

**République Algérienne Démocratique et populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
**Université Saad Dahlab de Blida 1**  
**Faculté de Technologie**  
**Département de génie civil**



## **MEMOIRE DE MASTER**

Spécialité : GEOTECHNIQUE

**Thème :**

**INFLUENCE DE LA GRANULOMETRIE SUR LA  
CARACTERISATION MECANIQUE D'UN MELANGE  
SABLE-BENTONITE.**

- Présenté Par :

- ZERROUAL RIMA
- RAMOUL IKRAM

- Encadré Par :

- Dr HAZOUT LEILA

**Promotion 2022/2023**

## **Remerciement**

*Dieu merci pour la santé, la volonté, le courage et la détermination qui nous ont accompagnés tout au long de la préparation et l'élaboration de ce travail et qui nous ont permis d'achever ce modeste travail.*

*La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant Dr. **HAZOUT LEILA** pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité*

*Nous voudrions remercier tous les membres du jury qui ont accepté de superviser la révision de cette note, et donc de partager leurs conseils et observations*

*Mes profonds remerciements au Monsieur **OUIR YUCEF** le directeur du laboratoire de mécanique des sols à l'école nationale supérieure d'hydraulique (ENSH) et l'ingénieur **BOUZIANE FETHI**, sans oublier le chef de laboratoire*

***YACINE** de Génie Civil l'université de Blida 01 pour nous rassurer et nous soutenir dans notre partie pratique de nos formations*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences.*

*Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*

# Dédicace

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, Le respect, la reconnaissance... Aussi, c'est*

*tout simplement que, Je dédie plus particulièrement à :*

*Mon cher père **Rachid** qui m'a éclairé ma vie par ses conseils et m'a présenté tout son soutien durant toutes mes études. Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines que Allah le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, Ma chère mère **Akila** la grâce d'Allah qui ne compense pas, Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours, source de tendresse, de patience et de générosité.*

*Ma 2<sup>ème</sup> mère et ma tante **Malika** qui m'a toujours encouragé Je dédie aussi ce travail à :*

*Mes chers frères : **Abd El Satter** et **Mohammed Nazim***

*A Tous la famille : « **Zerroual** et **Mohammedi** » petits et grands A mes chers petits **Wassim** et **Djawed** et **Aness***

*A le camarade et l'ingénieur **Younsi Essedik** qui m'a aidé.*

*Mon binôme **Ikram** qui s'est donnée à fond pour pouvoir arriver à ce résultat Tous mes amis d'étude et mes amies les plus proches **Ikram Amel Bakhta Ibtissem Rania Romaiassa Kahina Racha...** qui m'ont soutenu durant mes études.*

*Tous les étudiants de la deuxième année master génie civil, option géotechnique, promotion 2023*

*Z. RIMA*

## Dédicace

*Avec l'aide de dieu tout puissant est enfin achevé ce travail, lequel Je dédie à  
toutes les personnes qui me sont chères :*

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et  
de bonheur, a celui qui a lutté et sacrifié pour m'offrir les conditions propices à  
ma réussite, à toi **mon père**.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non âmes  
Exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse, **mon adorable  
mère**.*

*A mes très chère sœurs adorées source de joie et de bonheur **Nabila** et **Ines** et ma  
petite **Fadia** pour leurs encouragements dieu vous donne courage, santé et  
réussite, je vous aime.*

*A mon fiancé **Issam** qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir  
tout au long de mes études. Que Dieu le protège et lui offre la chance et le  
bonheur.*

*A mon binôme **Rima** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout  
au long de ce projet*

*R. Kram*

## ملخص

تعتبر مقاومة القص للتربة من أهم العوامل في دراسة وتصميم الهياكل. قام العديد من الباحثين على دراسة تأثير المواد الدقيقة وحجم حبوب الرمال على السلوك الميكانيكي والفيزيائي للتربة. في الأدبيات، هناك العديد من الخلافات في تفسير النتائج... الهدف من هذا البحث هو دراسة التأثير المشترك للدقائق و قطر حبوب الرمال الأقصى على سلوك رمال زموري الممزوجة بالبتونايت، بكميات تتراوح من 0% إلى 20%، باستخدام صندوق القص المباشر Casagrand. تم إعادة تشكيل عينات الرمل في ثلاث فئات حبيبية بأقطار قصوى مختلفة ونفس القطر الأدنى: ( $D_{max} = 0.63\text{mm}$ ،  $D_{max} = 2\text{mm}$ ،  $D_{max} = 4\text{mm}$ ) و ( $D_{min} = 0.08\text{mm}$ )، مختلطة مع البتونايت، بنسب مختلفة وهي 0% و 5% و 10% و 15% و 20%. حيث تم تشكيل العينات المدروسة بطريقة الشتاء الجاف، بكثافة أولية متوسطة ( $D_r = 55\%$ ) تحت ثلاث ضغوط عمودية  $\sigma_n = 100, 200, 300\text{Kpa}$

تشير النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح إلى أن نسبة المواد الدقيقة وكذلك قطر الحبيبات الأقصى لهما تأثير معنوي على السلوك الميكانيكي للتربة المدروسة. فقد أظهرت أن مقاومة القص تتناقص مع زيادة محتوى البتونايت حتى  $F_{cth} = 15\%$ ، بعد هذه القيمة تزداد مقاومة القص.

علاوة على ذلك تظهر نتائج البحث بوضوح، بالنسبة للأقطار الثلاثة القصوى: ( $D_{max} = 4\text{mm}$ ) للفئة " A "، ( $D_{max} = 2\text{mm}$ ) للفئة " B " و ( $D_{max} = 0.63\text{mm}$ ) للفئة " C "، بأن الزيادة في القطر الأقصى للرمل يؤدي إلى الزيادة في مقاومة القص. ترجع هذه الزيادة إلى دور هذا الأخير (القطر الأقصى) في زيادة التشابك بين الحبيبات مما يؤدي إلى تضخيم زيادة مقاومة القص وتوسيع مجال التمدد ببنية أكثر ثباتاً.

**الكلمات المفتاحية :** الرمل، البتونايت، القطر الأقصى، القطر الأدنى للرمل، مقاومة القص، الاستجابة الميكانيكية، التربة الدقيقة.

## RESUMÉ

La résistance au cisaillement des sols est l'un des paramètres les plus importants dans l'étude et la conception des ouvrages. Plusieurs chercheurs ont étudié les effets des fines ainsi que l'influence de la taille des grains sur le comportement mécanique et physique des sols. Dans la littérature, il existe de nombreuses controverses dans l'interprétation des résultats concernant la résistance, les déformations, les caractéristiques mécaniques...

L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier l'effet combiné de la teneur en fine et du diamètre maximal des grains sur le comportement du sable de Zemmouri mélangé à la bentonite, dans un intervalle allant de 0% à 20%, utilisant l'appareil de cisaillement direct à la boîte. Les échantillons de sable ont été reconstitués en trois classes granulaires ayant différents diamètres maximaux et un même diamètre minimal : ( $D_{max}=4\text{mm}$ ,  $D_{max}=2\text{mm}$ ,  $D_{max}=0,63\text{mm}$ ) et ( $D_{min}=0,08\text{mm}$ ), mélangés à la bentonite, leurs pourcentages sont de 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, et 20%. Les matériaux étudiés ont été reconstitués par la méthode de la pluviation à sec, avec une densité relative initiale ( $D_r=55\%$ ) et ont été soumis à trois contraintes normales initiales  $\sigma_n$  de 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa.

Les résultats obtenus indiquent clairement que la teneur en fine, ainsi que le diamètre maximal ont des influences significatives sur le comportement mécanique des sols étudiés. Ils montrent que la résistance au cisaillement diminue avec l'augmentation des teneurs en bentonite jusqu'à  $F_{cth}=15\%$ , au-delà de cette valeur la résistance augmente.

Les résultats montrent clairement, pour les trois diamètres maximaux : ( $D_{max}=4\text{mm}$ ) de la classe "A", ( $D_{max}=2\text{mm}$ ) de la classe "B" et ( $D_{max}=0.63\text{mm}$ ) de la classe "C", que l'augmentation du diamètre maximal induit une augmentation de la résistance au cisaillement.

Cette augmentation est due au rôle de diamètre maximal qui augmente l'enchevêtrement entre les grains favorisant ainsi un comportement plus dilatant conduisant à une amplification de la résistance au cisaillement et de la phase de dilatance avec une structure plus stable.

**Mots clés :** Sable, bentonite, diamètre maximal  $D_{max}$ , diamètre minimal, résistance au cisaillement, réponse mécanique.

## ABSTRACT

The shear strength of soils is one of the most important parameters in the study and design of structures. Several researchers have studied the effects of fines as well as the influence of grain size on the mechanical and physical behavior of soils. In the literature, there are many controversies in the results interpretation concerning the resistance, the deformations, the mechanical characteristics...

The purpose of this research work is to study the combined effect of fines and maximum grain diameter on the behavior of Zemmouri sand mixed with bentonite, in a range of fines content varying from 0% to 20%, using the Casagrand direct shear box.

The sand samples were reconstituted into three granular classes with different maximum diameters and the same minimum diameter: ( $D_{max}=4\text{mm}$ ,  $D_{max}=2\text{mm}$ ,  $D_{max}=0.63\text{mm}$ ) and ( $D_{min}=0.08\text{mm}$ ), mixed with bentonite, their percentages are 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%. The studied materials were reconstituted by the dry funnel pluviation method, with an initial relative density ( $D_r=55\%$ ) and were subjected to three initial normal stresses  $\sigma_n$  of 100 kPa, 200 kPa and 300 kPa.

The obtained results indicate clearly that the fines content, as well as the maximum diameter have significant influences on the mechanical behavior of the soils studied. They show that the shear strength decreases with increasing of bentonite content up to  $F_{cth}=15\%$ , beyond this value the strength increases. Moreover, the outcome of this research work shows clearly, for the three maximum diameters: ( $D_{max}=4\text{mm}$ ) of class "A", ( $D_{max}=2\text{mm}$ ) of class "B" and ( $D_{max}=0.63\text{mm}$ ) of class "C", that the increasing of the maximum diameter induces an increase in shear strength. This increase, is due to the role of maximum diameter which increases the entanglement and overlapping between grains thus promoting a more dilatant behavior, leading to an amplification of the shear strength and the dilatancy phase with more stable structure.

**Key words:** Sand, bentonite, shear strength, mechanical responses, fine content, maximum diameter, minimum diameter.

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENT	i
DEDICACE	ii
ملخص	iv
RESUMÉ	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES SYMBOLES	xvi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I	
I.1 Introduction	4
I-2 Effet de la taille des grains	4
I.3 Effet des fines	15
I.4 Effet de quelques paramètres sur la réponse mécanique des sols	24
I.4.1 Influence de la densité relative	24
I-4.2 Influence de la forme des grains	27
I.4.3 effet de la méthode de déposition	28
I.4.4 Influence de rapport de sur consolidation	29
I .5 Conclusion	30
CHAPITRE II	
II.1 Introduction	32
II.2 Dispositif expérimental	32
II.2.1 Composants de l'appareil de cisaillement direct à la boîte	33
II.2.2 Détermination des réponses mécaniques des sols (selon NF P94-071-1)	34
II.3 Programme expérimental	36
II.3.1 Matériaux testés	36
II.4 Détermination des propriétés physiques des matériaux étudiés	38
II.4.1 Essai au Pycnomètre	38
II.4.2 Analyse granulométrique et analyse sédimentométrie	39
II.4.3 Essai d'équivalent de sable	34
II.4.4 Détermination de densité relative minimale et maximale du sable	45
II.4.5 Détermination des limites d'Atterberg	48
II.5 Le but de l'essai	49
II.6 Procédure de la reconstitution des échantillons	49
II.6.1 Introduction	49
II.6.2 Reconstitution des échantillons	49
II.6.3 déterminations des masses des échantillons	52
II.7 Conclusion	53



<b>CHAPITRE III</b>	
<b>III.1 Introduction</b>	<b>54</b>
<b>III.2 Résultats des essais réalisés</b>	<b>54</b>
<b>III.2.1 Effet de la teneur en bentonite sur la réponse mécanique des mélanges de la classe "A" (Dmax=4mm/ Dmin=0.08)</b>	<b>55</b>
<b>III.2.1.1 Contrainte normale 100, 200 et 300kPa</b>	<b>55</b>
<b>III.2.2 Effet de la teneur en bentonite sur la réponse mécanique des mélanges de la classe "B" (Dmax=2mm/ Dmin=0.08mm)</b>	<b>59</b>
<b>III.2.3 Effet de la teneur en bentonite sur la réponse mécanique des mélanges de la classe "C" (Dmax=0,63mm/ Dmin=0.08mm)</b>	<b>63</b>
<b>III.3 Effet des fractions de bentonite sur la résistance au cisaillement maximale</b>	<b>67</b>
<b>III.3.1 Pour la classe "A" (Dmax=4mm/0.08µm)</b>	<b>68</b>
<b>III.3.2 Pour la classe granulaire "B" (Dmax=2mm/0.08µm)</b>	<b>69</b>
<b>III.3.3 Pour la classe granulaire "C" (Dmax=0.63mm/0.08µm)</b>	<b>70</b>
<b>III.4 Effet des fractions de bentonite sur la résistance au cisaillement normalisée</b>	<b>71</b>
<b>III.4.1 Pour la classe "A" (Dmax=4mm /Dmin=0.08µm)</b>	<b>71</b>
<b>III.4.2 Pour la classe "B" (Dmax=2mm /Dmin=0.08µm)</b>	<b>72</b>
<b>III.4.3 Pour la classe "C" (Dmax=0.63mm /Dmin=0.08µm)</b>	<b>72</b>
<b>III.5 Effet des fractions de bentonite sur l'angle de frottement interne pour les trois classes granulaires "A" , "B" , "C"</b>	<b>73</b>
<b>III.6 Conclusion</b>	<b>75</b>
<b>CHAPITRE IV</b>	
<b>IV.1 Introduction</b>	<b>77</b>
<b>IV.2 Résultats des essais réalisés</b>	<b>78</b>
<b>IV.2.1 Effet de diamètre maximal Dmax</b>	<b>78</b>
<b>IV.2.1.1. Contrainte normale, <math>\sigma_n = 100</math> kPa</b>	<b>78</b>
<b>IV.2.1.2. Contrainte normale, <math>\sigma_n = 200</math> kPa</b>	<b>84</b>
<b>IV.2.1.3. Contrainte normale, <math>\sigma_n = 300</math> kPa</b>	<b>90</b>
<b>IV.3 Effet de la taille des grains sur la résistance au cisaillement maximale</b>	<b>96</b>
<b>IV.3.1 Effet de diamètre maximal (Dmax)</b>	<b>96</b>
<b>IV.3.2 Effet de la taille des grains sur l'angle de frottement</b>	<b>99</b>
<b>IV.4 Conclusion</b>	<b>100</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>101</b>
<b>REFERANCE</b>	<b>103</b>

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

- Figure (I.1) :** influence des caractéristiques granulométriques sur la résistance cyclique des matériaux granulaires Yilmaz et al (2008) 6
- Figure (I.2) :** influence des diamètres D10 et D50 sur la résistance cyclique d'un sable limoneux Belkhatir et al (2011) 6
- Figure (I.3) :** influence des caractéristique granulométrique ( $D_{10}$ . $D_{50}$ .ESR.MGSR) sur la pression interstitielle d'un sable limoneux Belkhir et al (2014) 7
- Figure (I.4) :** Influence de coefficient d'uniformité sur la résistance au cisaillement non drainée des matériaux granulaires Liu et al. (2014) 8
- Figure (I.5) :** influence des caractéristique granulométriques  $D_{10}$ . $D_{30}$ . $D_{50}$ . $D_{60}$ . $C_u$ . $D_{10}$ . $R$ . $D_{50}$ . $R$ . $C_{ur}$  sur la résistance au cisaillement non drainée d'un sable limoneux Cherif Taiba et al (2016) 9
- Figure (I.6) :** Influence de diamètre moyen sur la résistance au cisaillement non drainée des matériaux granulaires, (a)  $D_{max}=4\text{mm}$ , (b)  $D_{max}=2.5\text{mm}$ , (c)  $D_{max}=1.6\text{mm}$  (Damage humide) Hazout et al. (2017) 11
- Figure (I.7) :** Influence de diamètre moyen sur la résistance au cisaillement non drainée des matériaux granulaires, (a)  $D_{min}=0,0016\text{mm}$ , (b)  $D_{min}=0,25\text{mm}$ , (c)  $D_{min}=0,63$  (Damage humide) Hazout et al. (2017) 12
- Figure (I.8) :** Rapport de résistance maximale par rapport aux diamètres de particules extrêmes des échantillons de sable de Chlef. ( $D_r = 25\%$ ,  $P_c = 50\text{ kPa}$ , Pluviation à sec) 13
- Figure (I.9) :** Rapport de résistance critique par rapport aux diamètres de particules extrêmes des échantillons de sable de Chlef. ( $D_r = 25\%$ ,  $P_c = 50\text{ kPa}$ , Pluviation à sec). Hazout et al (2022) 14
- Figure (I.10) :** réponse mécanique non drainée monotone du mélange sable limon de Chlef ( $D_r=52\%$ .  $P_c=100\text{ kPa}$ . DH) 16
- Figure (I.11) :** influence de la teneur en fines plastiques sur la surgénération de la surpression interstitielle 17
- Figure (I.12) :** effet de fines peu plastiques sur la résistance au cisaillement non drainée du sol Troncoso (1990) Koeste(1994) 18
- Figure (I.13) :** Influence de la teneur en fines plastiques sur la résistance au cisaillement du mélange du sable Firouzkooh-kaolinite (Ghahremani et Ghalandarzadeh, (2006) 18
- Figure (I.14) :** effet de la fraction de bentonite sur le comportement mécanique ( $\sigma_n=100\text{ kPa}$ ,  $D_r=55\%$ ) 19

<b>Figure (I.15) :</b> effet de la fraction de kaolin sur le comportement mécanique( $\sigma_n=100$ kPa, $Dr=55\%$ )	<b>20</b>
<b>Figure (I.16) :</b> effet de la fraction de cendre volante sur le comportement mécanique ( $\sigma_n=100$ kPa, $Dr=55\%$ )	<b>20</b>
<b>Figure (I.17) :</b> Effet de la fraction de cendre volantes sur le comportement mécanique ( $\sigma_n=100$ kPa / $Dr$ 25% PS) (Mahmoudi 2018)	<b>21</b>
<b>Figure (I.18) :</b> Effet de la fraction de cendre volante sur le comportement mécanique ( $\sigma_n=100$ kPa / $Dr=25\%$ /DH) (Mahmoudi 2018)	<b>21</b>
<b>Figure (I.19) :</b> Effet de la fraction de bentonite sur le comportement mécanique Bouchibane et Ben Abdel-Moutaleb (2020)	<b>22</b>
<b>Figure (I.20) :</b> Comportement mécanique des éprouvettes de mélange sable-bentonite à une pression de confinement de 100 kPa. Bayat et al. (2012)	<b>23</b>
<b>Figure (I.21) :</b> Effet de la densité relative sur la résistance à la liquéfaction(Tatsuoka et al. 1986)	<b>24</b>
<b>Figure (I.22) :</b> Effet de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction du sable de Chlef(Arab et al. 2010)	<b>25</b>
<b>Figure (I.23) :</b> Effet de la densité relative initiale sur le comportement mécanique de sable de Chlef ( $\sigma_n=100$ kPa, PS) Bachir et Banchaa (2018)	<b>25</b>
<b>Figure (I.24) :</b> Effet de la densité relative initiale sur le comportement mécanique de sable d'Hostun ( $\sigma_n=100$ kPa, PS) Bachir et Banchaa (2018)	<b>26</b>
<b>Figure (I.25) :</b> Effet de la densité relative initiale sur le comportement mécanique du sable de Fontainebleau ( $\sigma_n=100$ kPa, PS) Bachir et Banchaa (2018)	<b>26</b>
<b>Figure (I.26) :</b> Réponse non drainée du mélange sable limon ( $P_c=100$ Kpa, $Dr=52\%$ ) de la méthode de disposition sur la réponse non drainée du sol de chlef Cherif taiba et all (2018)	<b>27</b>
<b>Figure (I.27) :</b> influence de la méthode de disposition sur la réponse non drainée du sol de chlef	<b>28</b>
<b>Figure (I.28) :</b> influence de rapport de sur consolidation sur le comportement monotone de sable de Chlef Della et al (2011)	<b>29</b>

## CHAPITRE II

<b>Figure (II.1) :</b> Appareil de cisaillement	<b>32</b>
<b>Figure (II.2) :</b> Les accessoires de la boite de cisaillement	<b>33</b>
<b>Figure (II.3) :</b> plan de contrainte normale( $\sigma$ ) et tangentielle	<b>35</b>
<b>Figure (II.4) :</b> critère de rupture de Mohr.Couloumb's	<b>35</b>
<b>Figure (II.5) :</b> (a)Sable de Zemmouri (trois classes granulaires), (b)Bentonite	<b>37</b>
<b>Figure (II.6) :</b> Essais au pycnomètre	<b>39</b>
<b>Figure (II.7) :</b> analyse granulométrique par sédimentation	<b>40</b>
<b>Figure (II.8) :</b> Analyse granulométrique par tamisage	<b>40</b>
<b>Figure (II.9) :</b> courbes granulométrique des mélanges sable-bentonite (classe A) ( $D_{max}=4mm/D_{min}=0,08mm$ )	<b>41</b>
<b>Figure (II.10) :</b> courbes granulométrique des mélanges sable-bentonite (classe B) ( $D_{max}=2mm/D_{min}=0,08mm$ )	<b>41</b>
<b>Figure (II.11) :</b> courbes granulométrique des mélanges sable-bentonite (classe C) ( $D_{max}=0,63mm/D_{min}=0,08mm$ )	<b>42</b>
<b>Figure (II.12) :</b> Appareil d'équivalent de sable	<b>44</b>
<b>Figure (II.13) :</b> essai d'équivalent de sable	<b>44</b>
<b>Figure (II.14) :</b> détermination de la densité relative de sable ( $\phi < 5mm$ )	<b>46</b>
<b>Figure (II.15) :</b> Variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en bentonite pour la classe C'' ( $D_{max}= 0,63mm/ D_{min} = 0,08mm$ )	<b>46</b>
<b>Figure (II.16) :</b> Variation des indice des vides en fonction de bentonite pour la "classe B" ( $D_{max}=2mm/ D_{min} = 0,08mm$ )	<b>47</b>

<b>Figure (II.17) :</b> Variation des indice des vides en fonction de bentonite pour la ‘ ‘classe A’ ’ ( $D_{max}=4mm/ D_{min} = 0,08mm$ )	<b>47</b>
<b>Figure (II.18) :</b> Appareil de Casagrand	<b>48</b>
<b>Figure (II.19) :</b> Méthode de la pluviation à sec	<b>51</b>
 <b>CHAPITRE III</b>	
<b>Figure (III.1) :</b> Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "A" ( $D_{max}=4mm, D_{min}=0.08mm, \sigma_n= 100 \text{ kPa}, Dr=55\%$ )	<b>56</b>
<b>Figure (III.2) :</b> Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "A" ( $D_{max}=4mm, D_{min}=0.08mm, \sigma_n= 200 \text{ kPa}, Dr=55\%$ )	<b>57</b>
<b>Figure (III.3) :</b> Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "A" ( $D_{max}=4mm, D_{min}=0.08mm, \sigma_n= 300 \text{ kPa}, Dr=55\%$ )	<b>58</b>
<b>Figure (III.4) :</b> Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "B" ( $D_{max}=2mm, D_{min}=0.08mm, \sigma_n= 100 \text{ kPa}, Dr=55\%$ )	<b>60</b>
<b>Figure (III.5) :</b> Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "B" ( $D_{max}=2mm, D_{min}=0.08mm, \sigma_n= 200 \text{ kPa}, Dr=55\%$ )	<b>61</b>
<b>Figure (III.6) :</b> Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "B" ( $D_{max}=2mm, D_{min}=0.08mm, \sigma_n= 300 \text{ kPa}, Dr=55\%$ )	<b>62</b>
<b>Figure (III.7) :</b> Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "C" ( $D_{max}=0,63mm, D_{min}=0.08mm, \sigma_n= 100 \text{ kPa}, Dr=55\%$ )	<b>64</b>
<b>Figure (III.8) :</b> Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "C" ( $D_{max}=0,63mm, D_{min}=0.08mm, \sigma_n= 200 \text{ kPa}, Dr=55\%$ )	<b>65</b>
<b>Figure (III.9) :</b> Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "C" ( $D_{max}=0,63mm, D_{min}=0.08mm, \sigma_n= 300 \text{ kPa}, Dr=55\%$ )	<b>66</b>
<b>Figure (III.10) :</b> (a) Résistance au cisaillement maximale en fonction contrainte normal (b) Résistance au cisaillement maximale en fonction de la teneur en fine <b>Classe "A"</b>	<b>68</b>
<b>Figure (III.11) :</b> (a) Résistance au cisaillement maximale en fonction contrainte normal (b) Résistance au cisaillement maximale en fonction de la teneur en fine <b>Classe "B"</b>	<b>69</b>
<b>Figure (III.12) :</b> (a) Résistance au cisaillement maximale en fonction contrainte normal (b) Résistance au cisaillement maximale en fonction de la teneur en fine <b>Class "C"</b>	<b>70</b>
<b>Figure (III.13) :</b> Résistance au cisaillement normalisé en fonction de la fraction des fines pour la <b>Classe "A"</b> ( $D_{max}=4mm /D_{min}=0.08\mu m$ )	<b>71</b>

<b>Figure (III.14) :</b> Résistance au cisaillement normalisé en fonction de la fraction des fines pour la classe "B" ( $D_{max}=2\text{mm} / D_{min}=0.08\mu\text{m}$ )	<b>72</b>
<b>Figure (III.15) :</b> Résistance au cisaillement normalisé en fonction de la fraction des fines pour la classe "C" ( $D_{max}=0.63\text{mm} / D_{min}=0.08\mu\text{m}$ )	<b>72</b>
<b>Figure (III.16) :</b> influence de la fraction des fines de différentes classes granulaire sur l'angle de frottement interne	<b>74</b>
<b>CHAPITRE IV</b>	
<b>Figure (IV.1) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ , $\sigma_n=100 \text{ kPa}$ , $D_r=55\%$ , $FB=0\%$ )	<b>79</b>
<b>Figure (IV.2) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ , $\sigma_n=100 \text{ kPa}$ , $D_r=55\%$ , $FB=5\%$ )	<b>80</b>
<b>Figure (IV.3) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ , $\sigma_n=100 \text{ kPa}$ , $D_r=55\%$ , $FB=10\%$ )	<b>81</b>
<b>Figure (IV.4) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ , $\sigma_n=100 \text{ kPa}$ , $D_r=55\%$ , $FB=15\%$ ) (a) - Evolution de contrainte de cisaillement	<b>82</b>
<b>Figure (IV.5) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ , $\sigma_n=100 \text{ kPa}$ , $D_r=55\%$ , $FB=20\%$ )	<b>83</b>
<b>Figure (IV.6) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ , $\sigma_n=200 \text{ kPa}$ , $D_r=55\%$ , $FB=0\%$ )	<b>85</b>
<b>Figure (IV.7) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ , $\sigma_n=200 \text{ kPa}$ , $D_r=55\%$ , $FB=5\%$ )	<b>86</b>
<b>Figure (IV.8) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ , $\sigma_n=200 \text{ kPa}$ , $D_r=55\%$ , $FB=10\%$ )	<b>87</b>
<b>Figure (IV.9) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ , $\sigma_n=200 \text{ kPa}$ , $D_r=55\%$ , $FB=15\%$ )	<b>88</b>
<b>Figure (IV.10) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ , $\sigma_n=200 \text{ kPa}$ , $D_r=55\%$ , $FB=20\%$ )	<b>89</b>

<b>Figure (IV.11) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$ mm, $\sigma_n=300$ kPa, $D_r=55\%$ , $FB=0\%$ )	<b>91</b>
<b>Figure (IV.12) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$ mm, $\sigma_n=300$ kPa, $D_r=55\%$ , $FB=5\%$ )	<b>92</b>
<b>Figure (IV.13) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$ mm, $\sigma_n=300$ kPa, $D_r=55\%$ , $FB=10\%$ )	<b>93</b>
<b>Figure (IV.14) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$ mm, $\sigma_n=300$ kPa, $D_r=55\%$ , $FB=15\%$ )	<b>94</b>
<b>Figure (IV.15) :</b> Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$ mm, $\sigma_n=300$ kPa, $D_r=55\%$ , $FB=20\%$ )	<b>95</b>
<b>Figure (IV.16) :</b> Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte initiale (Effet de $D_{max}$ ) (a)- $FB=0\%$ , (b)- $FB=5\%$ , (c)- $FB=10\%$ , (d)- $FB=15\%$ , (e)- $20\%$	<b>98</b>
<b>Figure (IV.17) :</b> Angle de frottement en fonction des diamètres extrêmes ( $D_{max,}$ ) de groupe 1 ( $A_i$ , $B$ et $C_i$ )	<b>99</b>

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE II

<b>Tableau II.1</b> : Composition chimique de la bentonite	<b>37</b>
<b>Tableau II.2</b> : Densité relative des matériaux	<b>39</b>
<b>Tableau II.3</b> : Propriétés physiques de mélange sable-bentonite pour la classe A ( $D_{\max}=4\text{mm}/D_{\min}=0.08\text{mm}$ )	<b>42</b>
<b>Tableau II.4</b> : Propriétés physiques de mélange sable-bentonite pour la classe B ( $D_{\max}=2\text{mm}/D_{\min}=0.08\text{mm}$ )	<b>43</b>
<b>Tableau II.5</b> : Propriétés physiques de mélange sable-bentonite pour la classe C ( $D_{\max}=0.63\text{mm}/D_{\min}=0.08\text{mm}$ )	<b>43</b>
<b>Tableau II.6</b> : Résultats de test d'équivalent de sable	<b>45</b>
<b>Tableau II.7</b> : Résultats de test (Limites d'Atterberg)	<b>48</b>
<b>Tableau II.8</b> : Les masses des mélanges sable-bentonite	<b>52</b>

### CHAPITRE IV

<b>Tableau IV.1</b> : la résistance au cisaillement maximale ( $0.63\text{mm} \leq D_{\max} \leq 4\text{mm}$ ; $D_{\min}=0.08\text{mm}$ , $\sigma_n = 100\text{KPa}$ , $D_r=55\%$ ).	<b>78</b>
<b>Tableau IV.2</b> : la résistance au cisaillement maximale ( $0.63\text{mm} \leq D_{\max} \leq 4\text{mm}$ ; $D_{\min}=0.08\text{mm}$ , $\sigma_n = 300\text{KPa}$ , $D_r=55\%$ ).	<b>90</b>



## LISTE DES SYMBOLES

$C_c$	: Coefficient de courbure
$C_u$	: Coefficient d'uniformité
$C$	: Cohésion
$D_{max}$	: Diamètre maximale des grains
$D_{min}$	: Diamètre minimale des grains
$D_{10}$	: Diamètre effectif ou diamètre correspondant à 10% du tamis
$D_{30}$	: Diamètre correspondant à 30% du tamis
$D_{50}$	: Diamètre moyen ou diamètre correspondant à 50% du tamis
$D_{60}$	: Diamètre qui correspondant à 60% du tamis
$D_r$	: Densité relative
$e$	: L'indice des vides globale
$e_{max}$	: L'indice des vides maximal
$e_{min}$	: L'indice des vides minimal
$FA$	: Teneur en cendre volante
$FB$	: Teneur en bentonite
$FC$	: Teneur en fines
$FC_{th}$	: seuil de la teneur en grains fins
$FK$	: Teneur en kaolinite
$G_s$	: Gravité spécifique
$P'_c$	: Pression de confinement initiale
$\sigma_n$	: Contrainte normale initiale
$\tau$	: Résistance au cisaillement
$\tau_{max}$	: Résistance au cisaillement maximale
$\phi$	: L'angle de frottement
$\Delta h$	: Déplacement horizontal
$\Delta L$	: Déplacement vertical

## INTRODUCTION GENERALE

La stabilité et la résistance des sols granulaires ont toujours été parmi les problèmes les plus importants dans le domaine de la géotechnique. Dans La littérature publiée, il existe de nombreuses recherches expérimentales qui ont été menées pour analyser et comprendre les phénomènes fondamentaux qui régissent la réponse du sol. L'étude de la caractérisation mécanique et physique des sols granulaires traités et améliorés par d'autres matériaux comme : les cendres volantes, la Kaolinite, la bentonite, les fibres, le bio-char, etc.) implique nécessairement la connaissance des concepts fondamentaux contrôlant leurs comportements sous l'impact de divers facteurs.

Plusieurs recherches ont étudié l'impact de la fraction et le type de fines sur la résistance au cisaillement des sables. Certains travaux de recherches, ont montré que la résistance au cisaillement du sable diminue avec l'augmentation de la teneur en fines jusqu'à un certain seuil. D'autres recherches ont montré des résultats opposés. En effet de nombreux autres paramètres sont en cours d'étude comme la granulométrie (la taille des grains) en termes de diamètre moyen, diamètre maximal, diamètre minimal, coefficient d'uniformité, coefficient de courbure, etc...

Pour cette raison, Nous s'intéressons à l'étude de l'influence de diamètre maximal des grains sur le comportement des sables qui sont souvent rencontrés dans la nature à des tailles variables, pouvant aller de quelques micromètres (particules fines) à quelques millimètres.

L'objectif de notre travail est de contribuer à l'amélioration de la connaissance du comportement mécanique des sables reconstitués en différentes tailles maximales (en différentes classes granulaires) et à différentes teneurs en bentonite par une technique déposition connue par le nom de la pluviation à sec.

Le choix de ce matériau était suite au tremblement de terre particulièrement violent qui a secoué la zone de Boumerdes, dont la magnitude a été de 6.7 sur l'échelle de Richter. Ce séisme a été le plus meurtrier d'Algérie depuis celui d'El Asnam (Chlef actuellement) en 1980.

Ce dernier a été localisé à l'intérieur de la mer, à 7 km au nord de l'embouchure d'oued isser, dans la commune de Zemmouri. Des infrastructures publiques et privées notamment, les immeubles d'habitation, les mosquées, les établissements scolaires, universitaires et sanitaires, les ponts, les chaussées ont été complètement détruits, ...

Ce phénomène a causé d'énormes déformations aux sols tels que : le glissement de terrains, la liquéfaction des sols sableux etc...

Le sable étudié a été collecté d'une zone qui a subi une liquéfaction, située à Zemmouri el Bahri, et ce dans le but d'étudier son comportement sans et avec l'ajout des fines. Des échantillons de sable ont été reconstitués en trois classes granulaires ayant différents diamètres maximaux et un seul diamètre minimal : ( $D_{max}=4\text{mm}$ ,  $D_{max}=2\text{mm}$ ,  $D_{max}=0,63\text{mm}$ ) et ( $D_{min}=0,08\text{mm}$ ), mélangés avec la bentonite, leurs pourcentages sont de 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, et 20%. La méthode de déposition est la pluviométrie à sec. Les matériaux étudiés sont soumis à trois contraintes normales initiales  $\sigma_n$  de 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa.

Ce mémoire est réparti en 4 chapitres :

Le premier chapitre présente une recherche bibliographique bien détaillée des travaux réalisés sur l'influence des fines plastique et non plastique, ainsi que l'effet de la granulométrie sur la réponse mécanique des sables. Ensuite, nous présentons l'influence de quelques paramètres sur la réponse des sols granulaires.

Le deuxième chapitre présente l'équipement expérimental et la procédure de l'essai de cisaillement direct à la boîte. Ensuite, les propriétés physiques des matériaux utilisés, à savoir le sable de Zemmouri et la bentonite, ainsi que le mode opératoire utilisé pour reconstituer et installer les échantillons pour différents essais mécaniques sont présentés.

Le troisième chapitre présente les résultats des essais de cisaillement direct à la boîte, dans le but d'étudier l'impact de la teneur en bentonite ( $FB = 0\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$  et  $20\%$ ) sur la réponse mécanique du sable de Zemmouri.

Enfin, le quatrième chapitre est une analyse détaillée de l'effet combiné de la taille des grains en termes de diamètre maximal ( $D_{max}= 4\text{mm}$ ,  $D_{max}= 2\text{mm}$  et  $D_{max} =0,63 \text{ mm}$ ), et de la contrainte normale initiale ( $\sigma_n = 100$ ,  $200$  et  $300 \text{ kPa}$ ) sur les propriétés mécaniques des mélanges sable de Zemmouri-bentonite.

**CHAPITRE I**  
**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### I.1 INTRODUCTION

Le sol supporte les fondations d'ouvrages, sert comme matériaux de construction (barrages, remblai), peut comporter des ouvrages souterrains (tunnels), reçoit des matériaux à stocker (déchets industriels et nucléaires) et sert à extraire des minéraux et autres ressources de production de l'énergie et des matériaux. Il est donc très important de se renseigner des caractéristiques des mauvais sols qui sont la cause d'instabilité des structures projetées. (Gadouri 2017)

Les sols que l'on trouve couramment dans la nature sont constitués de différents mélanges et minéraux. Les mélanges de sols tels que les argiles limoneuses, les sables argileux, les sables limoneux, les limons et les argiles, le sable propre, se trouvent le plus souvent dans la nature. Le comportement mécanique et la stabilité des sols granulaires mélangés avec les fines a toujours été l'un des problèmes les plus importants qui nécessite des analyses et des études détaillées que ce soit de point de vu comportement ou bien amélioration.

Les cendres volantes, la kaolinite, la bentonite sont des matériaux qui ont été introduits dans le domaine de la géotechnique ces dernières années, font partie des paramètres qui jouent des rôles très importants dans la compréhension de la réponse mécanique des sols.

La taille des grains ainsi que la présence des fines sont parmi les facteurs les plus importants influençant le comportement des sols et qui doivent être correctement identifiés dans le contrôle de la réponse mécanique des matériaux granulaires. Dans ce chapitre, nous entamons une synthèse des travaux de recherche mettant l'accent sur l'influence de la taille des grains avec l'effet des fines (la bentonite). Ensuite, on évoque l'influence de quelques autres paramètres sur la résistance au cisaillement, comme, la densité relative, la contrainte initiale, la forme des particules...etc.

### I-2 Effet de la taille des grains

Il existe plusieurs paramètres qui influent sur le comportement des sols et ses propriétés ; parmi ces derniers, la taille des grains. (Lim et al, 2012) ont étudié l'effet de la taille des grains sur le comportement des sols et ont trouvé que ce paramètre a également un effet significatif sur les propriétés mécaniques des sables. (Ayad et al, 1990) ont observé à travers des essais triaxiaux que la forme des grains a un effet plus important que la taille des grains qui a une faible influence sur les comportements des sols. Cependant, la diminution de la taille des grains induit la diminution des indices des vides extrêmes et la résistance au cisaillement du sable. Vaid et al. (1991) ont étudié l'effet du coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) sur la résistance au cisaillement cyclique non drainé de trois échantillons sableux

reconstitués avec le même diamètre moyen ( $D_{50}$ ). Ils ont conclu que la résistance à la liquéfaction cyclique augmente avec l'augmentation du coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) à faible densités relatives et la tendance inverse était observé à des densités relatives élevées. (Prashanth et al. 2015) ont montré que la résistance au cisaillement au pic des sables avec des caractéristiques morphologiques (la forme et de la structure externe) similaires est affectée par la taille des grains, lorsque les essais sont effectués au même indice des vides. (Islam et al. 2011) ont observé qu'une augmentation de la taille des grains entraîne une augmentation de la résistance au cisaillement maximale et également une augmentation de l'angle de frottement interne. (Wang et al. 2013) ont trouvé à travers une série d'essais de cisaillement simple et d'essais triaxiaux que la taille des grains a une influence significative sur l'angle de frottement interne du sable. Ils ont trouvé que cet angle augmente avec l'augmentation de la taille des grains. (Alias et al. 2014) ont indiqué que les essais avec des diamètres maximaux élevés (gros grains), produisent des angles de frottement interne plus efficaces et développent des forces de cisaillement plus faibles. Donc l'angle de frottement interne dépend de la taille des grains. (Cherif Taiba. 2017) a réalisé des essais non drainés sur trois sables ayant différents diamètres maximaux : "sable grossier de Chlef " $D_{max}=2\text{mm}$ ", sable moyen de Chlef " $D_{max}=0.63\text{mm}$ " et sable fin de Chlef " $D_{max}=0.25\text{mm}$ ", mélangés avec le sol fin provenant du sable de Chlef (limons) " $D_{max}=0.08\text{mm}$ " pour une gamme de teneur en fines  $F_c$  variant de 0% à 30%. Il a trouvé que la taille des grains a une influence très significative sur le comportement non drainée des mélanges sable- limon. En effet, il a montré que le sable grossier ayant un diamètre maximal " $D_{max}=2 \text{ mm}$ " présente une résistance non drainée élevée par rapport au sable moyen " $D_{max}=0.63 \text{ mm}$ " et par rapport au sable fin ayant un " $D_{max}=0.25 \text{ mm}$ ". Par contre, la tendance inverse a été observée pour les trois types de sables, mélangés avec 30% des fines peu plastiques ( $F_c=30\%$ ), où la résistance au cisaillement non drainée maximale du sable fin " $D_{max}=0.25 \text{ mm}$ " est très élevée par rapport au sable moyen et au sable grossier " $D_{max}=0.63 \text{ mm}$  et  $D_{max}=2 \text{ mm}$ " (Yilmaz et al. 2008) ont montré qu'il existe une bonne relation liant la résistance cyclique et la taille des grains en termes de " $D_{10}$ ,  $D_{30}$  et  $D_{60}$ ", par rapport à la relation entre la résistance cyclique avec le coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure des mélanges sable-limon reconstitués avec une densité relative " $D_r=60\%$ ".

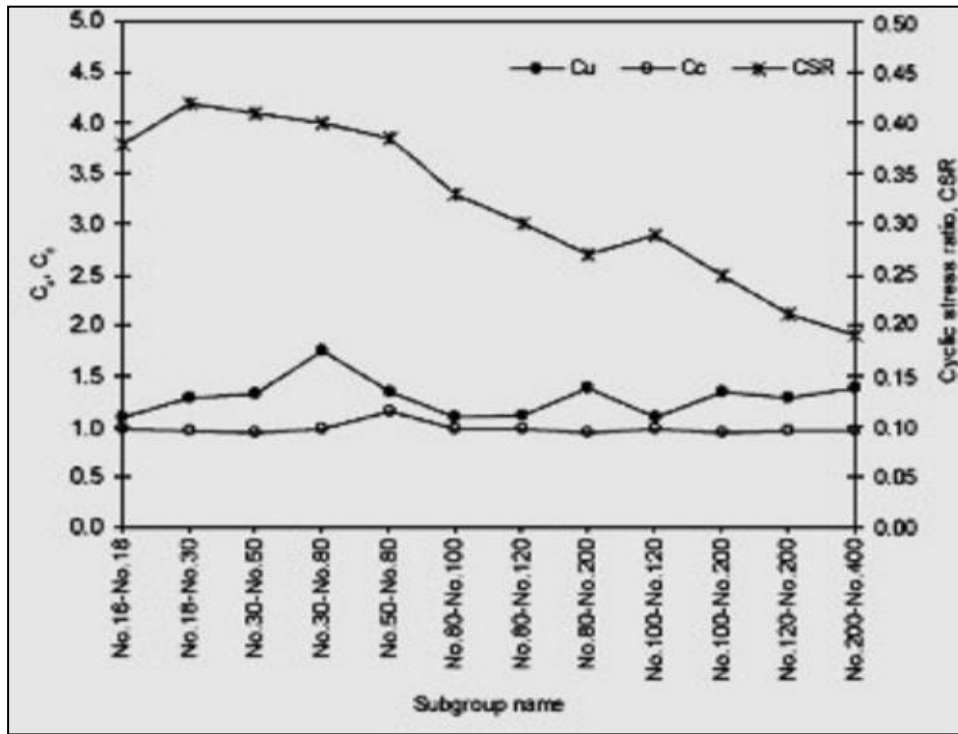


Figure I.1 : influence des caractéristiques granulométriques sur la résistance cyclique des matériaux granulaires Yilmaz et al (2008)

(Belkhatir et al. 2011) ont étudié l'influence de "D<sub>10</sub> et D<sub>50</sub>" sur la résistance cyclique d'un sable limoneux avec une densité relative "D<sub>r</sub> = 53%". Ils ont montré que la résistance cyclique augmente linéairement avec l'augmentation du diamètre efficace "D<sub>10</sub>", du diamètre moyen des grains "D<sub>50</sub>" et avec la diminution de la fraction des fines peu plastiques pour les mélanges sable-limon étudiés.

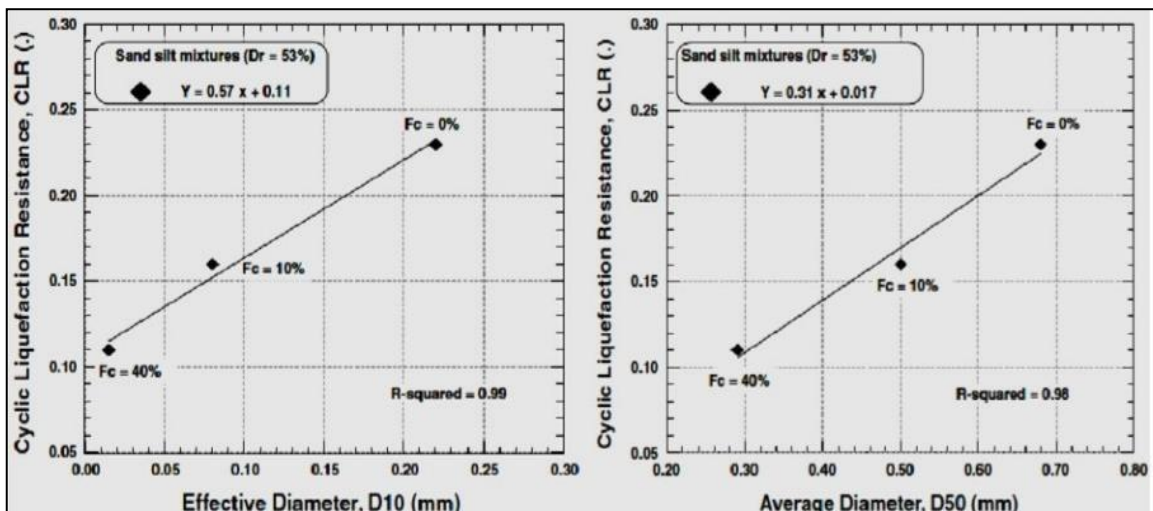


Figure I.2 : influence des diamètres D10 et D50 sur la résistance cyclique d'un sable limoneux Belkhatir et al (2011)

(Belkhatir et al. 2014) ont étudié l'influence des caractéristiques granulométriques, en termes de " $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $ESR = D_{10\text{sable}} / D_{10\text{mélanges}}$ ,  $MGSR = D_{50\text{sable}} / D_{50\text{mélanges}}$  et  $CUR = C_{u\text{ sable}} / C_{u\text{ mélanges}}$ ", sur la surpression interstitielle maximale d'un sable limoneux, reconstitué au laboratoire avec trois densités relatives "20%, 53% et 91%". Ils ont trouvé que la surpression interstitielle diminue avec l'augmentation de " $D_{10}$  et  $D_{50}$ ". Par contre, ils ont constaté que la surpression interstitielle maximale, augmente avec l'augmentation de " $ESR$  et  $MGSR$ " et la diminution de " $CUR$ " des mélanges sable-limon.

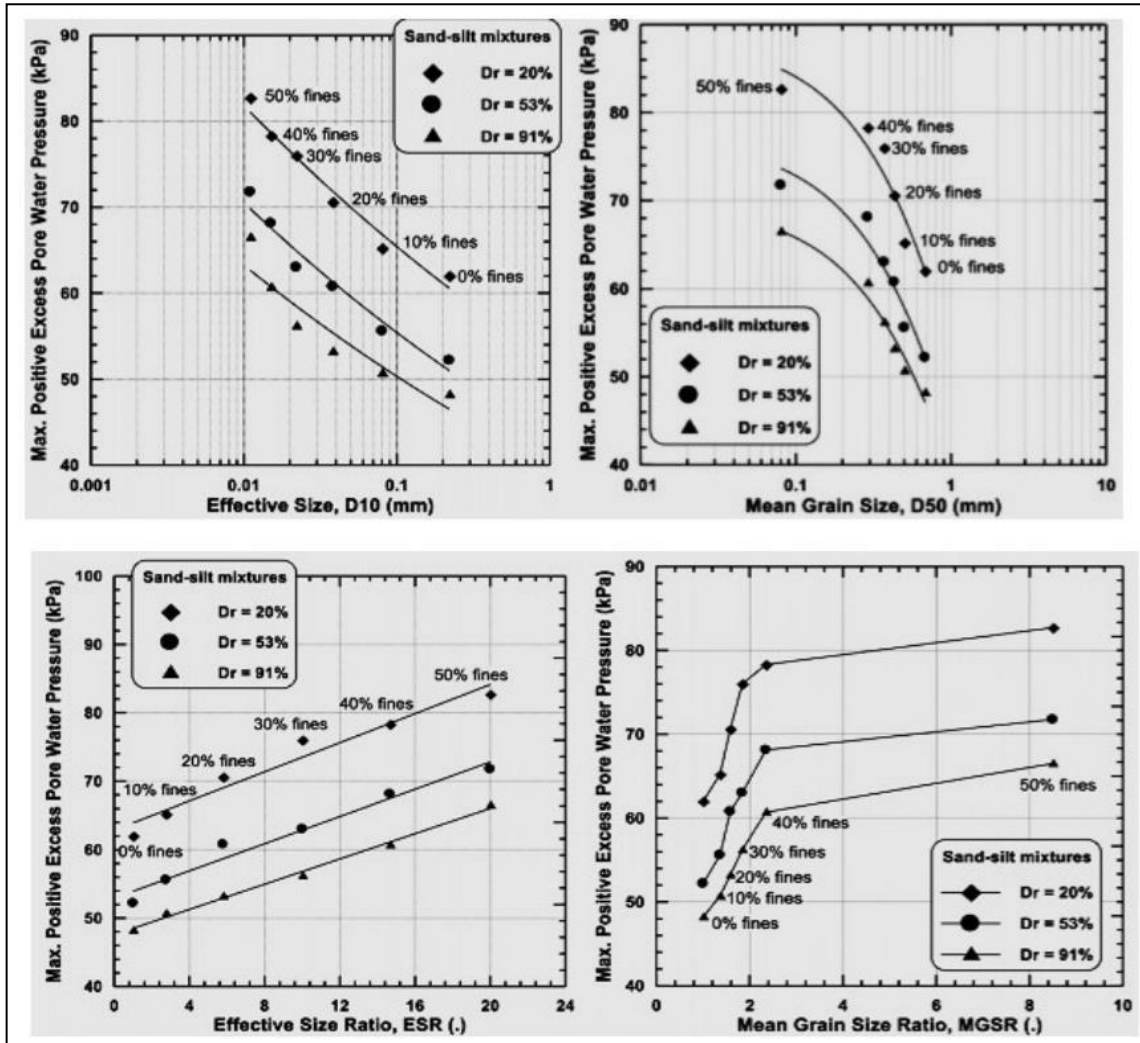
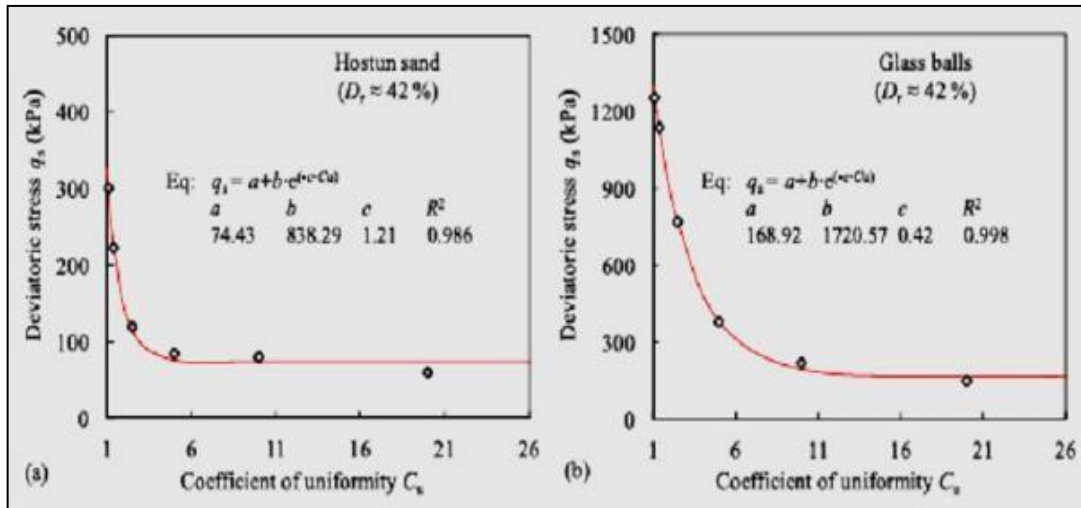


Figure I.3 : influence des caractéristique granulométrique ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $ESR$ ,  $MGSR$ ) sur la pression interstitielle d'un sable limoneux Belkhir et all (2014)



(Liu et al. 2014) ont étudié l'influence de la granulométrie sur le comportement mécanique des matériaux granulaires. Une série d'essais triaxiaux ont été réalisés sur deux matériaux différents "billes de verre et sable d'Hostun", à des densités relatives similaires. Ils ont conclu que la résistance au cisaillement non drainée diminue avec l'augmentation de coefficient d'uniformité du mélange " $C_u$ " de 1.1 à 20



**Figure I.4 : Influence de coefficient d'uniformité sur la résistance au cisaillement non drainée des matériaux granulaires, (a) sable d'Hostun (b) billes de verre Liu et al (2014).**

(Cherif Taiba et al. 2016) ont montré que la taille et la forme des grains ont une influence très significative sur le comportement de deux sables limoneux : Le premier matériau est un mélange contenant sable de Chlef avec limons de Chlef et le deuxième matériau est un mélange de sable de Fontainebleau avec limons de Chlef ayant  $F_c=0\%$  à  $F_c=40\%$ , pour la même densité relative " $D_r=52\%$ " et soumis sous la même pression du confinement initiale " **$P'_c=100$  kPa**".

Ils ont trouvé que la résistance non drainée maximale diminue d'une façon linéaire et d'une façon logarithmique avec la diminution des diamètres " $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$  et  $D_{60}$ ". Cette résistance, diminue aussi avec l'augmentation du coefficient d'uniformité et au même temps avec l'augmentation de la fraction des fines. Il existe une relation logarithmique entre la résistance au cisaillement maximale et les rapports de taille des grains " $D_{10R}$ ,  $D_{50R}$  et  $C_{UR}$ ". Cette relation est très significative pour le mélange de sable de Fontainebleau-limon de Chlef par rapport au mélange sable de Chlef-limon de Chlef, cela signifie que la forme des particules de sable a un effet notable sur le comportement non drainé des mélanges sable limon comme l'indique la figure suivante.

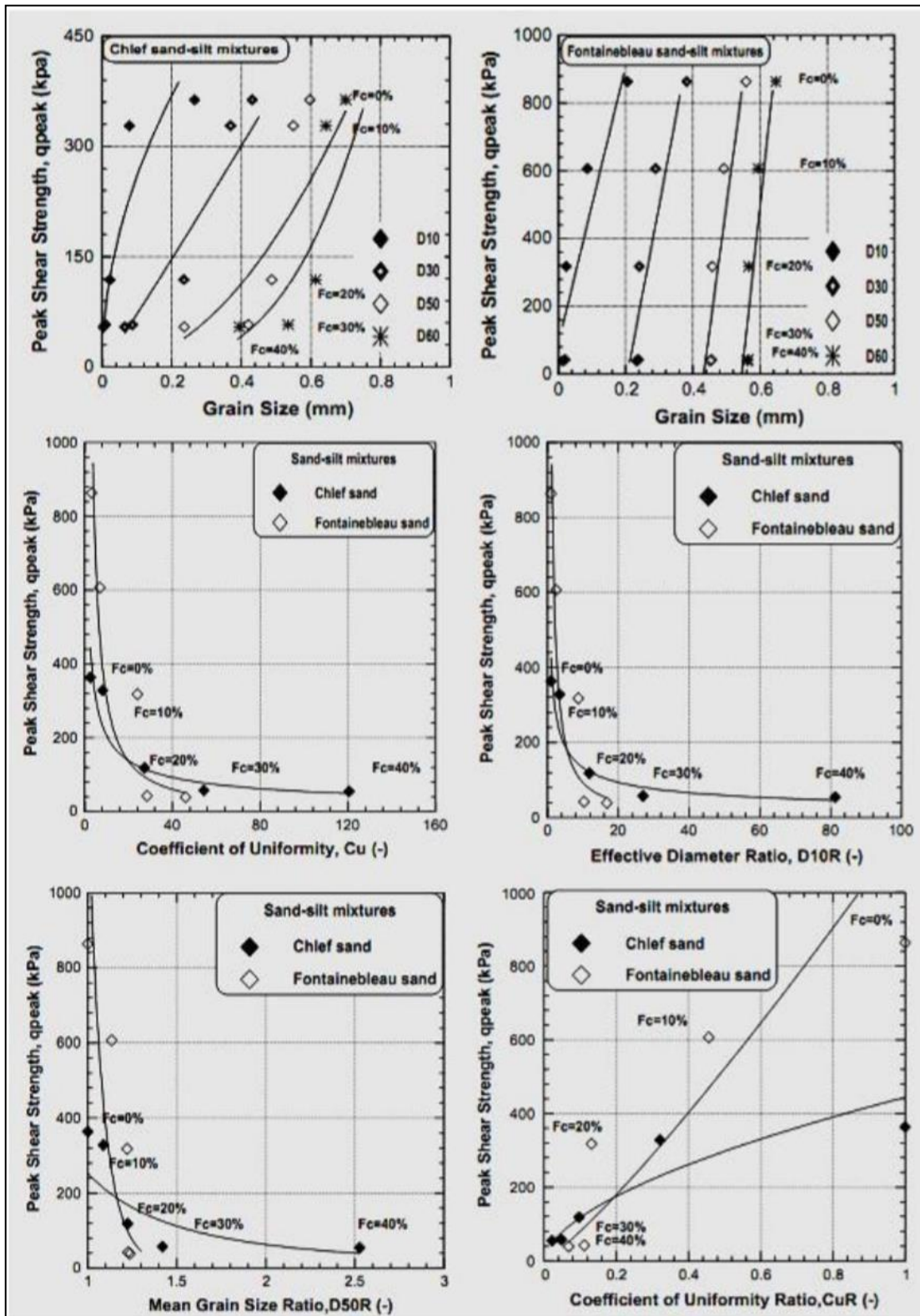


Figure I.5 : influence des caractéristique granulométriques  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{60}$ ,  $C_u$ ,  $D_{10R}$ ,  $D_{50R}$ ,  $C_{uR}$  sur la résistance au cisaillement non drainée d'un sable limoneux Cherif Taiba et al (2016).

Cherif Taiba et al. (2018) ont analysé les effets de la granulométrie sur l'instabilité (**la contrainte d'instabilité non drainée**) et des rapports d'état d'équilibre des sols sableux limoneux. Ils ont clairement observé que la granulométrie a une influence significative sur la contrainte d'instabilité et rapports à l'état d'équilibre des mélanges sable-limon et confirmer l'existence de corrélations simples entre la contrainte d'instabilité non drainée, les indices d'équilibre, la teneur en fines, les indices de vide et les paramètres de classification (D10, D30, D50, D60, Cu).

Hazout et al. (2017) ont effectué une série des essais triaxiaux sur 9 échantillons nommés (A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub>, et C<sub>i</sub>) ayant différents diamètres maximaux ( $D_{max}=4\text{mm}$ , 2.5mm et 1.6mm) et diamètres moyens ( $D_{50}=1\text{mm}$ , 0.63mm et 0.25mm) et une deuxième série sur 9 autres échantillons nommés (D<sub>i</sub>, E<sub>i</sub>, et F<sub>i</sub>) ayant différents diamètres minimaux ( $D_{min}=0,63\text{ mm}$ , 0,25 mm et 0,0016 mm) et diamètres moyens ( $D_{50}=2,5\text{ mm}$ , 1,6 mm et 1 mm) dans le but d'analyser leurs influences sur la résistance maximale non drainée de ces matériaux. Ils ont noté que la taille de grains à un effet notable sur la résistance au cisaillement des sols granulaires. Ils ont indiqué aussi que l'apparition d'une perte totale de résistance sur tous les échantillons A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub>, et C<sub>i</sub>, avec une influence très significative du diamètre maximal ( $D_{max}$ ) et du diamètre moyen ( $D_{50}$ ) sur la résistance au cisaillement non drainée et ce dans le cas de la reconstitution des échantillons par le damage humide. De plus, ils ont interprété l'influence combinée des paramètres " $D_{min}$ " et " $D_{50}$ " dans l'augmentation de la résistance au cisaillement non drainée par le fait de l'amplification de l'enchevêtrement entre les gros grains du sable avec les particules fines, qui induit une augmentation de la phase de dilatance et par conséquent une structure plus stable comme le montre dans les figures (1.6) et (1.7).

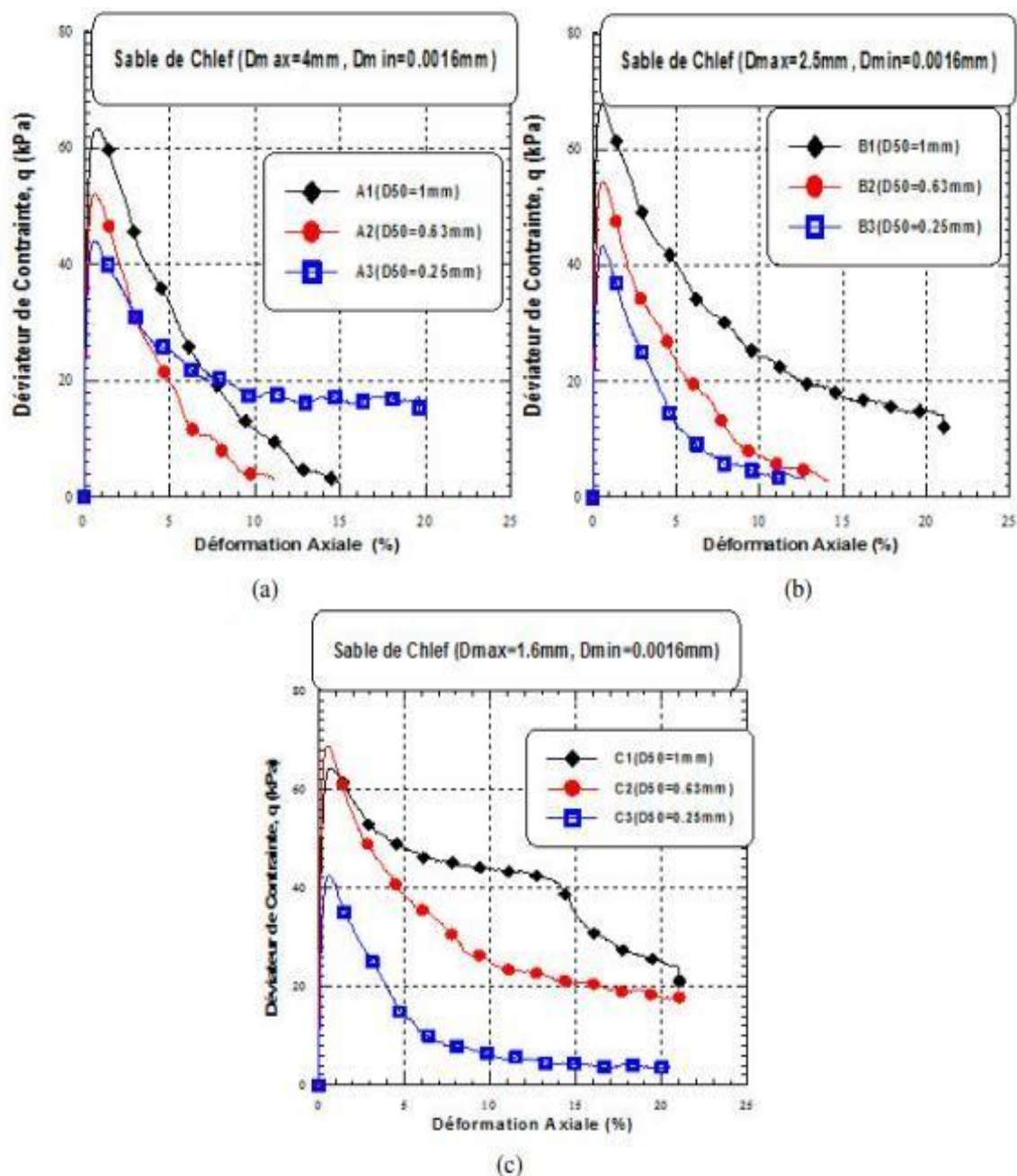
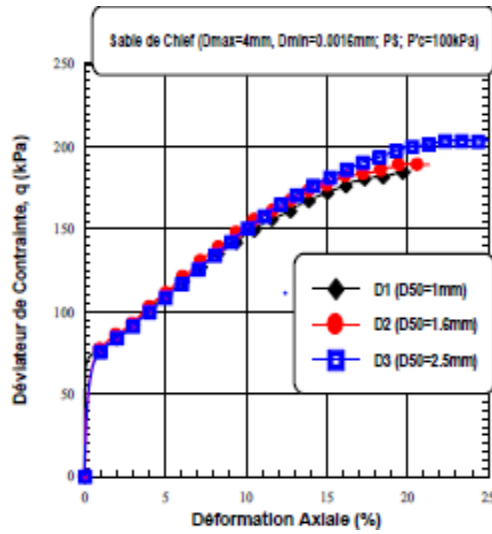
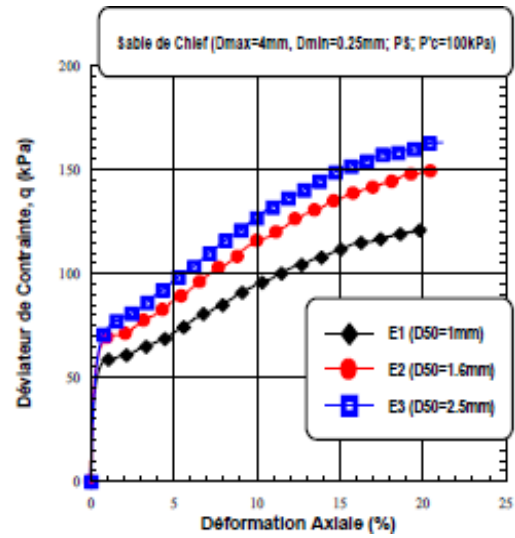


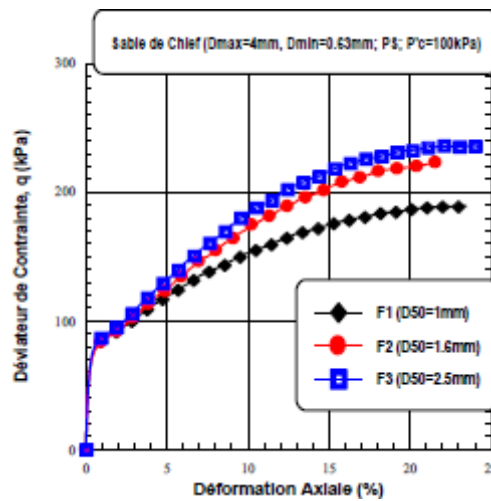
Figure I.6 : Influence de diamètre moyen sur la résistance au cisaillement non drainée des matériaux granulaires, (a) D<sub>max</sub>=4mm, (b) D<sub>max</sub>=2.5mm, (c) D<sub>max</sub>=1.6mm (Damage humide). Hazout et al. (2017).



(a)



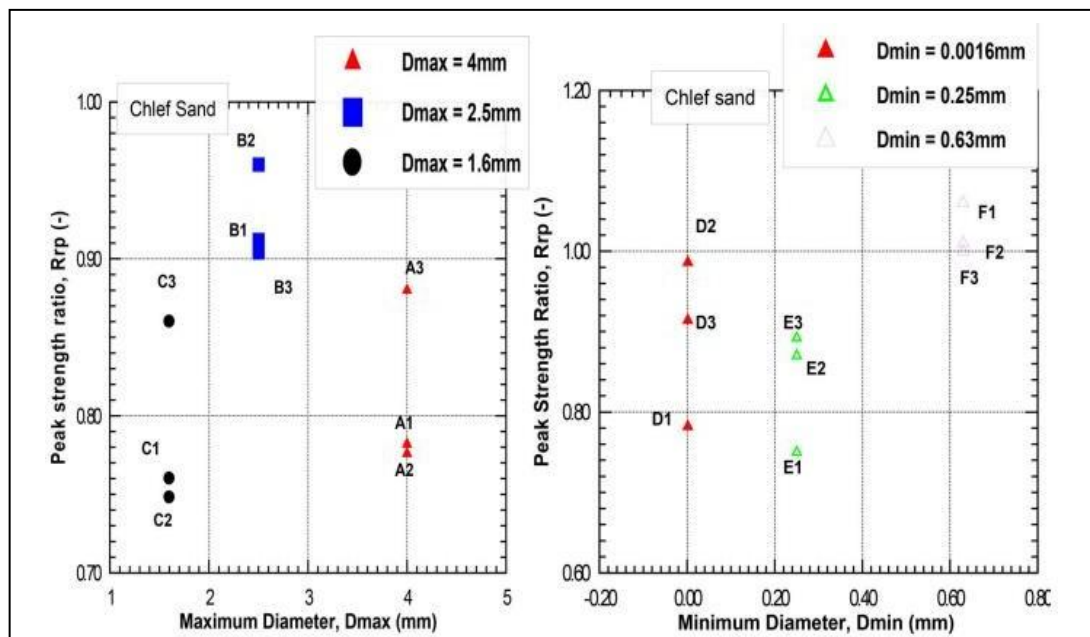
(b)



(c)

**Figure I.7 : Influence de diamètre moyen sur la résistance au cisaillement non drainée des matériaux granulaires, (a)  $D_{min}=0,0016\text{mm}$ , (b)  $D_{min}=0,25\text{mm}$ , (c)  $D_{min}=0,63$  (Damage humide) Hazout et al. (2017).**

Hazout et al(2022) ont étudié l'effet des diamètres extrêmes des particules «  $D_{max}$  et  $D_{min}$  » sur la réponse mécanique non drainée des échantillons de sable de Chlef, reconstitué par la méthode de la pluviation à sec, avec une densité relative initiale  $Dr = 25\%$ , et soumis à une pression de confinement  $P'_c = 50$  kPa ils ont trouvé que La présence de fraction des grains ayant  $D_{max}$  entre 2,50 mm et 4,00 mm ont joué un rôle majeur dans la diminution de la résistance au cisaillement et par conséquent l'augmentation de la surpression interstitielle. D'autre part, l'absence de la fraction de grains ayant  $D_{max}$  entre 1,60 mm et 2,50 mm ont également joué le même rôle dans la diminution de la résistance au cisaillement et augmentation de la surpression interstitielle. L'absence de la fraction des grains dans le sable " de  $D_{min}=0,0016$  mm à 0,25 mm » a joué un rôle dans la diminution de la résistance au cisaillement non drainé. Au contraire, l'absence de fraction de grains dans l'intervalle de 0,25 mm à 0,63 mm de  $D_{min}$  a contribué d'une manière claire, à augmenter la résistance au cisaillement non drainé. Ainsi, l'intervalle de « 2,5 mm à 0,0016 mm » est le domaine le plus résistant, où la pression d'eau interstitielle est la plus faible pour le groupe 1. Ainsi pour le groupe 2, le domaine de « 4 mm à 0,63 mm » est le plus résistant et le plus stable, donc la résistance au cisaillement dans ce domaine est le plus élevée. Voir figure (1.8) et (1.9).



(a)

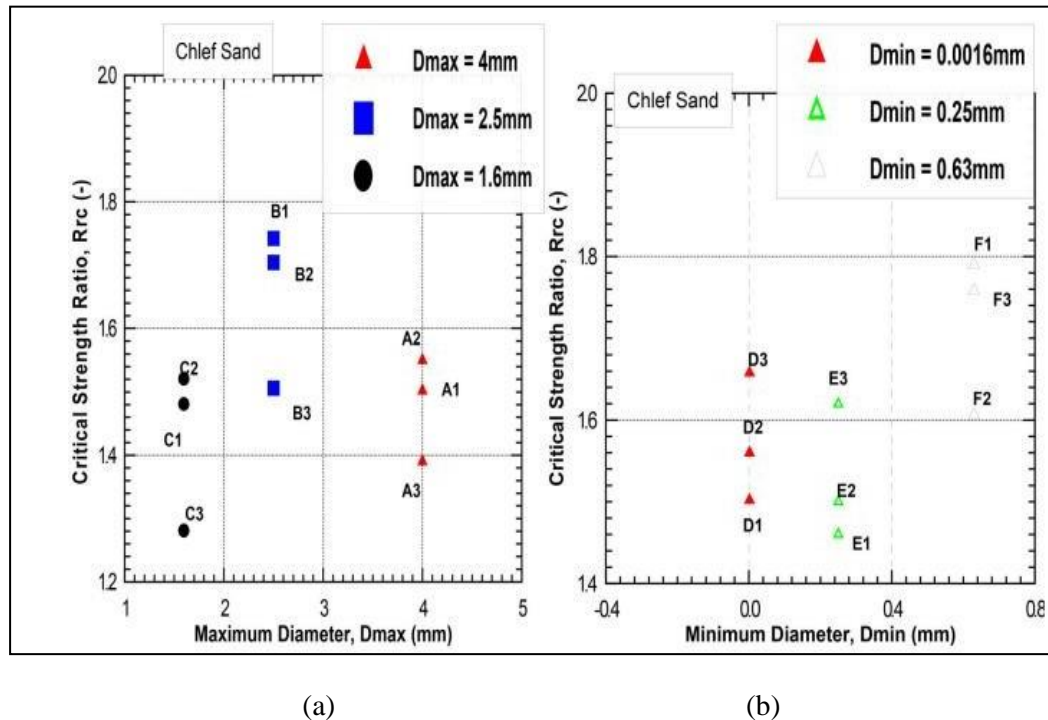
(b)

**Figure I.8 : Rapport de résistance maximale par rapport aux diamètres de particules extrêmes des échantillons de sable de Chlef. ( $Dr = 25\%$ ,  $P'_c = 50$  kPa, Pluviation a sec).**

**(a) Groupe 1 ( $1,6 \text{ mm} \leq D_{max} \leq 4,00 \text{ mm}$ ),  $D_{min} = 0,0016 \text{ mm}$**

**(b) Groupe 2 ( $0,0016 \text{ mm} \leq D_{min} \leq 0,63 \text{ mm}$ ),  $D_{max} = 4,00 \text{ mm}$**

**Hazout et al (2022)**



**Figure I.9 : Rapport de résistance critique par rapport aux diamètres de particules extrêmes des échantillons de sable de Chlef. ( $D_r = 25\%$ ,  $P_c = 50\text{ kPa}$ , Pluviation à sec).**

**(a) Groupe 1 ( $1,6\text{ mm} \leq D_{\max} \leq 4,0\text{ mm}$ ), ( $D_{\min} = 0,0016\text{ mm}$ ).**

**(b) Groupe 2 ( $0,0016\text{ mm} \leq D_{\min} \leq 0,63\text{ mm}$ ),  $D_{\max} = 4,00\text{ mm}$   
**Hazout et al (2022)****

Wang et al. (2013) ont étudié l'effet de la taille des grains sur les comportements de cisaillement interface sol-structure. Ils ont montré que l'échantillon avec un coefficient d'uniformité plus faible ( $C_u$ ) présente une contrainte de cisaillement plus élevée et comportement dilatatif plus prononcé. L'augmentation de  $C_u$  conduit à une diminution de l'angle de frottement pour le sol-structure à l'interface et une diminution de la déformation verticale maximale de l'échantillon de sol.

Doumi et al. (2021) ont étudié l'effet de diamètre des particules sur la résistance au cisaillement des sols sableux partiellement saturés. Ils ont observé que le diamètre maximal ( $D_{\max}$ ) a une influence remarquable sur la résistance au cisaillement des échantillons de sols sableux testés. Ils ont observé que la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la taille maximale des particules et plus significative pour des échantillons ayant un coefficient de Skempton plus bas ( $B = 20\%$ ) en comparaisant avec ceux ayant un coefficient de Skempton moyens à plus élevés ( $B = 50\%$  et  $B = 90\%$ ).

Azaiez et al. (2022) ont constaté que les paramètres de la granulométrie (diamètre effectif "D10", Diamètre moyen des grains "D50" et coefficient d'uniformité "Cu") pouvaient être corrélés avec la résistance à la compression des matériaux granulaires.

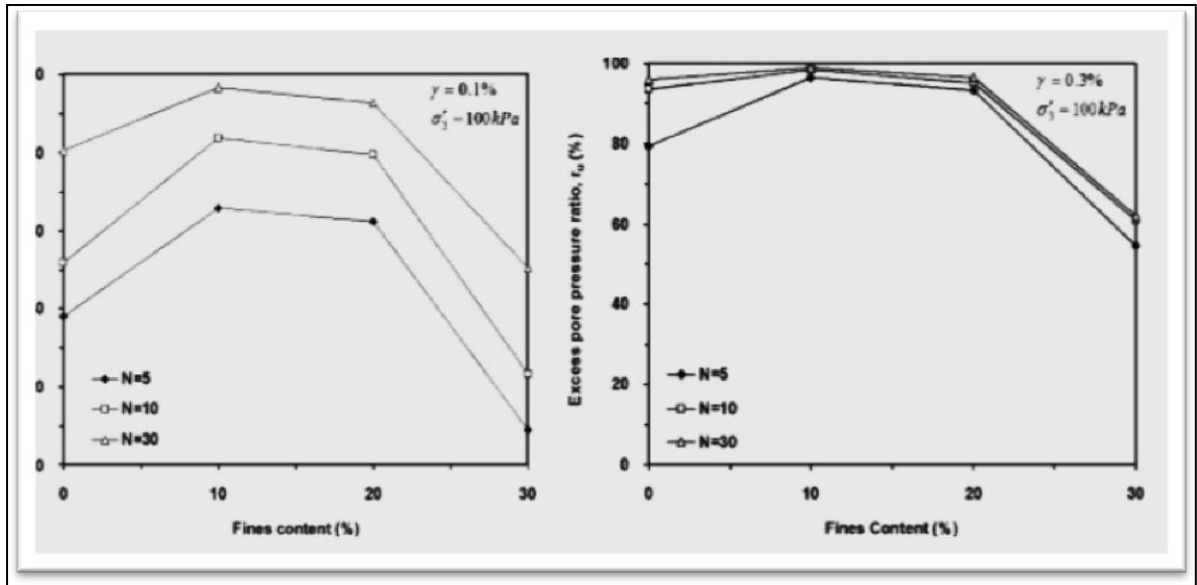
Wang et Huang (2022) ont étudié l'effet de la taille des particules sur les caractéristiques de cisaillement d'un sol à grand déplacement exposés à un traitement thermique. Ils ont constaté que la distribution de la taille des particules a une influence significative sur la résistance au cisaillement des sols, où ils ont déterminé que plus la taille des particules est petite, plus la résistance résiduelle au cisaillement est importante.

### **I.3 - Effet des fines**

Le rôle des fines sur le comportement à la liquéfaction des sables a fait l'objet de plusieurs recherches. De nombreuses études ont rapporté que la résistance à la liquéfaction d'un sable augmente avec l'augmentation de la teneur en fines (Chang et al. 1982 ; Dezfulian 1982 ; Amini et Qi 2000), d'autres ont trouvé que l'augmentation de la teneur en fines réduit la résistance à la liquéfaction (Shen et al. 1997 ; Troncoso et Verdugo 1985 ; Finn et al. 1994 ; Vaid 1994 ; Lade et Yamamuro 1997 ; Zlatovic et Ishihara 1997). D'autres études ont trouvé que la résistance à la liquéfaction diminue jusqu'à atteindre une résistance minimale c'est-à-dire un seuil de pourcentage des fines connu dans la littérature par  $F_{c\ th}$ , puis elle augmente avec l'augmentation de la teneur en fines (Law et Ling 1992 ; Koestler 1994, Bouferra).

Mahmoudi 2017 a analysé l'effet de la teneur en fines peu plastiques ( $F_c = 0\%$ ,  $20\%$  et  $40\%$ ) sur la réponse mécanique non drainée des mélanges sable-limon. Leurs échantillons sable-limon ont été reconstitués avec la technique de damage humide (DH) et soumis à une pression de confinement initiale ( $P'_c = 100\text{ kPa}$ ) pour une densité relative initiale ( $D_r=52\%$ ). Il a trouvé que la résistance au cisaillement non drainée devient plus petite avec l'augmentation de la teneur en fines peu plastiques. Il a expliqué cette tendance diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fines, par le fait que les particules fines peuvent être attribuée à la diminution de l'enchevêtrement des particules en raison de l'existence de molécules d'eau entre les particules du sable qui diminuent la phase de dilatance de sable limoneux et par conséquent diminuent la résistance au cisaillement non drainée.





(a)

(b)

**Figure I.10 : réponse mécanique non drainée monotone du mélange sable limon de Chlef.**

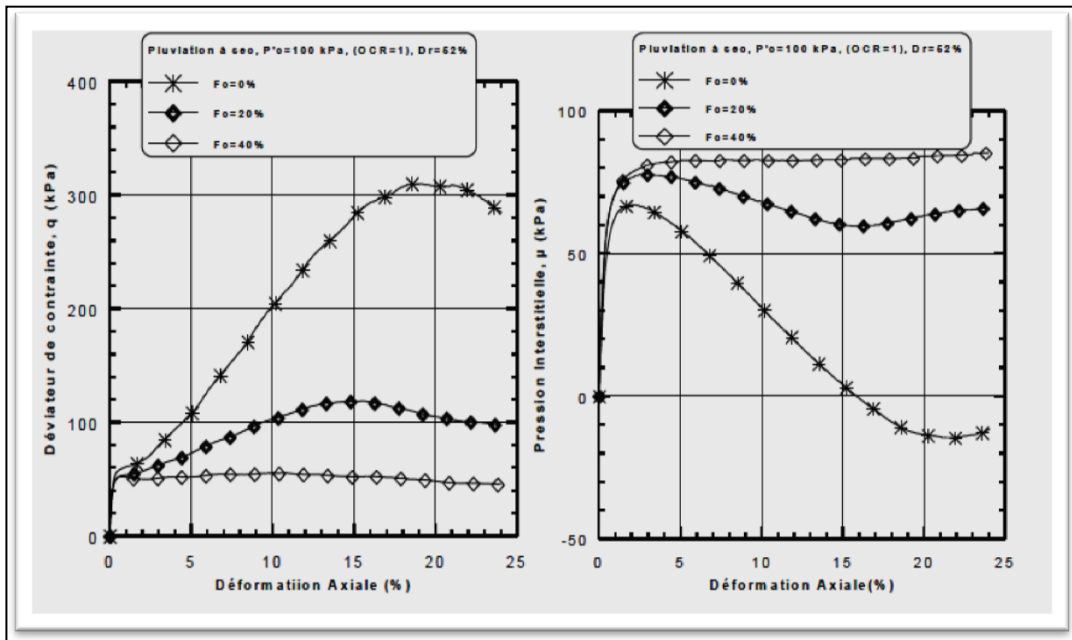
**( $D_r = 52\%$ ,  $P_c = 100 \text{ kPa}$ , DH)**

**(a) Evolution du déviateur de contrainte**

**(b) Evolution de la pression interstitielle**

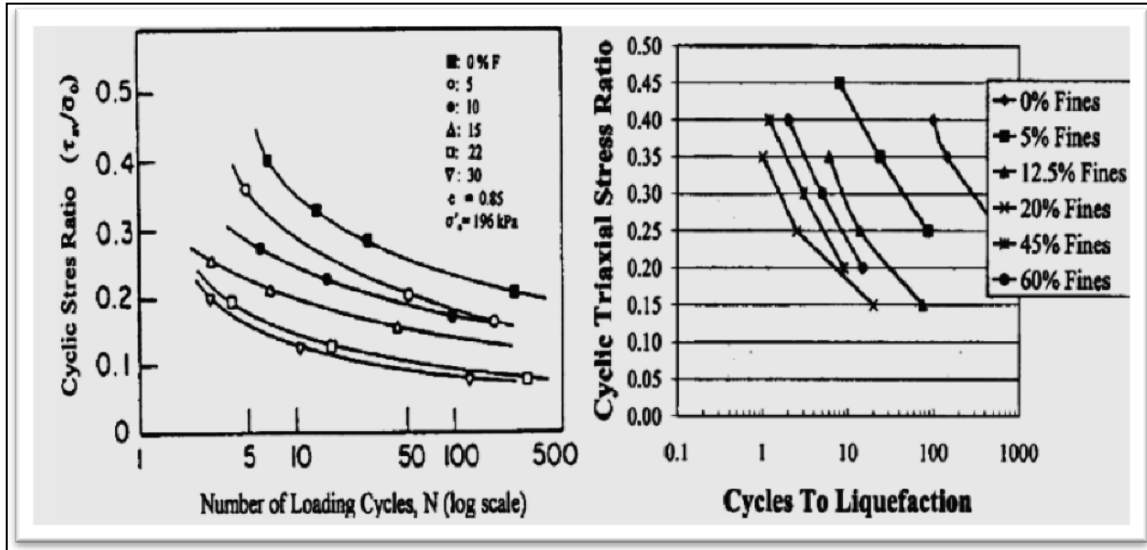
**Mahmoudi 2017**

Derakhshandi et al. (2008) ont réalisé des essais cycliques sur des mélanges de sable de Monterey avec une fraction de bentonite varie de 0%, 10%, 20% et 30%. Les échantillons ont été reconstitués au laboratoire avec la même densité relative  $D_r = 50\%$ . Ils ont montré que la surpression interstitielle de l'eau augmente d'une façon significative avec l'augmentation de fraction de bentonite jusqu'à 10%, puis elle s'atténue pour le pourcentage des fines plastiques compris entre 10% et 20%. Ensuite, au-delà de cette valeur, ils constatent une baisse considérable de la résistance au cisaillement cyclique.



**Figure I.11 : influence de la teneur en fines plastiques sur la surgénération de la surpression interstitielle. (Derakhshandi et al 2008)**

Troncoso (1990) a comparé la résistance au cisaillement cyclique d'un sable mélangé à différentes teneurs en fines peu plastiques (limon) de ( $F_c=0$  à  $F_c=30\%$ ) avec un indice de vides initial constant ( $e=0.85$ ). Il a trouvé que lorsque la fraction des fines augmente la résistance au cisaillement cyclique diminue. Koester (1994) a montré que la résistance au cisaillement cyclique diminue avec l'augmentation des fines peu plastiques. Donc les résultats obtenus par Troncoso (1990) sont semblables à ceux de Koester (1994) jusqu'à 20% de fines. Au-delà 20%, la résistance au cisaillement cyclique augmente.

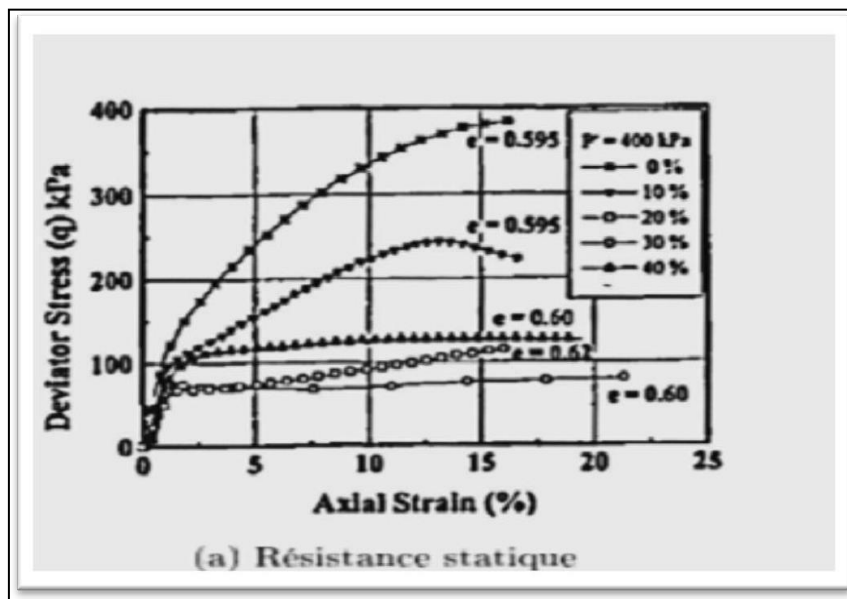


(a)

(b)

Figure I.12 : effet de fines peu plastiques sur la résistance au cisaillement non drainée du sol (a) Troncoso(1990) (b) Koester (1994).

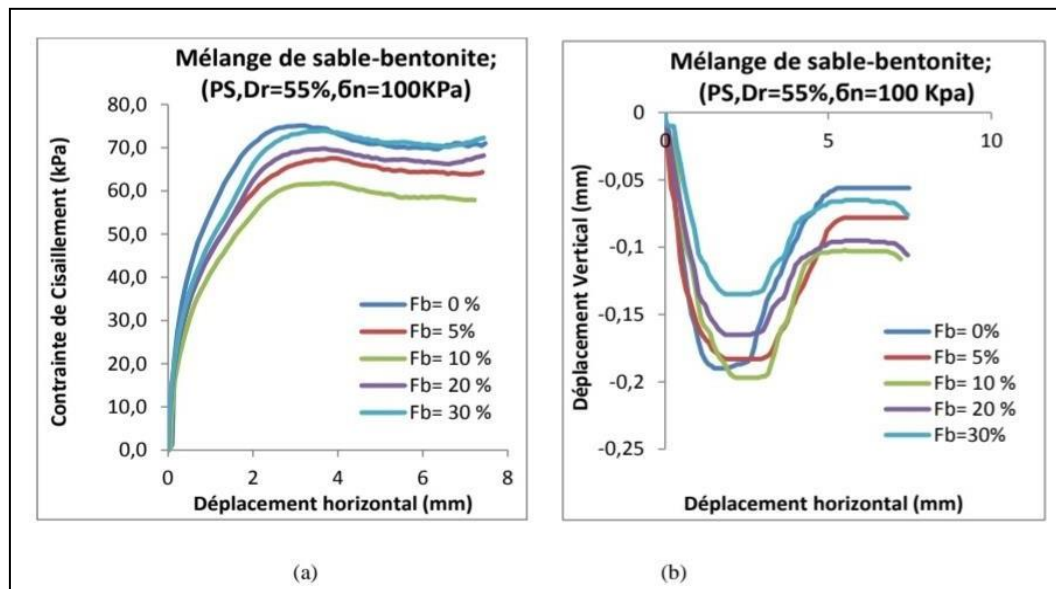
Ghahremani et al. (2006) ont testé le sable Firouzkooh mélangé avec une fraction variable de kaolinite pour dans le but d'étudier leurs influences sur le comportement mécanique des mélanges sable-fines plastiques. Ils ont mentionné que la résistance au cisaillement non drainée diminue avec l'augmentation de la fraction du Kaolinite de 0% à 30% pour le même indice des vides après consolidation. Au-delà de 30%, la résistance devient plus élevée pour les mélanges sable-fines plastiques étudiés



(a) Résistance statique

Figure I.13 : Influence de la teneur en fines plastiques sur la résistance au cisaillement du mélange du sable Firouzkooh-kaolinite (Ghahremani et Ghalandarzadeh, 2006).

Belkhatir et al (2019) ont comparé la résistance au cisaillement cyclique d'un sable mélangé à différents types des fines (bentonite /Kaolinite/cendres volantes) en différentes teneur, pour objet d'évalué l'effet de la fraction des fines (FB, FA, FK =0%, 5%, 10%, 20% et 30%) sur le comportement mécanique des échantillons des sols sableux. Les échantillons des mélanges (sable bentonite-cendres volantes kaoline) ont été reconstitués au laboratoire avec la méthode de pluviation à sec pour une densité relative initiale moyennement dense ( $D_r = 55\%$ ) sous une contrainte normale initiale ( $\sigma_n=100$  kPa). Les résultats des différents essais montrent que l'ajout de la fraction des fines à une influence remarquable sur le comportement mécanique. Cependant, la résistance au cisaillement diminue avec l'augmentation de la teneur en bentonite et la kaolinite, d'autre part la résistance augmente avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes.



**Figure I.14 : effet de la fraction de bentonite sur le comportement mécanique ( $\sigma_n=100$  kPa,  $D_r=55\%$ )**  
**(a)-Evolution de contrainte de cisaillement**  
**(b)-Evolution de déplacement vertical**

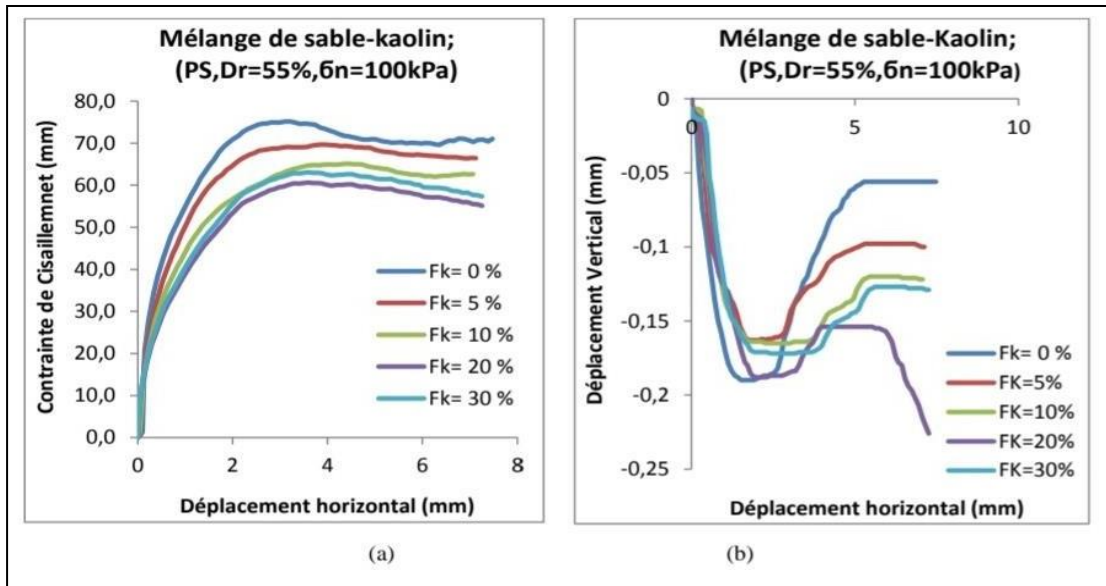


Figure I.15 : effet de la fraction de kaolin sur le comportement mécanique ( $\sigma_n=100$  kPa,  $Dr=55\%$ )

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement  
(b)-Evolution de déplacement vertical

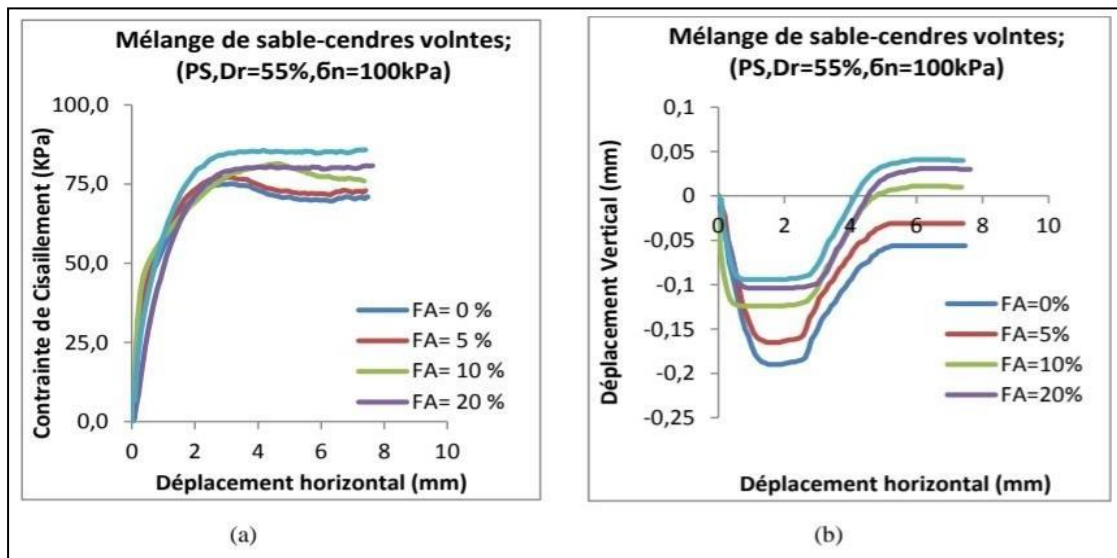


Figure I.16 : effet de la fraction de cendre volante sur le comportement mécanique ( $\sigma_n=100$  kPa,  $Dr=55\%$ )

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement  
(b)-Evolution de déplacement vertical

Mahmoudi (2018) a étudié l'influence de la fraction de cendre volante ( FA=0% ; 10% ; 15%) sur la réponse mécanique du sable de Chlef préparé par deux méthode : la pulviation à sec et le damage humide, avec une densité relative initiale ( $D_r=25\%$ ) et une contrainte normale initiale de 100kPa, il a trouvé que le teneur en cendre volante à une influence significative sur le comportement mécanique de mélange sable-cendre volante, ou la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en cendre volante.

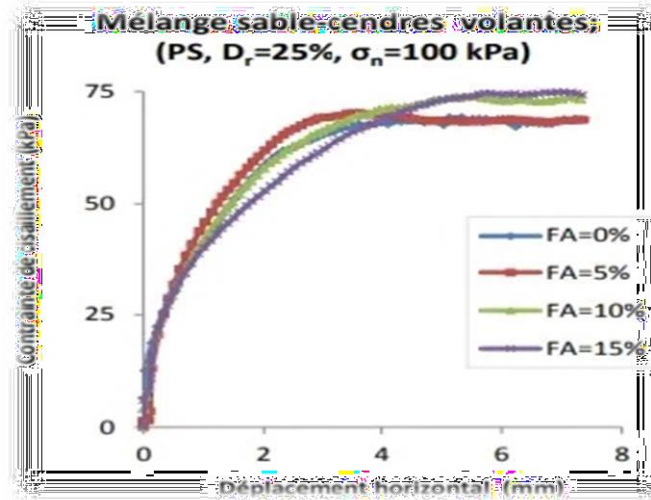


Figure I.17: Effet de la fraction de cendre volantes sur le comportement mécanique ( $\sigma_n=100$  kPa / $D_r$  25% PS) (Mahmoudi 2018)

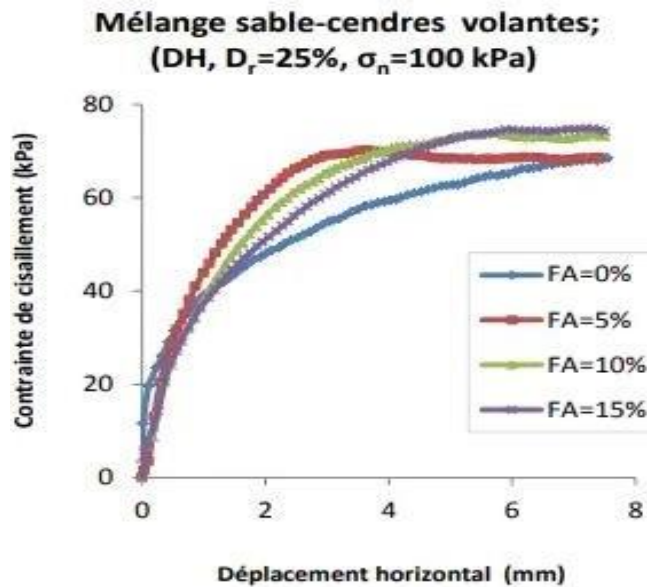


Figure I.18: Effet de la fraction de cendre volante sur le comportement mécanique ( $\sigma_n=100$ kPa / $D_r=25\%$  /DH) (Mahmoudi 2018)

Bouchibane et Ben Abdel-Moutaleb (2020) ont examiné l'impact de la teneur en bentonite sur la caractérisation mécanique du sable de Chlef. Les essais ont été effectués à l'appareil de cisaillement direct à la boîte, sur des spécimens du sable de Chlef mélangés avec des teneurs en bentonite ( $F_b = 0 \%, 5 \%, 10 \%, 20 \%$  et  $30 \%$ ). Les mélanges sable-bentonite ont été préparés en utilisant la méthode de la pluviation à sec avec une densité relative initiale ( $D_r = 55\%$ ), et soumis à une contrainte normale ( $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ ). Ils ont trouvé que le pourcentage de bentonite a un impact sur la caractérisation mécanique du mélange (sable- bentonite) ; ils ont montré que la résistance au cisaillement diminue avec l'augmentation de la proportion de bentonite de ( $F_b = 0 \%$ ) à ( $F_b = 10 \%$ ). Au-delà de cette valeur, la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en bentonite de  $F_b = 10 \%$  à  $F_b = 30 \%$ . Ce qui explique que la phase de contractance augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en bentonite jusqu'à un seuil de ( $F_b = 10 \%$ ). Au-delà de cette valeur, l'augmentation de la teneur en bentonite induit une augmentation de la phase de dilatance comme la montre dans la (Figure 1.19).

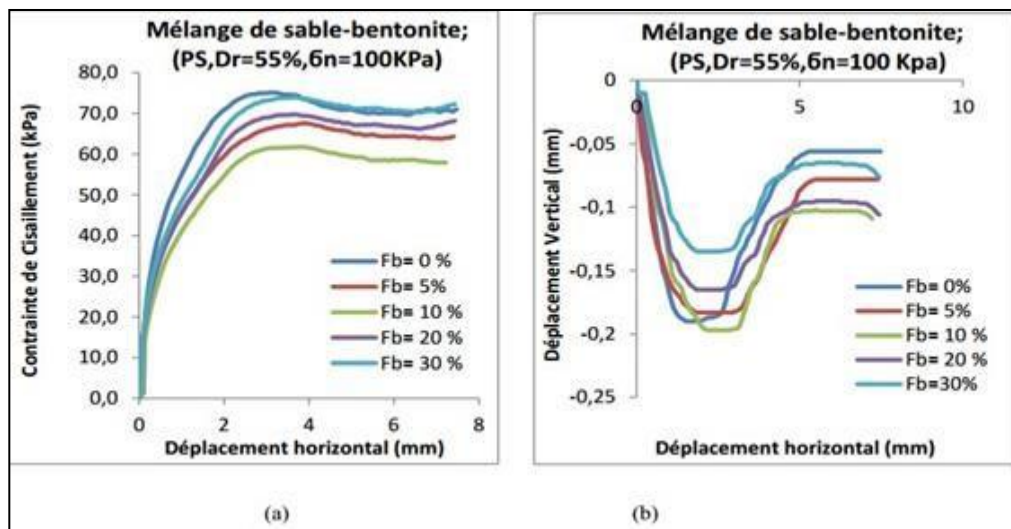
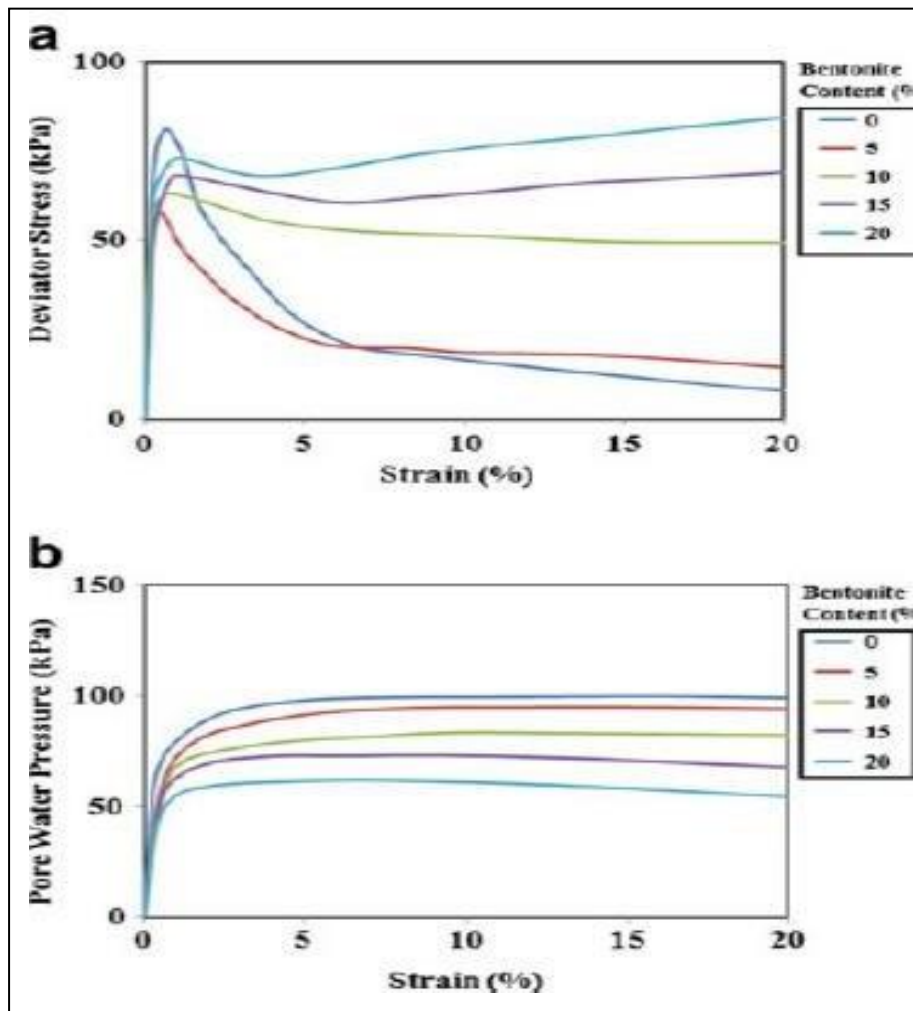


Figure I.19: Effet de la fraction de bentonite sur le comportement mécanique Bouchibane et Ben Abdel-Moutaleb (2020).

Bayat et al, 2012 ont réalisé des essais triaxiaux monotones sur des échantillons de sable avec les mêmes densités relatives et variation des teneurs en fines plastiques (kaolinite ou bentonite) allant de 0 à 30 % et consolidées à une pression moyenne de confinement de 100, 200 et 300 kPa , afin d'étudier l'influence de la teneur en fines et d'autres paramètres sur la résistance au cisaillement non drainé et le potentiel de liquéfaction d'échantillons de sable argileux ; Les résultats montrent que la résistance maximale diminue à mesure que la teneur

en fines (kaolinite ou bentonite) augmente jusqu'à un seuil de teneur en fines (FCth) après lequel, l'augmentation de la teneur en fines plastiques conduit à une amélioration de la résistance maximale au cisaillement, ainsi qu'à la stabilité ultime et la résistance à l'état résiduel ont été améliorées en raison de l'augmentation de la teneur en fines plastiques.



**Figure I.20 : Comportement mécanique des éprouvettes de mélange sable-bentonite à une pression de confinement de 100 kPa.**  
**(a) contrainte-déformation**  
**(b) Surpression interstitielle-déformation**  
**Bayat et al. (2012)**



## I.4- Effet de quelques paramètres sur la réponse mécanique des sols

Plusieurs paramètres peuvent avoir une influence très remarquable sur le comportement mécanique des sols comme : la densité relative initiale, la forme des grains, les méthodes de dépositions, etc...

### 1.4.1 Influence de la densité relative

Tatsuoka et al. (1986) ont réalisé des essais triaxiaux sur des échantillons du sable de Toyoura, reconstitués par la méthode de la pluviométrie à sec, avec différentes densités relatives. Ils ont constaté que la résistance à la liquéfaction augmente d'une façon linéaire avec la densité relative initiale, avec une pente douce jusqu'à " $D_r=70\%$ ". Au-delà de cette valeur, ils ont remarqué une augmentation importante de la résistance avec l'augmentation de la densité relative comme le montre la figure suivante.

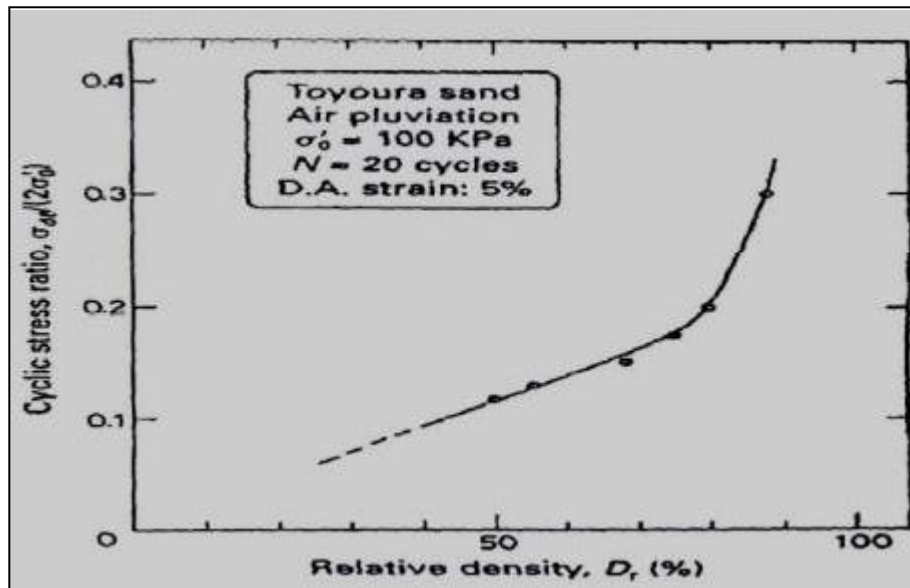
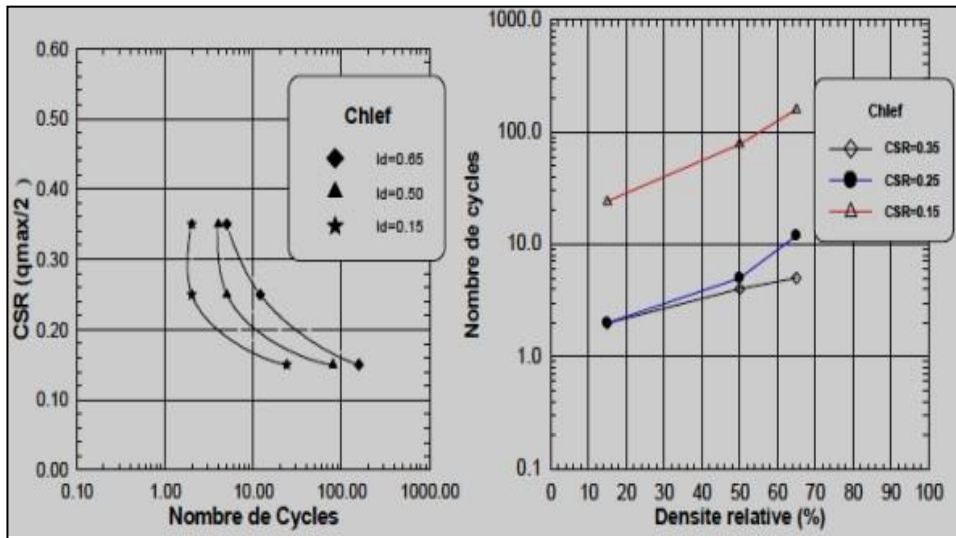


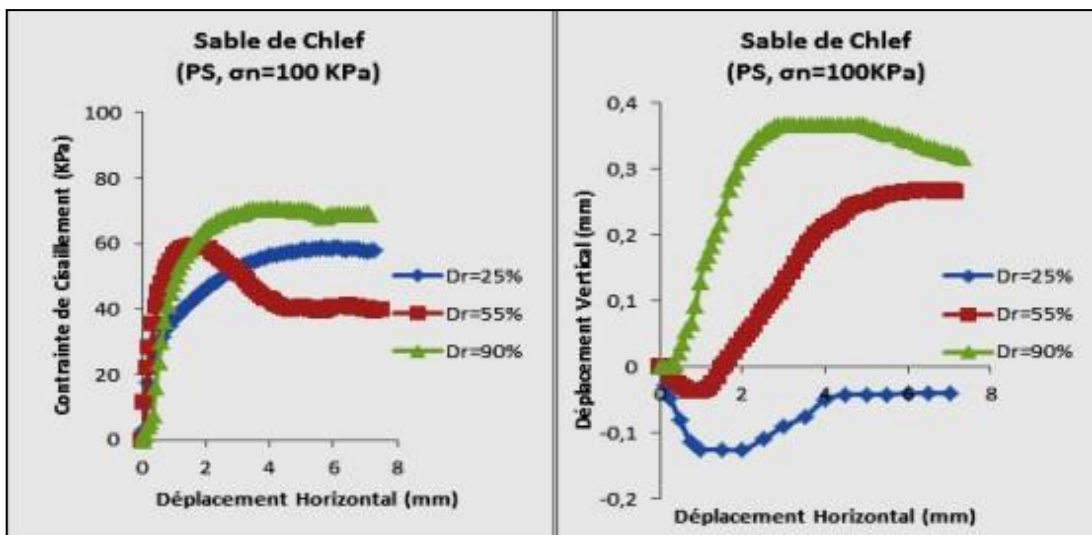
Figure I.21 : Effet de la densité relative sur la résistance à la liquéfaction (Tatsuoka et al. 1986).

(Arab et al. 2010) ont réalisé des essais triaxiaux cycliques sur le sable de Chlef, reconstitués au laboratoire, avec trois densités relatives " $D_r=15\%$ ,  $50\%$  et  $65\%$ ", soumis sous une contrainte de confinement " $P'_c=100\text{kPa}$ ". Ils ont trouvé que l'augmentation de la densité relative, induit une amélioration significative de la résistance au cisaillement cyclique du sable de Chlef.



**Figure I.22: Effet de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction du sable de Chlef (Arab et al. 2010)**

Bachir et Banchaa (2018) ont analysées l’influence de la densité relative lâche  $Dr = 25\%$  ; moyennement dense  $Dr = 55\%$  et dense  $Dr=90\%$  sur la réponse mécanique de trois sables : sable de Chlef, sable d’Hostun et sable Fontainebleau. Leurs échantillons ont été reconstitués par la technique de déposition « la pluviométrie à sec » et soumis à une contrainte normale initiale ( $\sigma_n=100$  kPa. Les résultats obtenus montrent que ce paramètre joue un rôle très remarquable dans l’amélioration de la résistance au cisaillement des sols par l’augmentation de l’enchevêtrement entre les particules des sols granulaires.



**Figure (I.23): Effet de la densité relative initiale sur le comportement mécanique de sable de Chlef ( $\sigma_n=100$  kPa, PS),  
 (a) - Evolution de contrainte de cisaillement  
 (b) - Evolution de déplacement vertical  
 Bachir et Banchaa (2018)**

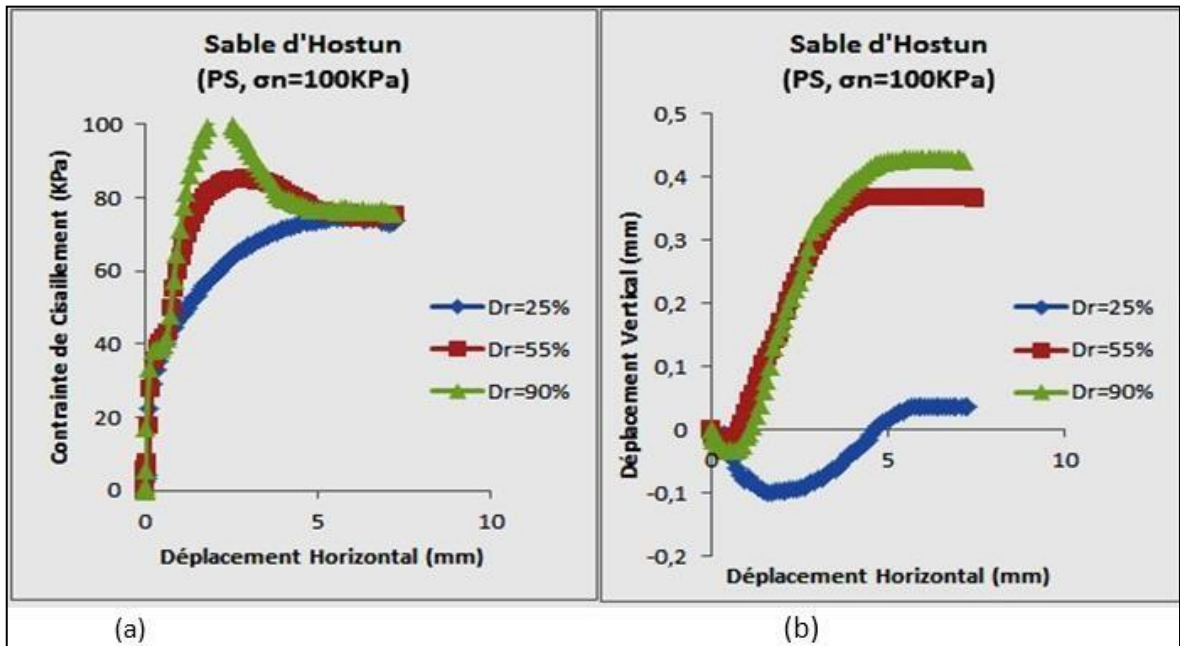


Figure I.24 : Effet de la densité relative initiale sur le comportement mécanique de sable d'Hostun ( $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ , PS),  
 (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b) - Evolution de déplacement vertical  
 Bachir et Banchaa (2018).

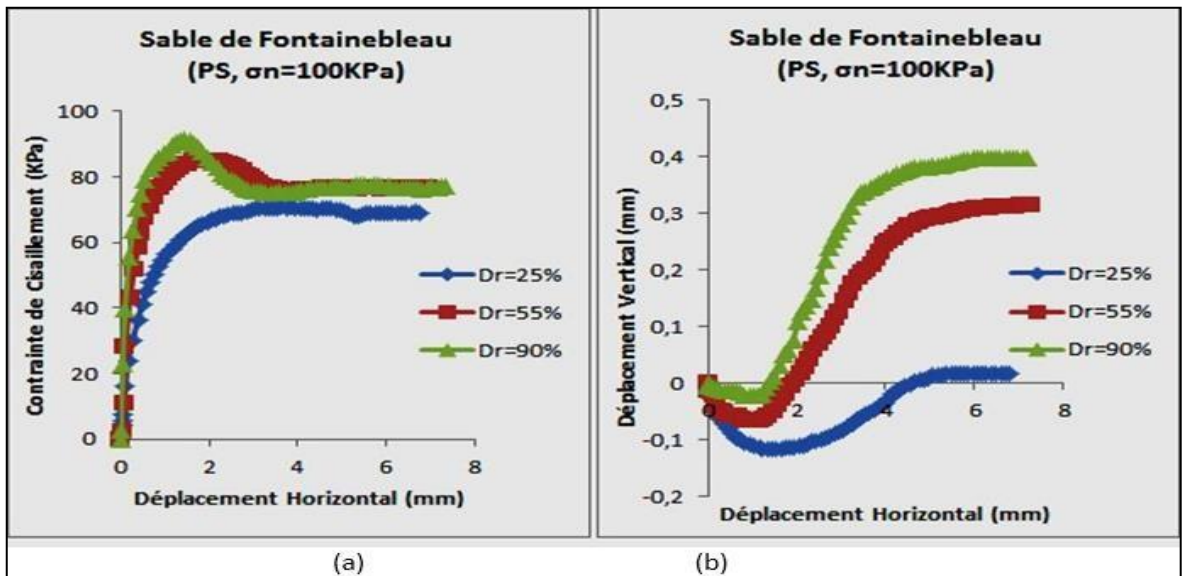
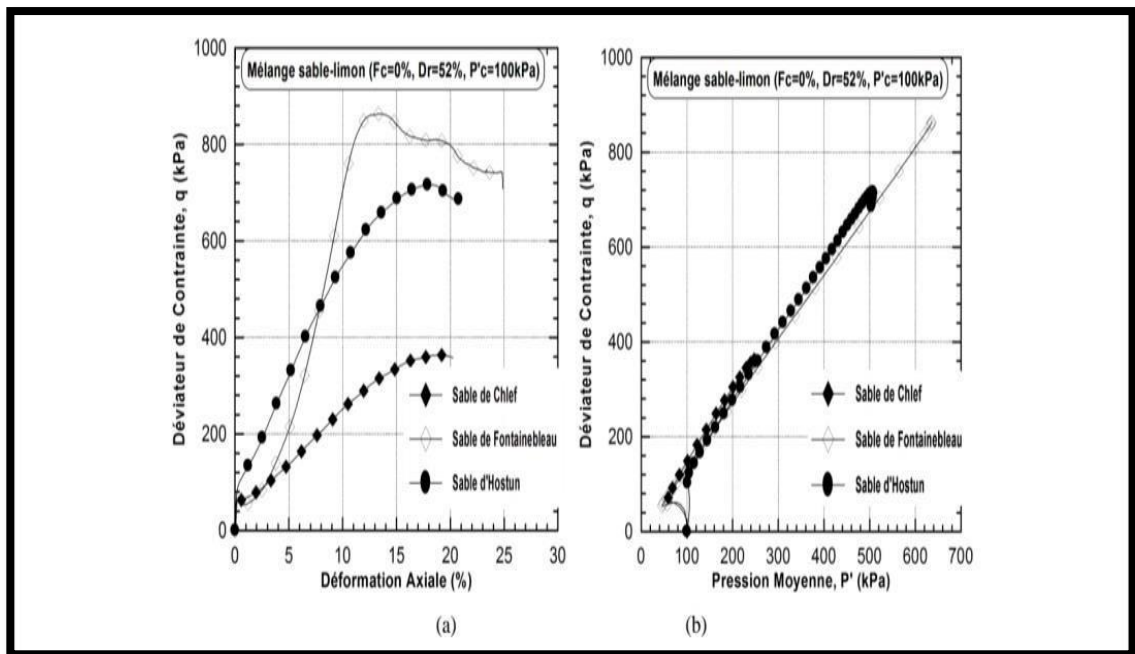


Figure I.25 : Effet de la densité relative initiale sur le comportement mécanique du sable de Fontainebleau ( $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ , PS),  
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement (b) - Evolution de déplacement vertical  
 Bachir et Banchaa (2018).

**I-4.2 Influence de la forme des grains**

Cherif Taiba et al. (2018) ont réalisé des essais triaxiaux en compression monotone, sur des échantillons ayant différentes formes des particules, tels que : sable de Chlef « forme arrondie », sable de Fontainebleau « forme semi-arrondie » et sable d’Hostun « forme anguleuse », reconstitués en laboratoire avec une densité relative initiale ( $D_r=52\%$ ) et soumis à une contrainte de confinement ( $P'_c=100$  kPa). Ils ont constaté que la forme des particules a une forte influence sur la résistance au cisaillement non drainée des sables. De plus, ils ont conclu aussi que la forme des particules joue un rôle primordial dans l’augmentation de l’enchevêtrement entre elles et par conséquent, l’amplification de résistance au cisaillement non drainée des sables comme indique la figure suivante :



**Figure I.26 : Réponse non drainée du mélange sable limon ( $P_c=100$ Kpa,  $D_r=52\%$ )  
 (a)Évolution de déviateur de contrainte.  
 (b) chemin de contrainte dans le plan (p, q)  
 Cherif taiba et all (2018)**

I.4.3 Effet de la méthode de dépôt

Della et al. (2011) ont comparé deux méthodes de reconstitution des échantillons de sable préparés au laboratoire avec une densité relative initiale ( $D_r = 80\%$ ) et soumis aux trois pressions de confinement ( $P'_c = 50\text{ kPa}$ ,  $100\text{ kPa}$ , et  $200\text{ kPa}$ ). Ils ont montré que la méthode de dépôt a une influence très pertinente sur la réponse mécanique des sols. Ils ont trouvé aussi que la méthode de pluviation à sec présente des échantillons plus dilatant par rapport à la méthode de Damage humide ayant des échantillons plus contractants.

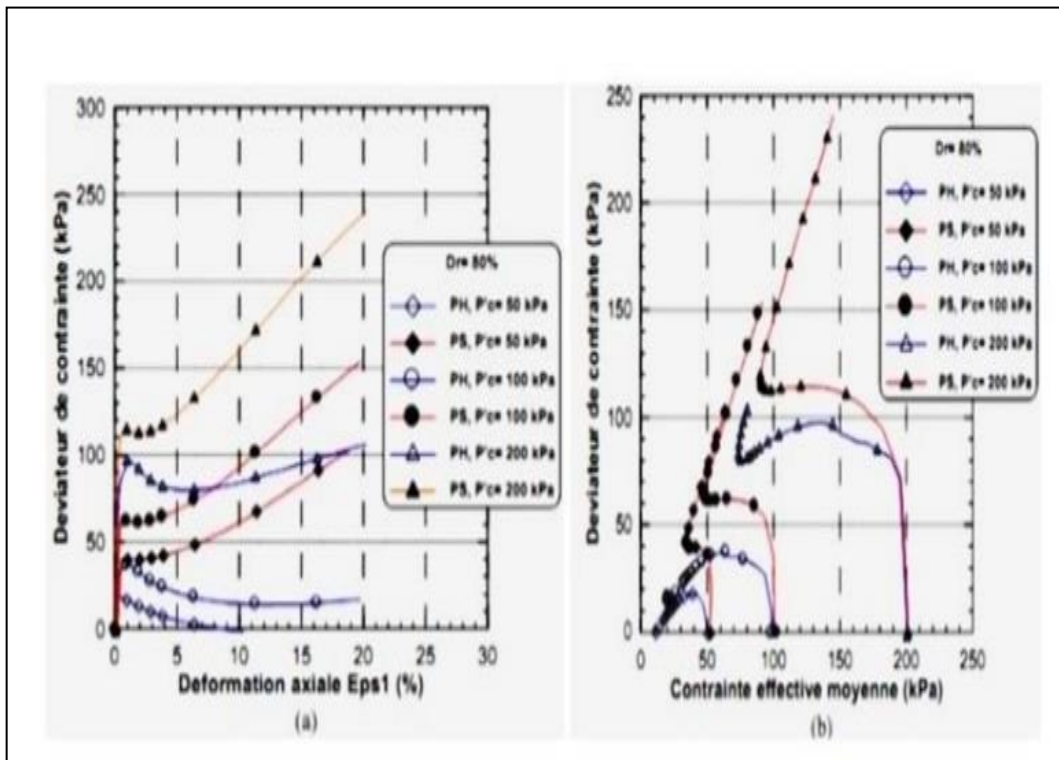
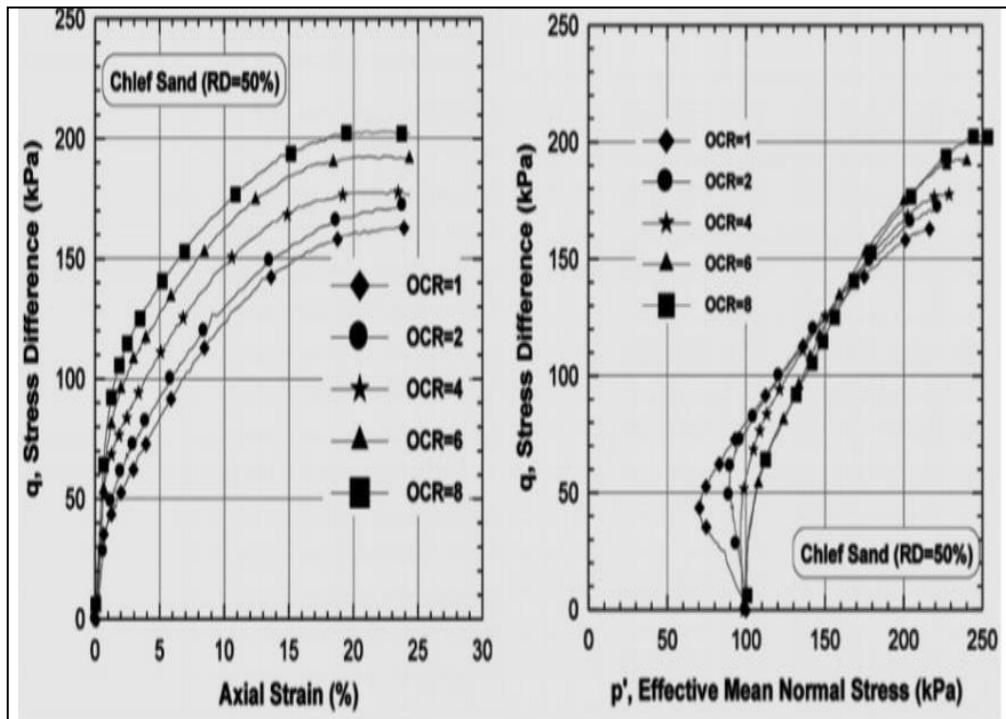


Figure I.27 : influence de la méthode de disposition sur la réponse non drainée du sol de Chlef

(a) courbe de cisaillement, (b) chemin de contrainte  
Della et all (2011)

**I.4.4 Influence de rapport de sur consolidation**

Della et al. (2011) ont réalisé une série des essais triaxiaux sur des échantillons du sable de Chlef afin d'étudier l'effet du rapport de sur consolidation " $\tau_{CR}$ " sur le comportement non drainé d'un sol granulaire. Ils ont trouvé que le rapport de sur consolidation a une influence très importante sur la réponse mécanique de sol. Cependant, l'augmentation du rapport de sur consolidation " $\tau_{CR}$ ", augmente la résistance au cisaillement non drainée de sable de Chlef. Ces résultats confirment que le rapport de sur consolidation contribue dans l'amplification d'enchevêtrement entre les grains de sol granulaire et par conséquent l'augmentation de la résistance au cisaillement non drainé de ces matériaux comme le montre



**Figure I.28 : influence de rapport de sur consolidation sur le comportement monotone de sable de Chlef  
Della et al (2011)**

### I.5 Conclusion

La synthèse bibliographique à montre la réponse mécanique des mélanges sable-bentonite, reçoit un intérêt très important dans le domaine de la géotechnique en termes de résistance au cisaillement et de déformations et par conséquent la contribution dans la stabilité des sols.

Ce chapitre illustre une synthèse bibliographique des études publiées dans la littérature, mettant l'accent sur l'influence de nombreux paramètres comme : La teneur en fines, les caractéristiques granulométriques, rapport de sur consolidation, la densité relative etc...

Pour une meilleure compréhension de comportement mécanique des mélanges sable-bentonite reconstitués dans trois classes granulaires, une analyse expérimentale bien détaillée a été faite pour étudier les facteurs influant sur la réponse mécanique de ces mélanges, tout en mettant l'accent sur l'effet de la taille des grains et la présence de la bentonite dans le sable de Zemmouri. L'étude de ces paramètres sont parmi les sujets d'actualité dans la mécanique des sols.

**CHAPITRE II**  
**DISPOSITIF EXPERIMENTAL**  
**ET MODE OPERATOIRE**

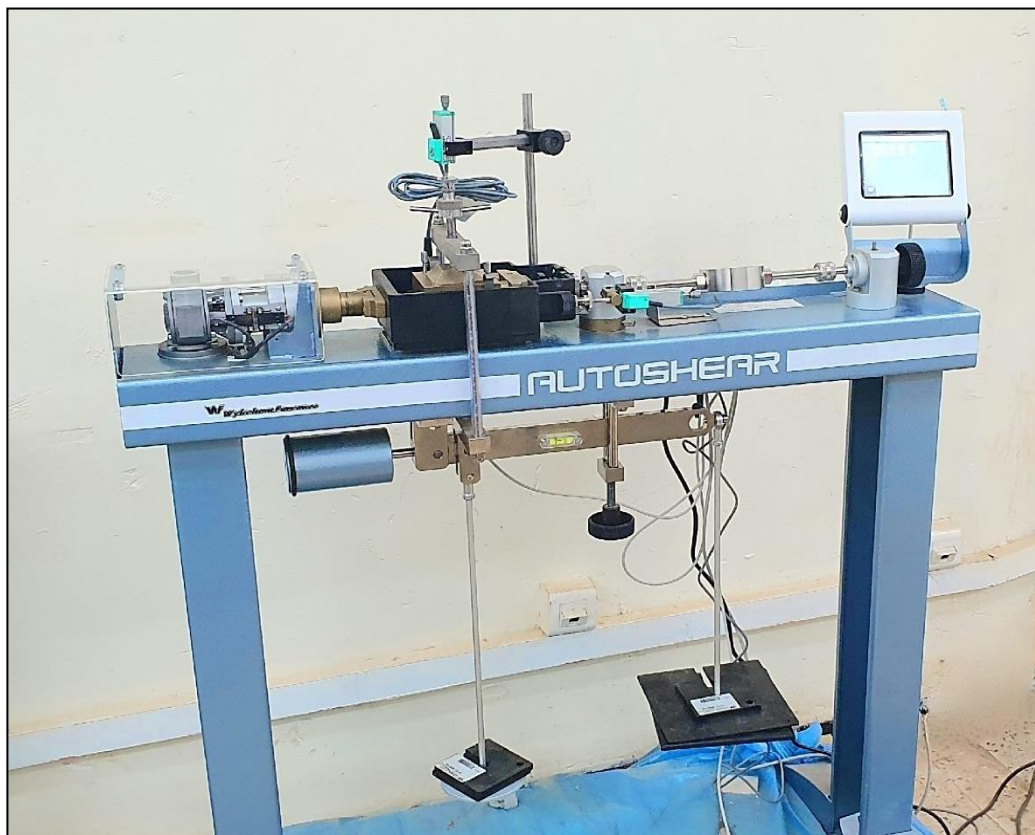


### II-1 Introduction

La résistance au cisaillement dépend de plusieurs facteurs, tels que le type de sol, qu'il soit cohésif ou granulaire, ou un mélange des deux, qu'il est grossier ou fin, son état de densité, la distribution de la taille des particules, la forme des grains, les méthodes de déposition et d'autres paramètres gouvernant la réponse mécanique. Cette dernière est indispensable pour comprendre le comportement des sols et pour la conception et le dimensionnement des ouvrages géotechniques.

### II.2 Dispositif expérimental

Dans ce chapitre, nous illustrons d'abord le dispositif expérimental utilisé dans cette étude, la procédure de l'essai à la boîte de cisaillement direct, la préparation et la caractérisation des matériaux utilisés, à savoir le sable de Zemmouri, et la bentonite, ensuite le mode opératoire adopté pour la reconstitution des mélanges de ces deux matériaux et à la fin la mise en place des échantillons pour la réalisation des différents essais mécaniques.



**Figure II.1 : Appareil de cisaillement.**

### II .2 .1 Composants de l'appareil de cisaillement direct à la boîte

La boîte de cisaillement (figure II.2) de dimension  $60 \times 60 \text{ mm}^2$ . Comprend :

- Deux pierres poreuses : elles sont utilisées pour faciliter le drainage et assurer une bonne adhésion entre l'échantillon et les demi-boîtes.
- Demi- boîte supérieure est constituée d'une embase permettant de recevoir le piston afin d'appliquer la charge verticale  $N$  sur l'échantillon
- Demi-boîte inférieure

La machine de cisaillement comporte essentiellement :

- Un chariot se déplaçant à vitesse horizontale constante et entraînant la Demi-boîte inférieure.
- Un écran fixé à la Demi-boîte supérieure enregistrant et indiquant les efforts  $T$  développés dans le sens de cisaillement, le déplacement vertical ainsi que le déplacement horizontal.
- Un système levier-étrier appliquant sur le piston de la boîte supérieure une charge verticale à l'aide de plateaux de poids connus.



**Figure II.2 : Les accessoires de la boîte de cisaillement.**

### II.2.2 Détermination des réponses mécaniques des sols (selon NF P94-071-1)

L'échantillon de sol de dimensions suivantes (6cm\*6cm\*2,5cm), est placé entre deux demi-boîtes (supérieure et inférieure) qui peuvent coulisser horizontalement l'une sur l'autre.

-Fixer les comparateurs horizontaux et verticaux (Small div) à la boîte de cisaillement pour mesurer les déplacements verticaux et horizontaux pendant l'essai.

-Appliquer sur l'échantillon une force de compression normale N. Les contraintes normales sont généralement fixées à  $\sigma_n=100\text{kpa}$ ,  $200\text{kpa}$  et  $300\text{kpa}$  (1bar, 2bars et 3bars).

Appliquer une charge horizontale automatiquement à la moitié supérieure de la boîte de cisaillement. La vitesse de cisaillement est fixée à 0,5 mm/min.

A la fin de l'essai, les résultats sont enregistrés automatiquement donnant deux fichiers. Le premier est le fichier consolidation et le deuxième est celui de cisaillement. Ce dernier contenant l'effort tranchant, le déplacement horizontal et le déplacement vertical.

- Les contraintes tangentielles sont calculées selon la procédure suivante :

1. Calculer la surface initiale de la boîte qui a une longueur de 6 cm et une largeur de 6 cm, soit  $36\text{ cm}^2$ .
2. Calculer la surface corrigée :  $(L - \Delta L) * L = A_{\text{corrigé}}$  ;  $\Delta L$  est le déplacement horizontal
3. La contrainte de cisaillement  $\tau$  est égale au rapport entre l'effort tranchant T appliqué à la boîte et la surface corrigée «  $A_{\text{corrigée}}$  »  $\tau = T/A_{\text{corrigée}}$ .

T est l'effort horizontal obtenu directement à partir de fichiers data.

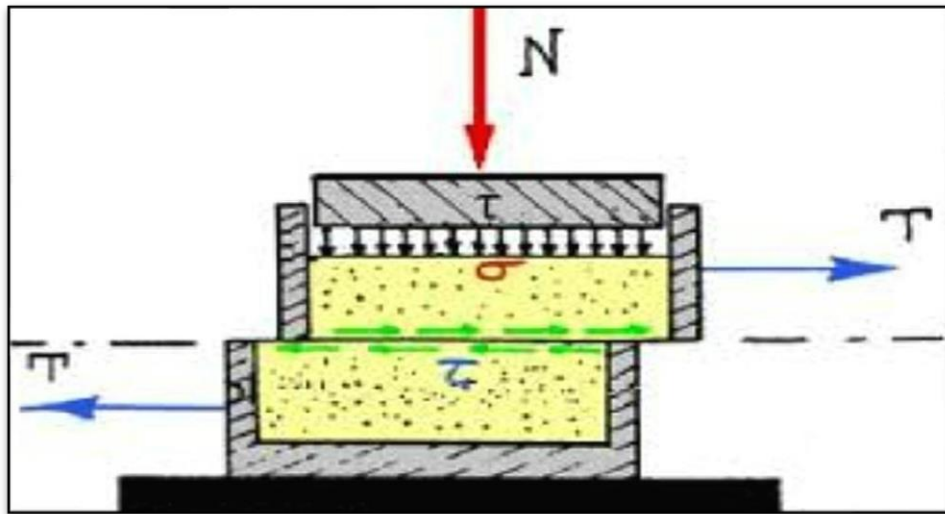


Figure II.3 : plan de contrainte normale( $\sigma$ ) et tangentielle.

Nous traçons dans un diagramme  $\tau_{max}$  en fonction de  $f(\sigma)$ , afin de déterminer les caractéristiques mécaniques des échantillons testés, connues par les angles de frottement interne  $\phi$  et la cohésion C. Ces dernières nous permettent d'estimer, par exemple, la contrainte de rupture sous une fondation, la pression active des terres derrière un mur de soutènement, la capacité portante des sols, etc...

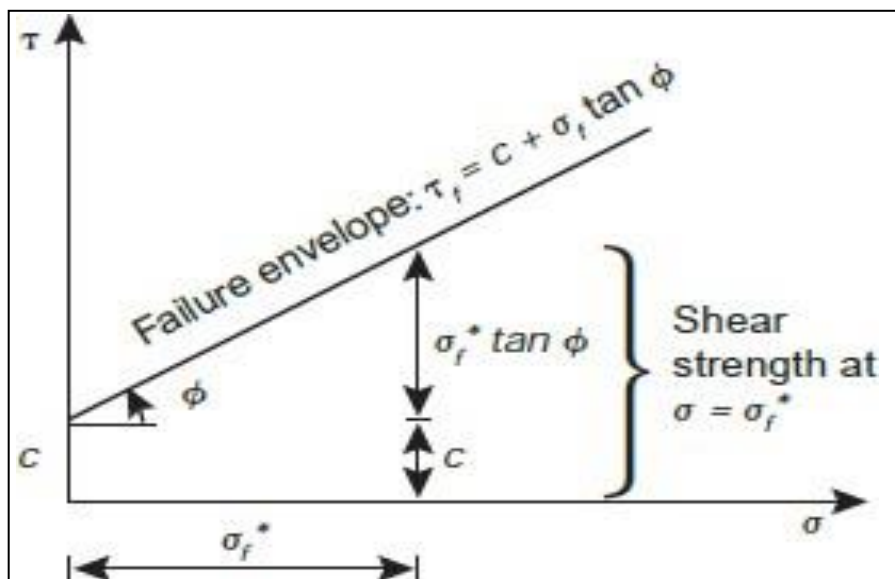


Figure II.4 : critère de rupture de Mohr's Coulombs

### II.3 Programme expérimental

#### II-3-1 Matériaux testés

Le matériau choisi pour cette recherche est un sable marin naturel du nord de l'Algérie, qui a été collecté le long de la plage de Zemmouri el Bahri à partir de zones de dépôt des sols liquéfiés, proches de l'épicentre du fort séisme de Zemmouri (le 21 mai 2003). Ce sable est préparé en trois classes granulaires ayant le même diamètre minimal de 0,08mm et différents diamètres maximaux :  $D_{max} = 4\text{mm}$  ;  $D_{max} = 2\text{mm}$  et  $D_{max}$ . Chaque classe granulaire est mélangée avec la **bentonite** en différents pourcentages 0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 30%.

Classe "A" ( $D_{max}=4\text{mm}$  /  $D_{min}=0,08\text{mm}$ )

Classe "B" ( $D_{max}=2\text{mm}$  /  $D_{min}=0,08\text{mm}$ )

Classe "C" ( $D_{max}=0,063\text{mm}$  /  $D_{min}=0,08\text{mm}$ ) ;

Donc chaque classe contient six (6) mélanges.

Le nombre total d'échantillons pour les trois classes est 18.

Tous les échantillons sont reconstitués par la méthode de la pluviation à sec avec une densité relative initiale constante ( $D_r = 55\%$ ) et soumis à trois contraintes verticales  $\bar{\sigma}_v = 100$  ; 200 ; et 300 kPa.

Les matériaux utilisés sont présentés dans la figure (2.5)

Les propriétés physiques des matériaux étudiés sont présentées dans les tableaux (2.1)

(a)



(b)



Figure II.5 : (a) Sable de Zemmouri (trois classes granulaires), (b) Bentonite.

Tableau (II.1) : composition chimique de la bentonite.

Constitution	Pourcentage (%)
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	16,39
Silica (SiO <sub>2</sub> )	60,61
Titanium Oxyde (TiO <sub>2</sub> )	0,69
Iron Oxyde (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,00
Potassium Oxyde K <sub>2</sub> O	2,70
Calcium Oxyde (CaO)	1,96
Magnésium Oxyde (MgO)	1,72
Sulfates (SO <sub>3</sub> )	0,04
Manganèse oxyde (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,06
Manganèse trioxyde (Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	0,09
Phosphores oxyde (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,017
Sodium oxyde (Na <sub>2</sub> O)	0,014

### II-4 Détermination des propriétés physiques des matériaux étudiés

Pour étudier le comportement mécanique des matériaux, il est d'abord nécessaire d'effectuer plusieurs essais pour déterminer leurs propriétés physiques. Cette caractérisation est réalisée à l'aide d'équipements appropriés tels que :

- Dispositif pour la détermination de l'équivalent de sable.
- Boîtes de Casagrand pour la détermination des différents teneurs en eau ainsi que la détermination de l'indice de plasticité.
- Pycnomètres de plusieurs capacités pour l'identification de la densité des grains solides.
- Densimètres pour la détermination de la distribution des tailles des grains pour les particules fines dont leurs diamètres inférieurs à 0,08mm.
- Tamiseuse équipée de tamis de différentes ouvertures pour l'élaboration de la courbe granulométrique, pour les particules ayant des diamètres plus grands que 0,08mm.
- Dispositif de compactage, pour la détermination des masses volumiques minimales et maximales etc...

#### II.4.1 Essai au Pycnomètre

Le pycnomètre permet de mesurer précisément la densité d'un échantillon par mesure de son volume de manière exacte.



Figure (II.6) : Essais au pycnomètre.

Matériau	Le sable	La bentonite
La densité	2.662	2.663

Tableau II.2 : densité relative.

#### II.4.2 Analyse granulométrique et analyse sédimentométrie

L'analyse granulométrique consiste à séparer les différentes fractions de particules présentes dans l'échantillon de sol en fonction de leur taille. Pour bien décrire un sol, il faut connaître sa granulométrie c.à.d. la répartition de ses particules suivant leurs diamètres. Deux essais de laboratoire permettent d'établir la granulométrie des sols

- L'analyse granulométrique par tamisage : effectuée pour les graviers et les sables (sols pulvérulents) dont les diamètres des grains sont supérieurs à 0,08mm.
- L'analyse granulométrique par sédimentométrie : destinée aux sols fins dont les diamètres des grains sont inférieurs à 0,08 mm.





Figure II .7 : analyse granulométrique par sédimentation.



Figure II.8 : Analyse granulométrique par tamisage.

Les courbes granulométriques des échantillons étudiés sont présentées dans les (figures 2.9 2.10 2.11) suivantes :

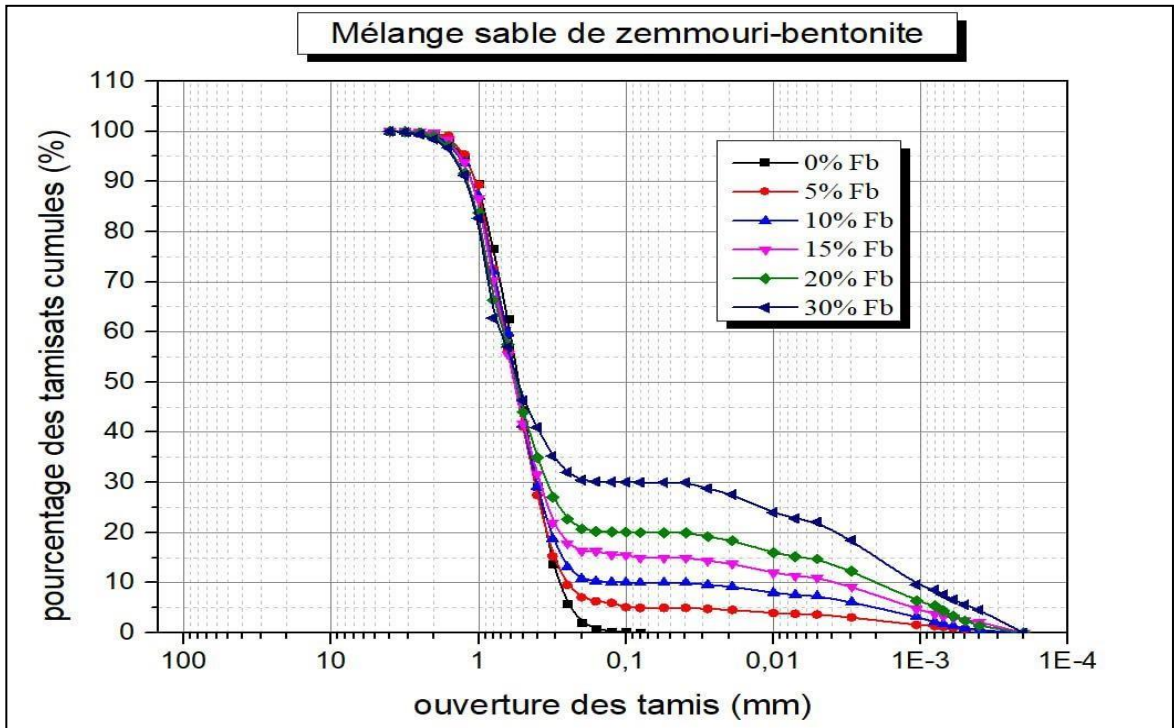


Figure II .9 : courbes granulométrique des mélanges sable-bentonite (classe A)( $D_{max}=4mm/D_{min}=0,08mm$ ).

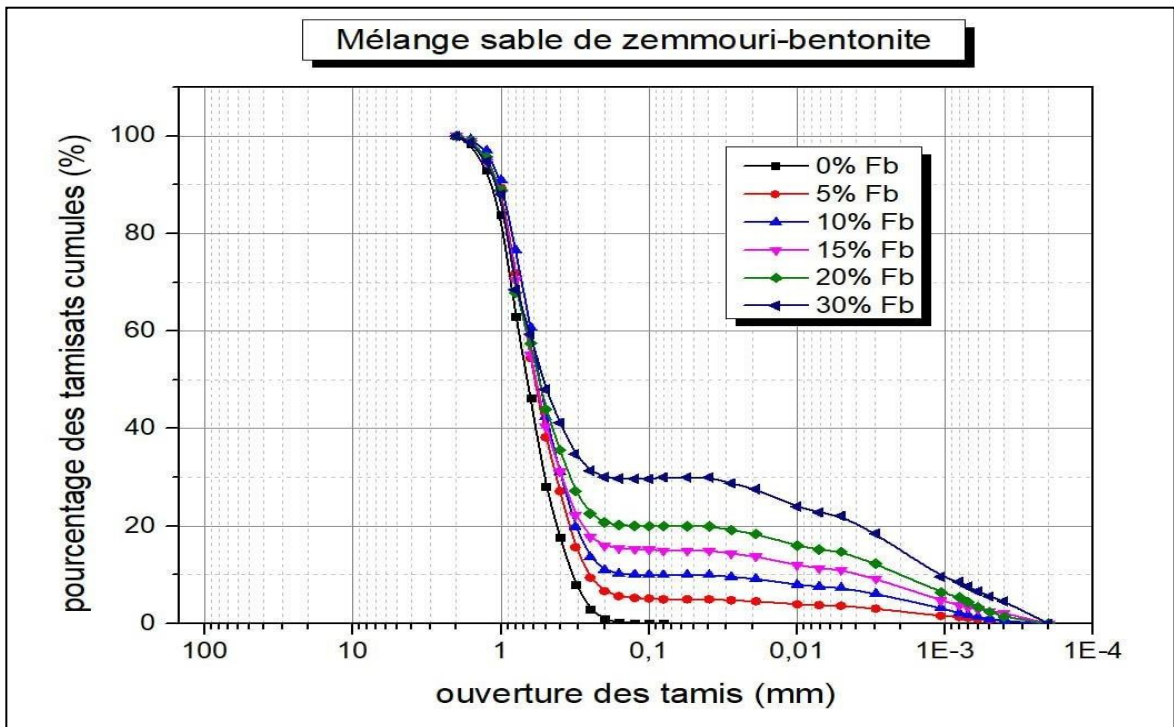


Figure II.10 : courbes granulométrique des mélanges sable-bentonite (classe B)( $D_{max}=2mm/D_{min}=0,08mm$ ).

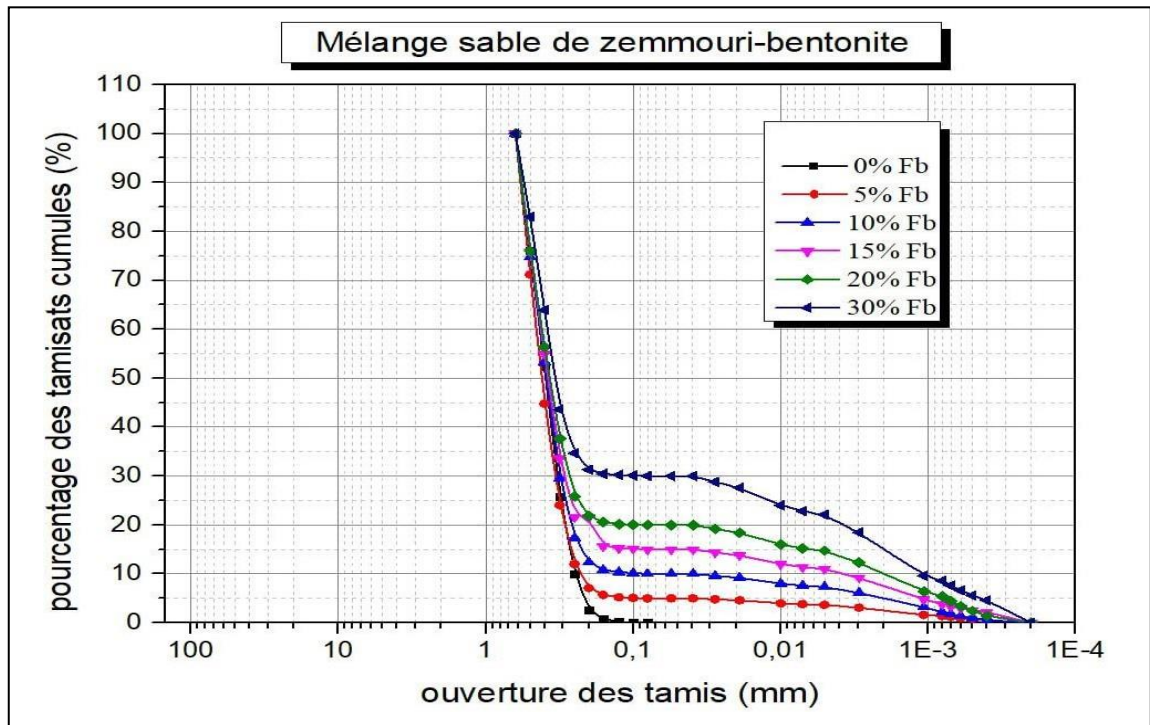


Figure II.11 : courbes granulométrique des mélanges sable-bentonite (classe C) ( $D_{max}=0,63\text{mm}/D_{min}=0,08\text{mm}$ ).

Tableau II.3 : propriétés physiques de mélange sable de Zemmouri –bentonite pour la (classe A) ( $D_{max}= 4\text{mm}/ D_{min} = 0,08\text{mm}$ ).

Propriétés physiques	Matériaux testé						Bentonite
	0%	5%	10%	15%	20%	30%	
<b>FB (%)</b>	0%	5%	10%	15%	20%	30%	100%
<b>D<sub>max</sub>(mm)</b>	4	4	4	4	4	4	0,008
<b>G<sub>s</sub></b>	2,662	2.6620	2.6621	2.6621	2.6622	2.6623	2,663
<b>D<sub>10</sub> (mm)</b>	0.30	0.25	0.20	0.004	0.002	0.001	/
<b>D<sub>30</sub> (mm)</b>	0.40	0.40	0.40	0.40	0.35	0.20	/
<b>D<sub>60</sub> (mm)</b>	0.7	0.8	0.70	0.70	0.70	0.70	/
<b>Cu</b>	2.33	3.2	3.5	/	/	/	/
<b>Cc</b>	0.76	0.8	1.14	/	/	/	/
<b>E<sub>max</sub></b>	0,766	0,767	0,758	0,792	0,826	0,935	/
<b>E<sub>min</sub></b>	0,522	0,503	0,447	0,428	0,423	0,435	/
<b>E</b>	0,631	0,621	0,586	0,591	0,604	0,66	/

**Tableau II.4 : propriétés physiques de mélange sable de Zemmouri –bentonite pour la(classé B) (Dmax= 2mm/ Dmin = 0,08mm).**

Propriétés physique	Matériaux testés						Bentonite
	0%	5%	10%	15%	20%	30%	
<b>FB (%)</b>	0%	5%	10%	15%	20%	30%	100%
<b>Dmax (mm)</b>	2	2	2	2	2	2	0,008
<b>Gs</b>	2,662	2.6620	2.6621	2.6621	2.6622	2.6623	2,663
<b>D10 (mm)</b>	0.35	0.25	0.2	0.005	0.002	0.001	/
<b>D30 (mm)</b>	0.50	0.4	0.35	0.350	0.33	0.20	/
<b>D60 (mm)</b>	0.80	0.6	0.6	0.60	0.60	0.60	/
<b>Cu</b>	2.28	2.4	3	/	/	/	/
<b>Cc</b>	0.89	1.06	1.02	/	/	/	/
<b>E<sub>max</sub></b>	0,76	0,757	0,768	0,813	0,826	0,926	/
<b>E<sub>min</sub></b>	0,522	0,523	0,469	0,419	0,429	0,445	/
<b>E</b>	0,629	0,628	0,603	0,596	0,607	0,661	/

**Tableau II.5 : propriétés physiques de mélange sable de Zemmouri –bentonite pour la(classé C) (Dmax= 0,63mm/ Dmin = 0,08mm).**

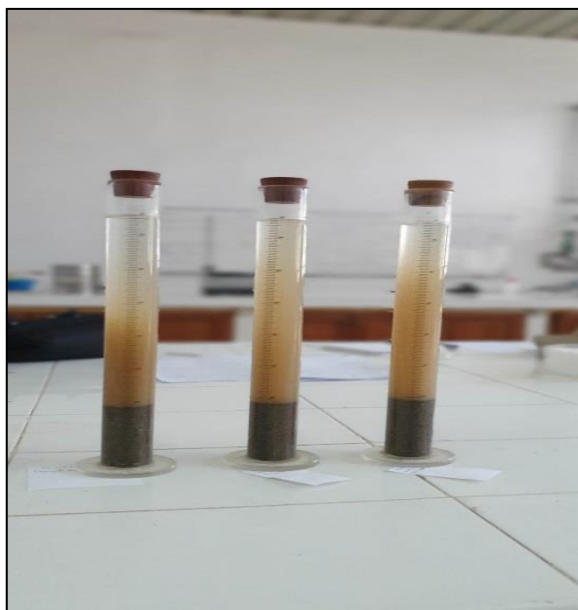
Propriétés physiques	Matériaux testés						Bentonite
	0%	5%	10%	15%	20%	30%	
<b>FB (%)</b>	0%	5%	10%	15%	20%	30%	100%
<b>Dmax (mm)</b>	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,008
<b>Gs</b>	2,662	2.6620	2.6621	2.6621	2.6622	2.6623	2,663
<b>D10 (mm)</b>	0.25	0.23	0.18	0.003	0.002	0.001	/
<b>D30 (mm)</b>	0.35	0.35	0.35	0.27	0.27	0.20	/
<b>D60 (mm)</b>	0.40	0.4	0.4	0.4	0.38	0.37	/
<b>Cu</b>	1.6	1.73	2.22	/	/	/	/
<b>Cc</b>	1.22	1.33	1.7	/	/	/	/
<b>E<sub>max</sub></b>	0,832	0,848	0,86	0,867	0,937	1,01	/
<b>E<sub>min</sub></b>	0,578	0,582	0,542	0,496	0,476	0,469	/
<b>E</b>	0,692	0,701	0,685	0,662	0,683	0,712	/

### II.4.3 Essai d'équivalent de sable

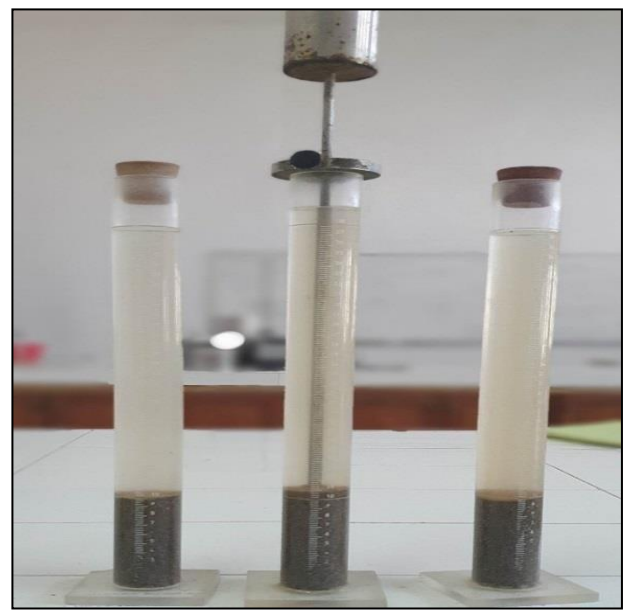
Cette méthode est utilisée pour évaluer la propreté et la qualité d'un agrégat, tel que le sable, en mesurant la quantité de particules fines et de matières organiques présents dans l'échantillon.



Figure II.12 : Appareil d'équivalent de sable.



(a)



(b)

Figure II.13 : essai d'équivalent de sable.

Tableau II.6 : résultats d'équivalent de sable.

Éprouvette	Hauteur de sable (cm) H <sub>1</sub>	Hauteur de sable (cm) H <sub>2</sub>	Hauteur de sable (cm) H <sub>3</sub>	Équivalent de sable visuel	Équivalent de sable au piston
1	9,8	10,1	9,1	97,02	90,09
2	10,2	10,5	8,3	97,14	79,04
3	9,9	10,2	8,9	97,05	87,25
Équivalent de sable visuel = 97,07 Equivalent de sable au piston=85.46					

#### II.4.4 Détermination de densité relative minimale et maximale du sable

Pour déterminer la densité relative minimale et maximale d'un sable, on utilise généralement l'essai de densité relative. Cet essai permet de comparer la densité d'un échantillon de sable par rapport à sa densité maximale théorique et sa densité minimale théorique. Nous déterminons d'abord les masses volumiques sèches minimale et maximale d'un sable dont le diamètre maximal des grains est inférieur à 5 mm, puis nous déduisons, par la suite, l'indice des vides minimal et maximal du mélange de sable- bentonite.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II.14 : essai de détermination de la densité relative de sable ( $\phi < 5\text{mm}$ ).

Figure (2.15), (2.16) et (2.17) montrent les variations des indices des vides maximal ("emax" correspondant à l'état le plus lâche) et l'indice des vides minimal ("emin" correspondant à l'état le plus dense de l'échantillon) en fonction la fraction de bentonite.

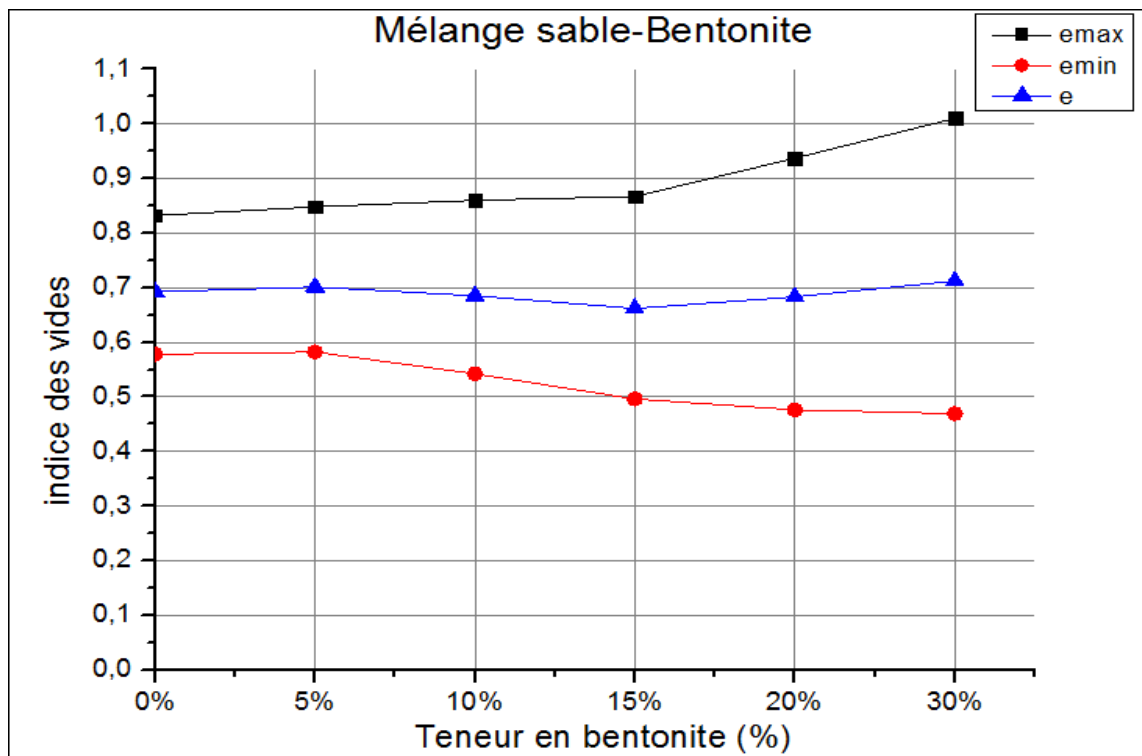


Figure II.15 : Variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en bentonite pour la (classe C) ( $D_{\text{max}} = 0,63\text{mm}$  /  $D_{\text{min}} = 0,08\text{mm}$ ).

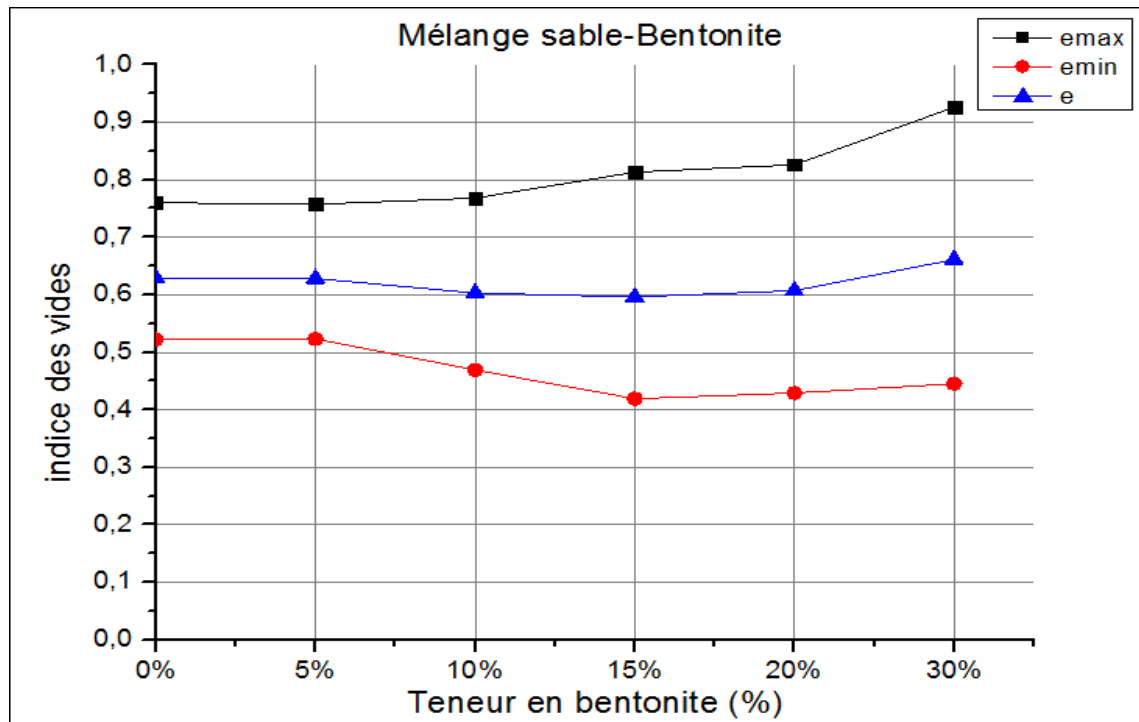


Figure II .16 : Variation des indice des vides en fonction de bentonite pour la (classeB) ( $D_{max}= 2mm/ D_{min} = 0,08mm$ ).

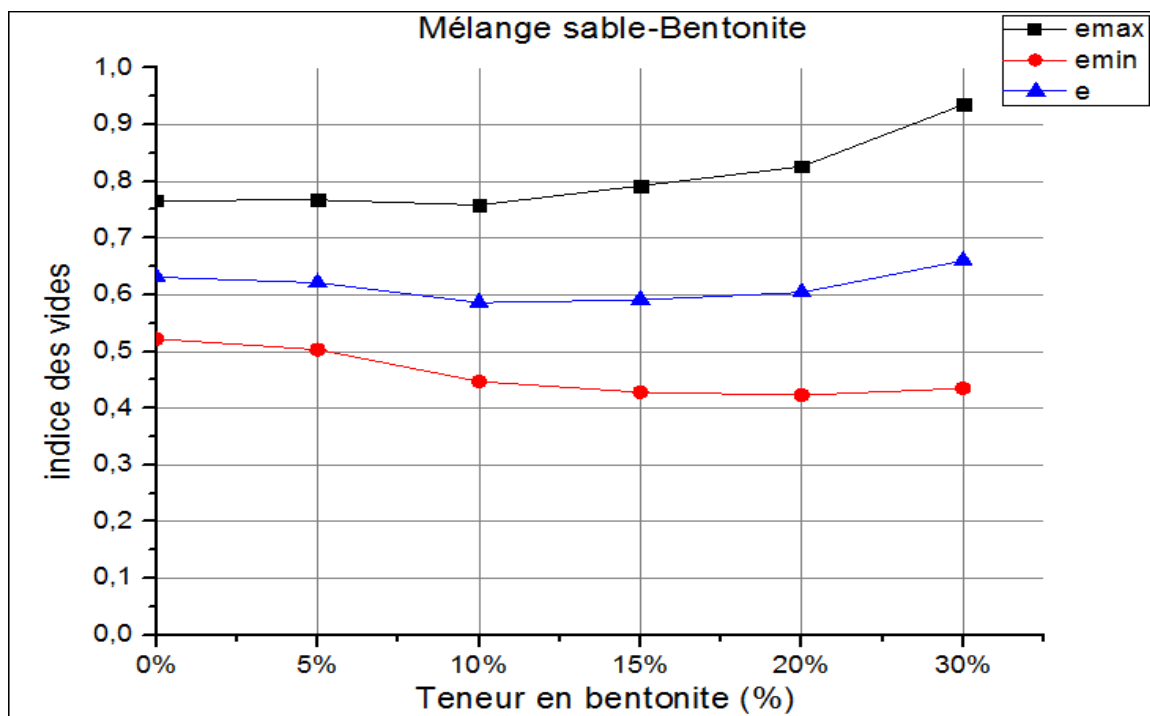


Figure II.17 : Variation des indice des vides en fonction de bentonite pour la (classeA) ( $D_{max}= 4mm/ D_{min} = 0,08mm$ ).



### II.4.5 Détermination des limites d'Atterberg

La limite de liquidité, limite de plasticité et l'indice de plasticité des sols cohésifs sont des paramètres de classification et d'évaluation de la capacité portante. La figure (2.18) présente les résultats des essais de limites d'Atterberg effectués sur la bentonite, le tableau (2.7) montre les résultats.



**Figure II.18 : Appareil de Casagrande.**

**Tableau II.7 : résultats de test (limite d'Atterberg).**

Type de fine	Limite de liquidité%	Limite de plasticité%	Indice de plasticité %
<b>Bentonite</b>	<b>198.77</b>	<b>39.58</b>	<b>159.19</b>

### II.5 Le but de l'essai

La littérature publiée montre que la résistance au cisaillement des sables dépend de la présence de particules fines. Dans ce contexte, cette étude vise à évaluer l'effet de fines sur la réponse mécanique des sables de Zemmouri mélangé avec la bentonite (mélanges sable-bentonite) pour une gamme de teneur en fines variant de FB=0% ; FB=5% ; FB =10% ; FB=15% ; FB =20% ; FB =30%, en utilisant l'appareil de cisaillement direct à la boîte.

Tous les essais, que ce soit, de caractérisation ou mécaniques, ont été effectués sur du sable propre de Zemmouri préparé en trois classes granulaires, ayant le même diamètre minimal et trois différents diamètres maximaux, de 4 mm ; 2mm et 0,63mm, soit : ( $D_{max} = 4 \text{ mm} / D_{min} = 0,08 \text{ mm}$ ) ; ( $D_{max} = 2 \text{ mm} / D_{min} = 0,08 \text{ mm}$ ) et ( $D_{max} = 0,63\text{mm} / D_{min} = 0,08 \text{ mm}$ ) mélangé avec la bentonite, cité ci-dessus, et soumis à une contrainte normale constante de 100, 200 et 300 kPa.

### II.6. Procédure de la reconstitution des échantillons

#### II.6.1 Introduction

Dans notre travail expérimental, le choix du dispositif de cisaillement a principalement été choisi à cause de sa disponibilité au laboratoire. Idéalement, nous aurions préféré d'effectuer des essais triaxiaux pour mieux analyser le comportement mécanique. Cependant, en raison de l'indisponibilité du dispositif triaxial, nous avons procédé à ces essais en utilisant l'appareil de cisaillement direct à la boîte.

#### II.6.2 Reconstitution des échantillons

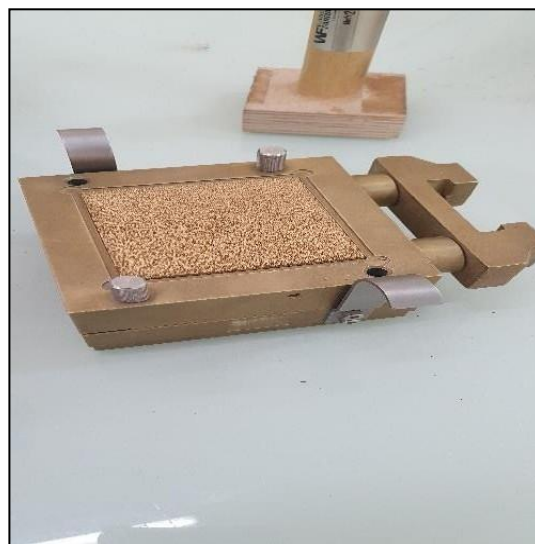
Les mélanges de sable ont été reconstitués au laboratoire avec des teneurs en fractions de bentonite (FB) de 0 % ,5%, 10 %, 15%, 20 % et 30%, avec 3 classe granulaires (0.63mm /0,08mm) ; (2mm/ 0,08mm) ; (4mm/ 0,08mm). Ainsi, chaque groupe est subdivisé pour donner six échantillons en fonction des pourcentages fixés pour les fractions fines correspondantes, soit un total de dix-huit (18) échantillons pour les trois groupes.

Tous les échantillons sont reconstitués par la méthode de la pluviation à sec avec une densité relative initiale ( $D_r = 55 \%$ ), et soumis à une contrainte normale de 100kPa, 200 kPa et 300kPa ( $\sigma_1 = 100\text{kPa}$ ,  $\sigma_2 = 200\text{kPa}$  et  $\sigma_3 = 300\text{kPa}$ ) respectivement.

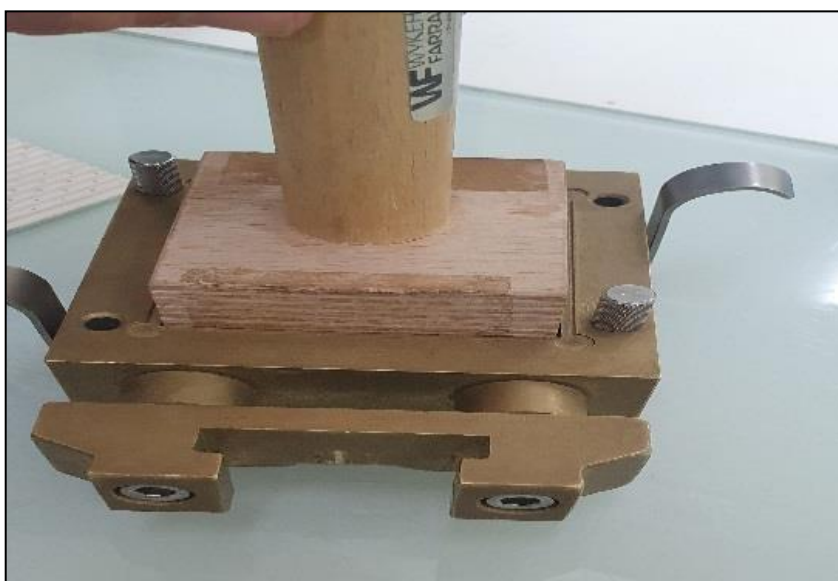
La technique de pluviation à sec est assez bien standardisée (Rad et Tumay, 1987). Nous avons choisi cette méthode, dans ce travail, car elle ressemble au dépôt naturel des sols. Plusieurs chercheurs (Belkhatir et al. 2012, 2014 ; Sze et al. 2014 ; Cherif Taiba et al. 2016) ; (Hazout et al) ; (Mahmoudi et al) ont utilisé cette technique pour étudier la susceptibilité à la liquéfaction d'échantillons de mélange sable-limon. Il a été démontré que la pluviation à sec crée une structure granulaire similaire à celle des sables de rivière et des sables marin déposés naturellement (Oda et al. 1978 ; Ishihara 1993). Par conséquent, la méthode de pluviation à sec a été choisie comme technique de dépôt appropriée pour le présent programme expérimental.



(a)



(b)



(c)

**Figure II .19 : Méthode de la pluviation à sec.**

**II.6.3 Déterminations des masses des échantillons**

La détermination de la quantité de matériau correspond à l'état moyennement dense. Une densité relative de l'échantillon est proposée (**égale à 55%**), puis l'indice de vide correspondant est calculé et enfin la masse du sol est déterminée.

Dans notre recherche, nous avons proposé une densité relative initiale moyenne de 55%, pour des raisons économiques. A la fin, nous concluons si, dans cet état, la résistance du sol s'améliore ou non.

**Tableau II.8 : Les masses des mélange sable de Zemmouri-bentonite.**

<b>Fines en (%)</b>	<b>Mélange (sable+bentonite) Classe C (0.63mm/0.08mm)</b>	<b>Mélange (sable+bentonite) Classe B (2mm/0.08mm)</b>	<b>Mélange (sable+bentonite) Classe A (2mm/0.08mm)</b>	<b>Densité Relative en (%)</b>
<b>0%</b>	141,59	147,07	146,79	<b>55%</b>
<b>5%</b>	141,14	147,76	147,85	
<b>10%</b>	142,23	149,45	151,15	
<b>15%</b>	144,2	150,16	150,64	
<b>20%</b>	142,4	149,14	149,45	
<b>30%</b>	139,91	144,36	144,37	

### II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'appareillage utilisé pour la réponse mécanique Ainsi que ceux utilisés pour la caractérisation du sable Zemmouri mélangé à la bentonite avec trois classes granulaires ayant trois différents diamètres maximaux et même diamètre minimal.

Le sable naturel de Zemmouri a été prélevé d'une faible profondeur le long de la plage de Zemmouri el Bahri, dans des zones de dépôt de sol liquéfié et mélangé séparément avec un seul type de fines (bentonite "FB") pour former trois groupes d'échantillons. Les mélanges sont : sable de Zemmour –bentonite avec ( $D_{max}=0.63\text{mm}/D_{min}=0,08\text{mm}$ ) pour la classe C ; sable de Zemmouri – bentonite avec ( $D_{max}=2\text{mm}/D_{min}= 0,08\text{mm}$ ) pour la classe B et sable de Zemmouri – bentonite avec ( $D_{max}=4\text{mm}/D_{min}= 0,08\text{mm}$ ). Chaque groupe a été subdivisé en six échantillons en fonction des pourcentages fixés des fines correspondantes (0 %, 5 %, 10 %, 15%, 20 % et 30%). Au total, 18 échantillons.

Tous les échantillons sont reconstitués par la méthode de la pluviation a sec avec une densité relative initiale constante de 55% ( $D_r = 55\%$ ), et soumis aux trois contraintes normales ( $\sigma_n = 100\text{ kPa}$ ,  $200\text{ kPa}$  et  $300\text{ kPa}$ ).

Nous ne sommes pas arrêtés là mais nous avons franchi une nouvelle étape où ce chapitre nous conduit au chapitre suivant dans lequel nous étudierons la réponse mécanique d'un mélange de sable avec différentes teneurs en fines (bentonite) en trois classe granulaire en mettant l'accent sur l'influence de la fraction des fines, de la taille des grains et de la contrainte normale sur le comportement mécanique des matériaux testés tout en interprétant soigneusement chacun des résultats en fonction des différentes observations.

## **CHAPITRE III**

# **EFFET DE LA TENEUR EN BENTONITE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES DIFFERENTES CLASSES GRANULAIRES**

### III-1 Introduction

Les sols présents dans la nature, se trouve sous forme de mélanges en raison de l'interaction entre leurs matrices constitutives parentales, et leurs comportements diffèrent considérablement de comportements des matériaux d'origine. Plusieurs chercheurs ont étudié le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite et ils ont constaté que la fraction des fines a un effet significatif sur la résistance au cisaillement.

Dans la littérature publiée, plusieurs études ont été menées pour comprendre le comportement des mélanges de sols granulaires avec les fines, exemple : (Belkhatir et al. 2014, Andrews et Martin 2000, Bouferra et al. 2000, Dash et al. 2011, Hazout 2022 et Mahmoudi et al. 2020). Cependant, il est important de noter que les réponses de ces mélanges restent un domaine de recherche actif et d'actualité et ne sont pas entièrement comprises.

L'objectif principal de cette étude expérimentale est d'étudier l'influence de la fraction de la bentonite (FB=0%, 5%, 10% et 15%,20%) sur la réponse mécanique de sable de Zemmouri, utilisant l'appareil de cisaillement direct à la boîte, mettant l'accent sur l'utilisation de la méthode de préparation d'échantillons (la pluviation à sec « W=0%»). Les mélanges sable-bentonite ont été reconstitués au laboratoire avec une seule densité relative initiale ( $D_r=55\%$ ) et soumis à trois contraintes normales ( $\sigma_n= 100, 200$  et  $300$  kPa).

### III-2 Résultats des essais réalisés

Les figures ci-dessous présentent la réponse mécanique des échantillons de sable de Zemmouri ayant différents diamètres maximaux ( $D_{max}=4$  mm,  $D_{max}=2$ mm,  $D_{max}=0.63$ mm) et le même diamètre minimal ( $D_{min}= 0.08$  mm) pour en constituer des classes granulaires respectives : ``A, B et C``. ``Classe A`` ayant des tailles variantes entre (4mm/0,08mm), ``Classe B`` leurs tailles des grains variant entre (2mm/0,08mm) et la ``Classe C`` l'intervalle des tailles s'étale entre (0,63mm/0,08mm) Les échantillons ont été reconstitués avec différentes teneur en bentonite (FB=0%, 5%, 10% et 15%,20%). La méthode de déposition est la pluviation à sec (PS), la densité relative initiale ( $D_r=55\%$ ). Ces matériaux sont soumis à trois contraintes normales initiales constantes ( $\sigma_n=100$  kPa,  $\sigma_n=200$ Kpa,  $\sigma_n= 300$ Kpa).



### **III-2-1 Effet de la teneur en bentonite sur la réponse mécanique des mélanges de la classe "A" ( $D_{max}=4mm/ D_{min}=0.08$ )**

#### **III-2-1-1 Contrainte normale 100, 200 et 300kPa**

Les figures (III.1, III.2, III.3) présentent la réponse mécanique des échantillons des mélanges de la classe A. ces matériaux ont été reconstitués au laboratoire avec différentes teneurs en bentonite (FB=0%, 5%, 10% et 15%,20%) faisant cinq (5) mélanges.

Les résultats obtenus montrent que l'addition de la teneur en bentonite a une influence remarquable sur la résistance au cisaillement des échantillons des mélanges sable de Zemmouri-bentonite. La résistance au cisaillement diminue avec l'augmentation de la teneur en bentonite de (FB=0%) jusqu'à FB variant de 10% à 15 % : ( $\tau_{max}=85.514$  à  $\tau_{max}=67.748kPa$ ) pour la contrainte initiale  $\sigma_n=100$  kPa, et ( $\tau_{max}$  variant de 151.05 à 121.506 kPa) pour la contrainte normale  $\sigma_n=200$  kPa, et ( $\tau_{max}=200.70$  KPa à  $\tau_{max}=195.08$  kPa) pour la contrainte normale  $\sigma_n=300$  kPa)

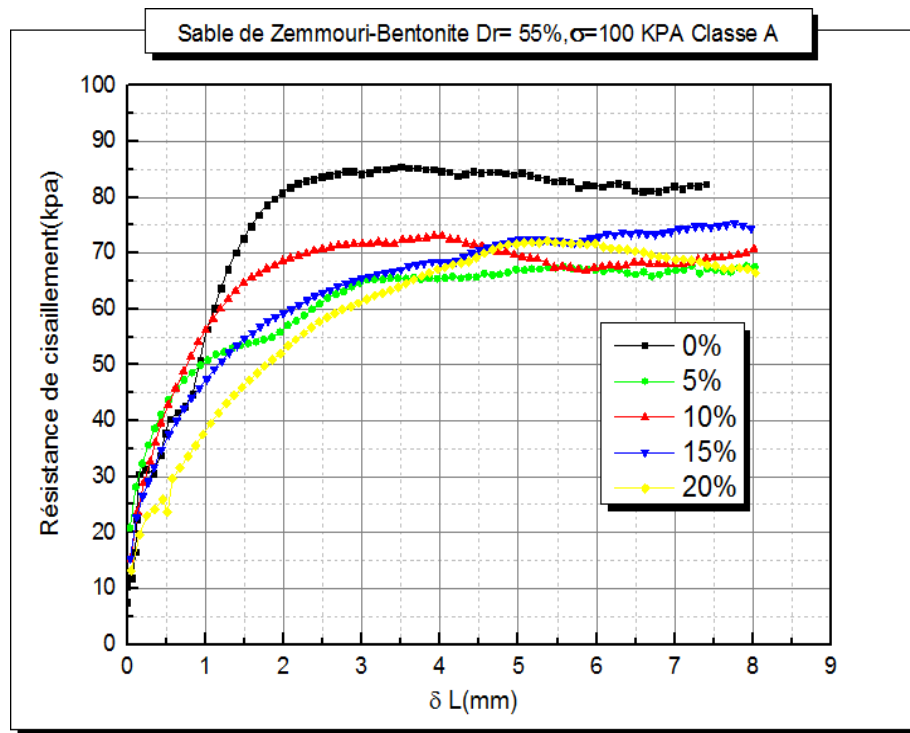
Pour des teneurs en fines de FB =15 % à FB = 20% nous remarquons une augmentation de résistance ( $\tau_{max}=67.748kPa$  à  $\tau_{max}=75.299KPa$ ) pour  $\sigma_n=100$  kPa, ( $\tau_{max}=125.570$  kPa à  $\tau_{max}=133.213$  kPa) pour  $\sigma_n=200Kpa$  et ( $\tau_{max}=173.213$  kPa à  $\tau_{max}=239.538$  kPa) pour  $\sigma_n=300$  kPa.

Nous remarquons que les réponses mécaniques des mélanges reconstitués à 5% et à 10% de FB sont presque les mêmes, nous n'avons pas remarqué un grand changement, et ce pour 100 et 200 kPa de contrainte normale initiale.

Le plan de déplacement vertical -horizontal montre que la phase de dilatance diminue avec l'augmentation de la teneur en bentonite, ou le phénomène de contractance apparaisse clairement jusqu'à FB= 15% au-delà de de cette valeur, c'est-à-dire pour FB = 20% ce dernier (phénomène de contractance) commence à diminuer expectant donnant un caractère dilatant.

Nous illustrons également que dans la partie résiduelle, c'est-à-dire le régime permanent, l'amélioration de la résistance est approuvée surtout pour 200 et 300 kPa.

➤ Contrainte normal  $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$  (Classe A)



(a)

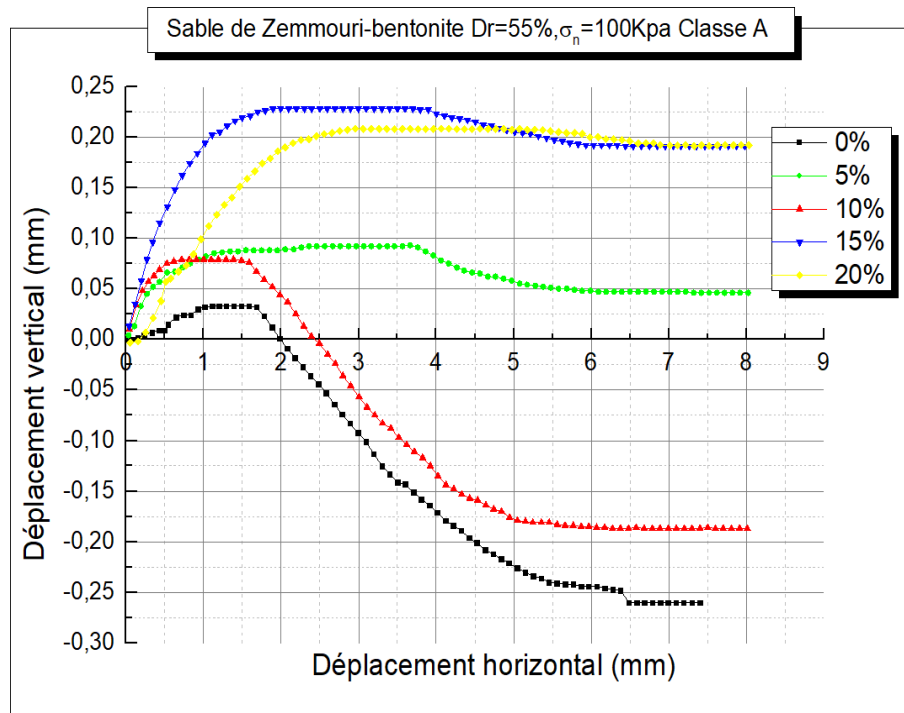
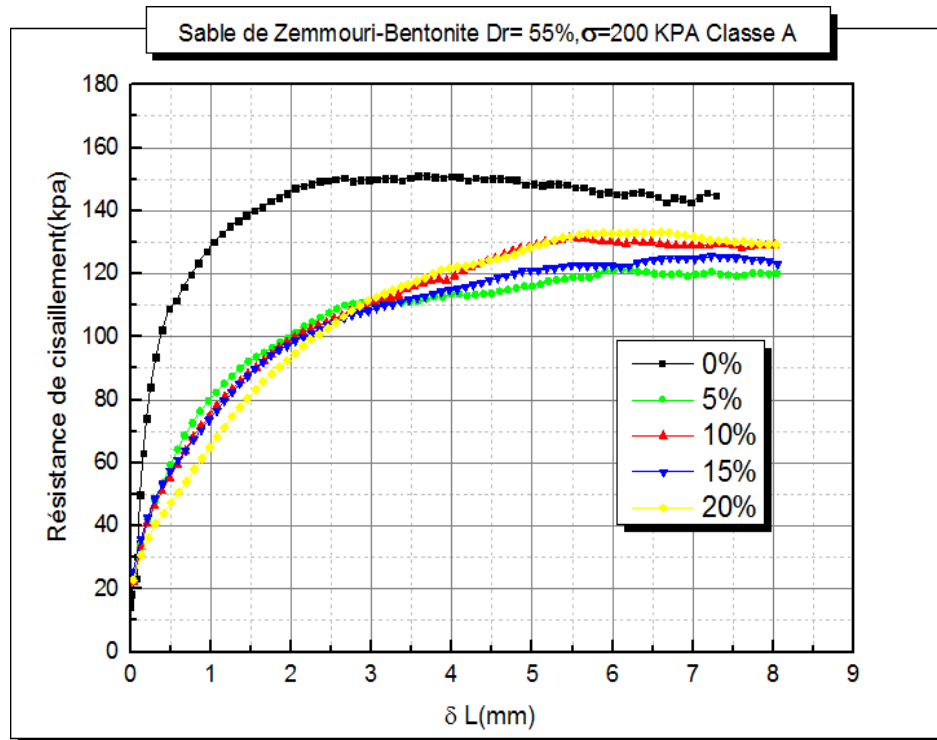


Figure III.1 : Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "A" ( $D_{max} = 4 \text{ mm}$ ,  $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ ).

(a) Evolution de la résistance au cisaillement

(b) Evolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal

➤ Contrainte normal  $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$  (Classe A)



(a)

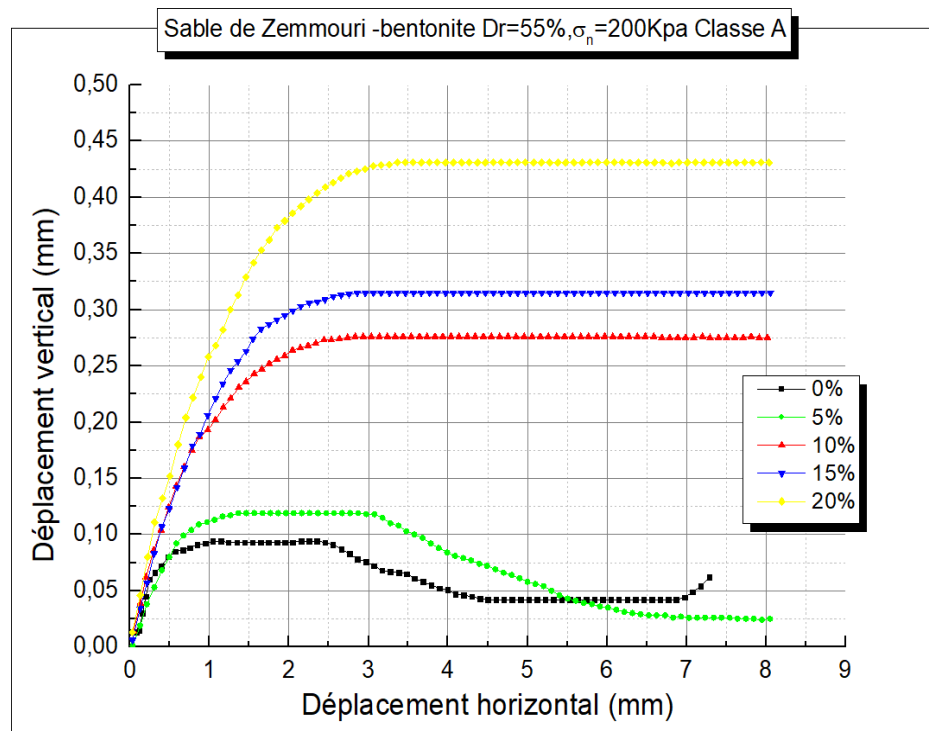


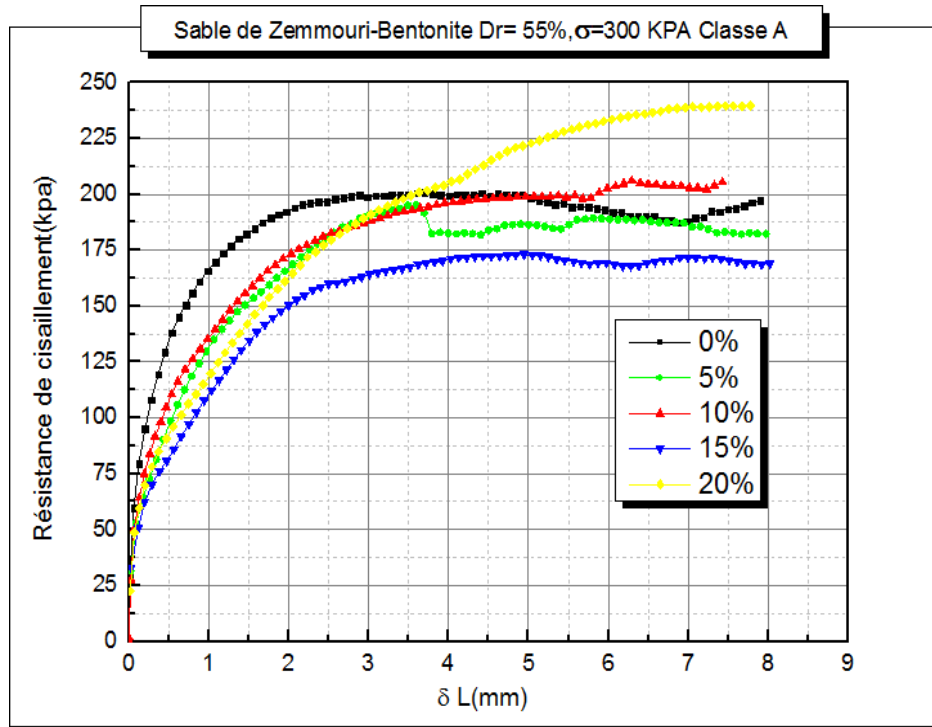
Figure III.2 : Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "A" ( $D_{max} = 4 \text{ mm}$ ,  $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ ).

(a) Evolution de la résistance au cisaillement

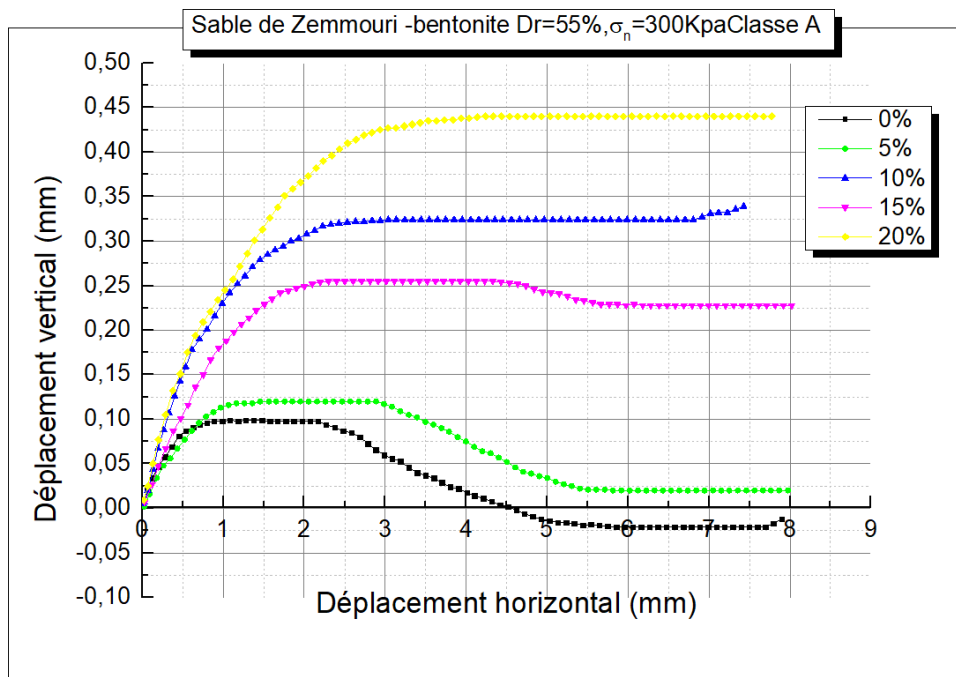
(b) Evolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal



Contrainte normal  $\sigma_n = 300$  kPa (Classe A)



(a)



(b)

Figure (III.3) Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "A" ( $D_{max} = 4$  mm,  $D_{min} = 0.08$  mm,  $\sigma_n = 300$  kPa,  $D_r = 55\%$ ).

(a) Evolution de la résistance au cisaillement

(b) Evolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal

**III-2-2 Effet de la teneur en bentonite sur la réponse mécanique des mélanges de la classe "B" ( $D_{max}=2mm/ D_{min}=0.08mm$ )**

Les figures (III.4, III.5, III.6) illustrent les résultats des essais de cisaillement direct à la boîte réalisés dans le but d'évaluer l'influence de la teneur en bentonite sur le comportement mécanique des mélanges sable de Zemmouri-Bentonite avec des pourcentages allant de FB=0% passant par FB=5%, FB=10%, FB=15% jusqu'à FB=20% faisant cinq (5) mélanges appartenant à la "classe B". Les échantillons ont été reconstitués par la méthode de déposition "pluviation à sec" avec la même densité relative initiale  $D_r=55\%$  et soumis à trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n= 100$  kPa, 200 kPa et 300 kPa).

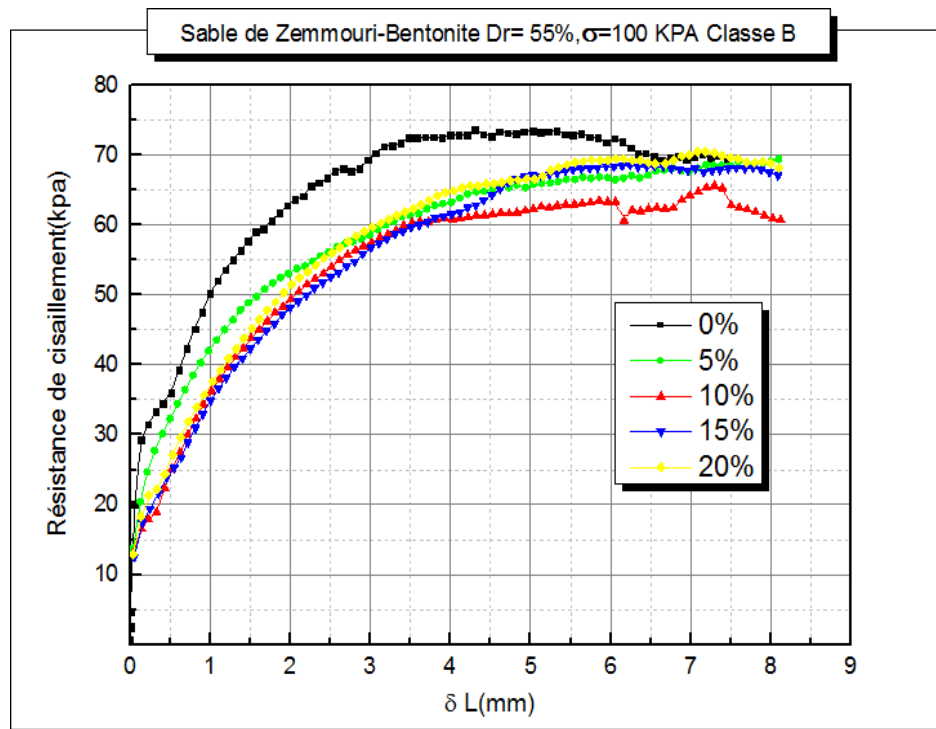
En général, les résultats obtenus illustrent que l'addition de la bentonite a un impact sur la réponse des mélanges sable-bentonite.

Nous remarquons que la résistance au cisaillement diminue légèrement avec l'augmentation de la teneur en bentonite pour les pourcentages FB=0%, FB=5%, FB=10% ( $\tau_{max}=73.69$  kPa ; 69.45 kPa ; 65.65 kPa) pour  $\sigma_n =100$  kPa. ( $\tau_{max}= 135.01$  kPa /130.86 kPa et 129.19 kPa) pour  $\sigma_n =200$  kPa. Et ( $\tau_{max}= 198.90$  kPa ;194.83 kPa ; et 191.17 kPa) pour  $\sigma_n=300$  kPa. Nous déduisons à partir des résultats que le seuil de la résistance existe à 15% de FB ( $\tau_{max}=68.63$  kPa ;118.61 kPa ; 190.67 kPa). Ou à ce point la courbe change de trajectoire. Et la (résistance) commence à augmenter avec l'augmentation des pourcentages des fines jusqu'à 20% ( $\tau_{max}=70.54$  kPa ; 136.18 kPa et 199.61 kPa) pour les trois contraintes initiales respectives  $\sigma_n=100$ Kpa,  $\sigma_n=200$ kpa,  $\sigma_n=300$ Kpa.

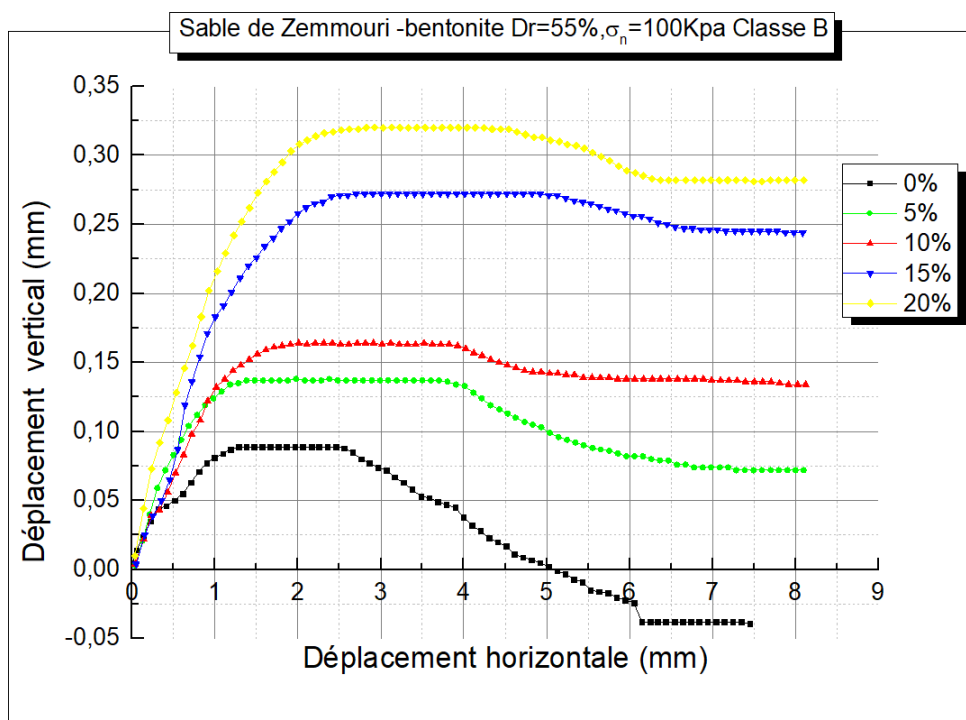
Nous illustrons également que dans la partie résiduelle, c'est-à-dire le régime permanent, l'amélioration de la résistance est approuvée pour toutes les contraintes normales considérées.

Le plan de déplacement vertical -horizontal (plans de cisaillement) montre que la phase de contractance augmente avec l'augmentation de la teneur en bentonite.

➤ **Contrainte normal  $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$  (Classe B)**



(a)



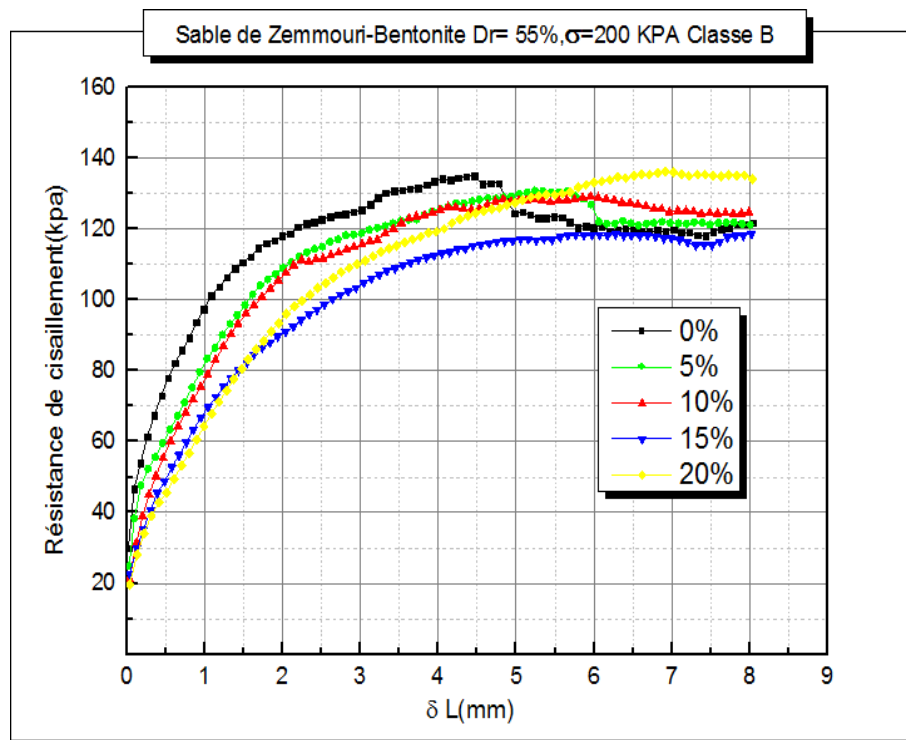
(b)

**Figure III.4 : Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "B" ( $D_{max} = 2 \text{ mm}$ ,  $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ ).**

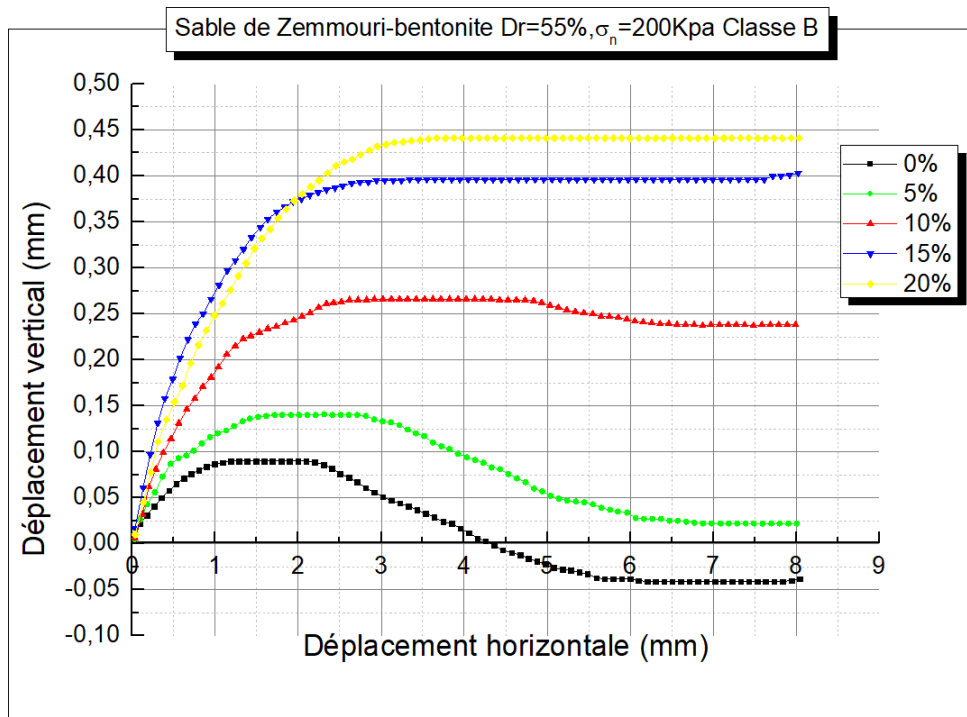
(a) Evolution de la résistance au cisaillement

(b) Evolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal

➤ Contrainte normal  $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$  (Classe B)



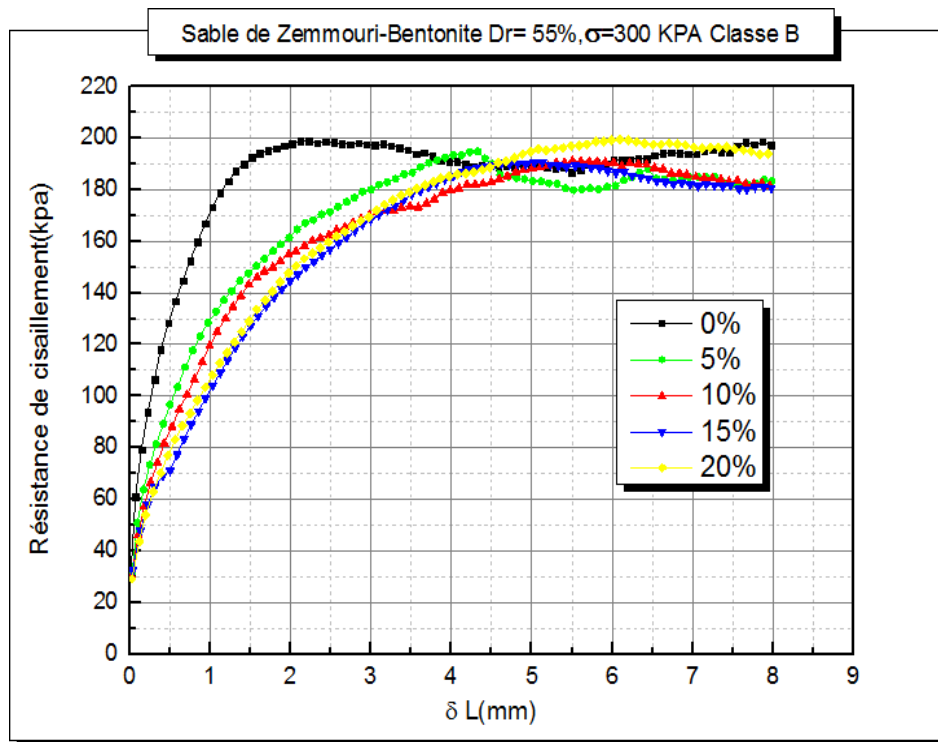
(a)



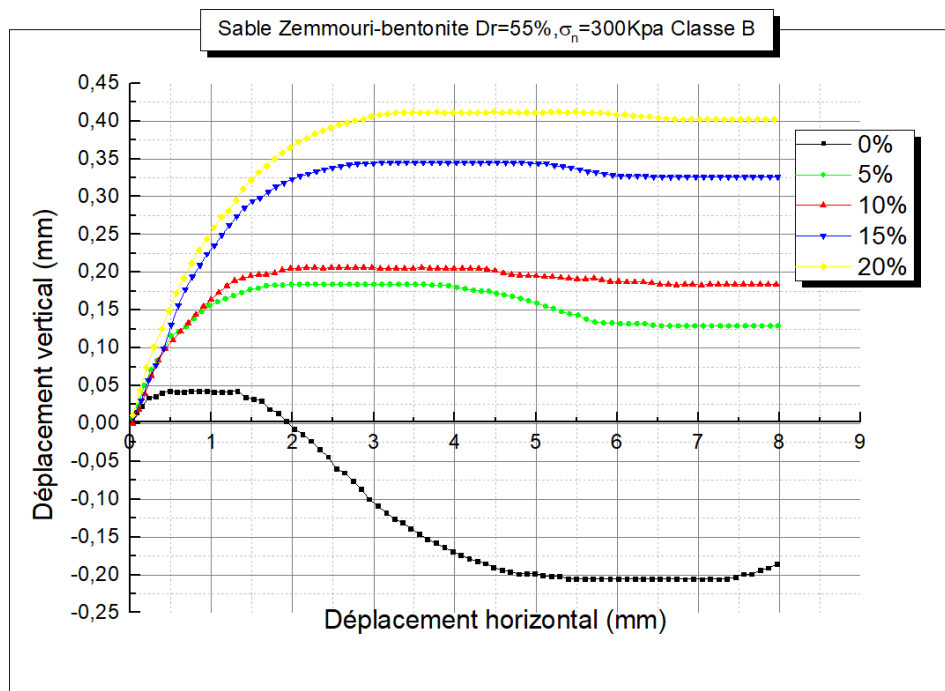
(b)

Figure III.6 : Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "B" ( $D_{max} = 2 \text{ mm}$ ,  $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ ).

➤ Contrainte normale  $\sigma_n = 300 \text{ kPa}$  (Classe B)



(a)



(b)

Figure III.6 : Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "B" ( $D_{max} = 2 \text{ mm}$ ,  $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 300 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ ).

(a) Evolution de la résistance au cisaillement

(b) Evolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal



**III-2-3 Effet de la teneur en bentonite sur la réponse mécanique des mélanges de la classe "C" ( $D_{max}=0,63mm/ D_{min}=0.08mm$ )**

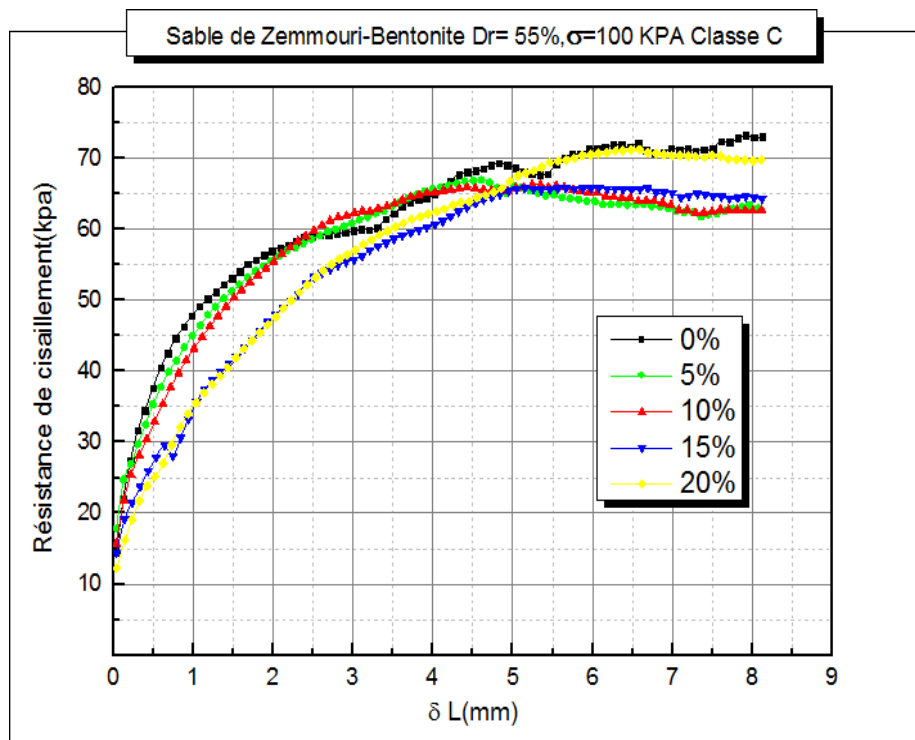
Les figures (III.7, III.8, III.9) illustrent les résultats des essais de cisaillement direct à la boîte réalisés dans le but d'évaluer l'influence de la teneur en fines sur le comportement mécanique de sable de Zemmouri-Bentonite. Les pourcentages varient entre 0% et 20% donnant cinq mélanges pour la classe "C". Les échantillons ont été reconstitués avec la pluviométrie à sec et avec la même densité relative initiale " $D_r=55%$ " et soumis à trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n= 100$  kPa, 200 kPa et 300 kPa).

Pour cette classe les résultats montrent que l'ajout des fines a un impact remarquable sur le comportement mécanique. La résistance au cisaillement diminue légèrement avec l'augmentation des pourcentages en bentonite de ( $FB=0%$  à  $FB=10%$ ), ( $\tau_{max} = 72.09$  kPa à  $\tau_{max} = 66.28$  kPa) pour la contrainte normale  $\sigma_n=100$  kPa, et ( $\tau_{max}= 140.36$  à  $\tau_{max} =123.58$  kPa) pour la contrainte normale  $\sigma_n=200$  kPa et ( $\tau_{max}=179.17$  kPa à  $\tau_{max}=160.86$  kPa ) pour la contrainte normale  $\sigma_n= 300$  kPa. Et une augmentation de résistance avec l'augmentation de la teneur en bentonite pour  $FB=15%$  et  $FB=20%$  ( $\tau_{max}=65.91$  kPa ,  $\tau_{max}=71.239$  kPa ) pour  $\sigma_n=100$  kPa, et ( $\tau_{max}=120.78$  KPa ,  $\tau_{max}=157.18$  kPa) pour  $\sigma_n=200$ Kpa , ( $\tau_{max}=177.88$  kPa ,  $\tau_{max}=191.19$  kPa) pour  $\sigma_n=300$  kPa.

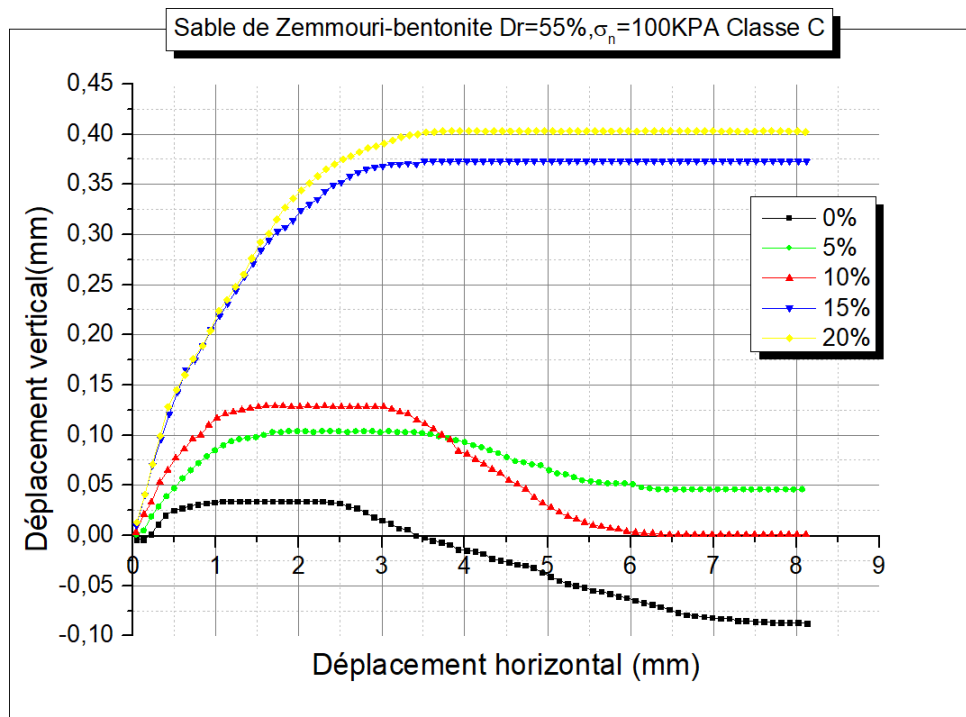
Nous illustrons également que dans la partie résiduelle, c'est-à-dire le régime permanent, l'amélioration de la résistance est approuvée pour toutes les contraintes normales considérées.

Le plan de déplacement vertical –horizontal (plan de cisaillement) montrent que la dilatance diminue avec l'augmentation de la teneur en bentonite.

➤ Contrainte  $\sigma_n=100\text{kPa}$  (Classe C)



(a)



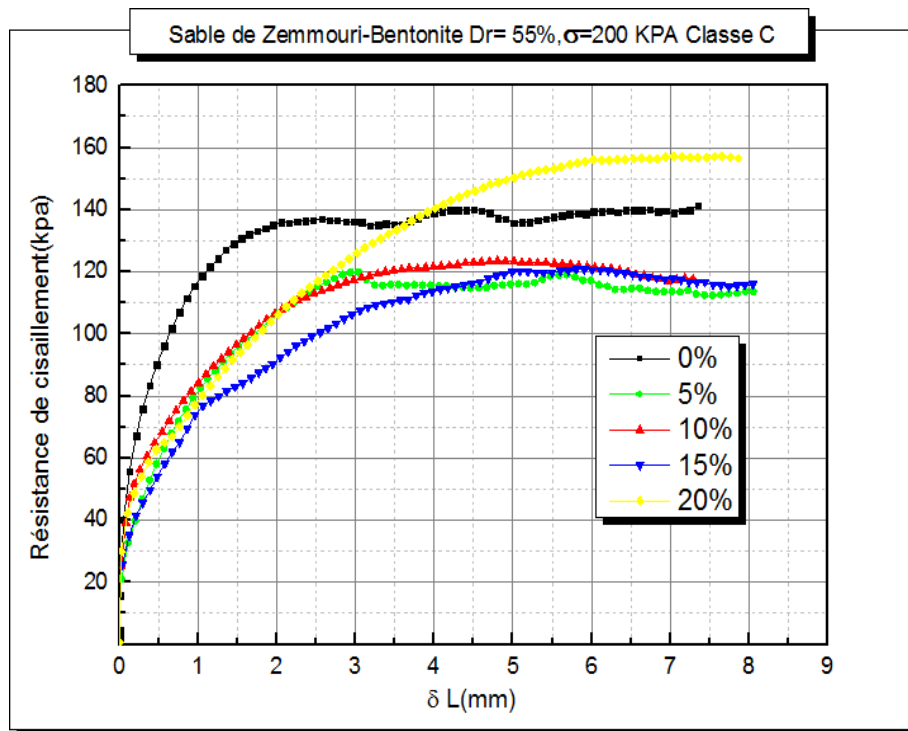
(b)

Figure III.7 : Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "C" ( $D_{max}=0,63\text{mm}$ ,  $D_{min}=0.08\text{mm}$ ,  $\sigma_n=100\text{ kPa}$ ,  $D_r=55\%$ ).

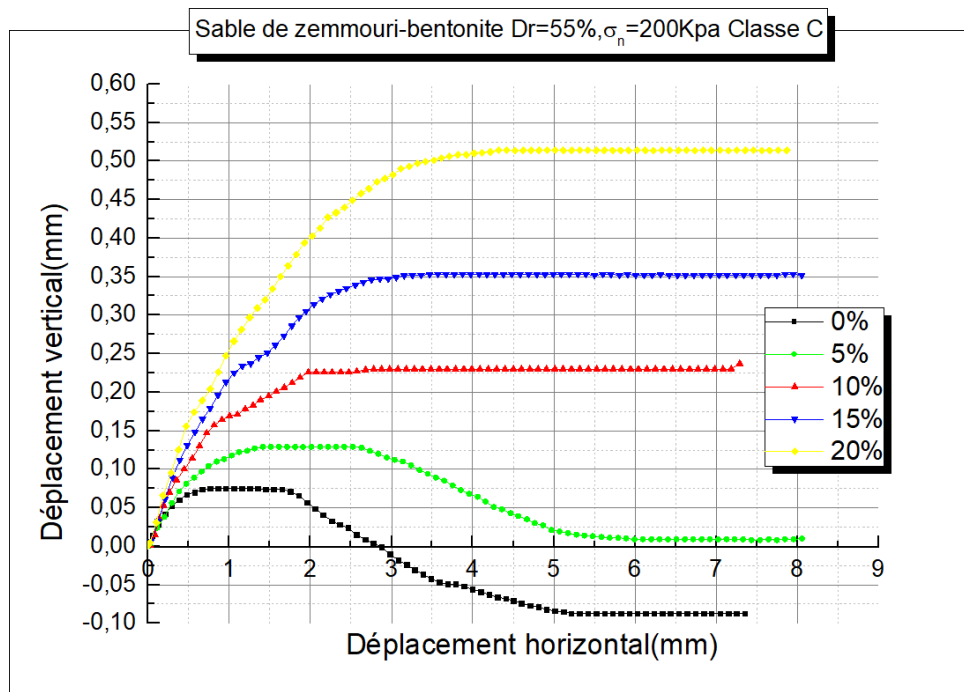
(a) Evolution de la résistance au cisaillement

(b) Evolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal

➤ Contrainte  $\sigma_n=200\text{Kpa}$  (Classe C)



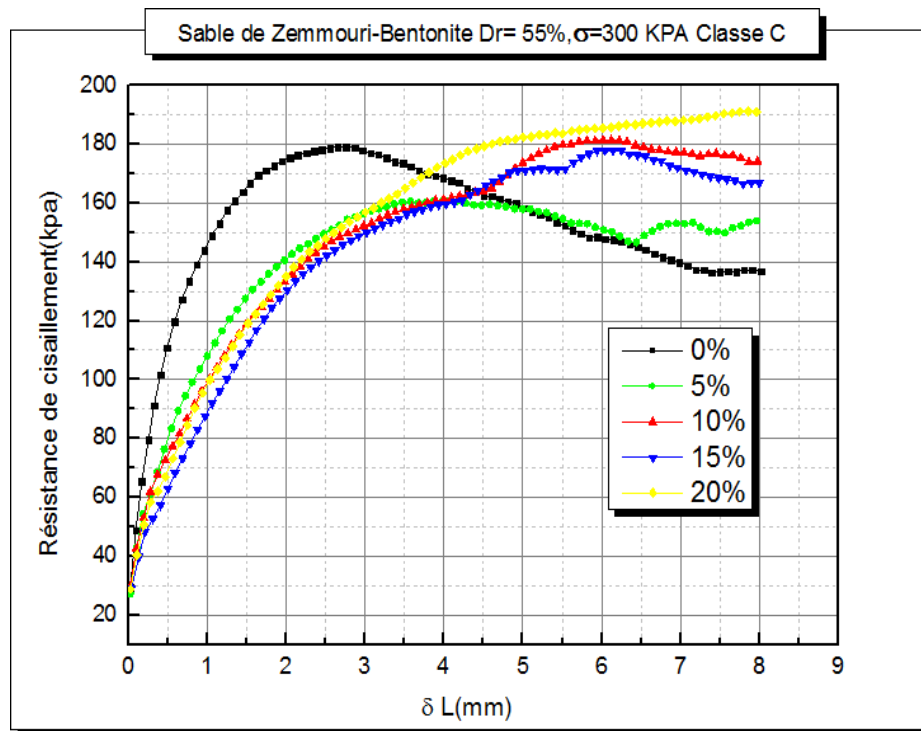
(a)



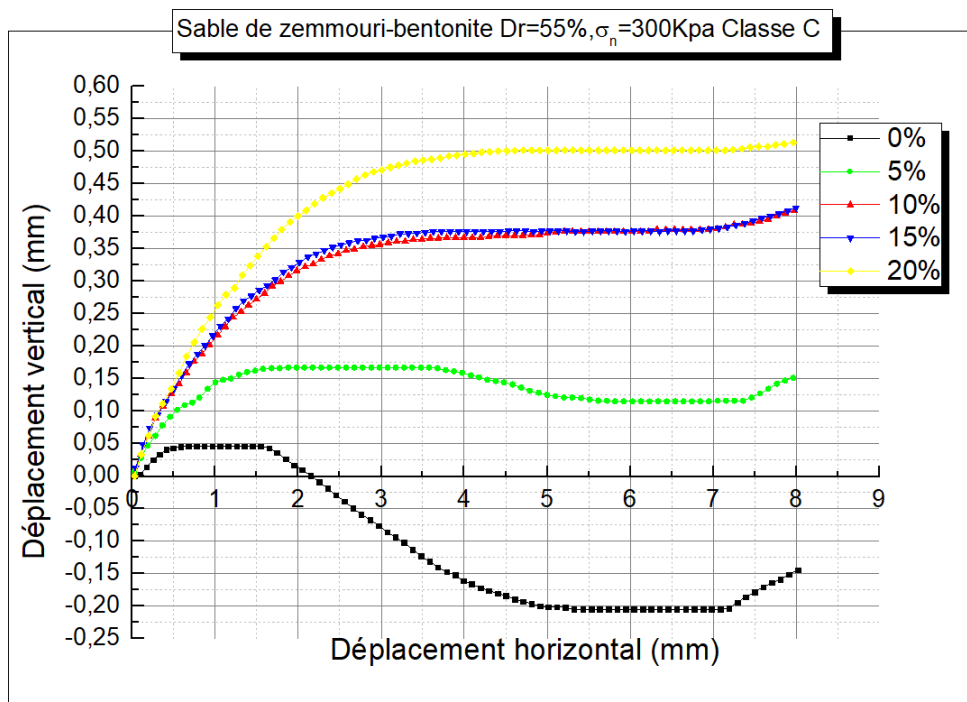
(b)

Figure III.8 : Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "C" ( $D_{max}=0,63\text{mm}$ ,  $D_{min}=0.08\text{mm}$ ,  $\sigma_n=200\text{ kPa}$ ,  $D_r=55\%$ ).

➤ Contrainte  $\sigma_n=300\text{kpa}$  (Classe C)



(a)



(b)

Figure (III .9) Effet des fractions de la bentonite sur le comportement de sable de Zemmouri pour la classe "C" ( $D_{max}=0,63\text{mm}$ ,  $D_{min}=0.08\text{mm}$ ,  $\sigma_n= 300\text{ kPa}$ ,  $D_r=55\%$ ).

(a) Evolution de la résistance au cisaillement

(b) Evolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal

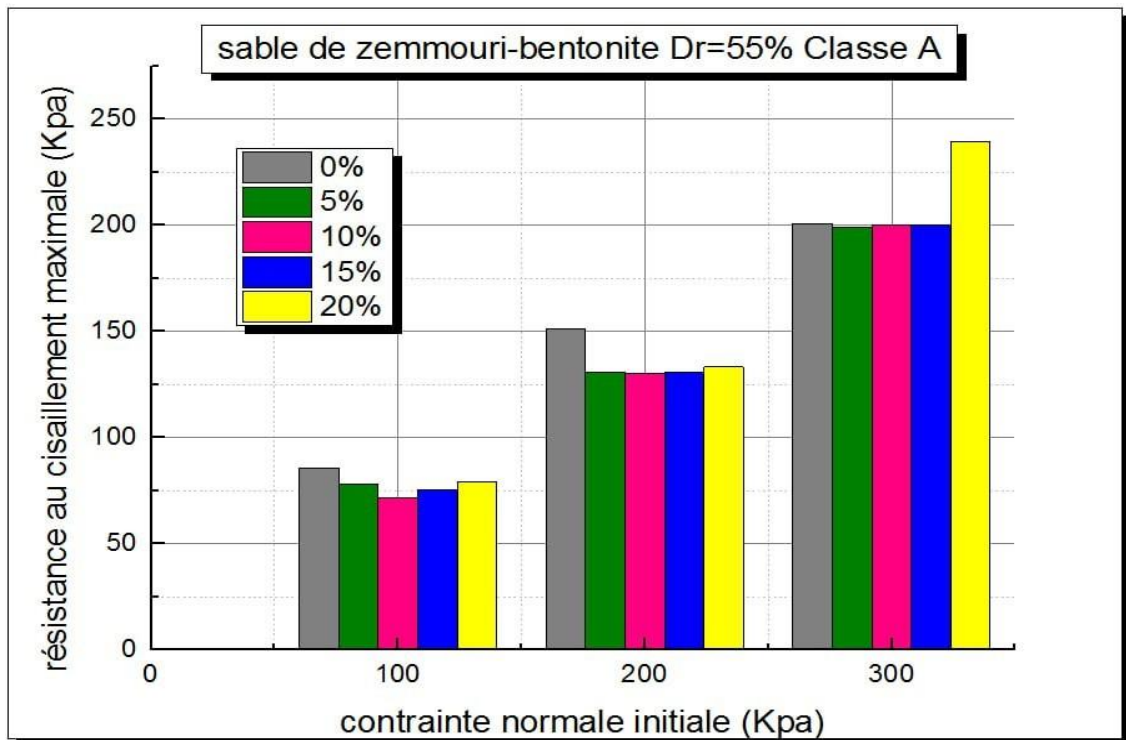
### **III-3 Effet des fractions de bentonite sur la résistance au cisaillement maximale**

Les données de la présente étude sont produites dans les figures (III.10; III.11; III.12) en vue d'évaluer l'influence des fractions de bentonite sur la résistance maximale de sable de Zemmouri pour des teneurs en bentonite suivantes : FB=0% ; FB=5% ; FB=10% ; FB=15% ; FB=20%, les mélanges ont été constitués par la pluviométrie à sec, avec une densité relative  $D_r = 55\%$  et soumis à trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n = 100, 200$  et  $300$  kPa)

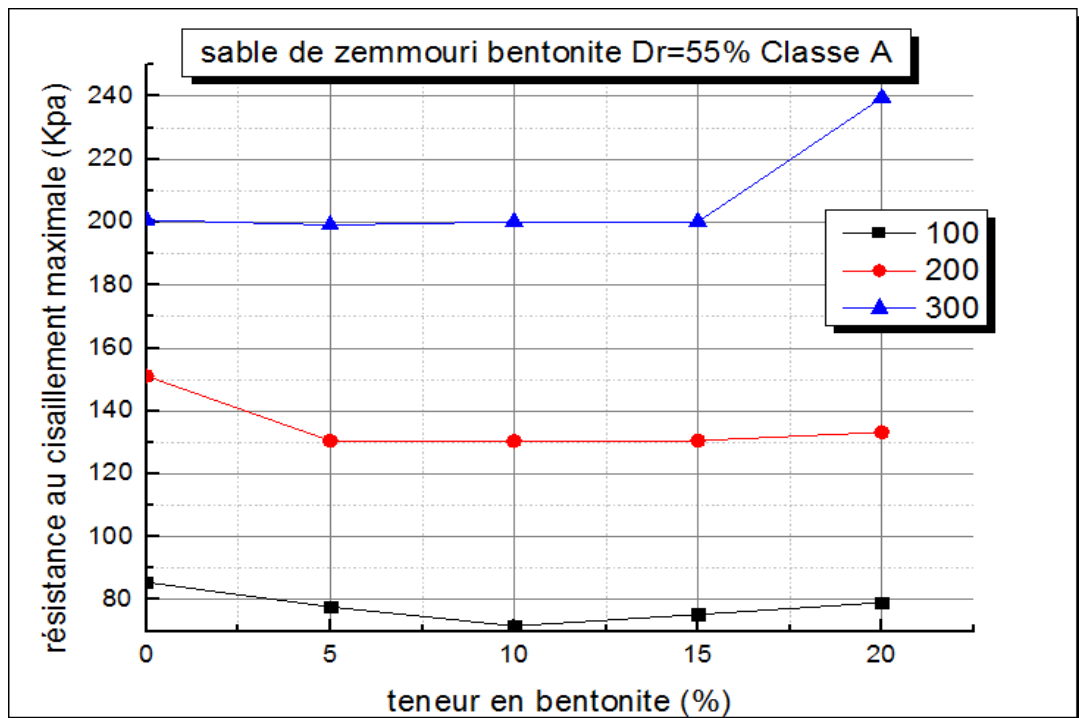
Nous remarquons l'effet de la fraction de la bentonite est très remarquable ou la résistance diminue avec l'augmentation de la teneur en bentonite dans l'intervalle (FB=0% à FB=15%) par contre une augmentation de la résistance pour FB=20% pour toutes les contraintes normales initiales.

Nous remarquons aussi que cette diminution de résistance est très claire pour les deux classes "B" et "C" par contre pour la classe "A", pour les trois contraintes initiales 100, 200 et 300 kPa, la variation est très légère et même parfois la résistance maximale est presque constante. De 15% à 20% de FB, l'amplification de la résistance est claire pour les trois classes granulaires "A", "B" et "C", mais elle est très prononcée surtout sous la contrainte initiale de 300 kPa.

III-3-1 Pour la classe "A" ( $D_{max}=4mm/0.08\mu m$ )



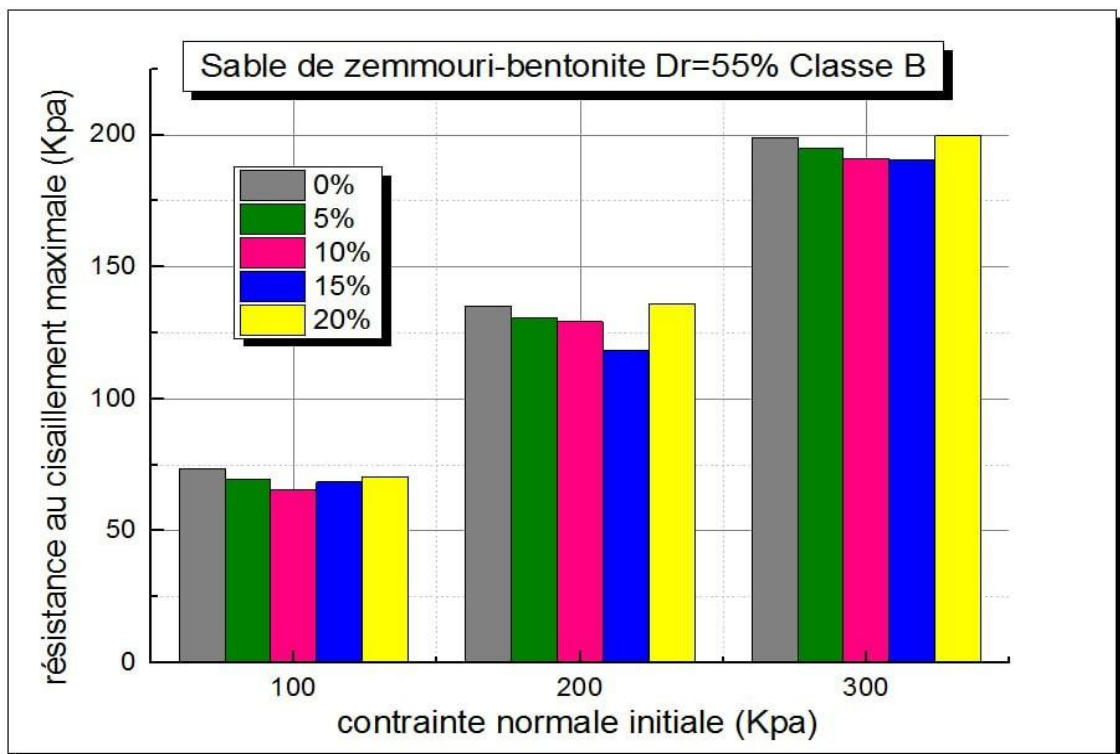
(a)



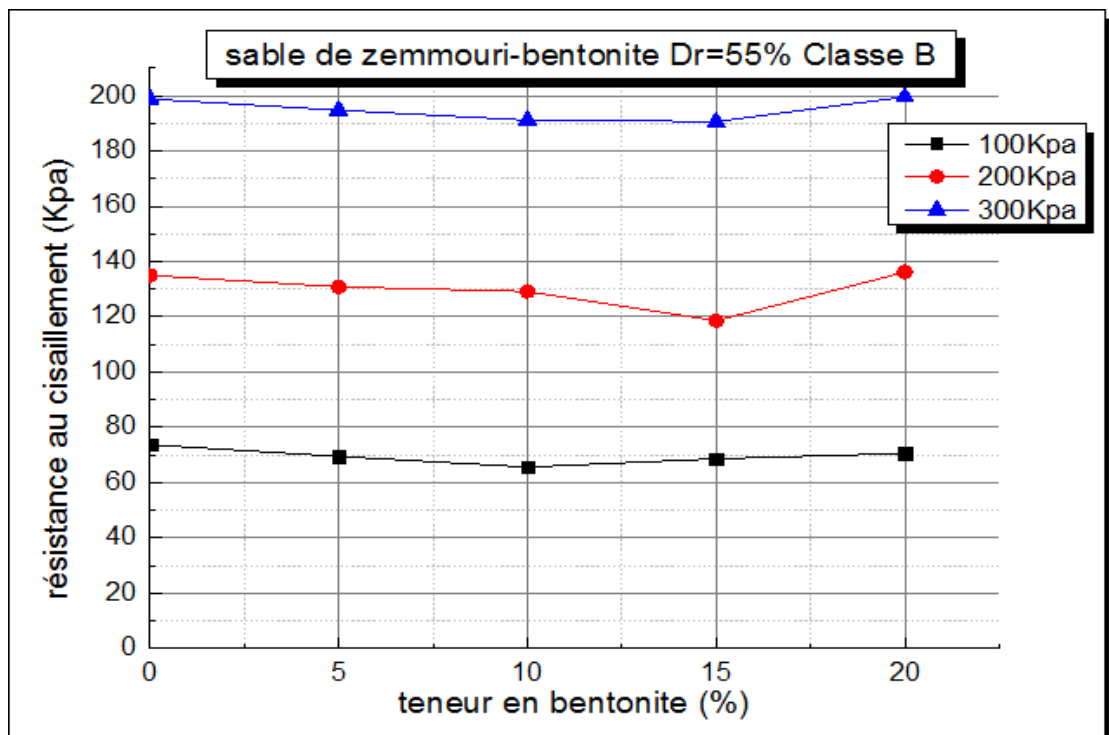
(b)

Figure III.10 : (a) Résistance au cisaillement maximale en fonction contrainte normal  
 (b) Résistance au cisaillement maximale en fonction de la teneur en fine Classe "A".

III-3-2 Pour la classe granulaire "B" ( $D_{max}=2mm/0.08\mu m$ )



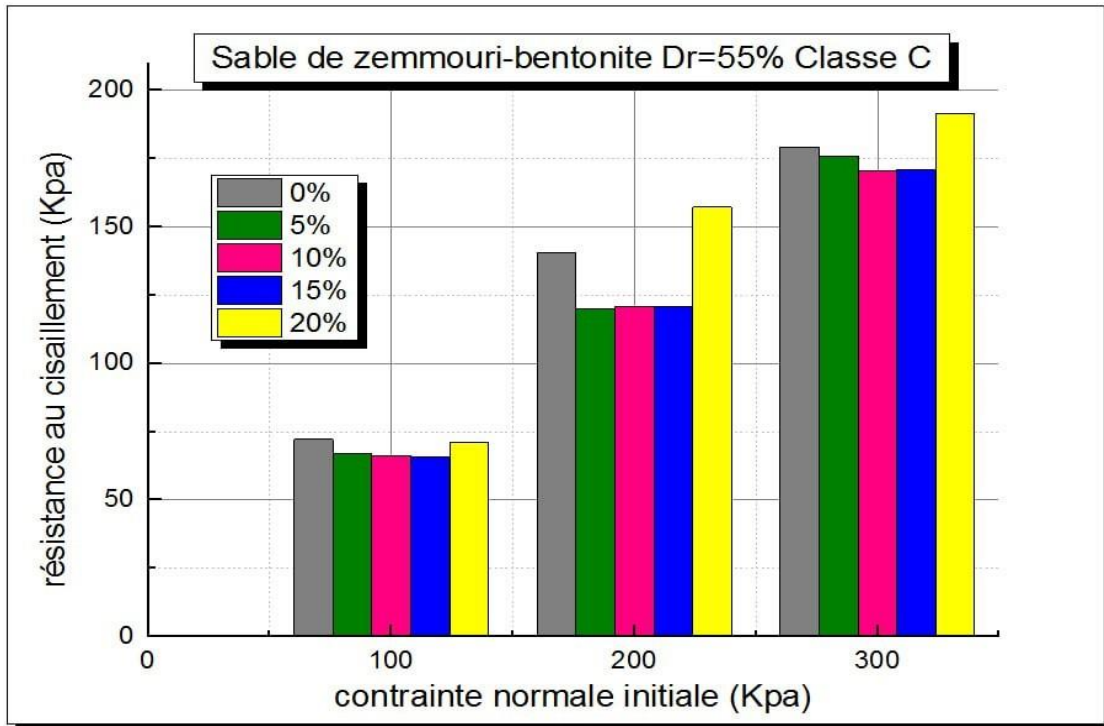
(a)



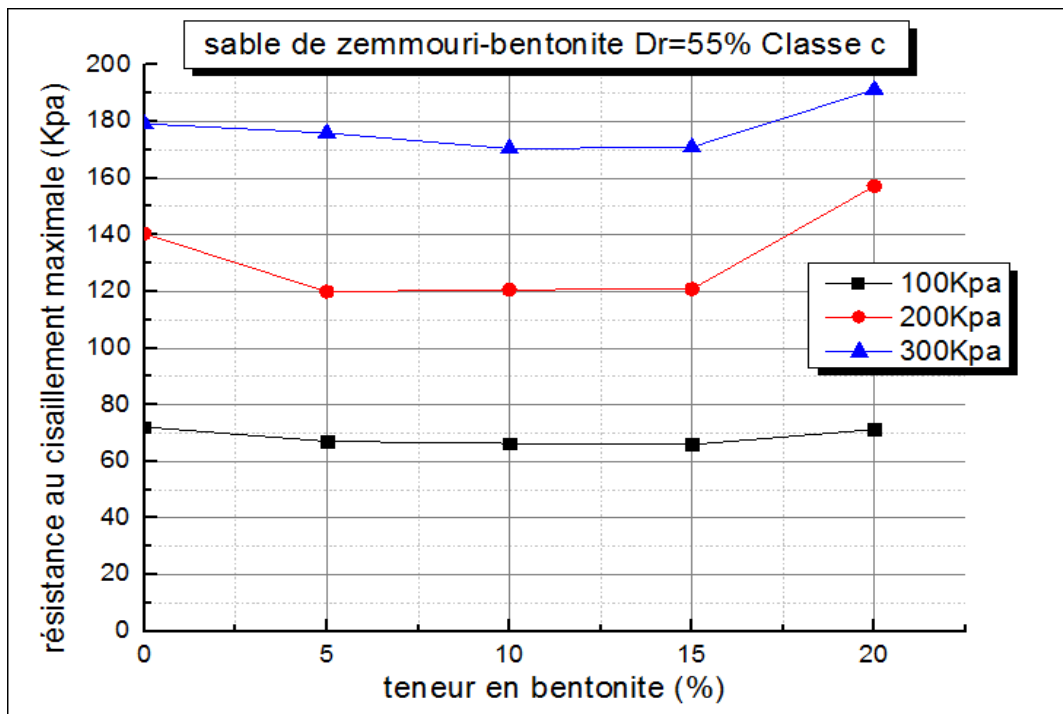
(b)

Figure III.11 : (a) Résistance au cisaillement maximale en fonction contrainte normal  
 (b) Résistance au cisaillement maximale en fonction de la teneur en fine Classe "B"

III-3-3 Pour la classe granulaire "C" ( $D_{max}=0.63mm/0.08\mu m$ )



(a)



(b)

Figure III.12 : (a) Résistance au cisaillement maximale en fonction contrainte normal  
 (b) Résistance au cisaillement maximale en fonction de la teneur en fine Classe "C"



### III-4 Effet des fractions de bentonite sur la résistance au cisaillement normalisée

Les figures (III.13, III.14, III.15) illustrent les effets des fractions des fines pour les trois classes granulaires ( $D_{max}=4mm$  ;  $D_{max}=2mm$  ;  $D_{max}=0.63mm$ ) sur la résistance au cisaillement normalisée ( $\tau_{pic}/\sigma_n$ ) des échantillons reconstitués par la pluviation à sec et pour une densité relative initiale ( $D_r=55\%$ ).

Nous constatons que les valeurs de la résistance au cisaillement normalisée diminuent avec l'augmentation de la fraction de bentonite (figure 3.13) jusqu'à  $F_{cth} = 15\%$  puis augmente pour atteindre **0,8** pour 100 kPa, en ce qui concerne 200 et 300 kPa le niveau est plus bas entre 0,75 et **0,65**, et ce, pour la classe "A". D'autre part, pour la classes "B" on observe que le rapport entre la résistance maximale et la contrainte normal varie entre 0,73 et 0,58 est beaucoup plus bas que la classe précédente. (Figures 3.14).

En ce qui concerne la classe "C" ( $D_{max}=0.63mm$ ) ; Figure (3.15) le seuil de la résistance au cisaillement normalisée est à  $F_{cth} = 15\%$ , alors que le rapport varie entre 0,8 et 0,58. On conclusion pour toutes les classes granulaires, la résistance au cisaillement normalisée est améliorée pour une contrainte normale de 100 kPa. Puis elle diminue pour des contraintes plus élevées.

#### III-4-1 Pour la classe "A" ( $D_{max}=4mm / D_{min}=0.08\mu m$ )

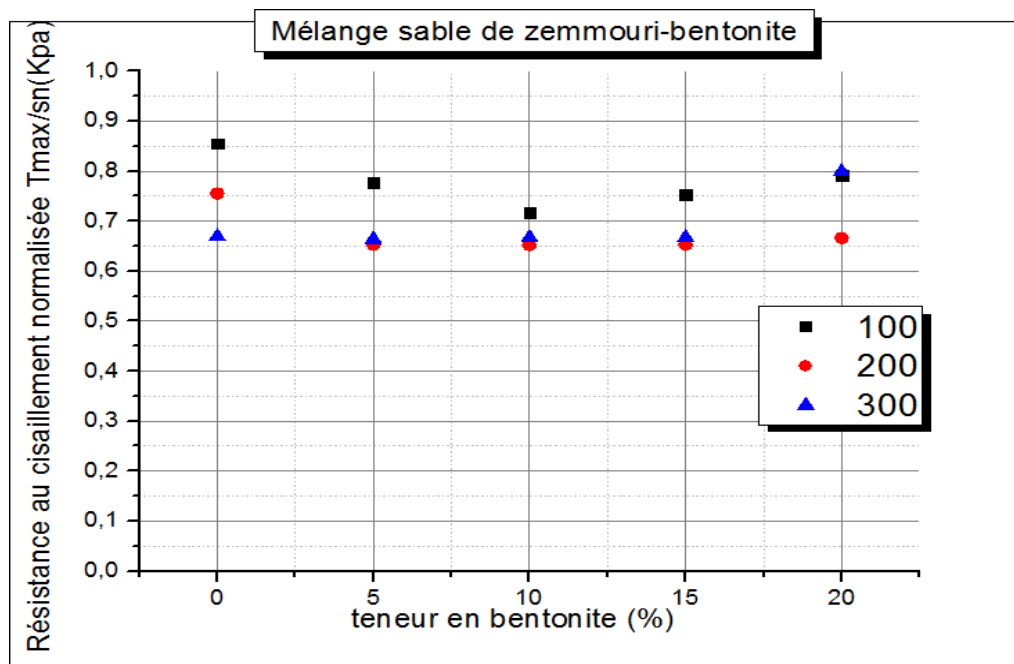


Figure III.13 : Résistance au cisaillement normalisé en fonction de la fraction des fines pour la Classe "A" ( $D_{max}=4mm / D_{min}=0.08\mu m$ )

III-4-2 Pour la classe "B" ( $D_{max}=2mm / D_{min}=0.08\mu m$ )

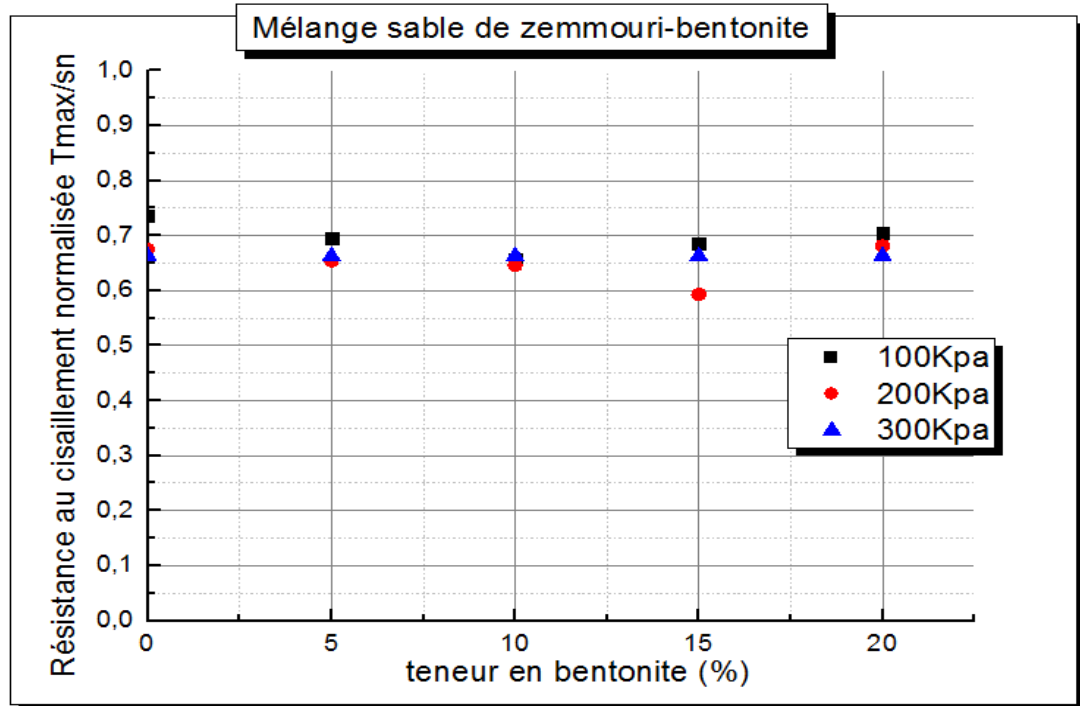


Figure III.14 : Résistance au cisaillement normalisé en fonction de la fraction des fines pour la classe "B" ( $D_{max}=2mm / D_{min}=0.08\mu m$ )

III-4-3 Pour la classe "C" ( $D_{max}=0.63mm / D_{min}=0.08\mu m$ )

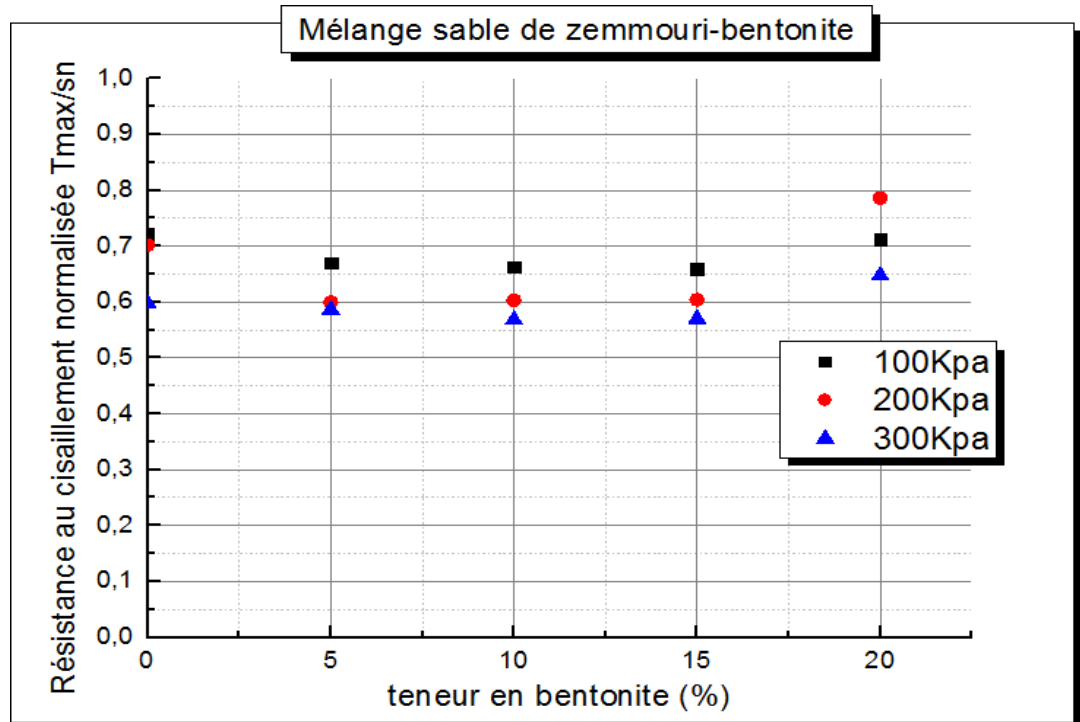


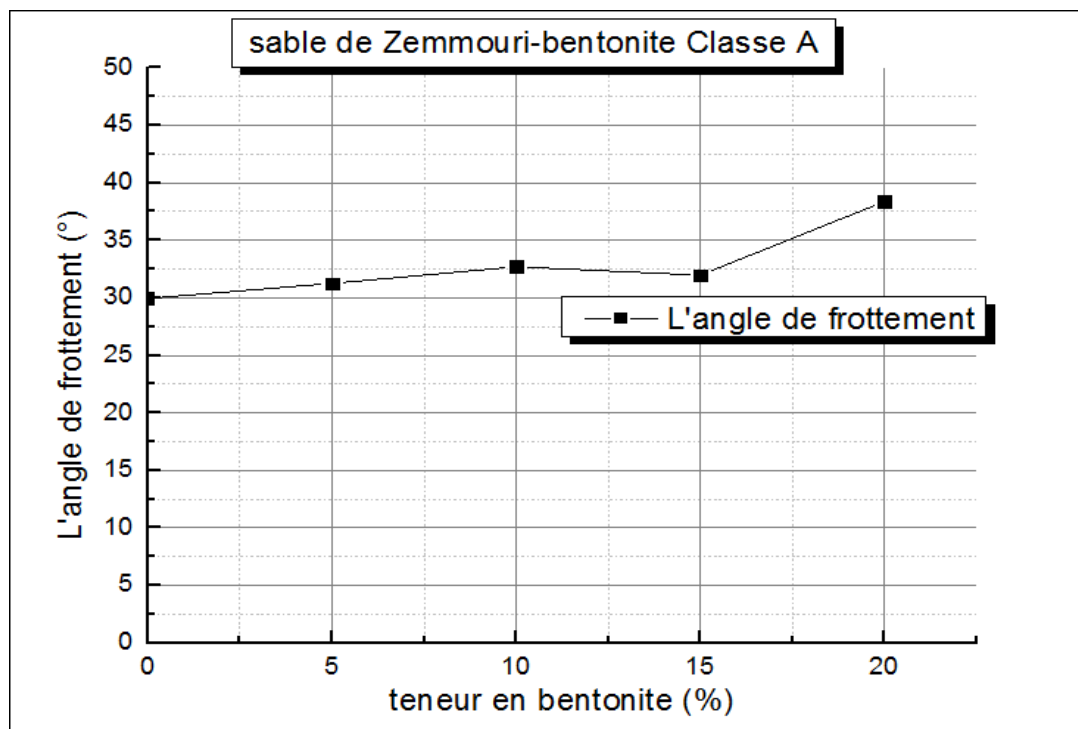
Figure III.15 : Résistance au cisaillement normalisé en fonction de la fraction des fines pour la classe "C" ( $D_{max}=0.63mm / D_{min}=0.08\mu m$ )

**III-5 Effet des fractions de bentonite sur l'angle de frottement interne pour les trois classes granulaires "A" , "B" , "C"**

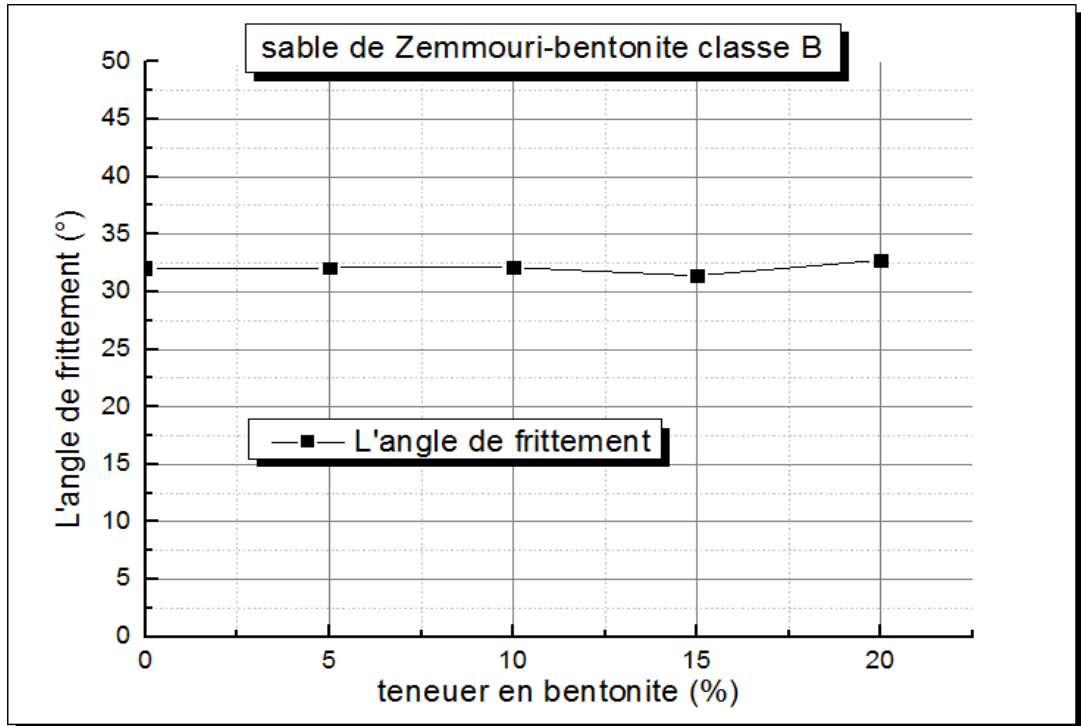
Les figures (III.16 a ; III.16 b, III.16 c) illustrent les résultats des essais de cisaillement direct à la boîte, dans le but d'évaluer l'effet de la teneur en bentonite sur l'angle de frottement interne des échantillons des mélanges sable de Zemmouri-bentonite, avec une densité relative initiale  $Dr=55\%$ , les mélanges testés contiennent des proportions de bentonite varie entre  $FB=0\%$  et  $FB=20\%$ .

Nous concluons que l'angle de frottement augment légèrement puis diminue jusqu'à  $F_{ch} = 15\%$  pour la classe "A" après remonte d'une manière prononcée. En ce qui concerne les deux autres classes nous remarquons qu'il n Ya pas d'amélioration en termes d'angle de frottement interne.

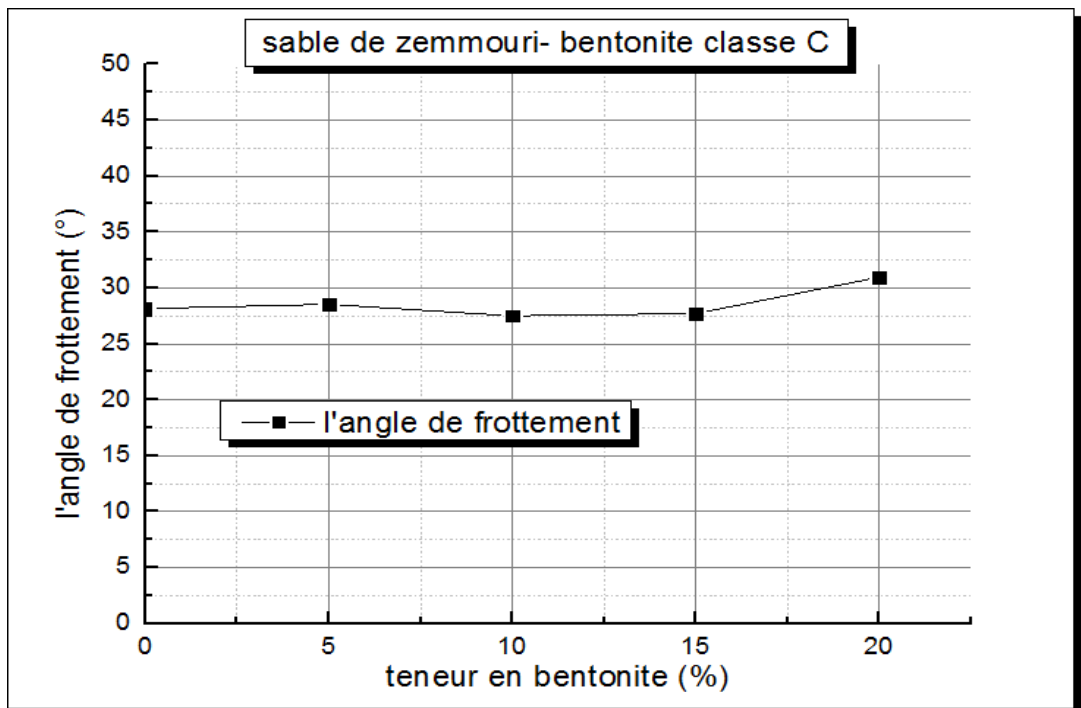
En conclusion, il est clair que la taille des grains, joue un rôle important dans l'amplification de toutes les paramètres de résistance.



(a)



(b)



(c)

Figure III.16 : influence de la fraction des fines de différentes classes granulaire sur l'angle de frottement interne

- (a) Mélanges sable de Zemmouri classe A-bentonite
- (b) Mélanges sable de Zemmouri classe B-bentonite
- (c) Mélanges sable de Zemmouri classe C-bentonite

### **III.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude approfondie sur l'influence des fractions de bentonite (FB=0% , FB =5%, FB =10%, FB =15%, FB =20%) sur le comportement mécanique de différents classes granulaires ,Tous les échantillons sont reconstitués par la pluviation à sec avec une densité relative initiale ( $D_r = 55 \%$ ) et soumis à trois contraintes normales ( $\sigma_n=100, 200$  et  $300$  kPa). , Les résultats des essais de cisaillement direct à la boite montrent que la teneur en bentonite à un effet sur la résistance au cisaillement (maximale et normalisée) et les caractéristiques mécaniques (l'angle de frottement) . En effet la résistance au cisaillement diminue avec l'augmentation de la teneur en bentonite pour toutes classes granulaires "A" , "B" et "C".

## **CHAPITRE IV**

# **INFLUENCE DU DIAMETRE MAXIMAL DES GRAINS SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES MELANGE SABLE- BENTONITE**

### **IV.1 Introduction**

Il existe plusieurs paramètres qui influent sur le comportement des sols et ses propriétés, parmi ces derniers c'est la taille des grains. (Lim et al, 2012) ont étudié l'effet de la taille des grains sur le comportement des sols et ont trouvé que ce paramètre a également un effet significatif sur les propriétés mécaniques des sables. (Hazout et al, 2017) ; (Hazout 2018) ont étudié l'effet des diamètres extrêmes ( $D_{max}$  et  $D_{min}$ ) sur la réponse mécanique non drainée des échantillons du sable de Chlef reconstitués par les deux méthodes : la pluviométrie à sec et le damage humide avec une densité relative initiale ( $D_r=25\%$ ). Ils ont remarqué que le diamètre maximal ( $D_{max}$ ), le diamètre minimal ( $D_{min}$ ) ainsi que le diamètre moyen ( $D_{50}$ ) ont un impact très remarquable sur le comportement mécanique non drainée des matériaux testés. Cherif Taiba et al. (2018) ont analysé les effets de la granulométrie sur l'instabilité (la contrainte d'instabilité non drainée) et des rapports d'état d'équilibre des sols sableux limoneux. Ils ont clairement observé que la granulométrie a une influence significative sur résistance d'instabilité et le rapport des résistances à l'état d'équilibre des mélanges sable-limon, et ils ont confirmé l'existence des corrélations entre la contrainte d'instabilité non drainée, les rapports de résistances à l'état d'équilibre, la teneur en limons, les indices de vide et les paramètres de classification ( $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{60}$ ,  $C_u$ ) de sable de Chlef.

Afin de bien montrer l'influence de la taille des grains en terme des diamètre extrême tel que le diamètre maximal ( $D_{max}$ ) sur la réponse mécanique des échantillons des mélanges sable sable de Zemmouri-bentonite, nous avons réalisé des essais de cisaillement direct à la boîte sur trois (3) classes d'échantillons du sable de Zemmouri reconstitués au laboratoire avec différents fractions de bentonite ( $FB = 0\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$  et  $20\%$ ) avec une densité relative initiale moyenne ( $D_r=55\%$ ) et soumis à trois contraintes normales ( $\sigma_n=100$  kPa,  $200$  kPa et  $300$  kPa) pour des gammes de diamètre maximal ( $0.63 \text{ mm} \leq D_{max} \leq 4 \text{ mm}$ ) et un seul diamètre minimal ( $D_{min} = 0.08\text{mm}$ ).

**IV.2. Résultats des essais réalisés**

**IV.2.1. Effet de diamètre maximal Dmax**

**IV.2.1.1. Contrainte normale,  $\sigma_n = 100$  kPa**

Les figures (IV.1, IV.2, IV.3, IV.4 et IV.5) présentent la réponse mécanique des échantillons du sable de Zemmouri ayant différents diamètres maximaux ( $D_{max}=4$  mm,  $D_{max}=2.0$  mm,  $D_{max}= 0.63$  mm) et un seul diamètre minimal  $D_{min}= 0.08$  mm pour constituer trois classes granulaires "A", "B", "C" respectivement. Chaque classe contient cinq échantillons. Ces derniers ont été reconstitués au laboratoire avec différents teneurs en bentonite ( $FB=0\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$  et  $20\%$ ) avec une densité relative moyenne ( $D_r=55\%$ ) et soumis à une seule contrainte normale initiale. Les résultats d'essais obtenus montrent clairement que le diamètre maximal a un impact remarquable sur la résistance au cisaillement des mélanges sable de Zemmouri-bentonite, pour une contrainte initiale de ( $\sigma_n=100$ kPa).

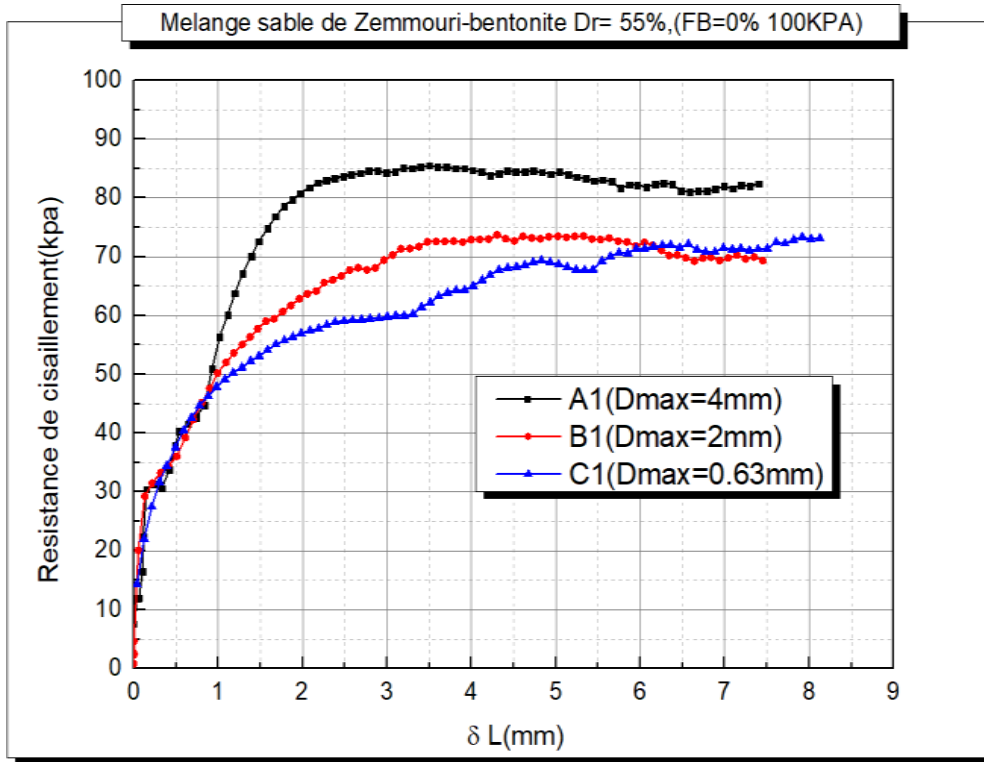
**Tableau IV.1 : la résistance au cisaillement maximale ( $0.63\text{mm} \leq D_{max} \leq 4\text{mm}$  ;  $D_{min}=0.08\text{mm}, \sigma_n = 100\text{KPa}, D_r=55\%$ ).**

Dmin (mm)	Dmax (mm)	Tmax (kPa)				
		0 %	5 %	10 %	15 %	20 %
0,08 mm	4	85.51	69.45	73.06	72.09	75.29
	2	73.69	67.74	68.63	65.65	70.54
	0,63	72.09	66.99	66.28	65.91	70.23

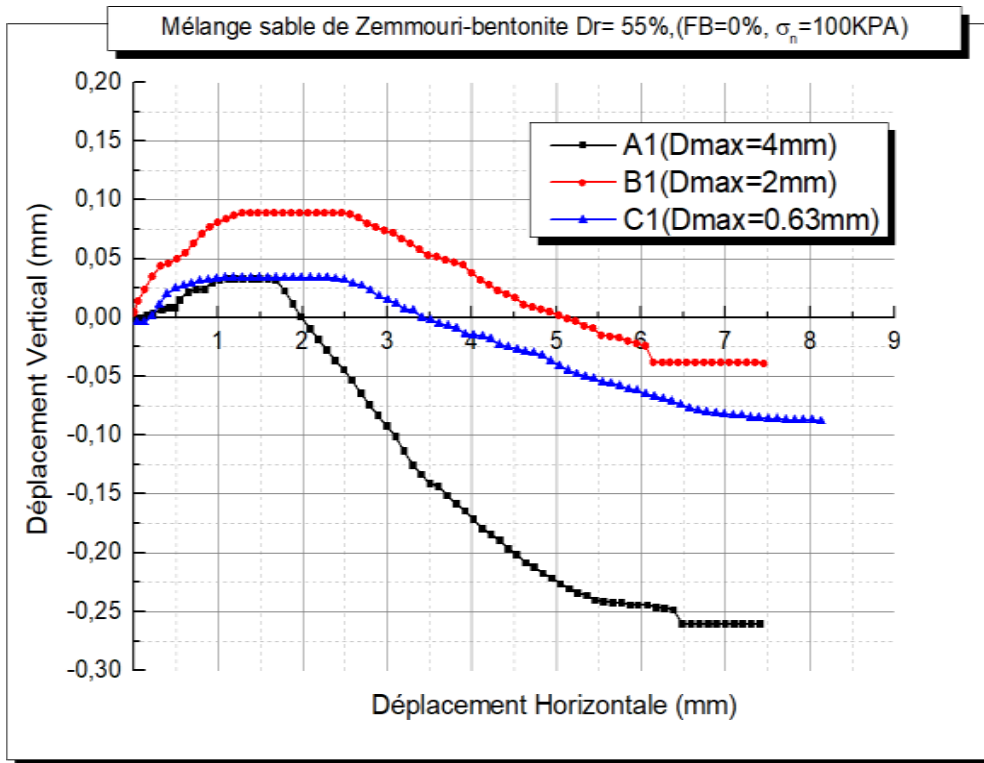
Pour les trois diamètres maximaux : ( $D_{max}=4\text{mm}$ ) de la classe "A", ( $D_{max}=2\text{mm}$ ) de la classe "B" et ( $D_{max}=0.63\text{mm}$ ) de la classe "C", leurs effets sur l'augmentation de la résistance au cisaillement est clairement observés, cette augmentation est due au rôle de diamètre maximal qui augmente l'enchevêtrement entre les grains favorisant un comportement plus dilatant conduisant à une augmentation de la résistance au cisaillement avec une structure plus stable.

Les figures (IV.1b, IV.2b, IV.3b,4.IVb et IV.5b) illustrent l'évolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal en considérant l'effet du diamètre maximal pour la même teneur en fine. Les résultats obtenus confirment le rôle du diamètre maximal dans la diminution de la phase de contractance avec l'augmentation de  $D_{max}$  (4mm, 2mm et 0.63mm).



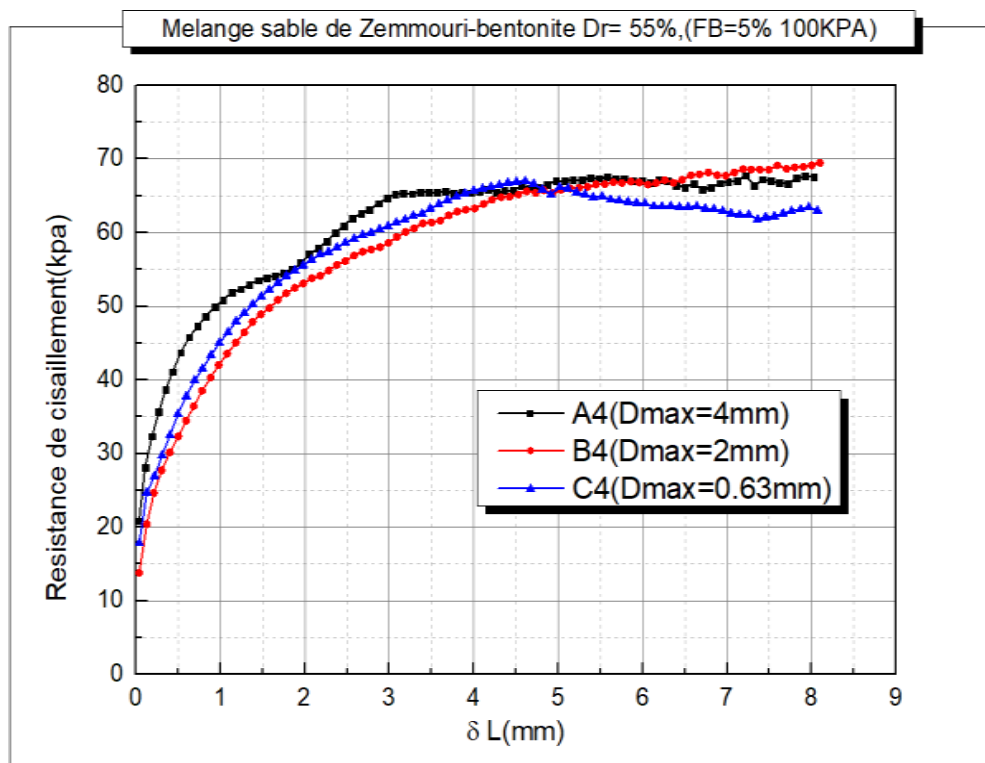


(a)

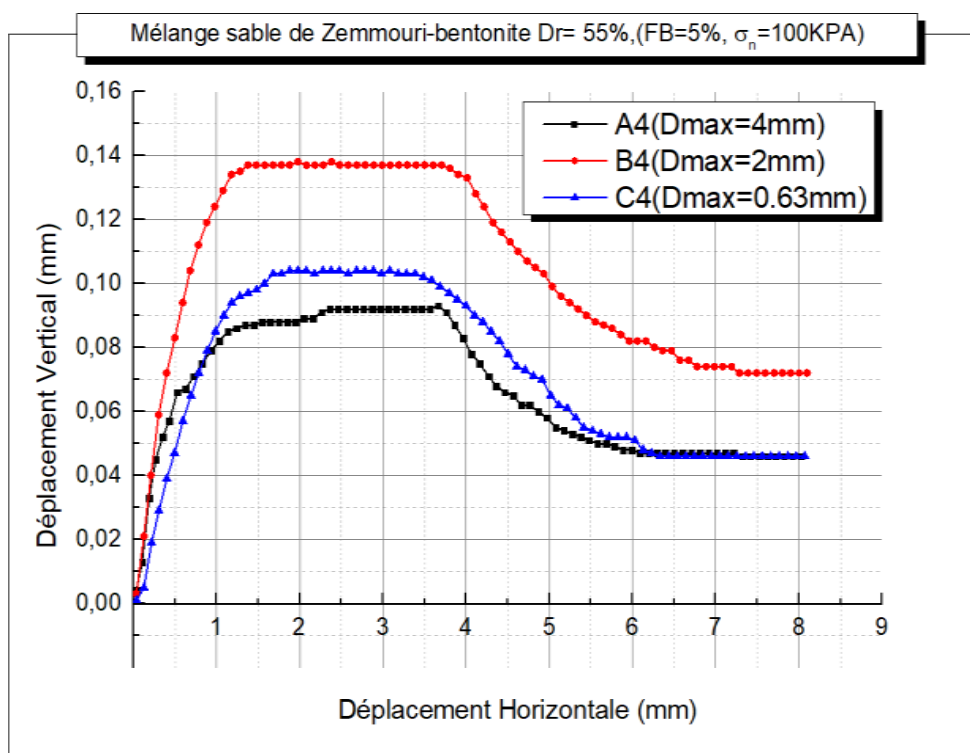


(b)

Figure IV.1 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable de Zemmouri-bentonite ( $D_{min} = 0.08$  mm,  $\sigma_n = 100$  kPa,  $D_r = 55\%$ , FB=0%)  
 (a) - Evolution de contrainte de cisaillement  
 (b) - Evolution de déplacement vertical



(a)

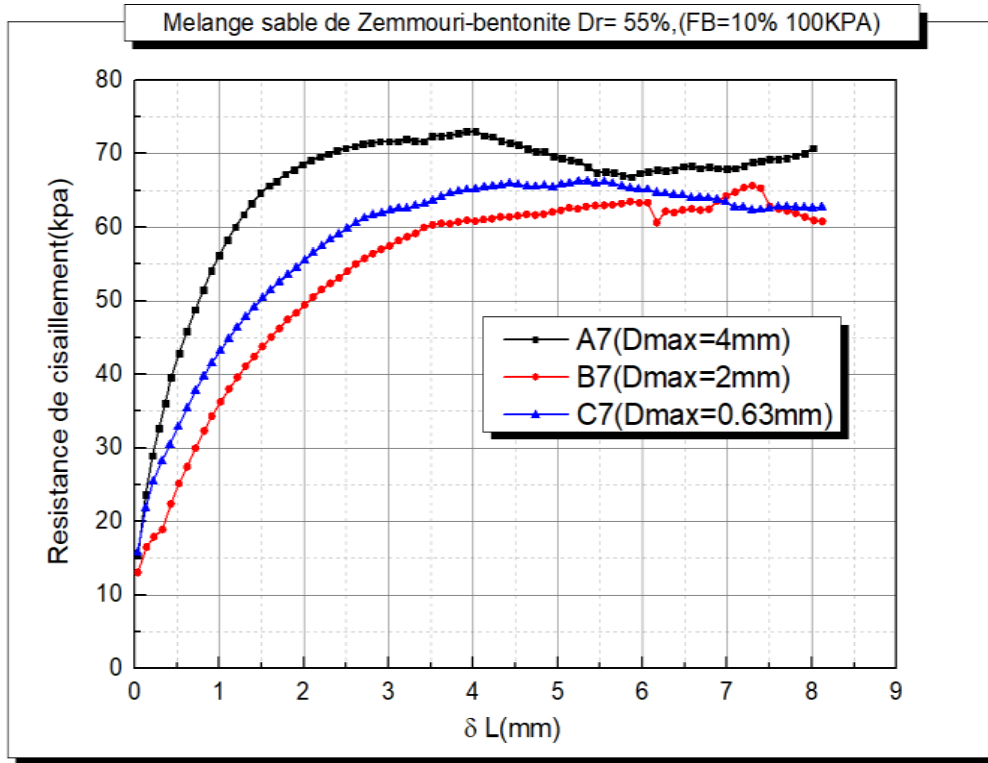


(b)

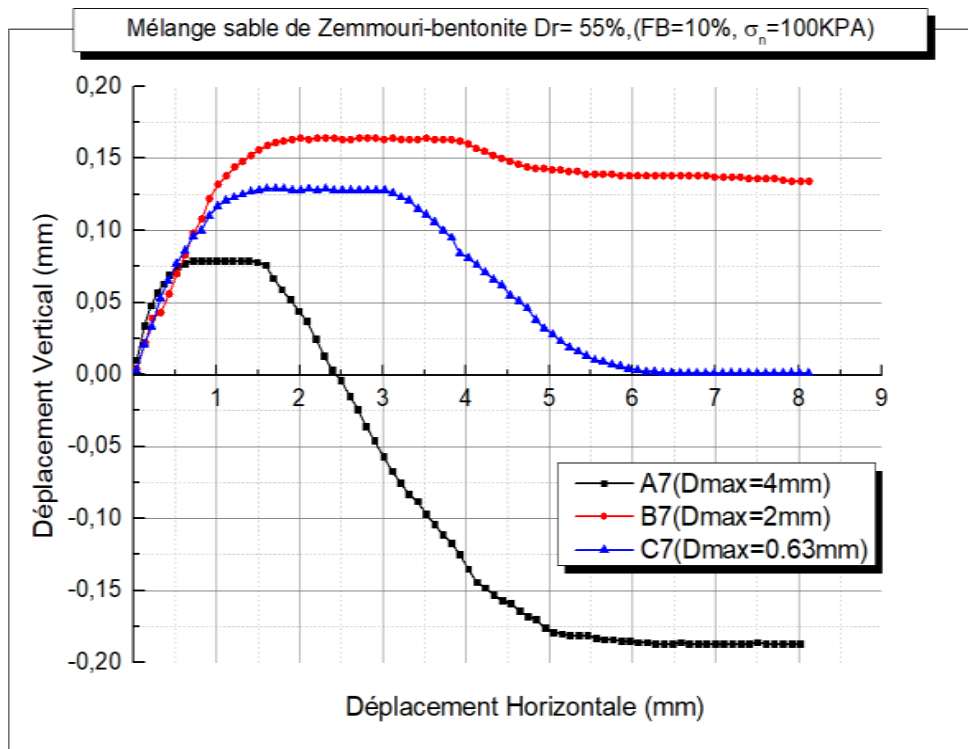
Figure IV.2 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ , FB=5%)

(a)- Evolution de contrainte de cisaillement,

(b)- Evolution déplacement vertical



(a)

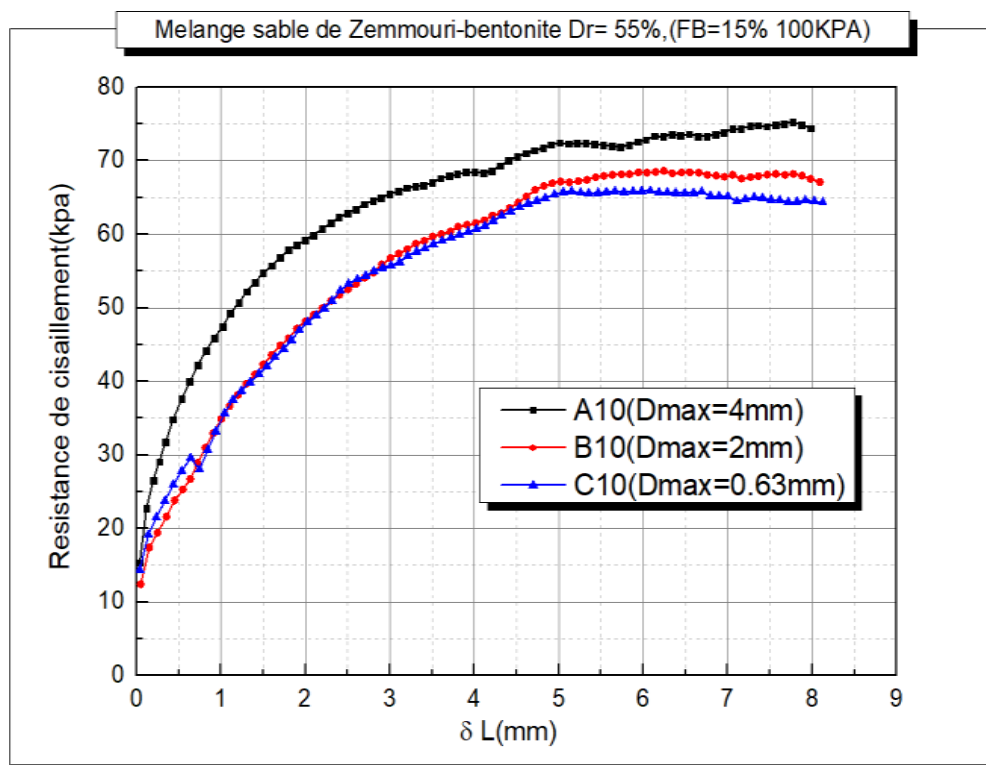


(b)

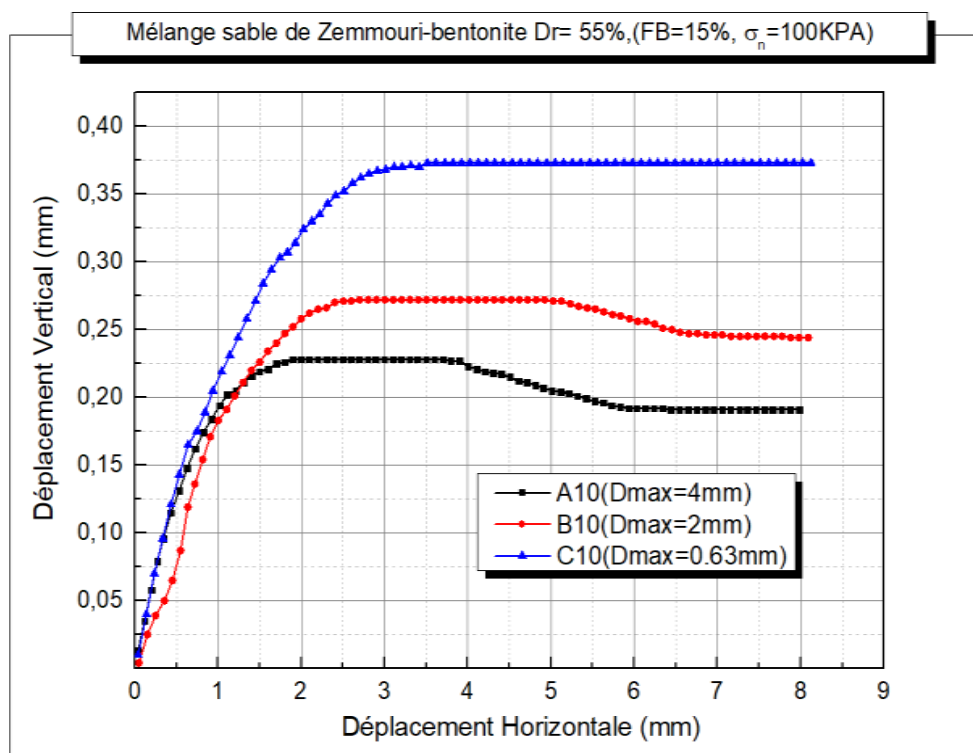
Figure IV.3 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ , FB=10%)

(a)- Evolution de contrainte de cisailment

(b)- Evolution déplacement vertical



(a)

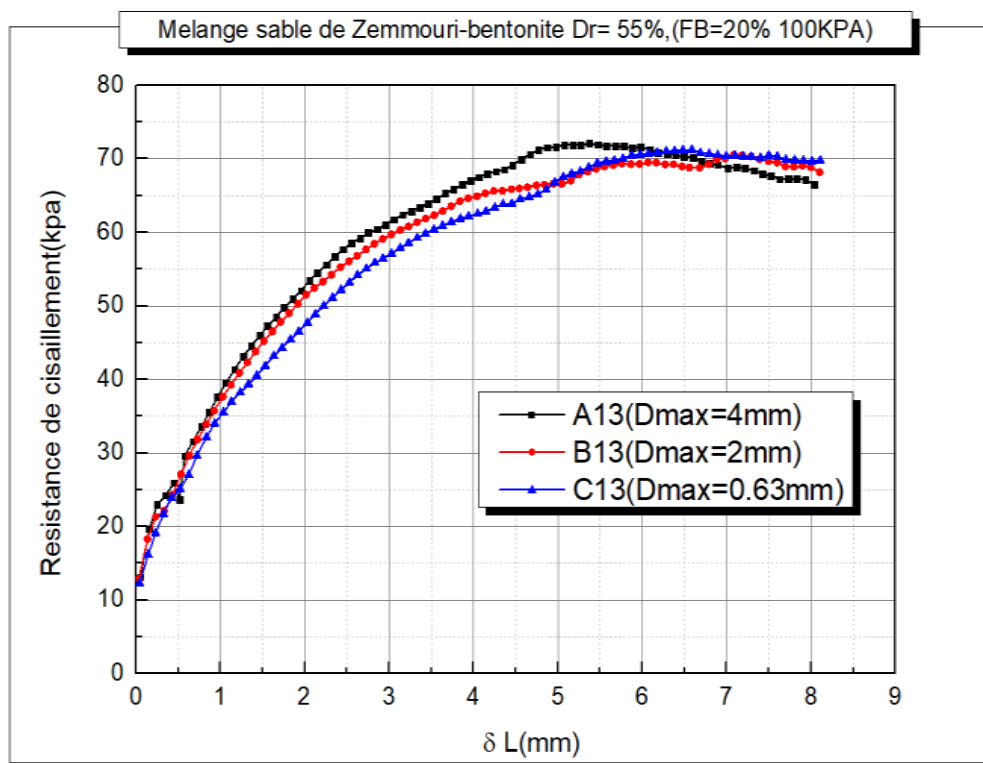


(b)

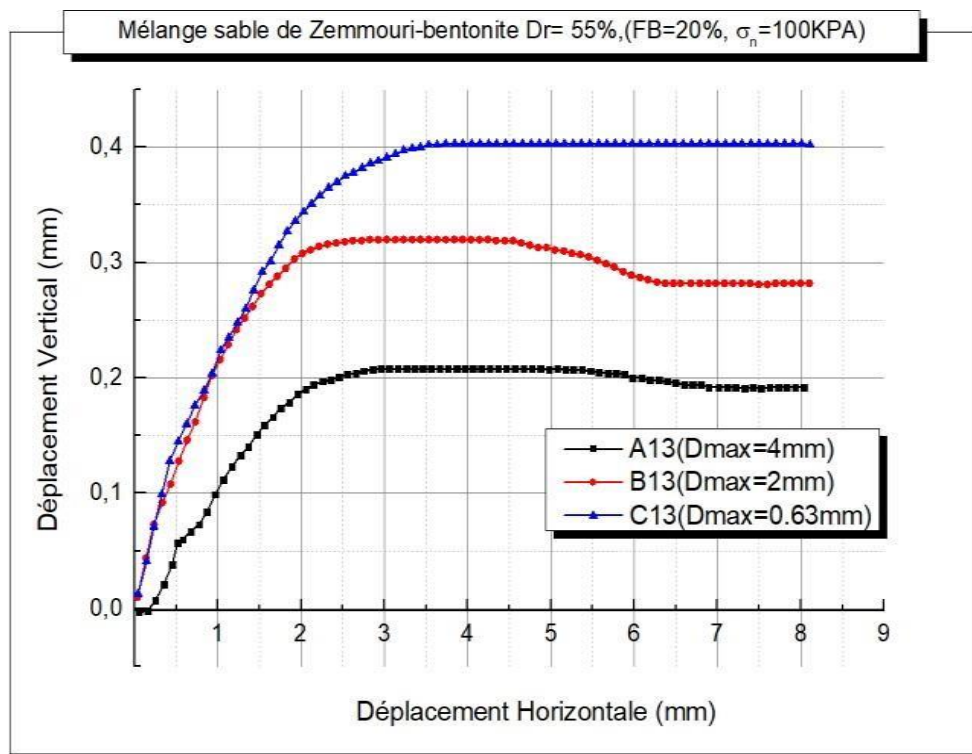
Figure IV.4 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ ,  $FB = 15\%$ )

(a) - Evolution de contrainte de cisaillement

(b) - Evolution de déplacement vertical



(a)



(b)

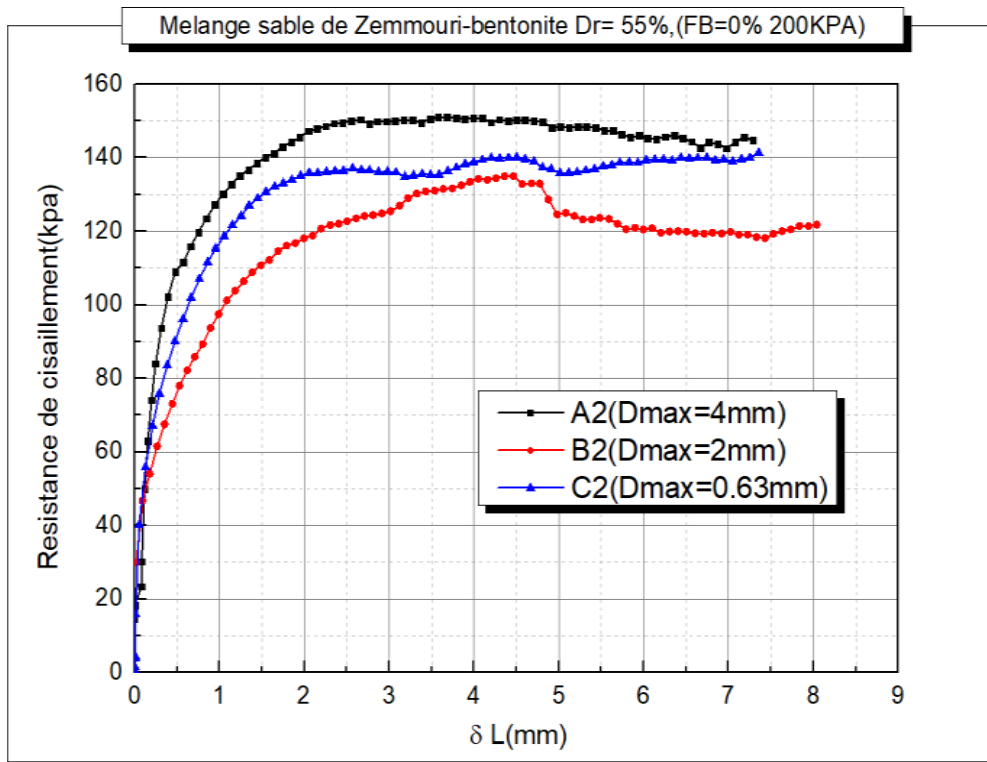
Figure IV.5 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécaniques mélanges sable de Zemmouri-bentonite ( $D_{min} = 0.08$  mm,  $\sigma_n = 100$  kPa,  $D_r = 55\%$ , FB=20%)

**IV.2.1.2. Contrainte normale,  $\sigma_n= 200$  kPa**

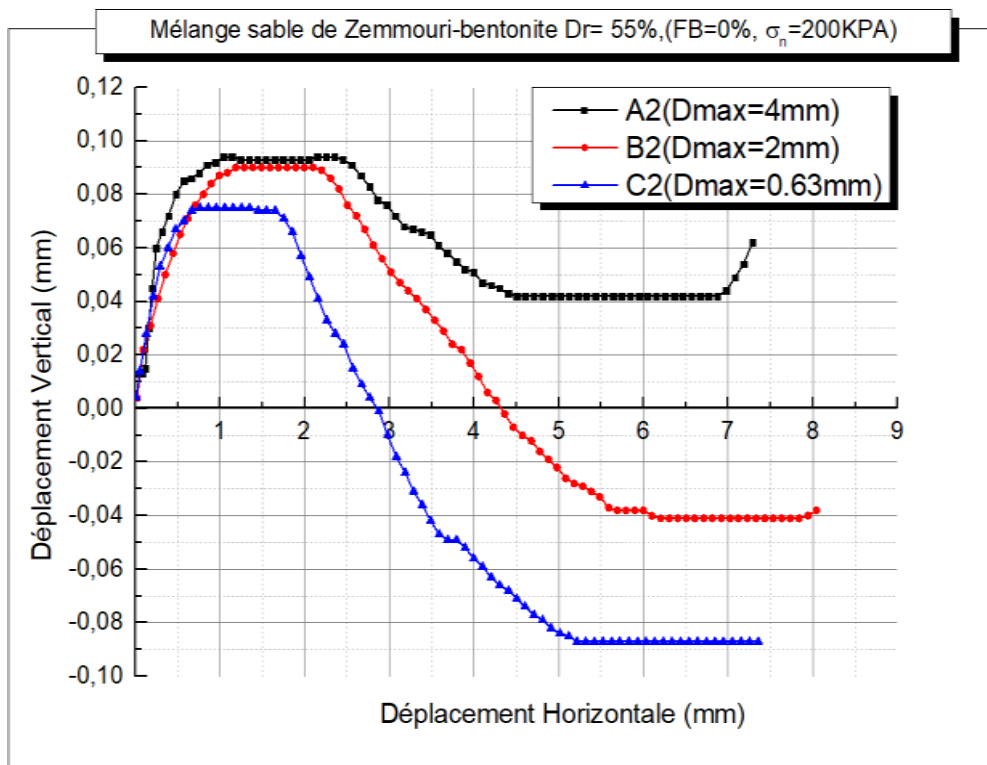
Dans le but d'évaluer l'impact de diamètre maximal ( $D_{max}=4mm$ , 2mm et 0.63mm) avec le même diamètre minimal  $D_{min}=0.08mm$  sur la réponse mécanique des mélanges de sable de Zemmouri-bentonite (FB=0%, FB=5%, FB=10%, FB=15% et FB=20%), ces matériaux ont été reconstitué en laboratoire avec la pulviation à sec et soumis à une contrainte normale  $\sigma_n=200kpa$ , avec une densité relative initiale  $Dr=55\%$ .

D'après les figures (IV.6 ,IV.7,IV.8,IV.9,IV.10) on constate en générale que les échantillons de la classe "A" ayant un ( $D_{max}=4mm$ ) sont les plus résistants puis les échantillons de la classe B et les moins résistants c'est ceux de la classe C pour 0%, 10% e et 15%. A 5% au régime permanent, le comportement est similaire. Mais à 20% de la teneur en bentonite la tendance inverse est observée : ( $\tau_{max} = 151.05$  kPa, 135 .01 kPa, 140.36 kPa,) pour FB=0% et respectivement et ( $\tau_{max}=131.40$  kPa,129.19 kPa,123.58 kPa) pour FB=10%. A 15% la réponse est presque la même. Puis à 20% la réponse s'inverse totalement pour que la classe C ( $D_{max}=0.63mm$ ) devienne la plus résistante suivie de la classe A et B. ce qui indique que tous les vides sont remplis pour rendre le sol plus résistant et plus stable.

Les figures (IV.11b, IV.12b, IV.13b, IV.14b et IV.15b) illustrent l'évolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal, en considérant l'effet du diamètre maximal. Les résultats obtenus confirment le rôle de diamètre maximal et montrent que la phase de contractance augment avec la diminution de  $D_{max}$  (4mm, 2mm et 0.63mm) jusqu'à 15% de FB puis la tendance inverse (dilatance) est remarquée.



(a)

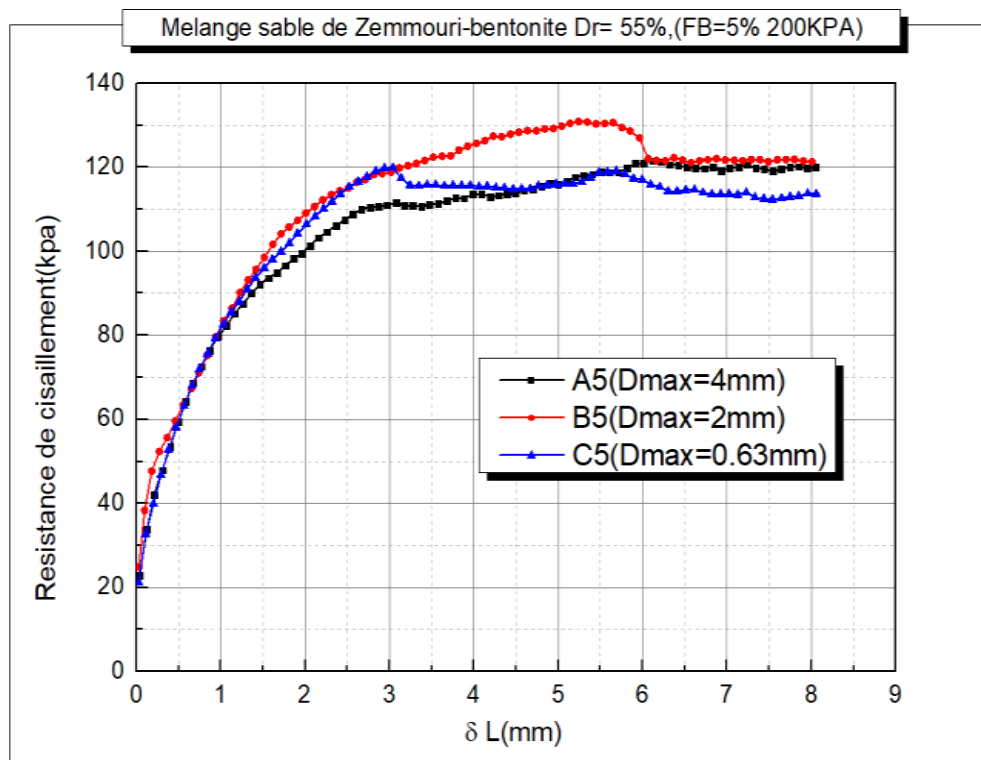


(b)

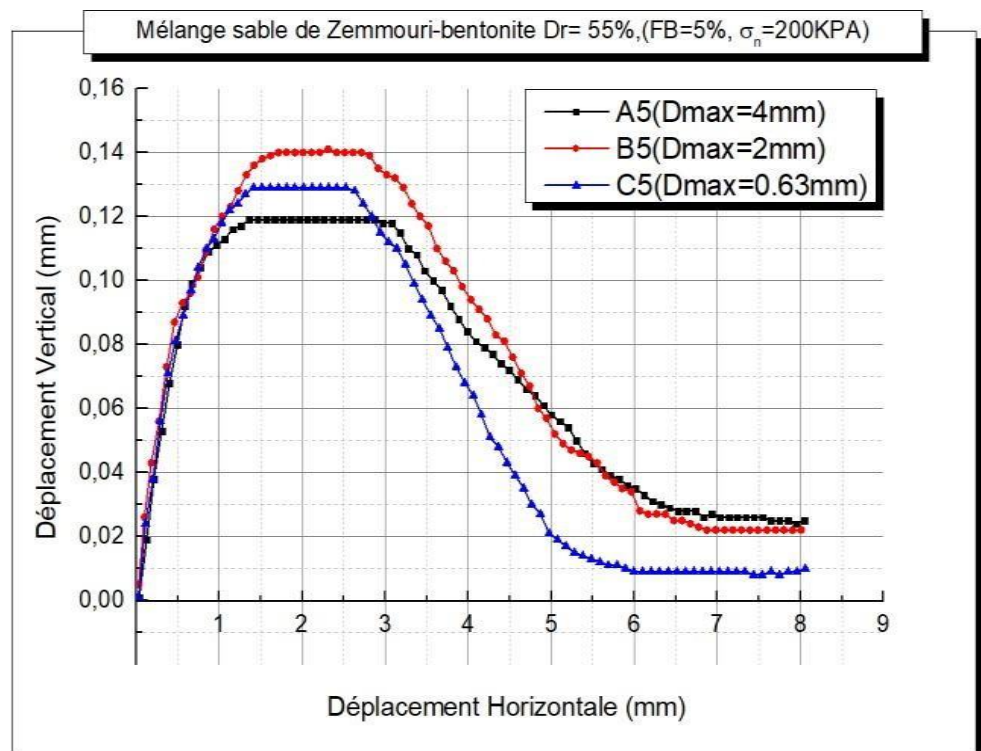
**Figure IV.6 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$  mm,  $\sigma_n = 200$  kPa,  $D_r = 55\%$ , FB=0%)**

(a) - Evolution de contrainte de cisailment

(b) - Evolution de déplacement vertical



(a)



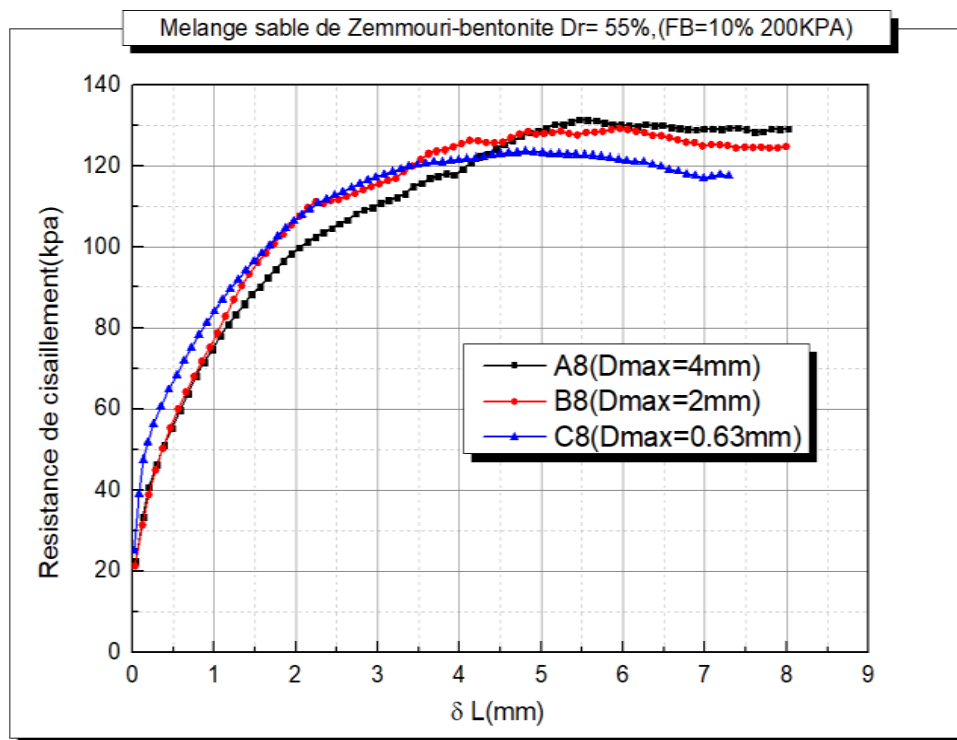
(b)

Figure IV.7 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$  mm,  $\sigma_n = 200$  kPa,  $D_r = 55\%$ , FB=5%)

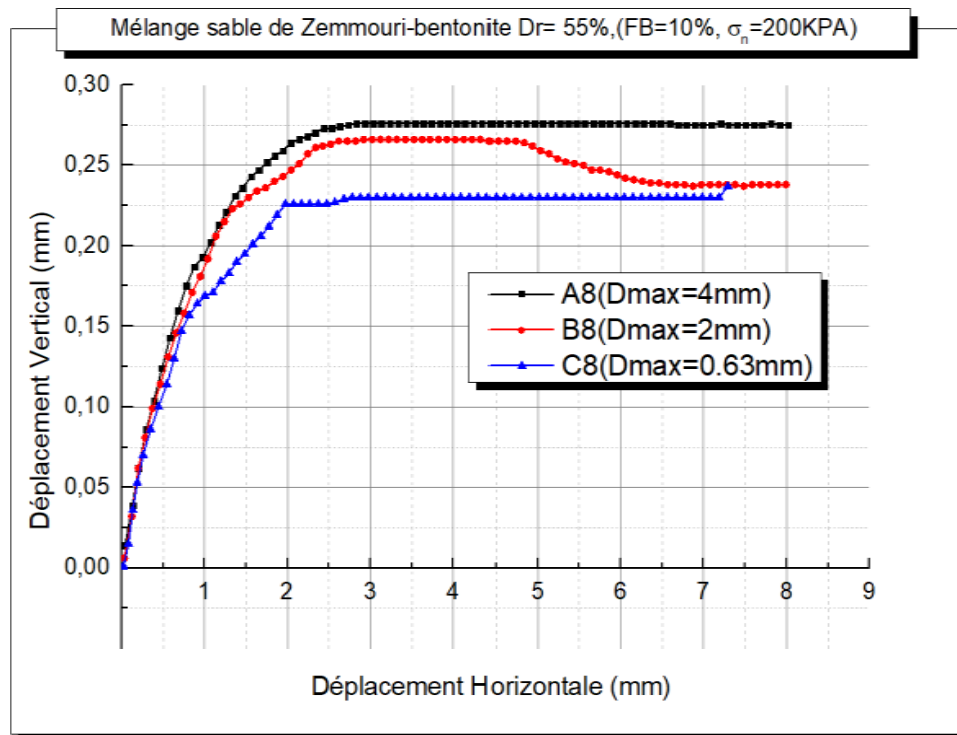
(a) - Evolution de contrainte de cisaillement

(b) - Evolution de déplacement vertical





(a)

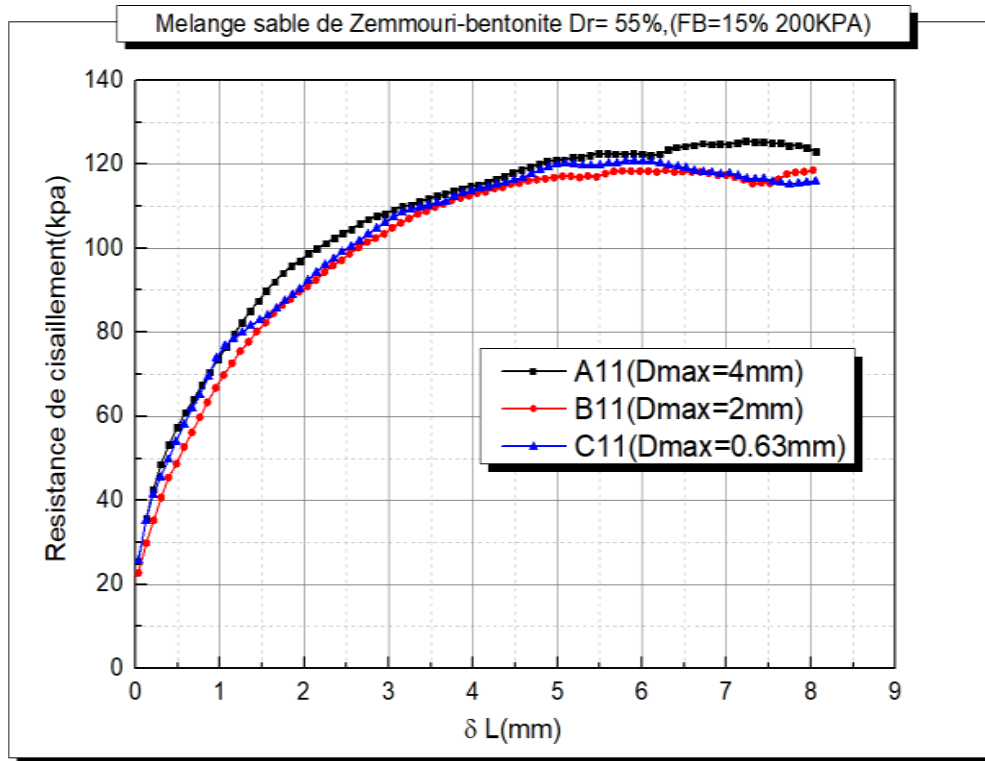


(b)

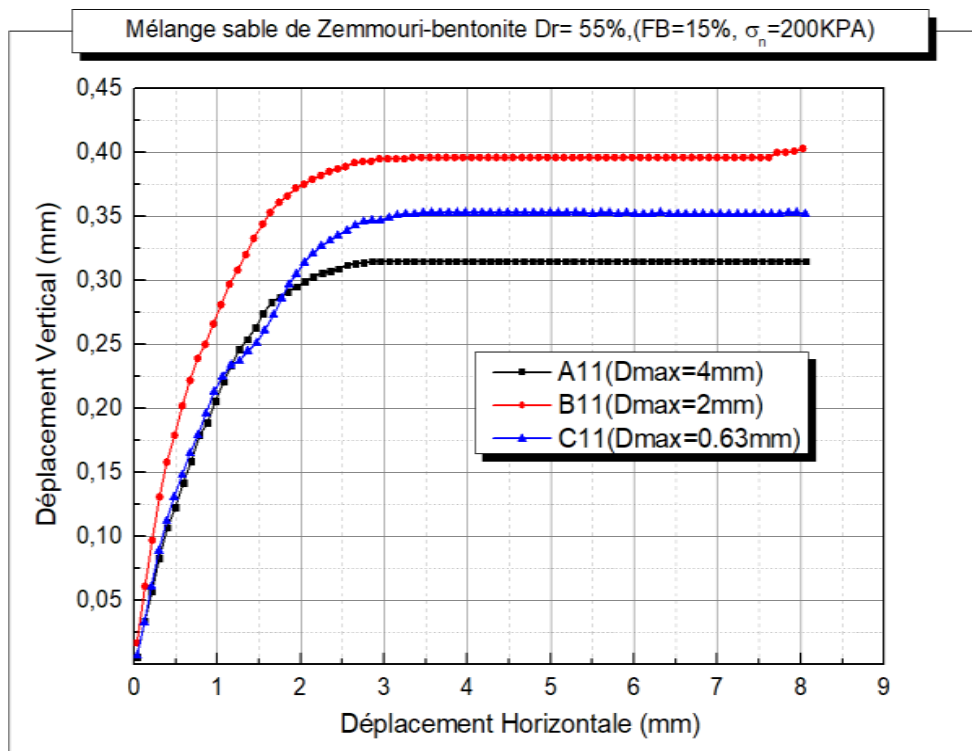
Figure IV.8 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$  mm,  $\sigma_n = 200$  kPa,  $D_r = 55\%$ , FB=10%)

(a) - Evolution de contrainte de cisaillement

(b) - Evolution de déplacement vertical



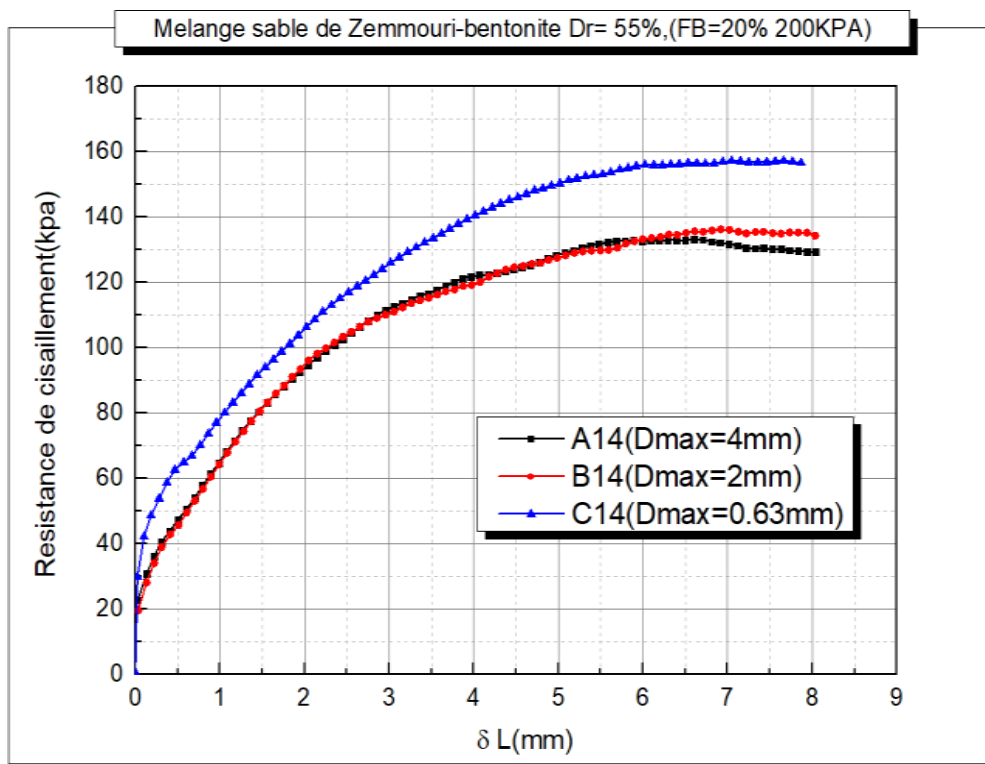
(a)



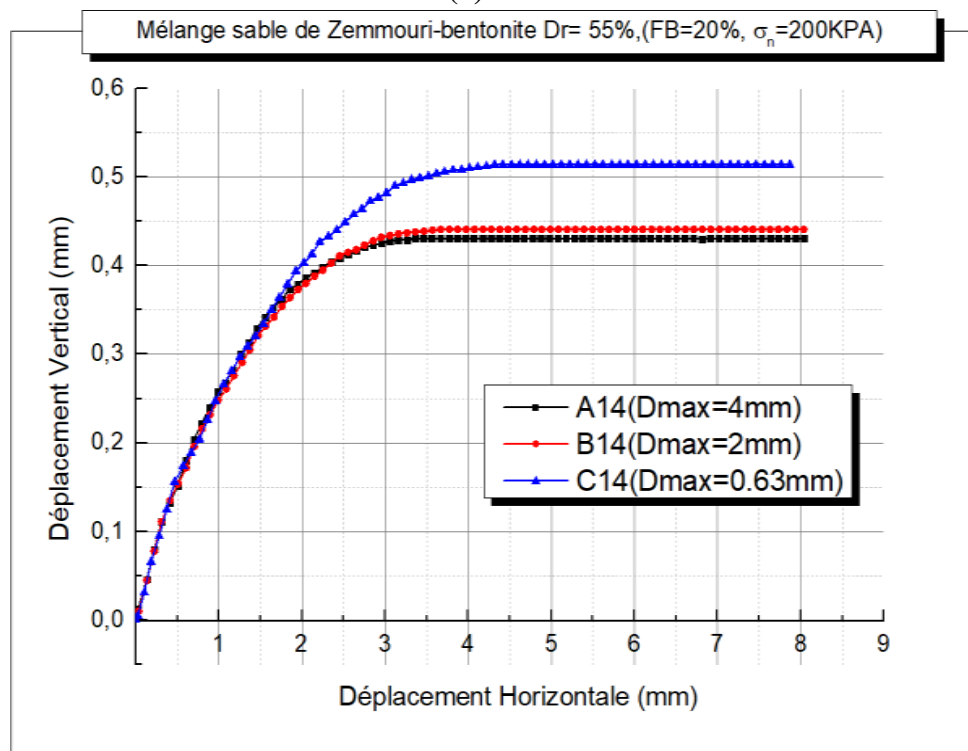
(b)

Figure IV.9 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ , FB=15%)

(a) - Evolution de contrainte de cisaillement (b) - Evolution de déplacement vertical



(a)



(b)

Figure IV.10 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécaniques mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ , FB=20%)

**IV.2.1.3. Contrainte normale,  $\sigma_n = 300$  kPa**

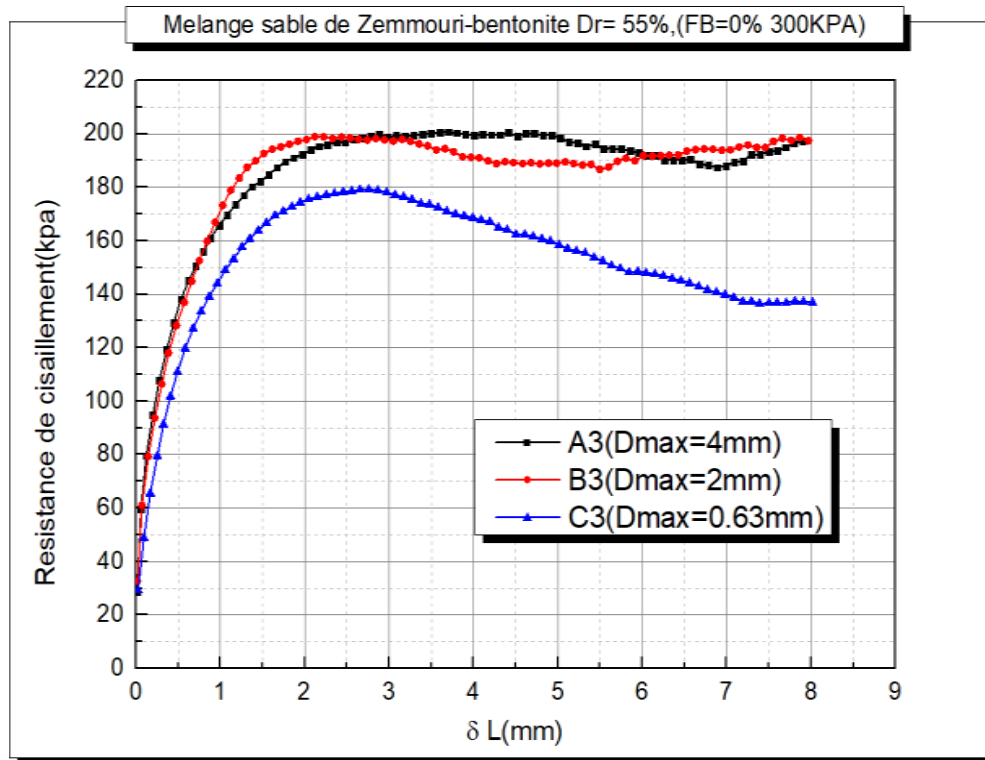
Les figures (IV.11, IV.12, IV.13, IV.14, IV.15) présentent la réponse mécanique des échantillons de sable de Zemmouri ayant différents diamètres maximaux ( $D_{max}=4$ mm,  $D_{max}=2$ mm,  $D_{max}=0,63$ mm) et un diamètre minimal ( $D_{min}=0,08$ mm) a une densité relative ( $D_r=55\%$ ) et soumis à une contrainte normale ( $\sigma_n=300$ Kpa).

Donc sous une contrainte normale de 300 kPa, les résultats obtenus montrent clairement que l'augmentation de diamètre maximal ( $D_{max}=4$ mm,  $D_{max}=2$ mm,  $D_{max}=0,63$ mm) pour les trois classes granulaires, induit une augmentation de la résistance au cisaillement.

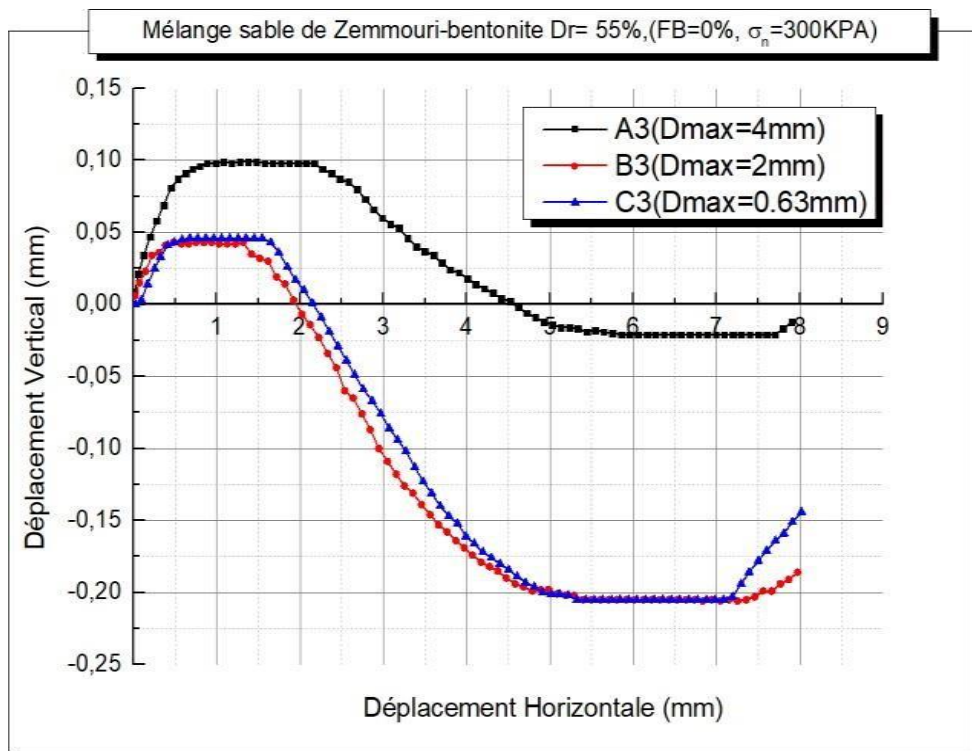
**Tableau IV.2 : la résistance au cisaillement maximale ( $0.63\text{mm} \leq D_{max} \leq 4\text{mm}$  ;  $D_{min}=0.08\text{mm}, \sigma_n = 300\text{KPa}, D_r=55\%$ ).**

<b>Dmin (mm)</b>	<b>Dmax (mm)</b>	<b><math>\tau_{max}</math> (kPa)</b>				
		0 %	5 %	10 %	15 %	20 %
<b>0,08 Mm</b>	4	200.70	195.0808	206.05	173.09	239.53
	2	198 .01	194 .83	191.17	190.67	199 .61
	0,63	179	160	181	177.88	191.19

Les figures (IV.6b, IV.7b, IV.8b, IV.9b et IV.10b) illustrent l'évolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal, en considérant, l'effet du diamètre maximal. Les résultats obtenus confirment le rôle du diamètre maximal dans l'augmentation de la phase de dilatance et la diminution de celle de contractance.



(a)

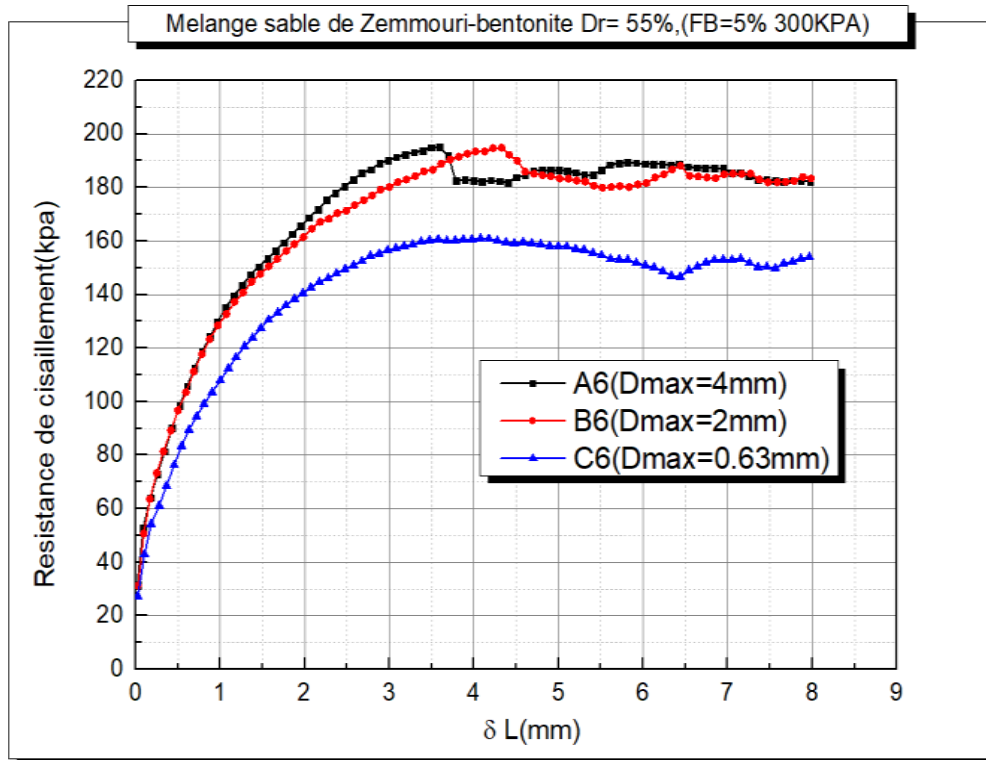


(b)

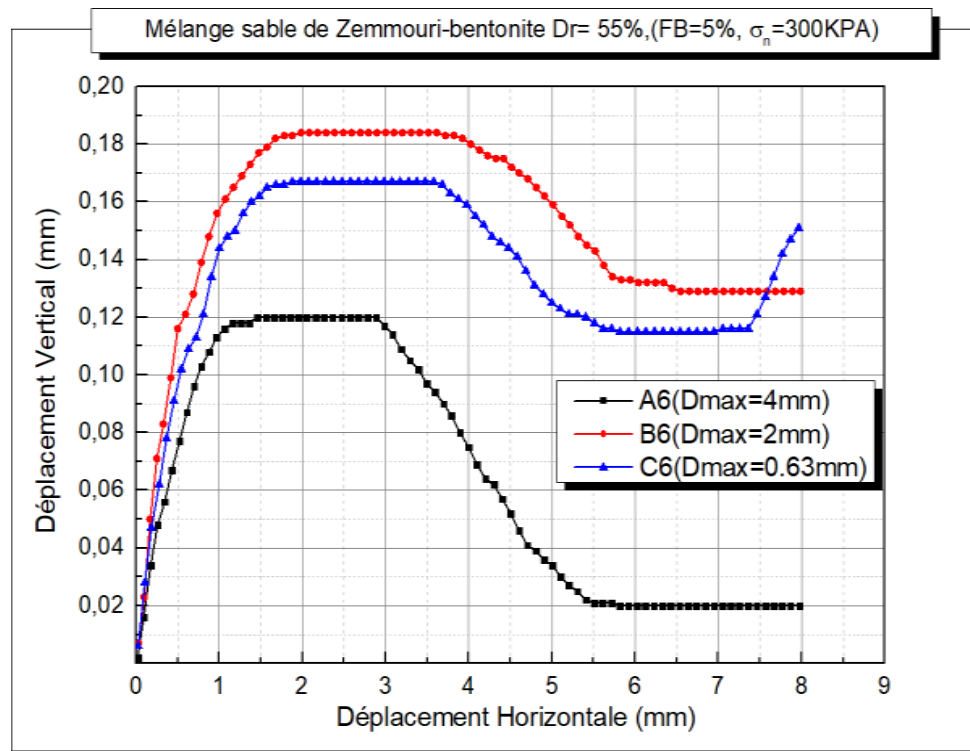
Figure IV.11 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$  mm,  $\sigma_n = 300$  kPa,  $D_r = 55\%$ , FB=0%)

(a) - Evolution de contrainte de cisaillement

(b) - Evolution de déplacement vertical



(a)

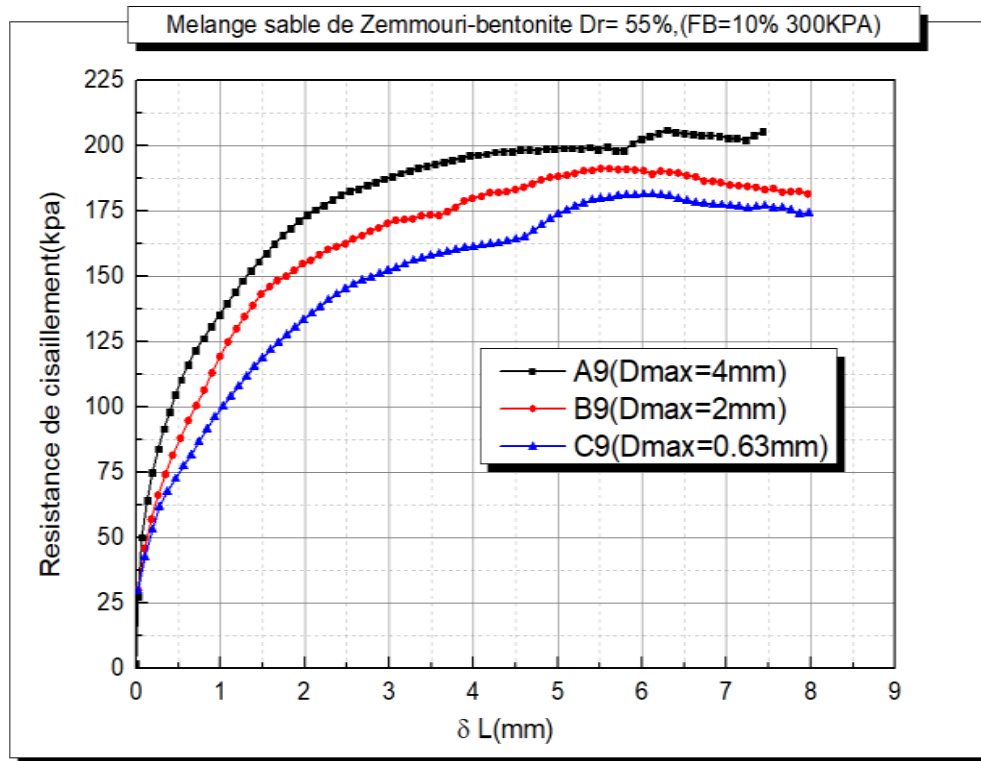


(b)

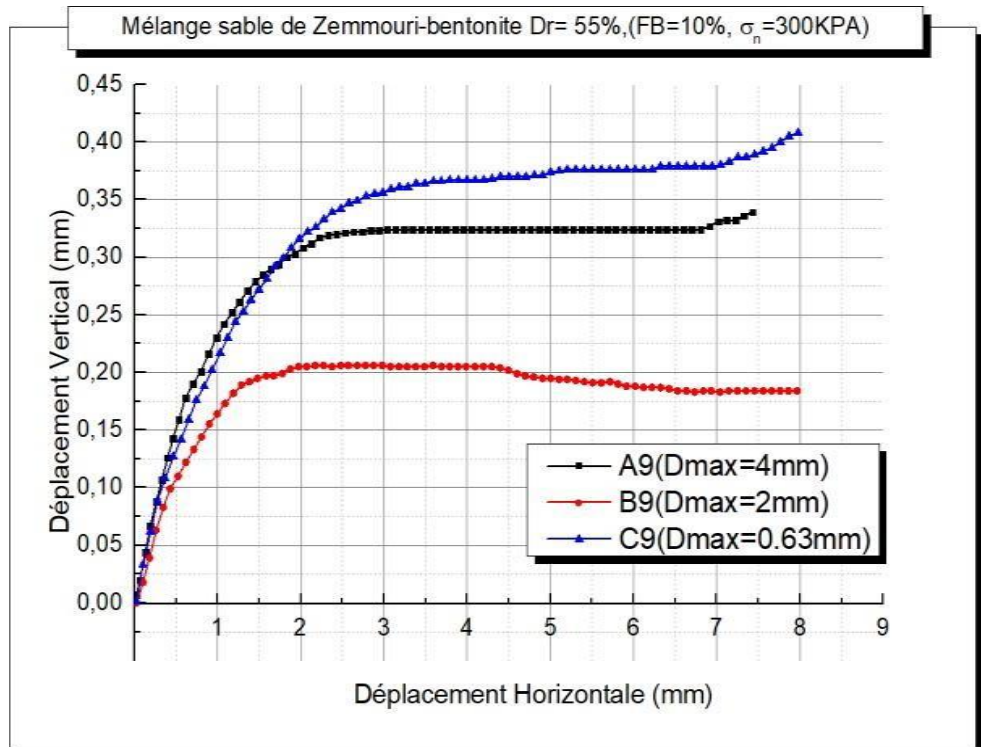
Figure IV.12 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n = 300 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 55\%$ ,  $FB = 5\%$ )

(a) - Evolution de contrainte de cisaillement

(b) - Evolution de déplacement vertical



(a)

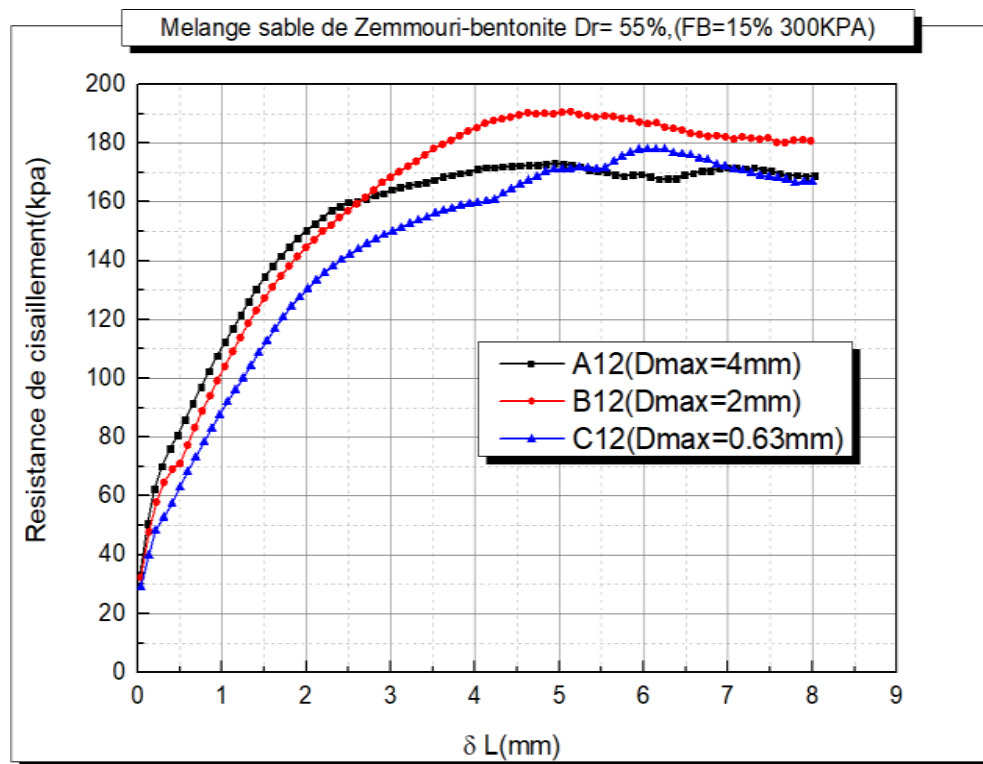


(b)

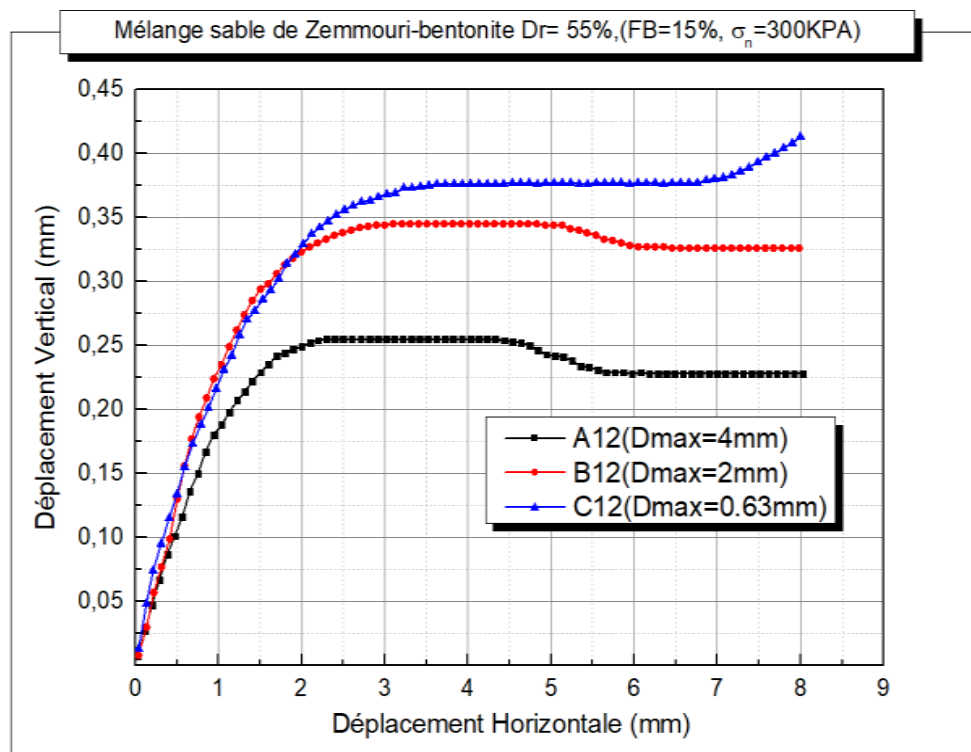
Figure IV.13 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$  mm,  $\sigma_n = 300$  kPa,  $D_r = 55\%$ , FB=10%)

(a) - Evolution de contrainte de cisaillement

(b) -déplacement vertical



(a)

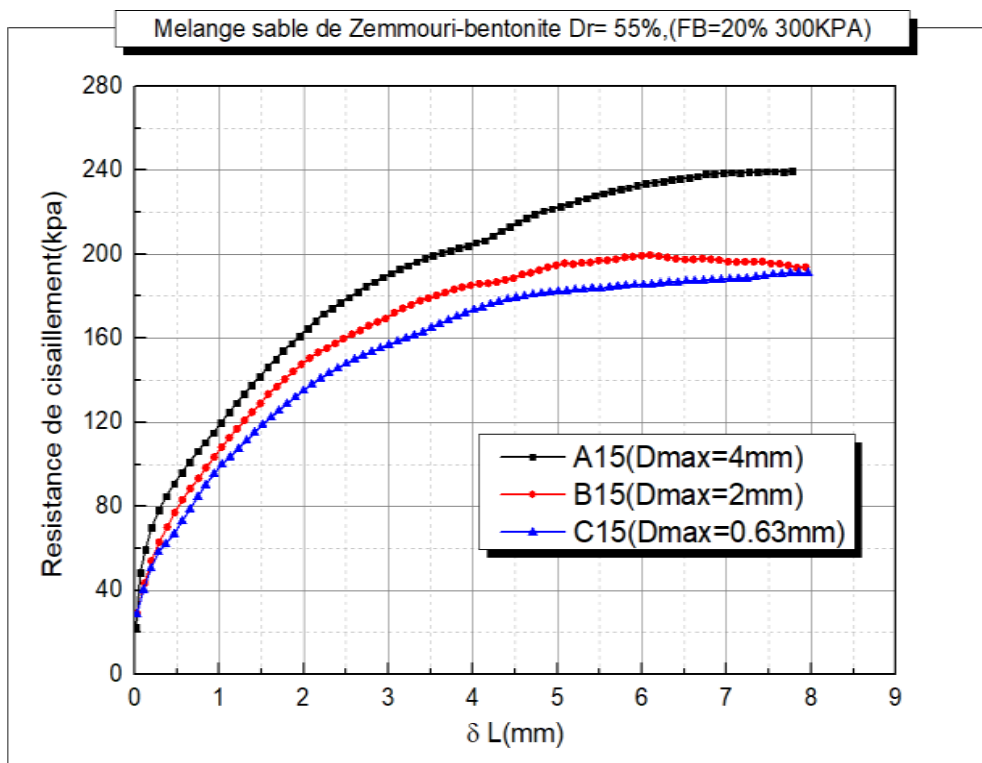


(b)

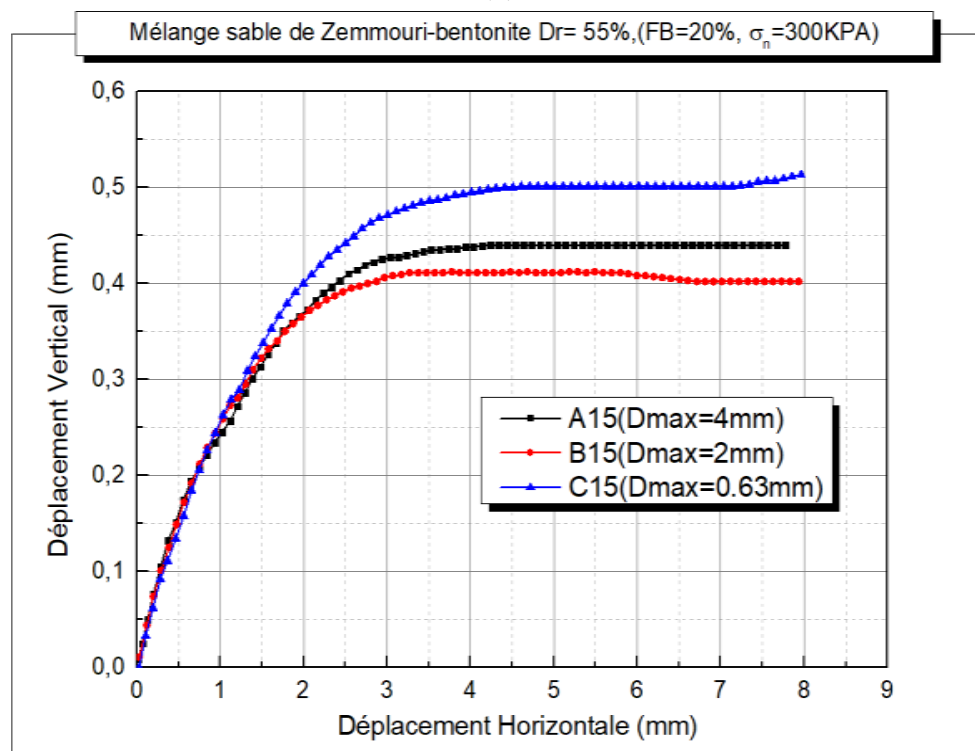
Figure IV.14 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\sigma_n=300 \text{ kPa}$ ,  $D_r=55\%$ , FB=15%)

(a) - Evolution de contrainte de cisaillement  
 (b)-déplacement vertical





(a)



(b)

Figure IV.15 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ( $D_{min} = 0.08$  mm,  $\sigma_n = 300$  kPa,  $D_r = 55\%$ , FB=20%)

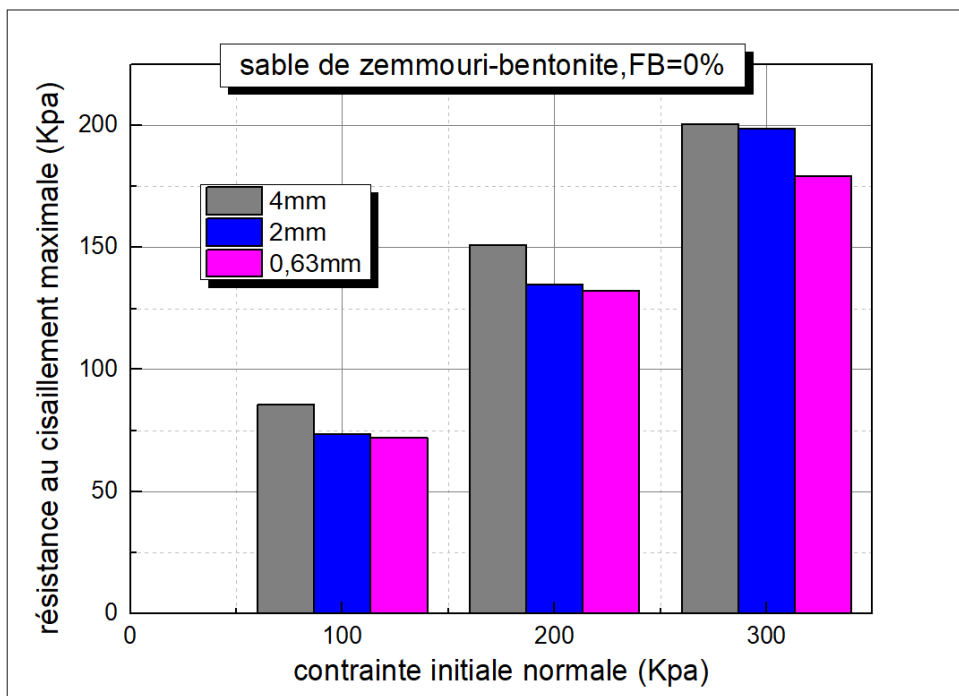
(a) - Evolution de contrainte de cisailment

(b)-déplacement vertical

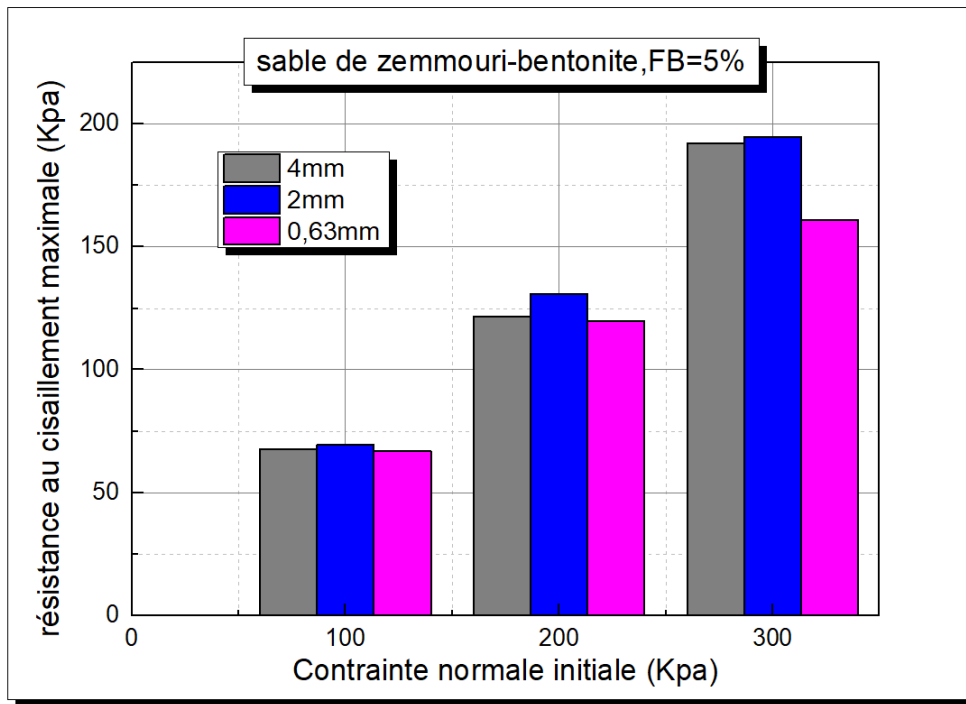
IV.3. Effet de la taille des grains sur la résistance au cisaillement maximale

IV.3.1. Effet de diamètre maximal (Dmax)

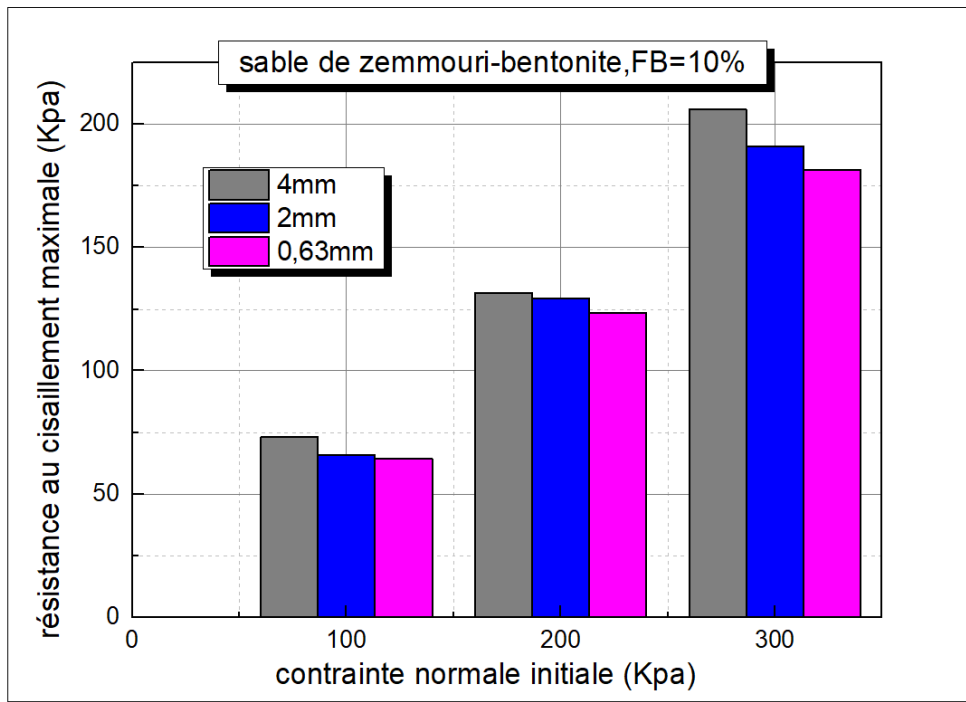
Les résultats obtenus dans la présente étude sont représentés sur la figure (IV.16) afin d'analyser l'influence du paramètre granulométrique en termes de diamètre maximal sur la résistance maximale au cisaillement des mélanges sable-bentonite. Les fractions des fines varient de (FB=0% à FB = 20%), avec une densité relative initiale moyenne ( $D_r=55%$ ) et soumis sous trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n= 100, 200$  et  $300$  kPa). Les échantillons de sable ont été reconstitués au laboratoire en trois classes granulaires différentes, ayant des diamètres maximaux  $D_{max}$  variant de (0.63 mm a 4.0 mm) et le même diamètre minimal ( $D_{min}=0.08$  mm). A partir de cette figure, Nous remarquons que la résistance au cisaillement maximale augmente légèrement avec l'augmentation du diamètre maximal ( $D_{max}=0.63$  mm, 2.0 mm, 4.0 mm) pour toutes les fractions du bentonite et contraintes normales initiales à l'étude. Cette réponse de l'augmentation légère de résistance au cisaillement maximale est due à la présence de la fraction des grains entre  $D_{max} =0.63$  mm à  $D_{min}=0.08$  mm dans toutes les classes du groupe 1 ( $A_i, B_i$  et  $C_i$ ) a joué un rôle pour diminuer la résistance au cisaillement qui induit une résistance au cisaillement presque similaire pour toutes les classes de ce groupe. Cependant, on remarque aussi que la résistance au cisaillement maximale augmente d'une façon remarquable avec l'augmentation de la contrainte normale initiale pour les mélanges bentonite considérés.



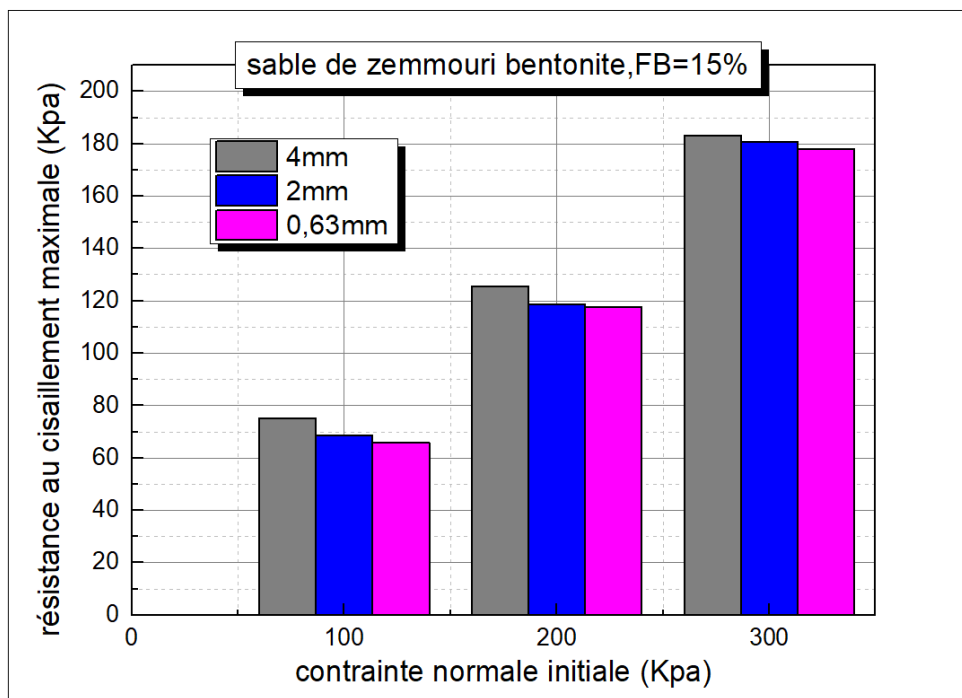
(a)



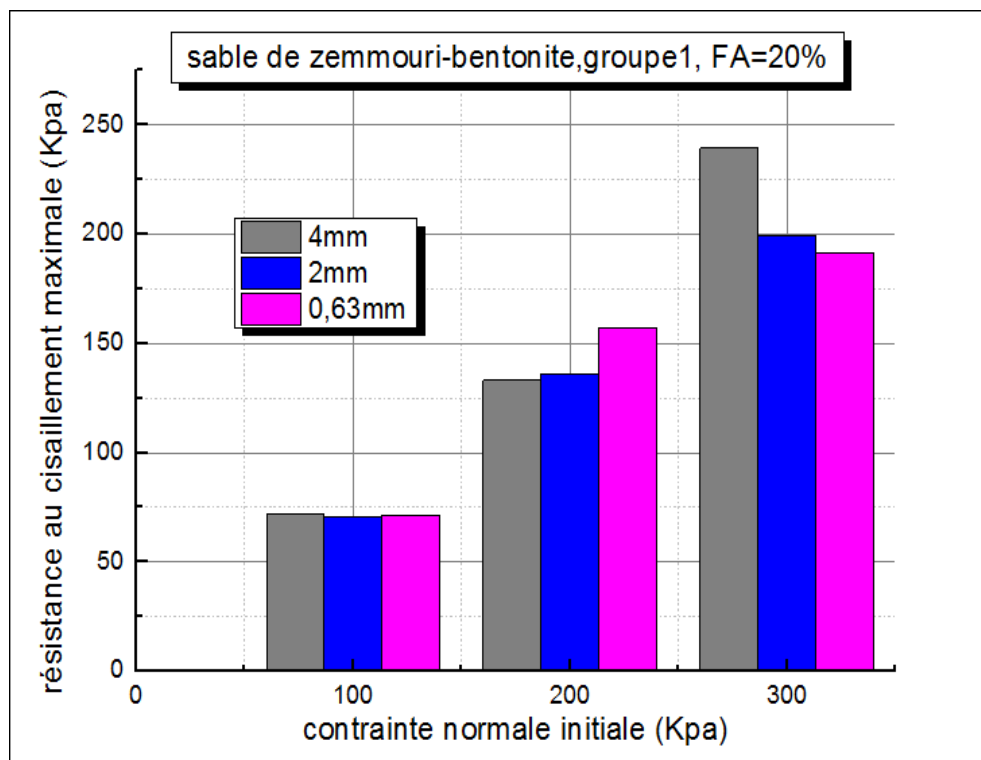
(b)



(c)



(d)

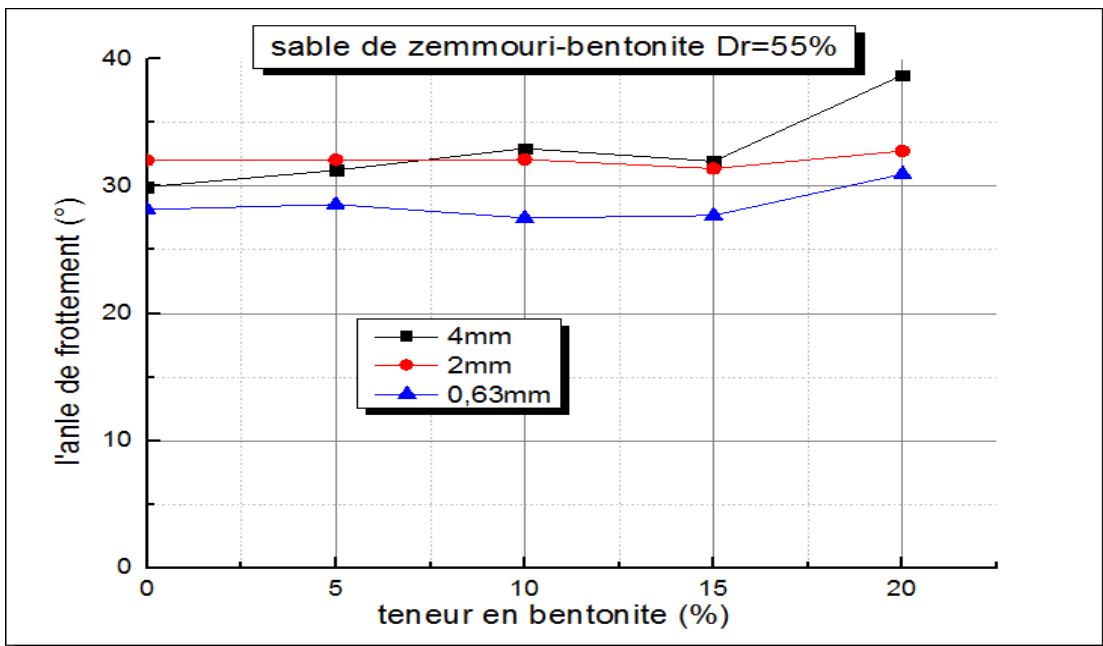


(e)

Figure IV.16 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte initiale ( $0,63 \leq D_{max} \leq 4mm$ ), ( $D_{min} = 0,08mm$ ) (a)-FB=0%, (b)-FB=5%, (c)-FB=10%, (d)-FB=15%, (e)-FB=20%

**IV.3.2 Effet de la taille des grains sur l'angle de frottement**

Dans le but d'étudier l'influence de la granulométrie en termes de diamètre maximal ( $D_{max}=4mm, 2mm$  et  $0.63mm$ ) sur l'angle de frottement ( $\phi$ ) des mélanges de sable de Zemmouri-bentonite, une série des essais de cisaillement direct à la boîte a été effectuée sur des échantillons des sols reconstitués au laboratoire avec la pluviométrie à sec, pour une densité relative initiale moyenne ( $Dr=55\%$ ). Ces mélanges ont été soumis à trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n= 100, 200$  et  $300$  kPa). la figure (4.17) montre une augmentation de l'angle de frottement avec l'augmentation des diamètres maximaux ( $D_{max}$ ) et ces résultats montrent clairement que les angles de frottement pour les échantillons du mélange sable de Zemmouri-bentonite reconstitués au laboratoire avec une fraction de bentonite  $FB=20\%$  indiquent des valeurs des angles de frottement plus élevées, par rapport aux échantillons préparés par les teneurs en bentonite plus faibles ( $FB=0\%, 5\%, 10\%$  et  $15\%$ )



**Figure IV .17 : Angle de frottement en fonction des diamètres extrêmes ( $D_{max}$ ,) des classes "A", "B" et "C"**

#### **IV.4 Conclusion :**

Ce chapitre présente une étude approfondie sur l'effet de la granulométrie en termes de diamètre extrême ( $D_{max}$ ) sur le comportement mécanique des échantillons des mélanges sable-bentonite. Les fines sont introduites à des pourcentages variant de ( $FB=0\%$  à  $20\%$ ) reconstitués par la pluviométrie à sec avec une densité relative initiale moyenne ( $D_r=55\%$ ) et soumis à trois contraintes normales ( $\sigma_n= 100, 200$  et  $300$  kPa). Les échantillons ont été préparés au laboratoire avec un seul diamètre minimal ( $D_{min}=0.08$  mm) et différents diamètres maximaux ( $0.63 \text{ mm} \leq D_{max} \leq 4.0$  mm).

Les résultats obtenus montrent clairement que l'augmentation du diamètre maximal ( $D_{max}=0.63$  mm,  $2.0$  mm,  $4.0$  mm) induit une augmentation insignifiante de la résistance au cisaillement maximale pour tous les paramètres à l'exception des résultats d'échantillons soumis à une contrainte normale initiale de  $200$  kPa, qui ne sont pas claires et demandent plus d'investigations.

Les résultats obtenus indiquent aussi que les mélanges de la classe A atteignent une résistance au cisaillement élevée en comparaison avec le sable de classe B et C, et ce pour les contraintes normales initiales de  $100$  et de  $300$  kPa, où les réponses sont très claires pour tous les pourcentages.

## CONCLUSION GENERALE

La littérature publiée indique que la granulométrie ainsi que la teneur en fines apparaissent comme des paramètres clés contrôlant la caractérisation des sols et par conséquent déterminant la prédiction de leurs réponses mécaniques, en terme de résistance au cisaillement, déformations, dilatance, contractance etc... Dans ce contexte, nous avons étudié l'effet de la taille des grains sur la réponse mécanique de trois classes de sable de Zemmouri, ayant différentes tailles extrêmes ( $D_{max}= 4.00$  mm,  $D_{max}=2.00$  mm,  $D_{max}=0.63$ mm) et un diamètre minimal constant ( $D_{min}= 0,08$ mm). Chaque classe granulaire est mélangée avec la bentonite suivant des teneurs différentes (FB=0%, 5%, 10%, 15% et 20%), faisant au total quinze (15) mélanges.

Les matériaux étudiés ont été reconstitués au laboratoire avec une densité relative initiale moyenne ( $D_r=55\%$ ) et soumis à trois contraintes normales ( $\sigma_n=100$  kPa, 200 kPa ,300 kPa)

Le choix de ce matériau est suite au tremblement de terre particulièrement violent qui a secoué wilaya de Boumerdès, causant d'énormes dégâts aux ouvrages et d'énorme déformations aux sols tels que : le glissement de terrains, la liquéfaction des sols etc...

Le sable étudié a été collecté d'une zone qui a subi une liquéfaction, située à Zemmouri el Bahr (wilaya de Boumerdès).

Il a été constaté que :

- Les résultats des essais de cisaillement direct à la boîte montrent que la teneur en bentonite à un effet sur la résistance au cisaillement (maximale et normalisée) ainsi que sur les caractéristiques mécaniques (l'angle de frottement).
- En effet, la résistance au cisaillement diminue avec l'augmentation de la teneur en bentonite pour toutes les classes granulaires "A", "B" et "C" jusqu'à  $F_{cth}= 15\%$  puis elle augmente avec l'augmentation de FB.
- L'angle de frottement augment légèrement puis diminue jusqu'à  $F_{cth} =15\%$  pour la classe "A" après, remonte d'une manière prononcée. En ce qui concerne les deux autres classes nous remarquons qu'il n Ya pas d'amélioration en terme d'angle de frottement interne.
- Nous illustrons également que dans la partie résiduelle, c'est-à-dire, au régime permanent, l'amélioration de la résistance est approuvée pour toutes les contraintes normales considérées.
- Le plan de déplacement vertical -horizontal (plans de cisaillement) montre que la phase de contractance augmente avec l'augmentation de la teneur en bentonite.
- Les résultats obtenus montrent clairement que l'augmentation du diamètre maximal ( $D_{max}=0.63$  mm, 2.0 mm, 4.0 mm) induit une augmentation remarquable de la résistance au cisaillement maximale

pour tous les paramètres à l'exception des résultats des échantillons soumis à une contrainte normale initiale de 200 kPa, qui ne sont pas claires et demandent plus d'investigations.

Les résultats confirment le rôle de diamètre maximal et montrent que la phase de contractance augmente avec la diminution de  $D_{max}$  (4mm, 2mm et 0.63mm) jusqu'à 15% de FB puis la tendance inverse (dilatance) est remarquée.

- Pour les trois diamètres maximaux : ( $D_{max}=4\text{mm}$ ) de la classe "A", ( $D_{max}=2\text{mm}$ ) de la classe "B" et ( $D_{max}=0.63\text{mm}$ ) de la classe "C", leurs effets sur l'augmentation de la résistance au cisaillement est clairement observés, cette augmentation est due au rôle de diamètre maximal qui augmente l'enchevêtrement entre les grains favorisant ainsi un comportement plus dilatant conduisant à une augmentation de la résistance au cisaillement avec une structure plus stable.

- L'absence de la fraction des grains entre 4mm et 2mm a joué un rôle primordial dans la diminution de la résistance conduisant à une diminution de la phase de dilatance pour la même teneur en bentonite.

En conclusion, il est clair que la taille des grains, joue un rôle important dans l'amplification de toutes les paramètres de résistance.

- Enfin, nous espérons que ce travail pourra trouver une suite. Quelques perspectives peuvent être proposées : afin de mieux valider certaines observations, notamment :

- ❖ Contribution à l'étude de comportement cyclique et monotone au cisaillement triaxiale des mêmes matériaux utilisés dans notre recherche, afin de mieux valider nos résultats.
- ❖ Contribution à l'étude de l'influence de la granulométrie, à travers les diamètres extrêmes " $D_{max}$ " et " $D_{min}$ ", le diamètre moyen des grains " $D_{50}$ " avec le pourcentage des fines plastiques et non plastiques sur le comportement du même sol.
- ❖ De plus, pour tous les paramètres étudiés, nous proposons d'introduire des fractions en bentonite plus élevée ( $FA > 20\%$ ).



## REFERANCS

- 1.Lim, M. S., D. C. Wijeyesekera, A. Zainorabidin, and I. Bakar. 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: 27–37Tatsuoka F, Miura S, Yoshimi Y, Yasuda S, & Makihara Y, (1986) "Cyclic undrained triaxial strength of sand by a cooperative test program, *Soils and foundations*", 26, 117-128
- 2.Ayad A. Alzaydi. (1990) "An investigation of the infleunce of particle size gradation and particle shape on the shear strength and packing behavior of beach sands in saudi arabia" *Eng. Sci.* pp 65-79
- 3.Vaid YP, Fisher JM, Kuerbis RH (1991) Particle gradation and liquefaction. *J Geotech Eng* 116(4):698–703
- 4.Prashanth Vangla, Gali Madhavi Latha (2015) “Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology”; *nt. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 1:6 DOI 10.1007/s40891-014-0008-9.
- 5.Islam, M. N., A. Siddika, M. B. Hossain, A. Rahman, and M. A. Asad. 2011. Effect of Particle Size on the Shear Strength of Sand. *Australian Geomechanics* 46 (3): 85–95
- 6.Wang, J. J., H. P. Zhang, C. C. Tang, and Y. Liang. 2013. Effects of Particle Size Distribution on Shear Strength of Accumulation Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139 (11): 1994–1997. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000931
- 7.Alias, R., A. Kasa, and M. R. Taha. 2014. Particle Size Effect on Shear Strength of Granular Materials in Direct Shear Test. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* 8 (11): 1093–1096
- 8.Cherif Taiba, A. 2017. “Etude en Laboratoire de la Susceptibilite a la Liquefaction de Sable Limoneux : Influence de la Forme et Taille Des Grains.” These de doctorat, Universite de Chlef, Algeria
- 9.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 (2008) 91–100.
- 10.Belkhatir M, Arab A, Missoum H, Della N, Schanz T (2011) Laboratory study on the liquefaction resistance of sand–silt mixtures: effect of grading characteristics. *Granul Matter* 13:599–609
- 11.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. *Geotech Test J* 37(5):922–931
- 12.Liu YJ, Li G, Zhen YY, Dano C, Hicher PY, Xiao HX, Wang JH (2014) “Influence of grading on the undrained behavior of granular materials” symposium about “Recent Advances in the Mechanics of Granular and Porous Media” at the European Solid Mechanics Conference in Graz, Austria
- 13.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. *Geotech Geol Eng* 34(1):367–382

14. Cherif Taiba A, Mahmoudi Y, Belkhatir M, et Schanz T, (2018) "Experimental Investigation into the Influence of Roundness and Sphericity on the Undrained Shear Response of Silty Sand Soils".
15. Hazout, L., Z. A. Zitouni, M. Belkhatir, and T. Schanz. 2017. Evaluation of Static Liquefaction Characteristics of Saturated Loose Sand Through the Mean Grain Size and Extreme Grain Sizes. *Geotechnical and Geological Engineering* 35 (5): 2079–2105. doi:10.1007/s10706-017-0230-z
16. Hazout Leila, Abdellah Cherif Taiba, Youcef Mahmoudi & Mostefa Belkhatir (2022): Deformation characteristics of natural river sand under compression loading incorporating extreme particle diameters impacts, *Marine Georesources & Geotechnology*, DOI: 10.1080/1064119X.2022.2122090
17. Wang, J. J., H. P. Zhang, C. C. Tang, and Y. Liang. 2013. Effects of Particle Size Distribution on Shear Strength of Accumulation Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139 (11): 1994–1997. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000931
18. Doumi, K., Y. Mahmoudi, A. Cherif Taiba, W. Baille, and M. Belkhatir. 2021. Influence of the Particle Size on the Flow Potential and Friction Index of Partially Saturated Sandy Soils. *Transportation Infrastructure Geotechnology* doi:10.1007/s40515-021-00193-4.
19. Azaiez, H., A. Cherif Taiba, Y. Mahmoudi, and M. Belkhatir. 2022. Polyurethane Organic Polymer as an Eco-Friendly Solution for \_ Improvement of Geotechnical Characteristics of Soils. *Journal of GeoEngineering* 17 (2): 89–98. doi :10.6310/jog.202206\_17(2).3
20. Amini F. & Qi G.Z. (2000). Liquefaction testing of stratified silty sands. *Journal of Geotechnical Engineering Division, Proc. ASCE*, vol. 126 (3), pp. 208-217
21. Ishihara K. (1997). Normalised behaviour of very loose nonplastic soil/ Effects of fabric. *Soils and Foundations*, Tokyo, vol. 37(4), pp. 47-56.
22. Bouferra R., & Shahrour I. (2004). Influence of fines on the resistance to liquefaction of a clayey sand. *Ground Improvement* vol. 8, (1), pp. 1-5.
23. Mahmoudi Y (2017) "Etude expérimentale du comportement mécanique des sols surconsolidés : influence de la structure initiale", la thèse de doctorat. Université Hassiba Benbouali de Chlef
24. Troncoso J.H. [1990] " Failure risks of abandoned tailings dams", proceedings, Int. Symp on safety and rehabilitation of Tailings Dams, CIGB ICOLD, Sydney, Australia, pp.34- 47.
25. Bouchibane et Ben abdelmoutaleb. [2020] "Etude en laboratoire de la réponse mécanique du sable de chlef : impact des différents types des fines" thème de master. Université Hassiba Benbouali de Chlef
26. Bayat M, Bayat E, Aminpour H, Salarpour A. [2012] "Shear strength and pore-water pressure characteristics of sandy soil mixed with plastic fine" DOI 10.1007/s12517-012- 0753-9.
27. Cherif Taiba A, Mahmoudi Y, Belkhatir M, et Schanz T, (2018) "Experimental Investigation into the Influence of Roundness and Sphericity on the Undrained Shear Response of Silty Sand Soils".
28. Della N, Arab A et Belkhatir M, (2011b) "Influence of specimen-reconstituting method on the undrained response of loose granular soil under static loading," *Acta Mech. Sin.* Vol. 27, No. 5, pp. 796–802.

29.Dezfulian, H. (1982). Effects of silt content on dynamic properties of sandy soils. In Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, pp. 63-70