

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

**Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil



**Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement
(LGEA)**

MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Réalisé par :

M^{elle} : AIT AMRANE Tilelli

Sujet :

***Caractérisation de la stabilisation par
des plastiques recyclés des sols
argileux eaux essais de cisaillement***

Devant le jury composé de :

Mr MELBOUCI Bachir, Professeur à l'UMMTO

Encadreur.

Mr BOUDLAL Omar, Maître de conférences (A) à l'UMMTO

Président.

Mme MOUBAREK, Maître Assistante à l'UMMTO

Examinatrice.

Promotion 2017/2018

REMERCEMENTS

Il est primordial de remercier «ALLAH EL KARIM» de m'avoir donné le courage, la patience et la santé qui m'ont été utiles tout au long de mon parcours pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens d'abord à exprimer toute ma gratitude à mon promoteur le professeur MELBOUCI Bachir pour m'avoir proposé ce sujet et suivi fidèlement mon parcours, pour ses remarques judicieuses et constructives qui ont contribué à l'amélioration de ce mémoire, ainsi que pour ses qualités pédagogiques et l'enthousiasme communicatif dont il a su faire preuve. C'est à la fois un privilège et une expérience exceptionnelle d'avoir pu bénéficier de ses conseils qui m'ont guidé et me guideront encore les années à venir, que Dieu le protège.

J'exprime mes vifs remerciements à tous les enseignants du département de Génie civil pour leur aide, leur encouragement et leur conseil tout au long de mon cursus universitaire, qu'ils puissent trouver ici l'expression de mon profond respect.

Je remercie mes parents, mes frères et ma sœur pour leur soutien et leur encouragement.

J'exprime aussi mes vifs remerciements à tous les fonctionnaires et techniciens du laboratoire LNHC pour leur aide.

*Mes sentiments de reconnaissance vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.
Je remercie mes amis pour les sympathiques moments qu'on a passés ensemble.*

Je tiens également à remercier Mr BOUDLAL Omar, MCA à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (U.M.M.T.O), d'avoir accepté de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Mme MOUBAREK, MAA à l'UMMTO d'avoir accepté de juger mon travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents.

Mes très chers frères, ma sœur et mes nièces

TABLE DE MATIERES

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des principales notations et indices

INTRODUCTION GENERALE 1

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ARGILES, LES SABLES ET LE PLASTIQUE

1. INTRODUCTION..... 2

2. Généralités sur les argiles..... 2

2.1. Définition des argiles 2

2.2. Formation des argiles 2

2.3. Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux 3

2.4. Structure moléculaire des argiles 4

2.5. Les types de minéraux argileux 4

2.5.1. La kaolinite 5

2.5.2. Les illites 5

2.5.3. La montmorillonite..... 5

2.6. Caractéristiques minéralogique des argiles 6

2.6.1. La surface spécifique (Ss) 6

2.6.2. La capacité d'échange cationique (CEC) 6

2.6.3. La densité de charge spécifique 7

2.7. Caractéristiques physiques des argiles 7

2.7.1 Paramètres d'état 8

2.7.2 Paramètres de nature 8

2.8. Caractéristiques mécaniques des argiles	8
2.9. Caractéristiques hydrauliques des argiles	9
2.10. Les dégâts que peut engendrer les sols argileux.....	9
2.10.1. Les glissements	9
2.10.2. Gonflement-retrait.....	10
3. Généralités sur les sables.....	12
3.1. Définition de sables	12
3.2. Les minéraux sableux.....	13
3.3. Microstructure des sables (sols granulaires.....	13
3.4. Quelques propriétés des sables.....	14
3.5. Différents types de sables.....	15
3.6. Variation de volume des sables au cisaillement	15
3.7. Le comportement des sols homogènes (sable, argile)	16
3.8. Sols hétérogènes	17
3.9. Sols hétérogènes, mélanges (sables-argile	18
3.10. Nature des espaces vides dans les sols en mélanges	19
3.11. Arrangement des particules et des grains dans les sols hétérogènes.....	20
4. Généralités sur les plastiques	21
4.1. Définition du plastique	21
4.2. Les différents types de plastique	22
4.2.1. Le PVC (Polychlorure de vinyle	23
4.2.2. Le Polyéthylène (PE)	23
4.2.2.1. Polyéthylène Basse Densité	23
4.2.2.2. Polyéthylène Haute Densité	24
4.3. Propriétés des matières plastiques.....	24
4.5. Le recyclage des plastiques	24
4.5.1. Le recyclage en Algérie.....	25

4.5.2. Les étapes de recyclage du plastique.....	25
12. conclusion.....	26

CHAPITRE II : TECHNIQUE DE STABILISATION DES SOLS

1. INTRODUCTION.....	27
2. Définition de la stabilisation	27
3. Principaux objectifs de la stabilisation.....	27
4. Différents procédés de stabilisation	27
5. Différentes techniques de stabilisation.....	28
5.1. Stabilisation mécanique.....	28
5.1.1. Compactage (densification)	28
5.1.2. Drainage	29
5.1.3. Substitution.....	29
5.1.4. Application de fortes pressions	29
5.1.5. Préhumidification	29
5.1.6. Utilisation de fondations et d'édifices spéciaux.....	30
5.2. Traitement thermique	30
5.3. La stabilisation physique.....	30
5.3.1. Les fibres	30
5.3.2. Stabilisation par ajout du sable	31
5.3.3 Stabilisation par les sels	32
5.4. Stabilisation chimique (physico-chimique).....	33
5.4.1. Hydrophobants	33
5.4.2. Liants	33
5.4.2.1 Liants hydrauliques	34
5.4.2.1.1. Stabilisation par ajout du ciment.....	34
5.4.2.1.2. Stabilisation par la chaux	34
5.4.2.1.3. Stabilisation aux cendres volante et pouzzolane	34
5.4.2.2. Liants organiques	35
5.4.2.2.1. Stabilisation par polymères	35
5.4.2.2.2. Le bitume.....	35

6. Conclusion	37
---------------------	----

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III : IDENTIFICATION ES MATERIAUX

1.INTRODUCTION.....	39
2. Origine de l'argile étudiée.....	40
3. Teneur en eau naturelle W % (NF P 94 – 050) – Méthode par étuvage	40
4. Masse volumique de l'argile	40
4.1. Masse volumique des grains solides des sols selon (NF P 94 – 054) – Méthode au pycnomètre	40
4.2. Masse volumique humide de sol (NF P 94 - 053) – Méthode de l'immersion dans l'eau	41
4.3. Masse volumique du sol sec (NF P 94 – 064)	42
5. Indice des vides et degré de saturation.....	42
5.1. Indice des vides (e)	42
5.2. Degré de saturation S_r	43
6. Analyse granulométrique et analyse granulométrique par sédimentation	43
7. Les limites d'ATTERBERG [NF P 94-051]	45
7.1. La détermination de la limite de liquidité	46
7.2. La détermination de la limite de plasticité	47
7.3. L'indice de plasticité	48
7.4.1. La limite de plasticité	48
7.4. Résultats des limites d'Atterberg	48
7.4.1. La limite de plasticité	48
7.4.2. La limite de liquidité	49
8. Valeur au bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche	51
9. Identification des plastiques	52
9.1. Teste de densité sur le polyéthylène.....	52
9.2. Test de Belstein sur le PVC	53

10. Conclusion	53
----------------------	----

CHAPITRE IV : CISAILLEMENT A LA BOITE DE CASAGRANDE

1. Introduction	54
2. Notion de résistance au cisaillement	54
3. Mécanisme de rupture d'un sol	55
3.1. Comportement à long terme	55
3.2. Comportement à court terme	55
4. Définition de l'essai de cisaillement	56
5. But de l'essai	57
6. Paramètres de cohésion c et angle de frottement interne ϕ	58
7. Type d'essais de cisaillement à la boîte (UU, CU, CD)	59
8. Facteurs influant les paramètres de résistance au cisaillement	60
9. Mode opératoire et déroulement de l'essai	60
10. Présentation des résultats	62
10.1. Représentation des résultats de l'argile sans ajouts	62
10.2. Présentation des résultats de l'argile + plastique granulé	63
10.2.1. Argile +3% plastique granulé.....	63
10.2.2. Argile +5% plastique granulé.....	64
10.2.3. Argile +7% plastique granulé.....	64
10.2.4. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de plastique granulé	65
10.2.5. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de plastique granulé	66
10.3. Présentation des résultats de l'argile + PVC	67
10.3.1. Argile+3%PVC	67
10.3.2. Argile+5%PVC	68
10.3.3. Argile+7%PVC	69

10.3.4. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage du PVC	69
10.3.5. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de plastique granulé	70
10.4. Présentation des résultats de l'argile + sable.....	71
10.4.6. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de sable à 400 Kpa	75
10.4.7. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de sable	75
10.5. Présentation des résultats de l'argile + sable+plastique granulé	76
10.5.1. Argile+sable+3% plastique granulé	76
10.5.2. Argile+sable+5% plastique granulé	82
10.5.3. Argile+sable+7% plastique granulé	88
10.6. Présentation des résultats de l'argile + sable+PVC.....	94
10.6.1. Argile+sable+3% PVC	94
10.6.2. Argile+sable+5% PVC	99
10.6.3. Argile+sable+7% PVC	104
10.7. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de plastique granulé ajouté au mélange(argile+20%sable qui est le cas le plus défavorable) à 400 Kpa	110
10.8. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de ajouté au mélange (argile+20%sable qui est le cas le plus défavorable	110
10.9. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de PVC au mélange (argile+20%sable qui est le cas le plus défavorable) à 400 Kpa.....	112
10.10.évolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de PVC ajouté au mélange (argile+20%sable qui est le cas le plus défavorable.....	112

11. Conclusion.....	113
---------------------	-----

CONCLUSION GENERALE	114
----------------------------------	------------

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : a)Tétraèdre de silice ; b) feuillet de silice en tétraèdre

Figure I.2 : a)octaèdre d'aluminium(ou de magnésium); b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre.

Figure I.3 : structure des argiles

Figure I.4 : instabilité des talus cas des routes.

Figure I.5: Fissure sur les murs et Fissures diagonales

Figure I.6: Risque à prendre en compte lors de la construction

Figure I.7 : Formes de fissuration Sur des Bâtiments Reposant sur des terrains gonflants

Figure I.8: Formes de Dégâts Sur des Bâtiments Reposant sur des terrains gonflants.

Figure I.9 : *dégradation des routes*

Figure I.10 : *dégradation de la route RN15, village Soumer*

Figure I.11: sables roulés de diamètre 1mm.

Figure I.12 : Microstructure des sols granulaire

variation de volume des sols pulvérulents au cours du cisaillement.

Figure I.14 : Arrangements des particules élémentaires,

Figure I.15 : Assemblages des particules

Figure I.16 : Microstructure d'une argile où les arrangements de particules élémentaires sont dominants dans la matrice.

Figure I.17 : Microstructure d'une argile où les agrégats de plaquettes sont dominants.

Figure I.18 : Microstructure d'un sol fin où la matrice de sable ou de silt est dominante, avec les particules argileuses comme connecteurs entre les grains.

Figure I.19 : Différents types d'arrangements des constituants d'un sol granulaire hétérogène,

Figure I.20: la formule chimique du PVC.

Figure I.21 : Schéma du processus standard de régénération.

CHAPITRE II

Figure II.2: Classifications des liants

CHAPITRE III

Figure III.4 : Matériel et matériaux d'essai du poids volumique du sol sec

Figure III.5.a : courbes granulométriques des deux types de sols utilisés du sable.

Figure III.5.b : courbes granulométriques des deux types de sols utilisés du sable.

Figure III.6: Limite limites d'Atterberg (Santamarina,

Figure III.7 : Les matériels utilisés.

Figure III.8 : Le mortier malaxé.

Figure III.9 : Le remplissage de la coupelle de Casagrande

Figure III.10 : La fermeture de la rainure

Figure III.11: La confection du rouleau.

Figure III.12 : La fissuration et brisure du rouleau.

Figure III.13: Présentation de la plasticité du sol étudié dans l'abaque de Casagrande

Figure III.14 : Courbe de limite de liquidité de l'argile.

Tableau III.17: Désignation du sol en fonction de son VBS.

Figure III.16 : Teste de densité sur un plastique.

Figure III.17 : Test de Belstein sur le plastique.

CHAPITRE IV

Figure IV.1: Les problèmes de construction.

Figure IV.2 : Courbe de contraintes-déformations.

Figure IV.3 : schéma de comportement des sols

Figure IV.4 : Appareillage de cisaillement.

Figure IV.5 : schéma e la boîte de cisaillement.

Figure IV.6 : Droite intrinsèque.

Figure IV.7: Droites intrinsèques des différentes catégories de sols.

Figure IV.8 : réalisation de l'éprouvette.

Figure IV.9 : Principe de la boîte de cisaillement.

Figure IV.10 : essai de cisaillement consolidé-drainé.

Figure IV.11 : Courbes contraintes tangentiellles à 0% d'ajout

Figure IV.12: Droite intrinsèque à 0% d'ajout

Figure IV.13 : Courbes contraintes tangentiellles à 5% d'ajout de plastique granulé.

Figure IV.14: Droite intrinsèque à 5% d'ajout de plastique granulé.

Figure IV.15 : Courbes contraintes tangentiellles à 7% d'ajout de plastique granulé.

Figure IV.16: Droite intrinsèque à 7% d'ajout de plastique granulé.

Figure IV.17 : Courbes d'évolution des contraintes tangentiellles avec l'augmentation du pourcentage de plastique granulé.

Figure IV.18 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en plastique granulé.

Figure IV.19: Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en plastique granulé

Figure IV.20 : Courbes contraintes tangentiellles à 3% d'ajout de PVC.

Figure IV.21: Droite intrinsèque à 3% d'ajout de PVC.

Figure IV.22 : Courbes contraintes tangentiellles à 5% d'ajout de PVC.

Figure IV.23: Droite intrinsèque à 5% d'ajout de PVC.

Figure IV.24 : Courbes contraintes tangentiellles à 7% d'ajout de PVC.

Figure IV.25: Droite intrinsèque à 7% d'ajout de PVC.

Figure IV.26 : Courbes d'évolution des contraintes tangentiellles avec l'augmentation du pourcentage de PVC.

Figure IV.27 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en PVC.

Figure IV.28 : Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en PVC

Figure IV.29 : Courbes contraintes tangentiellles à 5% d'ajout de sable.

Figure IV.30: Droite intrinsèque à 5% d'ajout de sable.

Figure IV.31 : Courbes contraintes tangentiellles à 10% d'ajout de sable.

Figure IV.32: Droite intrinsèque à 10% d'ajout de sable.

Figure IV.33 : Courbes contraintes tangentiellles à 15% d'ajout de sable.

Figure IV.34: Droite intrinsèque à 15% d'ajout de sable.

Figure IV.35 : Courbes contraintes tangentiellles à 20% d'ajout de sable.

Figure IV.36: Droite intrinsèque à 20% d'ajout de sable.

Figure IV.37 : Courbes contraintes tangentiellles à 25% d'ajout de sable.

Figure IV.38: Droite intrinsèque à 25% d'ajout de sable.

Figure IV.39 : Courbes d'évolution des contraintes tangentiellles avec l'augmentation du pourcentage de sable.

Figure IV.40 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.41 : Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.42 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 5% de sable et 3% de plastique granulé

Figure IV.43: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 3% de plastique granulé.

Figure IV.45 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 10% de sable et 3% de plastique granulé.

Figure IV.46: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 3% de plastique granulé.

Figure IV.47 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 15% de sable et 3% de plastique granulé.

Figure IV.48: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 3% de plastique granulé.

Figure IV.49 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 20% de sable et 3% de plastique granulé.

Figure IV.50: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 3% de plastique granulé.

Figure IV.51 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 25% de sable et 3% de plastique granulé.

Figure IV.52: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 3% de plastique granulé.

Figure IV.53 : Courbes d'évolution des contraintes tangentiellles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+3% plastique granulé).

Figure IV.54 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Figure IV .55: Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.11.56 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 5% de sable et 5% de plastique granulé.

Figure IV.57: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 5% de plastique granulé.

Figure IV.58 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 10% de sable et 5% de plastique granulé.

Figure IV.59: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 5% de plastique granulé.

Figure IV.60 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 15% de sable et 5% de plastique granulé.

Figure IV.61: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 5% de plastique granulé.

Figure IV.62 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 20% de sable et 5% de plastique granulé.

Figure IV.63: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 5% de plastique granulé.

Figure IV.64: Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 25% de sable et 5% de plastique granulé.

Figure IV.65: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 5% de plastique granulé.

Figure IV.66 : Courbes d'évolution des contraintes tangentiellles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+5% plastique granulé).

Figure IV.67: Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.68: Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.69: Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 5% de sable et 7% de plastique granulé

Figure IV.70: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 7% de plastique granulé.

Figure IV.71 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 10% de sable et 7% de plastique granulé.

Figure IV.72: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 7% de plastique granulé.

Figure IV.73 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 15% de sable et 7% de plastique granulé.

Figure IV.74: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 7% de plastique granulé.

Figure IV.75 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 20% de sable et 7% de plastique granulé.

Figure IV.76: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 7% de plastique granulé.

Figure IV.77 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 25% de sable et 7% de plastique granulé.

Figure IV.78: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 7% de plastique granulé.

Figure IV.79 : Courbes d'évolution des contraintes tangentiellles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+7% plastique granulé).

Figure IV.80 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.81: Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.82 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 5% de sable et 3% de PVC.

Figure IV.83: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 3% de PVC.

Figure IV.84 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 10% de sable et 3% de PVC.

Figure IV.85: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 3% de PVC.

Figure IV.86: Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 15% de sable et 3% de PVC.

Figure IV.87: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 3% de PVC.

Figure IV.88 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 20% de sable et 3% de PVC.

Figure IV.89: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 3% de PVC.

Figure IV.90 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 25% de sable et 3% de PVC.

Figure IV.91: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 3% de PVC.

Figure IV.92 : Courbes d'évolution des contraintes tangentiellles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+3% PVC).

Figure IV.93 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.94: Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.95 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 5% de sable et 5% de PVC.

Figure IV.96: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 5% de PVC.

Figure IV.97 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 10% de sable et 5% de PVC.

Figure IV.98: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 5% de PVC.

Figure IV.99 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 15% de sable et 5% de PVC.

Figure IV.100: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 5% de PVC.

Figure IV.101 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 20% de sable et 5% de PVC.

Figure IV.102: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 5% de PVC.

Figure IV.103 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 25% de sable et 5% de PVC.

Figure IV.104: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 5% de PVC.

Figure IV.105 : Courbes d'évolution des contraintes tangentiellles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+5% PVC).

Figure IV.106 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.107 : Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.108 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 5% de sable et 7% de PVC.

Figure IV.109: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 7% de PVC.

Figure IV.110 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 10% de sable et 7% de PVC.

Figure IV.111: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 7% de PVC.

Figure IV.112 : Courbes contraintes tangentiellles à l'ajout de 15% de sable et 7% de PVC.

Figure IV.113: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 7% de PVC.

Figure IV.114 : Courbes contraintes tangentielle à l'ajout de 20% de sable et 7% de PVC.

Figure IV.115: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 7% de PVC.

Figure IV.116 : Courbes contraintes tangentielle à l'ajout de 25% de sable et 7% de PVC.

Figure IV.117: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 7% de PVC.

Figure IV.118 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielle avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+7% PVC).

Figure IV.119: Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.120 : Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Figure IV.121 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielle avec l'augmentation du pourcentage de plastique granulé.

Figure IV.122 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en plastique granulé.

Figure IV.123 : Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en plastique granulé.

Figure IV.124 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielle avec l'augmentation du pourcentage de PVC.

Figure IV.125 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en PVC.

Figure IV.126 : Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en PVC.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1 : minéraux argileux

Tableau I.2 : quelques données sur les minéraux argileux

Tableau I.3 : Caractéristiques des argiles (Bultel, 2001).

Tableau I.4 : Caractéristiques physiques générales des argiles.

Tableau I.5 : caractéristiques physique générales d'un sable

Tableau I.6 : classes granulaire du sale

Tableau I.7 : différents types de plastique et leurs utilisations courantes.

Tableau I.8 : Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques polymères

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Moyens de stabilisation des terres remaniées.

Tableau II.2 : avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées

CHAPITRE III

Tableau III .1: Détermination de la teneur en eau naturelle.

Tableau III.2: Masse volumique des grains solides.

Tableau III.3: Masse volumique humide.

Tableau III.4: Classification des masses volumiques sec.

Tableau III.5: Masse volumique du sol sec.

Tableau III.6: Indice des vides pour les deux sites.

Tableau III.7: L'état de saturation du matériau.

Tableau III.8: Degré de saturation pour les deux sites.

Tableau III.9 : résultats de l'analyse granulométrique pour l'argile

Tableau III.10 : résultats de l'analyse granulométrique pour le sable

Tableau. III.11 : Résultats des limites de plasticité

Tableau III.12: Les résultats et les appréciations.

Tableau III.13: Limite de liquidité de l'échantillon d'argile.

Tableau III.14: Les teneurs en eau obtenues en ordonnée et le logarithme du nombre de coups égale à 25.

Tableau III.15: L'indice de consistance.

Tableau III.16: Résultats de l'indice de consistance.

Tableau III.18: Résultats des valeurs au bleu de méthylène.

Tableau III.19: Résultats finals des expériences.

CHAPITRE IV

Tableau IV.1:les optimum Proctor des mélanges argile-sable.

Tableau.2: Résultats des cohésions obtenus sur l'argile traitée avec du plastique granulé.

Tableau.3: Résultats des angles de frottement obtenus sur l'argile traitée avec du plastique granulé.

Tableau.4: Résultats des cohésions obtenus sur l'argile traitée avec du PVC.

Tableau: Résultats des angles de frottement obtenus sur l'argile traitée avec du PVC.

Tableau.5: Résultats des cohésions obtenus sur l'argile traitée avec du sable

Tableau.6: Résultats des angles de frottement obtenus sur l'argile traitée avec du sable.

Tableau.7: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+3%plastique granulé) traitée avec du sable

Tableau.8: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+3%plastique granulé) traitée avec du sable.

Tableau.9: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+5%plastique granulé) traitée avec du sable

Tableau.10: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+5%plastique granulé) traitée avec du sable.

Tableau.11: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+7%plastique granulé) traitée avec du sable

Tableau.12: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+7%plastique granulé) traitée avec du sable.

Tableau.13: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+3%PVC) traitée avec du sable

Tableau.14: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+3%PVC) traitée avec du sable.

Tableau.15: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+5%PVC) traitée avec du sable

Tableau.16: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+5%PVC) traitée avec du sable

Tableau.17: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+7%PVC) traitée avec du sable

Tableau.18: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+7%PVC) traitée avec du sable.

Tableau.19: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+20%de sable) traitée avec du plastique granulé.

Tableau.20: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+20%de sable) traitée avec du plastique granulé.

Tableau.21: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+20%de sable) traitée avec du PVC

Tableau.22: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+20%de sable) traitée avec du PVC.

Liste des principales notations et indices

CEC : capacité d'échange cationique

γ_d Poids volumique sec

γ_w Poids volumique de l'eau

W : Teneur en eau (%).

Ms : Masse sèche (g).

Mh : Masse humide (g).

ρ_w Masse volumique de l'eau égale à 1 (g/cm³).

ρ_s : La masse volumique des particules solides (g/cm³).

ρ_d : Masse volumique du sol sec (g/cm³).

ρ_h : Masse volumique humide (g/cm³).

E : Indice des vides.

Sr : Degrés de saturation (%).

Vs : Volume des grains solides (cm³)

Vv : Volume des vides (cm³)

Vw : Volume de l'eau (cm³).

WL : Limite de liquidité (%).

Wp : Limite de plasticité (%).

Ip : Indice de plasticité (%).

Ic : Indice de consistance (%).

C : la cohésion

Φ : angle de frottement

INTRODUCTION GENERALE

Le comportement mécanique des sols est en grande partie contrôlé par leur résistance au cisaillement qui dépend des caractéristiques intrinsèques à savoir l'angle de frottement interne et la cohésion. Des valeurs basses de ces paramètres nous indiquent sur la faible résistance au cisaillement des sols.

Les méthodes d'amélioration mécaniques et hydromécaniques des sols sont coûteuses et demandent un savoir faire élevé. Par ailleurs, les méthodes d'amélioration par addition de sable ou de plastique recyclé restent parmi les méthodes les moins onéreuses. Et l'emploi des produits plastiques recyclés est une alternative visant à minimiser les effets de la diminution des ressources naturelles et de réduire le nombre de décharges.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence et les changements apportés par la combinaison de différents pourcentages de sable, de plastique granulé et de PVC broyé sur les propriétés physico mécaniques des sols argileux.

Pour mener à terme ce travail, ce manuscrit est structuré en quatre chapitres:

- Le premier chapitre présente dans une première partie un aperçu sur la caractérisation des argiles et des sables et dans une deuxième partie un panorama sur les plastiques et leur recyclage.
- Les diverses techniques de stabilisation des sols fins sont expliquées dans le deuxième chapitre pour atténuer les dégâts économiques et les risques sur les vies humaines.
- Le troisième chapitre introduit la partie expérimentale de cette étude. Il est consacré à la préparation des différents échantillons à étudier et à leurs identifications en laboratoire.
- Le quatrième chapitre est consacré aux essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Ces essais permettent de traduire le comportement des matériaux étudiés du point de vue résistance au cisaillement et valorisation des déchets plastiques dans les corps de chaussées et les sols de fondation.

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES ARGILES , LES SABLE ET LES PLASTIQUES

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES ARGILES, LES SABLES ET LES PLASTIQUES

1. INTRODUCTION

Les sols fins tels que l'argile et le sable composent notre environnement, ils se présentent généralement sous forme de mélange (sol hétérogène). Souvent les propriétés de ce sol en mélange varient selon le pourcentage d'argile et de sable qui le compose.

Les sols contenant un taux d'argile élevé sont généralement instables, d'où vient l'intérêt de les stabiliser par ajout de plastique recyclé.

Ce travail s'inscrit dans la valorisation des déchets plastiques à base de polyéthylène basse densité PEBD sous forme de granulats ou de polychlorure de vinyle PVC broyé.

2. Généralités sur les argiles

2.1. Définition des argiles

D'une manière générale, lorsque la proportion de particules argileuses dépasse 30% le sol est considéré comme une argile.

Les particules d'argile présentent la fraction minérale inférieure à $2\mu\text{m}$. l'argile étant pratiquement imperméable, elle est souvent employée comme matériaux d'étanchéité dans les noyaux de barrage en terre ou de digues. Toutefois, sa compressibilité est élevée, et en générale, les charges qu'elle peut supporter sont de loin inférieures à celles que supportent les graviers et les sables. Les particules d'argile, contrairement à celles des autres types de sol, sont attirées les unes vers les autres et se regroupent. Cette attraction qui porte le nom de cohésion, est à l'origine de la consistance. Dans des conditions d'humidité favorables, la consistance est telle que l'argile devient plastique et qu'il est possible de façonner, une opération pratiquement irréalisable avec le gravier ou le sable. (Xing-ling, 1999)

En général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllosilicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leur qualité d'absorption (Chami,2016)

2.2. Formation des argiles

Les argiles proviennent de la désagrégation de roches silicatées : du granite (mica et feldspath), du gneiss ou encore des schistes. Ces particules sont transportées par le vent ou l'eau sous forme de limon ou de vase. Les fleuves véhiculent des argiles qui finissent par se déposer en alluvions, dans le cours d'eau lui-même, à son embouchure, dans un lac ou dans la mer. Les dépôts peuvent alors sédimenter et former une roche argileuse.

2.3. Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux (Robitaille et Tremblay 1997)

Les feuillets sont l'unité de base des minéraux argileux, ils ont une apparence similaire à celle d'une lame ou d'une feuille extrêmement mince. Ils sont constitués d'unités cristallines que l'on appelle structures fondamentales. Celles-ci se juxtaposent dans un seul plan, et c'est pourquoi les feuillets ont une surface très grande par rapport à l'épaisseur. On évalue l'épaisseur des feuillets et des structures fondamentales à environ 0,5 nm (5×10^{-7} mm). Il existe deux structures fondamentales : La structure fondamentale **tétraédrique** et la structure fondamentale **octaédrique**.

La structure fondamentale **tétraédrique** est composée de quatre atomes d'oxygène (O) formant un tétraèdre avec en son centre un atome de silicium (SiO_4). Un feuillet tétraédrique simple résulte d'un arrangement des structures fondamentales tétraédriques. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches tétraédriques.

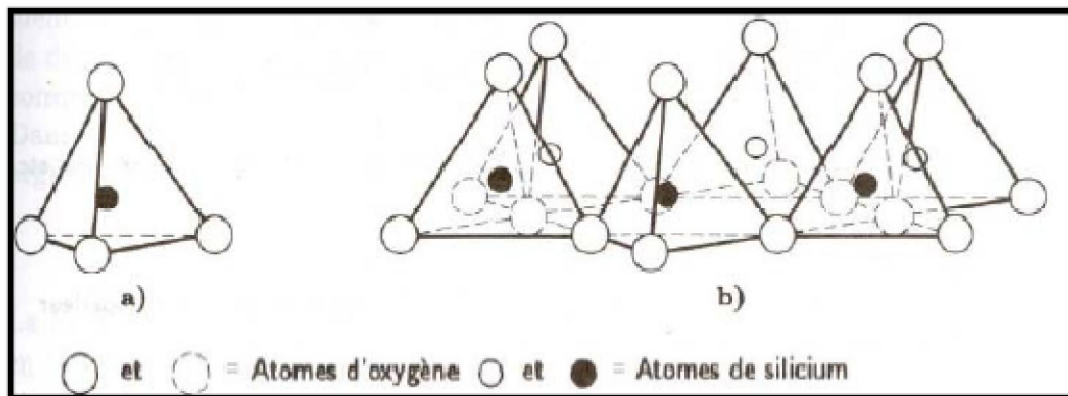


Figure I.1 : a) Tétraèdre de silice (d'après Grim, 1959) ; b) feuillet de silice en tétraèdre (D'après Grim, 1959).

La structure fondamentale **octaédrique** est une combinaison de six atomes d'oxygène (O) ou molécule d'hydroxyle (OH), placés au sommet d'un octaèdre qui renferme un atome métallique l'aluminium (Al) ou de magnésium (Mg). Chacun de ces deux atomes peut être remplacé par un atome métallique de fer (Fe), de titane (Ti), de nickel (Ni), de chrome (Cr) ou de lithium (Li).

Un feuillet octaédrique se forme par l'arrangement de structures fondamentales octaédriques. Lorsque les deux tiers des atomes métalliques sont des atomes d'aluminium, la structure octaédrique porte le nom de gibbsite. Si ce sont pour la plupart des atomes de magnésium, la structure portera le nom de brucite.

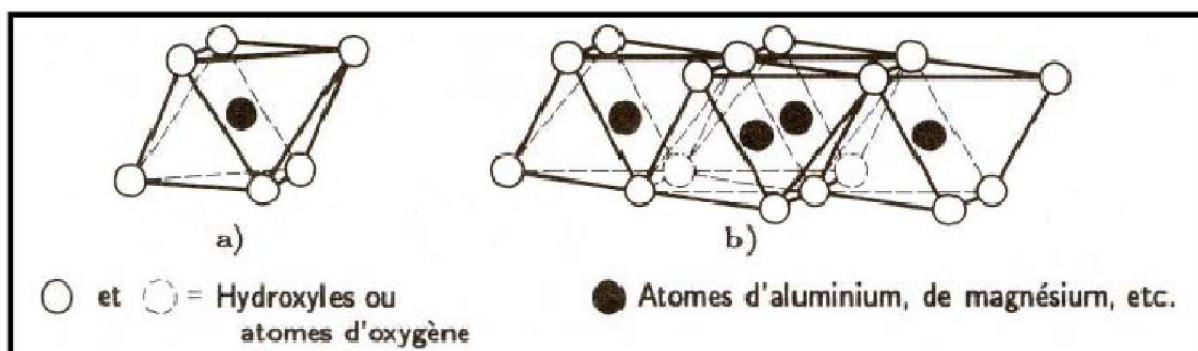


Figure I.2 : a) octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (d'après Grim, 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (d'après Grim, 1959).

L'insertion des atomes dans les structures fondamentales peut se faire par substitution, lors de la formation des minéraux argileux. Les substitutions surviennent principalement dans les structures octaédriques, où les atomes d'aluminium sont le plus souvent remplacés par des atomes de magnésium ou de fer. Dans les structures tétraédriques, un atome d'aluminium peut parfois remplacer l'atome de silicium. Comme la plus part de ces atomes ont approximativement la même taille, les structures fondamentales conservent sensiblement la même forme ; c'est pourquoi on parle de substitutions isomorphe. (Geddach, 2012).

L'illustration ci-après montre la structure d'une montmorillonite (droite et gauche), avec l'alternance des couches T et O, ici une séquence TOT avec l'adsorption d'eau dans l'espace interfoliaire (en vert). La macroscopie du milieu représente un empilement de kaolinite qui est beaucoup moins réactive avec l'eau, c'est pourquoi elle est utilisée pour fabriquer la porcelaine. La montmorillonite, qui peut absorber énormément d'eau, serait inapte à la fabrication de poterie ou de porcelaine en raison du retrait lors de la cuisson.

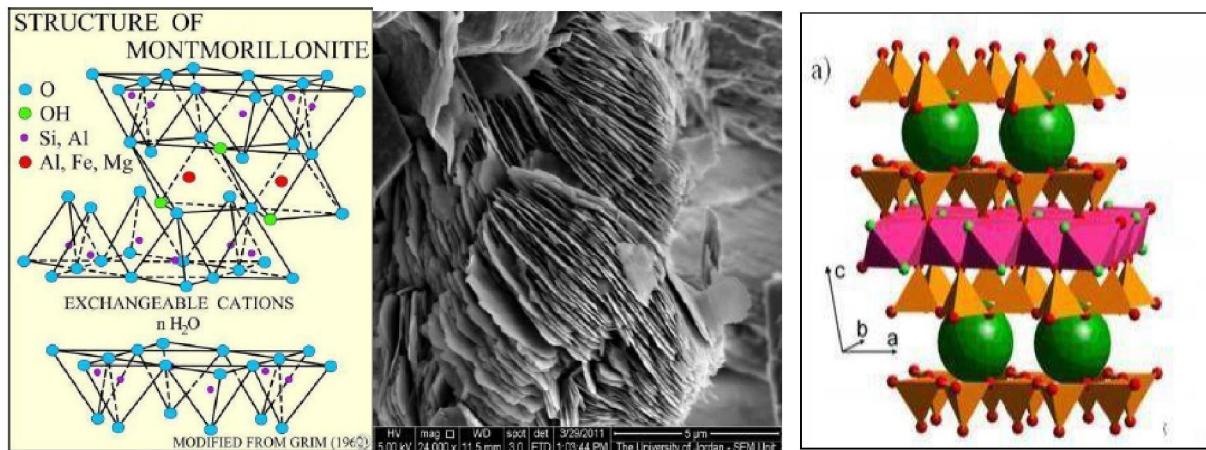


Figure I.3 : structure des argiles

2.4. Structure moléculaire des argiles

Les minéraux argileux sont tous constitués à partir d'un empilement de feuillets tétraédriques et octaédriques entrecoupés par un espace appelé espace interfoliaire. La structure formée en liant une couche tétraédrique à une couche octaédrique est appelée feuillet 1:1 dont l'épaisseur est d'environ 0,7 nm. En liant une couche tétraédrique de chaque côté d'une couche octaédrique, on forme un feuillet 2:1, dont l'épaisseur est d'environ 0,9 nm.

Les liens de covalence et les liaisons ioniques assurent la structure rigide du feuillet élémentaire; des liaisons moins fortes mais essentielles assurent l'assemblage des feuillets élémentaires pour former la particule d'argile. (Coussy et Dir, 2002)

2.5. Les types de minéraux argileux

Les trois familles les plus connues de minéraux argileux sont la kaolinite, la montmorillonite et l'illite (voir tableau I.1)

2.5.1. La kaolinite: ce nom vient du mot Kauling qui désigne le haut sommet d'une colline situé près de Jauchafu en Chine ou cette argile blanche a été découverte il y a quelques siècles. La kaolinite est formée de couches élémentaires comprenant chaque un feuillet octaédrique qui renferme des atomes d'aluminium (gibbsite).

Les argiles de la famille de la kaolinite sont les constituants essentiels de la plupart des argiles utilisés en céramique. Ces minéraux sont relativement inactifs. Non gonflant. La formule chimique de cette famille est du type $[\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ pour une demi-maille. Elle est donc assez riche en alumine.

2.5.2. Les illites : a été découverte pour la première fois à l'université de l'Illinois (USA) par le professeur R.E. Grim. Les argiles de la famille des Illite sont parmi les minéraux les plus répandus à la surface de la terre. La structure de l'illite est analogue à celle des micas, mais la matière est beaucoup plus finement divisée. Elles sont moyennement gonflantes. La formule chimique pour une demi-maille de l'illite est de la forme : $[\text{Si}_{(4-x)}\text{Al}_x\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_{2x}\text{K}]$

2.5.3. La montmorillonite : a été découverte à Montmorillon en France. Elle est constituée de deux feuillets tétraédriques placés de part et d'autre d'un feuillet octaédrique contenant des atomes d'aluminium (gibbsite), elle porte parfois le nom de Smectite.

Les sols de la famille de la La montmorillonite (Smectite) peuvent absorber de l'eau dans des proportions considérables, donnant lieu à des gonflements caractéristiques. Ceci est dû au fait que les liaisons d'un feuillet à l'autre sont faibles à cause de la structure floconneuse, et l'eau pénètre facilement entre les feuillets. La montmorillonite est du type $[\text{Si}_4\text{Al}_2(\text{OH})_2\text{Mg}_x\text{O}_{10}(\text{OH})_{2x}(\text{cations échangeables})_n\text{H}_2\text{O}]$.

Tableau I.1 : minéraux argileux

Type d'argile	Feuillets Elémentaires	Nombre de feuillets par particule	Dimensions d'une particule		Surface spécifique en m ² /g
			longueur en µm	épaisseur en µm	
Kaolinite		100-150	1	0,1	20-70
Illite		10	0,3	0,01	65-180
Montmorillonite		1	0,1	0,001	800

2.6. Caractéristiques minéralogique des argiles

2.6.1. La surface spécifique (Ss) :

La dimension d'une particule est exprimée par de nombreux auteurs par le concept de surface spécifique (Bolt, 1956 ; Komornik & David, 1969, Giroud et Bottéro, 1972..). Ce concept est défini comme étant le rapport entre la surface (S) de l'ensemble des grains solides constituant l'échantillon et son poids.

$$Ss = \frac{S}{p} ;$$

Etant donné que les argiles sont composées de particules fines (diamètre < 2µm), leur surface spécifique est donc très élevée.

Tableau I.2 : quelques données sur les minéraux argileux

Type de minéraux	Surface spécifique (m ² /g)	Diamètre (µm)	Epaisseur du feuillet (µm)
kaolinite	10 - 20	0,3 - 3	0,7
Montmorillonite (Smectite)	800	0,1 - 2	1
Illite	80 - 100	0,1 - 2	1

2.6.2. La capacité d'échange cationique (CEC)

Les minéraux argileux ont la propriété d'interagir avec les cations ou les anions. L'échange des ions se fait autour de la surface extérieure de l'unité structurale. Les cations échangeables les plus connus sont le calcium (Ca⁺⁺), le magnésium (Mg⁺⁺), l'hydrogène (H⁺), le Potassium (K⁺), le nitrate (NH) et le sodium (Na⁺).

La Mesure de la capacité d'une argile à échanger des cations est exprimée en Milli équivalent par 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela à surfaces spécifiques égales.

Tableau I.3 : Caractéristiques des argiles (Bultel, 2001).

Type de minéraux	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	C.E.C. (milliéquivalent/100g)
kaolinite	0	10 - 30	10 - 30	5 - 15
Illite	20 - 55	80 - 120	100 - 175	10- 40
Montmorillonite (Smectite)	600 - 700	80	700 - 800	80 - 150

2.6.3. La densité de charge spécifique

La densité de charge spécifique est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse.

$$\frac{CEC}{S}$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux : Une charge permanente ou structurale liée aux substitutions ioniques (Al³⁺ pour Si⁴⁺ dans la couche tétraédrique ; Mg²⁺ ou Fe²⁺ pour Al³⁺ dans la couche octaédrique), une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux. La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur.

Aussi, plus cette concentration est élevée, plus la couche est mince ou comprimée donc induit une diminution de gonflement. (Amoukrane, 2015)

2.7. Caractéristiques physiques des argiles

L'argile en particulier a fait l'objet de nombreux travaux de recherche sur sa nature minéralogique (Kamel, 1981; Rico, 1984 ; Tardy et Touret, 1987; Touret, 1988). La différenciation entre les différents types d'argile se fait essentiellement par un certain nombre d'essais en laboratoire ou in situ, qui permettent de déterminer les paramètres d'état et de nature du matériau (voir tableau I.4), ainsi que son comportement mécanique et hydraulique (Boudllal, 2013).

Tableau I.4 : Caractéristiques physiques générales des argiles. (Boudllal, 2013)

Caractéristique physique	Notation	Valeur moyenne	Unité
Poids volumique humide	γ ou γ_h	16 à 22	kN/m ³
Poids volumique sec	γ_d	10 à 20	kN/m ³
Poids volumique saturé	γ_{sat}	19 à 22	kN/m ³
Poids volumique déjaugé	γ'	9 à 12	kN/m ³
Densité relative	G_s	2,60 à 2,86	/
Porosité	n	0,20 à 0,80	/
Indice des vides	e	0,3 à 1	/
Teneur en eau	w	10 à 20	%

2.7.1 Paramètres d'état

L'eau joue un rôle très important sur les propriétés physiques des sols fins, ainsi, deux variables sont nécessaires pour décrire l'état d'un sol :

- ✚ La teneur en eau, w exprimée en %, (NF P94-050).
- ✚ Le poids volumique sec et/ou humide γ exprimé en kN/m³, (NF P94-053).

Certains paramètres d'état, nécessaires à la caractérisation du matériau naturel, font appel aux limites d'Atterberg. Les études de (Baver, 1930 ; Combeau et Quantin, 1963) ont montré que les limites d'Atterberg dépendent étroitement de la granulométrie de l'échantillon. Les valeurs des limites de liquidité et de plasticité ainsi que celle de l'indice de plasticité augmentent régulièrement avec le taux d'éléments fins dans le sol.

2.7.2 Paramètres de nature

Ces paramètres se composent de la granulométrie, de l'argilosité et de la minéralogie.

- ✚ La granulométrie, de l'argile se fait par le tamisage ou la sédimentation. L'analyse granulométrique est effectuée suivant les normes NF P94-056 et NF P94-057. La répartition des tailles des grains de sol est prise en compte jusqu'à 80 μm . C'est-à-dire que la fraction granulaire d'argile reste inférieure à 80 μm . Il est à définir également la notion de «teneur en argile» qui est le pourcentage d'éléments inférieurs à 2 μm .
- ✚ L'argilosité, est déterminée par l'indice de plasticité IP suivant la norme NF P94-051. Il mesure l'étendue de la plage des teneurs en eau dans laquelle le sol se trouve dans un état de plasticité. L'indice de plasticité dépend de la nature du sol et de la quantité des minéraux argileux qu'il contient. Il est d'autant plus élevé que le sol contient plus d'argile, d'où son importance capitale pour quantifier la sensibilité des sols fins à l'eau (Saadi, 2003).
- ✚ La minéralogie, consiste en la détermination de la composition chimique, par les méthodes courantes, fluorescence X, absorption atomique, etc.

2.8. Caractéristiques mécaniques des argiles

Le comportement mécanique des matériaux est caractérisé par des paramètres qui permettent d'estimer les tassements, la compressibilité ou la consolidation, et la résistance au

cisaillement des sols, (Le Thi Ngohà, 2009). Ces paramètres sont obtenus à partir des essais géotechniques en laboratoire, notamment :

- ✚ L'essai de compactage Proctor, il a pour objectif d'étudier l'influence de la teneur en eau d'un échantillon de sol sur le poids volumique sec de cet échantillon soumis à une énergie de compactage déterminée, il permet ainsi, de déterminer la teneur en eau optimal nécessaire pour avoir la densité maximale du sol ou des matériaux analysés.
- ✚ L'indice portant immédiat (IPI), à teneur en eau naturelle exprime la capacité au poinçonnement d'une éprouvette de sol compacté à énergie Proctor
- ✚ L'essai de cisaillement direct à la boîte, a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol (la contrainte de cisaillement à la rupture τ), ainsi que les caractéristiques mécaniques (c et ϕ) pour une contrainte normale donnée (σ), suivant un plan de cisaillement horizontal imposé.
- ✚ L'essai de cisaillement à l'appareil triaxial, a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol ainsi que les caractéristiques mécaniques (c et ϕ) pour une contrainte de confinement donnée σ_3 .
- ✚ L'essai de compression simple, a pour objectif de mesurer la force axiale de rupture de l'échantillon sous une vitesse de compression donnée.
- ✚ L'essai œdométrique, permet d'évaluer le tassement et le gonflement du matériau au cours du temps. Il permet également de classer les sols vis-à-vis de leur compressibilité.

2.9. Caractéristiques hydrauliques des argiles

Les sols fins en général et les argiles en particuliers sont connus par leur faible perméabilité, cette caractéristique est d'une importance capitale dans le cas de certains ouvrages en terres tels que les barrages, les barrières étanches, etc.

L'argile est un milieu poreux dit "imperméable". Son coefficient de perméabilité k varie de 10^{-10} à 10^{-13} m/s, et peut être plus faible parfois. Soit Q le débit d'eau s'écoulant à travers une éprouvette d'argile de section S . En divisant ce débit par S , sera obtenue la vitesse fictive de l'eau à la sortie du massif, comme si toute la section de l'échantillon était soumise à l'écoulement. Cette vitesse, notée V , est appelée vitesse de filtration (Boucly-Norotte, 1991).

2.10. Les dégâts que peut engendrer les sols argileux

2.10.1. Les glissements

Un glissement (figure I.4), est le mouvement de descente sur la pente, d'une masse de sol sous l'effet de la gravité selon une surface de rupture (plane, circulaire ou quelconque). (Boudellal, 2013)

Selon Sève et Durville (1996), les glissements se produisent lorsque les contraintes de cisaillement, dues aux forces motrices telles que le poids, excèdent la résistance du sol le long de la surface de rupture.



Figure I.4 : instabilité des talus cas des routes.

2.10.2. Gonflement-retrait

Le retrait gonflement qui cause des fissures apparaissant clairement sur les constructions et sur les routes. Ces fissures occasionnent des ouvertures dans les fenêtres et les portes et elles se propagent dans la maçonnerie et la structure de l'ouvrage.

Les ouvrages sont sujets au gonflement principalement dans la structure et la maçonnerie du bâtiment. Parmi ces derniers, Les maisons individuelles, construites sans mesures de précaution de construction sur ce type de sol, sont sujettes à des dégradations et des fissures au niveau des poteaux, des murs de remplissage et des fondations (radier, semelle superficielle, ou filante et les pieux).

Ces désordres résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements du sol de fondation (terrassement ou gonflement) sollicitant la structure en flexion ou en cisaillement.

Ces différences relatives de mouvement proviennent par ailleurs de l'hétérogénéité des sols de fondation, de celle des forces appliquées par la structure sur le sol, ainsi que des perturbations hydriques que le bâtiment peut engendrer

Les dégâts causés aux structures des bâtiments reposant sur des sols fins gonflants aux U.S.A (1976) ont été chiffrés à environ 2.25 milliards de dollars.

a). Cas des bâtiments



Figure I.5: Fissure sur les murs et Fissures diagonales. Ferrah (2006)

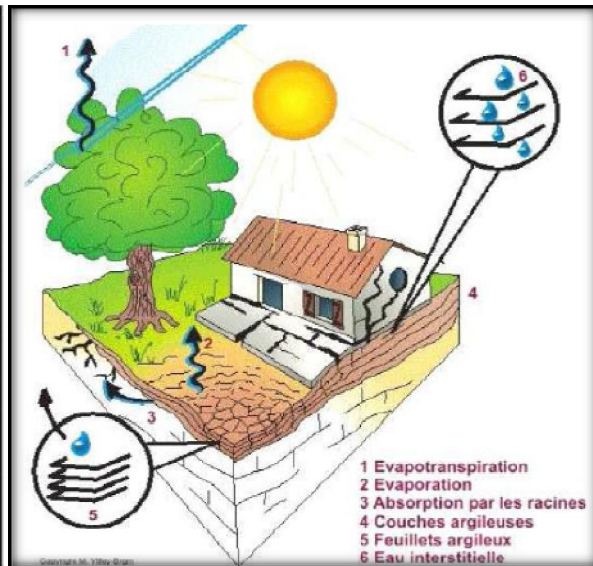


Figure I.6: Risque à prendre en compte lors de la construction. Ferrah (2006)

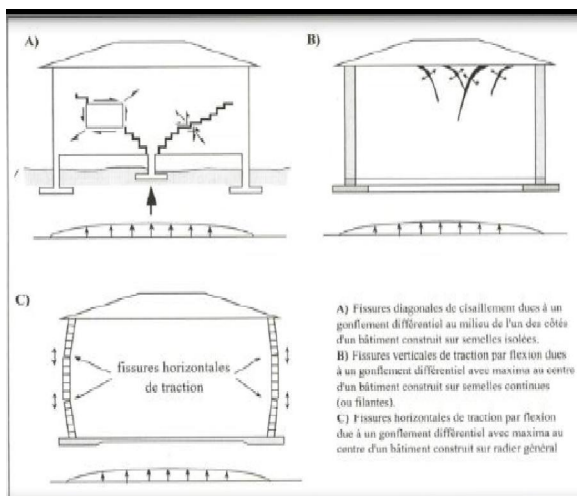


Figure I.7 : Formes de fissuration Sur des Bâtiments Reposant sur des terrains gonflants. Ferrah (2006)

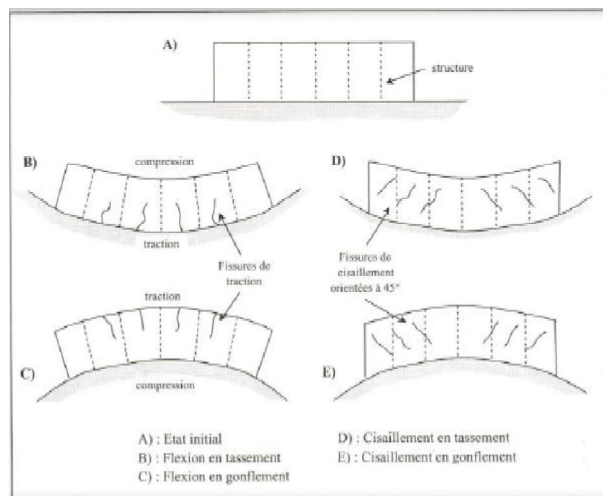


Figure I.8: Formes de Dégâts Sur des Bâtiments Reposant sur des terrains gonflants. Ferrah (2006)

b). Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau du sous sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. D'autres auteurs signalent que sur les routes d'importance moyenne, il ya apparition de divers type de fissures. Les désordres subits par la chaussée se résument.



Figure I.9 : Dégradation des routes (Freeah 2006).



Figure I.10 : dégradation de la route RN15, village Soumer

3. Généralités sur les sables

3.1. Définition de sables

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meubles n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0.063 mm et 2 mm. Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). La composition du sable peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents. Les principaux sont le quartz, les micas et les feldspaths, ainsi que des débris calcaires de coquillage et de corail. Une particule individuelle est appelée grain de sable.



Figure I.11: sables roulés de diamètre 1mm. (Sable de Pismo Beach, California)

3.2. Les minéraux sableux

Le sable est souvent le produit de la décomposition du granite du fait de l'érosion. ainsi, le plus fréquent de ses composants est le quartz, constituant le moins altérable du granite, ainsi que des micas et feldspaths un sable issu d'une roche volcanique est plutôt noir, tandis qu'un sable marin s'enrichit de débris de coquillages ; ainsi, le sable peut avoir plusieurs couleurs en fonction de sa nature (Boudlal, 2013).

Le sable de carrière, obtenu par découpage ou broyage mécanique de roches, est principalement composé de grains aux rugosités marquées.

On distingue trois familles de sables:

- ✚ Les sables roulés siliceux, dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.
- ✚ Les sables de concassage calcaires sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières. Leur coût de revient élevé, les rend économiquement moins intéressant.
- ✚ Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir qui peut remplacer par excellence les deux types de sables suscités. (Amoukrane.2015)

3.3. Microstructure des sables (sols granulaires)

La microstructure d'un sol dépend de sa granulométrie. Un sol granulaire n'a pas la même microstructure qu'un sol argileux.

Les sols granulaires sont des matériaux dont les grains ne sont pas de nature argileuse et donc, ne possèdent pas ou presque pas de propriétés colloïdales. Ils sont généralement tridimensionnels et non pas du type feuillet. Les liaisons entre les grains sont extrêmement faibles puisqu'il n'y a pas de couche d'eau absorbée sur la surface du grain. Toutefois, lorsque le sol est en état non saturé, la succion fournit une certaine cohésion et donc renforce les liaisons entre les grains.

Les interactions entre grains sont principalement dues aux forces des contacts. En conséquence les frottements sont souvent grands dans les sols granulaires. Les grains composant la structure sont imbriqués les un dans les autres et de multiples possibilités d'arrangement existent.

Quelques structures représentatives des sols granulaires sont schématisées sur la figure (I.12) (davallo, 1991).

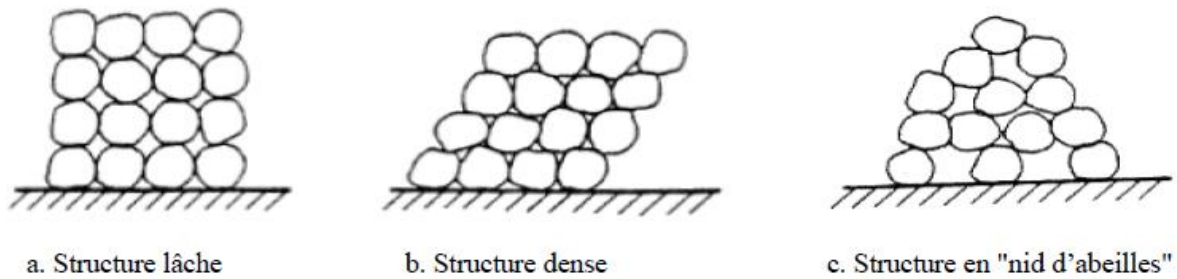


Figure I.12 : Microstructure des sols granulaire (davalle, 1991)

En raison de la structure granulaire et de l'absence de cohésion, les déformations d'un sol non cohérent peuvent s'expliquer par trois mécanisme (davalle, 1991), liés à la mobilité plus au moins important des grains :

- Réarrangement et compressibilité instantané des grains ;
- Glissement et rotation des grains ;
- Rupture et écrasement des grains.

Ainsi toute variation de volume d'un échantillon de sable par le déplacement relatif des grains : le désenchevêtrement des grains provoque la dilatation et désenchevêtrement entraîne la compaction. La résistance des sols ayant une structure lâche ou dense diffèrent fortement. Le comportement hydraulique est également influencé par la structure, en effet, la perméabilité d'un sable lâche est plus grande que celle d'un sable dense.

Outre la structure, le comportement hydromécanique des sols granulaires est influencé par le degré de saturation en eau, puisqu'il conditionne directement le niveau de succion. La succion augmente les efforts de contact et, par conséquent, le frottement. Sous l'effet de la succion, les grains se rapprochent les uns des autres, le sol devient en quelque sorte plus serré. La structure d'un tel sol peut être poreuse et instable quand la succion disparaît, surtout dans le cas de la structure en nid d'abeille (Boudllal, 2013).

3.4. Quelques propriétés des sables

Les sables sont identifiés grâce à la granulométrie (la grosseur des grains). Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement. Le sable artificiel, obtenu par découpage ou broyage mécanique des roches, est principalement composé de grains aux aspérités marquées.

Il peut être également différencié un sable transporté par le vent d'un sable transporté par l'eau. Le premier est de forme plus ronde, sphérique, alors que le deuxième est plus ovoïde. De plus, le sable éolien présente une diaphanéité plus mate que le sable fluvatile ou marin qui est dit "émoussé-luisant". L'aspect de la surface du grain de sable éolien est dû aux multiples impacts que subi le sable lors de son déplacement.

Chapitre I Généralités sur les argiles, les sables et les plastiques

La masse volumique du sable sec varie selon sa granulométrie et sa composition, de 1700 à 1900 Kg/m³, en moyenne 1850 Kg/m³. Le sable forme naturellement des pentes stables jusqu'à environ 30°, au-delà de cet angle, il s'écoule par avalanches successives pour retrouver une pente stable. (Boudllal, 2013)

Tableau I.5 : caractéristiques physique générales d'un sable (Léreau, 2006).

Caractéristique physique	Notation	Valeur moyenne	Unité
Poids volumique humide	γ ou γ_h	17 à 20	kN/m ³
Poids volumique sec	γ_d	14 à 18	kN/m ³
Poids volumique saturé	γ_{sat}	19 à 22	kN/m ³
Poids volumique déjaugé	γ'	9 à 12	kN/m ³
Densité relative	G_s	2,65 à 2,67	/
Porosité	n	0,25 à 0,50	/
Indice des vides	e	0,50 à 1	/
Teneur en eau	w	1 à 15	%

3.5. Différents types de sables

Selon la taille des grains, il est à distinguer trois types de sables (voire tableau I.6)

Tableau I.6 : classes granulaire du sable. (Magnant, 1997).

Type de sable	Dimension des grains
Sable grossier	0,6 à 2 mm
Sable moyen	0,2 à 0,6 mm
Sable fin	0,06 à 0,2 mm

3.6. Variation de volume des sables au cisaillement

Le cisaillement d'un matériau granulaire s'accompagne d'une variation de son volume qui est fonction de son état de compacité initial (Philipponnat & Hubert, 2002). Un sol compact a tendance à augmenter de volume lorsque le cisaillement augmente. Son comportement est dilatant. A l'inverse, un sol initialement à l'état lâche a tendance à diminuer de volume au cours du cisaillement. Son comportement, dit contractant, traduit un réarrangement des grains (diminution de la porosité et augmentation de la masse volumique) (Pedro, 2004).

Léonards (1968) cité par Boudllal, O, a illustré le phénomène élémentaire régissant les variations de volume par la figure (I.13)

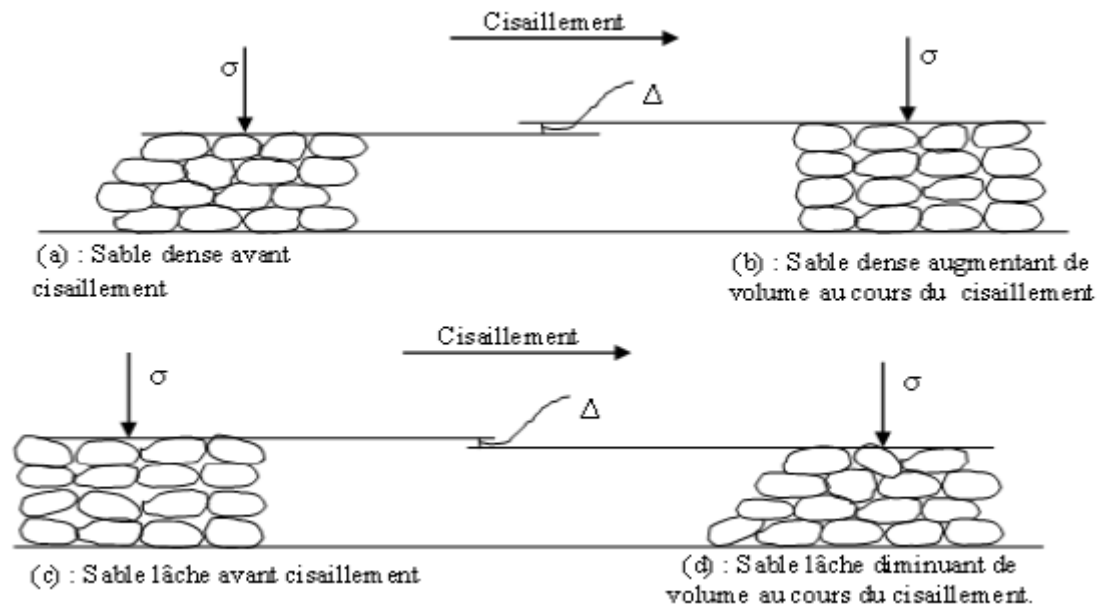


Figure 1.13 : variation de volume des sols pulvérulents au cours du cisaillement.

C'est une représentation schématique d'un sol fortement tassé (figure I.13.a) où les grains sont en ce point enchevêtrés, et leur déformation est impossible, à moins qu'elle ne s'accompagne d'un décompactage (dilatance) représenté sur la figure (I.13.b). Si le sol est peu tassé (figure I.13.c), les déformations de cisaillement provoquent la pénétration des particules dans les espaces vides, ce déplacement s'accompagne d'une réduction de volume (contractance), comme le montre la figure I.13.d. (Boudllal, 2013)

3.7. Le comportement des sols homogènes (sable, argile)

Les sols homogènes tels que les argiles, les sables fins et plus ou moins les marnes sont fréquemment sujets d'études en laboratoire et in-situ (Nguyen pham, 2008 ; khemissa et Magnan, 2000 ; hight et al, 1992 ; josseaume et al, 1991 ; Giroud et Bottero, 1972...), malgré tous ces efforts, leurs comportements restent toujours non maîtrisés et ces sols peuvent présenter divers comportements tels que la liquéfaction, l'effondrement, le glissement

En effet, les argiles par exemple, constituent un domaine de recherche très vaste mais assez compliqué, ainsi, elles peuvent être traitées selon plusieurs aspects :

Selon Skempton (1952), la compressibilité des sols fins (argiles) est influencée, en plus de la plasticité, par le mode de dépôt géologique et donc par la structure des grains (état en place). Dans le même contexte, Mitchell (1976) constate que la composition minéralogique, influence principalement sur les caractéristiques des particules fines, (Dimension, forme et surface). Les interactions de ces caractéristiques avec la phase liquide, déterminent l'activité, la plasticité, la compressibilité, le gonflement, et le comportement hydraulique des argiles.

La résistance au cisaillement peut dépendre de plusieurs paramètres en plus de la nature des sols et des efforts appliqués. De Bruyn et Thimus (1996) ainsi que Tinh, (2008) ont montré que la résistance au cisaillement de l'argile de Boom et de l'argile d'Opalinus varie en

fonction de la température. Ces matériaux deviennent généralement moins résistants et plus ductiles à des températures plus élevées.

Une tendance inverse par contre a été observée dans les travaux de Cekerevac et Laloui (2004) sur une kaolinite reconstituée et d'Abuel-Naga et al (2006.a, b) sur l'argile naturelle de Bangkok. Ce matériau a montré une augmentation de la résistance au cisaillement avec la température. Une observation similaire a été également effectuée par Abuel-Naga et al (2006.b) dans les cas d'essais non drainés sur des échantillons surconsolidés et normalement consolidés. Ceci ne peut être expliqué que par la structure interne et la composition minéralogique (chimique) des argiles (Boudllal, 2013).

- Les sables également ont fait l'objet de plusieurs recherches (sable d'Hostun, sable de Fontainebleau...). Ils ont été traités surtout du point de vue liquéfaction (Arab, 2008 ; Gajo et al, 2000) et cisaillement (Magnan, 1991 ; Coquillay, 2005) par contre leur compressibilité n'est généralement pas significative en tant que matériaux propres, bien que leur comportement peut être sensiblement compressible en présence de fines argileuses, (mélanges de sable, argile).

En se référant aux conditions de drainage, Dubois (2008)., dans son étude sur les sédiments marins a essayé de reproduire deux types de cisaillement en fonction du drainage. Il s'est basé sur la vitesse de cisaillement pour distinguer entre les deux types d'essais. Les essais drainés sont réalisés à une vitesse très lente (0,025 mm/mn), et les essais non drainés sont réalisés à une vitesse relativement rapide (0,6 mm/mn) ne permettant pas la dissipation de l'eau au cours du cisaillement.

Cependant, ce type d'essai (cisaillement non drainé à la boîte) est déconseillé par les recherches les plus récentes effectuées dans le domaine, du fait que les conditions non drainées ne sont pas garanties par le dispositif classique de cisaillement.

Dans le cas des sables, Algali et al (2007), ont réalisé des expériences à l'appareil triaxial sur le sable d'Hostun à l'état lâche saturé et en conditions non drainées. C'est des conditions rarement adoptées dans le cas des sables. Ils ont mis en évidence que, au point d'effondrement, l'augmentation de la pression n'est pas la cause mais une conséquence de l'effondrement.

3.8. Sols hétérogènes

Selon Kacprzak (2006), les mélanges de (sable, argile) sont également considérés comme étant des sols hétérogènes. Ce type de sol est couramment utilisé en génie civil. Ces mélanges (remaniés ou reconstitués) sont utilisés pour la réalisation de tapis d'étanchéité dans des projets de stockage de déchets. Ils sont employés pour la réalisation de digues ou de barrages. Ils peuvent être mis en œuvre en remblai ou en couche de forme dans des projets routiers. Les matériaux de ce type sont très souvent des constituants majeurs de nombreux dépôts naturels. Ils existent à l'état naturel dans les bassins de sédimentations en milieux fluviaux glaciaires mais également dans les fonds marins sous forme d'épaisses couches sédimentaires.

D'après Georgiannou et al (1990), la sédimentation d'une fraction sableuse, à travers une suspension de kaolinite, conduit à un matériau sensiblement moins stable qu'un sable obtenu

par sédimentation dans de l'eau claire. Le sable argileux ainsi obtenu se trouve dans un état de compacité plus lâche que celle d'un sable propre.

3.9. Sols hétérogènes, mélanges (sables-argile)

Le comportement hydraulique et mécanique de tel type de sols reste à ce jour mal appréhendé (Kacprzak, 2006). Les caractéristiques de ces sols sont souvent déterminées de manière simplifiée en fonction du pourcentage des différents constituants.

Les travaux de recherche effectués dans ce domaine, confirment sans doute que le comportement du sol dépend de la teneur en sable et en argile. Ainsi Martin et Lambe (1957), Faure (1978), Muondo-Ondoa (1979), Daskalova (1980), et Istvan (1990) définissent différents comportements pour des sols reconstitués suivant la teneur en sable et en argile. Ces auteurs montrent que les sols du point de vue compactage peuvent avoir un comportement :

- ✚ Sableux, s'ils contiennent plus de 90 % de sable. Dans ce cas, la densité du mélange dépend peu de la teneur en eau et l'optimum de densité est relativement faible.
- ✚ Sablo-argileux, s'ils contiennent entre 80 et 70 % de sable. L'optimum de densité est mieux marqué.
- ✚ Argilo-sableux, s'ils contiennent moins de 70 % de sable. Dans ce cas, la densité du mélange dépend fortement de la teneur en eau et la densité optimale est élevée.

L'arrangement des particules dépend des interactions entre les particules élémentaires individuelles, par exemple de l'interaction entre les plaquettes individuelles (figure I.14.a) ou entre de petits groupes des plaquettes (figure I.14.b). Lorsque les particules de silt ou de sable sont présentes dans le sol fin, de multiples possibilités de contacts entre les particules solides existent. Il a été constaté que, dans une argile limoneuse (silteuse), les particules de silt ou de sable sont souvent recouvertes par des plaquettes d'argile ou d'autres matières (clothed silt or sand particles) comme le montre la figure I.14.c.

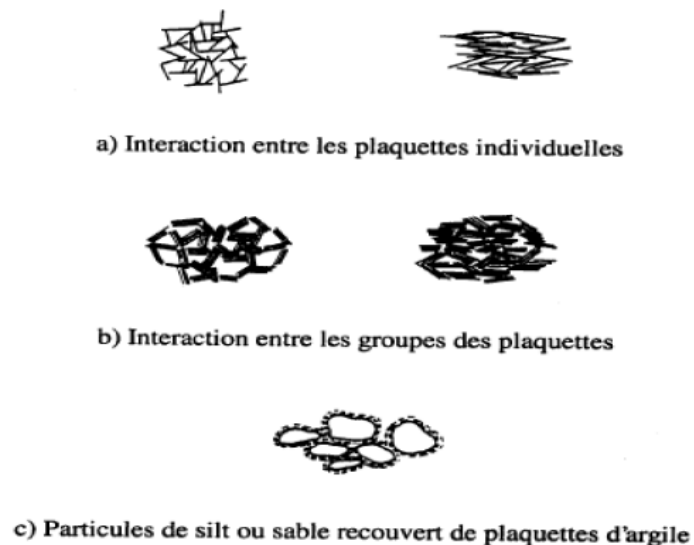


Figure I.14 : Arrangements des particules élémentaires, (Collins et al, 1974).

De nombreux modèles ont été employés pour décrire l'arrangement des particules élémentaires. Les plus représentatifs sont schématisés sur la figure (I.14), (Collins et al, 1974). Plusieurs plaquettes se groupent souvent et forment de grandes particules ayant une frontière physique plus ou moins claire, appelés agrégats. Leur forme dépend essentiellement de la concentration en électrolyte. Sont observés par exemple des ponts (ou des chaînes), des agrégations, des faisceaux entrelacés, des matrices, etc. Certains sont présentés schématiquement à la figure(I.15), (Collins et al, 1974).

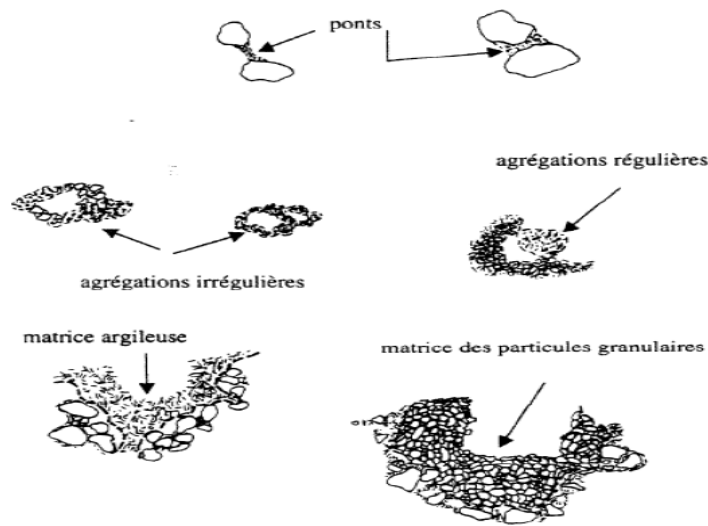


Figure I.15 : Assemblages des particules, (Collins et al, 1974).

Les ponts (ou les chaînes) sont des assemblages de particules formés entre des grains de silt et de sable. Ils relient les grains de silt ou de sable. Les agrégations sont des agrégats qui se comportent comme des unités individuelles. Les matrices sont essentiellement de deux sortes : matrice argileuse et matrice des particules granulaires.

3.10. Nature des espaces vides dans les sols en mélanges

Les espaces vides existent dans les sols en mélanges sous diverses formes. En général, ils sont classés en trois types :

- ✚ Les pores inter-élémentaires ;
- ✚ Les pores inter-agrégats ;
- ✚ Les pores intra-agrégats.

Les figures I.16, I.17 et I.18 montrent les types les plus fréquents de microstructures de sols (mélanges) sur la base de ces trois unités fondamentales (Alonso et al, 1987).

Le premier type représenté sur la figure I.6 est souvent présent dans des sols gonflants.

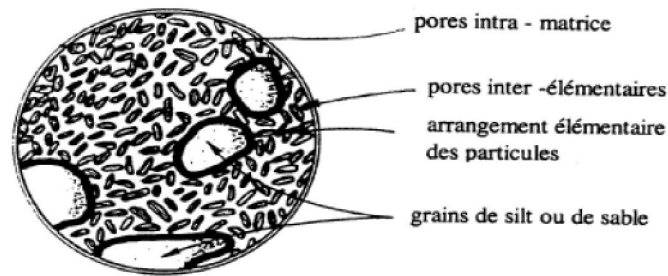


Figure I.16 : Microstructure d'une argile où les arrangements de particules élémentaires sont dominants dans la matrice.

Tandis que, le deuxième et le troisième type présentés sur les figures I.7 et I.8 respectivement, apparaissent régulièrement dans des sols manifestant des comportements d'effondrement lors du mouillage sous certaines charges.

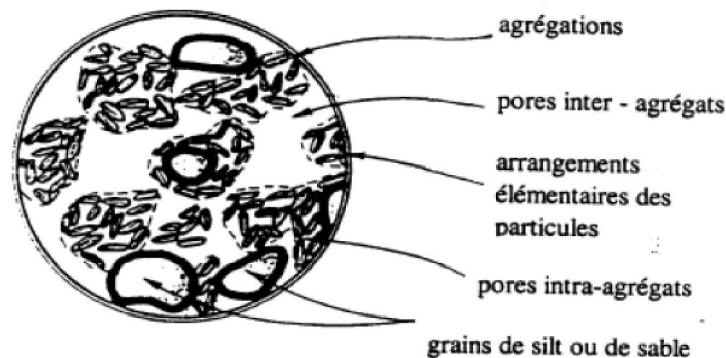


Figure I.17 : Microstructure d'une argile où les agrégats de plaquettes sont dominants.



Figure I.18 : Microstructure d'un sol fin où la matrice de sable ou de silt est dominante, avec les particules argileuses comme connecteurs entre les grains.

3.11. Arrangement des particules et des grains dans les sols hétérogènes

Thevanayagam et Liang, (2001), pensent que pour évaluer théoriquement les paramètres élastiques des sols hétérogènes, une description globale de l'arrangement des grains par l'indice des vides (e), ne convient pas. Ils proposent donc de distinguer l'arrangement des inclusions (e_c) de l'arrangement des grains de la matrice (e_m), et de définir un indice des vides

équivalent (e_{eq}). Ce paramètre est calculé à partir des différentes configurations théoriques d'arrangement dans le cas d'un milieu granulaire hétérogène (voir figure I.19).

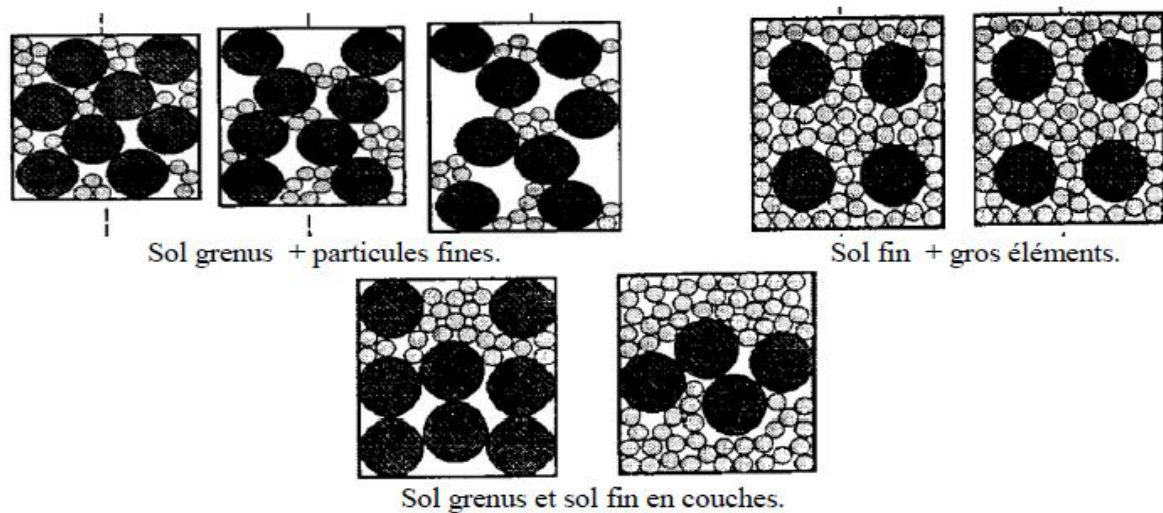


Figure I.19 : Différents types d'arrangements des constituants d'un sol granulaire hétérogène, (Thevanayagam et al, 2002).

4. Généralités sur les plastiques

4.1. Définition du plastique

On appelle plastique une matière synthétique constituée de macromolécules. Le terme « plastique » désigne une famille importante de plus de 700 types de matières fabriquées à partir du pétrole. Le pétrole est raffiné, distillé, ce qui permet d'obtenir des chaînes de molécules qu'on appelle les polymères. Pour leur donner les caractéristiques qui répondent à nos besoins, on y ajoute des éléments (chlore, azote, etc.) sous forme d'additifs ou adjuvants.

Le plastique est donc un matériau simple à fabriquer, stable, économique, solide, léger et résistant, facilement transformable et qui peut prendre toutes les formes voulues : le mot plastique vient en effet du grec plastikos qui signifie « malléable, qui peut être modelé ».

Matière plastique = résine de base + adjuvants + additifs

-Résine de base : c'est la matière de base, un mélange de molécules en longue chaîne qui se nomment « polymères »

-Les adjuvants et les additifs servent à améliorer l'aspect physique ainsi que les propriétés du plastique. Par exemple la solidité la couleur, la malléabilité, la résistance... etc.

4.2. Les différents types de plastique

Les plastiques peuvent être divisés en deux grandes familles :

- ✚ Les **thermoplastiques** : ce sont des plastiques qui ramollissent quand on les chauffe et qui durcissent à nouveau quand ils refroidissent (le préfixe thermo signifie « chaleur ») ; ex. la bouteille plastique pour l'emballage de l'eau
- ✚ Les **thermodurcissables** : ce sont des plastiques qui ne ramollissent plus sous l'influence de la chaleur une fois qu'ils ont reçu leur forme. ex. les résines époxy pour la fabrication de planches à voile, la bakélite pour les manches de poêles.

Le tableau suivant présente les différents types de thermoplastiques et leurs symboles, utilisation et caractéristiques :

Tableau I.7 : différents types de plastique et leurs utilisations courantes.
(Bureau, 2009)

Types de plastique (résine)	Sigle	symbole	Utilisations courantes	Caractéristiques ¹		
				T° d'utilisation limite (°C)	T° de fusion (°C) ²	Résistance à la traction (Mpa)
Polyéthylène téréphtalate	PET ou PETE		Bouteilles d'eau, de jus, de boisson gazeuse, de Windex ou de shampoing, autres contenants alimentaires comme les bouteilles de Ketchup ou d'huile et les pots de beurre d'arachides ou de mayonnaise	120	260	55-75
Polyéthylène haute densité	HDPE ou PÉhd		Bouteilles d'eau de javel, de shampoing ou d'autres produits nettoyants, contenants de pellicules photographiques, Ice pack, sacs biodégradables, seaux	90	134	20-40
Polychlorure de vinyle	PVC		Matériaux de construction, stores verticaux, boyaux d'arrosage	70-75	>140	10-60
Polyéthylène basse densité	LDPE ou PÉbd		Sacs à ordures ou sacs d'épicerie, pellicules extensibles, sacs de pain	80	Non disponible	5-16
Polypropylène	PP		Pots de yogourt ou de margarine, malles à linge	110	163	25-40
Polystyrène expansé (styromousse)	PSE		Contenants alimentaires et vaisselle pour emporter, glacières	85	110	Non disponible
Polystyrène	PS		Verres à bière et à vin jetables, ustensiles, godets de crème à café	75	110	20-35
Autres	Autres		Bouteilles en Nalgène, bouteilles d'eau de 18 litres réutilisables, plastiques compostables ou biodégradables	variable	variable	variable

Note 1 : Données tirées de Reyne (2006). Note 2 : Données tirées de Buekens In Scheirs and Kaminsky (2006)

4.2.1. Le PVC (Polychlorure de vinyle)

Le polychlorure de vinyle est un polymère thermoplastique dont la formule moléculaire est $-(CH_2CHCl)_n$. On l'obtient grâce à la polymérisation du chlorure de vinyle. Il est plus souvent utilisé pour les canalisations et autres tuyauteries.

Il a été découvert par accident à au moins deux occasions au cours du XIX^e siècle, d'abord en 1838 par Henri Victor Regnault et en 1872 par Eugen Baumann.

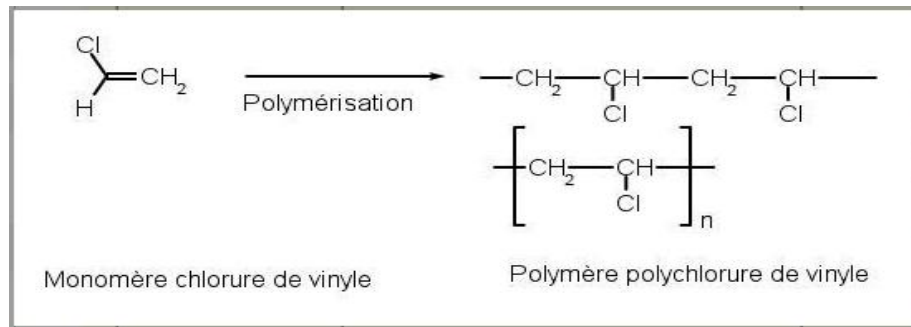


Figure I.20: la formule chimique du PVC.

🚦 **Avantage du PVC**

Le PVC est un matériau reconnu pour ses multiples avantages : inaltérable, robuste, isolant, il ne nécessite aucun entretien. Recyclable, il est parfaitement écologique pour un meilleur respect de l'environnement.

- Résistance aux produits chimiques
- Qualité physiologique
- Résistance au vieillissement
- Raideur et stabilité
- Résistance à la déformation sous effet calorifique
- Difficilement inflammable
- Isolation électrique
- Faible densité
- Surface lisse et exempte de pores
- Facilité de transformation.

4.2.2. Le Polyéthylène (PE)

Le PE est un des polymères les plus simples et les moins chers. C'est un plastique inerte et le plus employé, il compose notamment de la moitié des emballages. Suivant la méthode de polymérisation, le PE peut être classé en plusieurs types :

4.2.2.1. Polyéthylène Basse Densité ou PEBD (LDPE en anglais pour Low Density Polyethylene) inventé en 1933 par E.W Fawcett et R.O Gibson.

✚ Avantages du PEBD :

- Solidité, résistance aux chocs et à l'abrasion ;
- Inertie chimique et non toxique ;
- Résistance à la corrosion et à l'oxydation ;
- adaptabilité ;
- Isolation électrique;
- 100% recyclable.

4.2.2.2. Polyéthylène Haute Densité ou PEHD (HDPE en anglais pour High Density Polyethylene) synthétisé en 1953 par le chimiste allemand Karl Ziegler.

4.3. Propriétés des matières plastiques

Les matières plastiques présentent de nombreuses propriétés intéressantes, elles se caractérisent par une protection physique et chimique telles que l'imperméabilité, la résistance chimique aux solvants. Elles ont la propriété d'avoir une faible masse volumique et donc une forte légèreté. Le plastique est aussi connu pour sa résistance au choc, son excellente ténacité, et enfin aucun phénomène d'oxydation d'où sa très grande durée de vie pouvant atteindre les 450 ans.

Le tableau suivant englobe les caractéristiques de chaque type de matière plastiques :

Tableau I.8 : Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques polymères (Fontanille, 2014).

Type	Légèreté	Dureté	Tenue au choc	Résistance au froid	Résistance à la chaleur	Résistance aux solvants organiques	Module d'élasticité E (GPa)	Densité
PEHD	Très bon	Médiocre à assez bon	Très bon	Bon	Assez bon	Très bon	0.8-1.2	0.95
PVC	Assez bon	Assez bon	Faible à très bon	Médiocre	Faible	Faible à bon	2.4	1.38
PEBD	Très bon	Faible à médiocre	Médiocre à très bon	Bon	Médiocre	Très bon	0.12-0.3	0.92
PP	Très bon	Médiocre	Faible à assez bon	Médiocre	Assez bon à bon	Bon	1.3	0.91
PS	Bon	Assez bon à bon	Médiocre	Bon	Assez bon	Faible à bon	3.2	1.05

4.5. Le recyclage des plastiques

Les thermoplastiques se distinguent par leurs propriétés de recyclage. Ils ont la possibilité de conserver leurs propriétés plastiques contrairement aux thermodurcissables et les élastomères.

Le signe appelé sigle Ruban de Möbius, signifie que le matériau concerné a la propriété de recyclage

Le recyclage des plastiques est un moyen de protection de l'environnement, et ce par la réduction de déchets. Etant un dérivé du pétrole la réduction du plastique et ses déchets représentent un intérêt environnemental et économique, sachant que le recyclage d'une tonne de plastique équivaut à une économie de 700 Kg de pétrole brut.

Les produits fabriqués à base de plastiques recyclés couvrent plusieurs domaines : des tuyaux de drainage, des cassettes audio et vidéo, des casques de vélo, il existe même des ordinateurs en plastique recyclé, c'est le défi qu'a relevé la firme IBM.

4.5.1. Le recyclage en Algérie

Des travaux ont été réalisés par Boukhari, Kebaili et Boucherba (2015) de l'Université Kasdi Merbah de Ouargla, qui a pour but d'évaluer l'importance et les conséquences d'utilisation des déchets plastiques broyés de polyéthylène à haute densité (PEHD) comme un polymère dans le béton bitumineux. Le polyéthylène à haute densité PEHD est la matière la plus utilisée dans la fabrication des produits en plastiques, les sacs, les bouteilles et d'autres produits, le PEHD est disponible en abondance, avec plusieurs bonnes caractéristiques, qui les rendent aptes à la construction des routes bitumineuses. L'utilisation de polyéthylène à haute densité PEHD va améliorer certaines propriétés de l'enrobé et également résoudre les problèmes environnementaux. Les résultats obtenus sont satisfaisants et confirment que l'utilisation en PEHD en béton bitumineux peut améliorer certaines caractéristiques. (Ouali, 2017)

4.5.2. Les étapes de recyclage du plastique

Le recyclage se fait en plusieurs étapes : tri, lavage, séchage, broyage, extrusion, granulation.

Les unités de régénération peuvent être plus ou moins avancées dans leur processus de régénération et produire un sous-produit recyclé plus ou moins élaboré. Une unité de régénération n'est pas obligée d'avoir en charge toutes les étapes de production, on peut trouver un acteur pour chaque type d'opération.

On distingue deux grandes phases dans le processus de régénération :

1 - Tri, lavage, séchage : cette étape consiste à présenter un déchet plastique non-souillé et trié par type et qualité de résine pour les opérations de broyage, granulation, extrusion. Ces opérations peuvent être réalisées sans machine.

2 - Broyage, extrusion, granulation : cette étape va apporter une grande valeur ajoutée en transformant le déchet plastique en sous-produit commercialisable auprès de l'industrie plastique. Pour cela il est nécessaire de s'équiper en machine, dont la consommation électrique n'est pas négligeable, surtout pour l'extrusion.

La régénération du plastique permet de traiter tous les thermoplastiques avec le même équipement et selon le même procédé, seuls les paramètres de réglage des différentes machines changeront en fonction du plastique traité (température, vitesse de rotation de l'extrudeuse,...).

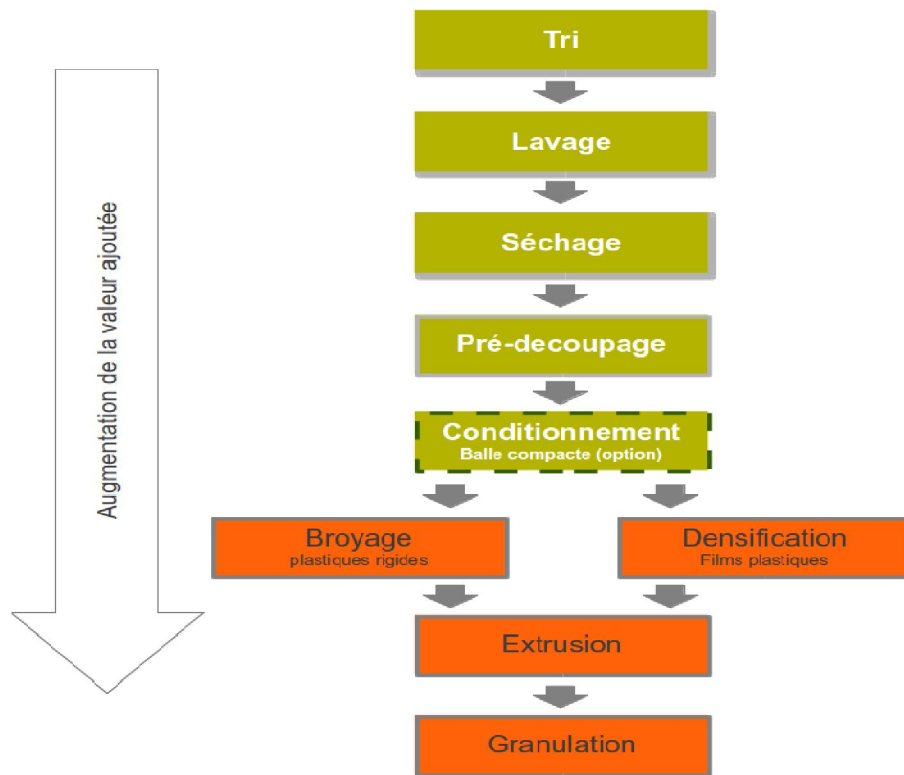


Figure I.21 : Schéma du processus standard de régénération.

12. conclusion

L'analyse générale de la structure des argiles et les sables illustre la complexité de leur comportement. La nature et la teneur des différentes fractions constituant les mélanges, peuvent influencer sensiblement sur leur comportement.

Les matériaux sélectionnés (argile sable et plastique recyclé) présentent plusieurs avantages tant sur le plan économique et environnemental, à savoir la disponibilité, facilité d'extraction ou de collecte dans le cas du plastique, facilité de préparation et enfin économie de transport et de temps car il s'agit de matériaux locaux.

CHAPITRE II

TECHNIQUES DE STABILISATION DES SOLS

CHAPITRE II**TECHNIQUE DE STABILISATION DES SOLS****1. INTRODUCTION**

La stabilisation est pratiquée de longue date. On a pu envisager l'application de la stabilisation à la réalisation de pistes, de routes, pistes d'envol pour avion etc....

Le problème que pose l'utilisation traditionnelle de la terre, est donc un problème de durabilité. C'est ce qui explique en grande partie l'abandon de ce matériau primitif malgré son excellent avantage d'isolation thermique. Alors le recourt à la stabilisation pour améliorer les caractéristiques de la terre est le moyen qui attire l'attention des spécialistes.

2. Définition de la stabilisation

Stabiliser la terre, c'est modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière (Houben et Guillaux, 1995). Et, on appelle stabilisation des sols, l'ensemble des procédés permettant d'améliorer leurs caractéristiques (**Centre de recherche et d'application- Terre, 1979**).

3. Principaux objectifs de la stabilisation

La stabilisation répond à un certain nombre d'objectifs qui sont:

- + réduire le volume des vides entre les particules solides (porosité).
- + colmater les vides qui ne peuvent être supprimé (perméabilité).
- + créer des liens ou améliorer les liaisons existantes entre les particules (résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer les caractéristiques du matériau et de :

- + Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques: augmenter la résistance à la compression simple à l'état sec, à l'état humide et la résistance à la traction et au cisaillement;
- + Obtenir une meilleure cohésion ;
- + Réduire la porosité et les variations de volume : gonflement-retrait à l'eau ;
- + Améliorer la résistance à l'érosion du vent et de la pluie : réduire l'abrasion de surface et l'imperméabilisation ;
- + Réduire sa sensibilité à l'eau : gonflement et retrait. Il est entendu que les améliorations obtenues doivent avoir un caractère irréversible (Houben et Guillaux, 1995).

4. Différents procédés de stabilisation

Un procédé de stabilisation peut être défini comme une méthode physique, physico-chimique, ou chimique permettant à un sol, à une terre, de mieux satisfaire aux exigences qu'impose son utilisation dans un ouvrage (**Centre de recherche et d'application- Terre, 1979**).

Pour résoudre un problème de stabilisation, il sera donc nécessaire de connaître :

- + Les propriétés de la terre à traiter,
- + Les améliorations souhaitées,
- + Les produits, matériaux, ou procédés utilisables,
- + Les diverses technologies de mise en œuvre

- ✚ Les exigences de réalisation de l'ouvrage ; tels que coûts et délais.

Les différents procédés de stabilisation sont décrits dans le tableau qui suit d'après Houben et Guillaud (1995).

Tableau II.1 : Moyens de stabilisation des terres remaniées. (Houben et Guillaud, 1995)

Stabilisant		Nature	Procédé	Moyens	Principe
Sans apport de stabilisant			Mécanique	Densifier	Créer un milieu dense qui bloque les pores et les canaux capillaires
Avec apport de stabilisant	Stabilisants inertes	Minéraux	Physique	Armer	Créer une armature omnidirectionnelle qui réduit le mouvement
		Fibres			
	Stabilisation physico-chimique	Liants	Chimique	Enchaîner	Créer un squelette inerte qui s'oppose à tout mouvement
		Hydrauphobants		Liaisonner	Former de liaisons chimiques stables entre les cristaux d'argile
				Imperméabiliser	Entourer les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et canaux
				Hydrofuger	Éliminer au maximum l'absorption et l'adsorption d'eau

5. Différentes techniques de stabilisation

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

- ✚ la stabilisation mécanique ;
- ✚ la stabilisation thermique ;
- ✚ la stabilisation chimique, (par additifs). (BABOURI, 2008)

5.1. Stabilisation mécanique

5.1.1. Compactage (densification)

Le compactage est une étape importante de la stabilisation. Un simple compactage permet de réduire la porosité du sol en expulsant l'air emprisonné.

Les caractéristiques optimales de compactage du sol sont déterminées par l'essai Proctor normal. Les caractéristiques mesurées, c'est-à-dire la teneur optimale en eau (W_{opm}) permettant l'obtention de la densité sèche du sol la plus élevée (ρ_{opm}) est utilisée lors des études de la stabilisation et aussi lors du chantier.

La granulométrie, la morphologie des particules du sol, l'abrasivité et la teneur en argile, ont une influence sur le comportement du sol lors du compactage. En raison de leur petite taille (quelques microns) les particules d'argiles permettent d'augmenter la densité sèche du sol en comblant sa porosité. Le comportement du sol dépend de la teneur en argile.

Dans le cas des sols fins, un simple compactage ne permet pas de garantir les caractéristiques de la couche de forme. La cohésion est avant tout liée à la présence d'eau : c'est un phénomène de tension superficielle qui lie les particules du sol. Les caractéristiques de la couche de forme sont donc tributaires de la teneur en eau du sol. (Belabbachi, 2014)

En même temps le compactage a des effets sur les propriétés physiques suivantes :

- ✚ La masse volumique du matériau sec ;
- ✚ La structure du sol ;
- ✚ La résistance au cisaillement et les déformations.
- ✚ La compressibilité ;
- ✚ La perméabilité du sol.

Enfin, le compactage en réduisant la porosité du matériau, en améliore les caractéristiques physiques et mécaniques. Toute construction en terre se dégrade à la longue sous l'action de l'eau ; ce qui oblige à les protéger et montre l'intérêt des produits qui, ajoutés à la terre, réduisent sa sensibilité à l'eau : les stabilisants (Geddache, 2012).

5.1.2. Drainage

C'est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés ; comme les tranchées drainantes, drains de carton, drains de sables verticaux. (Belabbachi, 2014).

5.1.3. Substitution

C'est la suppression de la couche du sol gonflant. C'est la solution la plus évidente. Si la couche a une grande épaisseur, la suppression totale ne peut être envisagée. Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec des sables, ou autres matériaux graveleux. C'est une solution coûteuse. (Belabbachi, 2014).

5.1.4. Application de fortes pressions

Le gonflement peut être évité en appliquant au sol des pressions supérieures à la pression de gonflement. Il s'agit de pression de gonflement réelle, c'est-à-dire correspondant à la pression limite minimum nécessaire pour empêcher le sol de gonfler par des chemins de contraintes réelles, in situ. Cette pression peut être appliquée soit par l'édifice lui-même, soit par des surcharges qui sont généralement des remblais des sols non gonflants (Mouroux, 1969).

5.1.5. Préhumidification

Il s'agit de créer ainsi un maximum de gonflement avant construction par une augmentation de teneur en eau du sol. Deux techniques ont été utilisées (BOJANA DOLINAR, 2006), cité par (BELABBACHI, 2014)

- ✚ Simple arrosage par jet ;
- ✚ Création de bassins au-dessus du sol gonflant, (solution la plus utilisée).

Ce dernier est comptabilisé comme étant diminué du soulèvement global disponible. De ce fait, si théoriquement, une haute teneur en eau est maintenue dans le sol, il n'y aura plus de soulèvement de la structure. La mise en œuvre de cette technique est plutôt recommandée en

fin de la saison pluviale. La teneur en eau est ensuite maintenue par arrosage artificiel. La réalisation de la construction ne commence qu'une fois le gonflement du sol est stabilisé. Cette technique est possible dans les régions à grande pluviométrie et dans les régions dont l'arrosage artificiel peut être garanti (**Zenkhri, 2009**).

Cette technique est destinée pour les structures légères généralement fondées sur radier général. Elle est utilisée pour la stabilisation du sol sur une profondeur d'environ 1.2m. Selon Chen (1988), le sol ne peut être considéré totalement stabilisé qu'après 10 ans de préhumidification. Ceci car la couche de sol sous-jacente à celle préhumidifiée absorbe continuellement de l'eau (**Zenkhri 2009**).

5.1.6. Utilisation de fondations et d'édifices spéciaux

Elles sont utilisées, soit pour réduire le gonflement, soit pour dissiper les pressions du gonflement. L'étude la plus intéressante était faite par JENNING et EVANS cité par (BELABBACI, 2014). Elle donne, en effet, plusieurs types de construction suivant le soulèvement estimé.

Des renforcements en acier des murs pour assurer une plus grande rigidité ;

- ✚ Des « constructions Split », c'est-à-dire, conçues pour assurer le déplacement sans dommage d'une partie de l'édifice ;
- ✚ Des reports de charges sur des semelles isolées ;
- ✚ Des pieux fondés sur une couche peu gonflante.

Par ailleurs, on peut placer un tapis graveleux entre l'argile et la construction pour amortir l'effet du gonflement.

5.2. Traitement thermique

La résistance des argiles peut être progressée et ceci se fait par une augmentation de la température et une réduction de la répulsion électrique entre les particules. Avec l'effet de la chaleur, un écoulement d'eau interstitielle est provoqué qui est due au gradient thermique appliqué (Draou et Nebati, 2016).

5.3. La stabilisation physique

L'objectif des stabilisants chimiques inertes est de réduire la sensibilité du sol à l'eau par conséquent réduire le phénomène de retrait gonflement.

Il existe deux procédures :

- ✚ Par changement de la granulométrie du sol en rajoutant des stabilisants tel que le sable, plastique et solution saline ;
- ✚ Par création d'armatures dans le sol en rajoutant des fibres végétales ou animales.

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées en intervenant sur la texture du mélange constitué de fraction de grains différents.

Il s'agit d'une stabilisation avec apport de stabilisants chimiquement inertes. Ces stabilisants agissent essentiellement sur la composition granulométrique du matériau, donc sur les propriétés mécaniques. Généralement, ils sont plus ou moins stables, leur friction interne est forte à l'état sec ils n'ont aucune cohésion ni plasticité interne.

Ces stabilisants ajoutés à des sols réduisent les effets néfastes du retrait. On peut évoquer :

5.3.1. Les fibres : Cette méthode de stabilisation est intéressante car elle est adaptable à différents modes de mise en œuvre de la terre, à l'état liquide ou à l'état plastique et même par compression. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait.

Les fibres peuvent être utilisées en combinaison avec d'autres stabilisants, avec le ciment, avec la chaux ou le bitume.

On utilise trois variétés de fibres lors de la stabilisation :

- Les fibres végétales : Pailles de toutes espèces : orge, seigle, blé, froments, escourgeons, lavande et balle de céréales telles que riz et orge, etc
- Les fibres animales : poils et crins du bétail.
- Les fibres synthétiques : cellophane, aciers, fibres de verre.

Les fibres végétales ou animales sont très efficaces peu chère et que l'on utilise dans la confection des briques.

Le rôle des fibres est d' :

- ✚ Empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions due au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau.
- ✚ Accélérer le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres. Inversement, la présence de fibres augmente l'absorption en présence d'eau.
- ✚ Alléger le matériau. Le volume de paille est souvent très important, allégeant la masse volumique du matériau et améliorant ses propriétés d'isolation.
- ✚ Augmenter la résistance à la traction ; sans doute le plus grand intérêt des fibres.

Pour les sols argileux un bon compactage est absolument nécessaire et l'adjonction de stabilisants inertes permet toujours d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques acceptables. Cependant ils ne réduisent guère la sensibilité à l'eau ; sous l'action de laquelle une dégradation du matériau est généralement très rapide. Dans ces conditions, on a recours à la stabilisation physico-chimique. (Houben et Guillaux, 1995).

5.3.2. Stabilisation par ajout du sable

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'ajout de sable sur le gonflement. Nous citerons certaines études réalisées:

- SATYANARAYANA, 1969, cité par ALLAM ,2011 a étudié le comportement de l'argile de black Cotton au sud de l'Inde sous forme de mélange avec le sable, et sous forme de couches. Il a constaté que la pression du gonflement est réduite par le simple ajout de faibles pourcentages de sable. Plus le pourcentage de sable augmente, plus la réduction de la pression diminue (différence marquée à partir 50% de sable). L'insertion de couches de sables (différentes positions avec l'argile), réduit la pression du gonflement en proportion appréciable due principalement à la capacité du sable à absorber le gonflement de l'argile. Cette capacité du sable dépend de la facilité de la couche de sable avec laquelle elle se déforme par compression ou, par mouvement latéral.
- KOMORNIK et IIVNEH, 1969, cité par ALLAM ,2011 ont étudié l'influence de la granularité des constituants sur les caractéristiques des argiles gonflantes. Pour cela, ils ont utilisé des mélanges argile - sable et argile- marbre à différents pourcentages. Il a été constaté que la diminution du taux du gonflement des différents mélanges est due à la faible densité de l'argile et à l'augmentation du matériau inerte dans les mélanges. Ainsi, ils ont constaté qu'il y a une influence du taux de l'humidité de l'argile sur la valeur de la pression du gonflement.

- MORAUX, 1969 a montré dans sa thèse que, si la couche gonflante est d'une grande épaisseur, de manière à ne pas pouvoir l'excaver complètement alors, il faut excaver jusqu'à une certaine profondeur puis, remblayer pour rétablir les conditions de pression initiale. Pour cela, souvent c'est le sable qui est utilisé. Le bas du remblai est faiblement compacté et ce pour deux raisons :
 - ✚ Le haut du sol gonflant serait très compact, et par conséquent son potentiel de gonflement est élevé.
 - ✚ Le bas du remblai peut alors « encaisser » un gonflement éventuel.
- SEED et al, 1969, cité par ALLAM, 2011 ont retenu trois paramètres significatifs de l'aptitude au gonflement d'un sol : Le pourcentage d'éléments argileux inférieur à 2μ et leur nature minéralogique, l'indice de plasticité et l'indice de retrait. Les auteurs ont mesuré le potentiel de gonflement de sols artificiels préparés en Mélangeant des minéraux argileux avec diverses quantités de sables. Ce mélange permet de diminuer le pourcentage. Une partie de l'étude d'El SAYED et d'EL SOHBY, 1981, cité par ALLAM, 2011 a porté sur le traitement d'un sol argileux gonflant par l'ajout de sable et de limon à différentes concentrations. Ils ont constaté que la grosseur de la fraction non argileuse a une influence sur le gonflement. C'est-à-dire, que les particules fines provoquent un gonflement important. En plus, la pression de gonflement pour les mélanges argile- limon était plus importante que celle des mélanges argile-sable.
- BENGERRA, 2004 a tenté de réduire le gonflement des argiles de la région d'Oran, par l'ajout de sable de carrière à différents granulométrie et pourcentages (10 et 40%).il ont constaté que le sable de carrière est un bon réducteur des limites de consistance par conséquent du potentiel de gonflement. Plus le sable ajouté est grossier, plus la réduction du gonflement est importante.

5.3.3 Stabilisation par les sels

Les sels sont des corps résultant de l'action d'une acide sur une base, qui permettent de donner des composés cationiques pour éviter les variations de la teneur en eau dans un sol et quelques soient les conditions extérieurs pour ce sol, il reste insensible à l'eau.

Dans le domaine de génie civil, les sels sont habituellement utilisés pour diminuer le gonflement car ils agissent sur l'équilibre de la pression osmotique et assurent une stabilisation des sols gonflants.

L'absorption d'un produit hydrophobant s'explique par deux effets :

- ✚ Réduction temporaire ou définitive de l'affinité du sol pour l'eau ce qui a pour conséquence d'augmenter la résistance mécanique du sol donc la réduction du gonflement ;
- ✚ Diminution de la structure microscopique du sol (A.BEKKOUCHE).
- ✚ Le principe de base est l'augmentation de la concentration ionique de l'eau libre et l'atténuation du phénomène d'échange. C'est une technique utilisée surtout dans les pays développés, en particulier aux Etats Unis.
- ✚ Nous indiquerons quelques exemples d'utilisation de ces produits servant à la stabilisation des sols argileux :
- ✚ Dider (1972), s'est penché dans ses recherches sur l'influence des sels sur la pression du gonflement et le gonflement libre de la montmorillonite. Il a donné des relations exprimant le gonflement en fonction du pourcentage théorique d'éléments inférieurs à

2μ et de l'indice de retrait de la montmorillonite pour divers fluides hydratants, cité par (BULTEL, 2001).

- ✚ Abou-Bekr Nabil et al, (2004), ont étudié l'effet des sels (KCl, Na Cl, CaCl₂ et (NH₄)₂ SO₄) sur deux argiles, la première est une argile naturelle intacte extraite du site de Mansourah (Banlieue Ouest de la ville de Tlemcen) et la deuxième est une Bentonite de MAGHNIA (Située à 60 km à l'Ouest de Tlemcen) (ABOUBEKR, 2004).

5.4. Stabilisation chimique (physico-chimique)

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées par l'ajout de certains additifs. Ces derniers sont classés en deux grandes familles

- ✚ les hydrophobants ;
- ✚ les liants. (BEKKOUCHE et al, 2001)

5.4.1. Hydrophobants

Les hydrophobants sont des produits dérivés amines des composés cationiques (par exemple: les amines aromatiques, les amines aliphatiques,). Les caractéristiques des hydrophobes permettent les variations de la teneur en eau en rendant le sol insensible à l'eau quelles que soient les conditions extérieures. L'absorption d'un produit hydrophobe se traduit par deux effets :

- ✚ diminution momentanée ou définitive de l'affinité du sol pour l'eau ; Ce qui a pour conséquence d'accroître la résistance mécanique du sol et la réduction du gonflement.
- ✚ diminution de la structure microscopique du sol (Belabbachi, 2014).

5.4.2. Liants

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques et les liants organiques.

Le schéma suivant donne les principaux liants existants dans l'industrie.

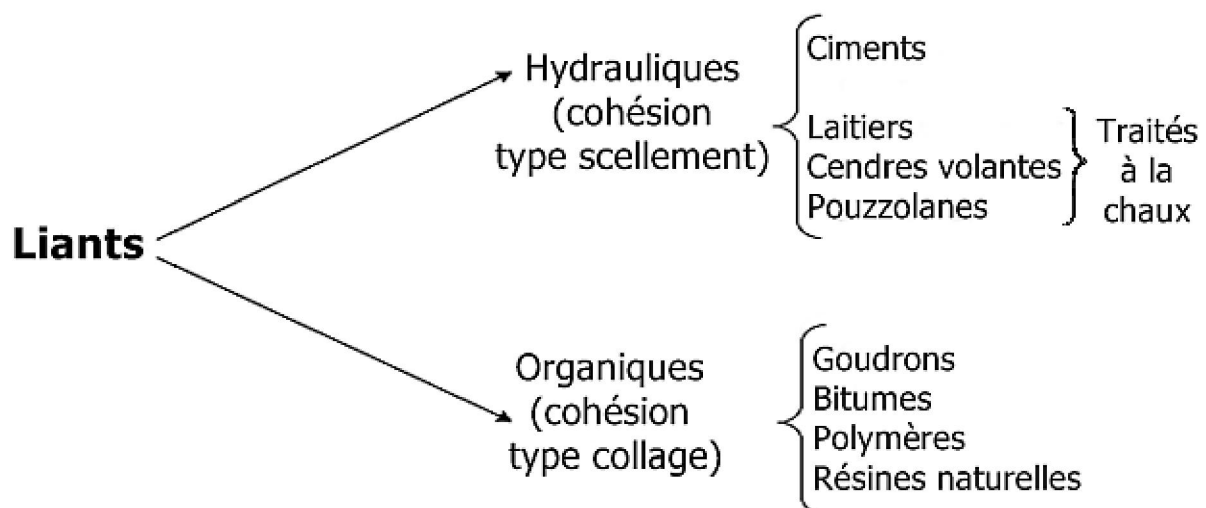


Figure II.2: Classifications des liants (LIVET M, 1990).

5.4.2.1 Liants hydrauliques

Ce sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le squelette minéral. Ils sont tous à base de chaux qui réagit avec l'argile par :

- ✚ Echange cationique ;
- ✚ Flocculation et agglomération ;
- ✚ Carbonations ;
- ✚ Réaction pouzzolanique.
- ✚ Ces réactions se traduisent par :
 - ✚ Une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et une diminution de la sensibilité à l'eau par flocculation et échange cationique.
 - ✚ Une réaction lente produisant les matériaux cimentant. C'est la réaction pouzzolanique (Bellabachi, 2014).

5.4.2.1.1. Stabilisation par ajout du ciment

L'action, de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température (JOHNSON, 1960). De plus, la présence de la chaux dans les ciments provoque des réactions d'échange. Les pourcentages utilisés varient, comme pour la chaux, de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans le traitement de sols de surface (THOMAS et al, 2002).

5.4.2.1.2. Stabilisation par la chaux

La stabilisation par ajout de chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue. L'utilisation de cette technique permet :

L'incorporation de la chaux génère immédiatement

- ✚ Diminution de la teneur en eau naturelle ;
- ✚ Modification des caractéristiques de la fraction argileuse du sol. Et elle génère à long terme
 - ✚ le durcissement ou cimentation du mélange (action pouzzolanique) ;
 - ✚ Neutralisation de l'acidité du milieu ;
 - ✚ insensibilité à l'eau et au gel.

5.4.2.1.3. Stabilisation aux cendres volantes et pouzzolane

Les cendres volantes sont considérées comme une pouzzolane artificielle, elles sont produites dans les centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre.

Dans la stabilisation des sols, les cendres volantes s'emploient dans une large gamme comme telle avec de la chaux ou le ciment à cause de leurs caractéristiques.

Le traitement par les cendres volantes peut efficacement diminuer le potentiel du gonflement des argiles fortement plastiques et éviter le gonflement sous des pressions de base plus petites. L'addition des cendres volantes à l'argile réduit considérablement sa perméabilité. Par conséquent. Tout dépendant du type de sol, l'addition de cendres volantes et de chaux peut donner de meilleurs résultats qu'avec la chaux seule (Davidson, 1962). Ainsi, un mélange de cendres volantes et de chaux semble avoir les propriétés d'un liant hydraulique, soit d'être capable de durcir non seulement dans l'air, mais également dans l'eau (Lavet, 1997). Avec un

bon dosage. L'addition des cendres volantes peut augmenter les propriétés mécaniques d'un sol notamment sa résistance au cisaillement

5.4.2.2. Liants organiques

Ce sont des produits de type colle, c'est à dire des composés organiques susceptibles d'une bonne adhésion au squelette.

On distingue deux sortes :

- + Les mono-composants (un seul constituant) ont un caractère thermoplastique, ce sont par exemple les bitumes de pétrole, les goudrons et les brais de houille.
- + Les bi-composants (deux constituants) sont à mélanger au moment de la mise en œuvre.

Le résultat est intermédiaire entre le collage thermique des mono-polymères, des résines ou des dopes. L'action de ces produits donne au sol des propriétés hydrophobes qui dépendent de l'enrobage des particules du sol par le liant. L'inconvénient majeur de ces liants organiques est leur biodégradabilité sous des climats tropicaux.

En génie civil, On utilise les liants organiques dans trois domaines principaux :

- + Pour la réalisation de revêtement routiers (enrobés pour bétons bitumineux, enduits superficiels, couches de base de type grave-bitume) ;
- + Pour la réparation d'ouvrages en béton hydraulique fissuré, le ragréage des surfaces ; pour l'assemblage par collage de pièces en béton hydraulique manufacturé, voir même pour la réalisation d'éléments de construction en béton de résine ;
- + Pour la protection des aciers par peintures, le marquage routier (signalisation horizontale) et la réalisation d'étanchéité (de tablier d'ouvrage ou de cuvelages), où les propriétés hydrophobes du liant sont utilisées conjointement à ses propriétés agglomérant (Draou et Nebati, 2016).

5.4.2.2.1. Stabilisation par polymères

Les polymères sont attirés par la surface des argiles quand ils portent des charges positives, et par les extrémités des feuillets quand les charges qu'ils portent sont négatives. La grande taille de ces molécules, permet une sorte d'encapsulage qui limite l'hydratation ultérieure de l'argile (Belabbachi, 2014)

HACHICHI et al 2005, cité par ALLAM, 2011, ont traité des argiles de Sidi Chahmi et de Mers El Kébir en présence des Polymères ils ont conclu qu'une forte concentration en polymères a pour effet de diminuer le gonflement final.

Les polymères utilisés à différentes concentrations sont en nombre de quatre :

- + Carboxyl methyl cellulose low viscosity : CMC LV (2, 4, 6, 8 g /l);
- + Carboxyl methyl cellulose low viscosity treated : CMC LVT (2, 4, 6, 8 g /l);
- + Carboxyl methyl cellulose high viscosity : CMC LVT (1,3, 4.5 g /l);
- + Hydroxyle éthyle cellulose : NATRASOL HEC (1, 2,4 g/l).

5.4.2.2.2. Le bitume

Le bitume désigne un produit composé d'au moins 40% d'hydrocarbures lourds et de filler. Pour être utilisable, le bitume doit être chauffé ou mélangé à des solvants, donnant alors des bitumes fluidifiés ou des cut-back, ou dispersé dans de l'eau en émulsion. Les deux dernières préparations sont celles qui sont employées en stabilisation.

L'emploi du bitume comme stabilisant est très ancien. L'historien grec Hérodote évoque son emploi à Babylone au VI^{ème} siècle avant notre ère pour la confection du mortier de pose de briques crues moulées.

La stabilisation d'une terre au bitume porte sur les particules fines (argiles et limons) qui sont les éléments instables en présence d'eau. Ainsi la stabilisation de la partie argileuse suffit à stabiliser l'ensemble de la terre.

Le bitume fluidifié ou en émulsion se présente sous la forme de globules microscopiques en suspension dans un solvant ou l'eau. Après mélange du liquide au sol, le solvant s'évapore, les globules de bitume s'étirent en films très fins, forment un revêtement solide adhérent à la surface des particules de sol qu'il enrobe, ainsi, il réduit la sensibilité à l'eau et augmente légèrement la résistance à la compression humide : une fois sec, le matériau aura pratiquement les mêmes caractéristiques mécaniques que le sol non traité. Cependant, les particules d'argile ne peuvent plus absorber d'eau (ni perdre leur cohésion), le sol est donc plus résistant à l'eau.

La présence, dans la terre, de matières organiques et sulfates gêne l'efficacité de la stabilisation au bitume car leur adhérence aux particules nuit à l'adhérence du bitume. Les matières organiques acides (terre de forêts) sont très néfastes. Les matières organiques neutres et alcalines des régions arides et semi-arides ne sont pas particulièrement nuisibles. Les sels minéraux sont aussi très néfastes.

Les effets du bitume se résument en ce qui suit :

Le bitume provoque une baisse de la densité et accroît la teneur en eau optimale en liquide (eau+bitume).

La résistance à la compression ; à l'état sec elle augmente avec la proportion de bitume jusqu'à un certain seuil au-delà duquel elle chute dangereusement car le bitume en excès joue le rôle de lubrifiant, une fois l'enrobage idéal réalisé. A l'état humide la résistance croît régulièrement avec la quantité de bitume, indépendamment de la résistance à sec.

Absorption : elle est fonction de la teneur en eau durant le malaxage et devient très faible à partir d'un certain seuil qu'il convient de déterminer. Après un séchage de quelques jours, l'absorption d'eau reste stationnaire dans le temps.

Gonflement : il est fonction de la teneur en liquide au malaxage. Plus le malaxage est effectué à l'état liquide, moins on observe le gonflement.

Ce matériau nécessite un moyen de chauffage onéreux. Il a pour effet de relier entre elles les particules du matériau terre par une fine couche empêchant ainsi tout contact entre l'eau et les particules argileuses. Cet ajout diminue la résistance mécanique du matériau terre. La couleur sombre qu'il confère aux blocs traités porte atteinte à leur esthétique (Geddach, 2012).

Tableau II-2 : avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées
(Ferrah, 2006)

Techniques	Procédés	Avantages	Inconvénients
Stabilisation mécanique	Compactage	• Le compactage est le plus économique • Réduire le potentiel expansif	Il faut une grande quantité d'eau. (compacter au-dessus de l'optimum avec une w_n élevée)
	Substitution		• L'épaisseur de la couche. • Disponibilité du matériau
	Pré-humidification		• Le temps de l'opération. • La distribution uniforme de w_n
Amélioration par congélation	Circulation d'un fluide froid (azote liquide) dans des tubes	Lorsqu'aucune solution n'est possible	• La réalisée le plus rapidement possible. • Il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.
Stabilisation thermique	Augmenter la température	Réduire la répulsion électrique entre les particules.	Très coûteuse.
Stabilisation chimique (Par ajout de matériaux)	Les sels	• Augmenter la concentration ionique de l'eau libre. • Réduire le phénomène d'échange	Le choix d'un type, de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (Valence et rayon du cation).
	Ciment	• Augmenter la résistance. • Diminuer la plasticité. • Réduire le potentiel de variation de volume. • Augmenter la limite de retrait	Utilisation d'un dosage important
	La chaux	• Diminuer la plasticité, la densité sèche • et la pression du gonflement. • Augmenter la résistance et w_{opt}. • Utilisation d'un faible dosage	Carbonatation de la chaux

6. Conclusion

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. L'incorporation des stabilisants génère :

- ✚ Une amélioration de la résistance du sol ;
- ✚ La durabilité ;
- ✚ La Réduction du potentiel de variation de volume ;
- ✚ L'imperméabilité le sol ;
- ✚ Diminution de la teneur en eau ;

✚ Enfin c'est une solution économique.

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Dans ce travail on a opté pour la stabilisation physique par changement de la granulométrie du sol, en incorporant du sable, du plastique granulé et du PVC broyé.

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III

IDENTIFICATION DES MATERIAUX

CHAPITRE III : IDENTIFICATION ES MATERIAUX**1. Introduction**

Les essais d'identification permettent de qualifier le sol par un nom plus précis (argile, sable, limon argileux,...). Une telle appellation est très utile quand elle est un peu rigoureuse car le mécanicien des sols sait pour chaque type de sol, quelles sont les propriétés à étudier, quels sont les risques possibles et quelles sont les aptitudes principales.

Dans le domaine de la géotechnique, l'identification du matériau qu'on voudrait utiliser est la première étape à suivre. Cette opération se fait à l'aide des essais de laboratoire et in-situ. Ces essais permettent la détermination des caractéristiques mécaniques et physiques du sol concerné. Ces dernières sont d'un grand intérêt, car elles servent non seulement à classer les sols mais nous renseignent aussi sur leur comportement mécanique, ce qui met à notre disposition des informations d'une extrême importance quant aux possibilités d'utilisation en construction civile.

Dans notre travail les essais d'identification physique qui ont été effectués sur matériaux utilisés sont:

- ✚ Teneur en eau ;
- ✚ Densité sèche ;
- ✚ Analyse granulométrique pour le sable et l'argile ;
- ✚ Analyse granulométrique par la sédimentométrie ;
- ✚ Limites d'Atterberg ;
- ✚ Valeur de bleu méthylène ;
- ✚ Test de Belstein sur le PVC ;
- ✚ Teste de densité sur le polyéthylène.

2. Origine de l'argile étudiée

L'argile étudiée dans ce travail vient de la commune d'Aït Chafâa qui se situe au Nord-Est de la wilaya de Tizi Ouzou.

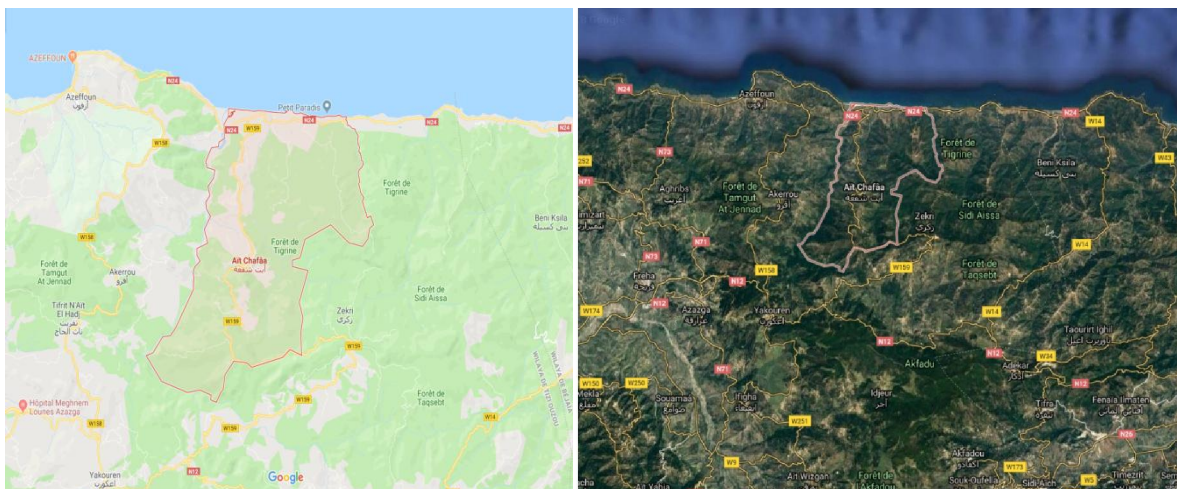


Figure III.1 : situation géographique d'Aït Chafâa

3. Teneur en eau naturelle W % (NF P 94 – 050) – Méthode par étuvage

C'est le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105 °C (60°C dans le cas des sols contenant des éléments organiques).

$$W = (w_w / w_s) \times 100$$

La connaissance de la teneur en eau d'un sol est très importante car elle permet, avec d'autres caractéristiques, d'apprécier l'état dans lequel se trouve le sol.

Dans le cas des matériaux étudiés, les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III .1: Détermination de la teneur en eau naturelle.

Sites de prélèvement des échantillons	W (%)
Ait chafaa	9.08%

4. Masse volumique de l'argile

4.1. Masse volumique des grains solides des sols selon (NF P 94 – 054) – Méthode au pycnomètre

La masse des particules solides est obtenue par pesage et exprimée en gramme. Les quantités de sol utilisées pour l'essai sont 50 g et 100 g prélevées sur le tamisât de l'échantillon de sol au tamis de 2 mm.



Figure III.2 : Matériel d'essai au pycnomètre.

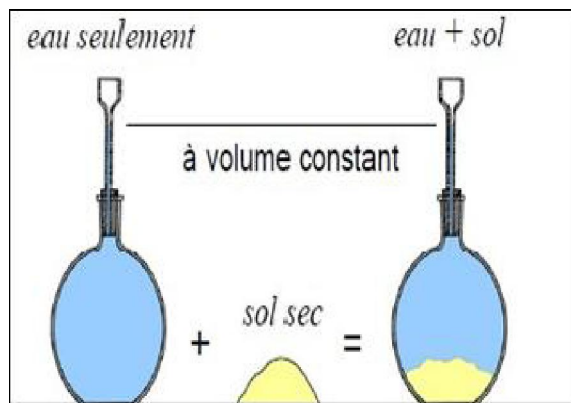


Figure III.3 : Les étapes de l'essai au pycnomètre.

La masse volumique des particules solides de sol est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = (m_3 - m_1) \rho_w / [(m_2 - m_1) - (m_4 - m_3)]$$

m_1 : masse du pycnomètre vide (g) ;

m_2 : masse du pycnomètre plein d'eau (g) ;

m_3 : masse du pycnomètre avec le matériau (g) ;

m_4 : masse du pycnomètre avec le matériau et l'eau (g) ;

ρ_w : masse volumique de l'eau égale à 1 (g/cm³).

$$\rho_s = m_s / v_s$$

Tableau III.2: Masse volumique des grains solides.

Sites de prélèvement des échantillons	ρ_s (g/cm ³)
Ait chafaa	2.48

4.2. Masse volumique humide de sol (NF P 94 - 053) – Méthode de l'immersion dans l'eau

Méthode de mesure de ρ_h par pesée hydrostatique :

(La masse de l'échantillon est obtenue par pesage à l'air et le volume par la méthode de l'immersion dans l'eau).

La même masse de l'échantillon dans l'air est paraffinée et ensuite pesée dans l'air.

À la moyenne d'une balance hydrostatique, on pèse notre échantillon paraffiné dans l'eau.



Figure III.4 : Matériel et matériaux d'essai du poids volumique du sol sec.

Les trois pesées permettant de déterminer la masse volumique par les relations ci-dessous :

$$\rho_h = m / V$$

Avec :

$$V = (m_p - m_p') / \rho_w - (m_p - m) / \rho_p$$

Avec :

ρ_w : Masse volumique de l'eau qui est égale à 1000kg/m³

ρ_p : Masse volumique de la paraffine qui est égale à 880kg/m³

Tableau III.3: Masse volumique humide.

Echantillon N°	1	2	3
Masse de l'échantillon humide : m (g)	272.564	230.731	179.613
Masse humide d'échantillon paraffiné à l'air: m _p (g)	294.728	242.412	192.093
Masse de l'échantillon paraffiné immergé: m _p ' (g)	207.5	175	150.300
La masse volumique humide ρ_h (g/cm ³)	4.4	4.26	6.50
La masse volumique moyenne ρ_h (g/cm ³)	5.05		

4.3. Masse volumique du sol sec (NF P 94 – 064)

C'est le rapport de la masse du matériau sec au volume de ce même matériau sol.

$\rho_d = m_s / V_t$ avec la relation existante entre ρ_d et ρ_h qui est :

$$\rho_d = \rho_h / (1 + w)$$

Tableau III.4: Classification des masses volumiques sec.

ρ_d (g /cm ³)	Appréciation
< 1,6	Faible
1,6 – 1,8	Moyenne
> 1,8	Dense

Tableau III.5: Masse volumique du sol sec.

Site de prélèvement	ρ_d (g/cm ³)	appréciation
Ait chafaa	0.50	faible

5. Indice des vides et degré de saturation :

5.1. Indice des vides (e) : C'est le rapport du volume des vides au volume des grains solides.

$$e = V_v / V_s \text{ avec : } e = (\rho_s / \rho_d) - 1$$

Tableau III.6: Indice des vides pour les deux sites.

Site	e
Ait chafaa	3.96

5.2.Degré de saturation S_r (%) : C'est le rapport du volume de l'eau au volume des vides d'un sol.

$$S_r = V_w / V_v \text{ avec : } S_r = (\rho_s / \rho_w) \times (W / e)$$

Tableau III.7: L'état de saturation du matériau.

S_r (%)	Appréciation
100	Saturé
76 – 99	Détrempe
51 – 75	Mouillé
26 – 50	Humide
1 – 25	Légèrement humide
0	Sec

D'après TERZAGHI

Tableau III.8: Degré de saturation pour les deux sites.

site	S_r (%)	appréciation
Ait chafaa	5.68	Légèrement humide

6. Analyse granulométrique et analyse granulométrique par sédimentation

Analyse granulométrique (argile et sable)

Cette analyse est faite sur des échantillons globaux (0/8 mm) à sec à l'aide d'un vibro-tamis selon la norme NF P 94-09 (octobre 1993). Le but est de déterminer la répartition en poids des grains suivant leurs grosseurs.

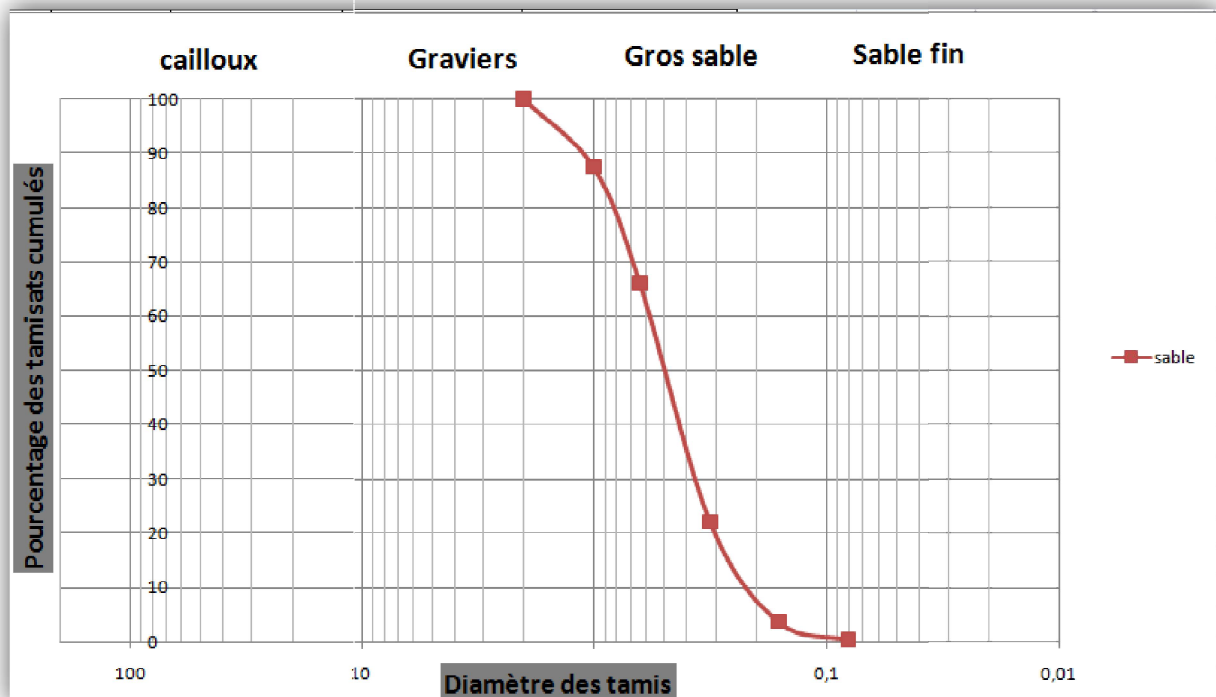
Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableau et de courbes granulométriques suivants :

Tableau III.9 : résultats de l'analyse granulométrique pour l'argile

dimension des tamis (mm)	Refus(g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamises cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	22,165	22,165	6,078964834	93,92103517
1	32,149	54,314	14,89613788	85,10386212
0,63	14,577	68,891	18,89402059	81,10597941
0,315	153,355	222,246	60,95310709	39,04689291
0,16	129,193	351,439	96,38553226	3,614467744
0,08	12,68	364,119	99,86314444	0,136855558
fond	0,499	364,618	100	0

Tableau III.10 : résultats de l'analyse granulométrique pour le sable :

dimension des tamis (mm)	Refus(g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
2	0	0	0	100
1	125,3	125,3	12,55757644	87,44242356
0,63	213,858	339,158	33,99044301	66,00955699
0,315	439,397	778,555	78,02684696	21,97315304
0,16	182,907	961,462	96,35780173	3,642198267
0,08	33,047	994,509	99,66977483	0,330225174
fond	3,295	997,804	100	0

**Figure III.5.a** : courbes granulométriques des deux types de sols utilisés du sable.

Le coefficient d'uniformité, $C_u = D_{60} / D_{10}$: caractérise la pente de la courbe granulométrique.

Le coefficient de courbure, $C_c = (D_{30})^2 / D_{60} \times D_{10}$: traduit la forme la plus ou moins régulière de la courbe.

Avec :

D_{10} : Diamètre correspondant à 10% des tamisats cumulés

D_{30} : Diamètre correspondant à 30% des tamisats cumulés

D_{60} : Diamètre correspondant à 60% des tamisats cumulés

Calcul de C_u et C_c pour les trois échantillons :

Echantillon de sable : $C_u = 2.72$, $C_c = 1.21$

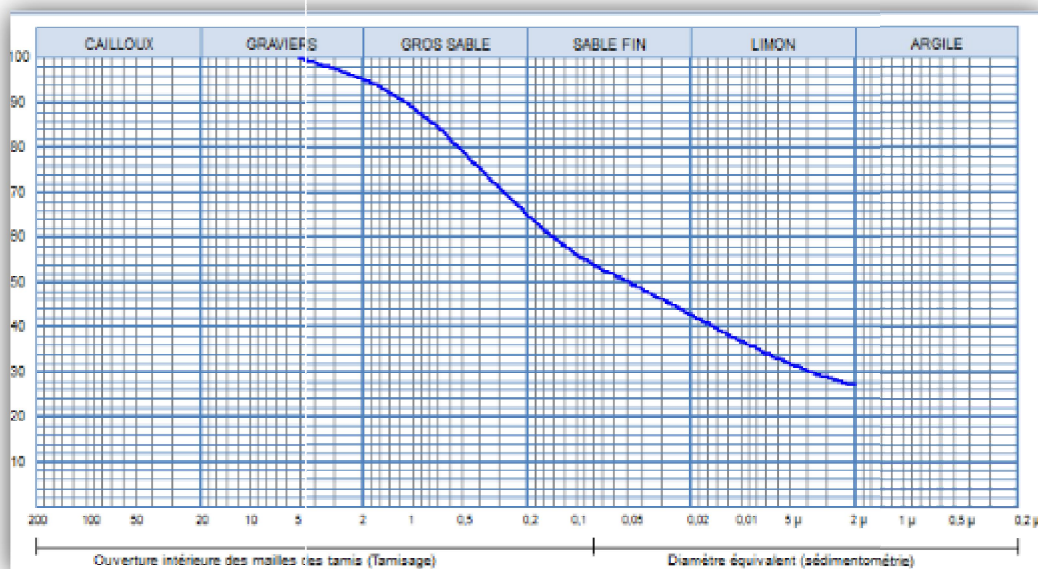
Classification du sable

Pour l'échantillon de sable : selon le système unifié de classification des sols granulaires, ce sol est un sable propre mal gradué de symbole (SW).

Pour l'échantillon d'argile : on a moins de 50% d'éléments supérieurs à 80μ alors il sera classé selon l'abaque de Casagrande.

Analyse granulométrique par sédimentation (argile)

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage pour déterminer la répartition selon le diamètre des grains de fraction fine de sol inférieure à 80μ .



Pour la préparation du mortier, une masse de sol, prise après échantillonnage et homogénéisation par brassage, est mise à imbiber dans un récipient d'eau, pendant 24 heures, et tamisée par voie humide au tamis de 400 μm . L'eau de lavage et le tamisât sont recueillis dans un bac. Une fois décantée, l'eau claire est siphonnée sans entrainer les particules solides.

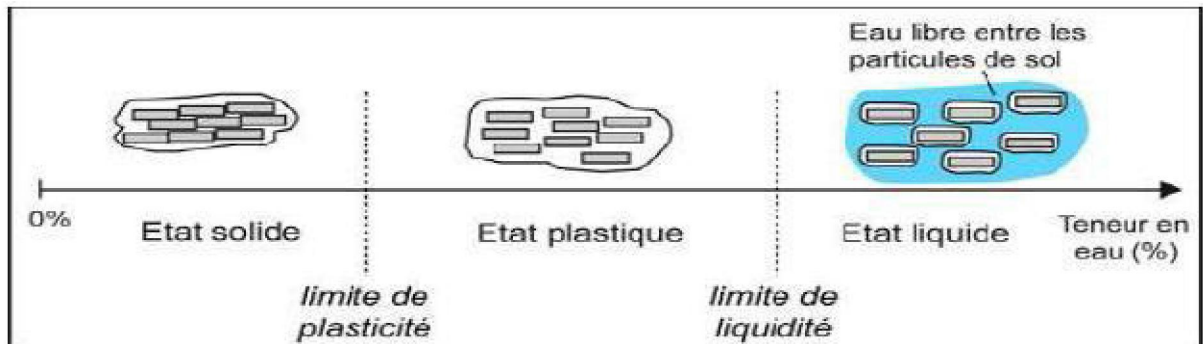


Figure III.6: Limite limites d'Atterberg (Santamarina, 2001).

7.1. La détermination de la limite de liquidité :

L'essai se fait au moyen d'un appareil normalisé, appelé coupelle de Casagrande. Cet appareil est constitué d'une coupelle d'une dizaine de centimètres de diamètre, d'un socle rigide et d'un système cranté permettant de soulever et de laisser retomber la coupelle, d'une hauteur constante fixée à 10 mm, à raison de deux coups par seconde.

Après le contrôle du fonctionnement de l'appareil et de la pointe de l'outil à rainurer qui doit être inférieure à 2,2 mm, tout en réglant la hauteur de chute de la coupelle, on malaxe la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide (Figure III.8).

Avec une spatule, on étend une masse de pâte sur la coupelle qui doit être propre et sèche. Cette dernière est étalée en plusieurs couches pour éviter d'emprisonner les bulles d'air, présentant à la fin de l'opération un aspect symétrique (Figure III.9).

Ensuite, on trace une rainure à l'aide de l'outil à rainurer en forme de V, comme indiqué dans la figure(III.10).



Figure III.7 : Les matériels utilisés.



Figure III.8 : Le mortier malaxé.



Figure III.9 : Le remplissage de la coupelle de Casagrande

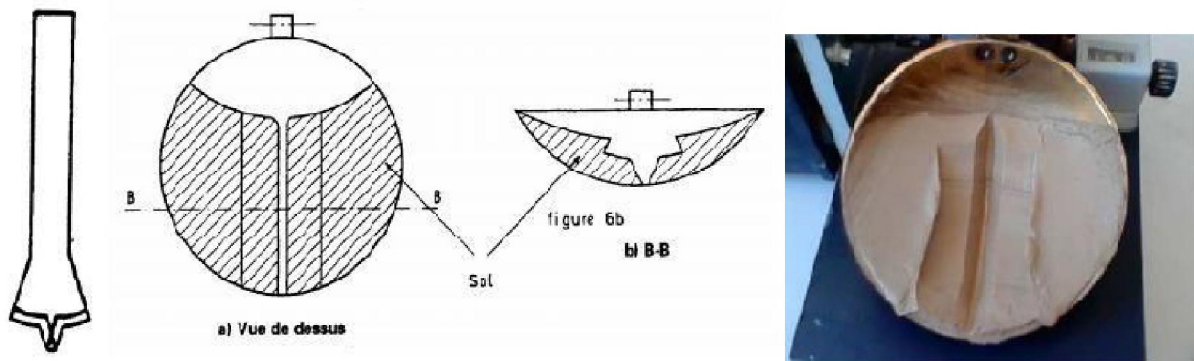


Figure III.10 : La fermeture de la rainure (CHEHEB.F ,2016).

On imprime à la coupelle une série de chocs, tout en comptant le nombre qui doit être compris entre 15 et 35, nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1cm.

Enfin, on prélève une quantité de mortier de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées, afin de déterminer la teneur en eau. L'essai est renouvelé 4 fois pour différentes teneurs en eau obtenues soit par assèchements, soit par addition d'eau, de façon à couvrir une plage de coups allant de 15 à 35.

7.2. La détermination de la limite de plasticité

Pour déterminer la limite de plasticité, on forme une boulette à partir de la pâte préparée. À l'aide de la paume de la main, on roule la boulette sur une plaque lisse de façon à lui donner la forme d'un rouleau, sans creux, qui s'amincit progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de diamètre et une longueur de 10 cm (Figure III.11).

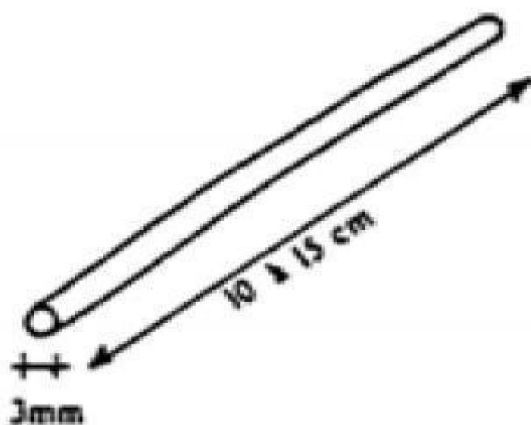


Figure III.11: La confection du rouleau.

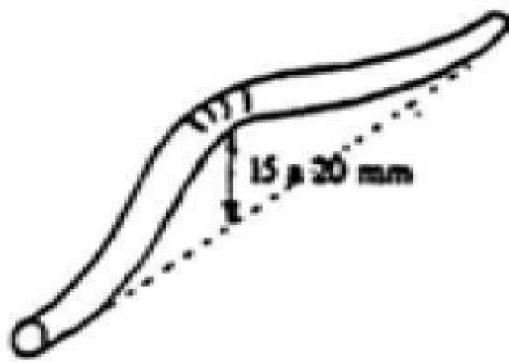


Figure III.12 : La fissuration et brisure du rouleau.

On estime arbitrairement que le sol a atteint la limite de plasticité lorsque le cylindre se brise en deux segments en le soulevant du milieu sur une hauteur variant de 15 à 20 mm (figure III.12). On pèse alors ces derniers sans tarder et on mesure la teneur en eau. On refait l'opération quatre fois pour chacun des échantillons. La limite de plasticité WP, exprimée en pourcentage, correspond à la moyenne arithmétique des quatre teneurs en eau obtenues.

7.3. L'indice de plasticité

L'indice de plasticité mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il a un intérêt tout à fait fondamental. Il est exprimé par la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

$$IP = wL - wP$$

7.4. Résultats des limites d'Atterberg

7.4.1. La limite de plasticité

Après avoir réalisé les essais pour chaque échantillon, on calcule la teneur en eau comme indiqué précédemment, on fait la moyenne des quatre résultats et les résultats sont donnés dans le tableau (III.11)

Tableau. III.11 : Résultats des limites de plasticité.

N ⁰	MHumide	MSèche	W (%)
1	1.06	0.93	0.14
2	0.91	0.79	0.15
3	1.09	0.93	0.17
4	0.86	0.73	0.17
W moyennes			0.16

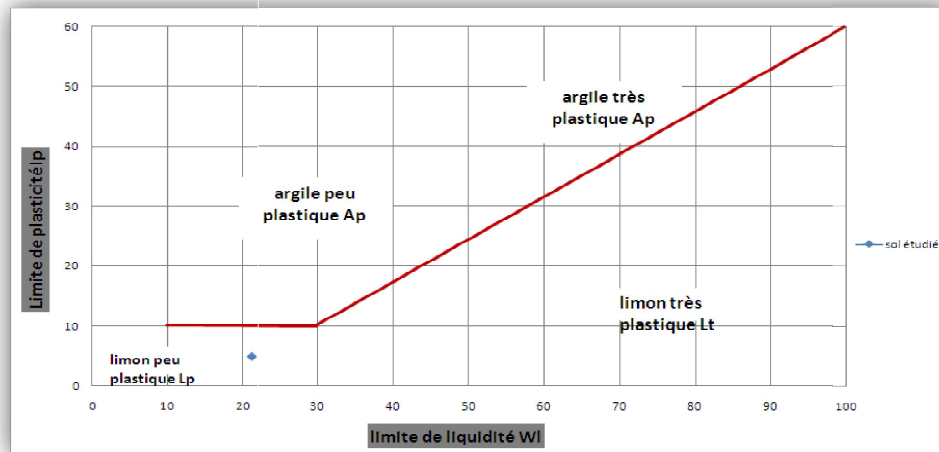


Figure III.13: Présentation de la plasticité du sol étudié dans l'abaque de Casagrande.

Tableau III.12: Les résultats et les appréciations.

site	Ait chafaa
WL à 25 coups	21.15
Wp	16
Ip	5
Résultats	Limon peu plastique

Classification : selon l'abaque de Casagrande le sol étudié est un limon peu plastique

7.4.2. La limite de liquidité

Les valeurs trouvées des limites de liquidité de l'échantillon sont inscrites au tableau (III.13)

Tableau III.13: Limite de liquidité de l'échantillon d'argile.

N ⁰	MHumide	MSèche	W (%)	Nombre de coups
1	9.52	7.73	0.23	15
2	12.24	10.05	0.22	25
3	15.04	12.38	0.21	24
4	15.85	13.21	0.20	35

Sur un graphique, on représente les teneurs en eau W obtenues en ordonnée et le logarithme du nombre de coups N en abscisse. La relation entre ces paramètres permet de tracer une droite. La limite de liquidité WL est déterminée à partir de cette dernière. Elle correspond à une teneur en eau obtenue pour une valeur N égale à 25 coups. Les résultats sont comme suit :

Tableau III.14: Les teneurs en eau obtenues en ordonnée et le logarithme du nombre de coups égale à 25.

site	Ait chafaa
WL (%) à 25 coups	21.15

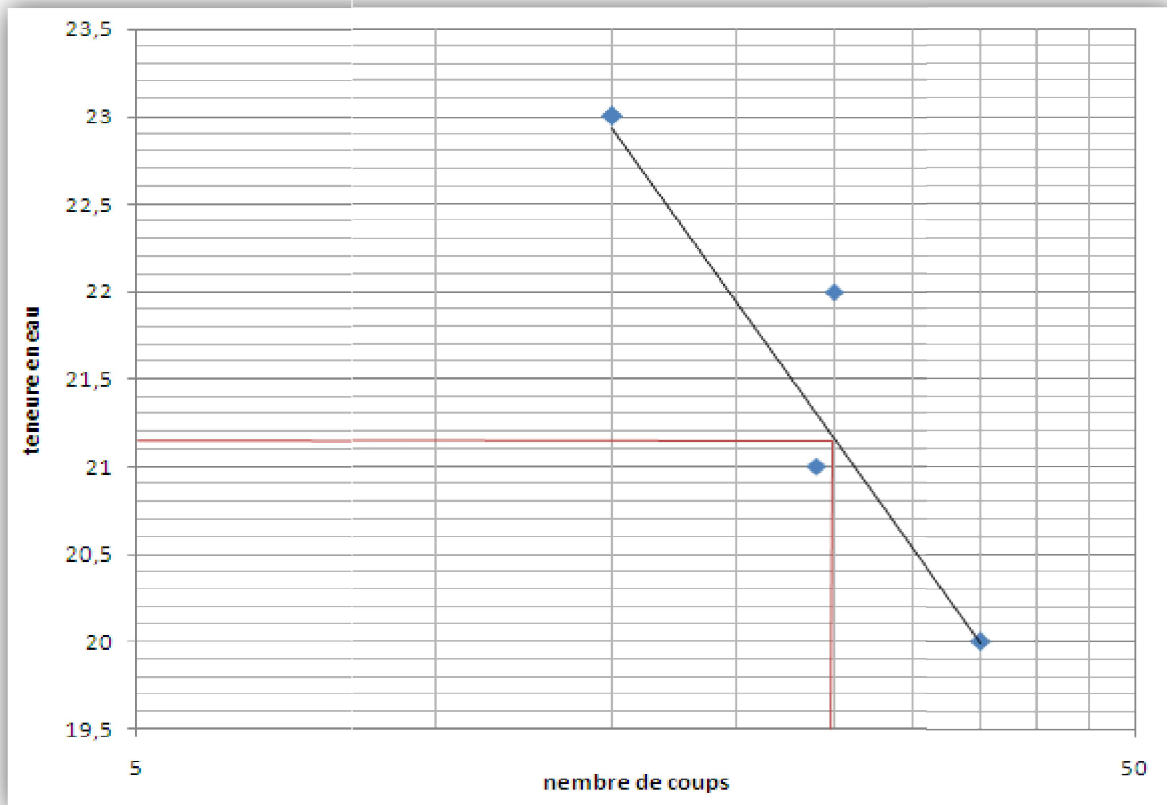


Figure III.14 : Courbe de limite de liquidité de l'argile.

De ces valeurs, l'indice de consistance I_c peut être déterminé, qui permet d'apprécier la consistance des sols plastiques en se référant aux plages de valeurs présentées ci-dessous. Il est déterminé par la formule suivante :

$$I_c = (W_L - W) / I_p$$

Tableau III.15: L'indice de consistance.

I_c	Appréciation
0 - 0,25	Pâteux
0,25 - 0,50	Mou
0,5 - 0,75	Ferme
0,75 - 1	Mi dur
>1	Dur

Tableau III.16: Résultats de l'indice de consistance.

site	I_c	appréciation
Ait chafaa	2.414	Dur

8. Valeur au bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche

Cet essai permet de mesurer la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol. L'essai s'effectue sur 70 g de matériau trempé dans 0,5 L de l'eau distillée et maintenus en permanence sous agitation. L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par l'échantillon de sol testé. Plus la fraction argileuse est importante plus elle adsorbe du bleu de méthylène.

Le test permet de repérer l'instant de la saturation au bleu des particules d'argile. On prélève une goutte de liquide contenant le sol imbibé de bleu, que l'on dépose sur un papier filtre spécial.

- Si la goutte centrale bleu est entouré d'une zone humide incolore le test est négatif, on continue alors le dosage au bleu.
- Si le test est positif, la zone humide est teintée de bleu c'est-à dire on arrête le dosage.

La valeur de bleu de sol est donnée par la relation suivante:

$$VBS = Mb/Ms * 100 \text{ avec } Mb = V * 100$$

Avec :

Mb : la masse de bleu permettant la saturation par adsorption (g);

Ms : la masse sèche de la prise d'essai (g) ;

V : le volume de solution de bleu utilisée (cm³).

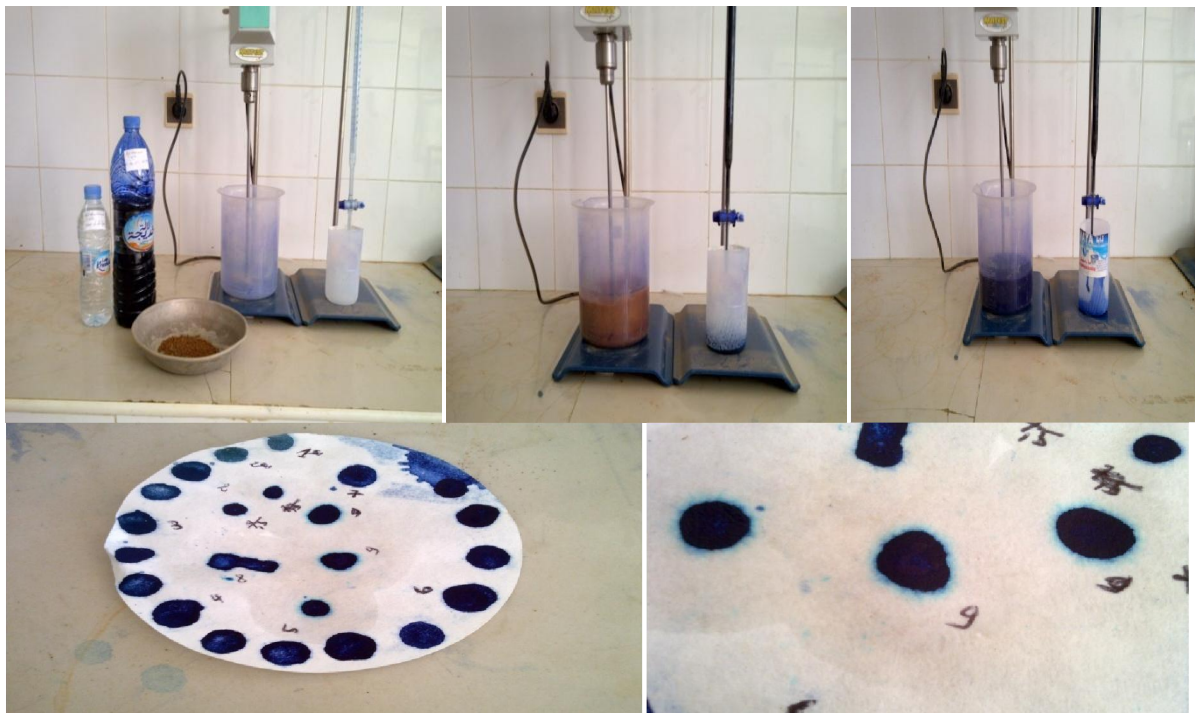


Figure III.15: Matériel d'essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche).

Tableau III.17: Désignation du sol en fonction de son VBS.

VBS (en grammes de bleu pour 100g de sol)	Désignation du sol
$VBS \leq 0,2$	sol sableux
$0,2 < VBS \leq 2,5$	sol limoneux
$2,5 < VBS \leq 6$	sol limoneux - argileux
$6 < VBS \leq 8$	sol argileux
$VBS > 8$	sol très argileux

Tableau III.18: Résultats des valeurs au bleu de méthylène.

Site	VBS	Désignation du sol
ait	2.7	Sol limoneux-argileux

✚ Interprétation des résultats

Les valeurs obtenues au bleu de méthylène montrent que le site d'Aït Chafâa présente un sol limoneux – argileux.

Tableau III.19: Résultats finals des expériences.

W(%)	P _s (g/cm ³)	P _h (g/cm ³)	P _d (g/cm ³)	e	Sr (%)	Ip	Ic	VBS
9.08	2.48	5.05	0.50	3.96	5.68	5	2.414	2.7

9. Identification des plastiques

9.1. Teste de densité sur le polyéthylène

Réaliser l'expérience suivante :

- ✚ remplir à moitié le b cher avec de l'eau du robinet,
- ✚ ajouter 2 gouttes de détergent,
- ✚ plonger les trois échantillons au fond du récipient.

Si l'échantillon remonte à la surface, il est moins dense que l'eau : c'est du polypropylène.

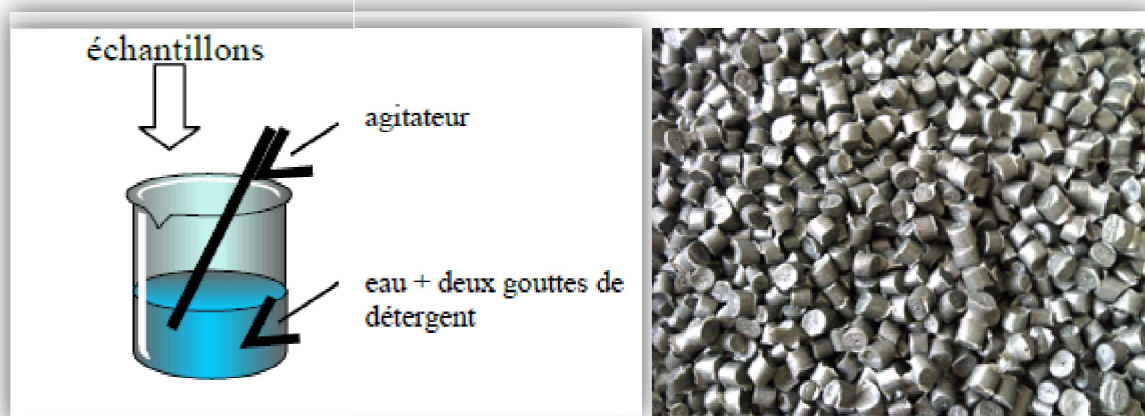


Figure III.16 : Teste de densité sur un plastique.

En effet le plastique granulé remonte à la surface, donc c'est du polyéthylène de densité faible.

9.2. Test de Belstein sur le PVC

- + Allumer le bec Bunsen.
- + Chauffer fortement l'extrémité d'une tige de cuivre.
- + Poser cette tige sur le premier échantillon pour en prélever une petite quantité.
- + Replacer la tige au dessus de la flamme.
- + Si celle-ci se colore en vert (présence de chlore), la matière plastique est du PVC.
- + Recommencer avec l'autre échantillon en utilisant une nouvelle tige de cuivre.
- + Eteindre le bec Bunsen.

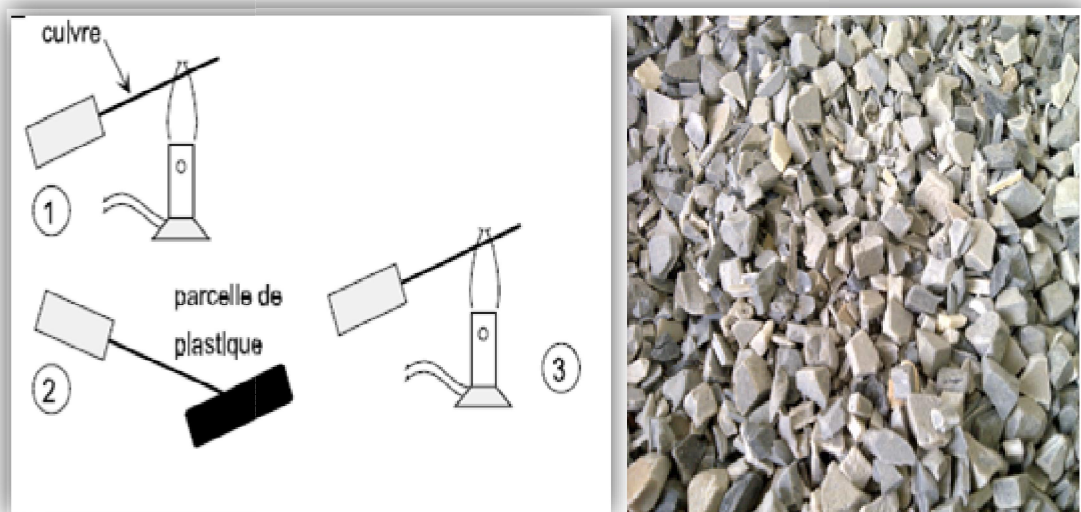


Figure III.17 : Test de Belstein sur le plastique.

En effet le deuxième plastique utilisé est un PVC car la tige se colore en vert, donc on constate que il ya présence de chlore.

10. Conclusion

Les résultats des essais d'identification réalisés au laboratoire pour les matériaux étudiés, ont permis d'avoir une idée sur leurs natures physiques et minéralogiques.

Après les essais physiques réalisés, on constate que l'échantillon d'argile est un sol limoneux-argileux, c'est la raison d'avoir un comportement peu plastique dur est légèrement humide avec une teneur en eau faible au faite que c'est un sol remanié en dépôt.

Pour l'échantillon de sable : les résultats de l'analyse granulométrique ont montré qu'il est un sable propre mal gradué.

Les résultats obtenus sur les plastiques montrent que le premier échantillon est un polyéthylène de densité faible et le deuxième échantillon est un PVC.

CHAPITRE IV

CISAILLEMENT A LA BOITE DE CASAGRANDE

CHAPITRE IV : CISAILLEMENT A LA BOITE DE CASAGRANDE

1. Introduction

La résolution des problèmes de stabilité en mécanique des sols est inenvisageable sans la connaissance des paramètres de résistance au cisaillement du sol. Cette résistance dépend de la nature du matériau rencontré, suivant qu'il soit cohérent ou non, grossier ou fin. Ces paramètres appelés angle de frottement interne et cohésion interviennent dans le calcul de stabilité des différents ouvrages de génie civil (fondations, barrages, digues...) (Ouali, 2017).

La résistance au cisaillement des sols constitue une part importante de la plupart des problèmes de construction, et particulièrement des problèmes de fondation. La capacité portante des semelles et des pieux, la stabilité des talus naturels, des excavations, des barrages et des remblais, la poussée des terres contre les murs de soutènement et les tunnels, etc. sont fonction des caractéristiques de la résistance au cisaillement des sols. Il est difficile de définir la résistance au cisaillement des sols de façon rigoureuse, car le terme inclut à la fois un concept de rupture et un concept de déformation excessive.

Dans ce chapitre, nous allons étudier la résistance au cisaillement des mélanges d'argile-sable, argile-plastique granulé, argile-PVC, argile-sable-plastique granulé et argile-sable-PVC en utilisant l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande.



Figure IV.1: Les problèmes de construction.

2. Notion de résistance au cisaillement

Les contraintes de cisaillements se développent lorsqu'un système de forces est appliqué à un volume déterminé d'un sol. Cette sollicitation induit des déformations le long de certaines surfaces appelées "surface de glissement", elle correspond aussi à la surface de rupture. Si l'on porte l'évolution de la contrainte au cisaillement (τ) en fonction de la déformation horizontale (ϵ) dans le plan de cette contrainte de cisaillement, on obtient le graphique suivant :

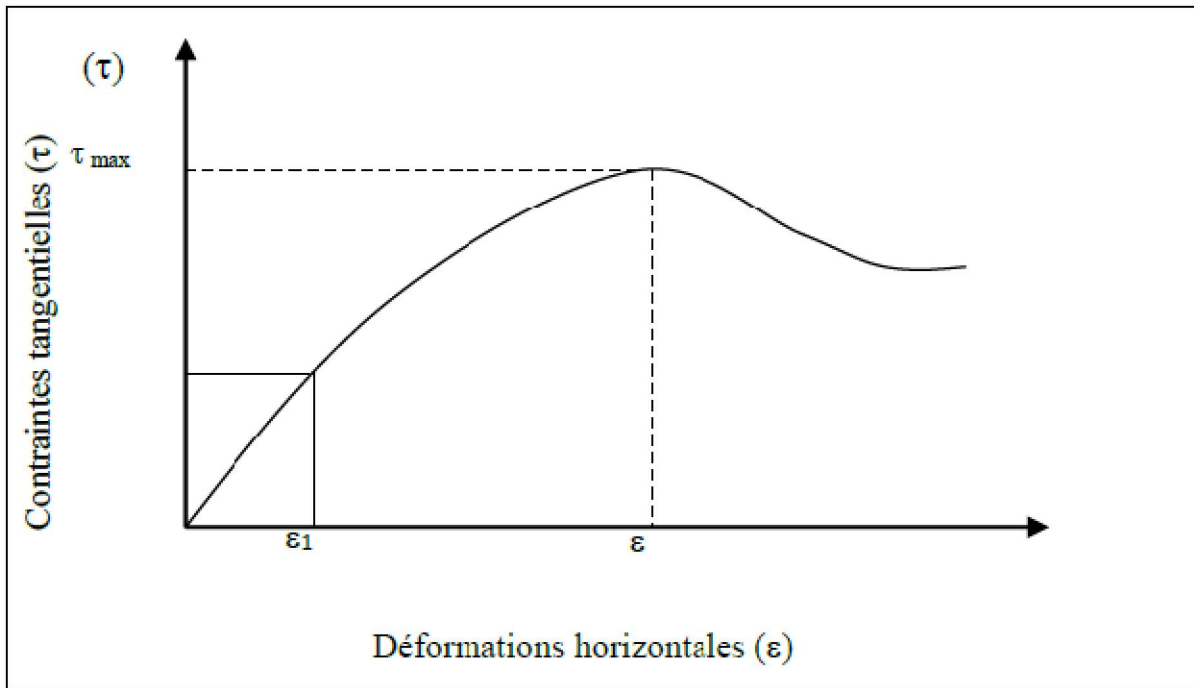


Figure IV.2 : Courbe de contraintes-déformations.

La résistance au cisaillement est définie sur ce graphique, comme étant :

- ✚ Le maximum de la contrainte de cisaillement τ_{max} ;
- ✚ La contrainte de cisaillement correspondant à une déformation très grande ;
- ✚ La contrainte de cisaillement correspondant à une déformation plus ou moins arbitraire (Ouali, 2017).

3. Mécanisme de rupture d'un sol

Dans un sol saturé, l'application d'une charge est supportée dans un premier temps par l'eau interstitiel puis progressivement ensuite elle est reprise par le squelette solide du sol.

En effet, la résistance au cisaillement dépend donc :

- ✚ De la nature et de la forme des grains
- ✚ De leur disposition par rapport aux directions principales du champ des contraintes.

Si la perméabilité du sol est faible (charge des éléments fins) le processus de cisaillement dépend beaucoup de la vitesse d'application des contraintes. On peut donc envisager pour ces sols, deux types de comportement :

3.1. Comportement à long terme

Dans ce cas, la pression interstitielle peut se dissiper lentement ; la résistance au cisaillement est alors celle du squelette solide. Si ce squelette est constitué d'éléments argileux, sa cohésion est d'abord mobilisée.

3.2. Comportement à court terme

L'application brutale des contraintes, conduit à une rupture instantanée ; la résistance au cisaillement du sol est dans ce cas conditionnée par le comportement de l'ensemble solide/eau interstitielle.

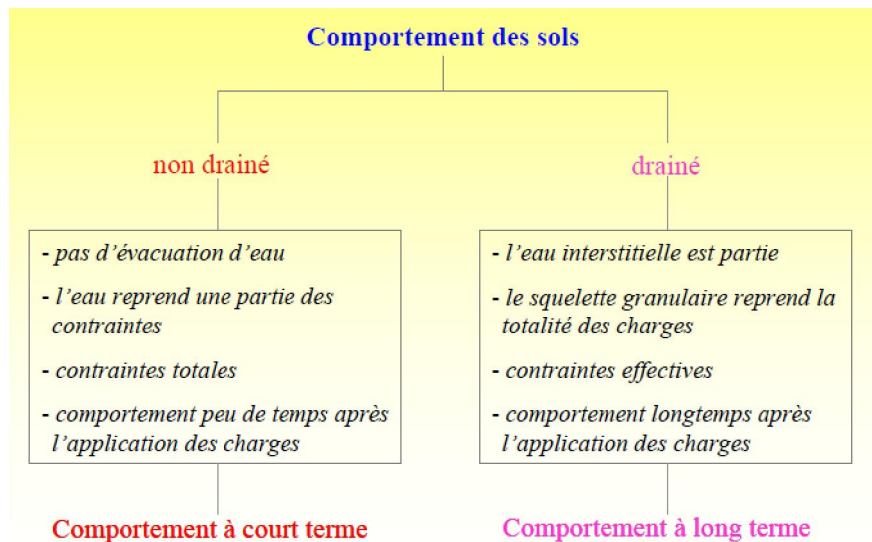


Figure IV.3 : schéma de comportement des sols

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques (ϕ et C) de n'importe quel type de sol, on doit réaliser des essais au laboratoire tel que l'essai de cisaillement direct.

4. Définition de l'essai de cisaillement

C'est parmi les essais les plus anciens par rapport à d'autres essais de laboratoire (essai scissomètre, essai au pénétromètre à cône suédois, essai de compression simple et l'essai triaxial, etc.).

Des expériences de Coulomb sont effectuées à l'aide d'une boîte de cisaillement, dont la forme la plus récente a été élaborée par **ARTHUR CASAGRANDE en 1932**. (Voir figure IV.4)



Figure IV.4 : Appareillage de cisaillement.

L'essai de cisaillement direct à la boîte consiste à cisailer l'éprouvette de sol, qui est placée entre deux demi-boîtes, suivant un plan imposé, sur lequel on exerce une force normale N et une force tangentielle T . La demi-boîte inférieure peut se déplacer horizontalement, à vitesse de déplacement constante. Cet essai permet de représenter la résistance au cisaillement du sol par une relation entre la contrainte tangentielle τ (T/S) et la contrainte normale σ_N (N/S) sur la surface de rupture (S : surface de l'éprouvette).

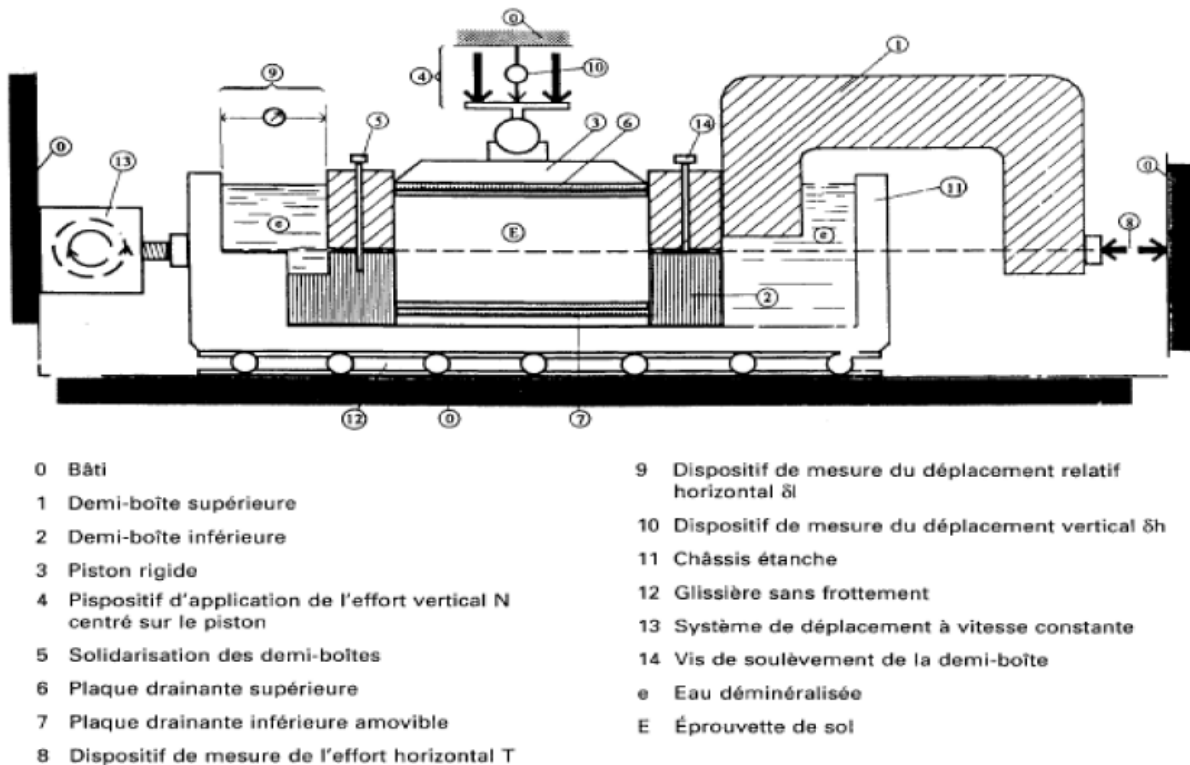


Figure IV.5 : schéma de la boîte de cisaillement.

5. But de l'essai

L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande a pour but d'étudier le comportement et la résistance mécanique d'un matériau au cisaillement à court et à long terme. Il permet de déduire les caractéristiques mécaniques au cisaillement du sol (angle de frottement interne et cohésion) à travers une droite obtenue appelée "droite intrinsèque".

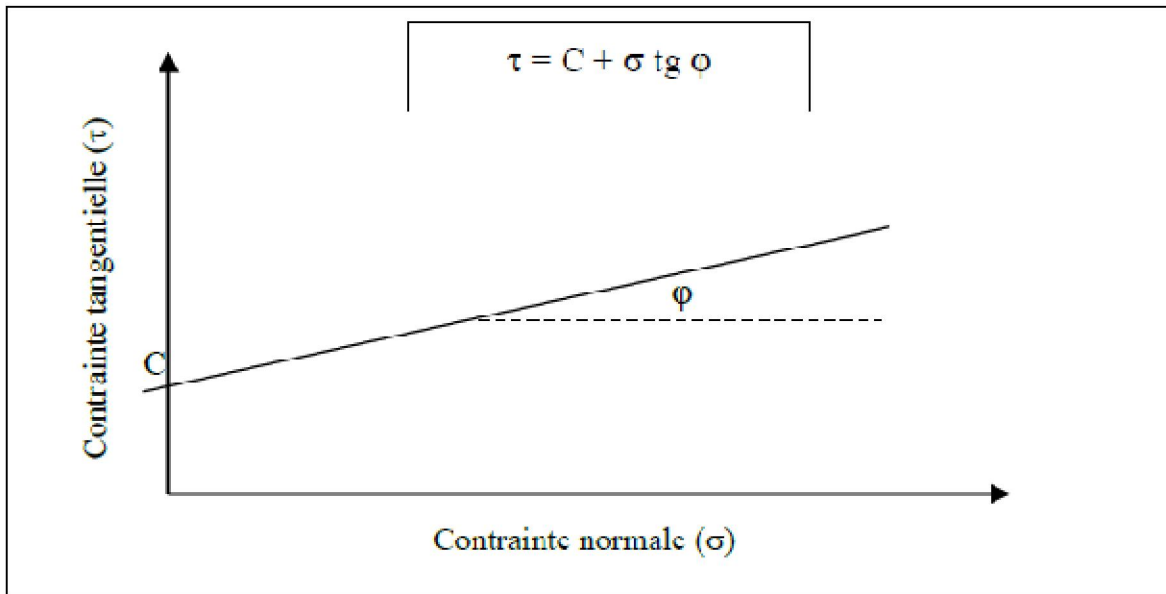


Figure IV.6 : Droite intrinsèque.

L'angle de frottement interne φ est représenté par l'angle que fait cette droite avec l'axe des abscisses. La cohésion quant à elle est déduite par l'ordonnée à l'origine.

L'équation de la droite intrinsèque qui exprime la loi de Coulomb, se présente comme suit :

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

6. Paramètres de cohésion c et angle de frottement interne φ

La droite intrinsèque peut se présenter sous trois formes :

- ✚ Si elle passe par l'origine des axes, cela signifie que le sol est pulvérulent (non cohérent) : exemple, les graviers et les sables.

Dans ce cas le terme " c " est nul et l'équation devient alors : $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi$

- ✚ Si elle ne passe pas par l'origine des axes, cela signifie que le sol est à la fois cohérent et frottant (la plupart des sols : les limons).

Dans ce cas l'équation reste la même : $\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$

- ✚ Si la droite est parallèle à l'axe des abscisses, c'est que nous sommes en présence de sols purement cohérents (argiles) et donc sans angle de frottement interne ($\varphi = 0$).

Dans ce cas l'équation devient : $\tau = c$

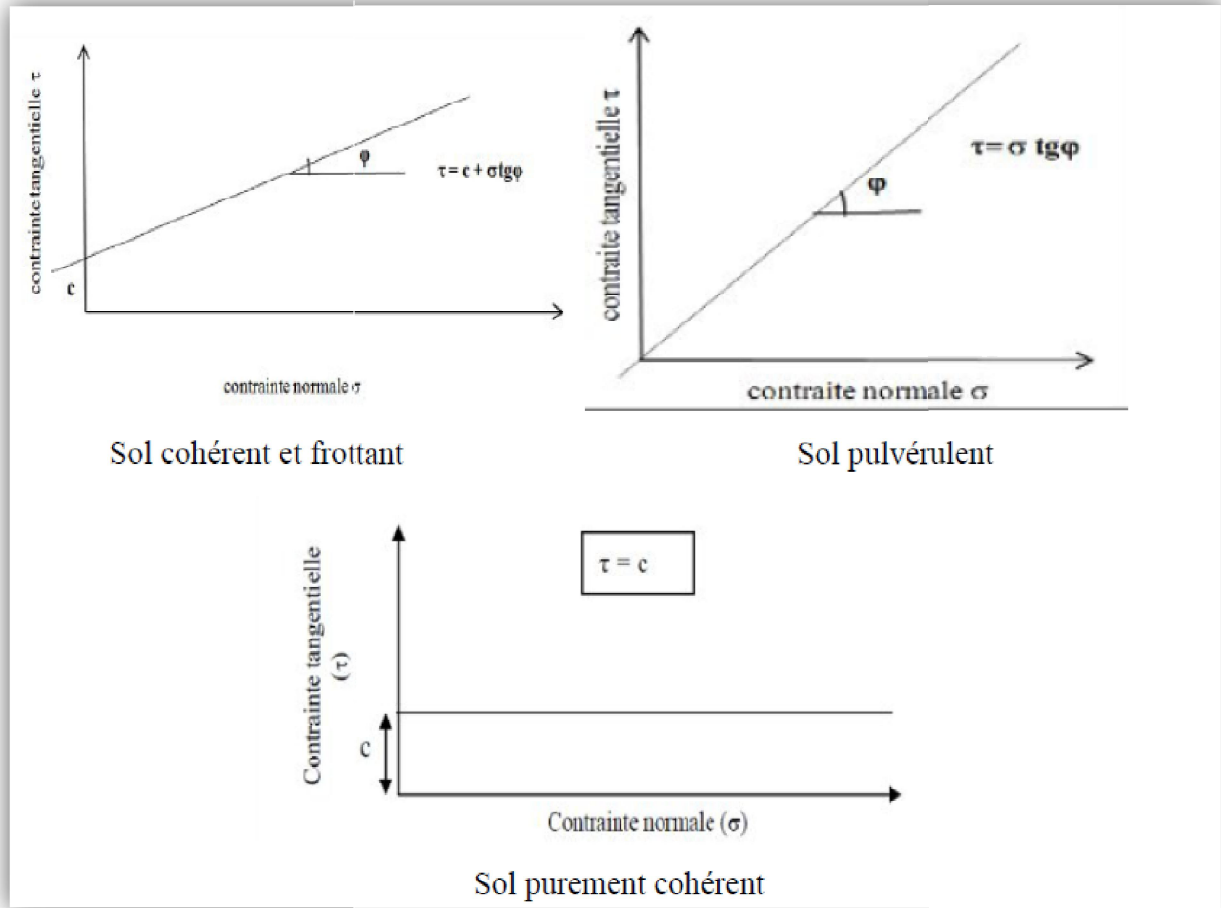


Figure IV.7: Droites intrinsèques des différentes catégories de sols.

7. Type d'essais de cisaillement à la boîte (UU, CU, CD)

Trois types d'essais peuvent être réalisés à la boîte de cisaillement :

✚ Essai non consolidé non drainé UU (Unconsolidated-Undrained)

Cet essai est réalisé pour étudier un comportement à court terme. La vitesse d'exécution est rapide, ce qui empêche les pressions interstitielles de se dissiper. De par cet essai est déduite la cohésion non drainée c_u . L'angle de frottement interne ϕ_u est quant à lui considéré nul.

$$\tau = c_u$$

✚ Essai consolidé non drainé CU (Consolidated-Undrained)

Dans ce cas, l'échantillon est consolidé sous une contrainte normale appliquée avec drainage, l'essai est ensuite effectué avec une vitesse rapide et un drainage fermé. Cet essai est exprimé en contraintes totales, la droite intrinsèque a pour équation :

$$\tau = c_{cu} + \sigma \tan \phi_{cu}$$

✚ Essai consolidé drainé CD (Consolidated-Drained)

Cet essai est caractérisé par une vitesse d'exécution relativement lente, il correspond au comportement à long terme du sol. L'échantillon est consolidé et drainé tout au long de l'opération ($u = 0$).

L'essai est exprimé en contraintes effectives $\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$

Avec : φ' : angle de frottement effectif,

c' : cohésion drainée.

8. Facteurs influant les paramètres de résistance au cisaillement

Les paramètres de résistance au cisaillement varient en fonction de la nature du sol et en fonction de quelques propriétés physiques telles que la compacité et les conditions de drainages.

En effet, les grains de différents sols ne possèdent pas les mêmes forces de cohésion, de frottement et d'enchevêtrement entre particules. Ces facteurs influent sur la valeur de l'angle de frottement φ et de la cohésion c du matériau.

Dans le cas d'un sol cohérent et frottant, ayant la particularité d'être peu perméable, la résistance au cisaillement sera influencée par les conditions de drainages et la teneur en eau de ce dernier.

Dans le cas d'un sol pulvérulent, ayant la particularité d'avoir une cohésion nulle, seule la compacité du matériau influencera sur sa résistance au cisaillement. Lorsque la compacité du sol augmente, l'indice des vides diminue et l'angle φ augmente. Plus les particules d'un sol sont angulaires, plus d'angle de frottement est important ; inversement, des particules arrondies font diminuer l'angle de frottement (Robitaille et Tremblay, 1997).

9. Mode opératoire et déroulement de l'essai

L'éprouvette de sol, de forme cylindrique (dans ce cas) est réalisée à partir du compactage du mélange argile, sable et plastique à l'optimum proctor (voir tableau IV.1) et démoulage à l'aide d'un annaux de cisaillement (voir figure IV.8)

Tableau IV.1: les optimum Proctor des mélanges argile-sable.

type de mélange	100% Argile	95%Argile+5% sable	90%Argile +10% sable	85%Argile +15% sable	80%Argile +20% sable	75%Argile +25% sable
WOP(%)	15	15	15	14	14	13



Figure IV.8 : réalisation de l'éprouvette.

L'éprouvette est placée à l'intérieur des deux demi-boîtes (figure IV.9) et repose à sa partie inférieure, sur une pierre poreuse dont la perméabilité est assez grande vis-à-vis de celle du sol de l'éprouvette et par laquelle le sol reste en contact permanent avec l'eau. Un piston métallique muni également d'une pierre poreuse est placé sur la face supérieure de l'éprouvette.

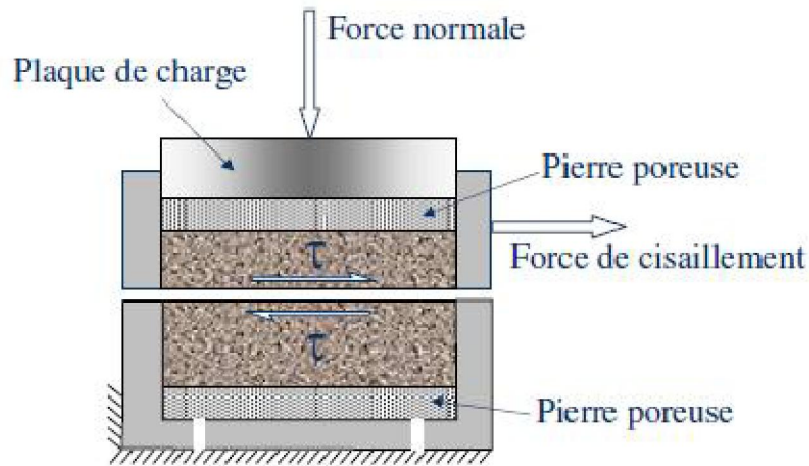


Figure IV.9 : Principe de la boîte de cisaillement.

Le dispositif est ensuite placé sur la machine de cisaillement et le récipient sera rempli d'eau, puisque l'essai réalisé dans ce travail est un essai consolidé drainé (CD) (figure IV-10)

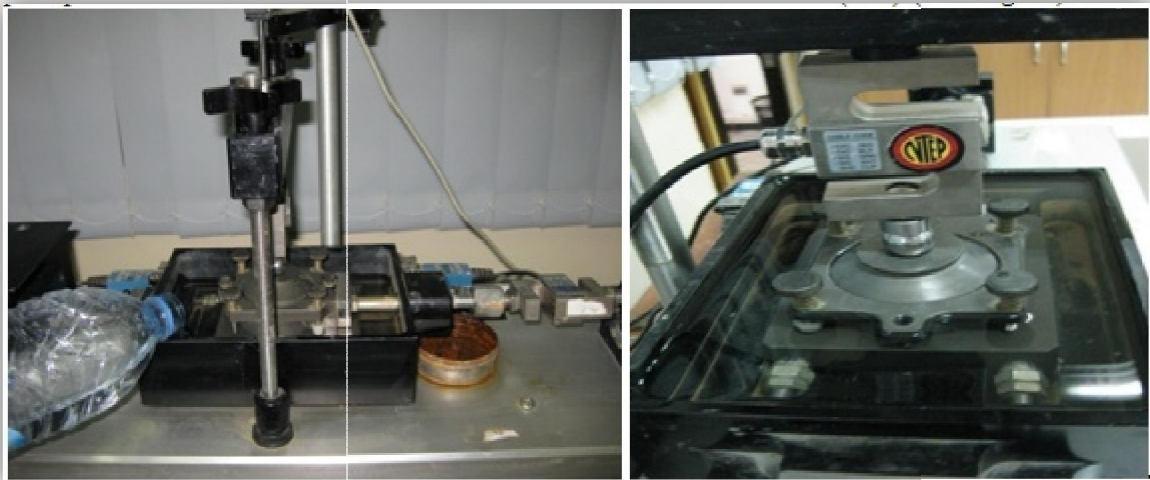


Figure IV.10 : essai de cisaillement consolidé-drainé.

Les données de l'essai (vitesse de cisaillement, contrainte normale, poids de l'échantillon, ...) sont introduites à la machine par l'intermédiaire d'un ordinateur. Il est appliqué à l'éprouvette une force normale constante "N" sur sa face supérieure au moyen d'un vérin, et par l'intermédiaire du piston horizontal une force de cisaillement horizontale "T". L'essai est effectué en imposant un déplacement relatif entre les deux demi-boîtes. Un dispositif mécanique approprié entraîne à vitesse constante le châssis inférieur et la force de cisaillement est mesurée sur le châssis supérieur au moyen d'un capteur de force.

Au cours de l'essai, sont mesurés et enregistrés :

- L'effort normal N (capteur force);
- L'effort horizontal de cisaillement T (capteur force);

- Le déplacement horizontal du châssis mobile (capteur déplacement);
- Le déplacement vertical du piston dans le châssis supérieur (capteur déplacement).

Une fois l'essai terminé (fin de cisaillement), les données recueillies par l'unité d'acquisition sont traitées par le logiciel approprié ; un rapport (fichier résultats) est ensuite généré, présentant les différents détails de l'essai sous forme de tableaux et de courbes (contraintes-déformations, variations de volume et droites intrinsèques).

10. Présentation des résultats

Les résultats des essais de cisaillement sont présentés sous forme de courbes contraintes-déformations et droites intrinsèques pour déduire les caractéristiques C et ϕ .

10.1. Représentation des résultats de l'argile sans ajouts

Nous avons fait varier la contrainte normale de 1 à 4 bars. Les courbes obtenues sont portées sur les figures ci-dessous. Nous avons d'abord réalisé les essais sur l'argile seule dont les résultats sont présentés sur la figure IV-11 pour la courbe contrainte déplacement et la figure IV-12 pour la droite intrinsèque.

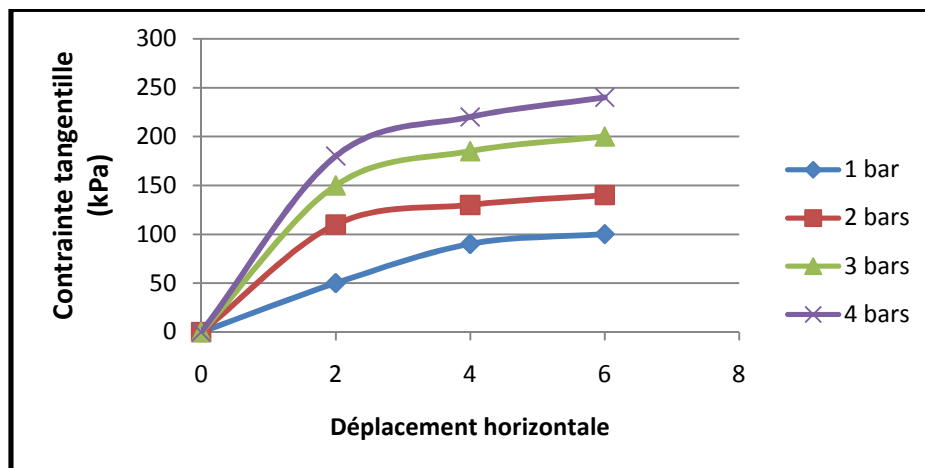


Figure IV.11 : Courbes contraintes tangentielles à 0% d'ajout

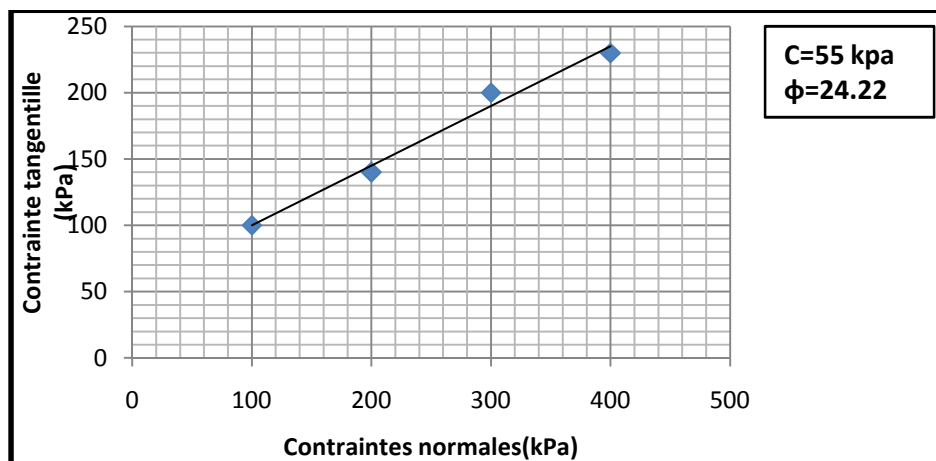


Figure IV.12: Droite intrinsèque à 0% d'ajout

10.2. Présentation des résultats de l'argile + plastique granulé

Dans cette série d'essai, nous avons fait varier le pourcentage d'ajout de plastique granulé de 3 à 7% au matériau argileux. Les résultats sont présentés dans les figures ci-dessous.

10.2.1. Argile +3% plastique granulé

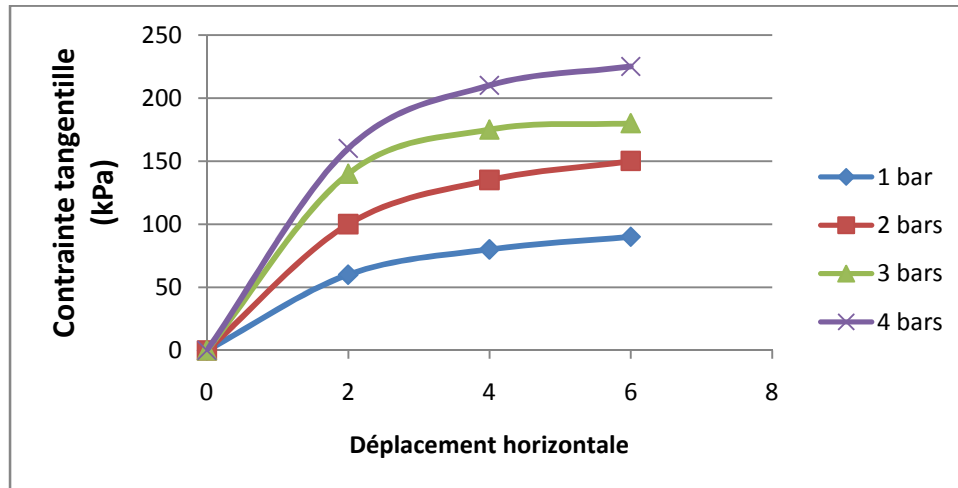


Figure IV.11 : Courbes contraintes tangentielles à 3% d'ajout de plastique granulé.

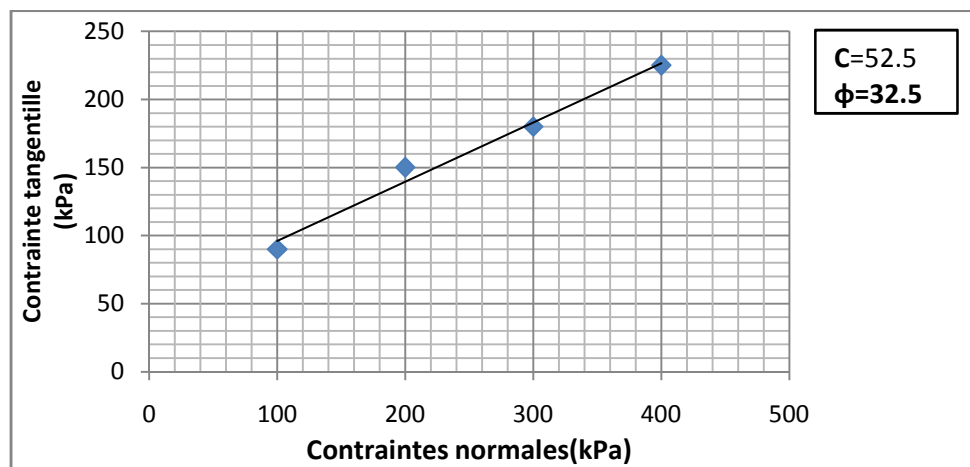


Figure IV.12: Droite intrinsèque à 3% d'ajout de plastique granulé.

10.2.2. Argile +5% plastique granulé

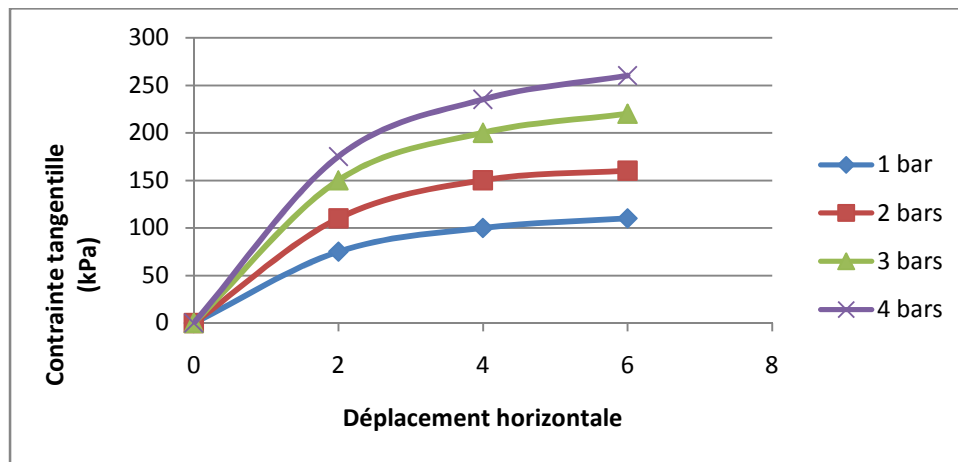


Figure IV.13 : Courbes contraintes tangentielles à 5% d'ajout de plastique granulé.

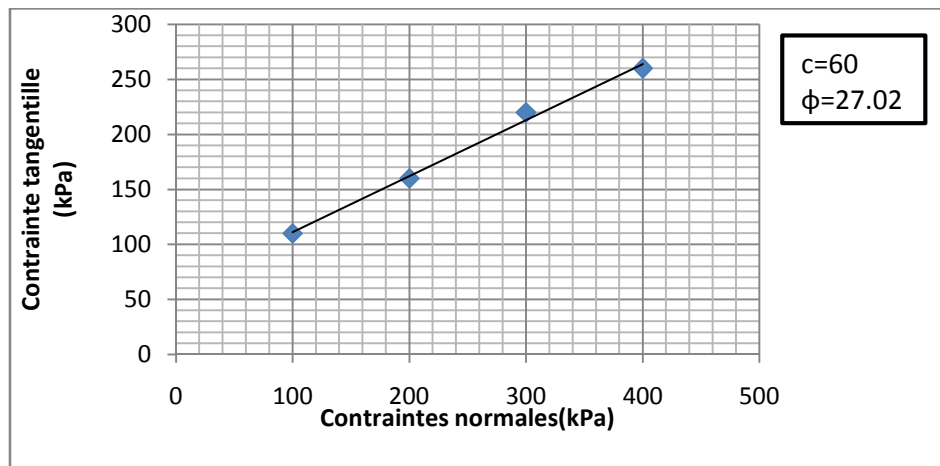


Figure IV.14: Droite intrinsèque à 5% d'ajout de plastique granulé.

10.2.3. Argile +7% plastique granulé

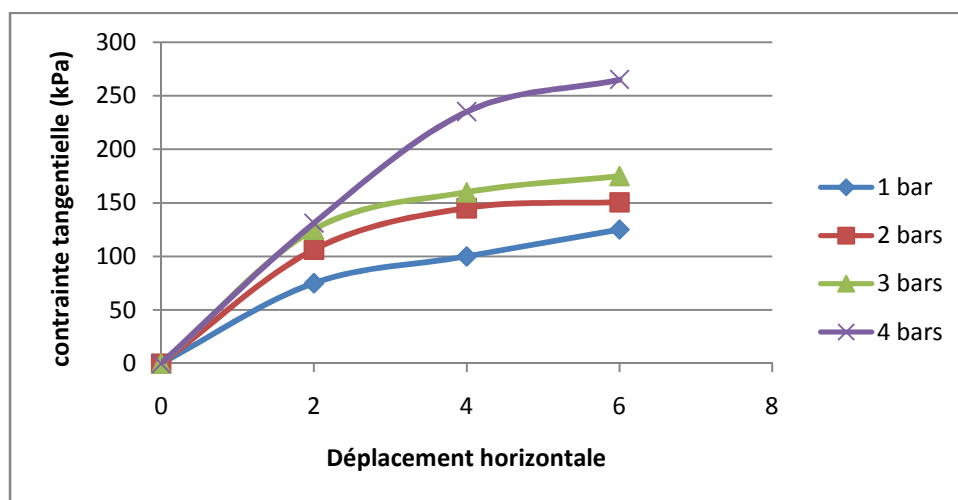


Figure IV.15 : Courbes contraintes tangentielles à 7% d'ajout de plastique granulé.

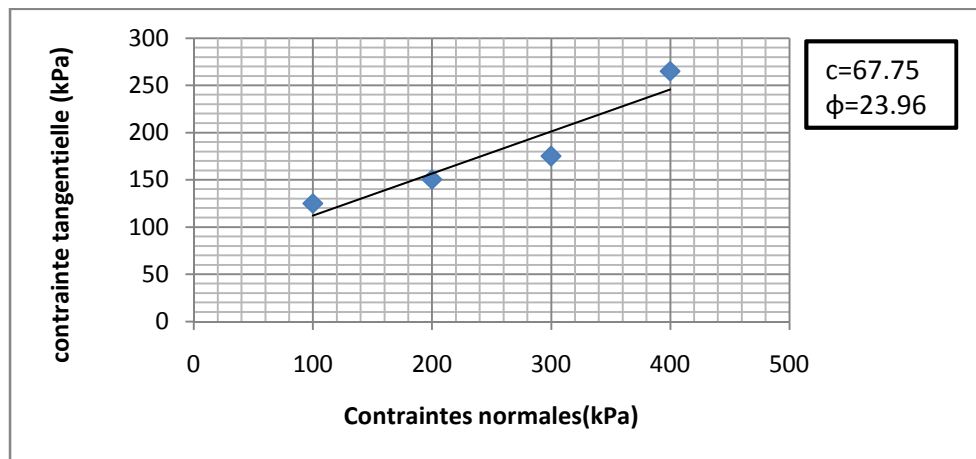


Figure IV.16: Droite intrinsèque à 7% d'ajout de plastique granulé.

10.2.4. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de plastique granulé.

En maintenant la contrainte normale à 4 bars et en faisant varier le pourcentage de plastique granulé, nous obtenons la courbe suivante.

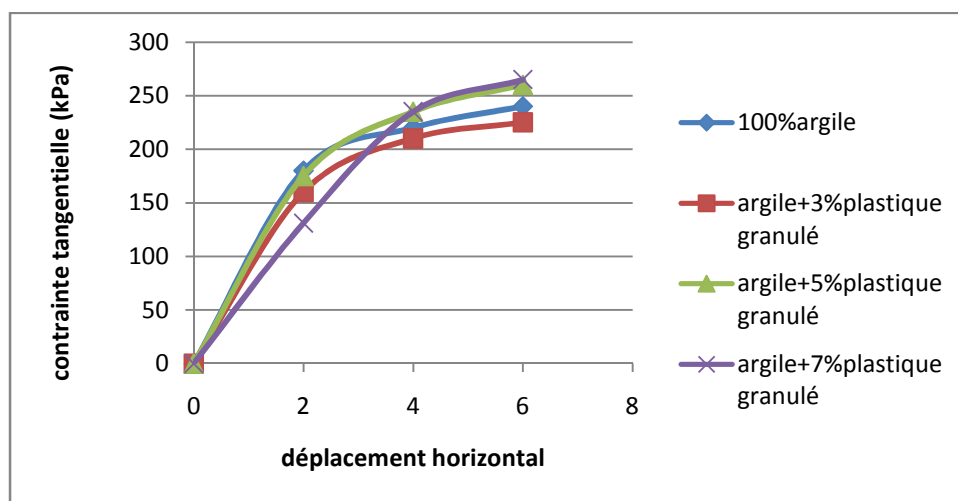


Figure IV.17 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de plastique granulé.

D'après les courbes obtenues, la résistance au cisaillement n'est augmentée que pour 5 et 7% d'ajout. Pour de faibles pourcentages de plastique granulé la résistance au cisaillement n'est pas augmentée.

10.2.5. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de plastique granulé

Tableau.2: Résultats des cohésions obtenus sur l'argile traitée avec du plastique granulé.

% du plastique granulé	0%	3%	5%	7%
cohésion	55	52	60	67.75

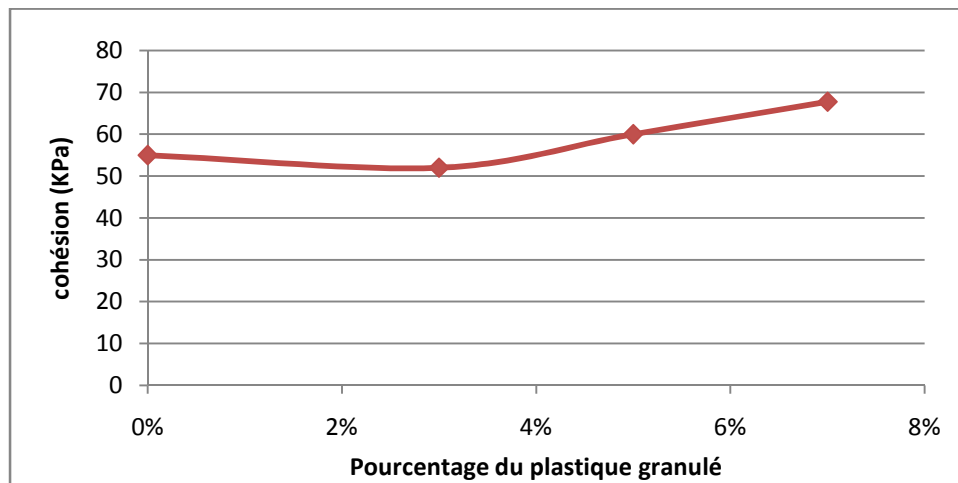


Figure IV.18 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en plastique granulé.

Tableau.3: Résultats des angles de frottement obtenus sur l'argile traitée avec du plastique granulé.

% du plastique granulé	0%	3%	5%	7%
L'angle de frottement	24.22	32.5	27.02	23.96

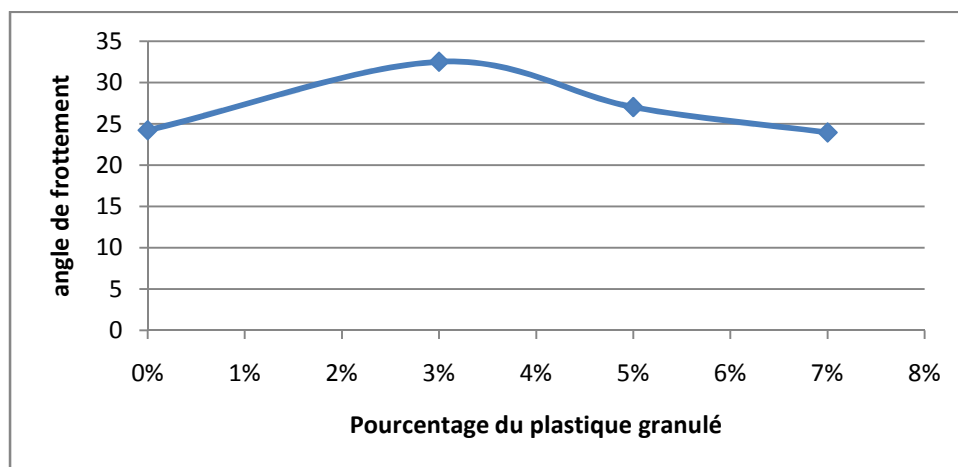


Figure IV.19: Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en plastique granulé

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout de plastique granulé fait augmenter la cohésion et fait diminuer l'angle de frottement interne à partir de 5% d'ajout.

10.3. Présentation des résultats de l'argile + PVC

Dans cette série d'essai, nous avons fait varier le pourcentage d'ajout de PVC de 3 à 7% au matériau argileux. Les résultats sont présentés dans les figures ci-dessous.

10.3.1. Argile+3%PVC

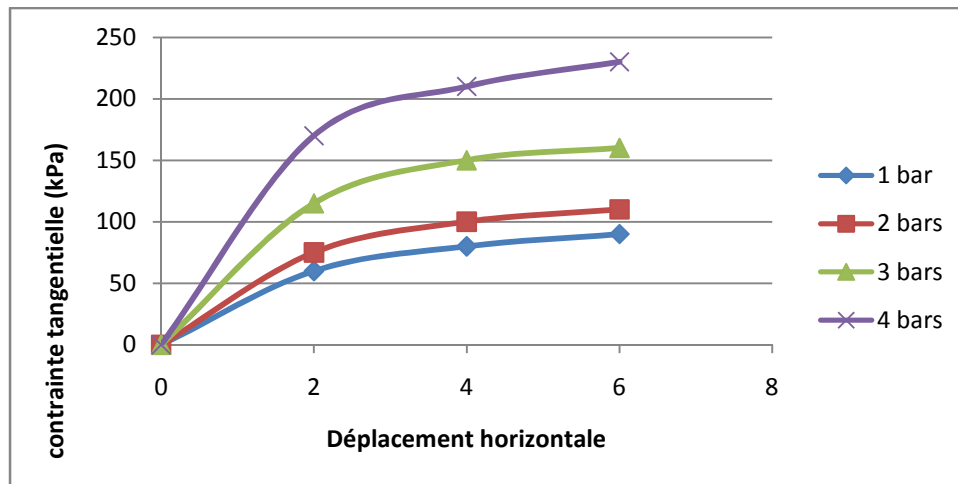


Figure IV.20 : Courbes contraintes tangentielles à 3% d'ajout de PVC.

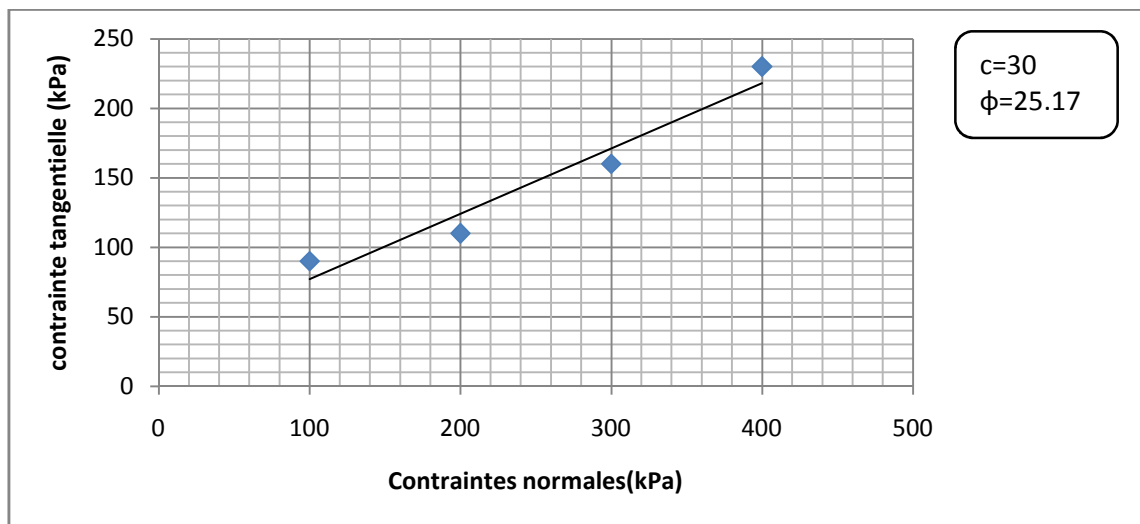


Figure IV.21: Droite intrinsèque à 3% d'ajout de PVC.

10.3.2. Argile+5%PVC

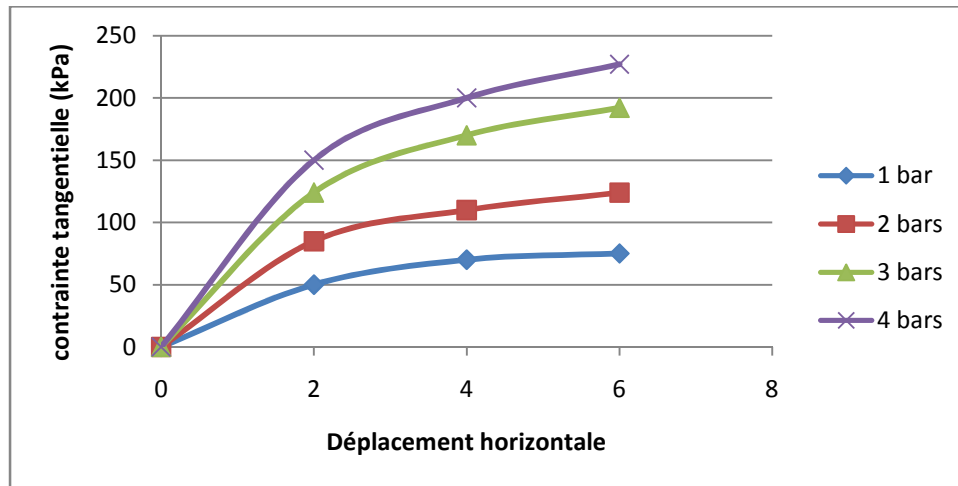


Figure IV.22 : Courbes contraintes tangentielles à 5% d'ajout de PVC.

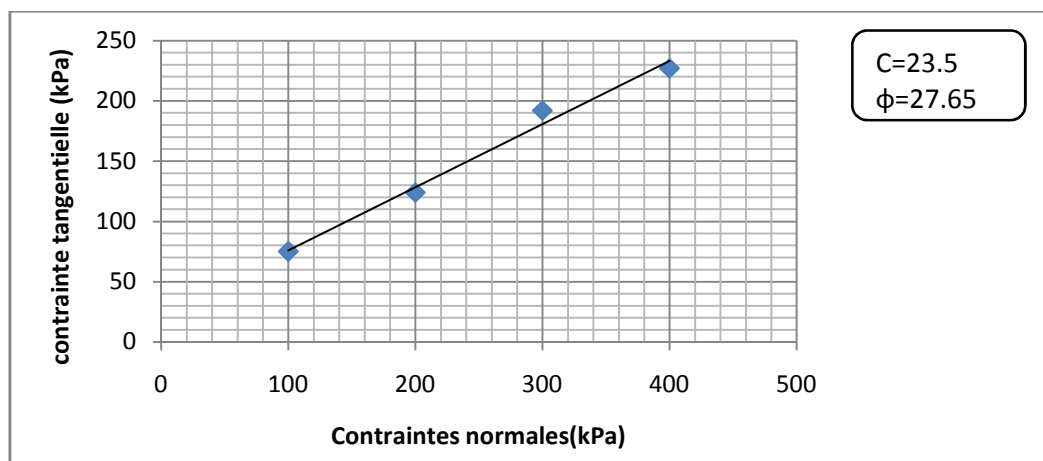


Figure IV.23: Droite intrinsèque à 5% d'ajout de PVC.

10.3.3. Argile+7%PVC

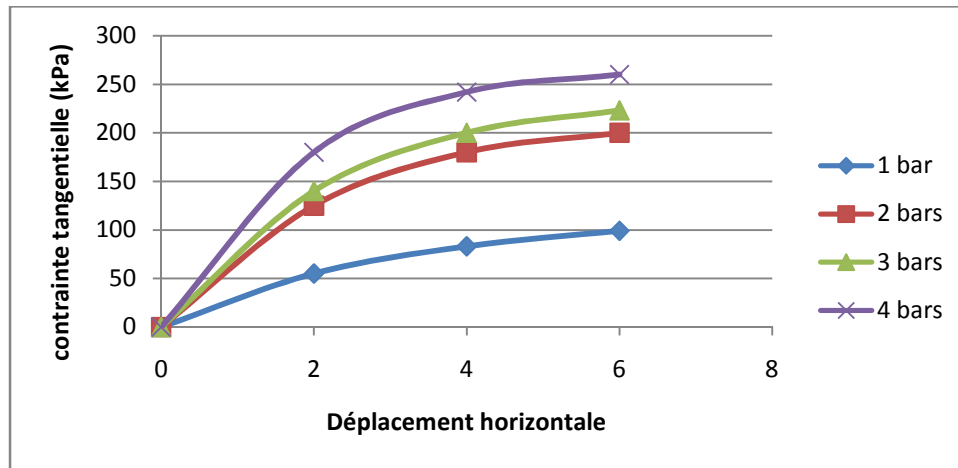


Figure IV.24 : Courbes contraintes tangentielles à 7% d'ajout de PVC.

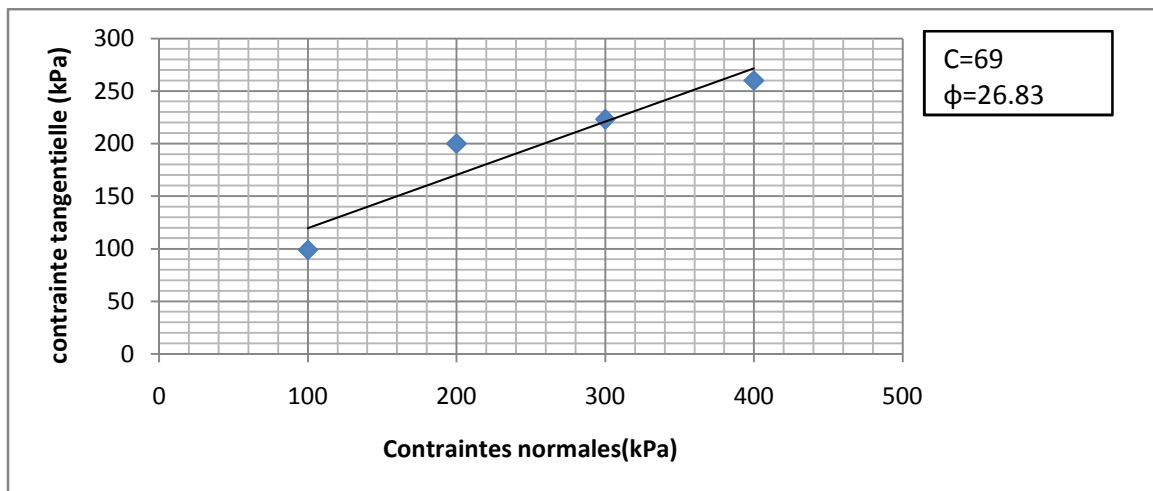


Figure IV.25: Droite intrinsèque à 7% d'ajout de PVC.

10.3.4. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage du PVC

En maintenant la contrainte normale à 4 bars et en faisant varier le pourcentage de PVC, nous obtenons la courbe suivante.

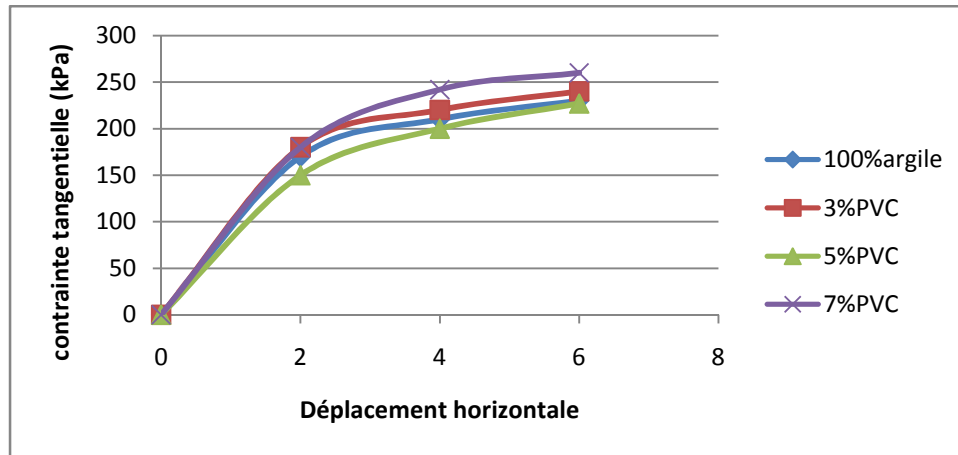


Figure IV.26 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de PVC.

D'après les courbes obtenues, la résistance au cisaillement n'est augmentée que pour 7% d'ajout de PVC. Pour de faibles pourcentages de PVC la résistance au cisaillement tend à se confondre.

10.3.5. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de plastique granulé

Tableau.4: Résultats des cohésions obtenus sur l'argile traitée avec du PVC.

%	0%	3%	5%	7%
cohésion	55	30	23.5	69

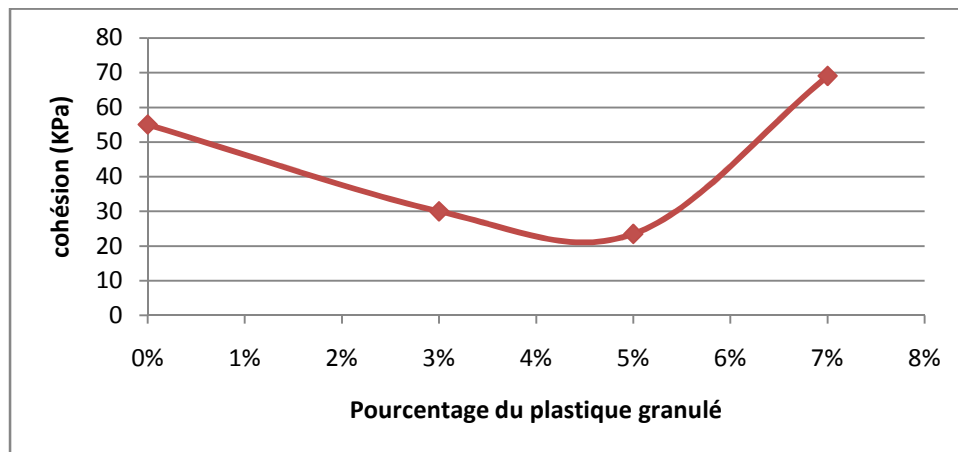


Figure IV.27 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en PVC.

Tableau: Résultats des angles de frottement obtenus sur l'argile traitée avec du PVC.

%	0%	3%	5%	7%
Angle de frottement	24.22	25.17	27.65	26.83

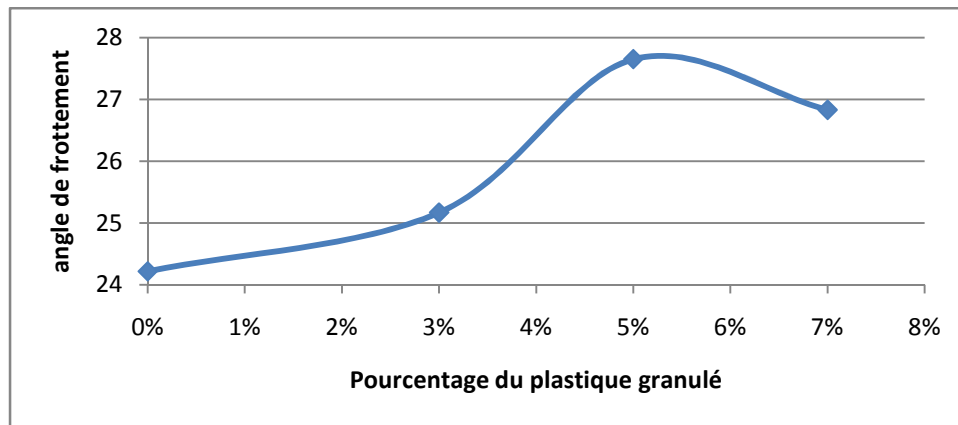


Figure IV.28 : Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en PVC

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout PVC fait augmenter l'angle de frottement interne passant par un seuil de 5% d'ajout et fait diminuer la cohésion pour 3 et 5% avec un pic à 7%.

10.4. Présentation des résultats de l'argile + sable

Dans cette série d'essai, nous avons fait varier le pourcentage d'ajout de sable de 5 à 25% par pas de 5% au matériau argileux. Les résultats sont présentés dans les figures ci-dessous.

10.4.1. Argile + 5% sable

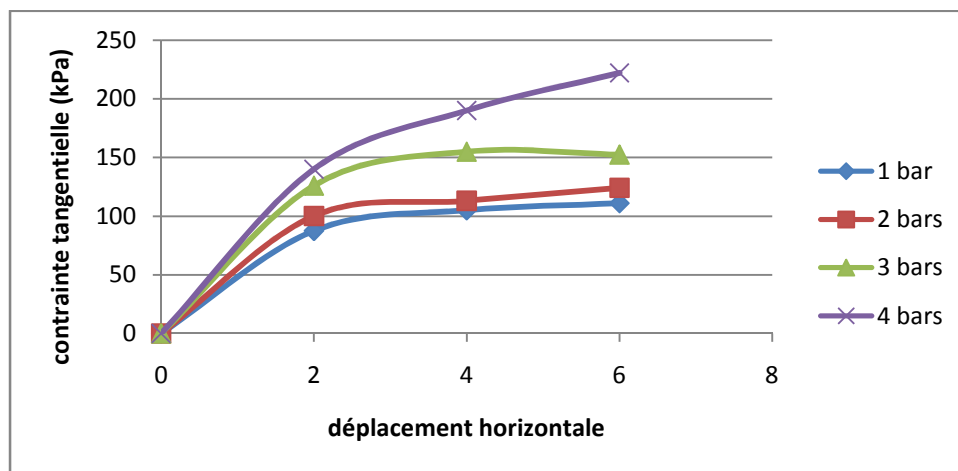


Figure IV.29 : Courbes contraintes tangentielles à 5% d'ajout de sable.

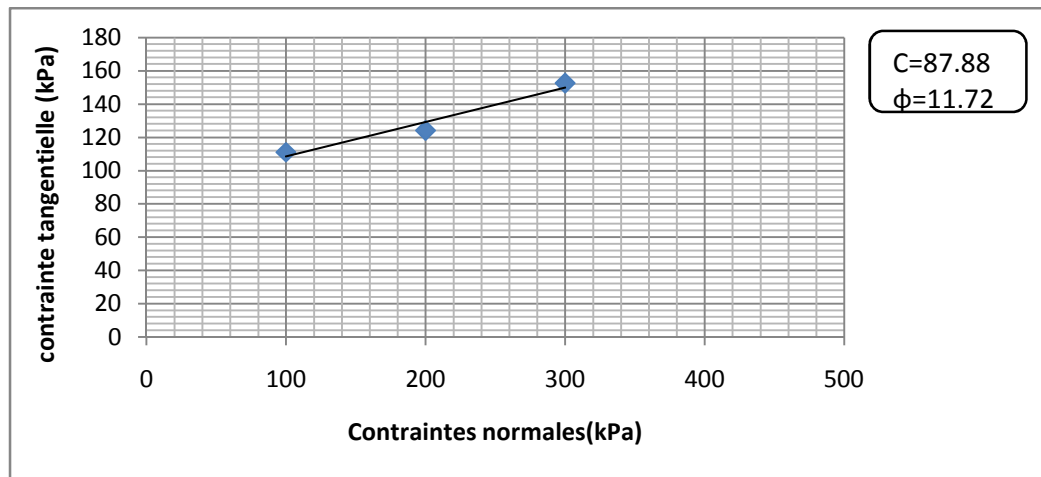


Figure IV.30: Droite intrinsèque à 5% d'ajout de sable.

10.4.2. Argile + 10% sable

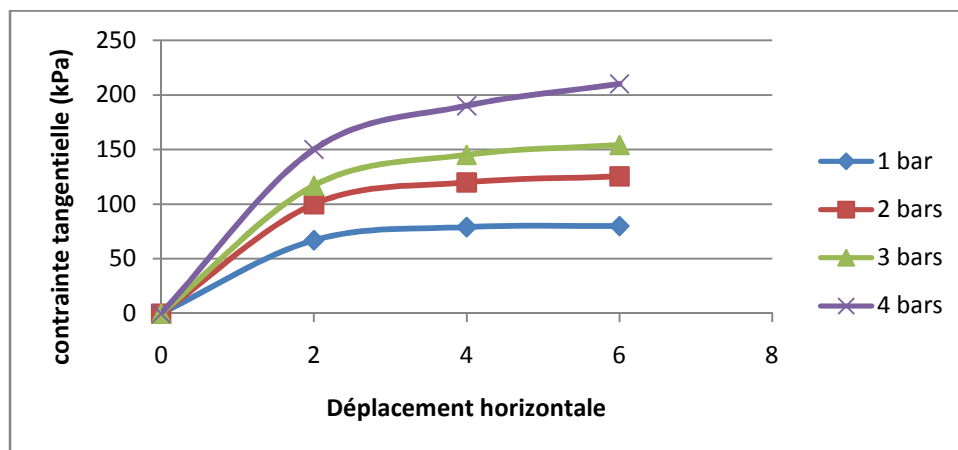


Figure IV.31 : Courbes contraintes tangentielles à 10% d'ajout de sable.

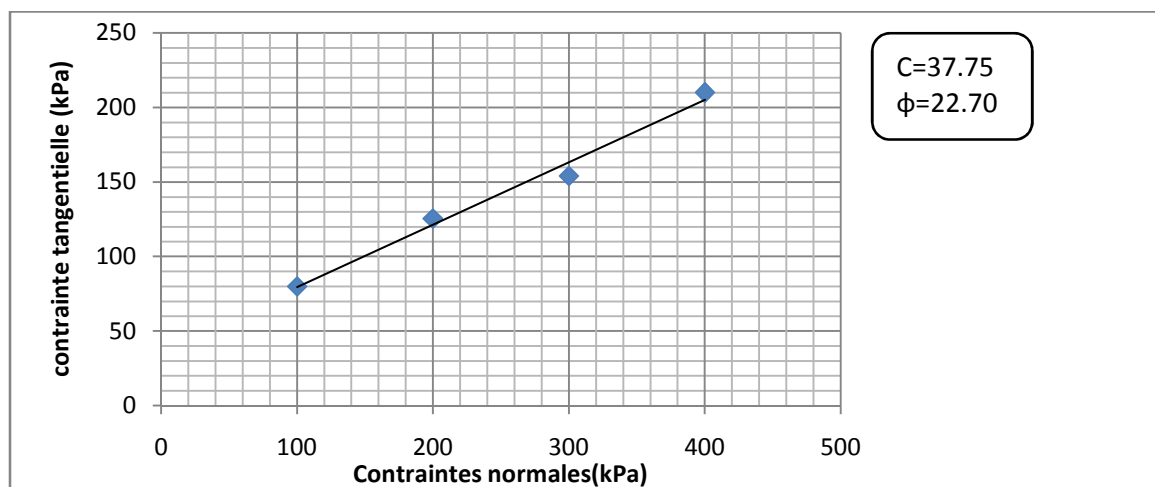


Figure IV.32: Droite intrinsèque à 10% d'ajout de sable.

10.4.3. Argile + 15% sable

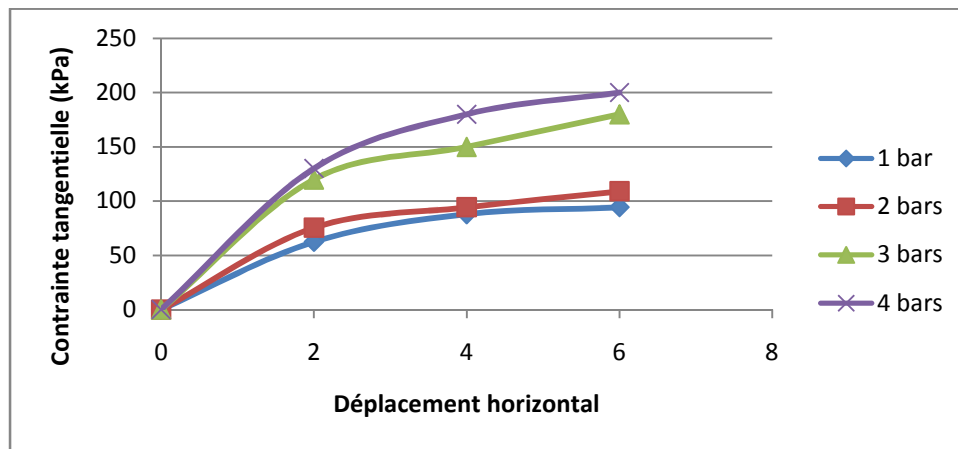


Figure IV.33 : Courbes contraintes tangentielles à 15% d'ajout de sable.

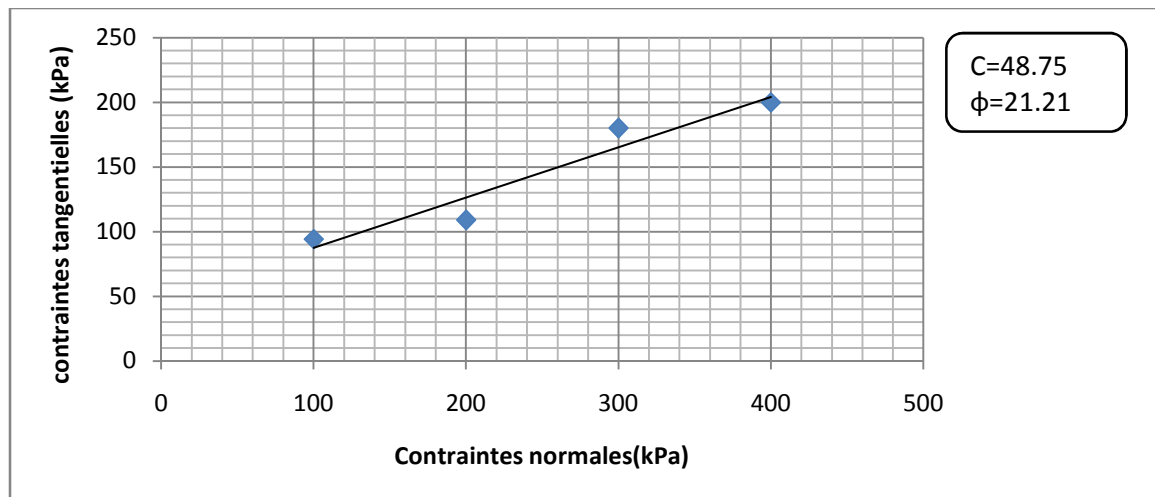


Figure IV.34: Droite intrinsèque à 15% d'ajout de sable.

10.4.4. Argile + 20% sable

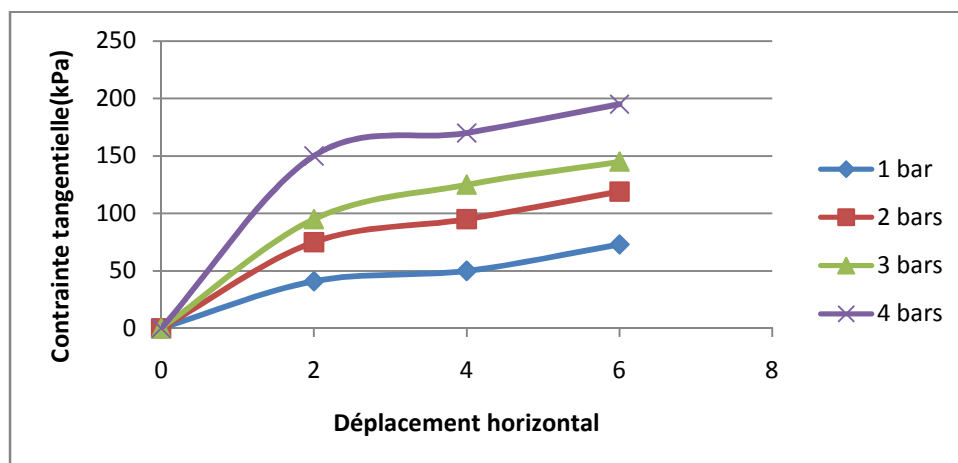


Figure IV.35 : Courbes contraintes tangentielles à 20% d'ajout de sable.

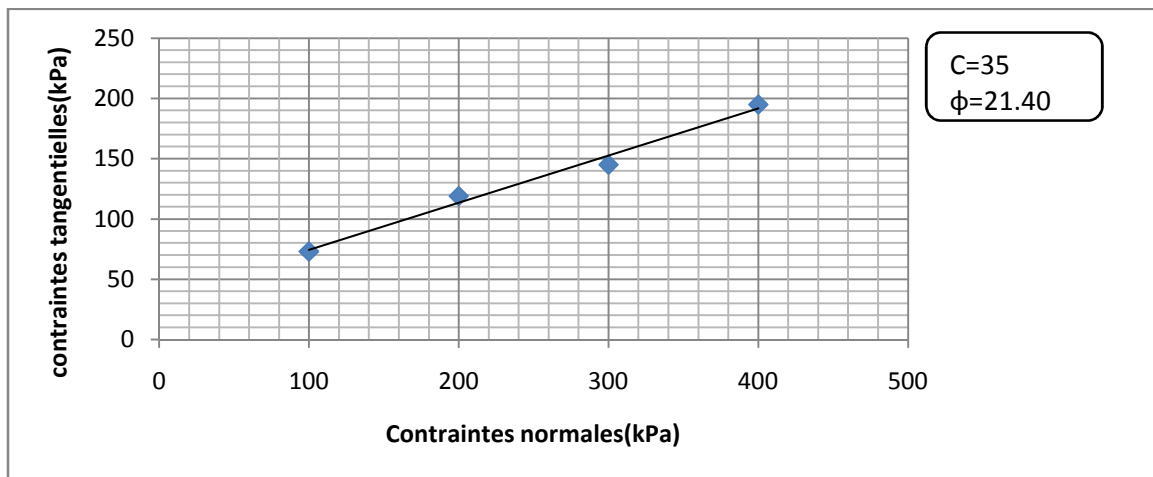


Figure IV.36: Droite intrinsèque à 20% d'ajout de sable.

10.4.5. Argile + 25% sable

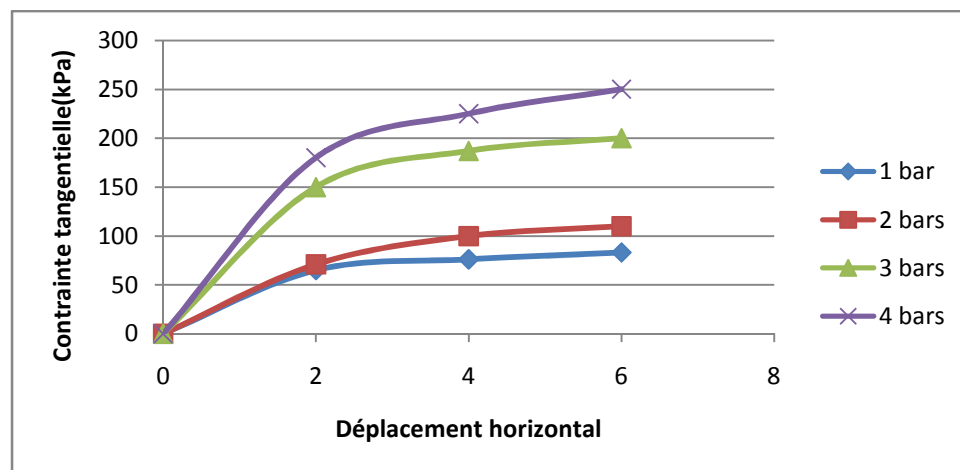


Figure IV.37 : Courbes contraintes tangentielles à 25% d'ajout de sable.

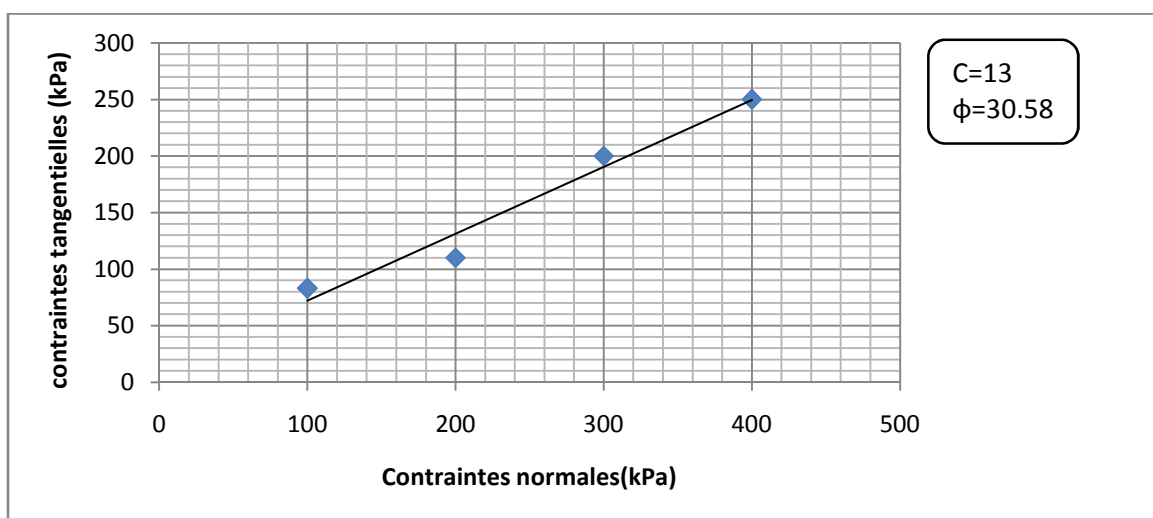


Figure IV.38: Droite intrinsèque à 25% d'ajout de sable.

10.4.6. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de sable à 400 KPa

En maintenant la contrainte normale à 4 bars et en faisant varier le pourcentage de sable, nous obtenons les courbes suivantes.

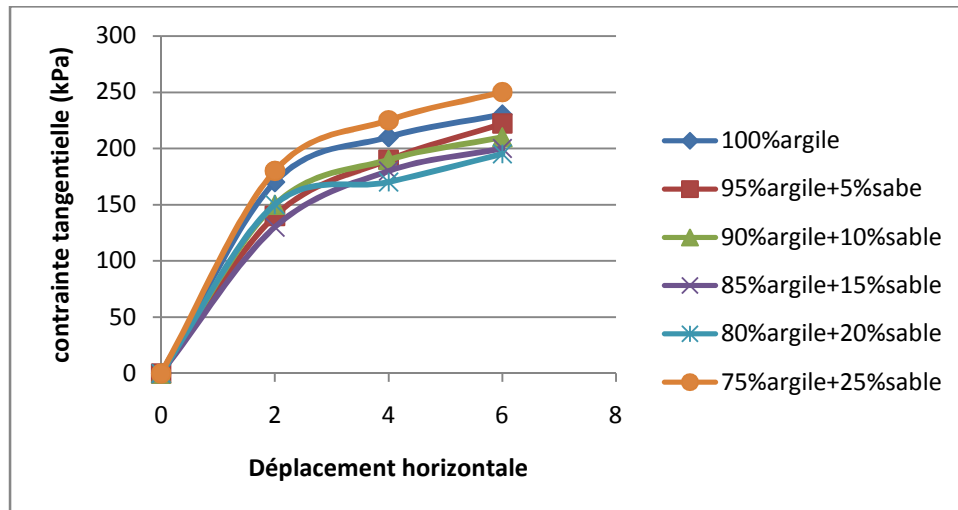


Figure IV.39 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de sable.

D'après les courbes obtenues, la résistance au cisaillement n'est augmentée que pour 25% d'ajout de sable. Pour de faibles pourcentages de sable est en baisse par rapport à la résistance au cisaillement de l'argile seule.

10.4.7. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de sable

Tableau.5: Résultats des cohésions obtenus sur l'argile traitée avec du sable

%	0%	5%	10%	15%	20%	25%
cohésion	55	87.88	37.75	48.75	35	13

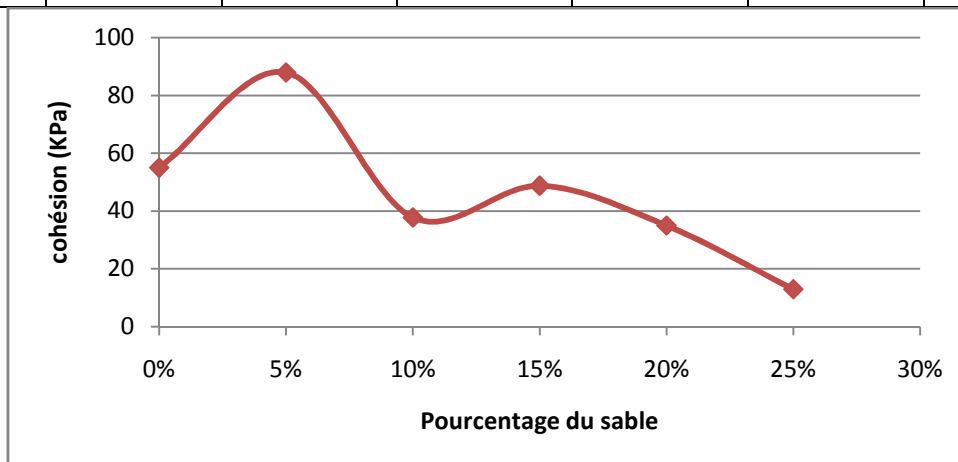
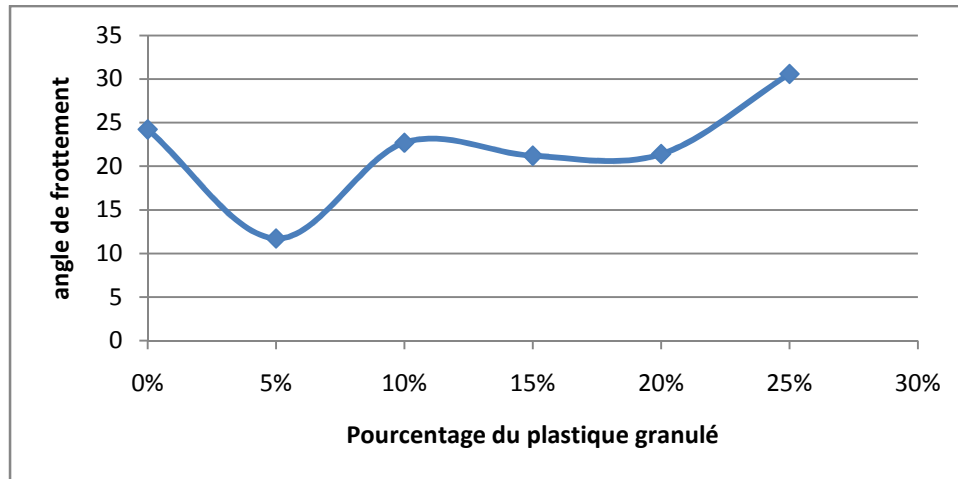


Figure IV.40 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Tableau.6: Résultats des angles de frottement obtenus sur l'argile traitée avec du sable.

%	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Angle de frottement	24.22	11.72	22.70	21.21	21.40	30.58

**Figure IV.41 :** Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout de sable ne fait augmenter l'angle de frottement interne que pour un apport de sable supérieur à 25%. Par contre, la cohésion n'est augmentée que pour 5% d'ajout de sable et elle diminue pour tous les autres ajouts.

10.5. Présentation des résultats de l'argile + sable+plastique granulé

Dans cette série d'essai, nous avons fait varier le pourcentage d'ajout de sable de 5 à 25% par pas de 5% au matériau argileux et on fixe le pourcentage d'ajout de plastique granulé. Les résultats sont présentés dans les figures ci-dessous.

10.5.1. Argile+sable+3% plastique granulé

- Dans ce cas on varie le pourcentage de sable et on fixe le pourcentage de plastique granulé à 3%.

10.5.1.1. Argile+5% sable+3% plastique granulé

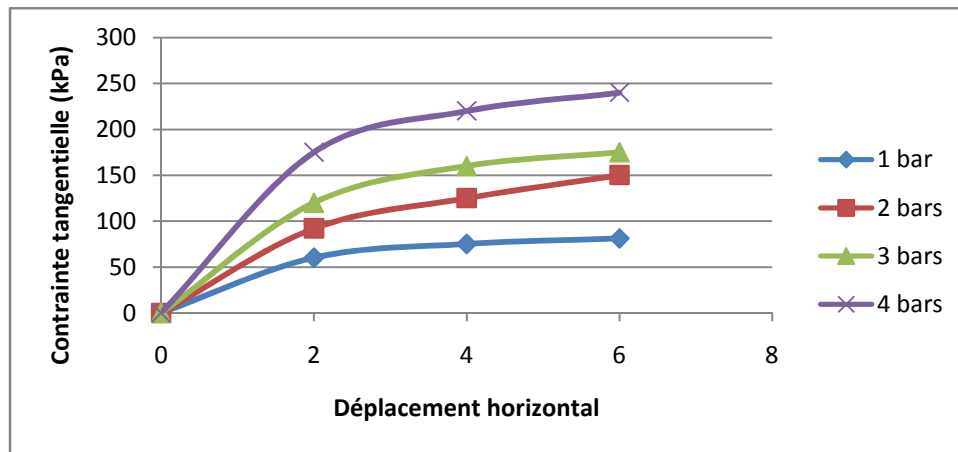


Figure IV.42 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 5% de sable et 3% de plastique granulé.

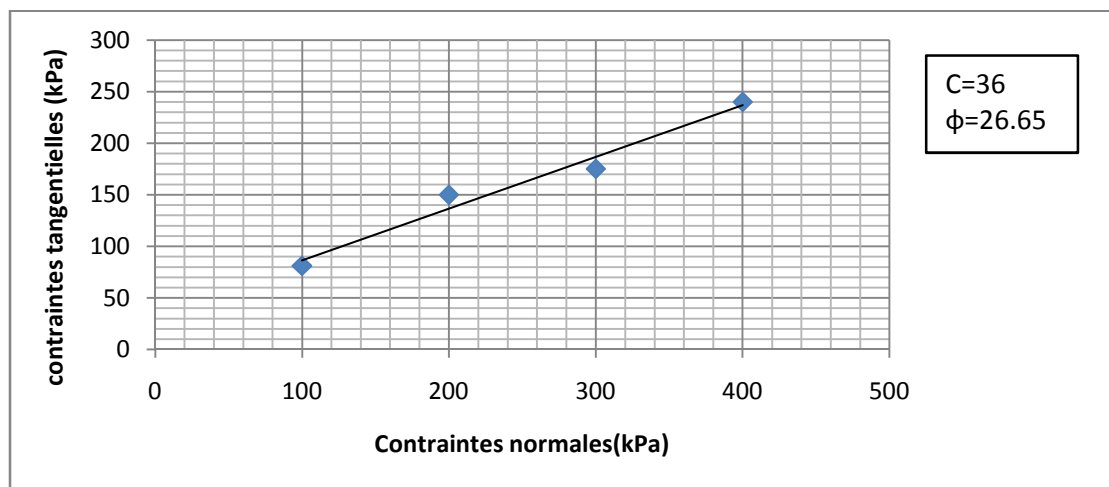


Figure IV.43: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 3% de plastique granulé.

10.5.1.2. Argile+10% sable+3% plastique granulé

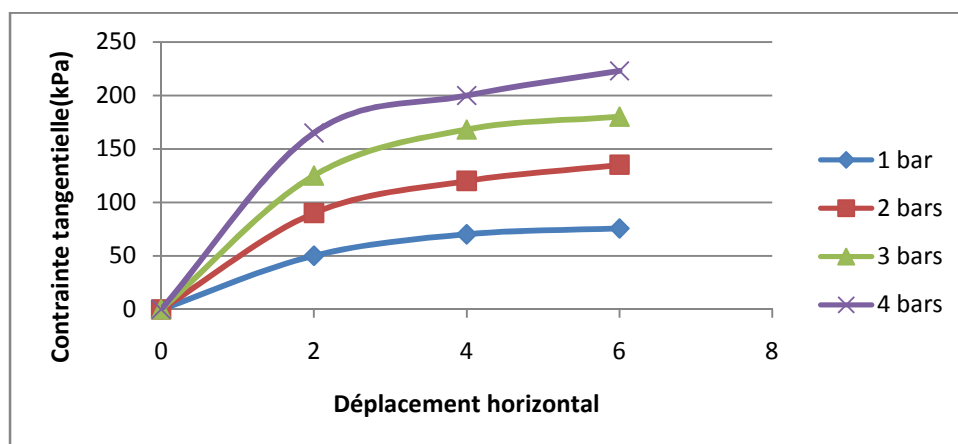


Figure IV.45 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 10% de sable et 3% de plastique granulé.

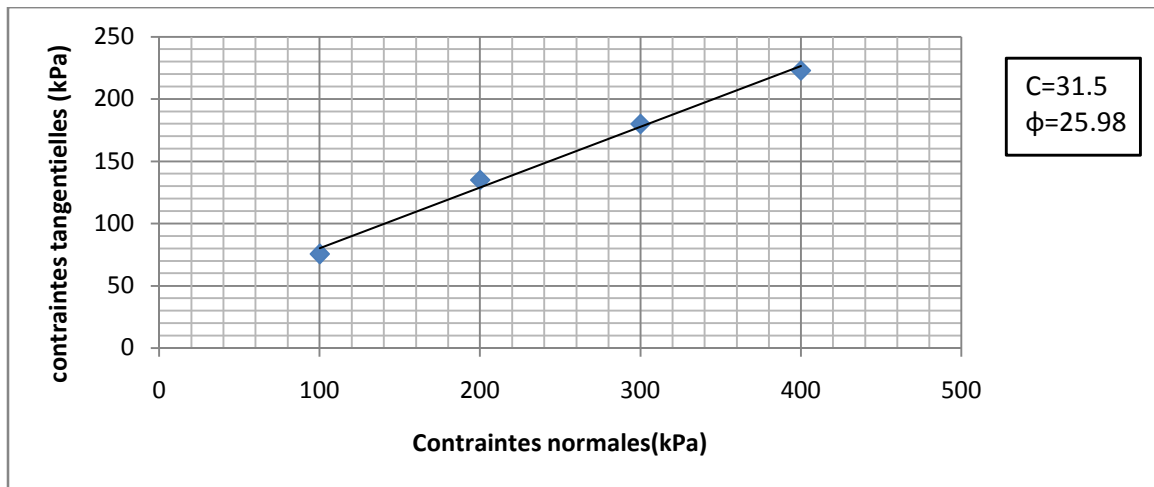


Figure IV.46: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 3% de plastique granulé.

10.5.1.3. Argile+15% sable+3% plastique granulé

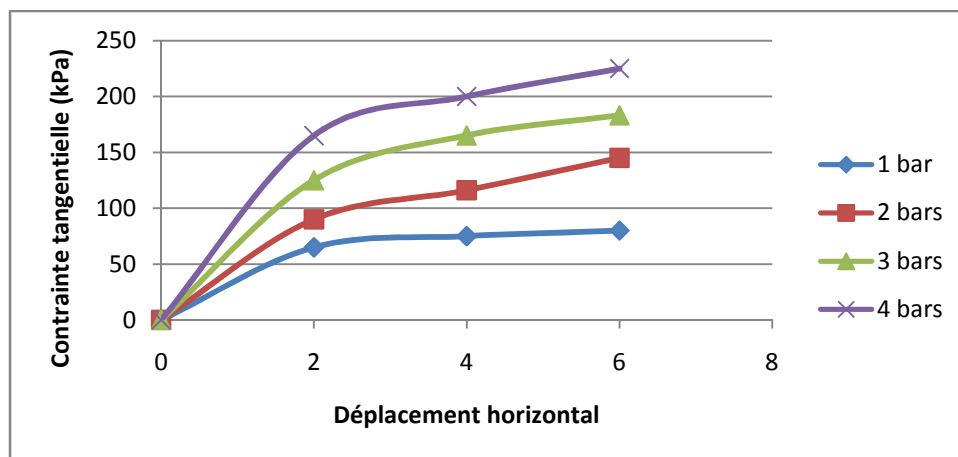


Figure IV.47 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 15% de sable et 3% de plastique granulé.

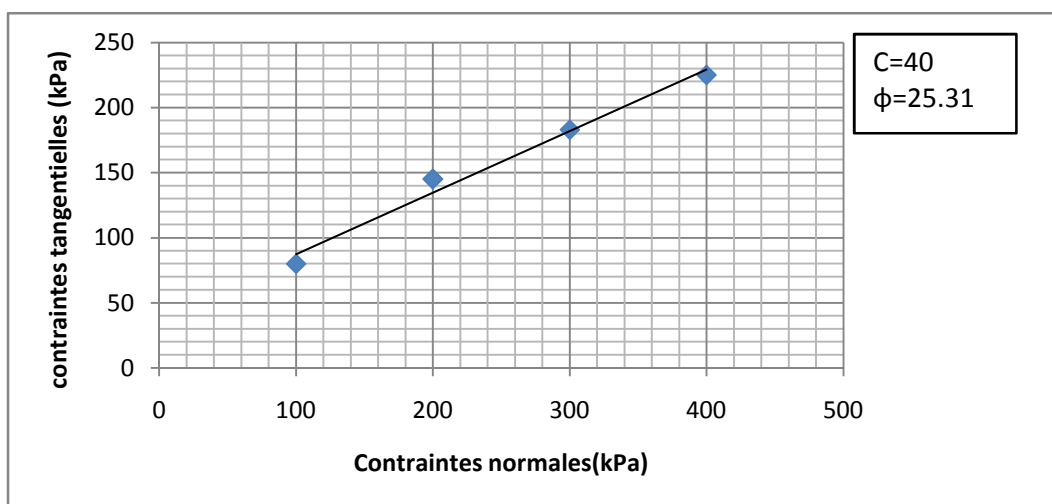


Figure IV.48: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 3% de plastique granulé.

10.5.1.4. Argile+20% sable+3% plastique granulé

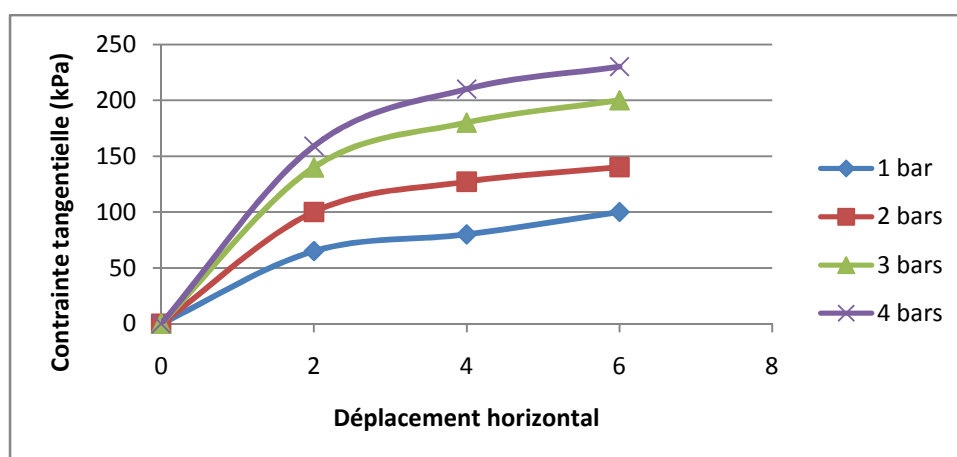


Figure IV.49 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 20% de sable et 3% de plastique granulé.

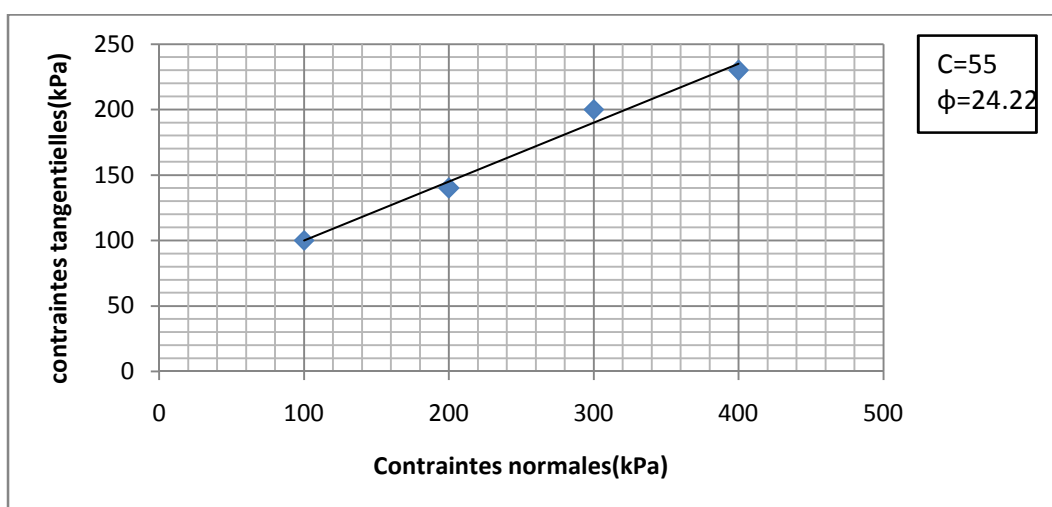


Figure IV.50: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 3% de plastique granulé.

10.5.1.5. Argile+25% sable+3% plastique granulé

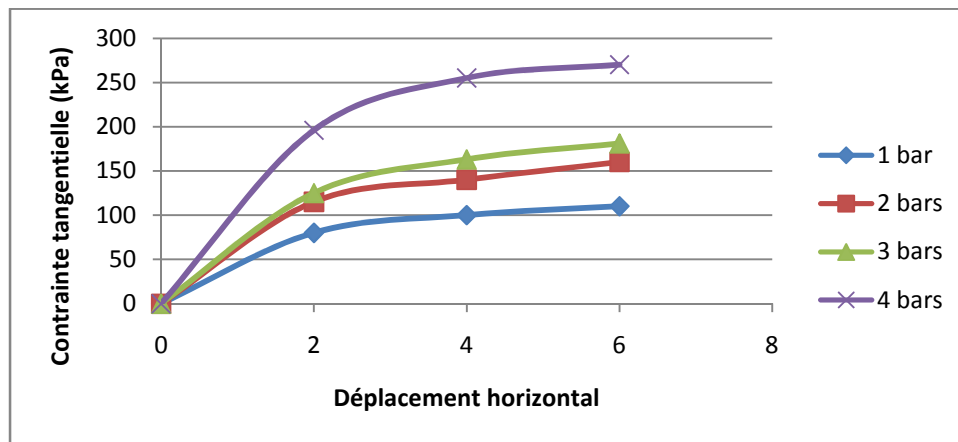


Figure IV.51 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 25% de sable et 3% de plastique granulé.

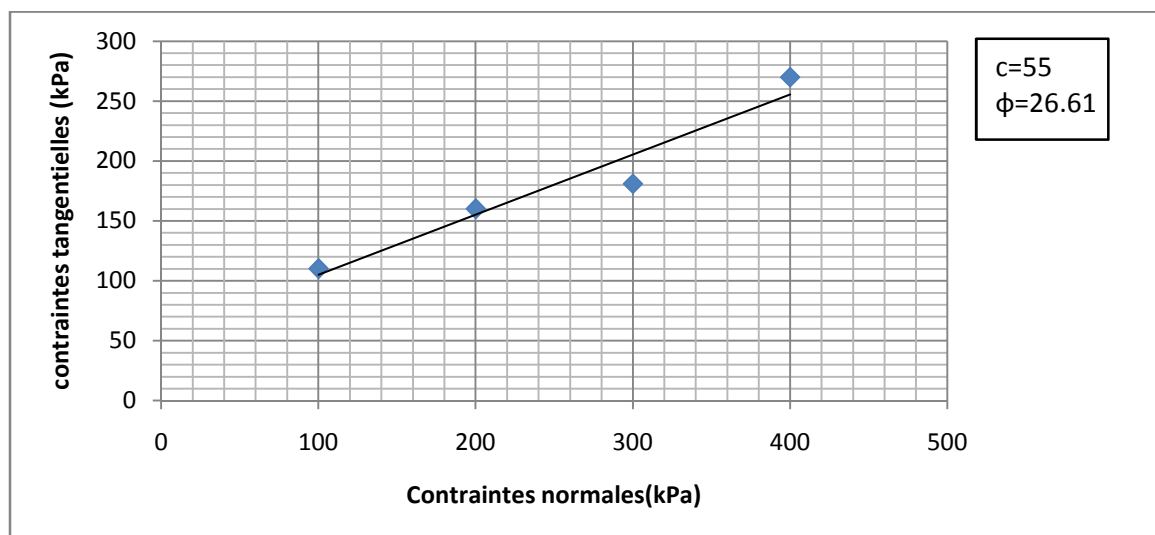


Figure IV.52: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 3% de plastique granulé.

10.5.1.6. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange argile+3%plastique granulé à 400 KPa

En maintenant la contrainte normale à 4 bars et le pourcentage d'ajout de plastique granulé à 3% et en faisant varier le pourcentage de sable, nous obtenons les courbes suivantes.

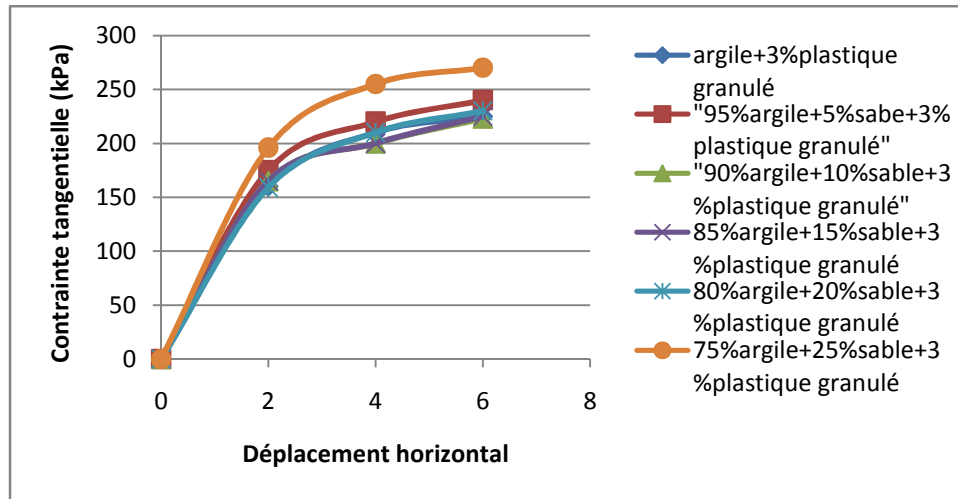


Figure IV.53 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+3% plastique granulé).

D'après les courbes obtenues, la résistance au cisaillement n'est augmentée que pour 25% d'ajout de sable et 3% de plastique granulé et les autres courbes tendent à se confondre.

10.5.1.7. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de sable

Tableau.7: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+3%plastique granulé) traitée avec du sable

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
cohésion	52.5	36	31.5	40	55	55

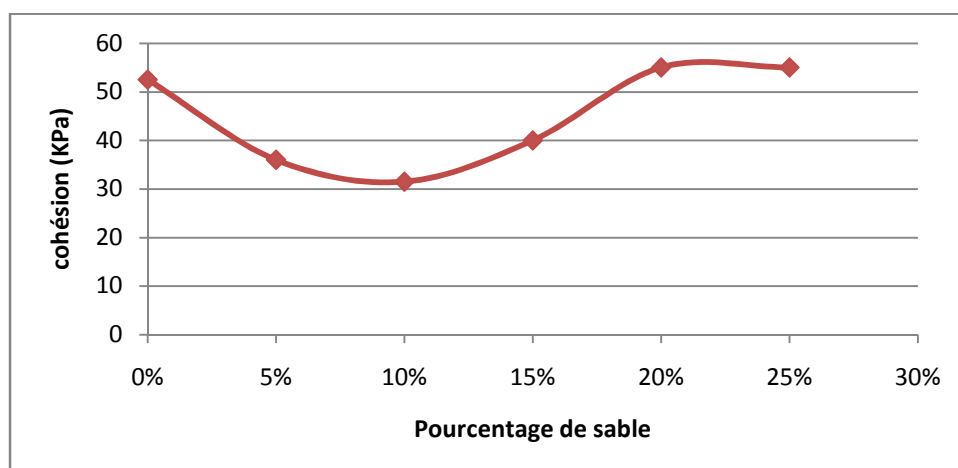


Figure IV.54 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Tableau.8: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+3%plastique granulé) traitée avec du sable.

%	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Angle de frottement	32.5	26.65	25.98	25.31	24.22	26.61

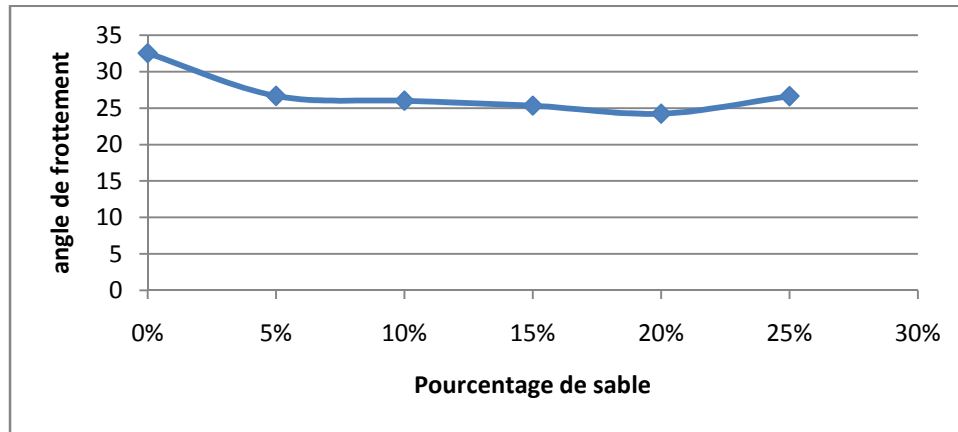


Figure IV .55: Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout simultané de sable et de plastique granulé à 3% ne fait augmenter pas l'angle de frottement interne et il se stabilise autour de 25°. Par contre, la cohésion diminue jusqu'à un certain seuil puis reprend pour se stabiliser autour de la valeur de l'argile seule.

10.5.2. Argile+sable+5% plastique granulé

- Dans ce cas on varie le pourcentage de sable et on fixe le pourcentage de plastique granulé à 5%.

10.5.2.1. Argile+5%sable+5% plastique granulé

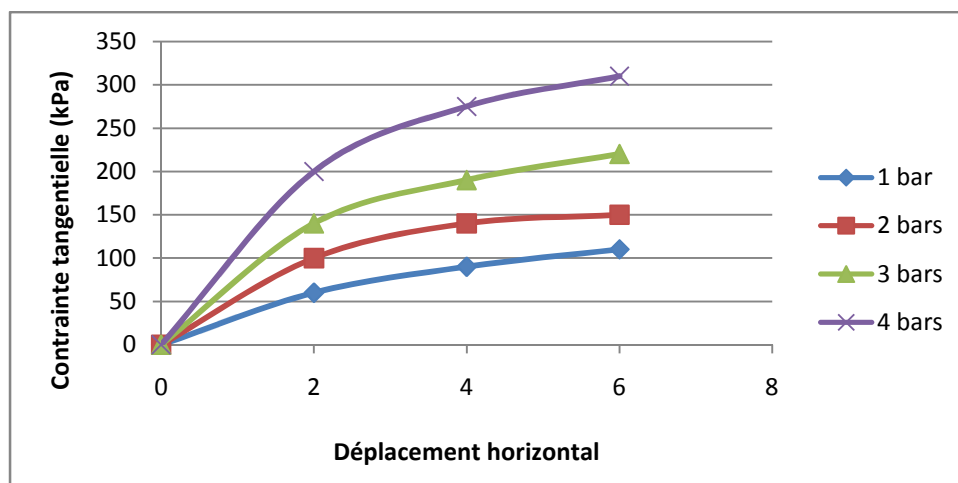


Figure IV.11.56 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 5% de sable et 5% de plastique granulé.

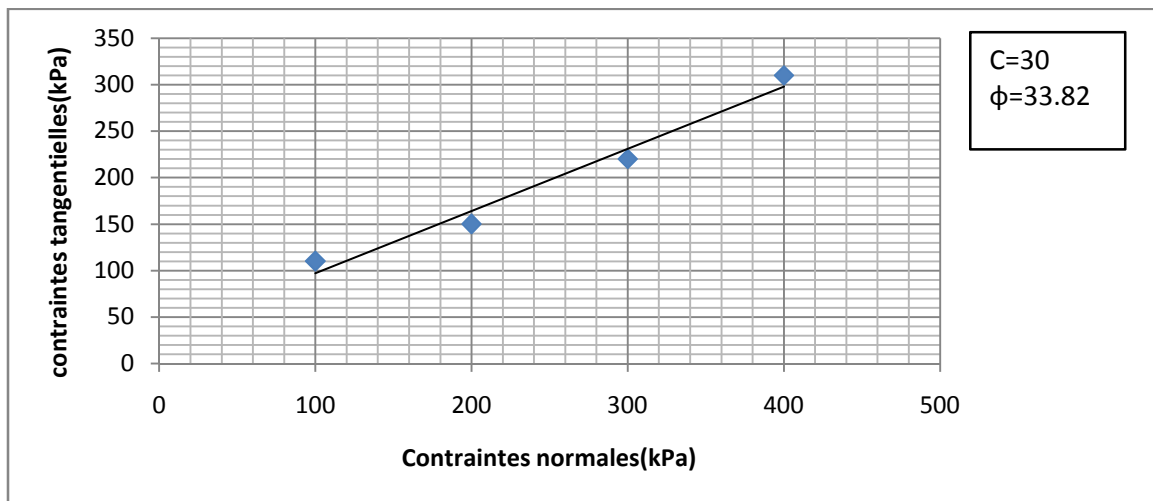


Figure IV.57: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 5% de plastique granulé.

10.5.2.2. Argile+10% sable+5% plastique granulé

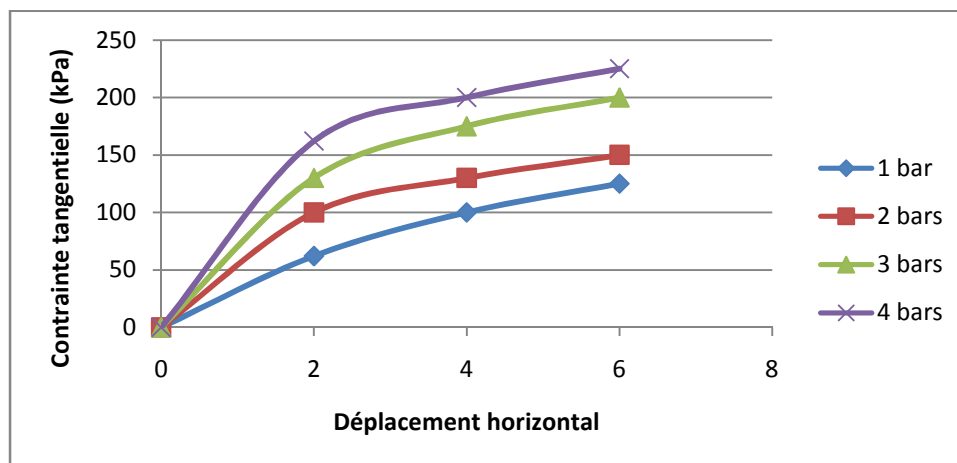


Figure IV.58 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 10% de sable et 5% de plastique granulé.

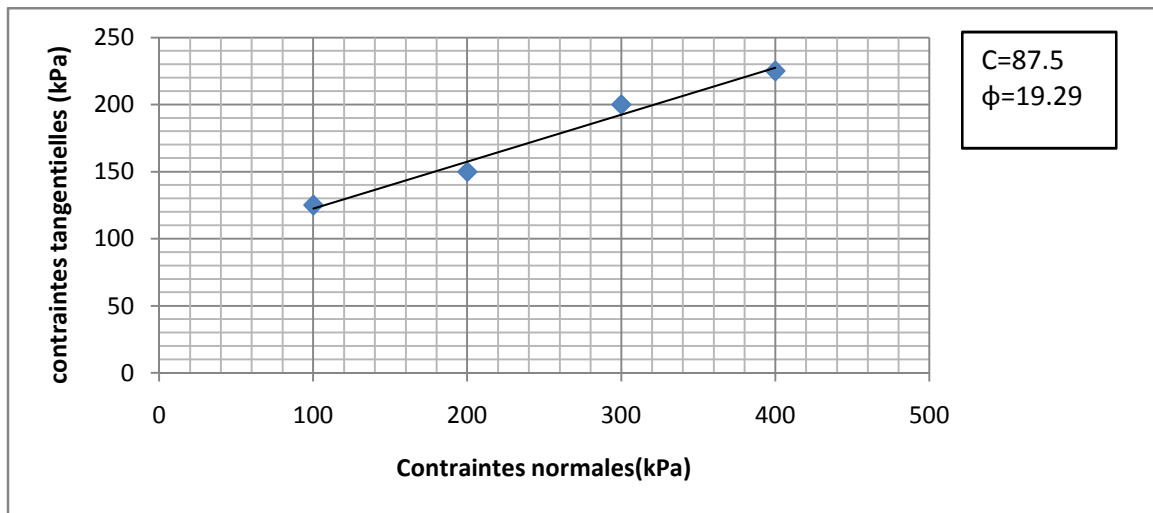


Figure IV.59: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 5% de plastique granulé.

10.5.2.3. Argile+15% sable+5% plastique granulé

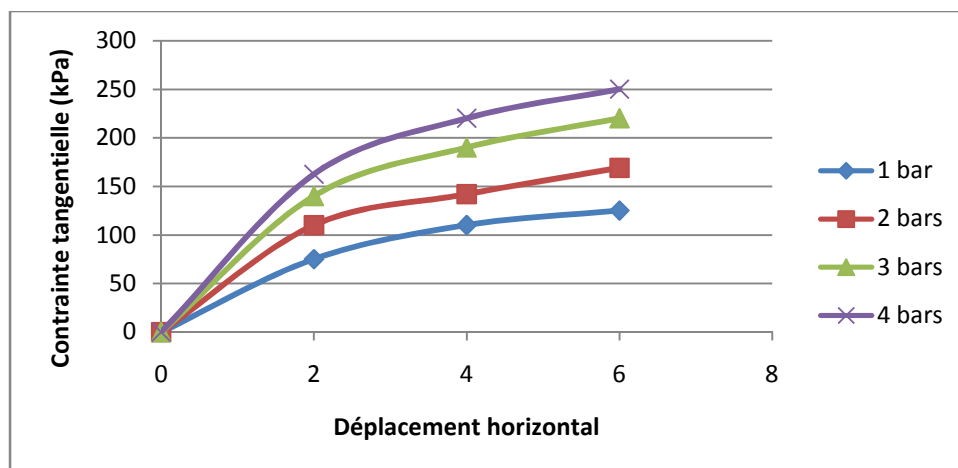


Figure IV.60 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 15% de sable et 5% de plastique granulé.

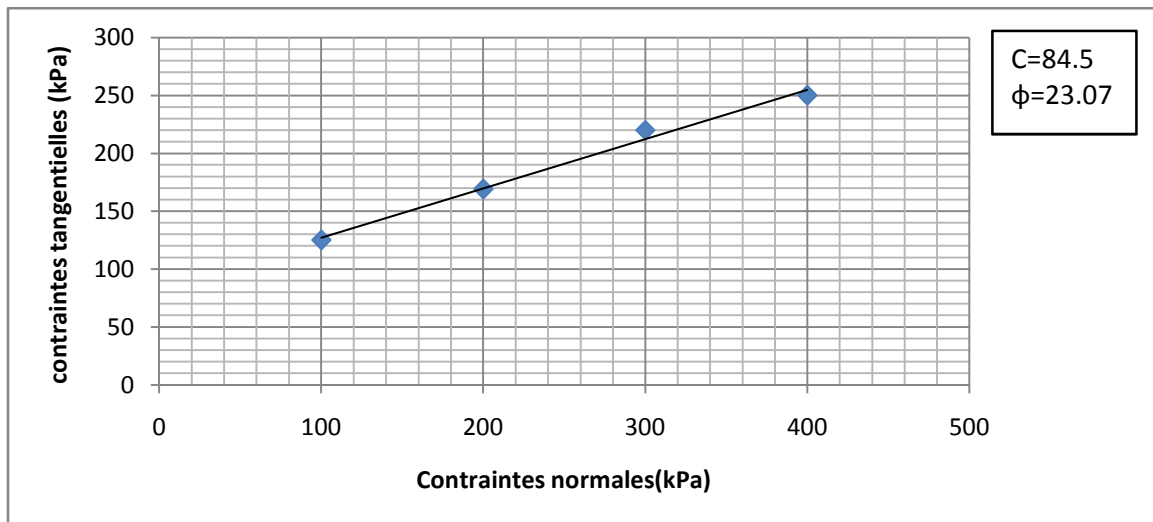


Figure IV.61: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 5% de plastique granulé.

10.5.2.4. Argile+20% sable+5% plastique granulé

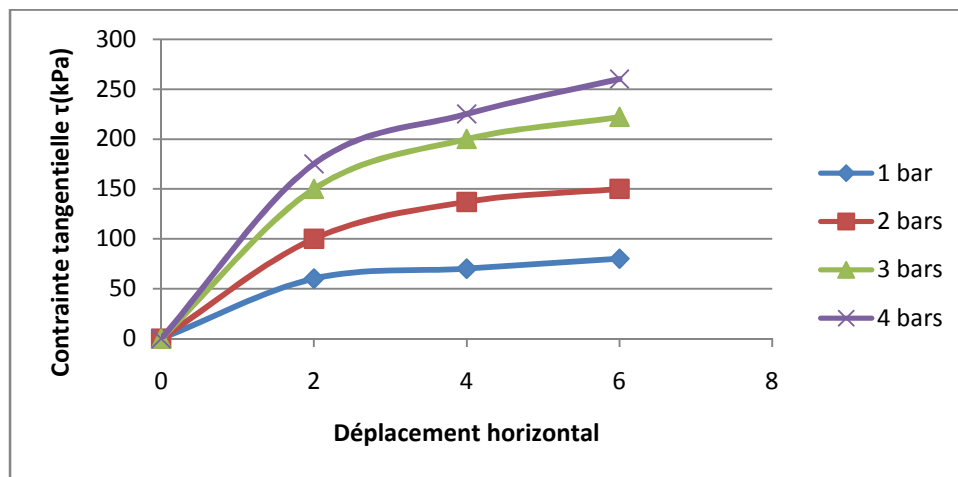


Figure IV.62 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 20% de sable et 5% de plastique granulé.

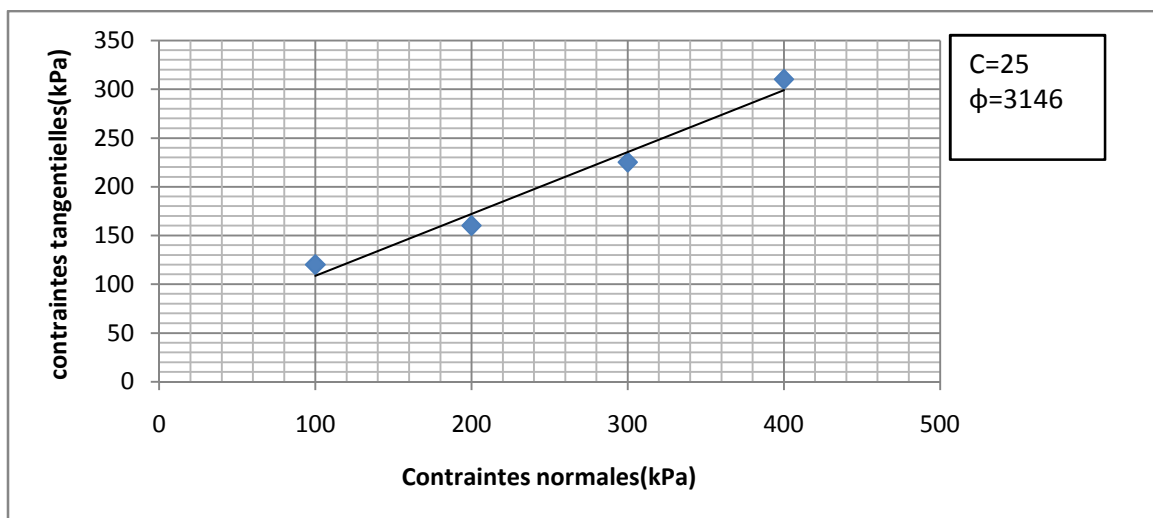


Figure IV.63: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 5% de plastique granulé.

10.5.2.5. Argile+25% sable+5% plastique granulé

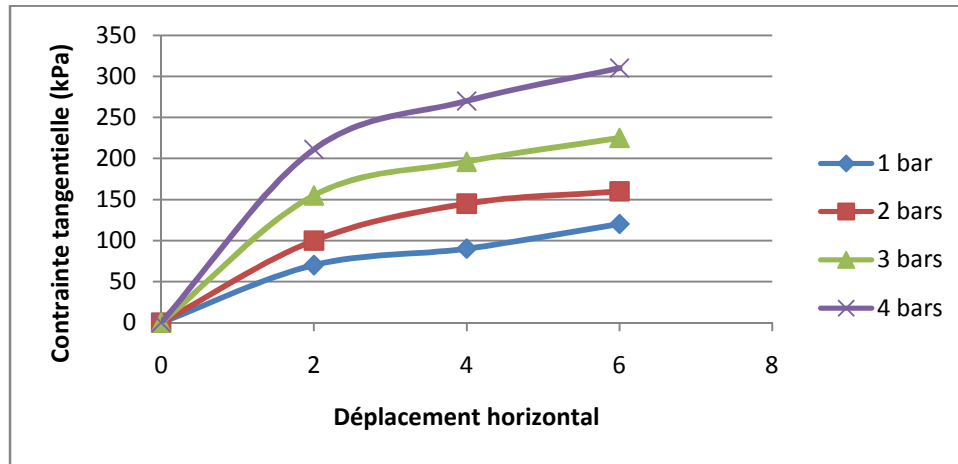


Figure IV.64: Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 25% de sable et 5% de plastique granulé.

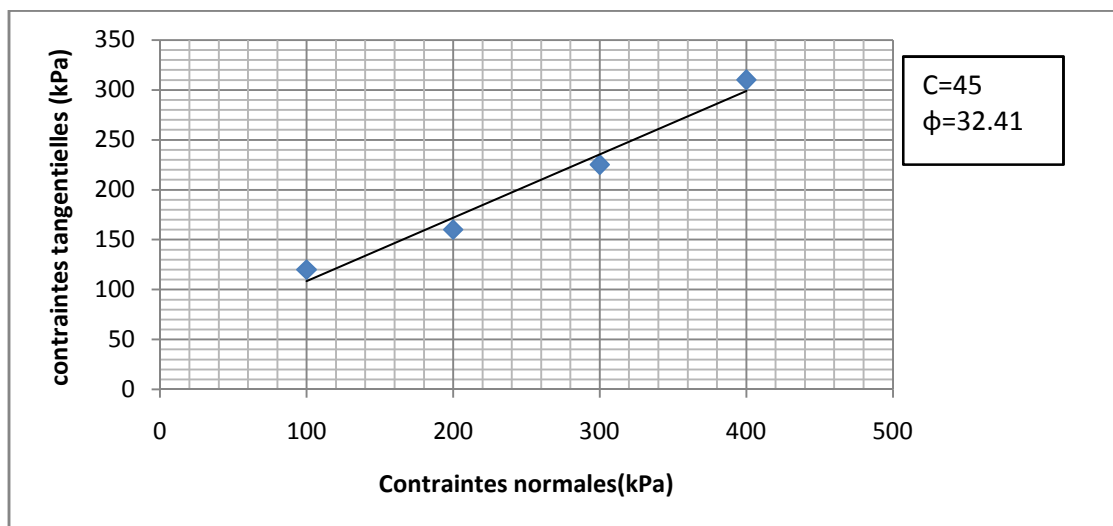


Figure IV.65: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 5% de plastique granulé.

10.5.2.6. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange argile+5%plastique granulé à 400 KPa

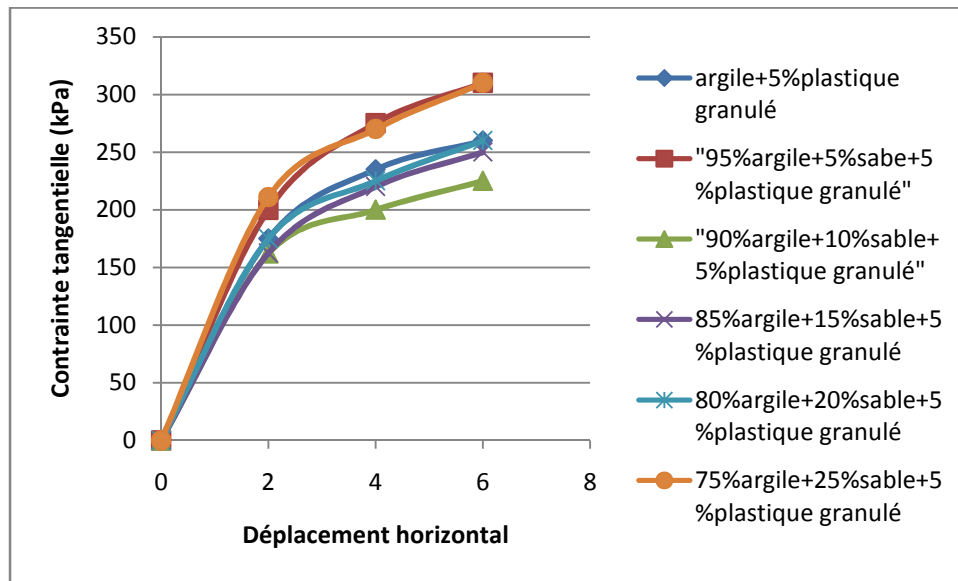


Figure IV.66 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+5% plastique granulé).

D'après les courbes obtenues, la résistance au cisaillement n'est augmentée que pour 25% et 5% d'ajout de sable et 5% de plastique granulé et les autres courbes tendent à se confondre à l'exception d'ajout de 10% de sable qui chute la résistance au cisaillement.

10.5.2.7. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de sable

Tableau.9: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+5%plastique granulé) traitée avec du sable

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
cohésion	60	30	87.5	84.5	25	45

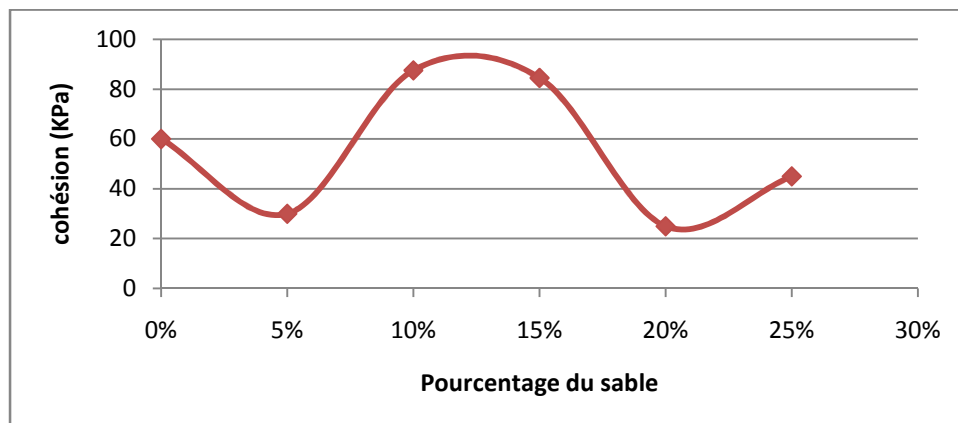
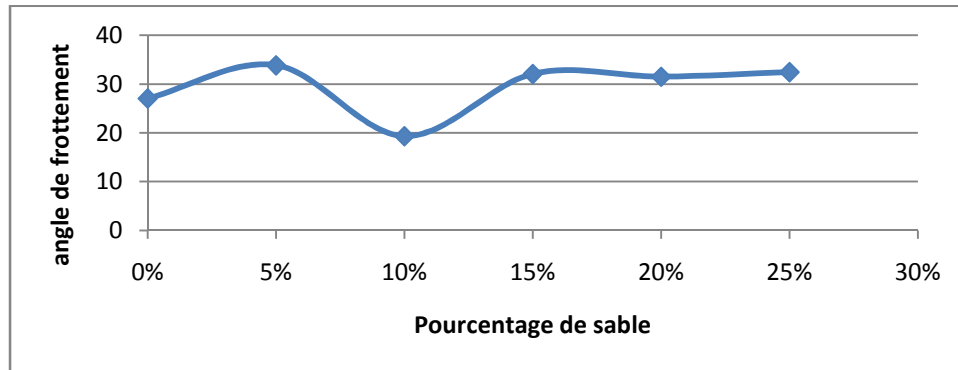


Figure IV.67: Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Tableau.10: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+5%plastique granulé) traitée avec du sable.

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Angle de frottement	27.02	33.82	19.29	23.02	31.46	32.41

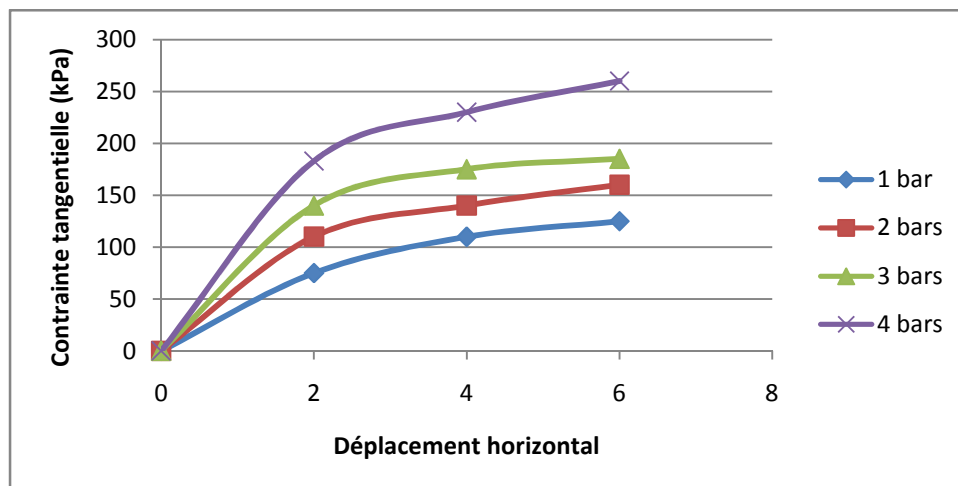
**Figure IV.68:** Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout simultané de sable et de plastique granulé à 5% fait augmenter l'angle de frottement interne et il se stabilise autour de 32°. Par contre, la cohésion augmente jusqu'à un certain seuil entre 10 et 15% d'ajout de sable puis chute pour se stabiliser au dessous de la valeur de l'argile seule.

10.5.3. Argile+sable+7% plastique granulé

- Dans ce cas on varie le pourcentage de sable et on fixe le pourcentage de plastique granulé à 7%.

10.5.3.1. Argile+5%sable+7% plastique granulé

**Figure IV.69:** Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 5% de sable et 7% de plastique granulé

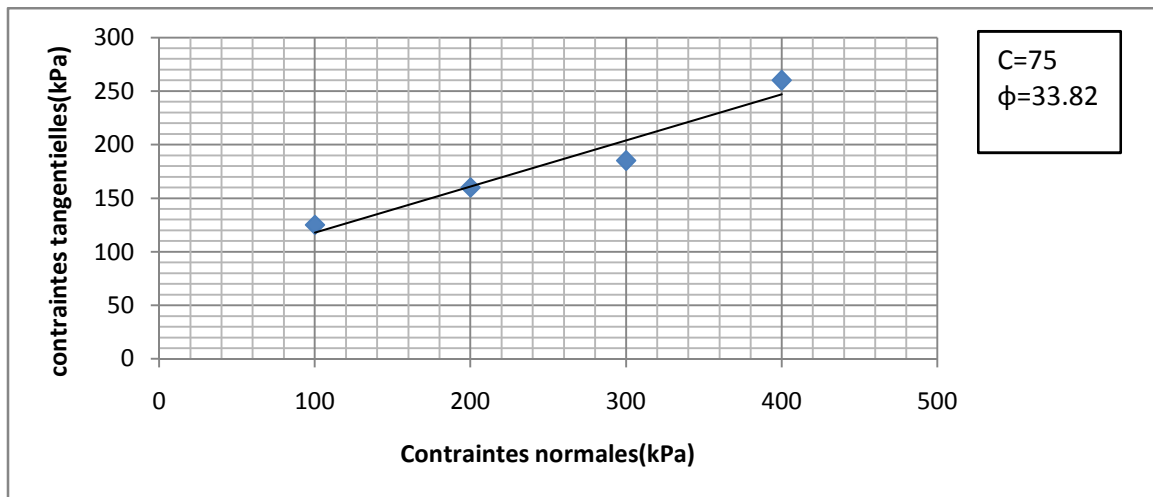


Figure IV.70: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 7% de plastique granulé.

10.5.3.2. Argile+10% sable+7% plastique granulé

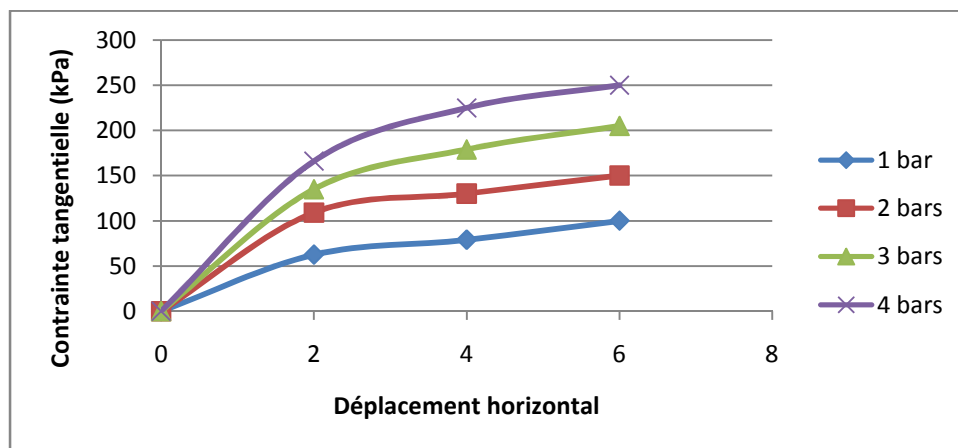


Figure IV.71 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 10% de sable et 7% de plastique granulé.

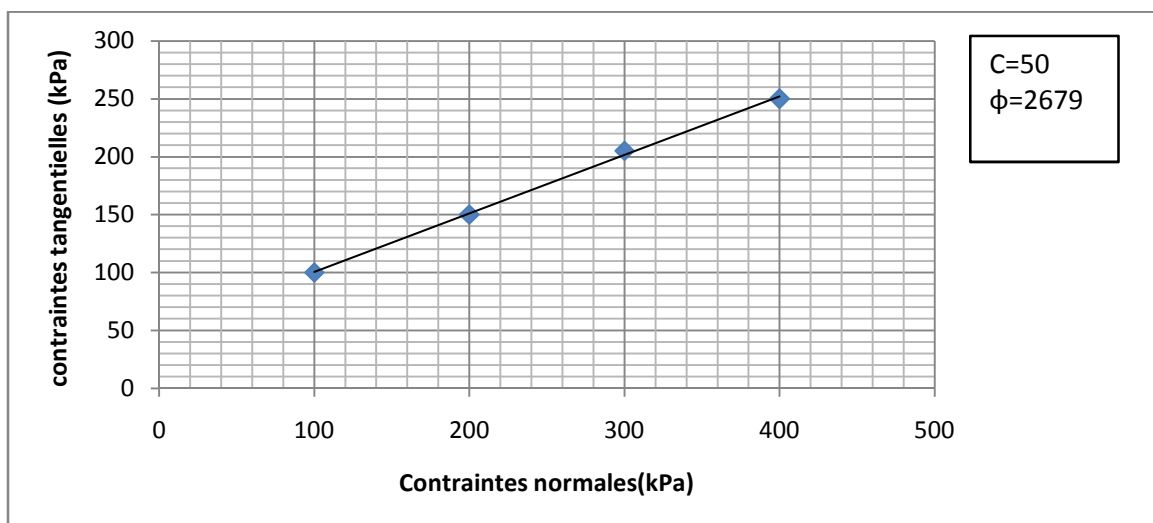


Figure IV.72: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 7% de plastique granulé.

10.5.3.3. Argile+15% sable+7% plastique granulé

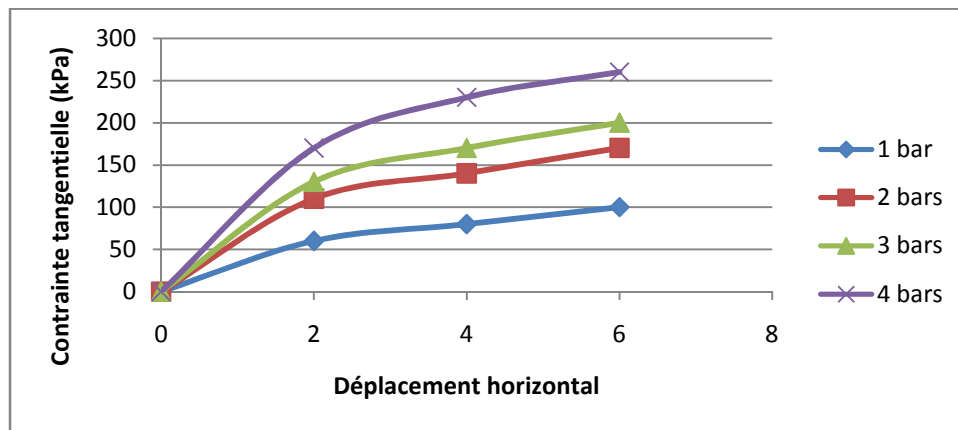


Figure IV.73 : Courbes contraintes tangentielle à l'ajout de 15% de sable et 7% de plastique granulé.

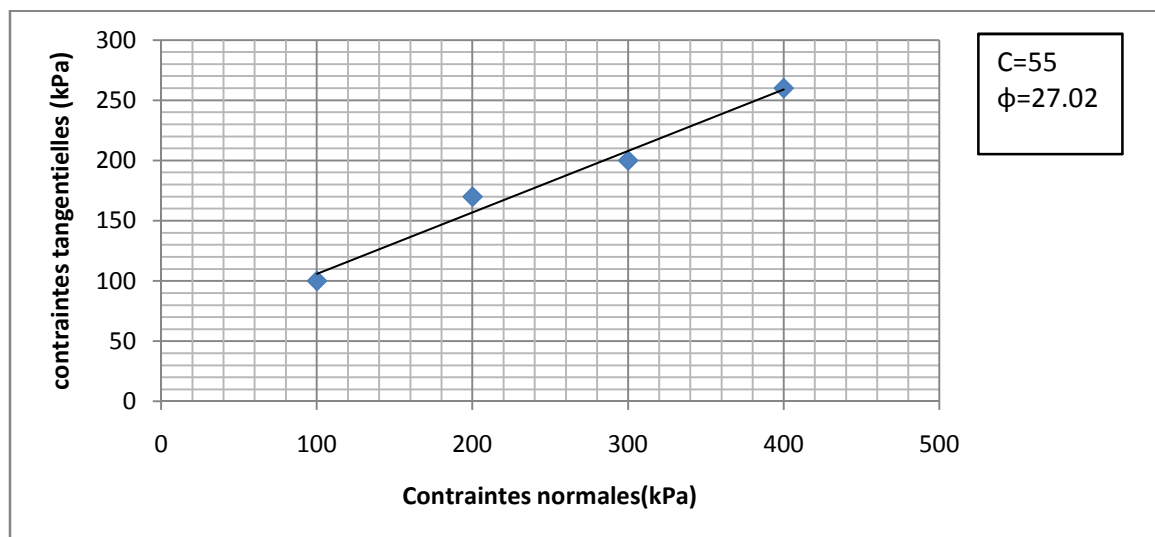


Figure IV.74: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 7% de plastique granulé.

10.5.3.4. Argile+20% sable+7% plastique granulé

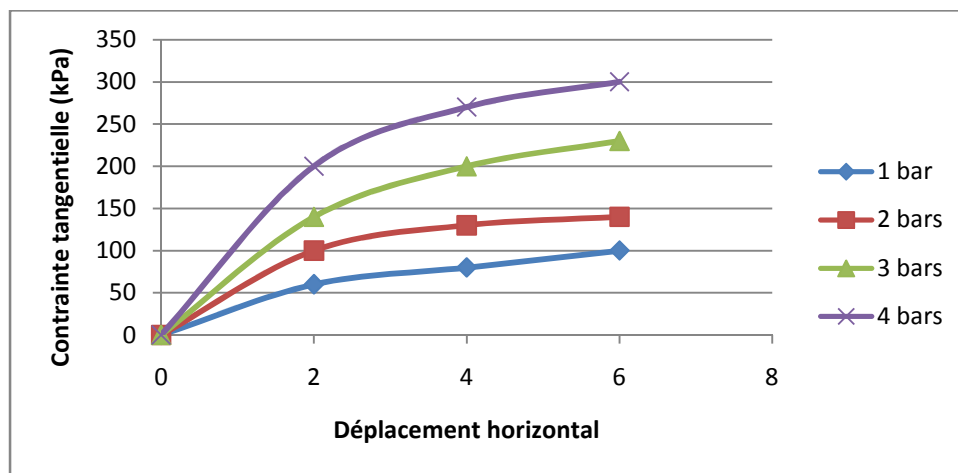


Figure IV.75 : Courbes contraintes tangentielle à l'ajout de 20% de sable et 7% de plastique granulé.

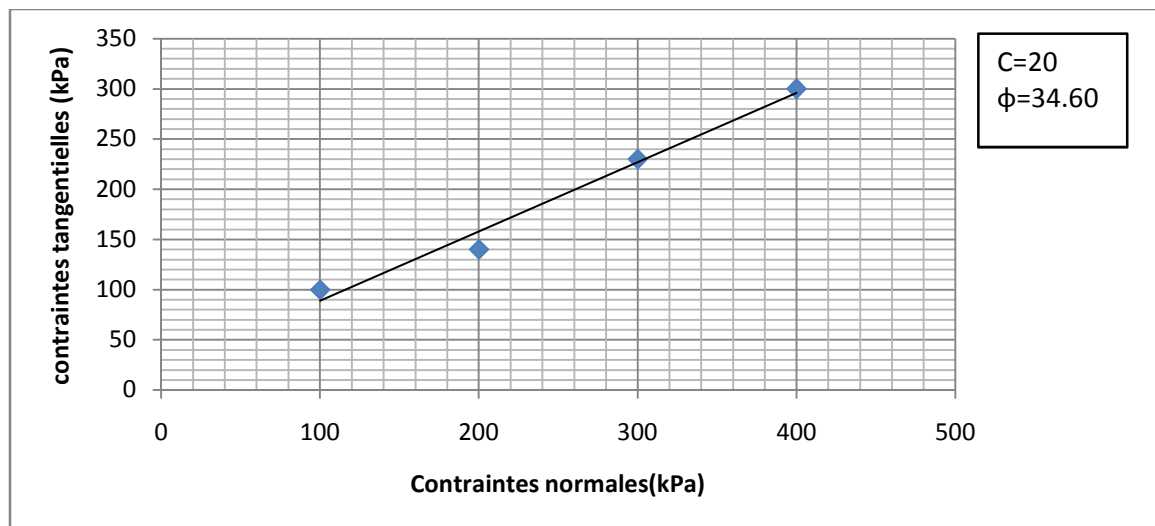


Figure IV.76: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 7% de plastique granulé.

10.5.3.5. Argile+25% sable+7% plastique granulé

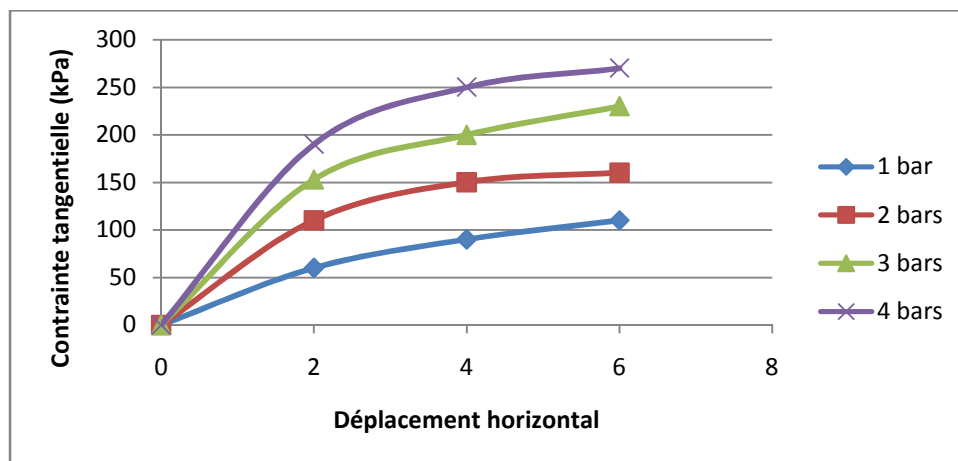


Figure IV.77 : Courbes contraintes tangentielle à l'ajout de 25% de sable et 7% de plastique granulé.

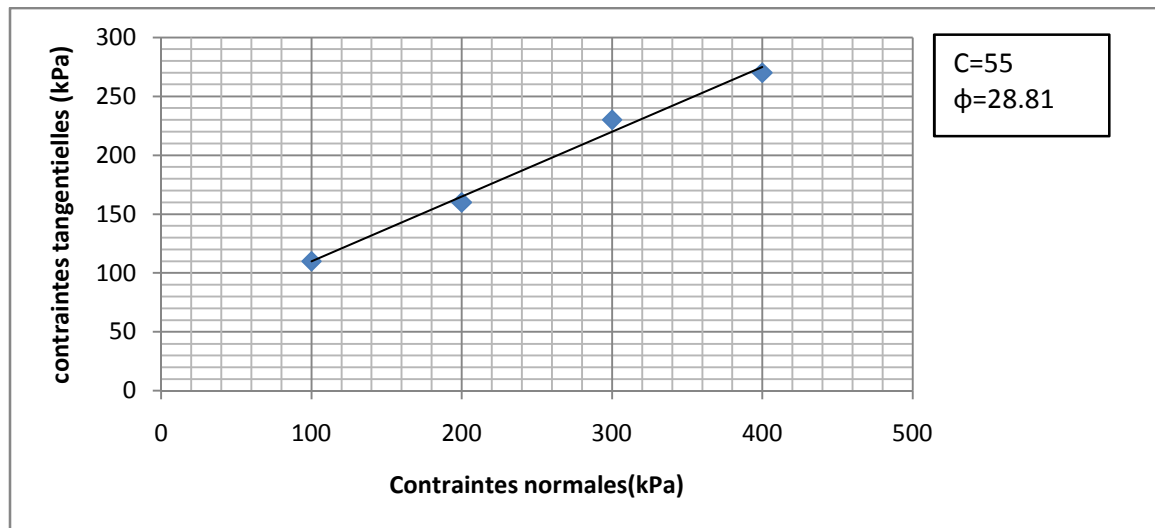


Figure IV.78: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 7% de plastique granulé.

10.5.3.6. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange argile+7%plastique granulé à 400 KPa

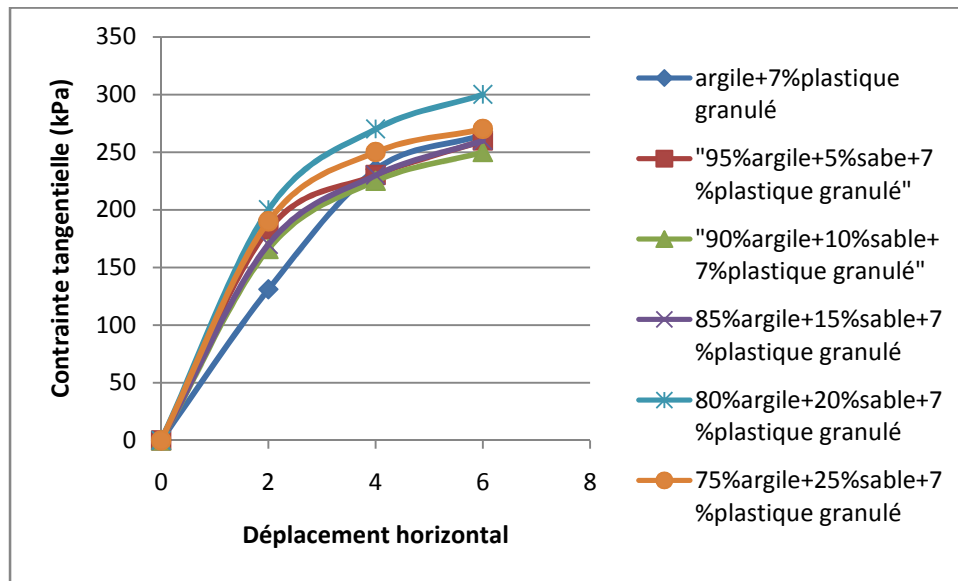


Figure IV.79 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+7% plastique granulé).

D'après les courbes obtenues, la résistance au cisaillement n'est augmentée que pour 20% d'ajout de sable et 7% de plastique granulé et les autres courbes tendent à se confondre

10.5.3.7. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de sable

Tableau.11: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+7%plastique granulé) traitée avec du sable

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Cohésion	67.75	75	50	55	20	55

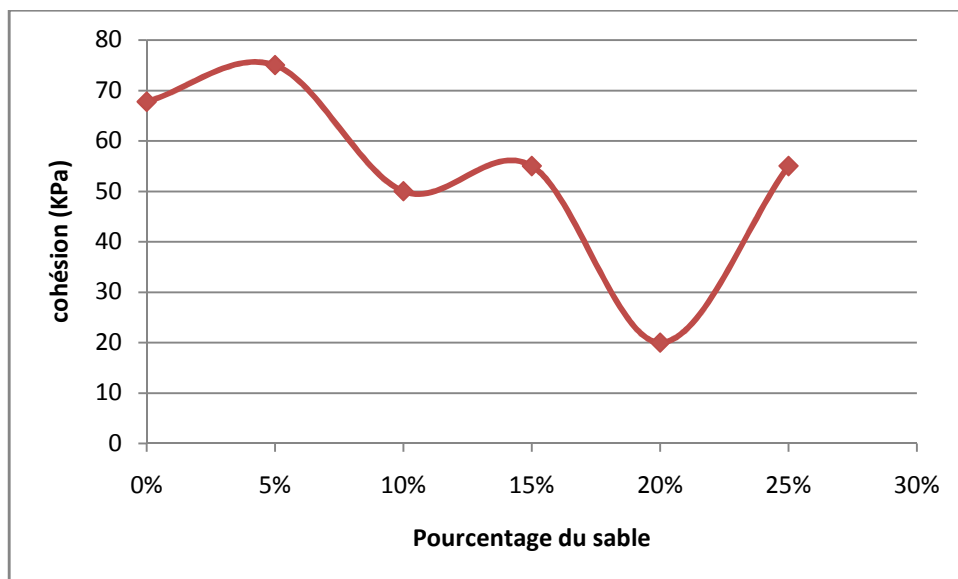


Figure IV.80 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Tableau.12: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+7%plastique granulé) traitée avec du sable.

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Angle de frottement	23.96	23.26	26.79	27.02	34.60	28.81

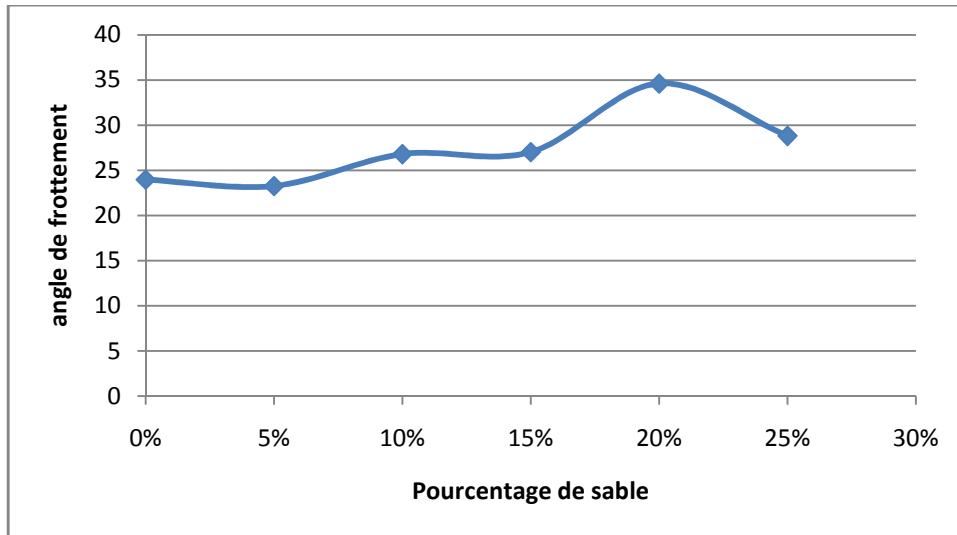


Figure IV.81: Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout simultané de sable et de plastique granulé à 7% fait augmenter l'angle de frottement interne. Par contre, la cohésion augmente pour 5% d'ajout de sable puis chute jusqu'à 20% d'ajout de sable.

10.6. Présentation des résultats de l'argile + sable+PVC

Dans cette série d'essai, nous avons fait varier le pourcentage d'ajout de sable de 5 à 25% par pas de 5% au matériau argileux et on fixe le pourcentage d'ajout de PVC. Les résultats sont présentés dans les figures ci-dessous

10.6.1. Argile+sable+3% PVC

- Dans ce cas on varie le pourcentage de sable et on fixe le pourcentage de PVC à 3%.

10.6.1.1. Argile+5%sable+3% PVC

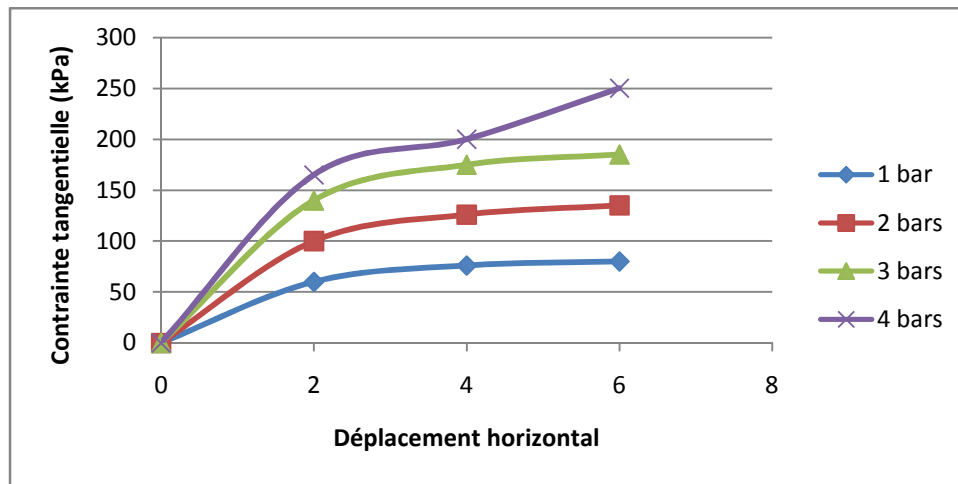


Figure IV.82 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 5% de sable et 3% de PVC.

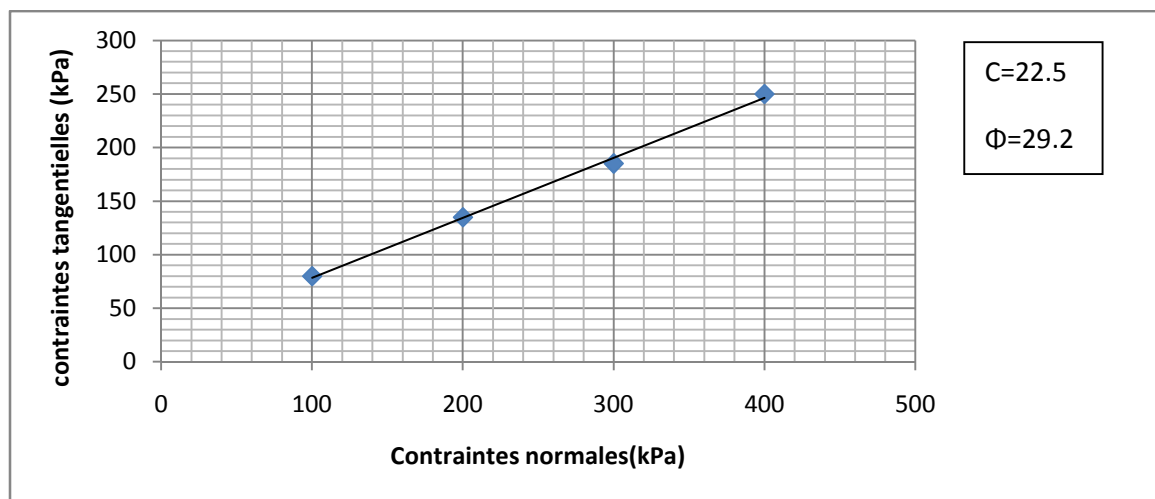


Figure IV.83: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 3% de PVC.

10.6.1.2. Argile+10% sable+3% PVC

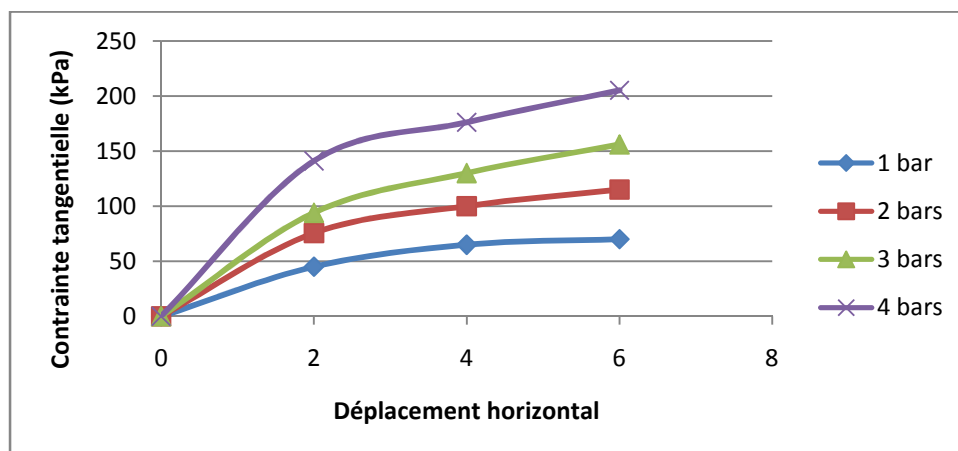


Figure IV.84 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 10% de sable et 3% de PVC.

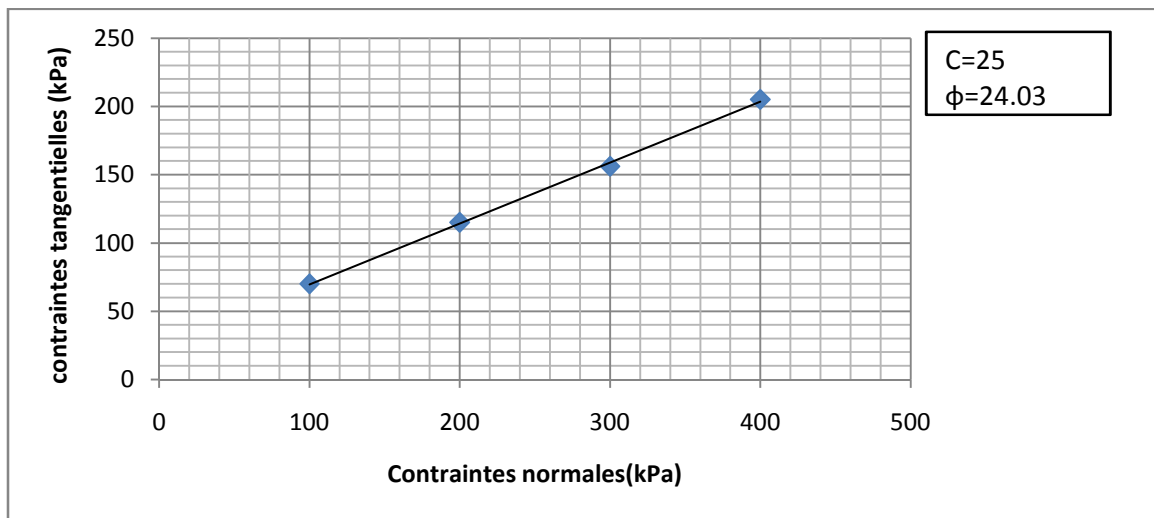


Figure IV.85: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 3% de PVC.

10.6.1.3. Argile+15% sable+3% PVC

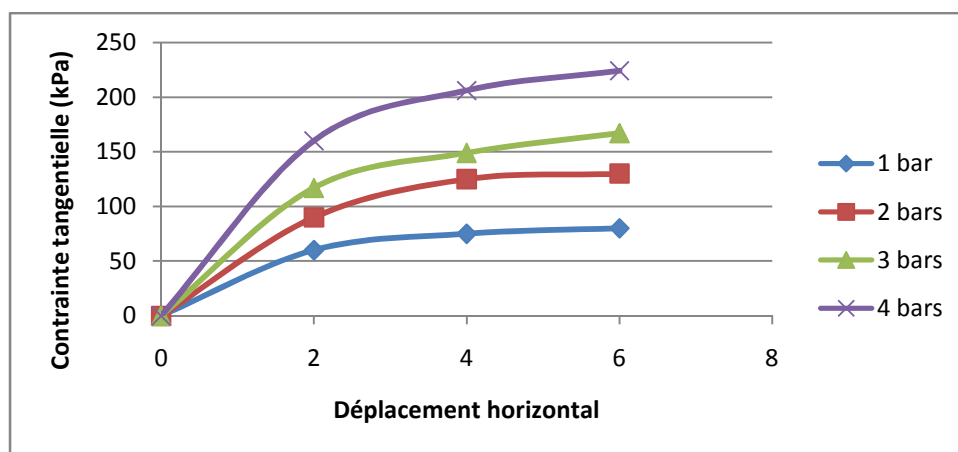


Figure IV.86: Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 15% de sable et 3% de PVC.

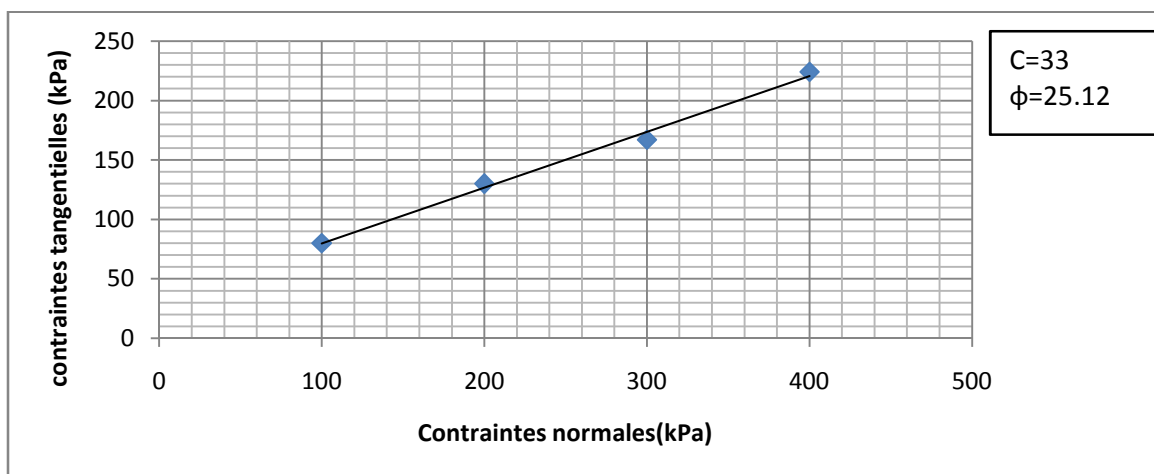


Figure IV.87: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 3% de PVC.

10.6.1.4. Argile+20%sable+3% PVC

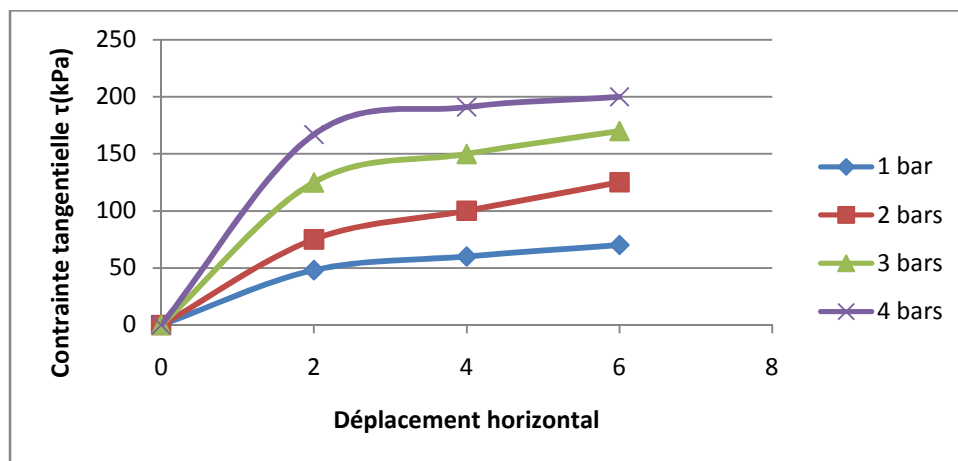


Figure IV.88 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 20% de sable et 3% de PVC.

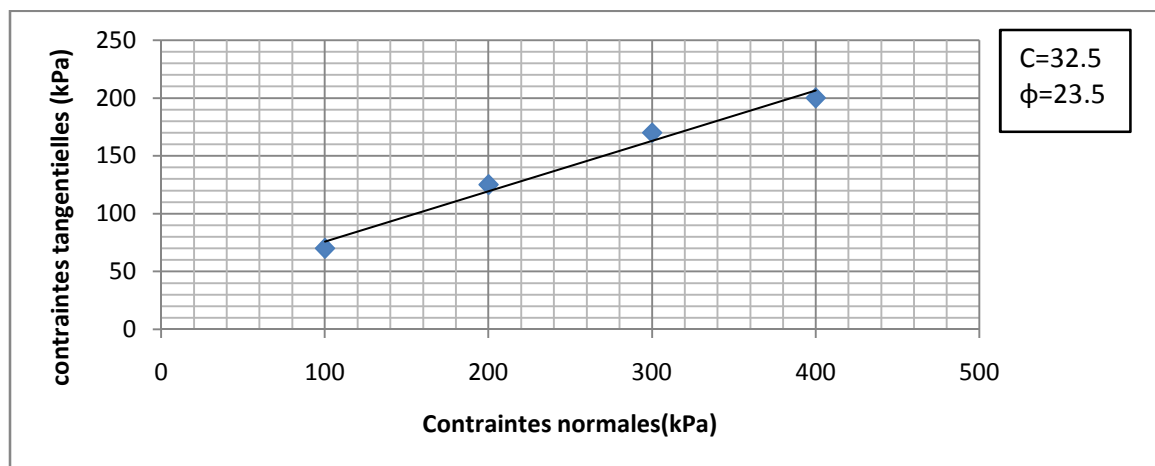


Figure IV.89: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 3% de PVC.

10.6.1.5. Argile+25%sable+3% PVC

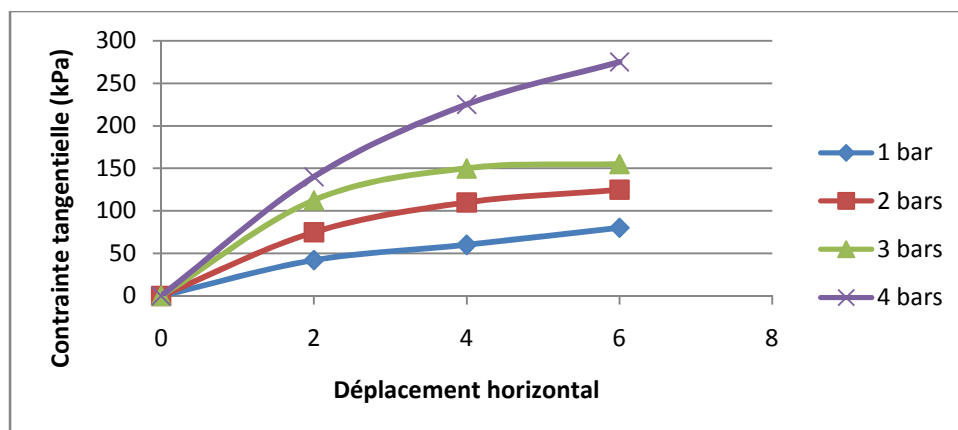


Figure IV.90 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 25% de sable et 3% de PVC.

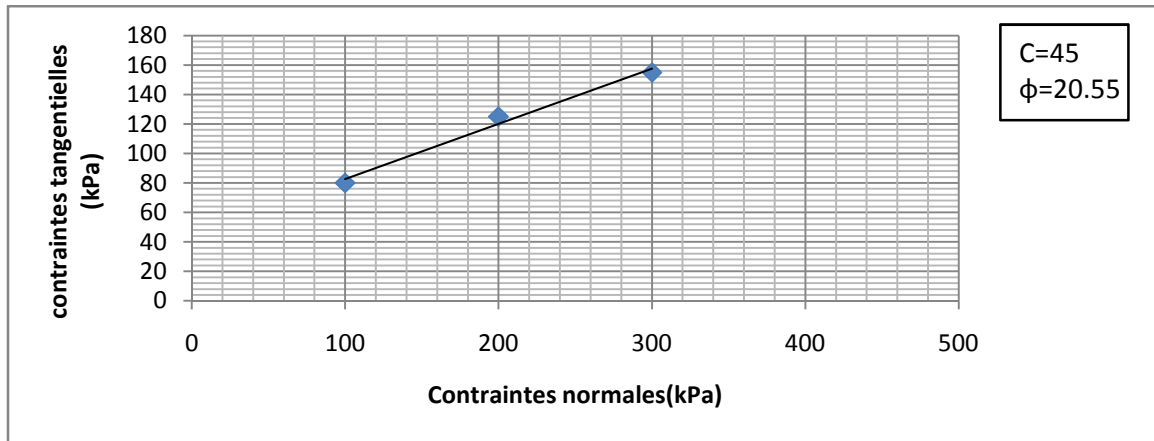


Figure IV.91: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 3% de PVC.

10.6.1.6. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange argile+3%PVC à 400 KPa

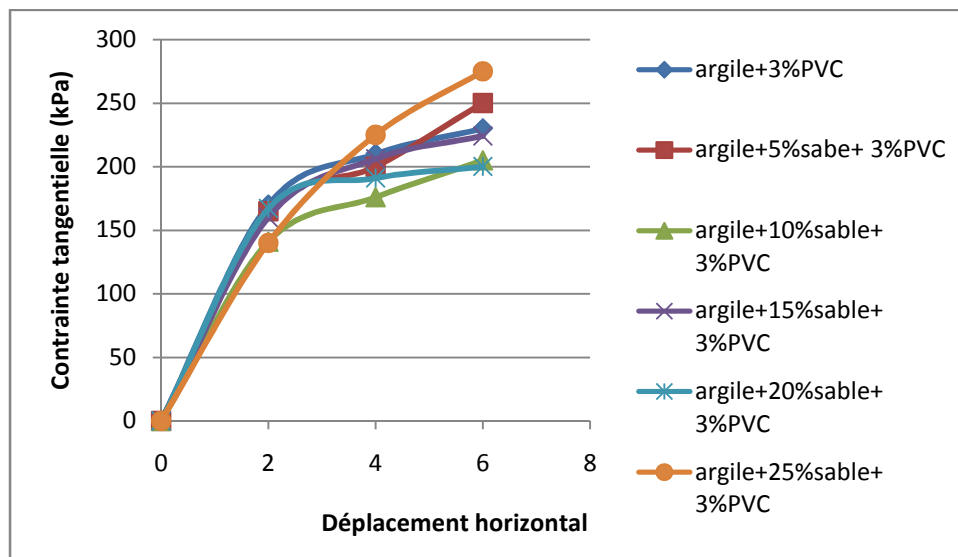


Figure IV.92 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+3% PVC).

D'après les courbes obtenues, la résistance au cisaillement n'est augmentée que pour 25% et 5% d'ajout de sable et 3% de PVC et les autres courbes sont au dessous de celle de l'argile sans ajout de sable.

10.6.1.7. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de sable

Tableau.13: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+3%PVC) traitée avec du sable

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Cohésion	30	22.5	25	33	32.5	45

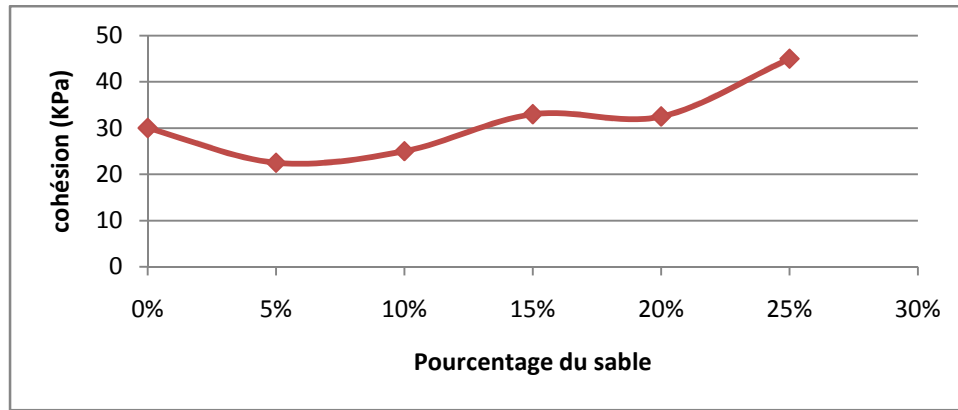


Figure IV.93 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Tableau.14: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+3%PVC) traitée avec du sable.

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Angle de frottement	25.17	29.24	24.03	25.12	23.50	20.55

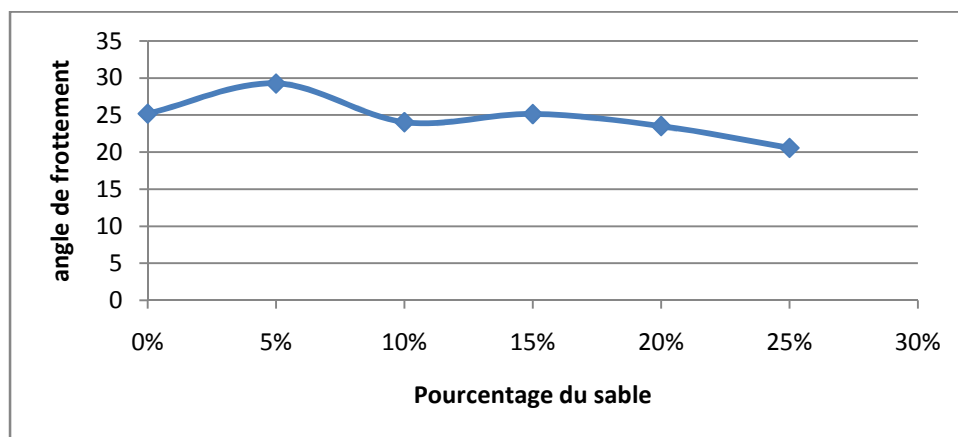


Figure IV.94: Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout simultané de sable et de PVC à 3% fait augmenter l'angle de frottement interne pour 5% de sable. Par contre, la cohésion augmente à partir de 15% d'ajout de sable.

10.6.2. Argile+sable+5% PVC

- Dans ce cas on varie le pourcentage de sable et on fixe le pourcentage de PVC à 5%.

10.6.2.1. Argile+5%sable+5% PVC

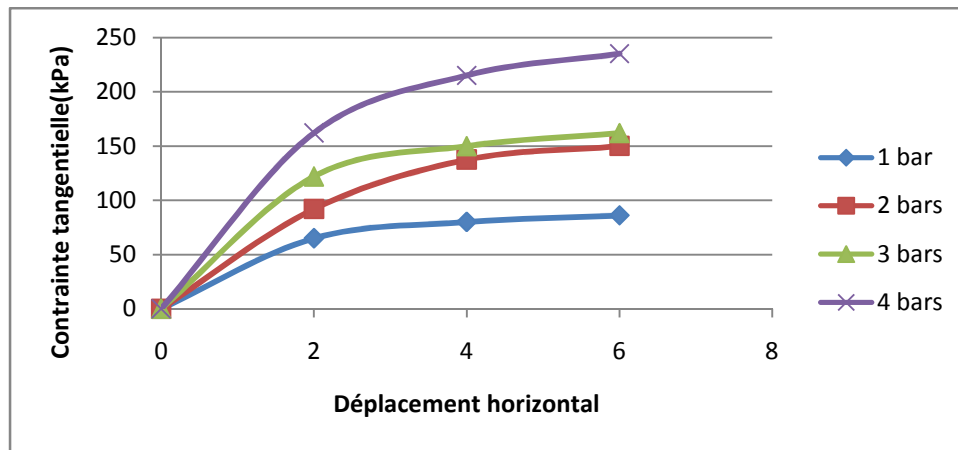


Figure IV.95 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 5% de sable et 5% de PVC.

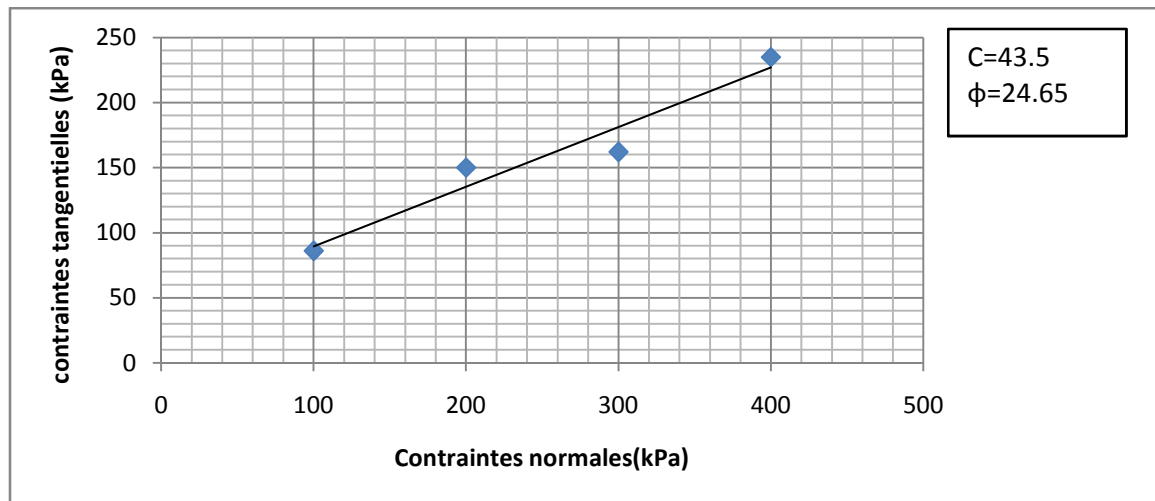


Figure IV.96: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 5% de PVC.

10.6.2.2. Argile+10% sable+5% PVC

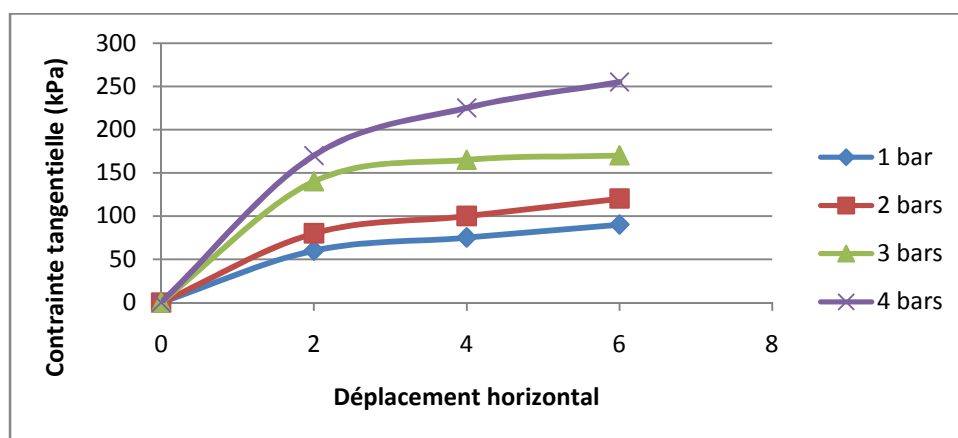


Figure IV.97 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 10% de sable et 5% de PVC.

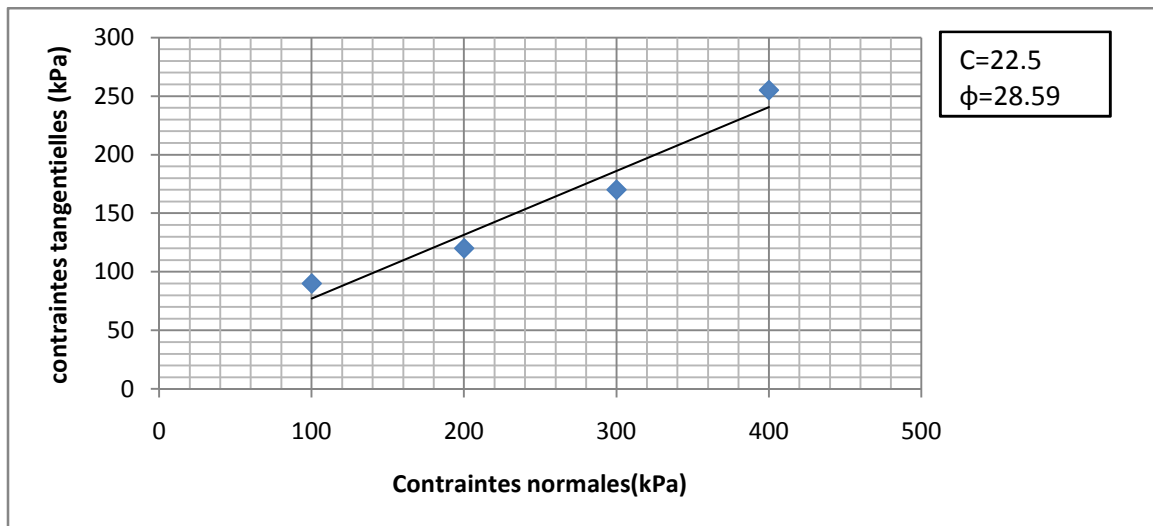


Figure IV.98: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 5% de PVC.

10.6.2.3. Argile+15% sable+5% PVC

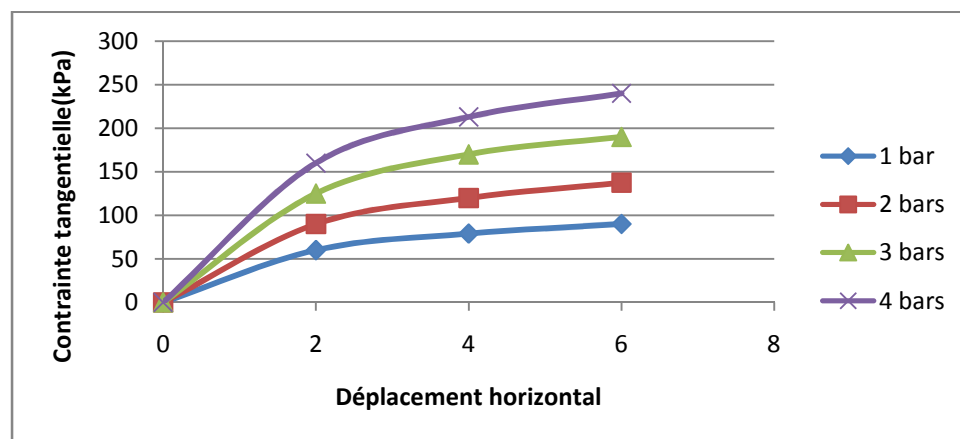


Figure IV.99 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 15% de sable et 5% de PVC.

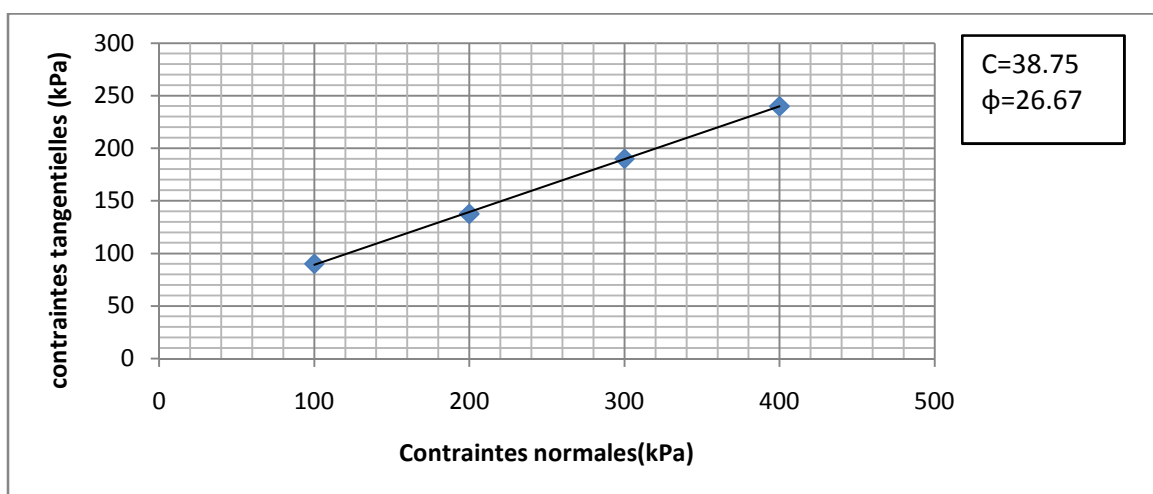


Figure IV.100: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 5% de PVC.

10.6.2.4. Argile+20% sable+5% PVC

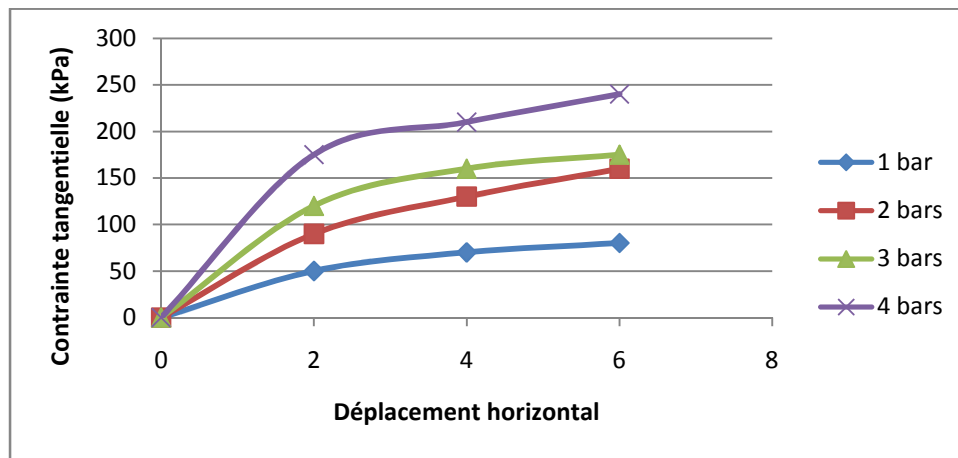


Figure IV.101 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 20% de sable et 5% de PVC.

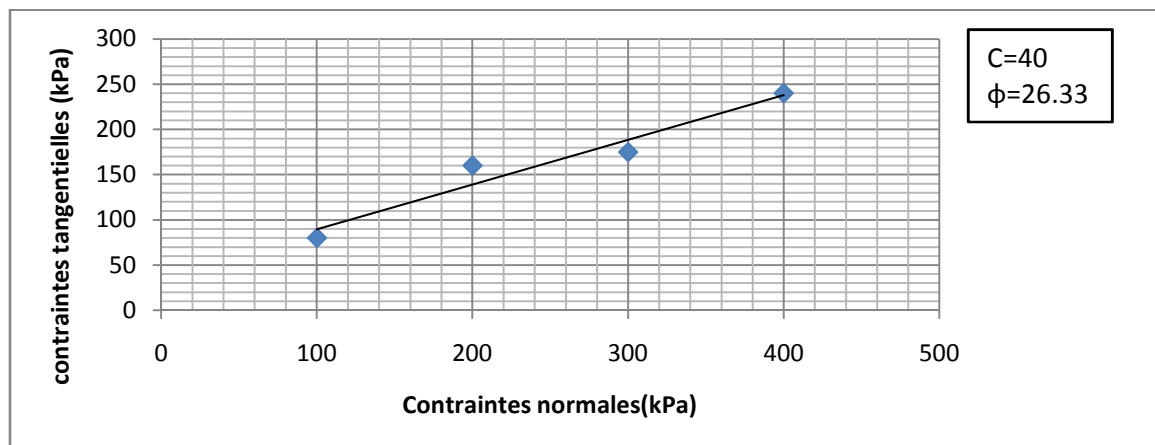


Figure IV.102: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 5% de PVC.

10.6.2.5. Argile+25% sable+5% PVC

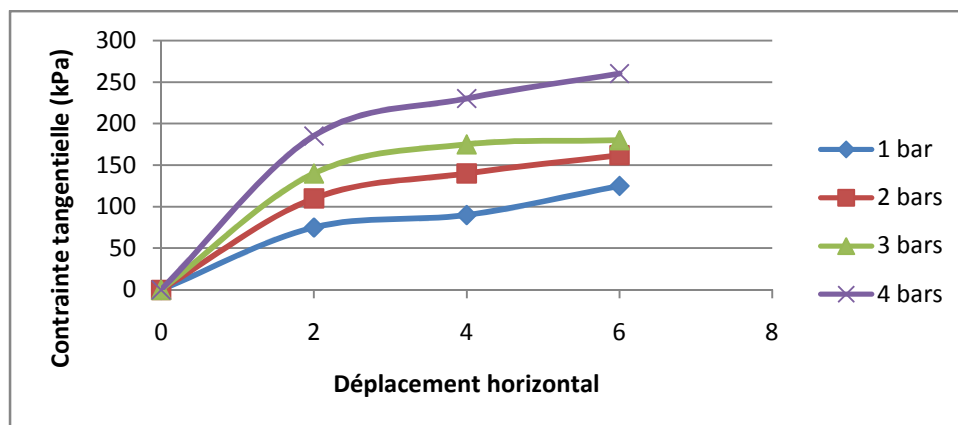


Figure IV.103 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 25% de sable et 5% de PVC.

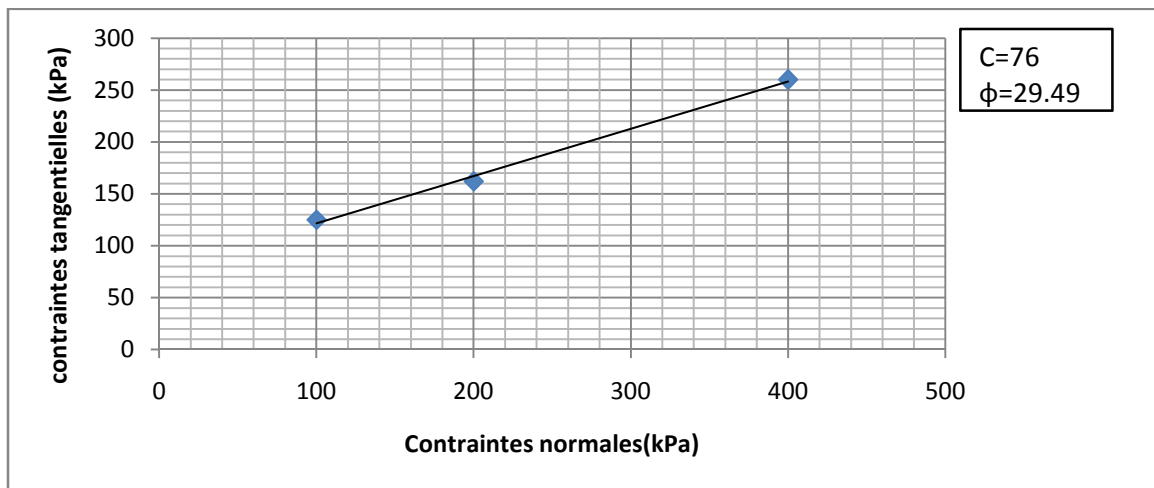


Figure IV.104: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 5% de PVC.

10.6.2.6. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange argile+5%PVC à 400 KPa

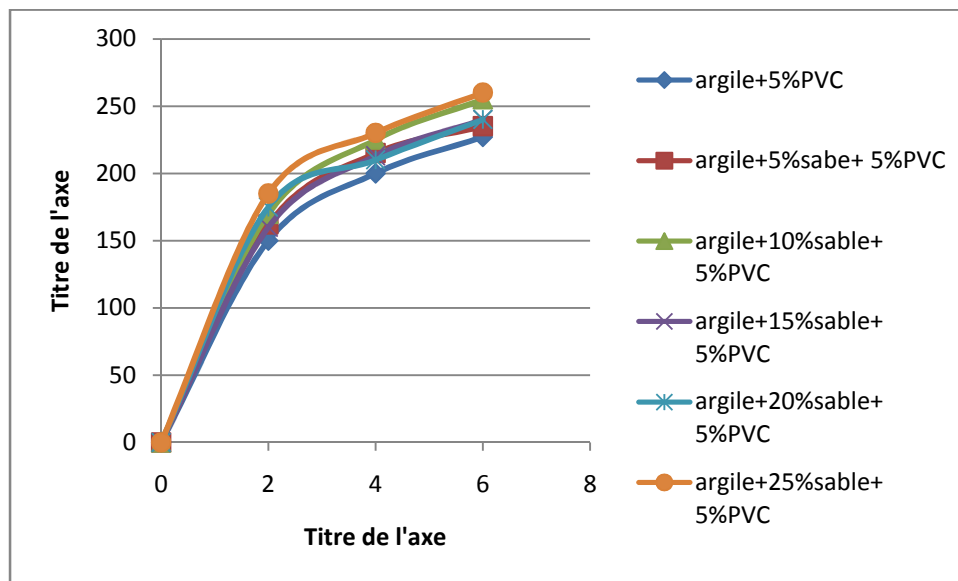


Figure IV.105 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+5% PVC).

D'après les courbes obtenues, la résistance au cisaillement est augmentée que pour 25% et 5% d'ajout de sable à 5% de PVC et les autres courbes sont au dessous de celle de l'argile sans ajout de sable.

10.6.2.7. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de sable

Tableau.15: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+5%PVC) traitée avec du sable

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Cohésion	23.5	43.5	22.5	38.75	40	76

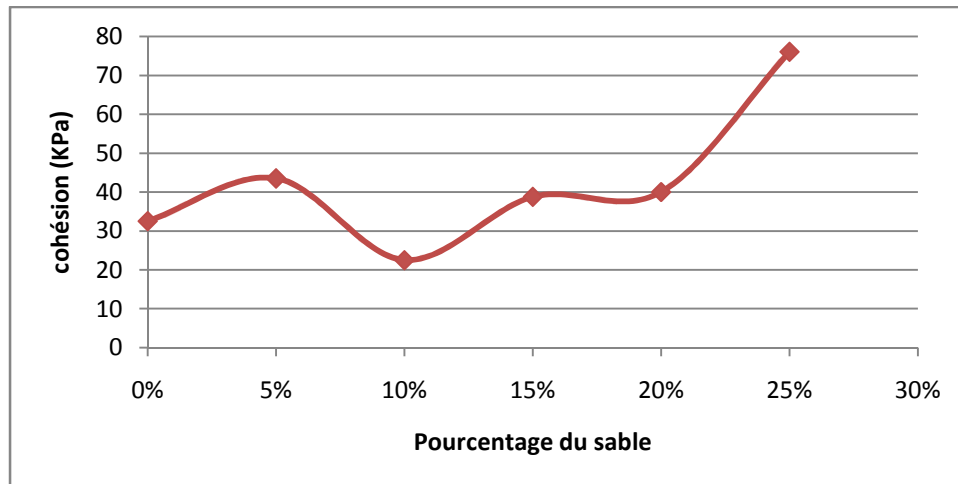


Figure IV.106 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.

Tableau.16: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+5%PVC) traitée avec du sable.

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Angle de frottement	27.65	24.65	28.59	26.67	26.33	29.49

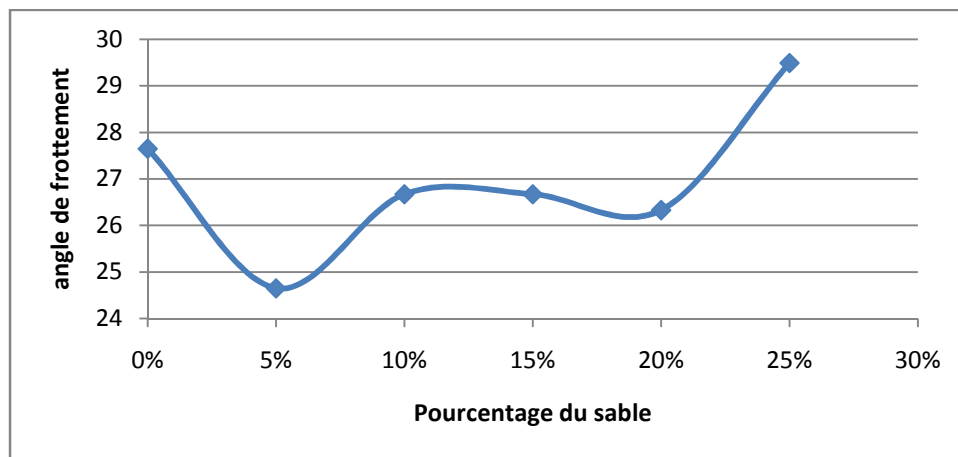


Figure IV.107 : Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout simultané de sable et de PVC à 5% fait diminuer l'angle de frottement interne à l'exception de l'ajout de 25% de sable. Par contre, la cohésion augmente à partir de 15% d'ajout de sable.

10.6.3. Argile+sable+7% PVC

- Dans ce cas on varie le pourcentage de sable et on fixe le pourcentage de PVC à 7%.

10.6.3.1. Argile+5%sable+7% PVC

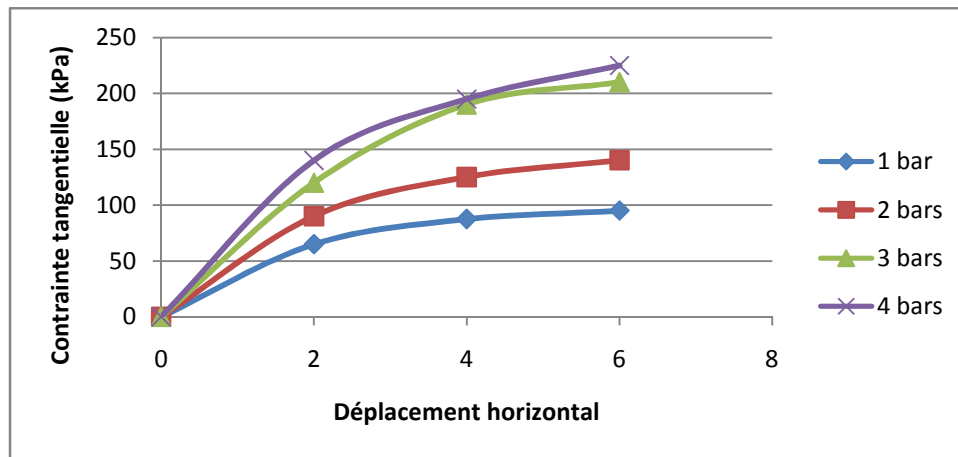


Figure IV.108 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 5% de sable et 7% de PVC.

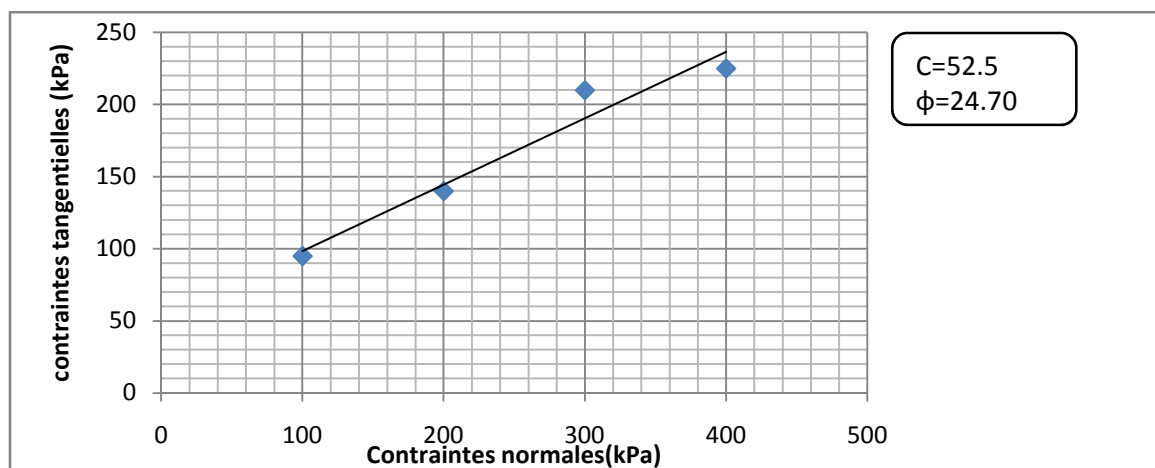


Figure IV.109: Droite intrinsèque à l'ajout de 5% de sable et 7% de PVC.

10.6.3.2. Argile+10% sable+7% PVC

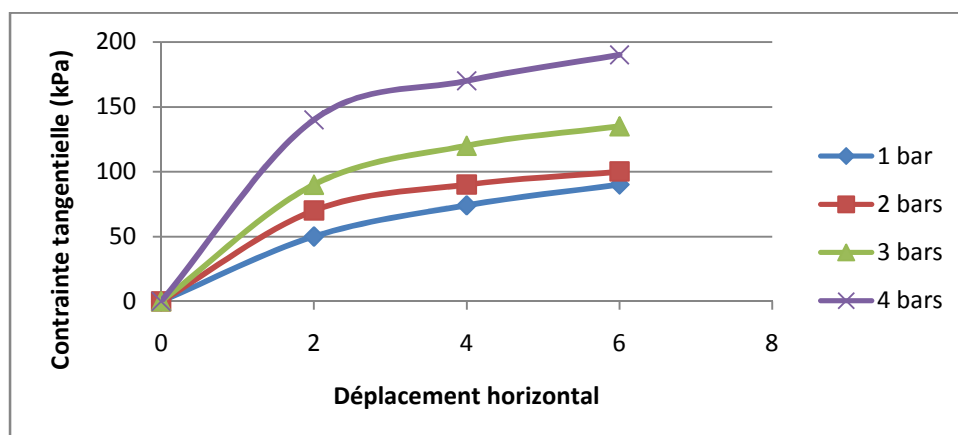


Figure IV.110 : Courbes contraintes tangentielles à l'ajout de 10% de sable et 7% de PVC.

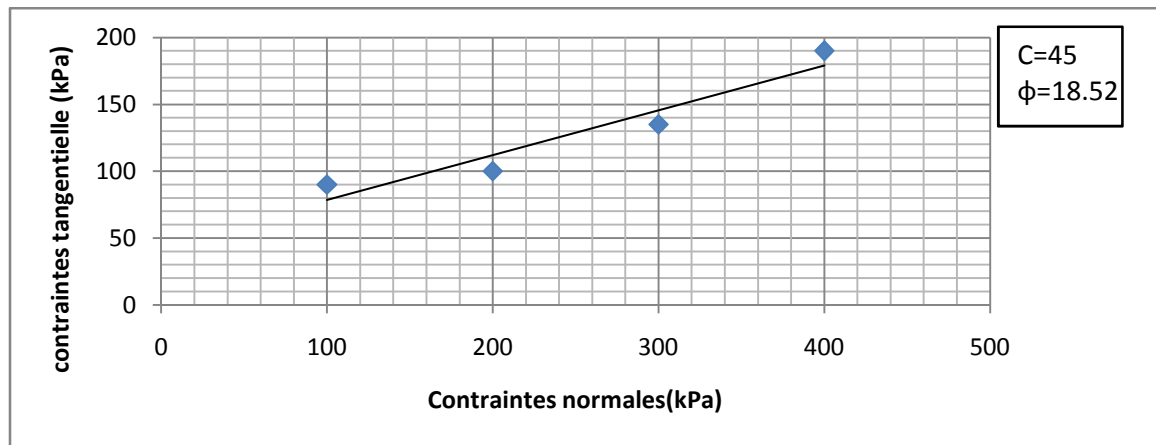


Figure IV.111: Droite intrinsèque à l'ajout de 10% de sable et 7% de PVC.

10.6.3.3. Argile+15% sable+7% PVC

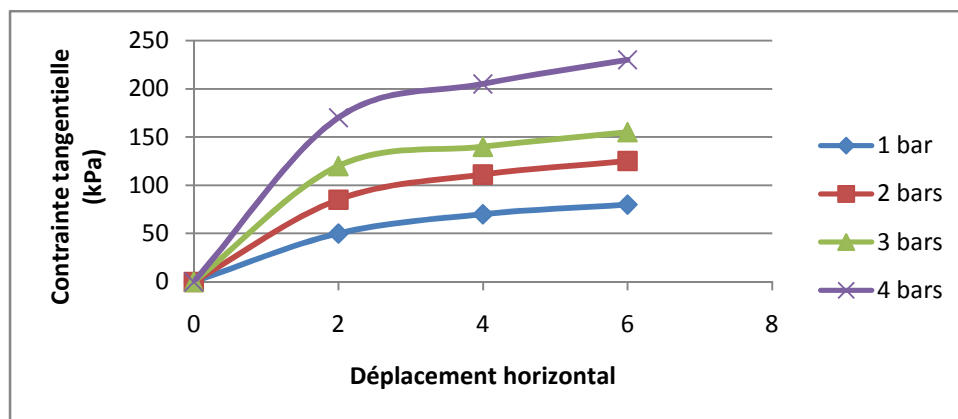


Figure IV.112 : Courbes contraintes tangentielle à l'ajout de 15% de sable et 7% de PVC.

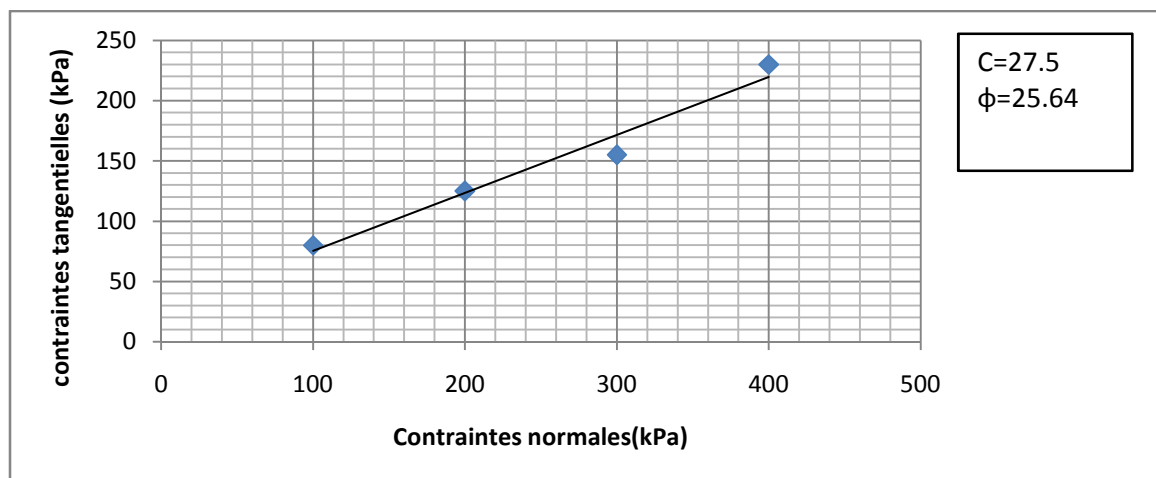


Figure IV.113: Droite intrinsèque à l'ajout de 15% de sable et 7% de PVC.

10.6.3.4. Argile+20%sable+7% PVC

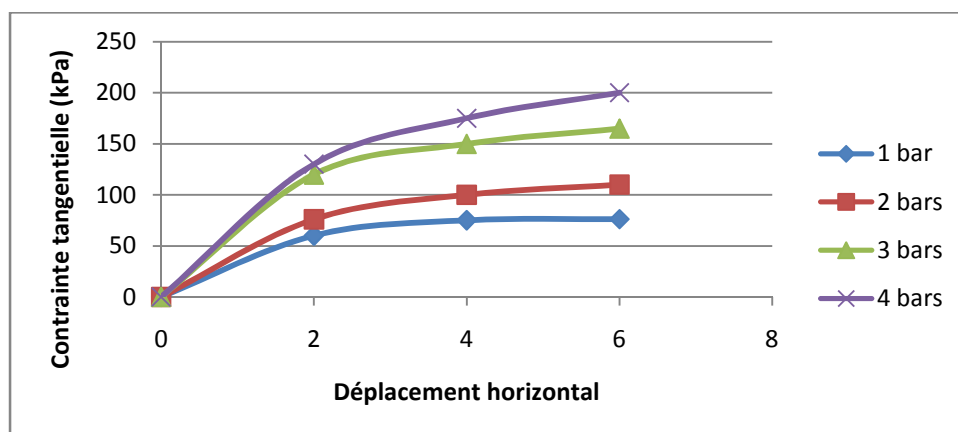


Figure IV.114 : Courbes contraintes tangentielle à l'ajout de 20% de sable et 7% de PVC.

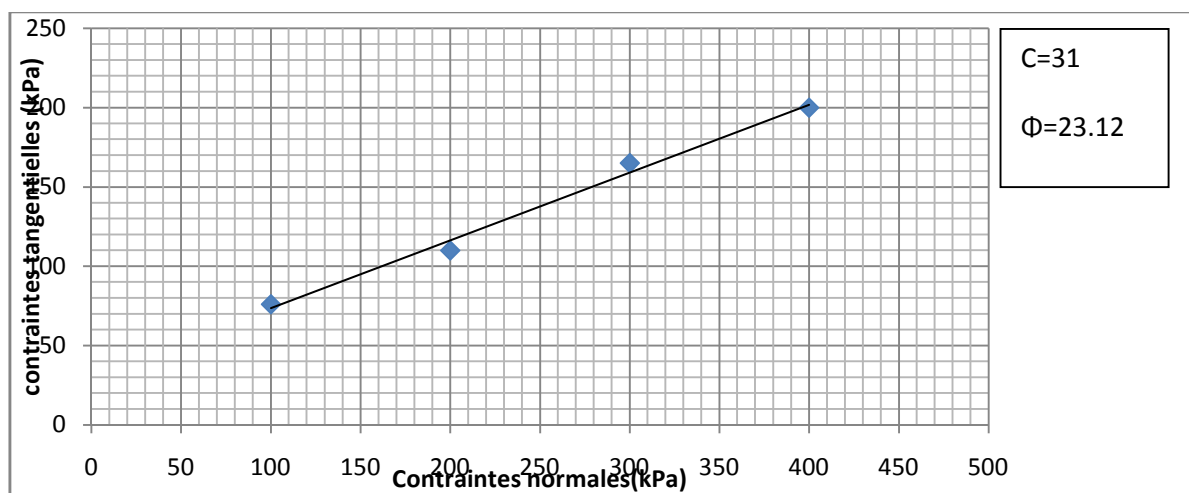


Figure IV.115: Droite intrinsèque à l'ajout de 20% de sable et 7% de PVC.

10.6.3.5. Argile +25%sable+7% PVC

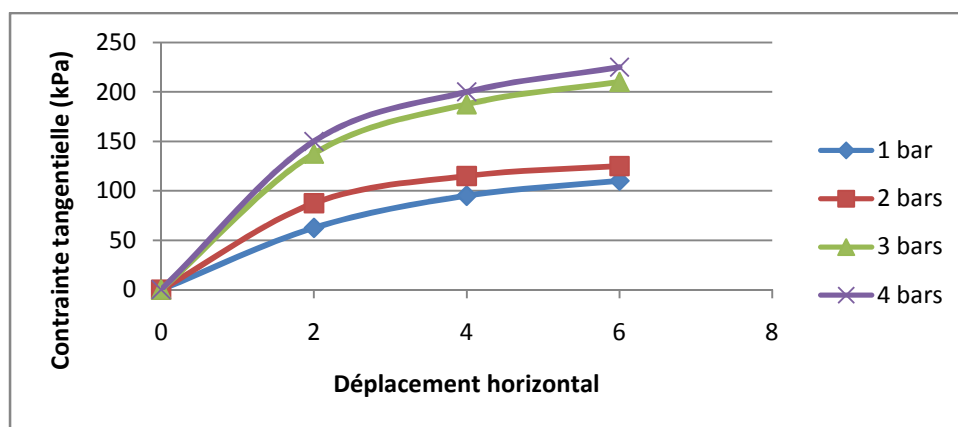


Figure IV.116 : Courbes contraintes tangentielle à l'ajout de 25% de sable et 7% de PVC.

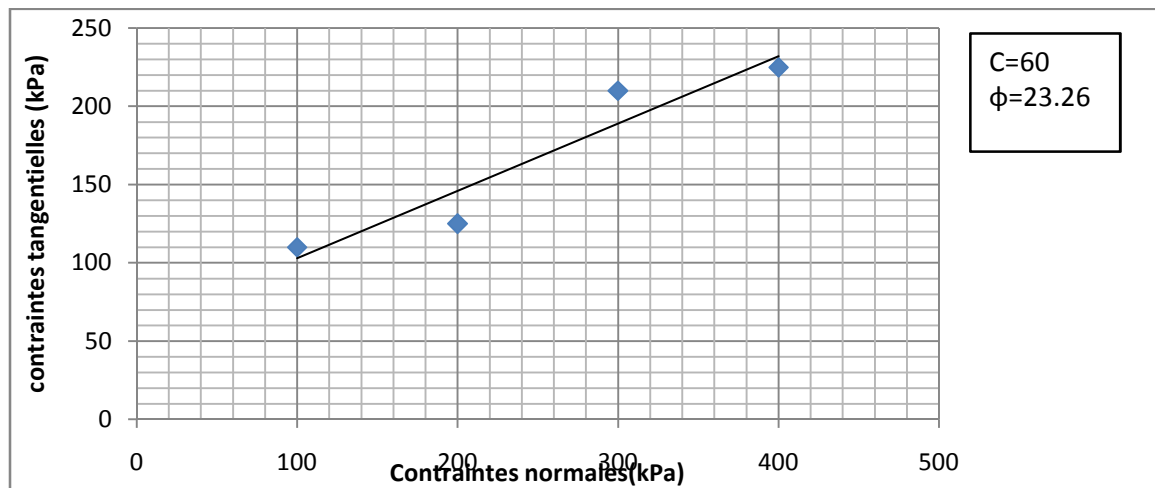


Figure IV.117: Droite intrinsèque à l'ajout de 25% de sable et 7% de PVC.

10.6.3.6. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange argile+7%PVC à 400 KPa

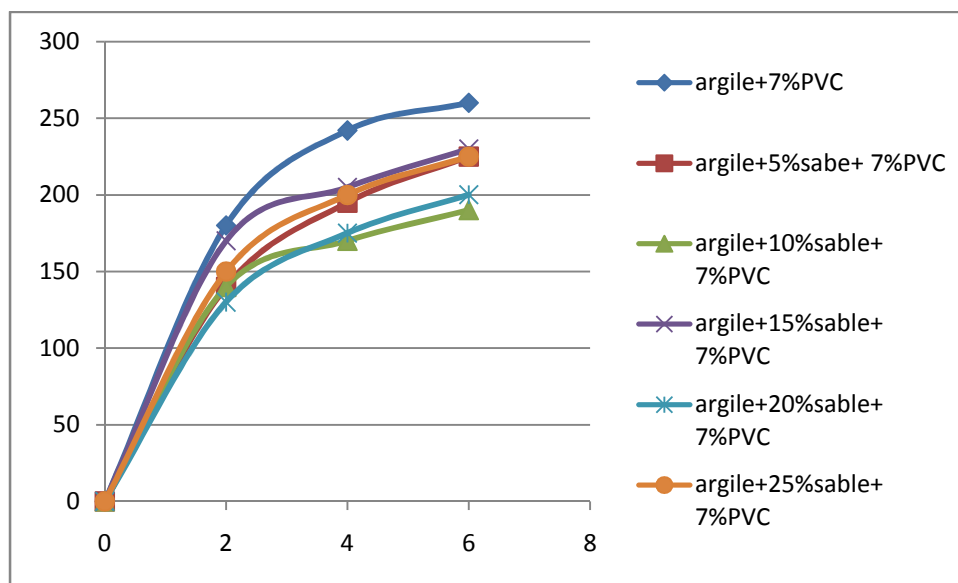


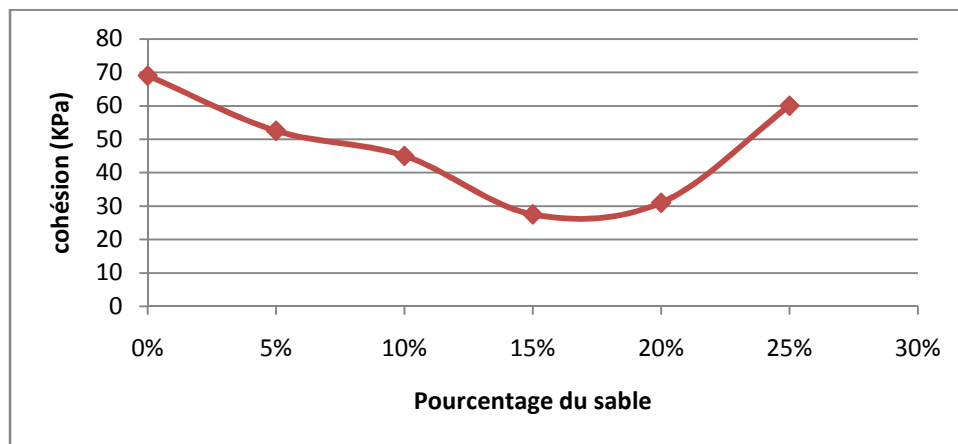
Figure IV.118 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de sable au mélange (argile+7% PVC).

D'après les courbes obtenues, la résistance au cisaillement est diminuée pour tous les pourcentages d'ajout de sable à 7% de PVC.

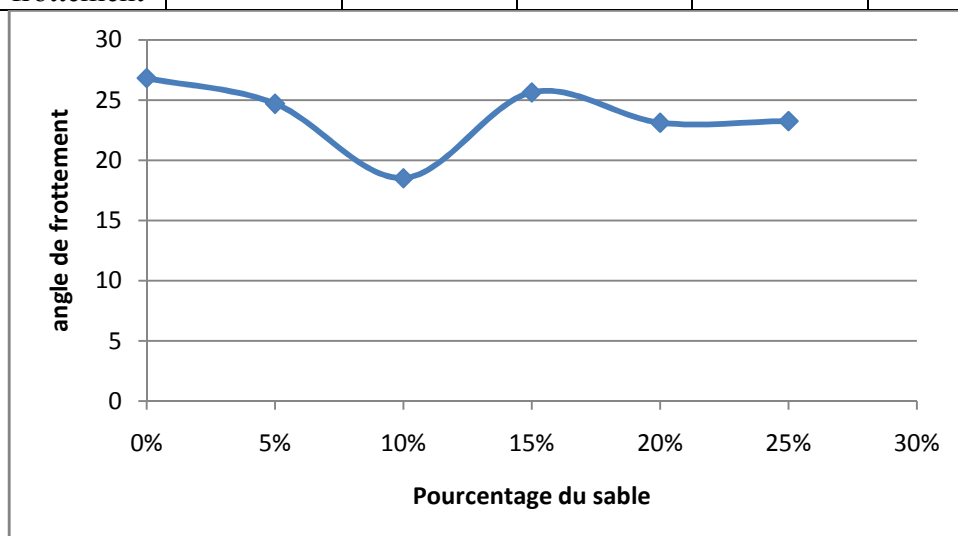
10.6.3.7. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de sable

Tableau.17: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+7%PVC) traitée avec du sable

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Cohésion	69	52.5	45	27.5	31	60

**Figure IV.119:** Courbes des cohésions en fonction de la teneur en sable.**Tableau.18:** Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+7%PVC) traitée avec du sable.

% de sable	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Angle de frottement	26.83	24.70	18.52	25.64	23.12	23.26

**Figure IV.120 :** Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en sable.

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout simultané de sable et de PVC à 7% fait diminuer les deux caractéristiques C et ϕ .

10.7. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de plastique granulé ajouté au mélange(argile+20%sable qui est le cas le plus défavorable) à 400 KPa.

Pour le mélange (argile + 20% de sable) que l'on stabilise avec des plastique granulé, les courbes de cisaillement montrent que plus le pourcentage d'ajout est élevé plus la résistance au cisaillement est importante.

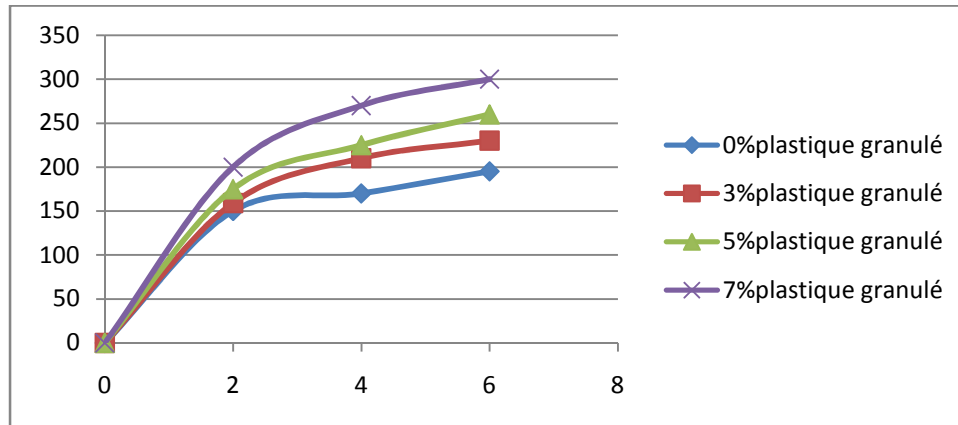


Figure IV.121 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de plastique granulé.

Pour le mélange (argile + 20% de sable) que l'on stabilise avec du plastique granulé, les courbes de cisaillement montrent que la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation du pourcentage du plastique granulé, et le pourcentage d'ajout le plus représentatif est de 7% de plastique granulé.

10.8. Evolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de ajouté au mélange (argile+20%sable qui est le cas le plus défavorable)

Tableau.19: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+20%de sable) traitée avec du plastique granulé.

% de plastique granulé	0%	3%	5%	7%
Cohésion	35	55	25	20

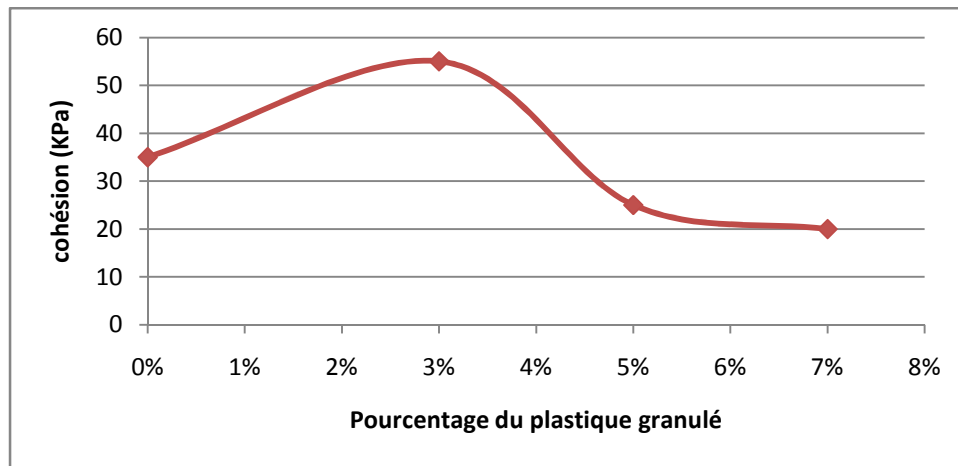


Figure IV.122 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en plastique granulé.

Tableau.20: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+20%de sable) traitée avec du plastique granulé.

% de plastique granulé	0%	3%	5%	7%
Angle de frottement	21.40	24.22	31.46	34.60

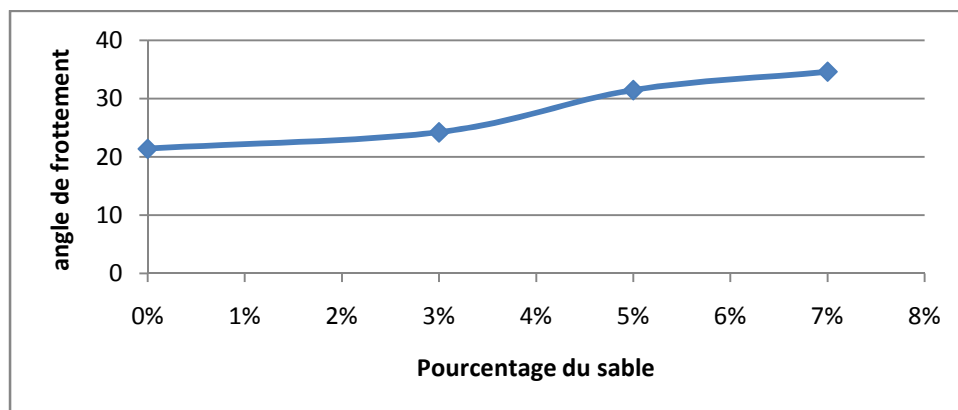


Figure IV.123 : Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en plastique granulé.

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout de plastique granulé au mélange (argile + 20% de sable) fait diminuer la cohésion et augmenter l'angle de frottement interne.

10.9. Evolution des contraintes de cisaillement avec l'augmentation du pourcentage de PVC au mélange (argile+20%sable qui est le cas le plus défavorable) à 400 KPa

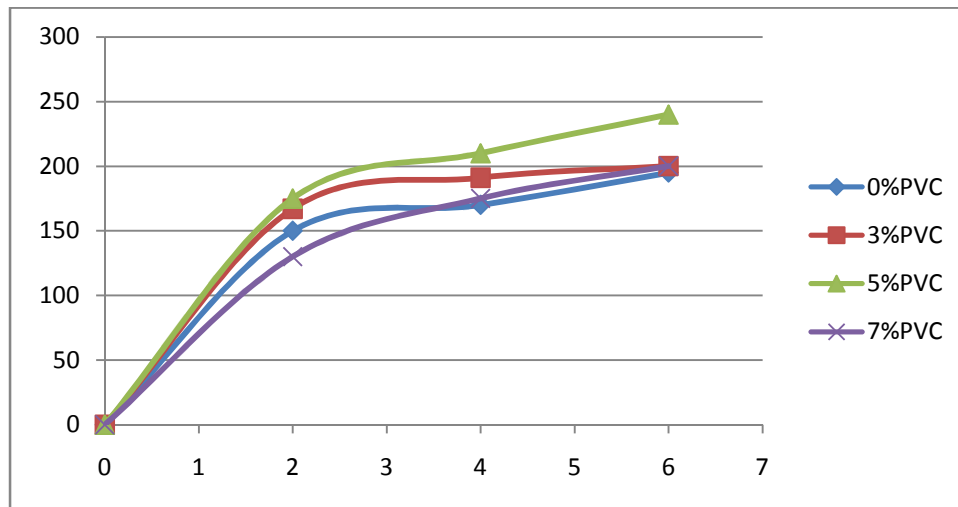


Figure IV.124 : Courbes d'évolution des contraintes tangentielles avec l'augmentation du pourcentage de PVC.

Pour le mélange (argile + 20% de sable) que l'on stabilise avec du PVC, les courbes de cisaillement montrent que le pourcentage d'ajout le plus représentatif est de 5% de PVC les autres courbes tendent à rejoindre la même valeur de résistance au cisaillement.

10.10. évolution de la cohésion et l'angle de frottement en fonction du pourcentage de PVC ajouté au mélange (argile+20%sable qui est le cas le plus défavorable)

Tableau.21: Résultats des cohésions obtenus sur (l'argile+20%de sable) traitée avec du PVC

% de sable	0%	3%	5%	7%
Cohésion	35	32.5	40	31

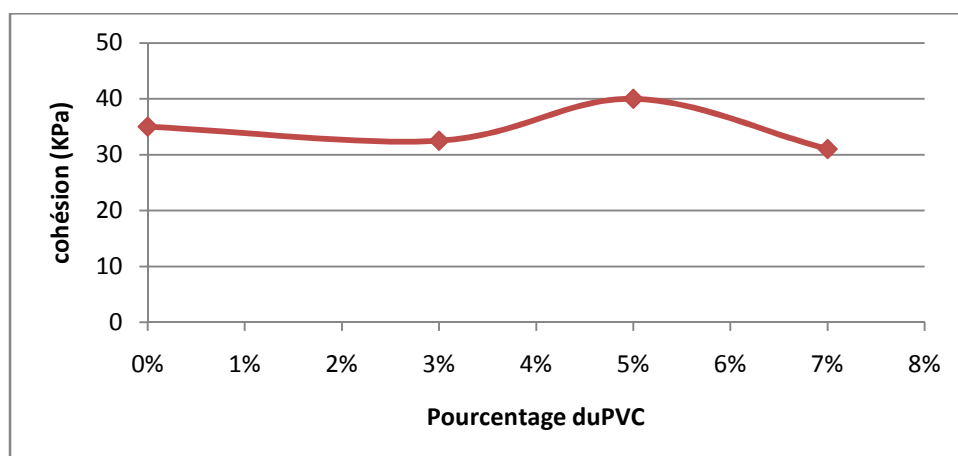


Figure IV.125 : Courbes des cohésions en fonction de la teneur en PVC.

Tableau.22: Résultats des angles de frottement obtenus sur (l'argile+20%de sable) traitée avec du PVC.

% de sable	0%	3%	5%	7%
Angle de frottement	21.40	23.50	26.33	23.12

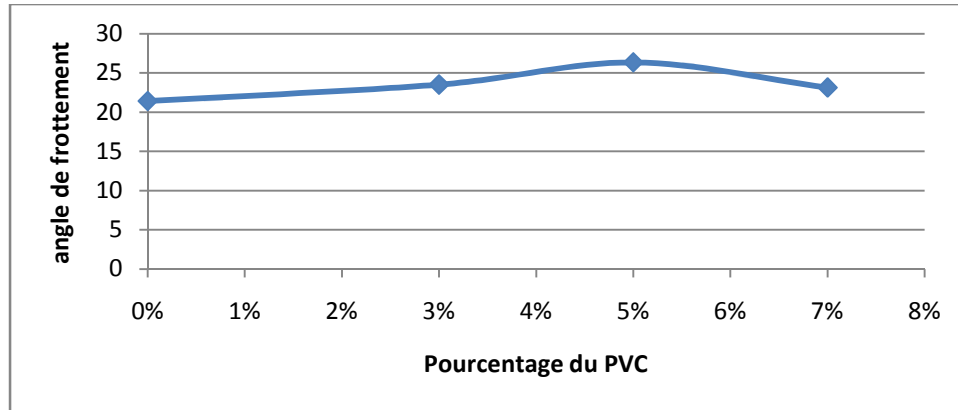


Figure IV.126 : Courbes des angles de frottement en fonction de la teneur en PVC.

Les caractéristiques de cisaillement montrent clairement que l'ajout du PVC au mélange (argile + 20% de sable) fait stabiliser la cohésion entre 32 et 40 kPa et l'angle de frottement interne oscille entre 22 et 27°.

11. Conclusion

L'étude du comportement des mélanges au cisaillement a confirmé davantage que l'ajout de sable et de plastiques recyclé est très intéressant et influe positivement sur le comportement de l'argile. Ceci se traduira par la suite (en pratique) sous forme de résistance et de stabilité des couches de chaussées et des sols de fondations.

CONCLUSION GENERALE

Les matériaux sélectionnés (argile, sable et plastiques recyclés) présentent plusieurs avantages tant sur le plan économique qu'environnemental, à savoir la disponibilité, facilité d'extraction ou de collecte dans le cas du plastique, facilité de préparation et enfin économie de transport et de temps car il s'agit de matériaux locaux.

Les résultats obtenus à l'issue des essais réalisés sur des échantillons reconstitués à base de différents mélanges permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ✚ Mélange argile- plastique granulé :
 - la résistance au cisaillement augmente pour un pourcentage de 5% et 7% ;
 - l'angle de frottement s'améliore;
 - la cohésion s'améliore.
- ✚ Mélange argile-PVC :
 - la résistance au cisaillement augmente pour un pourcentage de 7% ;
 - l'angle de frottement s'améliore ;
 - la cohésion s'améliore avec 7% et diminue avec 3% et 5% .
- ✚ Mélange argile-sable :
 - la résistance au cisaillement augmente avec 25% de sable ;
 - l'angle de frottement avec 25% de sable augmente et diminue avec les autres pourcentages ;
 - la cohésion diminue.
- ✚ Mélanges argile-sable-plastique granulé (dans le ca le plus défavorable d'argile-sable)
 - la résistance au cisaillement augmente en fonction de l'augmentation de plastique granulé.
 - l'angle de frottement diminue ;
 - la cohésion s'améliore.
- ✚ Mélanges argile-sable-PVC (dans le ca le plus défavorable d'argile-sable)
 - la résistance au cisaillement augmente pour un pourcentage de 5% ;
 - la cohésion se stabilise entre 32 et 40 kPa ;
 - l'angle de frottement interne oscille entre 22 et 27°.

Les résultats obtenus sont très intéressants et il serait souhaitable de confirmer ces résultats à l'échelle réelle particulièrement dans le domaine routier ou sous les sols de fondation.

PERSPECTIVE

Le travail mérite d'être poursuivi en réalisant des essais triaxiaux et en élargissant le champ d'utilisation de ces plastiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABOUBEKR, N. & AISSA MAMOUNE, S.M. Stabilisation des sols gonflants par les sels. Conférence Internationale de Géotechnique. Beyrouth, 2004.

ALLAM.O : «Etude au laboratoire de l'influence des sels sur la pression de gonflement des marne», mémoire de magister université de TLEMCEN, Algérie, 2011.

ALONSO E, GENS A and HIGHT D W. Special Problem soils. General Report, Proceedings of the Ninth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin. 1987

AMOUKRANE T. Amélioration des propriétés physiques et mécaniques des sols par incorporation des stabilisants : Université Mouloud Mamerie de Tizi-Ouzou, 2015, 153p.

BABOURI.R: stabilisation des sols argileux par la chaux cas des de kaolinite de GHELMA » mémoire de magister université de MSILA, Algérie, 2008.

BEKKOUCHE et al: « Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie) », Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, **2001**, Réf 4375 – PP (67-75).

BELABBACI, Z. stabilisation des sols gonflants. Thèse de doctorat SOLS ET STRUCTURES. Université ABOUBKER Belkaid. Tlemcen, 2014, 169 pages.

BOUCLY-NOROTTE V. évaluation des caractéristiques et de la perméabilité de matériaux argileux sous l'effet de sollicitations thermiques. Thèse de doctorat de l'école nationale de ponts et chaussées en géologie de l'ingénieur.1991.

BOUDLLAL O. Etude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations. Thèse de doctorat en géotechnique. Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mamerie.2013, 222p.

BULTEL, F., Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels. Thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées, 2001.

BUREAU C. optimisation e la gestion et de la mise en valeur des plastique récupérés au Québec, Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.).université de SHERBROOKE, 2009. 88p

Centre de recherche et d'application- Terre. «Construire en terre », Alternative, 1979

CHAMI I. effet d'ajout de stabilisant (ciment. Chaux et sable) sur le retrait et sur la résistance mécanique des argiles : Université Mouloud Mamerie de Tizi-Ouzou, 2016, 120p.

CHEHEB.F. « Etude expérimentale et analytique de la perméabilité des argiles stratifiées. » Thème de Master en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.2016

COLLINS K ET MCGOWO A. 1974. The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. Géotechnique 24, n°2 : pp 223-254.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COUSSY, Olivier DIR. « mécanique des sols non saturés ». Paris, Hermes sciences publication, 2002.

Davalle E M. Modèle numérique du comportement d'un sol liquéfiable sous sollicitations dynamiques. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, 1991

DAVIDSON, W.H, MULLIN, E.F. Use of fly ash in road construction in New South Wales. N.S.W : Department of Main Roads, 1962. Vol. 1, pp. 1085-1104.

DRAOU.N et NEBATI.F. Stabilisation des sols fins. Mémoire de master Ingénierie Des infrastructures de Base et Géotechnique. Université ABOUBKER Belkaid. Tlemcen. 2016. 78p.

DUBOIS V. 2008. Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière. Thèse de doctorat de l'université d'Artois.

FERRAH Ferrah. Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des fondations superficielles Thèse de MAGISTER Spécialité : Génie Civil Option : Mécanique des sols - Université El Hadj Lakhedar. Batna. 2006

Fontanille M et Gnanou Y. Chimie et physico-chimie des polymères, Dunod, coll, troisième édition, 2014. 576 p.

Frédéric Bultel. Prise en compte du gonflement des terrains dans le dimensionnement des revêtements des tunnels. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2001.

GUEDDACH H. Stabilisation des sols à la chaux et à chaud : Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012, 118p.

HOUBEN H et GUILLAUX H. « Traité de construction en terre », Parenthèses, Juin 1995.

JOHNSON.L.D: «Horizontal and vertical swell pressures from triaxial test »: feasibility study. Geotechnical Testing Journal, 1960 .pp (117–124).

KACPRZAK G. Etude du comportement mécanique des mélanges sable/argile ; thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de l'université de Lyon. 2006.

LCPC. Essais de cisaillement à la boîte. Méthode d'essai N° 21. Ministère de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire et des transports. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 1987.

LE Thi Ngohà. Comportement des sols fins utilisés en couverture étanche des installations de stockage de déchets : approche expérimentale e numérique. Thèse doctorat. Université Grenoble I- Joseph Fourier., Ecole doctorale Terre- Univers-Environnement. 2009.

LERAUL J. Cours Géotechnique 1, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse, Département des sciences et technologies pour l'ingénieur. 2006.

LIVET M. Sols argileux gonflants-site expérimentale de Waza-Maltman. Lyon : Laboratoire Régional des ponts et chaussées de Clermont-Ferrand, 1990.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

MAGNANT J P. Description, identification et classification des sols. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Document c208, Techniques de l'Ingénieur, l'expertise technique et scientifique de référence. 1997

MOUROUX.P:« La construction économique sur les sols gonflants », Manuels et méthodes, BRGM. France. 1969

- **NFP 18-592 (1990)** : Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à tache.
- **NFP 94- 041 (1995)** : Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide.
- **NFP 94- 053 (1991)** : Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire. Méthode de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau.
- **NFP 94-050 (1995)** : Détermination de la teneur en l'eau pondérale des matériaux- Méthode par étuvage.
- **NFP 94-051 (1993)** : Détermination des limites d'Atterberg la limite à la coupelle – limite de plasticité au rouleau.
- **NFP 94-057 (1992)** : Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.
- **NFP 94-060-1** : Détermination conventionnelle de la limite retrait sur le passant à 400µm d'un matériau.

OUALI L. Etude du comportement d'un mélange de marne et de déchets plastiques dans les corps de chaussées : Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017, 104

OUALI L. Etude du comportement d'un mélange de marne et de déchets plastiques

Pedro L S. De l'étude du comportement mécanique de sols hétérogènes modèles à son application au cas des sols naturels. Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées. 2004

SAADI L A. Méthodologie de contrôle de l'homogénéité et de la perméabilité des barrières argileuses. Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France). 2003

THEVANAYAGAM S, Shenthana, T, S Mohan & Liang J. Undrained fragility of clean sands, silty sands and sandy silts. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.128(No.10), 2002. pp 849-859.

THOMAS. M, PETRY. P. E, FASCE. « Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures History, Practice, and Future», Journal of Materials in Civil Engineering, 2002. Vol. 14, N. 6, pp (447-460).

XING-LING. Comportement hydromécanique des sols fins : de l'état saturée à l'état non saturée. Thèse de doctorat en science appliquées. Université de Liège. 1999.

ZENKHRI Abderrezak: Solutions de construction sur sol potentiellement gonflant- Application à la région d'In-Aménas. Thèse de MAGISTER, université In Aménas, 2010.

RESUME

Le travail réalisé apporte une précieuse contribution à la résolution du problème environnemental concernant les déchets plastiques. L'intégration de ces plastiques recyclés au matériau naturel à savoir l'argile constitue une alternative économique et une solution durable dans les techniques routières et les sols de fondations.

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de l'ajout simultané des granulats en plastique recyclés et de sable sur les caractéristiques de cisaillement de l'argile. Les échantillons ont été soumis aux essais de cisaillement direct. Le sable a été ajouté au sol argileux aux teneurs 0-25% avec un pas de 5%. Les échantillons ont été soumis à des efforts de cisaillement de 100-200-300-400KPa.

Les résultats des résistances au cisaillement et les caractéristiques intrinsèques obtenus ont montré que les sols argileux peuvent être stabilisés avec succès par les granulats en plastique recyclé ou le PVC broyé à faibles pourcentages et par le sable à un pourcentage avoisinant les 20 à 25%.

MOTS CLES : argile, sable, plastique granulé, pvc broyé, stabilisation, essai de cisaillement, caractéristiques.