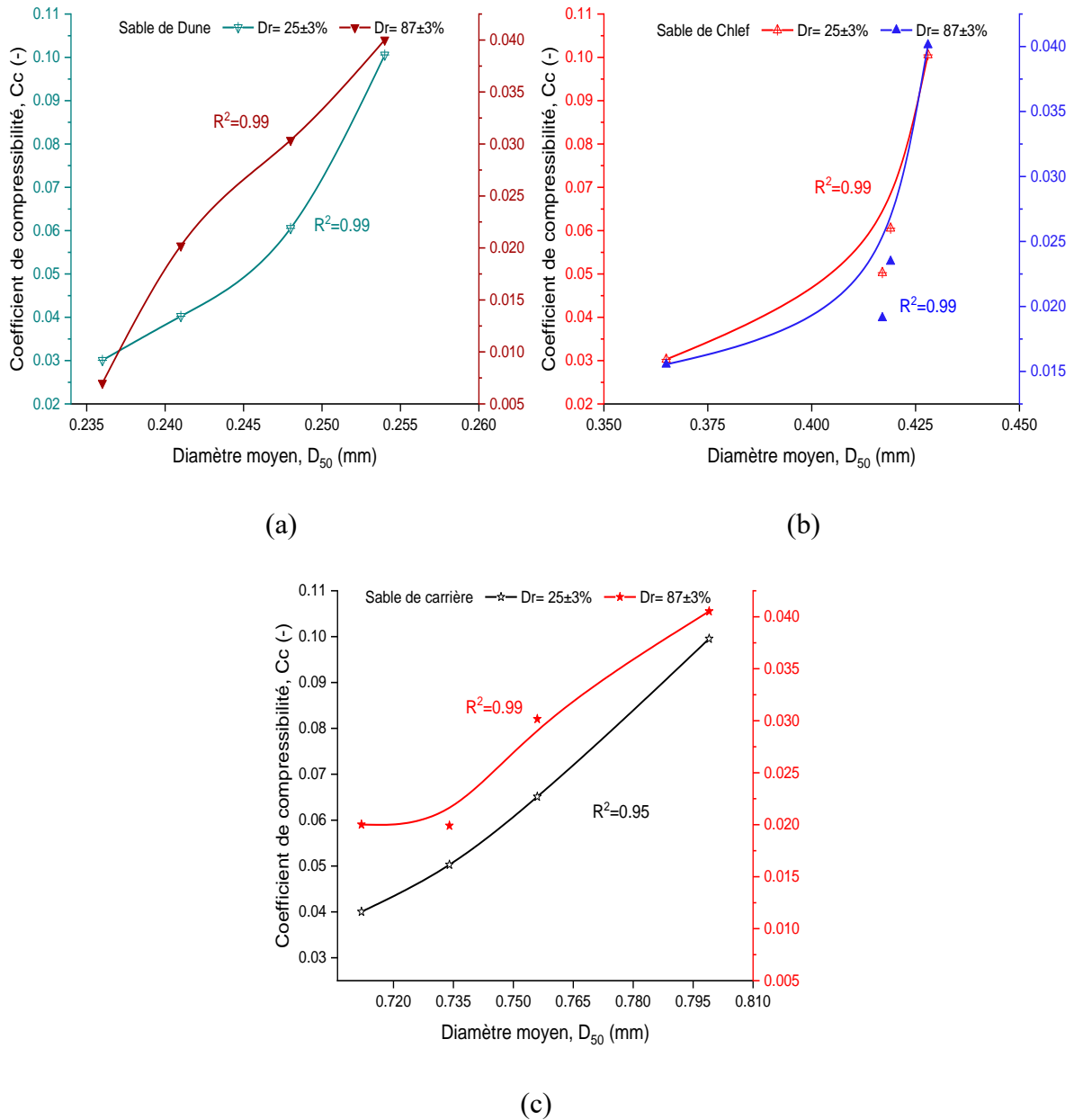


Figure 5.4 : Variation de ( $C_c$ ) en fonction de ( $D_{50}$ ) :  
 (a) Sable de dune, (b) Sable de Chlef et (c) Sable de carrière.

### 5.2.3 Effet des caractéristiques de forme sur la compressibilité des sables étudiés

#### 5.2.3.1 Sphéricité

Figure 5.5 présente la variation du coefficient de compressibilité en fonction de la sphéricité combinée et de la teneur en cendres volantes pour les sables de carrière (QS), de dune (DS) et celui de Chlef (CS) traités avec des fractions de cendres volantes. Les résultats obtenus indiquent que pour les trois matériaux testés, le coefficient de compressibilité semble très bien corrélé avec la sphéricité combinée. En effet, l'augmentation de la teneur en cendres volantes est à l'origine d'une augmentation de la sphéricité combinée conduisant ainsi, à une diminution remarquable du coefficient de compressibilité. D'autre part, en comparant le comportement des trois sables testés sous sollicitations œdométriques, il est clair que le sable ayant la sphéricité combinée la plus faible (sable de carrière) a montré des valeurs de coefficient de compressibilité les plus élevées parmi les deux autres types de sable (sable de Chlef et sable de dune) pour les échantillons propres. Ceci pourrait être dû au rôle de la dépendance systématique du comportement mécanique des sables du paramètre de la sphéricité, c'est-à-dire plus le sable est sphérique, plus le matériau a tendance d'être compact, moins il est compressible au cours du chargement œdométrique.

Les tendances présentées par les sables étudiés peuvent être exprimées sous forme d'équations (5.4, 5.5) avec des coefficients de détermination ( $R^2=0,99$ ) et ( $R^2=0,95$ ) pour les sables initialement lâches ( $Dr=25\pm3\%$ ) et dense ( $Dr=87\pm3\%$ ) respectivement. Ces expressions pourraient être utilisées pour évaluer l'ampleur de la compressibilité en fonction de la sphéricité combinée et la teneur en cendres volantes.

- $C_c = 0.4499 \times (S_{com}) - 0.00498 \times (FA) - 0.3148 \times (S_{com})^2 + 2.60617 \times (10)^{-4} \times (FA)^2 - 0.00417 \times (S_{com}) \times (FA) - 0.06028$  Pour  $Dr=25\pm3\%$  (5.4)
- $C_c = -0.35995 \times (S_{com}) + 0.00164 \times (FA) + 0.25869 \times (S_{com})^2 + 8.10708 \times (10)^{-5} \times (FA)^2 - 0.00603 \times (S_{com}) \times (FA) + 0.16407$  Pour  $Dr=87\pm3\%$  (5.5)

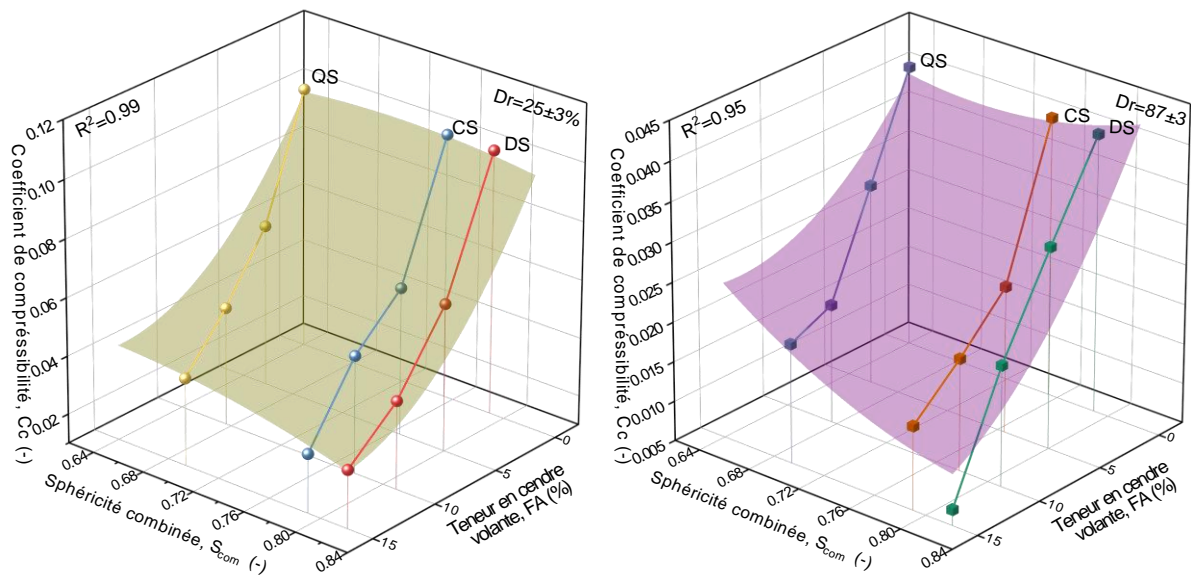


Figure 5.5: Variation de (Cc) en fonction de (S<sub>com</sub>) et (FA) pour les matériaux testés :

(a) Dr=25±3% et (b) Dr=87±3%

### 5.2.3.3 Angularité

L'angularité des particules de sable est définie par le degré de douceur des particules, les particules arrondies sont supposées se déposer d'une meilleure manière que les particules angulaires en raison de leur meilleure capacité de rotation et de mouvement. Dans la Figure 5.6, il a été remarqué que la variation du coefficient de compressibilité est très sensible à l'effet de l'angularité des particules, de telle sorte que l'augmentation de cette dernière en traitant les sables avec des quantités de cendres volantes ( FA=5%, 10% et 15%), a induit une réduction remarquable du coefficient de compressibilité pour tous les sables étudiés. En outre, la même tendance a été observée pour l'état lâche et l'état dense. Quantitativement parlant de l'augmentation de l'angularité combinée des mélanges de sable de dune et de cendres volantes variant de 0.489 à 0.567 a induit une baisse du coefficient de compressibilité de 30% à 17.51% pour l'état lâche et dense. D'autre part, le sable de Chlef a montré une réduction de 30.1% à 38.74% pour l'état lâche et dense respectivement lorsque l'angularité combinée est passée de 0.453 à 0.535, de plus, le sable de carrière a montré une diminution du coefficient de compressibilité de 40.2% et 49.37% pour les mêmes états de densités considérés. Ces expressions numériques pourraient mettre clairement en évidence le rôle des cendres volantes dans l'amélioration de la réponse au tassement des sols sableux, ce qui pourrait être dû au phénomène de cimentation qui se produit au cours du processus de chargement. Cependant, il

convient de mettre l'accent sur le taux d'amélioration des matériaux étudiés, le sable de dune connu par son petit diamètre de grain et sa forme arrondie a montré le taux d'amélioration le plus faible parmi les deux autres matériaux, ce qui pourrait s'expliquer par un taux faible de vides entre les particules de sable, tandis que le sable de Chlef a montré une meilleure réponse en raison du fait qu'il est caractérisé par un plus grand diamètre de grain par rapport au sable de dune, ce qui signifie sa texture dispose de beaucoup plus de vides à remplir, cependant, le sable de carrière a répondu d'une meilleure manière en terme de compressibilité en raison de sa grande taille des particules et de sa forme anguleuse.

Les équations (5.6) et (5.7) pourraient être considérées pour évaluer le coefficient de compressibilité en fonction de la teneur en cendres volantes et les valeurs d'angularité à l'état lâche ( $Dr=25\pm3\%$ ) et à l'état dense ( $Dr=87\pm3\%$ ) respectivement.

- $$C_c = 0.21266 \times (A_{com}) - 0.00766 \times (FA) - 0.27662 \times (A_{com})^2 + 2.61276 \times (10)^{-4} \times (FA)^2 - 7.75978 \times (10)^{-4} \times (A_{com}) \times (FA) + 0.06067$$

Pour  $Dr=25\pm3\%$  (5.6)
- $$C_c = -0.10057 \times (A_{com}) - 8.36413 \times (10)^{-4} \times (FA) + 0.13738 \times (A_{com})^2 + 0.98024 \times (10)^{-5} \times (FA)^2 - 0.00474 \times (A_{com}) \times (FA) + 0.05721$$

Pour  $Dr=87\pm3\%$  (5.7)

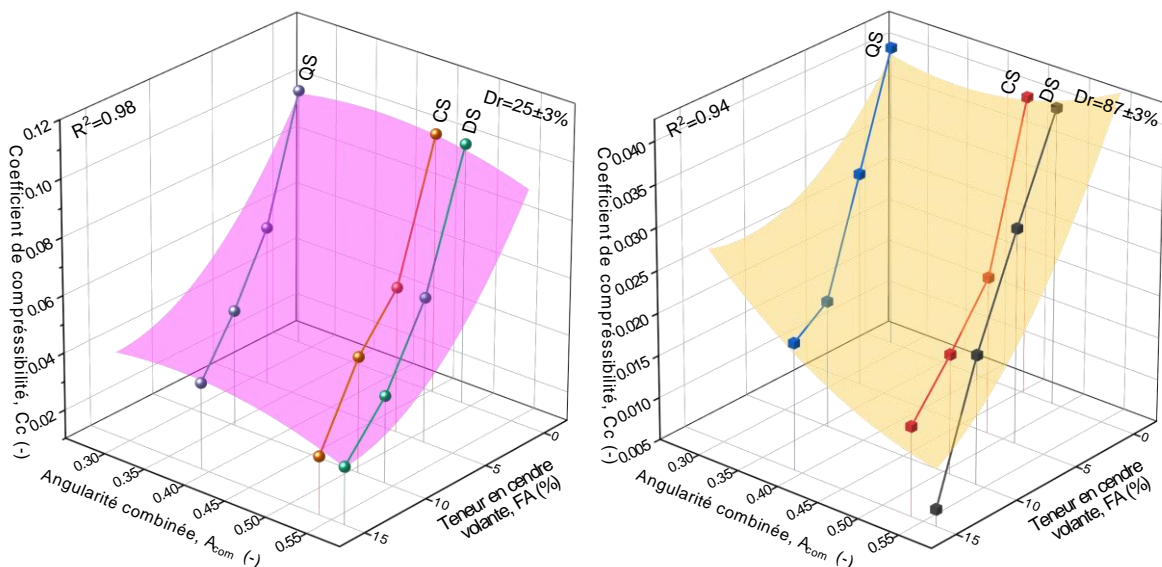


Figure 5.6 : Evolution de (Cc) en fonction de (Acom) et (FA) pour les matériaux testés :

(a)  $Dr=25\pm3\%$  et (b)  $Dr=87\pm3\%$

### 5.2.3.3 Régularité globale

Plusieurs chercheurs ont abordé l'effet de la régularité globale sur la réponse mécanique du sol sableux (Cho et al., 2006)(Cherif Taiba et al., 2023) qui ont déclaré que la régularité globale est un paramètre important qui influe de manière significative la densité des matériaux meubles et qu'elle est considérée comme facteur pertinent qui influence le comportement des sols sableux (Cherif Taiba et al., 2019). On note que cette section vise à développer une compréhension fondamentale de l'impact de la régularité globale sur le tassement des sols sableux à travers la discussion de la variation du coefficient de compressibilité en fonction de la régularité globale combinée considérant le paramètre de la teneur en cendres volantes, pour les trois différents types de sables étudiés présentant une variété de formes de particules. L'étude a été menée pour deux densités relatives initiales ( $D_r=25\pm 3\%$  et  $D_r=87\pm 3\%$ ). Figure 5.8 illustre les résultats obtenus qui indiquent que l'ajout de cendres volantes aux sables a induit une augmentation significative de leur régularité et que le sable le plus irrégulier (sable de carrière) a montré une forte augmentation de la régularité globale par rapport aux deux autres sables les moins réguliers (sable de Chlef et sable de dune). Le coefficient de compressibilité semble très bien corrélérer avec le changement de régularité des échantillons des sables étudiés, dans lequel l'augmentation de la régularité globale combinée induite par l'ajout de cendres volantes a toujours montré une diminution significative de la compressibilité des échantillons. On note que l'augmentation de la régularité globale du sable de carrière de 6.36% a causé une diminution du coefficient de compressibilité de 0.099 à 0.04 pour les échantillons initialement lâches, tandis qu'il est passé de 0.04 à 0.02 pour les échantillons initialement denses et que la même tendance a été observée pour le sable de Chlef où le coefficient de compressibilité est passé de 0.10 à 0.03 pour l'état lâche et de 0.04 à 0.01 pour l'état dense lorsque la régularité globale a augmenté de 3.15%, alors que l'effet était moins significatif pour le sable de dune en raison de sa régularité élevée, pour laquelle le coefficient de compressibilité a diminué de 29.9% et de 17.5% respectivement pour les états lâche et dense, lorsque la régularité globale est passée de 0.862 à 0.882. Les expressions (5.8) et (5.9) ont été proposées pour évaluer le coefficient de compressibilité en fonction de la régularité globale et teneur en cendres volantes pour les états de densité lâche et dense.

- $C_c = 0.48434 \times (OR_{com}) - 0.0047 \times (FA) - 0.30982 \times (OR_{com})^2 + 2.56674 \times (10)^{-4} \times (FA)^2 - 0.00417 \times (OR_{com}) \times (FA) - 0.08862$  Pour  $Dr = 25 \pm 3\%$  (5.8)

- $C_c = -0.34171 \times (OR_{com}) + 0.00136 \times (FA) + 0.22397 \times (OR_{com})^2 + 7.60802 \times (10)^{-5} \times (FA)^2 - 0.00514 \times (OR_{com}) \times (FA) + 0.16919$  Pour  $Dr = 87 \pm 3\%$  (5.9)

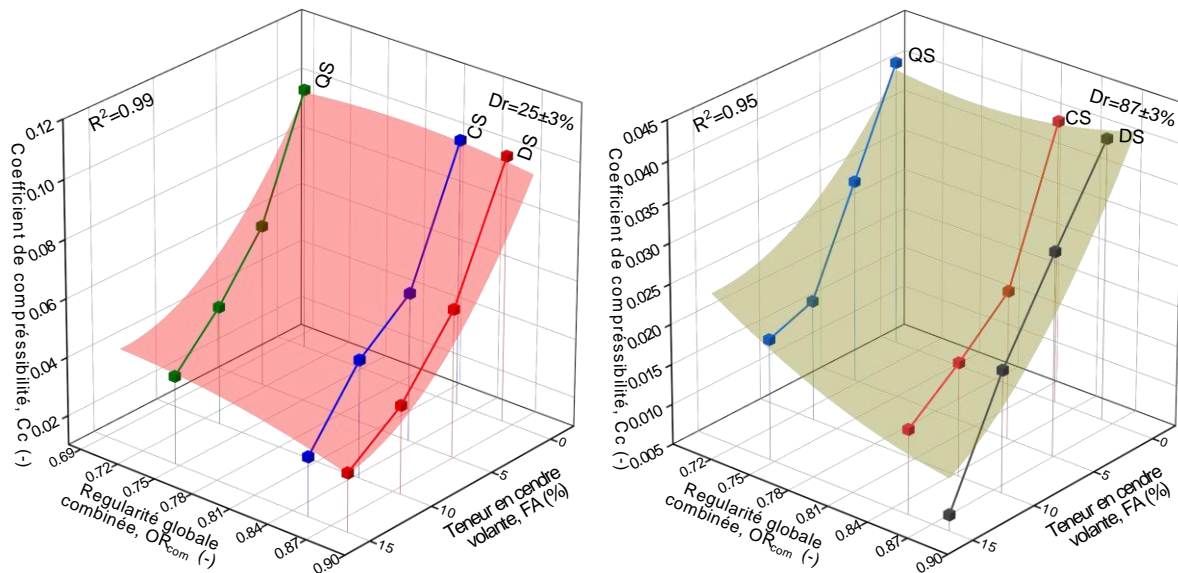


Figure 5.7: Evolution de ( $C_c$ ) en fonction de ( $OR_{com}$ ) et de ( $FA$ ) pour les matériaux testés :  
(a)  $Dr = 25 \pm 3\%$  et (b)  $Dr = 87 \pm 3\%$

### 5.2.4 Prédiction du coefficient de compressibilité sur la base des caractéristiques de taille et de forme des grains

Cette section est consacrée à l'étude de l'éventualité d'établir une corrélation entre les valeurs du coefficient de compressibilité mesurées et celles prédites en se basant sur les caractéristiques de taille et forme des particules ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $C_c$ ,  $C_u$ ,  $S_{com}$ ,  $A_{com}$  et  $OR_{com}$ ) de trois sables distincts (sable de dune, sable de Chlef et sable de carrière). Cette corrélation a été établie afin de mettre en évidence la relation entre les tendances obtenues des paramètres de taille et de forme avec le comportement mécanique sous chargement œdométrique, particulièrement, la compressibilité des sols sableux. En effet, les tendances obtenues ont pu être exprimées en termes d'équations basées sur les différents paramètres de taille et de forme. Ainsi, ces équations ont été utilisées ensuite pour prédire les valeurs du coefficient de compressibilité afin de tester

la fiabilité des équations obtenues en comparant les valeurs mesurées avec celles prédites On note que les Figures 5.9 et 5.10 montrent clairement la relation étroite entre les valeurs mesurées et celles prédites avec un coefficient de détermination de ( $R^2=0.96$ ) pour la prédiction basée sur le diamètre efficace ( $D_{10}$ ), ( $R^2=0.88$ ) pour la prédiction basée sur le diamètre moyen ( $D_{50}$ ), tandis qu'elle a été trouvée comme étant ( $R^2=0.81$ ) pour les prédictions basées sur le coefficient d'uniformité ( $C_u$ ). D'autre part, la prédiction faite sur la base des paramètres de forme a montré des coefficients de détermination de ( $R^2=0.98, 0.95$  et  $0.98$ ) pour la sphéricité combinée( $S_{com}$ ), l'angularité combinée ( $R_{com}$ ) et la régularité globale combinée ( $OR_{com}$ ) respectivement. Les tendances obtenues confirment que la prédiction du coefficient de compressibilité des sables de dune, de Chlef et de carrière traités aux cendres volantes à partir des caractéristiques de taille et de forme des grains, en utilisant les équations (5.10) et (5.15) est relativement applicable et peut être utilisée pour prévoir les caractéristiques préliminaires quant à l'effet des cendres volantes, ainsi que ceux des grains en termes de taille et de forme des particules sur la compressibilité des sols.

$$D_{10}: CC_M = 1.00009 (CC_p) + 1.63456 \times 10^{-7} \quad \text{with } R^2=0.96 \quad (5.10)$$

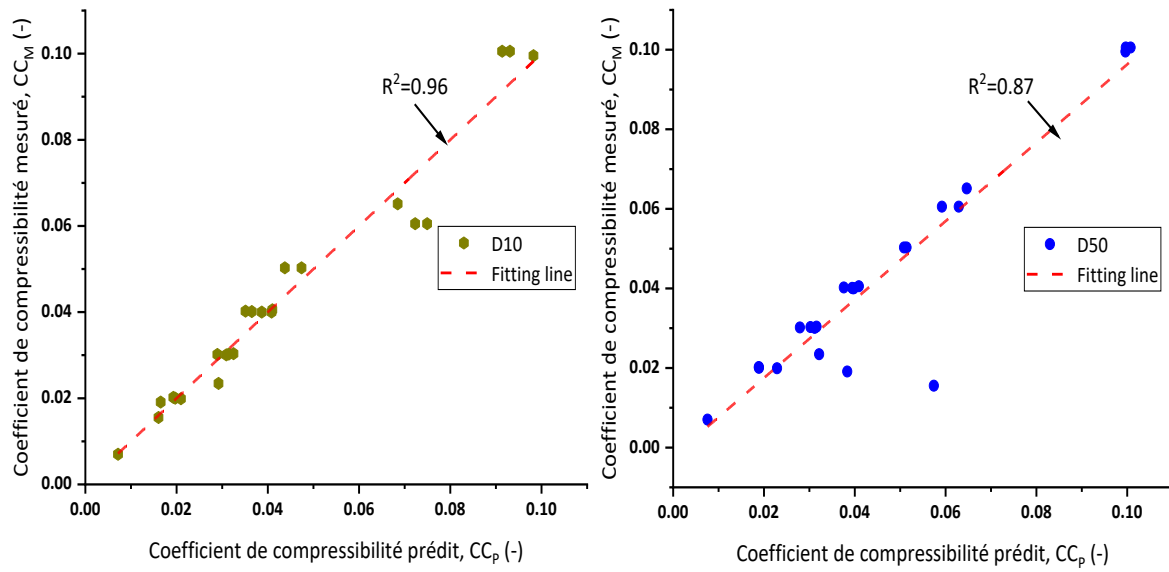
$$D_{50}: CC_M = 0.98533(CC_p) - 0.0022 \quad \text{with } R^2=0.88 \quad (5.11)$$

$$C_u: CC_M = 0.95931 (CC_p) - 5.64541 \times 10^{-4} \quad \text{with } R^2=0.81 \quad (5.12)$$

$$S_{com}: CC_M = 1.01217 (CC_p) - 0.00162 \quad \text{with } R^2=0.98 \quad (5.13)$$

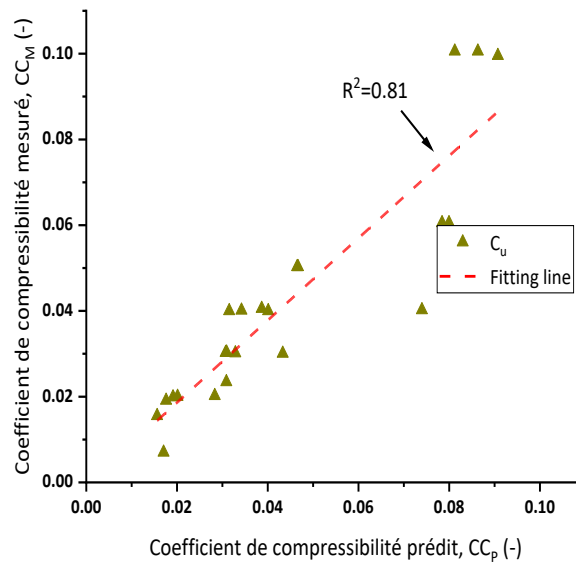
$$R_{com}: CC_M = 0.86367 (CC_p) + 0.00782 \quad \text{with } R^2=0.95 \quad (5.14)$$

$$OR_{com}: CC_M = 1.01176 (CC_p) - 0.00158 \quad \text{with } R^2=0.98 \quad (5.15)$$



(a)

(b)



(c)

Figure 5.8: Variation de ( $CC_M$ ) en fonction de ( $CC_P$ ) pour :

(a)-diamètre efficace, (b)-Diamètre moyen, (c)-Coefficient d'uniformité

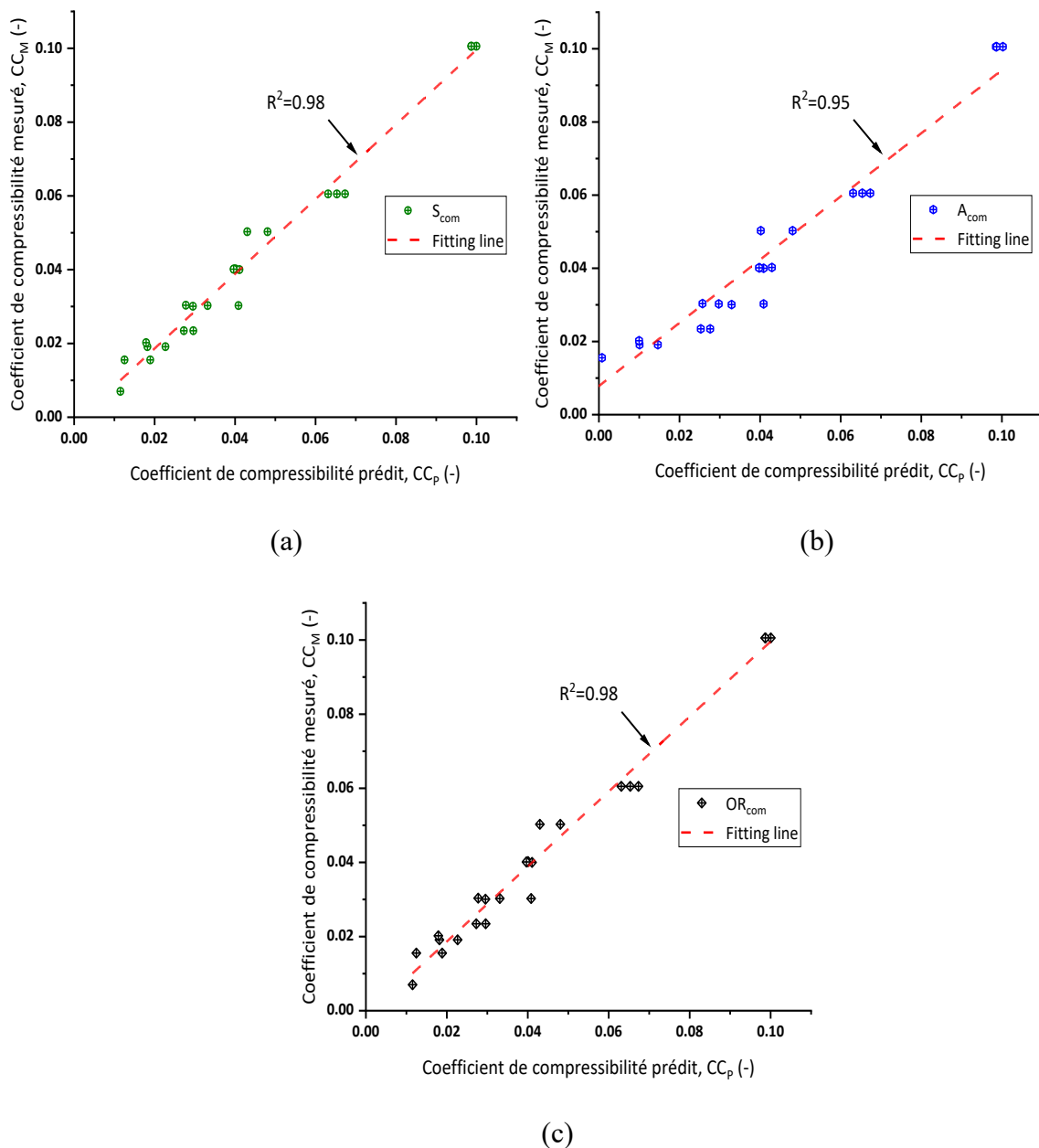


Figure 5.9: Variation de ( $CC_M$ ) en fonction de ( $CC_p$ ) pour :

(a)-Sphéricité combinée, (b)-Angularité combinée, (c)-Régularité globale combinée

### 5.3 Conclusion

La présente étude vise à mettre en évidence l'impact de la taille et de la forme des grains sur la compressibilité des sols granulaires. Cette étude expérimentale comprend une série d'essais de compression à l'œdomètre sur trois différents de sables (le sable de dune arrondi, le sable de Chlef semi-arrondi et le sable de carrière qui est classé comme sable anguleux). Les trois matériaux ont été traités avec de la poudre de cendres volantes dans une fourchette de 0 % à 15 %, afin de mettre en lumière l'effet de la cimentation des cendres volantes sur la compressibilité

des sols. Les résultats obtenus ont révélé une dépendance significative entre la compressibilité des sols sableux et les caractéristiques de taille et de forme, et sont résumés en points clés suivants:

- Le comportement de compressibilité des sables testés a montré une similarité générale quel que soit les matériaux étudiés lorsque la densité relative est maintenue constante. Cependant, il a été observé que le sable de carrière présentait une plus grande susceptibilité au tassement que le sable de dune et le sable de Chlef. Cette compressibilité accrue du sable de carrière est probablement due à la taille plus importante des particules et à la forme très irrégulière des grains, présentant, ainsi des vides plus importants dans la matrice du sol. En effet durant le chargement œdométrique, ces vides induisent un caractère contractant plus important entraînant systématiquement une compressibilité plus élevée par rapport à celle induite par les deux autres types de sables.
- En outre, les caractéristiques de taille des particules, telles que la diamètre efficace, le diamètre moyen et le coefficient d'uniformité, se sont trouvés à avoir une forte corrélation avec le coefficient de compressibilité, contrairement aux conclusions de (Nougar et al., 2022), qui ont révélé qu'une augmentation de diamètre efficace et de la diamètre moyen, due à l'ajout de matériaux fins (limon), entraînait une augmentation du coefficient de compressibilité. Cela suggère que l'ajout de limon modifie la distribution granulométrique, ce qui conduit à des mélanges de sable plus compressibles.
- Les paramètres de forme des particules, tels que la sphéricité, l'angularité (rondeur) et la régularité globale, appartiennent comme facteurs critiques pour prédire le comportement de compressibilité des sables dans les conditions étudiées. Ces résultats s'alignent sur les conclusions de (Taibi et al., 2023), renforçant, ainsi l'idée que les caractéristiques de forme des grains peuvent être utilisées d'une manière systématique dans l'évaluation du comportement de déformation des sols granulaires. La forme et la taille des particules et par conséquent la microstructure du sable jouent un rôle important dans la détermination et l'identification de l'ampleur de compressibilité du matériau sous chargement œdométrique, en particulier lorsqu'il est combiné à différentes teneurs en cendres volantes.

## **Conclusion générale & perspectives**

## **Conclusion générale et perspectives**

L'influence de la taille et la forme des grains sur le comportement mécanique en termes de cisaillement et compressibilité des sables a été étudiée dans ce travail, à travers une série d'essais de cisaillement directe à la boîte de Casagrande et de compressibilité à l'œdomètre, effectués sur trois types de sable : sable de dune, sable de Chlef et sable de carrière. Les échantillons ont été reconstitués à deux densités relatives initiales ( $D_r=25\pm 3\%$  et  $D_r=87\pm 3\%$ ). Ces sables ont été traités avec différentes teneurs en cendres volantes (FA=0%, 5%, 10% et 15%).

L'analyse de l'influence de la taille des grains sur la résistance au cisaillement a été réalisée en classant le sable de Chlef en trois classes granulaires, en tenant compte de trois diamètres minimaux des grains ( $D_{\min}=0.08, 0.63$  et  $2$  mm). Les résultats obtenus lors des essais de cisaillement indiquent que le diamètre minimal exerce un effet très significatif sur la réponse mécanique des sables ; en effet, l'augmentation du diamètre minimal des particules entraîne systématiquement une augmentation des caractéristiques de stabilité du sable de Chlef tels que l'angle de frottement et l'enchevêtrement des grains, et amplification de la phase de dilatance induisant ainsi, une structure plus stable du sable.

Il est à signaler que deux nouveaux paramètres ont été introduits dans cette étude : l'indice de taille des particules (PSI) et le facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement (FSE). Les résultats obtenus ont clairement montré l'existence d'une bonne corrélation de ces deux paramètres avec l'angle de frottement et le diamètre minimal des grains, respectivement. On note également que ces deux facteurs présentent également une forte corrélation entre eux ; ainsi, une augmentation de l'indice de taille des particules est associée à une tendance haussière du facteur d'amélioration de la résistance au cisaillement. Ce dernier constat valide l'utilité de l'indice de taille des particules dans l'évaluation des performances mécaniques des sables, soulignant par conséquent son importance dans les applications géotechniques et études de comportement mécanique relatives aux matériaux granulaires.

Les résultats obtenus confirment que la variation des paramètres de forme des grains tel que l'angularité, la sphéricité et la régularité globale peut remarquablement influencer le comportement mécanique des sols sableux, plus précisément les mélanges sable de Chlef-cendres volantes testés, ou il a été trouvé que l'augmentation de l'angularité, la sphéricité ou la régularité globale induit une augmentation de l'angle de frottement des mélanges étudiés. De plus, l'étude des tendances obtenues a mis en évidence une corrélation plus forte entre les

caractéristiques de taille et de forme des particules et les variations de l'angle de dilatance maximale. Des équations de corrélation sont aussi envisageables pour établir des liens entre l'angle de dilatance maximale ( $\psi_{\max}$ ) et la contrainte normale initiale ( $\sigma_n$ ) et les caractéristiques des particules des mélanges sable de Chlef-cendres volantes. On note que la relation contrainte-dilatance a été étudiée à travers l'utilisation du coefficient de dilatance de Bolton qui a été employé dans cette étude et que la prédiction du comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-cendre volantes a été trouvé possible grâce à l'utilisation de coefficient de Bolton où il a été trouvé applicable pour les cas de mélanges étudiés.

La relation entre contrainte et dilatance a été abordé à travers l'utilisation du coefficient de dilatance de Bolton, qui a été intégré dans le cadre de cette étude. Ce coefficient se révèle essentiel pour la compréhension du comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-cendres volantes. Grâce à l'application du coefficient de Bolton, il a été possible de prédire avec précision les réponses mécaniques de ces mélanges spécifiques. Les résultats obtenus indiquent que le coefficient de dilatance de Bolton est non seulement applicable, mais également pertinent pour les mélanges étudiés, permettant ainsi une meilleure compréhension des interactions entre les particules et les effets de la dilatance sur la résistance au cisaillement.

La compressibilité des sols sableux a été mise en discussion dans ce travail, à travers des séries d'essais de compressibilité à l'eodomètre sur trois types de sables testés. Une analyse des résultats obtenus montre que les matériaux étudiés ont une tendance de compressibilité similaire, sauf que la taux de compressibilité a été contrasté due à la différence de forme des grains, ou, il a été remarque que le sable de carrière était plus vulnérable vis-à-vis des chargements verticaux. Cet état est attribué à la forme angulaire des grains en comparaison aux autres sables étudiés. De plus, il a été trouvé que les caractéristiques de taille et de forme des grains peuvent être en bonne corrélations avec le coefficient de compressibilité des sables, ceci peut permettre la prédiction de comportement de compressibilité à l'aide des caractéristiques de taille et de forme des grains dans le cas des matériaux testés avec les teneurs en cendres volantes utilisées.

Autrement, l'utilisation des cendres volantes a été fréquemment identifiée comme bénéfique pour l'amélioration des propriétés des sables, notamment en ce qui concerne leur résistance mécanique. Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude montrent une augmentation significative de la résistance au cisaillement des trois types de sable étudiés, ce qui indique un potentiel d'application prometteur dans le domaine de géotechnique. De plus,

l'analyse de l'impact des cendres volantes sur la compressibilité révèle une diminution importante de la compressibilité des mélanges examinés, ce qui peut contribuer à une meilleure stabilité de ces sols utilisés dans diverses applications d'ingénierie. Ces résultats confirment le rôle important des cendres volantes dans l'amélioration des performances mécaniques des sols sableux soulignant ainsi l'utilité de valoriser ce matériau souvent sous-estimé.

Suite aux résultats expérimentaux réalisés dans le cadre de cette recherche, diverses perspectives peuvent être envisagées pour une éventuelle progression adéquate de cette étude :

- 1- Investigation du comportement des mélanges : Une analyse approfondie du comportement des mélanges étudiés sous chargement triaxial, tant monotone que cyclique, en conditions drainées et non drainées peut être envisagée. Cette investigation vise à identifier les effets d'autres paramètres, tels que les méthodes de reconstitution, la saturation, le rapport de surconsolidation et les types de chargement.
- 2- Essais de cisaillement sur éprouvettes reconstituées : Des essais de cisaillement seront réalisés sur des éprouvettes reconstituées à partir de mélanges humides de sable et de cendres volantes, en variant les temps de cure. Ces essais seront suivis d'analyses par microscopie électronique à balayage (SEM) sur les résidus des tests, afin d'explorer l'effet du temps de cure sur le comportement mécanique des mélanges traités.
- 3- Approches des indices des vides : L'introduction des approches relatives aux indices des vides global, intergranulaire et équivalent dans une étude expérimentale utilisant les mélanges examinés est proposée dans le but d'élargir la base de données concernant les sables traités avec des cendres volantes.
- 4- Extension des fractions de cendres volantes : Il est également suggéré d'élargir la gamme des fractions de cendres volantes utilisées dans le traitement jusqu'à FA=100%, afin d'obtenir une compréhension exhaustive du comportement des cendres volantes et leur impact sur les sols sableux.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- Alhani, I. J., Albadri, W. M., Noor, M. J. M., Lim, S. M., & Alwash, A. (2022). Effect of Particle Breakage on Strength Characteristics of Limestone Aggregate. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(10), 5295-5306.
- Alshibli, K. A., & Cil, M. B. (2018). Influence of Particle Morphology on the Friction and Dilatancy of Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(3), 04017118.
- Amini, F., & Qi, G. (2000). Liquefaction testing of stratified silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(3), 208-217.
- Arab, A., & Belkhatir, M. (2012). Fines content and cyclic preloading effect on liquefaction potential of silty sand: a laboratory study. *Acta Polytechnica Hungarica*, 9(4), 47-64.
- Arab, A., & Shahrour, I. (2010). ETUDE EN LABORATOIRE DE L'AMELIORATION DES SOLS PAR L'AUGMENTATION DE LA DENSITE RELATIVE. SICZS\_2010" Symposium International sur la Construction en Zone Sismique Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie),
- ASTM-C618-19. (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. In.
- Azaiez, H., Taiba, A. C., Mahmoudi, Y., & Belkhatir, M. (2021a). Characterization of Granular Materials Treated with Fly Ash for Road Infrastructure Applications. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 8(2), 228-253.
- Azaiez, H., Taiba, A. C., Mahmoudi, Y., & Belkhatir, M. (2021b). Shear characteristics of fly ash improved sand as an embankment material for road infrastructure purpose. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(3), 148.
- Beeghly, J. H. (2003). Recent experiences with lime-fly ash stabilization of pavement subgrade soils, base and recycled asphalt. Proceedings of the International Ash Utilization Symposium, University of Kentucky, Lexington, USA, Oct,
- Belkhatir, M., Arab, A., Della, N., Missoum, H., & Schanz, T. (2010). Liquefaction resistance of Chlef river silty sand: effect of low plastic fines and other parameters. *Acta Polytechnica Hungarica*, 7(2), 119-137.
- Belkhatir, M., Arab, A., Della, N., & Schanz, T. (2012). Experimental study of undrained shear strength of silty sand: effect of fines and gradation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 1103-1118.

- Belkhatir, M., Arab, A., Della, N., & Schanz, T. (2014). Laboratory study on the hydraulic conductivity and pore pressure of sand-silt mixtures. *Marine Georesources & Geotechnology*, 32(2), 106-122.
- Belkhatir, M., Arab, A., Schanz, T., Missoum, H., & Della, N. (2011). Laboratory study on the liquefaction resistance of sand-silt mixtures: effect of grading characteristics. *Granular Matter*, 13(5), 599-609.
- Belkhatir, M., Schanz, T., Arab, A., Della, N., & Kadri, A. (2014). *Insight into the effects of gradation on the pore pressure generation of sand-silt mixtures*. ASTM International.
- Bhuvaneshwari, S., Robinson, R., & Gandhi, S. (2014). Behaviour of lime treated cured expansive soil composites. *Indian Geotechnical Journal*, 44, 278-293.
- Borhani, A., & Fakharian, K. (2016). Effect of Particle Shape on Dilative Behavior and Stress Path Characteristics of Chamkhaleh Sand in Undrained Triaxial Tests. *International journal of civil engineering*, 14(4b), 197-208.
- Bouri, D. E., Brahimi, A., Krim, A., Arab, A., Najser, J., & Mašin, D. (2021). Compression behaviour of Chlef sand and transition of fines content using pressure-dependent maximum void ratios of sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-18.
- Bruand, A., Hartmann, C., & Lesturgez, G. (2005). Physical properties of tropical sandy soils: A large range of behaviours. *Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. A holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics.*,
- Cabalar, A. F., & Akbulut, N. (2016). Effects of the Particle Shape and Size of Sands on the Hydraulic Conductivity. *Acta Geotechnica Slovenica*, 13(2), 82-93.
- Canou, J., Benahmed, N., Dupla, J.-C., & De Gennaro, V. (2002). Instabilités de liquéfaction et phénomène de mobilité cyclique dans les sables. *Revue française de géotechnique*(98), 29-46.
- Chang, N., Yeh, S., & Kaufman, L. (1982). Liquefaction potential of clean and silty sands. *Proceedings of the third international earthquake microzonation conference*,
- Chen, C., Gu, J., Peng, Z., Dai, X., Liu, Q., & Zhu, G.-Q. (2022). Discrete element modeling of particles sphericity effect on sand direct shear performance. *Scientific Reports*, 12(1), 5490.
- Cherif Taiba, A., Belkhatir, M., Kadri, A., Mahmoudi, Y., & Schanz, T. (2016). Insight into the effect of granulometric characteristics on the static liquefaction susceptibility of silty sand soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, 367-382.

- Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., Azaiez, H., & Belkhatir, M. (2022). Impact of the overall regularity and related granulometric characteristics on the critical state soil mechanics of natural sands: a state-of-the-art review. *Geomechanics and Geoengineering*, 1-10.
- Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., Belkhatir, M., & Baille, W. (2021). Assessment of the correlation between grain angularity parameter and friction index of sand containing low plastic fines. *Geomechanics and Geoengineering*, 16(2), 133-149.
- Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., Belkhatir, M., Kadri, A., & Schanz, T. (2018). Experimental characterization of the undrained instability and steady state of silty sand soils under monotonic loading conditions. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(5), 513-529.
- Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., Hazout, L., Bailie, W., & Belkhatir, M. (2019). Effects of gradation on the mobilized friction angle for the instability and steady states of sand-silt mixtures: experimental evidence. *Acta Geotechnica Slovenica*, 16(1), 79-95.
- Chittoori, B. C. S. (2008). *Clay mineralogy effects on long-term performance of chemically treated expansive clays* [doctoral dissertation, The University of Texas at Arlington].
- Cho, G., Dodds, J., & Santamarina, C. (2006). Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *J Geotech Geoenviron* 132 (5): 591–602. In.
- Choobbasti, J., Asskar, Ghalandarzadeh, A., & Esmaili, M. (2014). Experimental study of the grading characteristic effect on the liquefaction resistance of various graded sands and gravelly sands. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 2739-2748.
- Choobbasti, J. A., Ghalandarzadeh, A., & Esmaili, M. (2014). Experimental study of the grading characteristic effect on the liquefaction resistance of various graded sands and gravelly sands. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 2739-2748.
- Coop, M., & Atkinson, J. (1993). The mechanics of cemented carbonate sands. *Géotechnique*, 43(1), 53-67.
- Della, N., Missoum, H., Arab, A., & Belkhatir, M. (2010). Experimental study of the overconsolidation and saturation effects on the mechanical characteristics and residual strength of Chlef river sandy soil. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 54(2), 107-116.
- Doumi, K., Belkhatir, M., Taiba, A. C., Mahmoudi, Y., & Baille, W. (2020). EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF RELATIVE EFFECTIVE DIAMETER ON THE ULTIMATE SHEAR STRENGTH OF PARTIALLY SATURATED GRANULAR SOILS. *Acta Geotechnica Slovenica*, 17(1), 56-70.

- Doygun, O., Brandes, H. G., & Roy, T. T. (2019). Effect of Gradation and Non-plastic Fines on Monotonic and Cyclic Simple Shear Strength of Silica Sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4), 3221-3240.
- Fan, J., Rowe, R. K., & Brachman, R. W. (2022). Compressibility and permeability of sand–silt tailings mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(8), 1348-1357.
- Finn, W. L., Bransby, P. L., & Pickering, D. J. (1970). Effect of strain history on liquefaction of sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(6), 1917-1934.
- Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8, 1-16.
- Ghadr, S., & Assadi-Langroudi, A. (2019). Effect of grain size and shape on undrained behaviour of sands. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5, 1-9.
- Guo, H., Wang, S., Guo, C., Yang, K., Guo, R., Fu, J., Nan, Y., & Tao, M. (2023). Effect of grain size distribution on the shear properties of sand. *Frontiers in Materials*, 10, 1219765.
- Haeri, S. M., Hamidi, A., Hosseini, S. M., Asghari, E., & Toll, D. G. (2006). Effect of cement type on the mechanical behavior of a gravely sand. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24, 335-360.
- Hazout, L., Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., & Belkhatir, M. (2023). Deformation characteristics of natural river sand under compression loading incorporating extreme particle diameters impacts. *Marine Georesources & Geotechnology*, 41(10), 1156-1174.
- Hazout, L., El-Abidine Zitouni, Z., Belkhatir, M., & Schanz, T. (2017). Evaluation of static liquefaction characteristics of saturated loose sand through the mean grain size and extreme grain sizes. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, 2079-2105.
- Igwe, O., Fukuoka, H., & Sassa, K. (2012). The effect of relative density and confining stress on shear properties of sands with varying grading. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 1207-1229.
- Indraratna, B., Wijewardena, L., & Balasubramaniam, A. (1993). Large-scale triaxial testing of grey wacke rockfill. *Géotechnique*, 43(1), 37-51.
- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Géotechnique*, 43(3), 351-451.
- Ishihara, K., Tatsuoka, F., & Yasuda, S. (1975). Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses. *Soils and foundations*, 15(1), 29-44.

- Jamshidi Chenari, R., Fatahi, B., Akhavan Maroufi, M. A., & Alaie, R. (2017). An experimental and numerical investigation into the compressibility and settlement of sand mixed with TDA. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, 2401-2420.
- Janalizadeh Choobbasti, A., Ghalandarzadeh, A., & Esmaeili, M. (2014). Experimental study of the grading characteristic effect on the liquefaction resistance of various graded sands and gravelly sands. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 2739-2748.
- Jozefaciuk, G., Skic, K., Adamczuk, A., Boguta, P., & Lamorski, K. (2021). Structure and strength of artificial soils containing monomineral clay fractions. *Materials*, 14(16), 4688.
- Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2017). Experimental study on effect of fly ash on liquefaction resistance of sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 93, 1-6.
- Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2018). Effect of flyash on post-cyclic behavior of sand. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(12), 2033-2045.
- Koester, J. P. (1994). The influence of fines type and content on cyclic strength. Ground failures under seismic conditions,
- Kokusho, T., Hara, T., & Hiraoka, R. (2004). Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(6), 621-629.
- Kolay, P. K., Puri, V. K., Tamang, R. L., Regmi, G., & Kumar, S. (2019). Effects of Fly Ash on Liquefaction Characteristics of Ottawa Sand. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(2), 1-14.
- Kong, X. J., Liu, J. M., Zou, D. G., & Liu, H. B. (2016). Stress-Dilatancy Relationship of Zipingpu Gravel under Cyclic Loading in Triaxial Stress States. *International Journal of Geomechanics*, 16(4), 04016001.
- Lee, K., & Fitron, J. (1969). Factors affecting the cyclic loading strength of soil; vibration effects of earthquakes on soils and foundations: American Society for Testing and Materials, Philadelphia. *Spec. Tech. Publ.*
- Lim, M. S., Wijeyesekera, D. C., Zainorabidin, A., & Bakar, I. (2012). The effects of particle morphology (shape and sizes) characteristics on its engineering behaviour and sustainable engineering performance of sand. *International Journal of Integrated Engineering*, 4(4).
- Lo, S. R., & Wardani, S. P. R. (2002). Strength and dilatancy of a silt stabilized by a cement and fly ash mixture. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), 77-89.

- Mahmoudi, Y., Cherif Taiba, A., Belkhatir, M., Arab, A., & Schanz, T. (2018). Laboratory study on undrained shear behaviour of overconsolidated sand–silt mixtures: effect of the fines content and stress state. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(2), 118-132.
- Mahmoudi, Y., Cherif Taiba, A., Belkhatir, M., & Schanz, T. (2016). Experimental investigation on undrained shear behavior of overconsolidated sand-silt mixtures: effect of sample reconstitution. *Geotechnical Testing Journal*, 39(3), 515-523.
- Mahmoudi, Y., Cherif Taiba, A., Hazout, L., Belkhatir, M., & Baille, W. (2020). Packing density and overconsolidation ratio effects on the mechanical response of granular soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 723-742.
- Mahmoudi, Y., Taiba, A. C., & Belkhatir, M. (2024). One-Dimensional Compression Behavior of River Silty Sand: Emphasizing the Equivalent Void Ratio Concept. *International Journal of Geomechanics*, 24(9), 04024184.
- Mahmoudi, Y., Taiba, A. C., Hazout, L., Belkhatir, M., & Baille, W. (2020). Packing Density and Overconsolidation Ratio Effects on the Mechanical Response of Granular Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 723-742.
- Makusa, G. P. (2012). State of the art review soil stabilization methods and materials in engineering practice. *Luleå University of Technology, Luleå, Sweden*, 1-30.
- Manzoor, S. O., & Yousuf, A. (2020). Stabilisation of soils with lime: A review. *J. Mater. Environ. Sci*, 11(10), 1538-1551.
- McDowell, C. (1959). Stabilization of soils with lime, lime-flyash, and other lime reactive materials. *Highway Research Board Bulletin*, 231(1), 60-66.
- Mello, V. F. B. D. (1977). Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams. *Géotechnique*, 27(3), 281-355.
- Monkul, M. M., Etminan, E., & Senol, A. (2016). Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, 185-197.
- Monkul, M. M., & Ozden, G. (2007). Compressional behavior of clayey sand and transition fines content. *Engineering Geology*, 89(3-4), 195-205.
- Monkul, M. M., & Yamamuro, J. A. (2011). Influence of silt size and content on liquefaction behavior of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(6), 931-942.
- Nawagamuwa, U. P., & Wijesooriya, N. (2018). Use of flyash to improve soil properties of drinking water treatment sludge. *International Journal of Geo-Engineering*, 9(1), 1-8.

- NF-P94-071-1. (1994). 94-071-1 Sols: Reconnaissance et essais-essai de cisaillement rectiligne à la boîte-Partie 1: Cisaillement direct. *Editions AFNOR Boutique, Saint-Denis, France.*
- NF-P94-090-1. (1997). Sols: reconnaissance et essais - Essais eodométrique. *Editions AFNOR Boutique, Saint-Denis, France.*
- NF-P-94-054. (1991). 94-054, Sols: reconnaissances et essais, Détermination de la masse volumique des particules solides des sols, Méthode du pycnomètre à eau. *Association Française de Normalisation, France (in French).*
- NF-P-94-056. (1996). 94-056, Sols: reconnaissances et essais, Analyse granulométrique, Méthode de tamisage à sec après lavage. *Association Française de Normalisation, France (in French).*
- NF-P-94-057. (1992). 94-057-Analyse granulométrique des sols-Méthode par sédimentation. *Norme Française, AFNOR, Paris.*
- NF-P-94-059. (2000). 94-059 Sols Reconnaissance et essais détermination des masses volumiques minimale et maximale des sols non cohérents. *Editions AFNOR Boutique, Saint-Denis, France.*
- Nimbalkar, S., Indraratna, B., Dash, S. K., & Christie, D. (2012). Improved Performance of Railway Ballast under Impact Loads Using Shock Mats. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(3)*, 281-294.
- Nimtaj, A., & Beyrag, B. S. (2022). Impact of Particle Morphology on the Friction Angle of Firoozkouh Sand. *Geotechnical and Geological Engineering, 1-9.*
- Noaman, M. F., Khan, M., Ali, K., & Hassan, A. (2022). A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. *Cleaner Materials, 6*, 100151.
- Nougar, B., Bouri, D. E., Brahimi, A., Belhassena, F. Z., & Arab, A. (2022). Effect of plastic fine and non-plastic fine on the compressibility behavior of granular material. *Arabian Journal of Geosciences, 15(22)*, 1686.
- Phanikumar, B. R., & Nagaraju, T. V. (2018). Effect of Fly Ash and Rice Husk Ash on Index and Engineering Properties of Expansive Clays. *Geotechnical and Geological Engineering, 36(6)*, 3425-3436.
- Polito, C. P. (1999). *The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils.* Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Roberts, J. (1958). The compressibility of sand. *Proc., Am. Soc. for Testing Mat., 58*, 1269-1277.
- Robitaille, V., & Tremblay, D. (1997). *Mécanique des sols: théorie et pratique.* Modulo.

- Rose, H. G., & Smith, H. F. (1957). A method for determining permeability and specific capacity from effective grain size. *Circular no. 059*.
- Rousé, P., Fannin, R., & Shuttle, D. (2008). Influence of roundness on the void ratio and strength of uniform sand. *Géotechnique*, 58(3), 227-231.
- Schanz, T., & Vermeer, P. A. (1996). Angles of friction and dilatancy of sand. *Géotechnique*, 46(1), 145-151.
- Şenol, A. (2012). Effect of fly ash and polypropylene fibres content on the soft soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, 379-387.
- Sherwood, P. (1993). *Soil stabilization with cement and lime*.
- Simatupang, M., Mangalla, L. K., Edwin, R. S., Putra, A. A., Azikin, M. T., Aswad, N. H., & Mustika, W. (2020). The mechanical properties of fly-ash-stabilized sands. *Geosciences*, 10(4), 132.
- Simoni, A., & Houlsby, G. T. (2006). The direct shear strength and dilatancy of sand–gravel mixtures. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24, 523-549.
- Simpson, D. C., & Evans, T. M. (2016). Behavioral Thresholds in Mixtures of Sand and Kaolinite Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 04015073.
- Taibi, A., Mahmoudi, Y., Cherif Taiba, A., Azaiez, H., & Belkhatir, M. (2023). Fly ash effects on the stress-dilatancy relation of coarse soils: Particle morphology role. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(4), 2517-2536.
- Taylor, D. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. *Jon Wiley & Sons Inc*.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*.
- Throncoso, J., & Verdugo, R. (1985). Silt content and dynamic behavior of tailing sands. *International conference on soil mechanics and foundation engineering*. 11,
- Tsuchida, H. (1970). Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits. *Abstract of the seminar in the Port and Harbor Research Institute*,
- Vaid, Y., Fisher, J., Kuerbis, R., & Negussey, D. (1990). Particle gradation and liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(4), 698-703.
- Wang, H., Cui, Y.-J., Zhang, F., & Liu, J. (2022). Effect of grain breakage on the compressibility of soils. *Acta Geotechnica*, 17(3), 769-778.
- Wang, J.-J., Zhang, H.-P., Tang, S.-C., & Liang, Y. (2013). Effects of particle size distribution on shear strength of accumulation soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(11), 1994-1997.

- Wang, S., Guo, S., Gao, X., Zhang, P., & Li, G. (2022). Effects of cement content and soil texture on strength, hydraulic, and microstructural characteristics of cement-stabilized composite soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(7), 264.
- Wang, Y., Shao, S., & Wang, Z. (2019). Effect of particle breakage and shape on the mechanical behaviors of granular materials. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-15.
- Xiao, Y., Long, L. H., Evans, T. M., Zhou, H., Liu, H. L., & Stuedlein, A. W. (2019). Effect of Particle Shape on Stress-Dilatancy Responses of Medium-Dense Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(2), 04018105.
- Yang, J., & Luo, X. (2018). The critical state friction angle of granular materials: does it depend on grading? *Acta Geotechnica*, 13, 535-547.
- Yang, J., & Luo, X. D. (2015). Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 84, 196-213.
- Yazıcı, E., & Unsever, Y. S. (2024). Investigation of Cement and Fly Ash on the Improvement of Fine Sand Soil. *Applied Sciences*, 14(7), 2908.
- Yilmaz, Y., Mollamahmutoglu, M., Ozaydin, V., & Kayabali, K. (2008). Experimental investigation of the effect of grading characteristics on the liquefaction resistance of various graded sands. *Engineering Geology*, 100(3-4), 91-100.
- Zhang, X., Baudet, B. A., & Yao, T. (2020). The influence of particle shape and mineralogy on the particle strength, breakage and compressibility. *International Journal of Geo-Engineering*, 11, 1-10.
- Zhang, Z., You, L., Lin, J., Wu, Y., Zhong, H., Chen, J., Jiang, F., Zhang, Y., Wang, M.-K., & Huang, Y. (2023). Impact of soil surface properties on soil swelling of different soil layers in collapsing wall of Benggang. *Plos one*, 18(2), e0280729.
- Zheng, J. X., & Hryciw, R. D. (2016). Index Void Ratios of Sands from Their Intrinsic Properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(12), 06016019.

### Sites web

Artisanat <https://www.artisanat.ch/reportages/578-histoire-des-voies-de-communication-et-moyens-de-transport-1ere-partie.html>