

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente une interprétation détaillée de l'effet des poudrettes en caoutchouc sur le comportement du sable de Chlef naturel. Les échantillons sont préparés en mixant le sable naturel de Chlef avec des poudrettes en caoutchouc à différents pourcentages variant de 0, 0.5, 1, 1.5 et 2%). Les essais ont été réalisés à la boîte de cisaillement localisée au sein du laboratoire des travaux publics de l'ouest (L.T.P.O) de Tiaret et dont les détails sont mentionnées dans le chapitre 3. Ainsi les essais ont été effectués à deux différentes densités relatives. Le premier réalisé sur un sol lâche pour une densité relative de $D_r = 10\%$ et le deuxième étant réalisé sur un sol dense pour $D_r = 80\%$. Les contraintes normales initiales appliquées au cours des essais sont respectivement: $\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa.

V.2. Présentation et discussion des résultats

Nous présentons dans ce paragraphe les différents graphes obtenus comportant l'évolution de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal, contraintes de cisaillement en fonction du pourcentage de poudrettes en caoutchouc, ainsi que l'obtention des droites de Coulomb traçant l'enveloppe des cercles de Mohr et qui donnent la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale.

V.2.1. Effet de la contrainte normale initiale

V.2.1.1. Essais à l'état lâche ($D_r = 10\%$)

a. Sable non renforcé (0% de poudrettes)

La figure 5.1 représente les résultats des essais effectués à l'état lâche, sur le sable de Chlef non renforcé pour différentes contraintes normales initiales. On constate d'après la figure 5.1a que la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la contrainte normale initiale. La figure 5.1b montre le chemin de contraintes dans le plan (τ, σ_n) , on constate que cette ligne est droite qui passe par l'origine qui a pour équation: $\tau = \sigma_n \cdot tg\phi$.

Où:

τ : Contrainte de cisaillement maximale;

σ_n : Contrainte normale;

ϕ : L'angle de frottement interne.

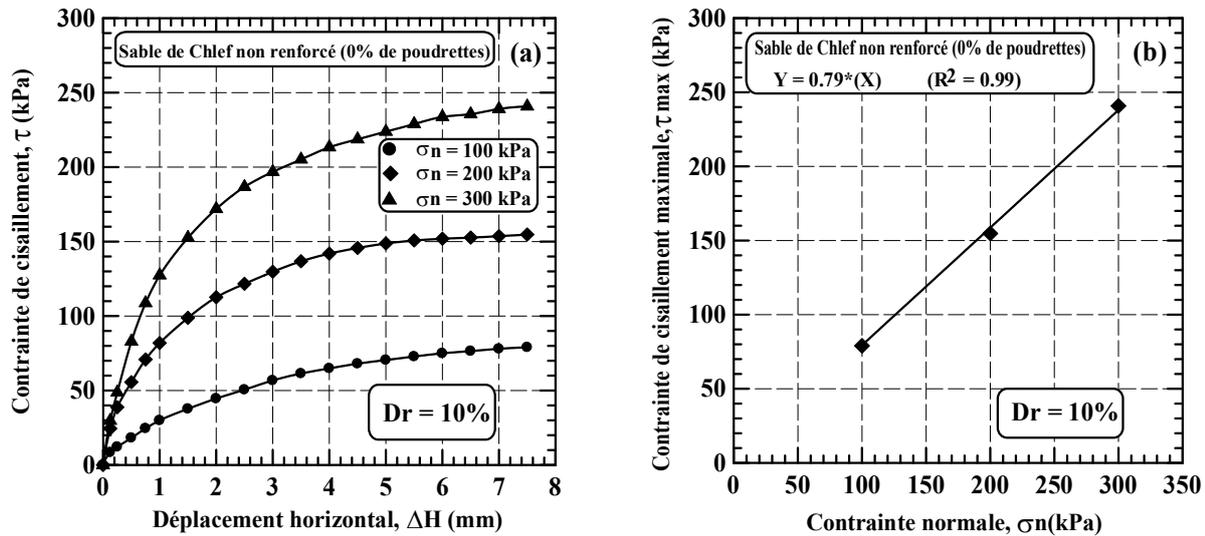


Figure V.1: Comportement du sable de Chlef non renforcé à l'état lâche

(a) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de déplacement horizontal

(b) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

b. Sable renforcé par 0.5% de poudrettes

La figure 5.2a illustre la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la déformation axiale pour les mélanges sable plus 0.5% de poudrettes pour les échantillons préparés à l'état lâche et pour différentes contraintes normales initiales. On remarque un comportement similaire à celui du sable non renforcé, à savoir une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la contrainte normale. Cette augmentation est supérieure au sable non renforcé ($\tau_{max} = 83.98, 160.76$ et 252.79 kPa contre $78.98, 154.76$ et 240.84 kPa pour le sable non renforcé). La figure 5.2b montre le chemin de contraintes dans le plan (τ, σ_n) , on constate que cette ligne droite qui ne passe par l'origine qui a pour équation: $\tau = \sigma_n \cdot tg\phi + C$.

Où:

τ : Contrainte de cisaillement maximale;

σ_n : Contrainte normale;

ϕ : Angle de frottement interne;

C: Cohésion (ordonnée à l'origine).

On remarque aussi l'apparition de la cohésion qui est due à l'ajout des poudrettes signifiant l'amélioration de la résistance au cisaillement des échantillons.

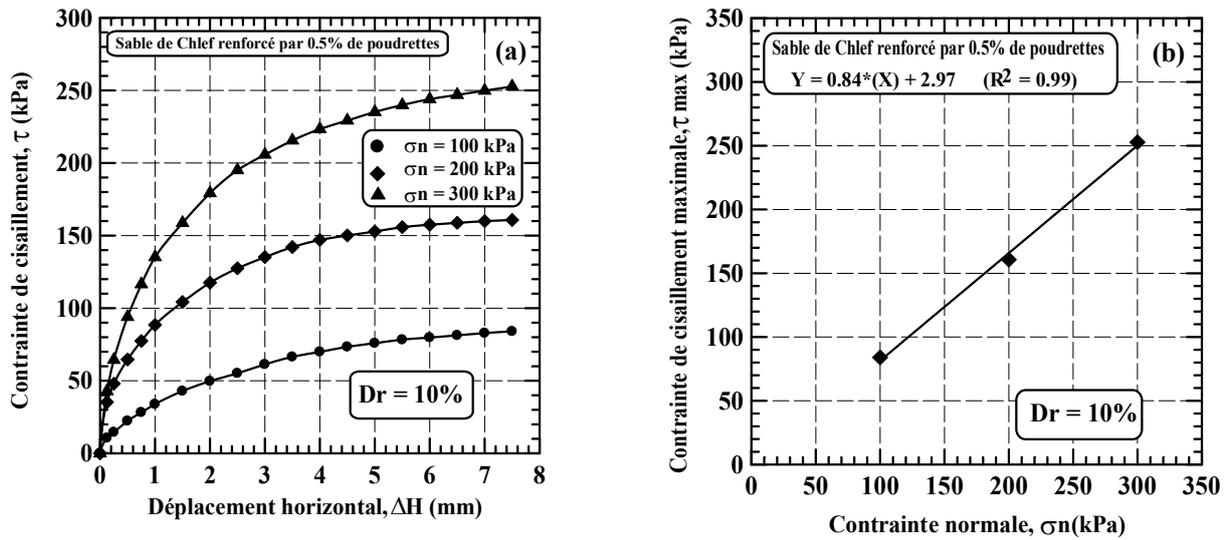


Figure V.2: Comportement du sable de Chlef renforcé par 0.5% de poudrettes à l'état lâche

(a) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de déplacement horizontal

(b) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

c. Sable renforcé par 1% de poudrettes

La figure 5.3a résume l'évolution du comportement des échantillons préparés par un mélange du sable de Chlef naturel et 1% de poudrettes. On constate d'après cette figure que la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la contrainte normale ($\tau_{max} = 86.88, 166.55$ et 260.65 kPa). Cette augmentation est supérieure à celle du mélange sable avec 0.5% de poudrettes. La figure 5.3b montre le chemin de contraintes dans le plan (τ, σ_n) , on constate que cette ligne droite qui ne passe par l'origine qui a pour équation: $\tau = \sigma_n \cdot tg\phi + C$.

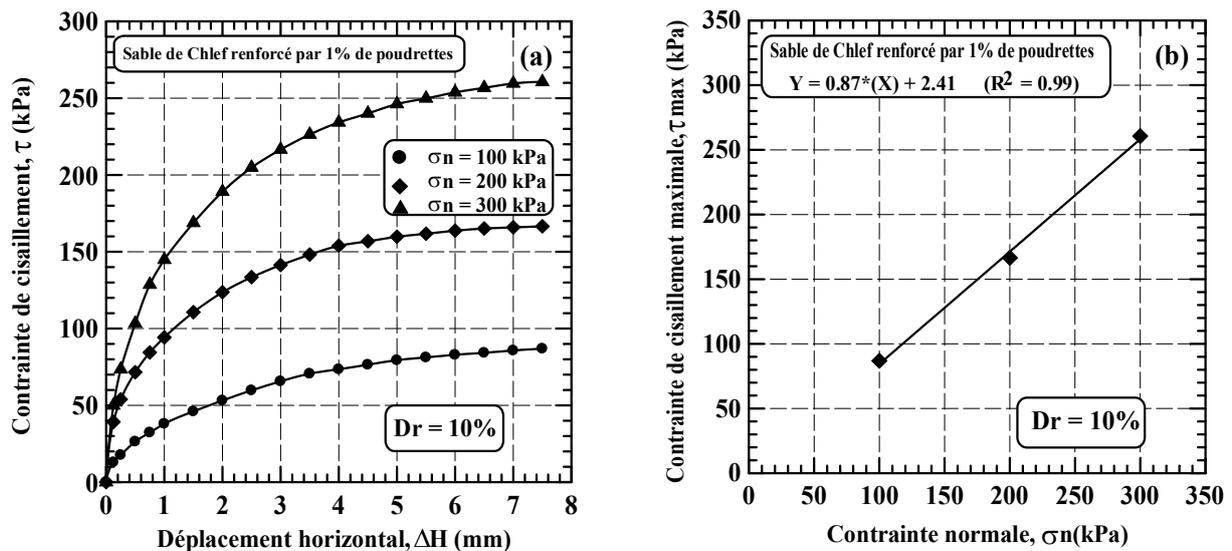


Figure V.3: Comportement du sable de Chlef renforcé par 1% de poudrettes à l'état lâche

(a) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de déplacement horizontal

(b) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

d. Sable renforcé par 1.5% de poudrettes

La figure 5.4a illustre la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour les mélanges sable et 1.5% de poudrettes pour les échantillons à l'état lâche et pour différents contraintes normales. On remarque une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la contrainte normale ($\tau_{\max} = 90.86, 172.20$ et 268.45 kPa), cela est dû à l'effet de l'ajout des poudrettes en caoutchouc (un mélange avec le sable). La figure 5.4b montre le chemin de contraintes dans le plan (τ, σ_n) , on constate que cette ligne droite qui ne passe par l'origine qui a pour équation: $\tau = \sigma_n \cdot tg\phi + C$.

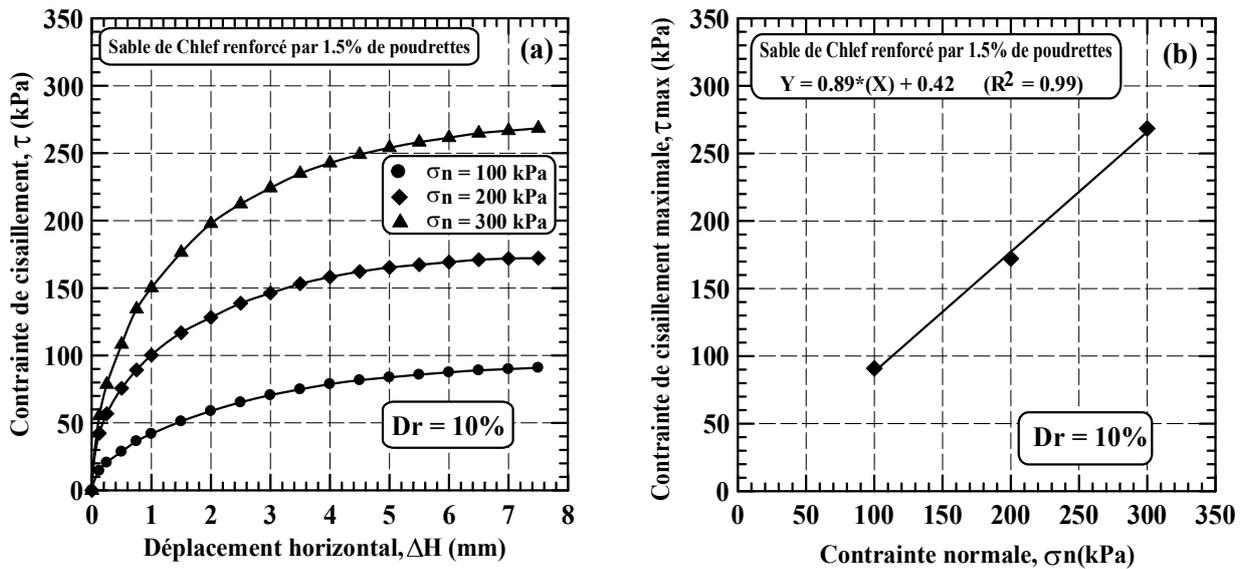


Figure V.4: Comportement du sable de Chlef renforcé par 1.5% de poudrettes à l'état lâche

(a) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de déplacement horizontal

(b) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

e. Sable renforcé par 2% de poudrettes

La figure 5.5a résume l'évolution du comportement des échantillons préparés par un mixage du sable de Chlef naturel et 2% de poudrettes. Les résultats portés dans cette figure permet de mettre en évidence une importante constatation, à savoir un retour à la baisse de la résistance au cisaillement ($\tau_{\max} = 88.95, 168.90$ et 263.98 kPa). La figure 5.5b montre le chemin de contraintes dans le plan (τ, σ_n) , on constate que cette ligne droite qui ne passe par l'origine qui a pour équation: $\tau = \sigma_n \cdot tg\phi + C$. Donc, on peut constater pour la série des essais sur échantillons à l'état lâche, une augmentation de la résistance jusqu'à un pourcentage de 1.5% suivie d'une diminution de contrainte tangentielle. Au delà de ce pourcentage appelé seuil optimal de poudrettes pour les différents échantillons fabriqués à l'état lâche, ce seuil a été localisée à 1.5% de poudrettes (résistance au cisaillement et cohésion supérieurs).

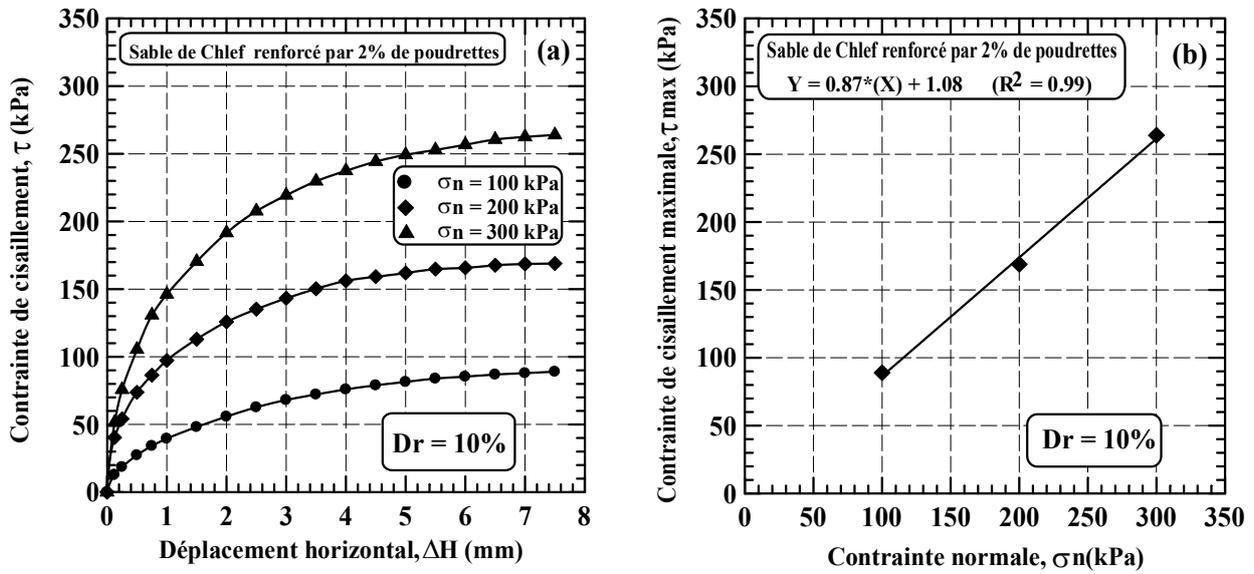


Figure V.5: Comportement du sable de Chlef renforcé par 2% de poudrettes à l'état lâche

- (a) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de déplacement horizontal
- (b) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

V.2.1.2. Essais à l'état dense ($D_r = 80\%$)

a. Sable non renforcé (0% de poudrettes)

La figure 5.6 représente les résultats des essais effectués à l'état dense, sur le sable de Chlef non renforcé pour différentes contraintes normales. On constate d'après la figure 5.6a et 5.6b que la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la contrainte normale.

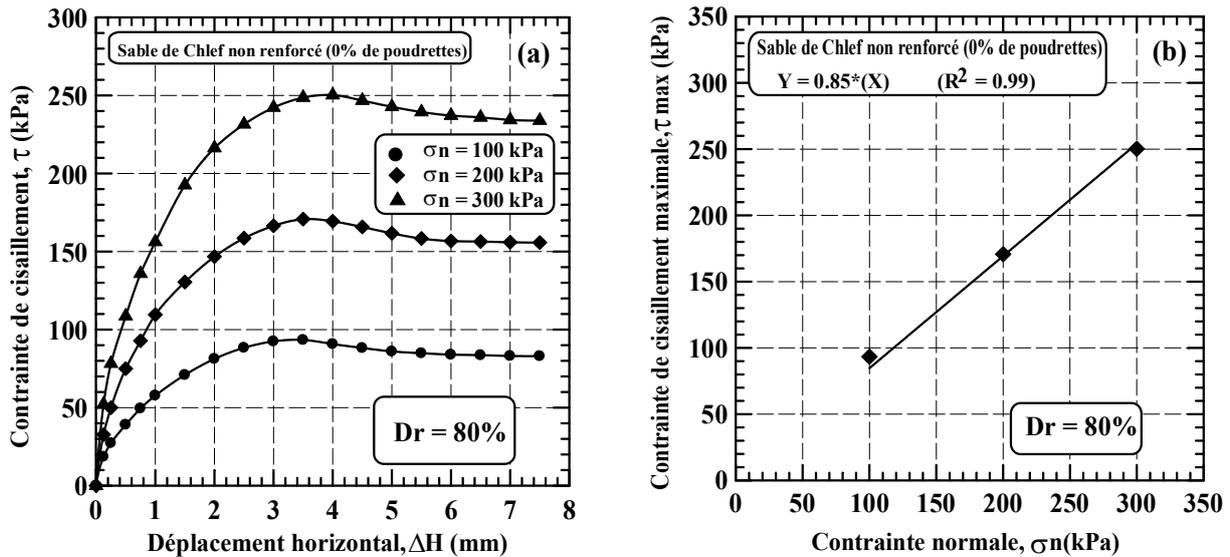


Figure V.6: Comportement du sable de Chlef non renforcé à l'état dense

- (a) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de déplacement horizontal
- (b) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

b. Sable Renforcé par 0.5% de poudrettes

La figure 5.7a illustre la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour un mélange sable de 0.5% de poudrettes pour les échantillons préparés à l'état dense et pour différentes contraintes normales. On remarque un comportement similaire à celui du sable pure, à savoir une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la contrainte normale initiale, avec la différence que cette augmentation est supérieure au sable non renforcé ($\tau_{\max} = 96.23, 180.45$ et 257.90 kPa contre $93.35, 170.78$ et 250.26 kPa pour le sable non renforcé) avec l'apparition d'une certaine cohésion.

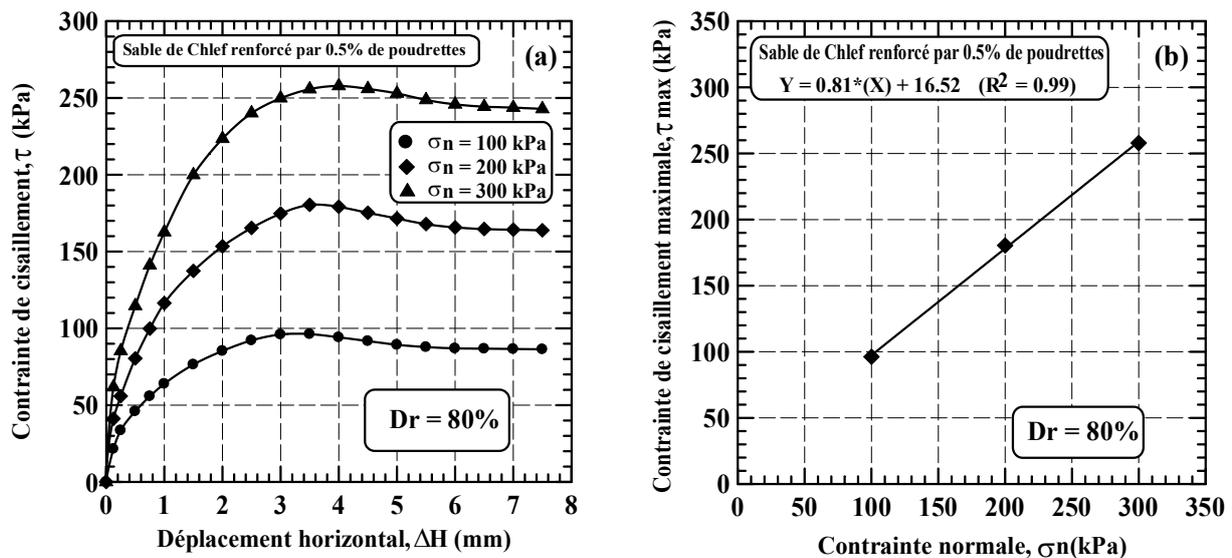


Figure V.7: Comportement du sable de Chlef renforcé par 0.5% de poudrettes à l'état dense

- (a) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de déplacement horizontal
 (b) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

c. Sable renforcé par 1% de poudrettes

La figure 5.8a résume l'évolution du comportement des échantillons préparés par un mélange du sable de Chlef naturel et 1% de poudrettes. On constate d'après ces figures que la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la contrainte normale ($\tau_{\max} = 99.68, 187.32$ et 268.88 kPa).

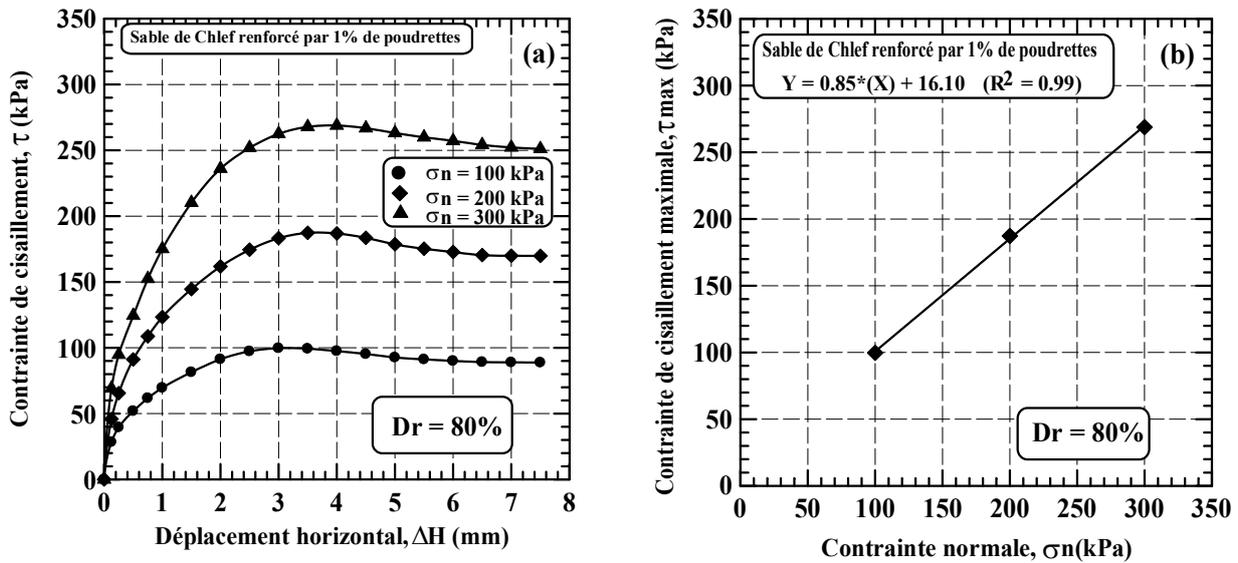


Figure V.8: Comportement du sable de Chlef renforcé par 1% de poudrettes à l'état dense

- (a) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de déplacement horizontal
- (b) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

d. Sable renforcé par 1.5% de poudrettes

La figure 5.9a illustre la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour les mélanges sable avec 1.5% de poudrettes pour les échantillons préparés à l'état dense et pour différentes contraintes normales. On remarque une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la contrainte normale ($\tau_{max} = 104.98, 196.65$ et 279.45 kPa), cela est dû à l'effet de l'ajout de poudrettes en caoutchouc (un mélange avec le sable).

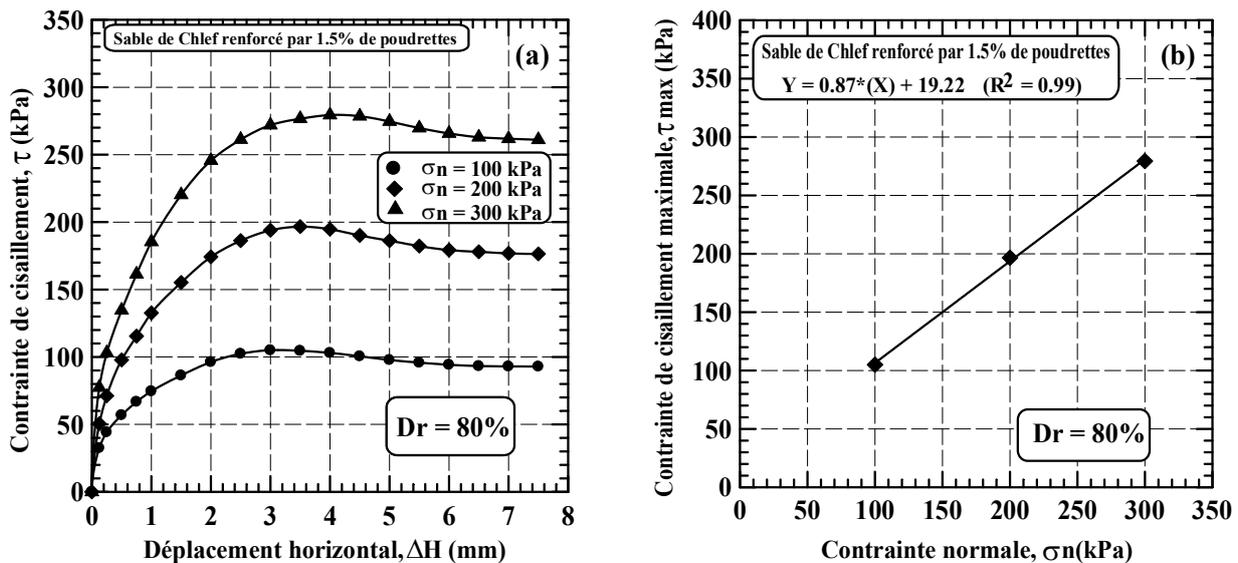


Figure V.9: Comportement du sable de Chlef renforcé par 1.5% de poudrettes à l'état dense

- (a) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de déplacement horizontal
- (b) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

e. Sable renforcé par 2% de poudrettes

La figure 5.10a résume l'évolution du comportement des échantillons préparés par un mélange du sable de Chlef naturel et 2% de poudrettes. Les résultats portés dans ces figures permettent de mettre en évidence une importante constatation, à savoir un retour à la baisse de la résistance au cisaillement ($\tau_{\max} = 102.21, 191.65$ et 274.26 kPa). La figure 5.10b montre le chemin de contraintes dans le plan (τ, σ_n) , on constate que cette ligne droite qui ne passe par l'origine qui a pour équation: $\tau = \sigma_n \cdot tg\phi + C$.

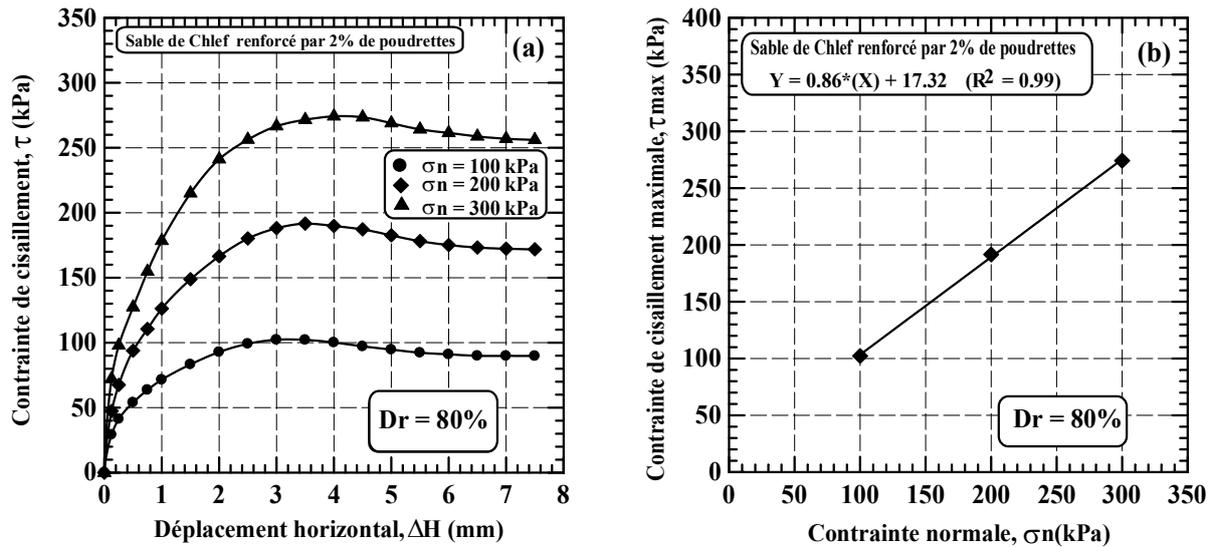


Figure V.10: Comportement du sable de Chlef renforcé par 2% de poudrettes à l'état dense

(a) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de déplacement horizontal

(b) Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

On peut constater pour la série des essais sur des échantillons à l'état dense, une augmentation de la résistance au cisaillement du sol jusqu'à un pourcentage de 1.5% de poudrettes en caoutchouc suivie d'une diminution de la résistance au cisaillement au delà de ce pourcentage appelé seuil optimal de poudrettes en caoutchouc (résistance au cisaillement et cohésion supérieurs au niveau de ce seuil). Les résultats des figures ci-dessus montrent que l'augmentation de la contrainte normale initiale améliore la résistance au cisaillement des échantillons pour les deux états de densité. Un comportement similaire a été observé par différents chercheurs (Costas et al. 2014; Pradhan et al. 2012; Mousa et al. 2010).

V.2.2. Effet de l'ajout des poudrettes sur la résistance maximale (τ_{\max})

La figure 5.11 et 5.12 montrent l'évolution de la résistance au cisaillement en fonction de la teneur en poudrettes en caoutchouc pour les états lâche et dense. On peut remarquer à partir de ces figures, une amélioration du comportement du sol avec l'augmentation de la densité relative pour les trois

contraintes normales initiales de 100, 200 et 300 kPa. On peut constater aussi que pour tous les états de densité, une nette amélioration de l'évolution de la résistance au cisaillement pour les mélanges variant de 0% à 1.5% de poudrettes, ensuite une baisse de cette résistance avec l'augmentation de la teneur en poudrettes (2% de poudrettes). Ces phases d'augmentation et diminution de résistance sont beaucoup plus prononcées pour la contrainte normale initiale de 300 kPa.

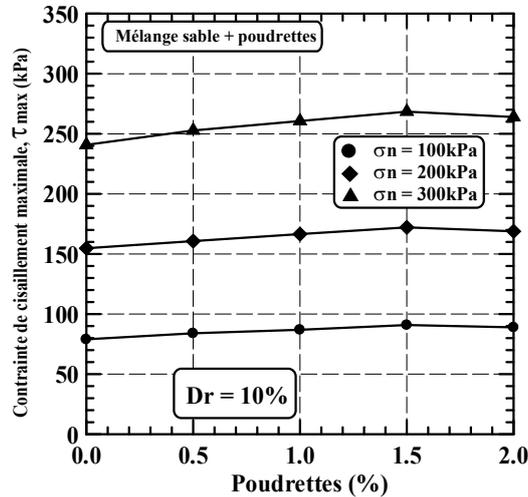


Figure V.11: Variation de la contrainte tangentielle maximale (τ_{max}) en fonction du pourcentage des poudrettes des échantillons lâches ($Dr = 10\%$) ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa).

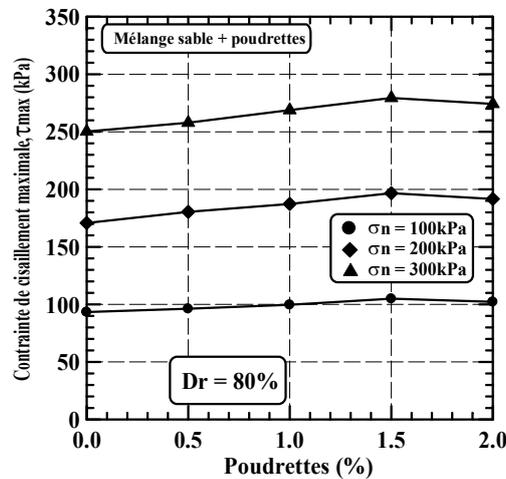


Figure V.12: Variation de la contrainte tangentielle maximale (τ_{max}) en fonction du pourcentage des poudrettes des échantillons denses ($Dr = 80\%$) ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa).

IV.2.3. Effet de la densité relative

La figure 5.13 montre l'évolution de la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte normale initiale appliquée de 100, 200 et 300 kPa pour les deux densités relatives de 10% (état lâche) et 80% (état dense) et pour différentes teneurs en poudrettes. Cette figure montre clairement que cette résistance au cisaillement est nettement supérieure pour la densité de 80% (densité forte)

que celle de la densité de 10% (densité lâche) pour les trois contraintes normales et pou différentes teneurs en poudrettes.

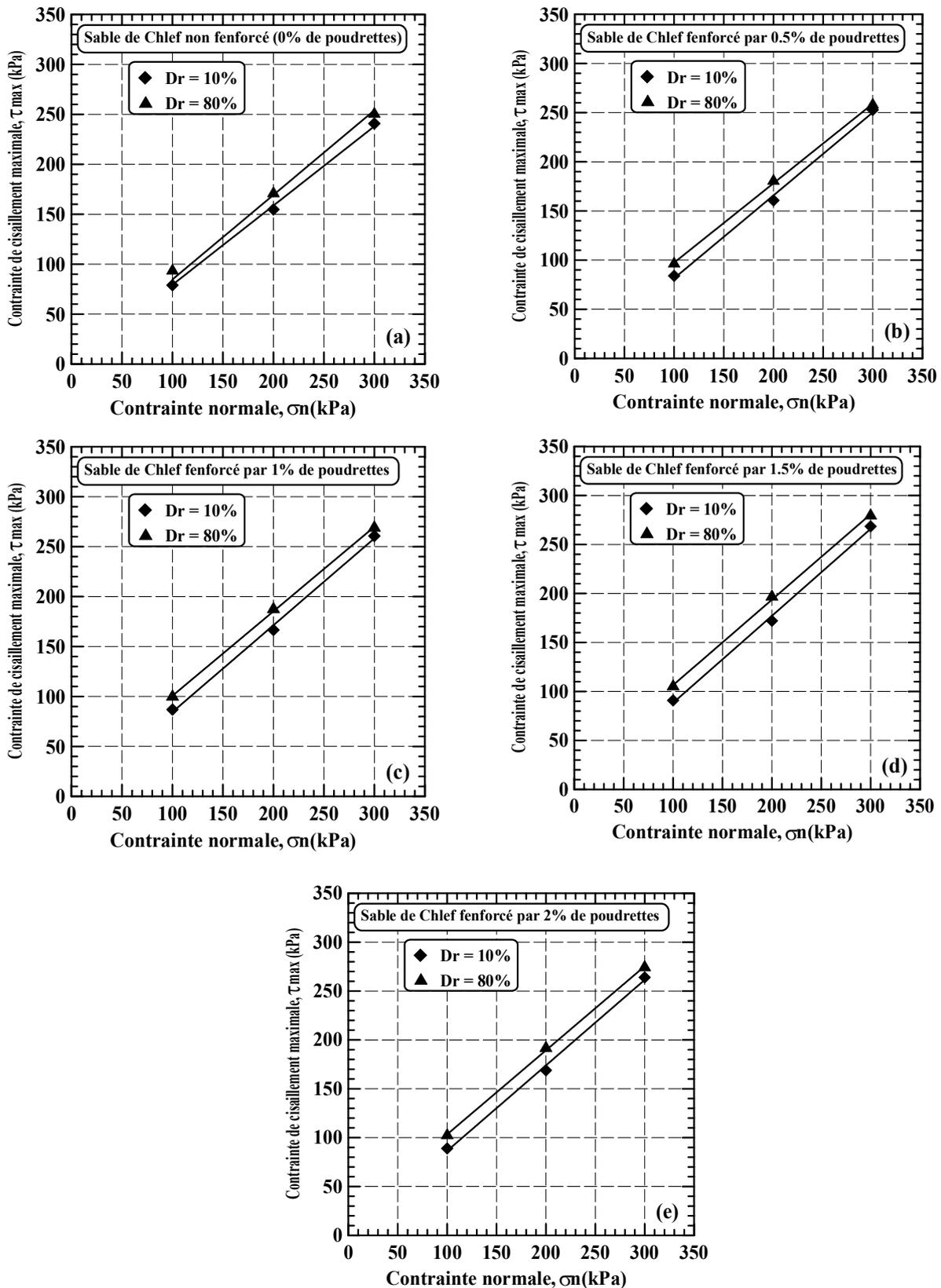
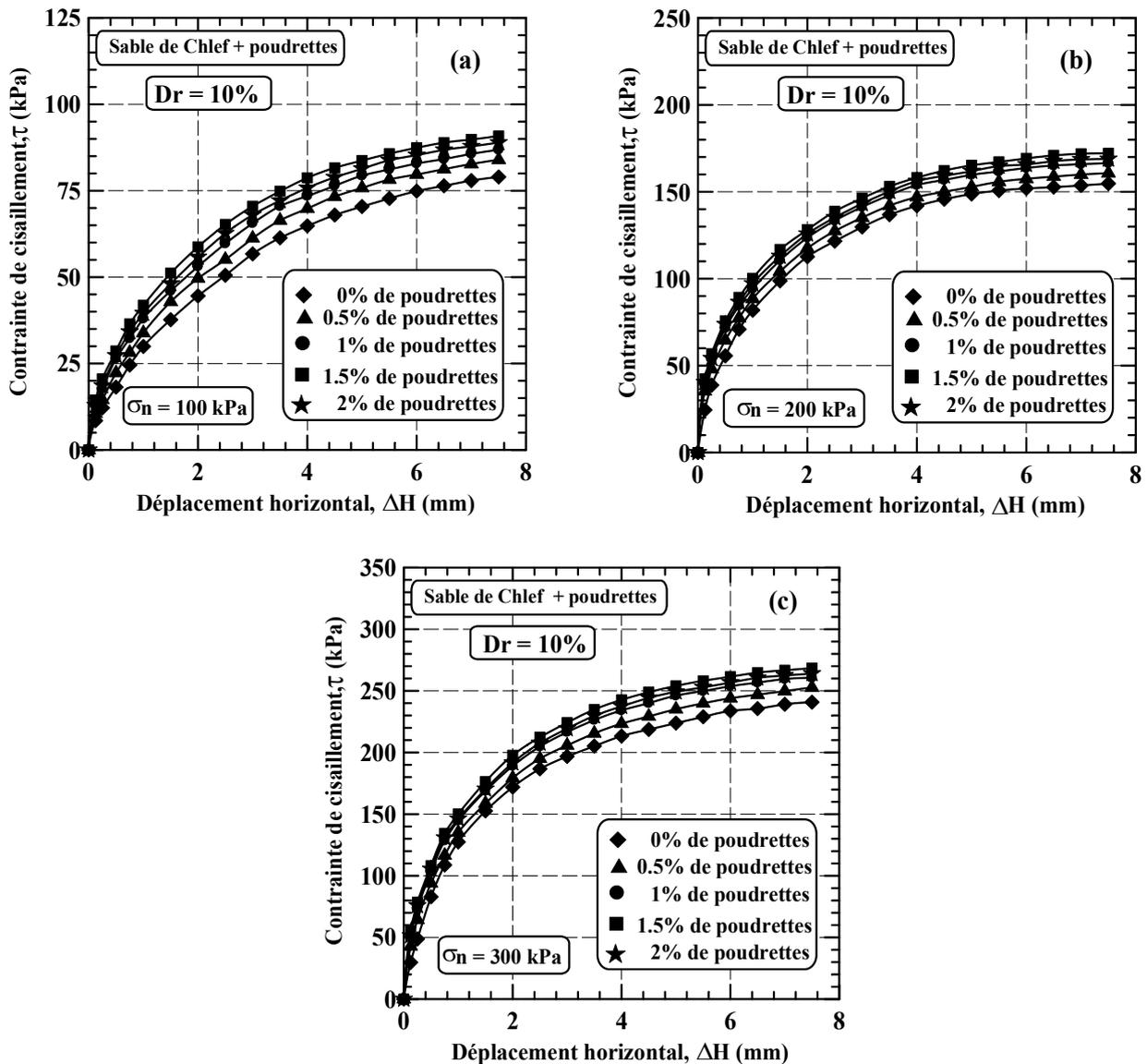


Figure V.13: Variation de la contrainte tangentielle maximale (τ_{max}) en fonction de la densité initiale et du pourcentage des poudrettes ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa)

IV.2.4. Effet des ajouts

La figure 5.14a, 5.14b et 5.14c illustrent les variations de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour les mélanges lâches de sable et les pourcentages en poudrettes variant de 0, 0.5, 1, 1.5 et 2% soumis à des contraintes normales initiales variant entre 100 kPa (figure 5.14a), 200 kPa (figure 5.14b) et 300 kPa (figure 5.14c). On constate une nette amélioration de la résistance pour les échantillons passant de 0% à 1.5% de poudrettes, suivie d'une baisse continue pour de mélange de 2% de poudrettes. Notons aussi une amélioration de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de la contrainte normale initiale.



La figure 5.15a, 5.15b et 5.15c illustrent les variations de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour les mélanges denses de sable et pourcentage de poudrettes variant de 0, 0.5, 1, 1.5 et 2% soumis à des contraintes normales variant entre 100 kPa (figure 5.15a), 200 kPa (figure 5.15b) et 300 kPa (figure 5.15c). On constate une nette amélioration de la résistance pour les échantillons passant de 0% à 1.5% de poudrettes, suivie d'une baisse continue pour le mélange de 2% de poudrettes. Notons aussi une amélioration de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de la contrainte normale. Des comportements similaires ont été observés par Pradhan et al. (2012) et Costas et al. (2014).

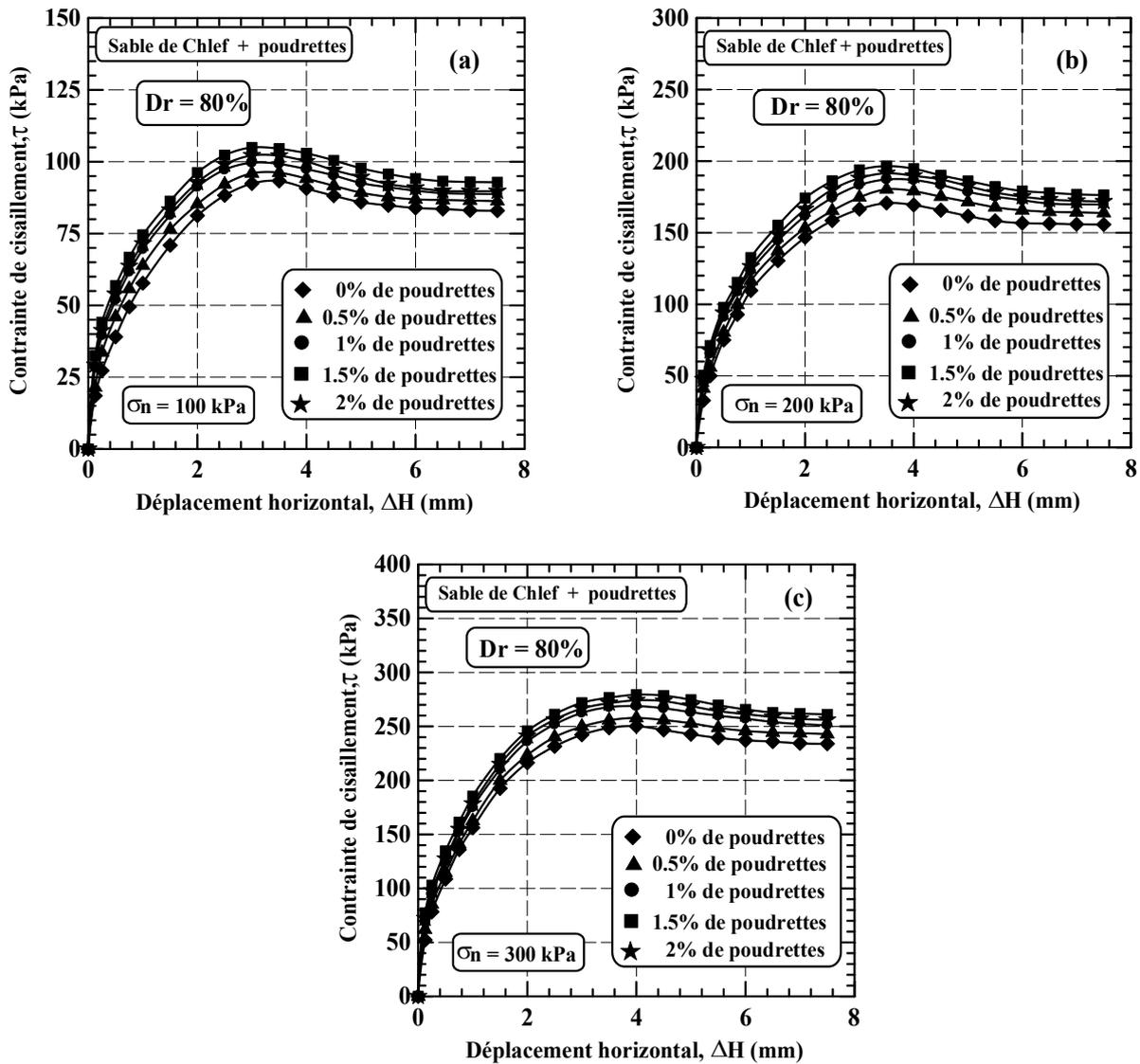


Figure V.15: Effet des poudrettes sur la résistance au cisaillement du sol dense ($D_r = 80\%$)
 (a) Contrainte normale: $\sigma_n = 100$ kPa, (b) Contrainte normale: $\sigma_n = 200$ kPa, (c) Contrainte normale: $\sigma_n = 300$ kPa.

La figure 5.16 et 5.17 montrent l'évolution des droites de Mohr-Coulomb en fonction de la teneur des poudrettes en caoutchouc pour les états lâches et denses. On peut remarquer à partir de ces

figures, que pour tous les états de densité, une nette amélioration des caractéristiques mécaniques des échantillons pour les mélanges passant de 0% à 1.5% de poudrettes en caoutchouc, ensuite une baisse de ces caractéristiques avec l'augmentation de la teneur des poudrettes en caoutchouc (2%). On note aussi qu'il y'a une bonne corrélation ente la contrainte tangentielle maximale (τ_{max}) et le pourcentage de poudrettes pour les deux densités relatives ($D_r = 10\%$ et 80%). L'expression suivante est proposée pour évaluer la contrainte tangentielle maximale (τ_{max}) qui est fonction du pourcentage de poudrettes pour le mélange sable de Chlef - poudrettes:

$$\tau_{max} = A * \sigma_n + B \tag{1}$$

Tableau 1 donne les coefficients A, B et le coefficient de détermination (R^2) correspondants au mélange sable de Chlef -poudrettes.

Tableau 1: Coefficients A, B et R^2 de l'équation (1)

Matériau	D_r (%)	Poudrettes (%)	A	B	R^2
Sable de Chlef - Poudrettes	10	0	0.79	0.00	0.99
		0.5	0.84	2.97	0.99
		1.0	0.87	2.41	0.99
		1.5	0.89	0.42	0.99
		2.0	0.87	1.08	0.99
	80	0	0.85	0.00	0.99
		0.5	0.81	16.52	0.99
		1.0	0.85	16.09	0.99
		1.5	0.87	19.22	0.99
		2.0	0.86	17.32	0.96

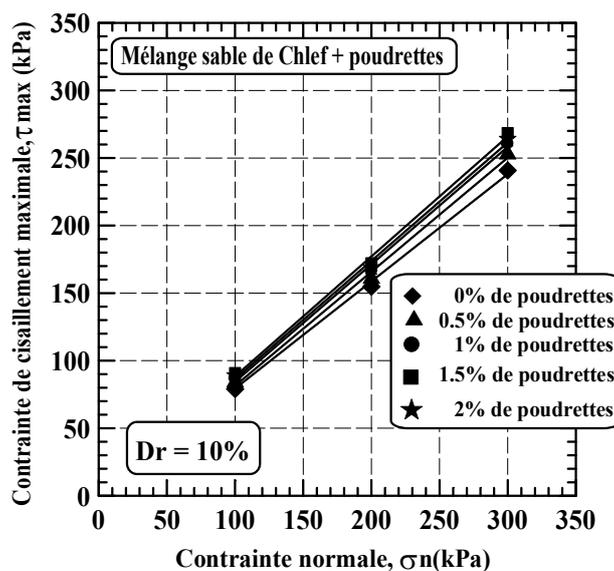


Figure V.16: Effet du pourcentage des ajouts: Droites de Coulomb de type ($\tau = \sigma_n \text{tg}\phi + C$) pour des échantillons lâches.

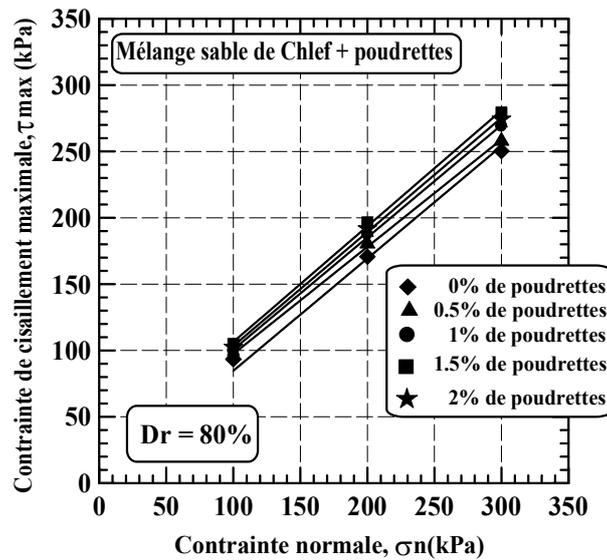


Figure V.17: Effet du pourcentage des ajouts: Droites de Coulomb de type $(\tau = \sigma_n \text{tg}\phi + C)$ pour des échantillons denses.

V.2.5. Variation des paramètres de cisaillement

V.2.5.1. Variation de la cohésion C

Les résultats des essais concernant la variation de la cohésion en fonction de la teneur en poudrettes sont présentés sur la figure 5.18. Pour les mélanges denses sable plus poudrettes en caoutchouc. On constate une nette amélioration de la cohésion pour les mélanges passant de 0% à 1.5% de poudrettes en caoutchouc, suivie d'une baisse continue pour de mélange de 2% de poudrettes. Les mêmes conclusions sont émises pour les échantillons constitués de différents mélanges à l'état lâche.

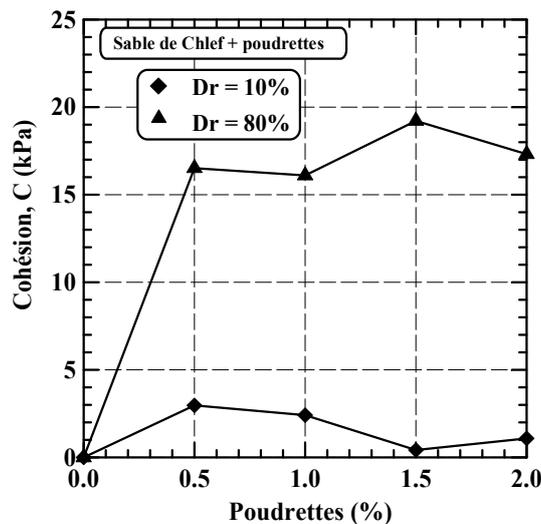


Figure V.18: Evolution de la cohésion C du sol avec le pourcentage de poudrettes.

V.2.5.2. Variation de l'angle de frottement interne ϕ

Les résultats des essais concernant la variation de l'angle de frottement interne en fonction de la teneur en poudrettes sont présentés sur la figure 5.19. Pour les mélanges denses sable plus poudrettes et lâches sable plus poudrettes, On constate une nette amélioration de l'angle de frottement pour les échantillons passant de 0% à 2% de poudrettes en caoutchouc, suivie d'une baisse importante pour le mélange de 2% de poudrettes en caoutchouc.

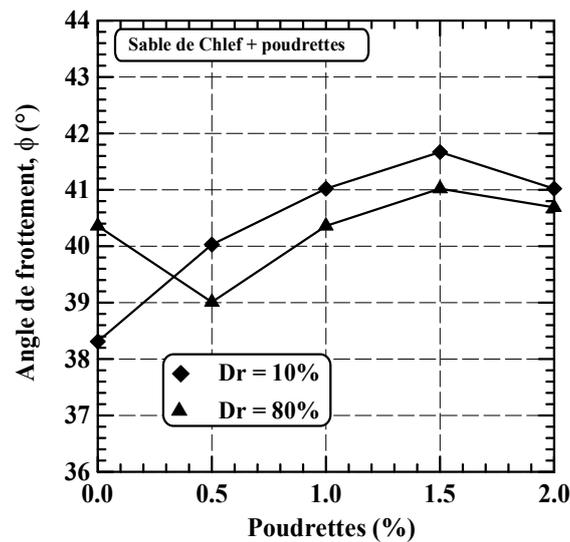


Figure V.19: Evolution de l'angle de frottement interne ϕ du sol avec le pourcentage de poudrettes.

Les résultats des figures 5.18 et 5.19 montrent que la cohésion et l'angle de frottement augmentent avec l'augmentation de la teneur en poudrettes jusqu'à une teneur de 1.5%, au-delà de ce pourcentage ces caractéristiques mécaniques diminuent, confirmant ainsi les résultats trouvés pour les résistances au cisaillement, à savoir l'existence du pourcentage de 1.5% reconnu comme seuil optimale. Un comportement similaire a été observé par Pradhan et al.(2012).

V.3. Conclusion

Une série d'essais a été effectuée au laboratoire afin d'étudier l'influence de l'ajout de poudrettes en caoutchouc sur les propriétés mécaniques d'un sol granulaire instable. A partir des résultats obtenus durant cette étude, les conclusions suivantes peuvent être dégagées:

- L'augmentation de la densité relative induit une augmentation de la résistance du sol;
- L'accroissement de la contrainte de confinement aboutit à une amélioration du comportement des échantillons de sol;

- L'ajout de poudrettes en caoutchouc en pourcentage améliore les caractéristiques mécaniques du sol ainsi que sa résistance au cisaillement jusqu'à une teneur de 1.5% de poudrettes en caoutchouc.

Au delà de cette teneur appelée teneur optimale ou seuil optimal, on constate une diminution de la résistance au cisaillement et les caractéristiques mécaniques du sol.