



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement supérieur  
Et de la recherche scientifique



Université Mohamed Seddik BenYahia -Jijel-  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil et Hydraulique

# Projet de Fin d'Etudes

En Vue de l'obtention du Diplôme de Master académique

Filière : Génie Civil

Option: Géotechnique

## *Thème*

**Renforcement des sols par ajout des fibres naturelles**

Présenté par :

- RAHAI Amel
- BOUSSALEM Madiha

Encadré par :

- M<sup>lle</sup> : ARABET Leila

Soutenu publiquement le 27/06/2018 devant le jury composé de :

Président : Dr : CHIKER Tarek

Examineur : Pr : LAAMARA Mohamed

Promotion : 2017/2018

## **Remerciements**

*Nous remercions tout d'abord Dieu tout le puissant de nous avoir donnés le courage,  
la force et la patience d'achever ce modeste travail.*

*Nous remercions vivement notre encadreur durant la réalisation de ce projet M<sup>lle</sup>  
«**ARABET Leila** ». Nous lui sommes reconnaissants pour son appui, sa  
disponibilité, ses critiques et ses conseils qui furent précieux dans l'aboutissement de  
cette recherche.*

*Tous nos remerciements et notre profonde gratitude à tous nos enseignants.*

*Nous remercions également les membres des jurys qui nous ont fait l'honneur de  
présider et d'examiner ce modeste travail.*

*Nos profonds sentiments de respect et de gratitude s'adressent à M<sup>lle</sup> : «**HANK**  
**Souad** » qui nous a aidé et orienté tous le long de ce travail.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la  
réalisation de ce travail*

*qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail et surtout  
Lwiza, Wassim, Ilham et Loubna.*

***Amel et Madiha***

## *Dédicace*

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.*

*J'ai le grand plaisir de dédier le fruit de mes efforts A :*

*L'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui sacrifié pour me voir réussir : Mon père.*

*La lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur : Ma mère.*

*Mes précieuses sœurs : Habou, Jamou, Lamou et Louda ;*

*Belles sœurs : Linda et Manel.*

*Mes chers frères : Zouhir Mohammed Toufik et Faysal ;*

*Beaux frères : Nour eddine et Rafik,*

*Ma chère khaltou.*

*L'amour de mon cœur, tout en Son nom : Bilal, Walid, Aymen, Anis, Wail, Bouchra,*

*Racha Asil et Akram Joud.*

*Mon très cher ami Adel qui m'a soutenue tout au long de ce projet.*

*Une dédicace toute spéciale à mon encadreur, M<sup>lle</sup> : ARABET Leila.*

*Mes amies et aux personnes qui me sont chères : Lwiza, Anissa, Meryem, Wassima,*

*Noura, Sahar, Nada, Fayza et Sarah.*

*Ma collègue Madiha et toute sa famille.*

*Mes collègues de Génie Civil de la promotion 2017 particulièrement à la classe de :*

*Géotechnique.*

*Amel.*



## **Dédicace**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*La lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; mon fils Djawed que j'adore.*

*Mes parents ; Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Qui sont toujours sacrifié pour me voir réussir .Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*Celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : mon marie Mohammed.*

*Le père et la mère de mon mari Mon oncle Ammar et ma tante Massouda sur leurs conseils, aides, et encouragements. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*Mes frères : Tarik, Sami, Rafik, Younes, Chérif, Salah, Kamel, Morad, Ahsene, Khireddine, et le psychologue Zakarya.*

*Mes sœurs : Houda, Lamya, Imane, Ratiba, Warda et Malika et sa fille Ritadje.*

*Mes belles sœurs : Warda, Nadia, Farida, Sabrina et Samah.*

*Mes nièces : Malak, Ghofrane et Zineb.*

*Mes neveux : Riyad, Yahya, Adam, Iyad, Ayoub, Sadjed, Aya, Hiba et Toubia.*

*Une dédicace toute spéciale a mon encadreure : M<sup>lle</sup> « ARABET Leila »*

*Ma collègue Amel et toute sa la famille.*

*Tous les enseignants et les étudiants de l'université de Jejl.*

*Tous que j'aime et m'aiment.*

***Madiha.***

## **Résumé :**

Dans ce travail, l'effet de renforcement d'Alfa dans le sable de la wilaya de Jijel a été étudié. À cet effet les fibres d'Alfa ont été choisies pour deux raisons principales. Tout d'abord, cette fibre est abondante dans le bassin méditerranéen et surtout en Algérie. Deuxièmement, Alfa a des propriétés mécaniques élevées, y compris la résistance à la traction et la rigidité. L'interaction entre le sable et les fibres d'alfa ajoutés a été évalué par un essai de cisaillement direct (avec un appareil de cisaillement). Les fibres « Alfa » ont été utilisées dans leur état naturel, et elles ont été placées dans le plan de cisaillement dans quatre directions différentes (horizontale, verticale, aléatoire et incliné à 45°) par rapport à la direction de la force de cisaillement ; et pour différents pourcentages (0.25, 0.5, 0.75 et 1%) et longueurs (1, 1.5, 2 et 2.5 cm). Les études expérimentales montrent que l'orientation, le pourcentage et la longueur de fibre d'alfa influencent fortement le comportement du sol étudié.

**Mots clés :** Renforcement, Sable, Alfa, Cohésion, Angle de frottement, contrainte de cisaillement.

## **Abstract :**

This work is a study of reinforcing effect of Alfa in sandy soil (Jijel). For this purpose Alfa fibers have been chosen for two main reasons. First of all, this fiber is abundant in the Mediterranean basin and especially in Algeria. Second, Alfa has high mechanical properties, including tensile strength and rigidity. The interaction between the sand and the added alfa fibers was evaluated by a direct shear test (with a shearing apparatus). "Alfa" fibers were used in their natural state, and they were placed in the shear plane in four different directions (horizontal, vertical, random and 45 ° inclined) with respect to the direction of the shear force; and for different percentages (0.25, 0.5, 0.75 and 1%) and lengths (1, 1.5, 2 and 2.5 cm). Experimental studies show that the orientation, the percentage and the length of the fibers strongly influence the behavior soil.

**Key words:** Reinforcement, Sand, Alfa, Cohesion, Angle of friction, shear stress.

## **الملخص:**

في هذا العمل ، تمت دراسة التأثير تعزيز الحلفاء في رمل ولاية جيجل. تم اختيار ألياف الحلفاء لسببين رئيسيين. بادئ ذي بدء ، هذه الألياف موجودة في حوض البحر الأبيض المتوسط وخاصة في الجزائر. ثانيا ، تمتلك الحلفاء خصائص ميكانيكية عالية ، بما في ذلك قوة الشد والصلابة. تم تقييم التفاعل بين الرمل وألياف الحلفاء المضافة عن طريق اختبار القص المباشر (مع جهاز القص). ألياف "الحلفاء" استخدمت في حالتها الطبيعية، وأنها وضعت في علبة القص في أربعة اتجاهات مختلفة (أفقي، عمودي، عشوائي و بميل 45 درجة) فيما يتعلق اتجاه القوة القص. وبنسب مئوية مختلفة (0.25 ، 0.5 ، 0.75 و 1٪) وأطوال (1 ، 1.5 ، 2 ، 2.5 سم). تظهر الدراسات التجريبية أن الاتجاه والنسبة المئوية وطول الألياف تؤثر بقوة على سلوك التربة المدروسة.

**الكلمات الرئيسية:** التعزيز ، الرمل ، الحلفاء ، التماسك ، زاوية الاحتكاك ، إجهاد القص.

Remerciement

Dédicaces

Résumé

## Sommaire

Sommaire .....	i
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux .....	xv
Introduction générale .....	1

### **Chapitre I : Renforcement de sol**

I.1. Introduction.....	3
I.2. Caractérisation des sols.....	3
I.2.1. Les paramètres de nature.....	3
I.2.2. Les paramètres d'état des sols.....	4
I.2.3. Les paramètres de comportement.....	4
I.3. Quelques problèmes pathologiques des sols.....	5
I.3.1. Le retrait-gonflement des sols fins.....	5
I.3.2. Liquéfaction des sols grenus.....	5
I.3.3. Instabilité des pentes.....	6
I.4. Historique sur le renforcement des sols.....	6
I.5. Techniques de renforcement du sol.....	7
I.6. Différents types de renforcement de sol.....	8
I.6.1. Colonnes ballastées.....	8
I.6.2. Jet-grouting.....	10

I.6.3. Inclusions rigides.....	11
I.6.4. Soil mixing.....	12
I.6.5. Géosynthétiques.....	13
I.6.6. La Terre Armée.....	15
I.6.7. Les micro-pieux.....	15
I.6.8. Le clouage.....	15
I.6.9. par ancrages.....	16
I.6.10. Pneu usages.....	16

## **Chapitre II : Renforcement de sol par des fibres**

II.1. Introduction.....	17
II.2. Les fibres textiles.....	17
II.2.1. Les fibres naturelles.....	17
II.2.1.1. Les fibres végétales.....	17
II.2.1.2. Les fibres animales.....	17
II.2.1.3. Les fibres minérales.....	18
II.2.2. Les fibres chimiques.....	18
II.2.2.1. Fibres synthétiques.....	18
II.2.2.2. Fibres artificielles.....	18
II.3. Les fibres végétales.....	18
II.3.1. Introduction.....	18
II.3.2. Classification des fibres végétales.....	19
II.3.3. Le processus d'extraction des fibres végétales.....	19
II.3.4. Les avantages et les inconvénients des différentes fibres végétales.....	20
II.4. La fibre d'Alfa.....	21
II.4.1. Présentation générale.....	21



II.4.2. Propriétés des fibres d'alfa.....	21
II.4.3. Répartition géographique.....	22
II.4.4. La récolte de l'Alfa.....	23
II. 5. Les différentes recherches réalisées sur sable/fibre.....	23
II.6. Conclusion.....	27

### **Chapitre III : Essais d'identification et de classification des sols**

III.1. Introduction.....	31
III.2. Le sol étudié.....	31
III.3. LES ESSAIS D'IDENTIFICATION.....	31
III.3.1. La teneur en eau de sol (NF P 94-050).....	31
III.3.1.1. Introduction.....	31
III.3.1.2. Principe de la méthode.....	32
III.3.1.3. Appareillage utilisée.....	32
III.3.1.4. Mode opératoire.....	32
III.3.1.5. Résultats obtenus.....	32
III.3.2. Détermination de la masse volumique.....	33
III.3.2.1. Introduction.....	33
III.3.2.2. Mesure de la masse volumique des sols au laboratoire.....	33
III.3.2.3. Appareillage utilisé.....	33
III.3.2.4. Mode opératoire.....	34
III.3.2.7. Résultats obtenus.....	34
III.3.3. Équivalent de sable (NF P 18-598).....	35
III.3.3.1. Définition.....	35
III.3.3.2. Principe.....	35
III.3.3.3. Appareillage.....	35

III.3.3.4. Mode opératoire.....	36
III.3.3.5. Formules.....	37
III.3.3.6. Les résultats obtenus.....	37
III.3.4 : Les limites d'Atterberg (NF P 94-051).....	38
III.3.4.1. Introduction.....	38
III.3.4.2. Définition.....	38
III.3.4.3. Principe de détermination des limites d'Atterberg.....	38
III.3.4.4. Préparation de l'échantillon.....	39
III.3.4.5. Détermination de la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande.....	39
III.3.4.5.a. Matériel utilisé.....	39
III.3.4.5.b. Mis en place de l'échantillon.....	39
III.3.4.6. Limite de plasticité WP du rouleau.....	40
III.3.4.7. Résultats obtenus.....	41
III.3.4.8. Interprétation des résultats.....	41
III.3.5. Essai de bleu méthylène (NF P 94-068).....	42
III.3.5.1. Introduction.....	42
III.3.5.2. Principe de l'essai.....	42
III.3.5.3. Préparation de l'échantillon.....	43
III.3.6. Analyse granulométrique.....	44
III.3.6.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056).....	45
III.3.6.1.a. Principe.....	45
III.3.6.1.b. Équipements utilisés.....	45
III.3.6.2. Essai granulométrique par sédimentation (NF P 94-057).....	46
III.3.6.2.a. Introduction.....	46
III.3.6.2.b. Principe.....	47
III.3.6.2.c. Appareillage.....	47

III.3.6.2.d. Mode opératoire.....	48
III.3.6.2.e. Préparation de la prise d'essai.....	49
III.3.6.2.f. Expression des résultats.....	50
III.3.6.1.j. Les résultats obtenus.....	52
III.4. Essai de cisaillement direct à la boîte.....	54
III.4.1. Introduction.....	54
III.4.2. Définition.....	54
III.4.3. Principe de l'essai.....	55
III.4.4. Appareillages.....	55
III.4.4.1. La machine de cisaillement à déformation contrôlés.....	55
III.4.4.2. La boîte de cisaillement.....	56
III.4.4.3. Les bâtis de consolidation.....	57
III.4.4.4. Les poids.....	57
III.4.4.5. Appareillage d'usage courant.....	57
III.4.2. Mode opératoire.....	57
III.4.2.2. Résultats obtenus .....	58
III.5. La fibre utilisée (fibre d'Alfa).....	60
III.6. Conclusion.....	60

## **Chapitre IV : Étude expérimentale**

IV.1. Introduction.....	61
IV.2. Programme des essais réalisés .....	61
IV.3. Préparation des mélanges.....	64
IV.4. Les résultats obtenus .....	65
IV.4.1. Direction horizontale.....	65
IV.4.1.1 Différents pourcentage d'Alfa de 1 cm.....	65
IV.4.1.1.a. Essai n°2.....	65

IV.4.1.1.b. Essai n°3.....	66
IV.4.1.1.c. Essai n°4.....	68
IV.4.1.1.d. Essai n°5.....	69
IV.4.1.1.e. Récapitulatifs des résultats.....	70
IV.4.1.2. Les différentes longueurs d'Alfa (0.25%).....	72
IV.4.1.2.a. Essai n°20.....	72
IV.4.1.2.b. Essai n°19.....	74
IV.4.1.2.c. Essai n°18.....	75
IV.4.1.2.d. Récapitulatifs des résultats.....	77
IV.4.2. Direction incliné à 45°.....	78
IV.4.2.1 Différents pourcentage d'Alfa de 1 cm.....	78
IV.4.2.1.a. Essai n°6.....	78
IV.4.2.1.b. Essai n°7.....	80
IV.4.2.1.c. Essai n°8.....	81
IV.4.2.1.d. Essai n°9.....	83
IV.4.2.1.e. Récapitulatifs des résultats.....	85
IV.4.2.2. Les différentes longueurs d'Alfa (0.25%).....	86
IV.4.2.2.a. Essai n°23.....	86
IV.4.2.2.b. Essai n°22.....	88
IV.4.2.2.c. Essai n°21 (Sable + 0.25% fibre d'alfa «2.5 cm»).....	89
IV.4.1.2.d. Récapitulatifs des résultats.....	91
IV.4.3. Direction verticale.....	92
IV.4.3.1 Différents pourcentage d'Alfa de 1 cm.....	92
IV.4.3.1.a. Essai n°10.....	92
IV.4.3.1.b. Essai n°11.....	94
IV.4.3.1.c. Essai n°12.....	95

IV.4.3.1.d. Essai n°13.....	97
IV.4.3.1.e. Récapitulatifs des résultats.....	98
IV.4.3.2. Les différentes longueurs d'Alfa (0.25%).....	100
IV.4.3.2.a. Essai n°26.....	100
IV.4.3.2.b. Essai n°25.....	101
IV.4.3.2.c. Essai n°24.....	103
IV.4.1.2.d. Récapitulatifs des résultats.....	104
IV.4.4. Direction aléatoire.....	106
IV.4.4.1 Différents pourcentage d'Alfa de 1 cm.....	106
IV.4.4.1.a. Essai n°14.....	106
IV.4.4.1.b. Essai n°15.....	108
IV.4.4.1.c. Essai n°16.....	109
IV.4.4.1.d. Essai n°17.....	111
IV.4.4.1.e. Récapitulatifs des résultats.....	112
IV.4.4.2. Les différentes longueurs d'Alfa (0.75%).....	114
IV.4.4.2.a. Essai n°29.....	114
IV.4.4.2.b. Essai n°28.....	115
IV.4.4.2.c. Essai n°27.....	117
IV.4.4.2.d. Récapitulatifs des résultats.....	118
IV.5. Récapitulatif des résultats obtenus dans les différentes directions d'Alfa.....	120
IV.6. Conclusion.....	120
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>121</b>



Listes des figures

<b>Figure I.1</b> : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide (Reiffsteck, 2010).....	9
<b>Figure I.2</b> : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie sèche (Corneil, 2007).....	9
<b>Figure I.3</b> : Étapes de réalisation du renforcement de sol par jet grouting (Soletanche-Bachy).....	11
<b>Figure I.4</b> : Schéma de principe de renforcement par inclusions rigides (Briançon, 2004).....	12
<b>Figure I.5</b> : Les géotextiles.....	13
<b>Figure I.6</b> : Géogrilles mono-axiales.....	13
<b>Figure I.7</b> : Géogrilles bi-axiales.....	14
<b>Figure I.8</b> : Terre armé.....	15
<b>Figure I.9</b> : Renforcement par ancrages.....	16
<b>Figure II.1</b> : Classification générale des fibres textiles.....	18
<b>Figure II.2</b> : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013).....	18
<b>Figure II.3</b> : Illustrations de quelques fibres animales, de gauche à droite: cocon de soie, fibres d'Angora et fibres d'Alpaga.....	19
<b>Figure II.4</b> : Classification des fibres végétales selon l'origine.....	21
<b>Figure II.5</b> : Processus générique d'extraction des fibres végétales.....	22
<b>Figure II.6</b> : Plante d'alfa.....	23
<b>Figure II.7</b> : Les différentes méthodes de récolte d'alfa.....	26
<b>Figure II.8</b> : Courbes de cisaillement et intrinsèque (a et b) dans le plan perpendiculaire de l'axe de cisaillement.....	27
<b>Figure II.9</b> : (a) Effort de cisaillement sur la surface de la fibre; (b) un élément infinitésimal.....	28
<b>Figure II.10</b> : (a) Répartition idéale des contraintes de cisaillement sur la surface d'une fibre glissant dans une matrice déformante; (b) La contrainte axiale dans une fibre pendant le cisaillement pur ; (c) Contrainte de cisaillement idéalisée sur une fibre défailante en traction; (d) contrainte axiale.....	29

<b>Figure II.11</b> : Répartition de déformation le long d'une seule fibre incorporée dans une matrice déformante.....	30
<b>Figure III.1</b> : L'endroit du sol étudié.....	31
<b>Figure III.2</b> : Séchage du matériau.....	32
<b>Figure III.3</b> : Essai de l'éprouvette graduée.....	34
<b>Figure III.4</b> : Machine agitatrice manuelle.....	36
<b>Figure III.5</b> : Les phases et limites d'Atterberg.....	38
<b>Figure III.6</b> : Essai de la limite de liquidité (l'appareille de Casagrande).....	40
<b>Figure III.7</b> : Détermination de la limite de plasticité.....	40
<b>Figure III.8</b> : La courbe de la limite de liquidité.....	41
<b>Figure III.9</b> : Le déroulement de l'essai de bleu méthylène.....	43
<b>Figure III.10</b> : Granulométrie par tamisage.....	45
<b>Figure III.11</b> : Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentometrie.....	47
<b>Figure III.12</b> : Lecture de densimètre.....	49
<b>Figure III.13</b> : Lecture corrigé du densimètre.....	50
<b>Figure III.14</b> : Granulométrie par sédimentation.....	52
<b>Figure III.15</b> . Courbe granulométrique.....	53
<b>Figure III.16</b> . Principe de l'essai de cisaillement.....	55
<b>Figure III.17</b> : La machine de cisaillement.....	56
<b>Figure III.18</b> : Les constituants de la boite de cisaillement.....	56
<b>Figure III.19</b> : Les poids.....	57
<b>Figure III.20</b> : Mode opératoire de l'essai de cisaillement direct.....	58
<b>Figure III.21</b> : Contrainte de cisaillement & déformation $x$ .....	58
<b>Figure III.22</b> : Courbe déformation volumique & déformation $x$ .....	59
<b>Figure III.23</b> : Courbe contrainte de cisaillement & contrainte normale.....	59
<b>Figure IV.1</b> : Préparation des mélanges.....	64
<b>Figure IV.2</b> : Orientation des fibres d'Alfa dans l'échantillon de sol.....	65
<b>Figure IV.3</b> : Courbe de cisaillement de l'essai 2.....	65
<b>Figure IV.4</b> : Courbe déformation volumique & déformation $x$ de l'essai 2.....	66
<b>Figure IV.5</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 2.....	66
<b>Figure IV.6</b> : Courbe de cisaillement de l'essai 3.....	67
<b>Figure IV.7</b> : Courbe déformation volumique & déformation $x$ de l'essai 3.....	67
<b>Figure IV.8</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 3.....	67
<b>Figure IV.9</b> : Courbe de cisaillement de l'essai 4.....	68



**Figure IV.10** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 4.....68

**Figure IV.11** : Courbe intrinsèque de l'essai 4.....69

**Figure IV.12** : Courbe de cisaillement de l'essai 5.....69

**Figure IV.13** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 5.....70

**Figure IV.14** : Courbe intrinsèque de l'essai 5.....70

**Figure IV.15**: La cohésion en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction horizontale).....71

**Figure IV.16** : Angle de frottement en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction horizontale).....72

**Figure IV.17** : Courbe de cisaillement de l'essai 20.....72

**Figure IV.19** : Courbe intrinsèque de l'essai 20.....73

**Figure IV.18** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 20.....73

**Figure IV.20** : Courbe de cisaillement de l'essai 19.....74

**Figure IV.21** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 19.....74

**Figure IV.22** : Courbe intrinsèque de l'essai 19.....75

**Figure IV.23** : Courbe de cisaillement de l'essai 18.....75

**Figure IV.24** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 18.....76

**Figure IV.25** : Courbe intrinsèque de l'essai 18.....76

**Figure IV.26** : La cohésion en fonction des longueurs d'Alfa de 0.25% (direction horizontale).....77

**Figure IV.27**: Angle de frottement en fonction de longueur d'Alfa de 0.25%(direction horizontale) .....78

**Figure IV.28** : Courbe de cisaillement de l'essai 6.....79

**Figure IV.29** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 6.....79

**Figure IV.30** : Courbe intrinsèque de l'essai 6.....80

**Figure IV.31** : Courbe de cisaillement de l'essai 7.....80

**Figure IV.32** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 7.....81

**Figure IV.33** : Courbe intrinsèque de l'essai 7.....81

**Figure IV.34** : Courbe de cisaillement de l'essai 8.....82

**Figure IV.35** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 8.....82

**Figure IV.36** : Courbe intrinsèque de l'essai 8.....83

**Figure IV.37** : Courbe de cisaillement de l'essai 9.....83

**Figure IV.38** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 9.....84

**Figure IV.39** : Courbe intrinsèque de l'essai 9.....84

**Figure IV.40** : La cohésion en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction inclinée).....85

**Figure IV.41** : Angle de frottement en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction inclinée).....86

**Figure IV.42** : Courbe de cisaillement de l'essai 23.....86

**Figure IV.43** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 23.....87

**Figure IV.44** : Courbe intrinsèque de l'essai 23.....87

**Figure IV.45** : Courbe de cisaillement de l'essai 22.....88

**Figure IV.46** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 22.....88

**Figure IV.47** : Courbe intrinsèque de l'essai 22.....89

**Figure IV.48** : Courbe de cisaillement de l'essai 21.....89

**Figure IV.49** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 21.....90

**Figure IV.50** : Courbe intrinsèque de l'essai 21.....90

**Figure IV.51** : La cohésion en fonction des longueurs d'Alfa de 0.25% (direction Inclinée).....91

**Figure IV.52**: Angle de frottement en fonction de longueur d'Alfa de 0.25% (direction inclinée).....92

**Figure IV.53** : Courbe de cisaillement de l'essai 10.....92

**Figure IV.54** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 10.....93

**Figure IV.55** : Courbe intrinsèque de l'essai 10.....93

**Figure IV.56** : Courbe de cisaillement de l'essai 11.....94

**Figure IV.57** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 11.....94

**Figure IV.58** : Courbe intrinsèque de l'essai 11.....95

**Figure IV.59** : Courbe de cisaillement de l'essai 12.....95

**Figure IV.60** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 12.....96

**Figure IV.61** : Courbe intrinsèque de l'essai 12.....96

**Figure IV.62** : Courbe de cisaillement de l'essai 13.....97

**Figure IV.63** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 13.....97

**Figure IV.64** : Courbe intrinsèque de l'essai 13.....98

**Figure IV.65** : La cohésion en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction verticale).....99

**Figure IV.66** : Angle de frottement en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction verticale).....99

**Figure IV.67** : Courbe de cisaillement de l'essai 26.....100

**Figure IV.68** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 26.....100

<b>Figure IV.69</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 26.....	101
<b>Figure IV.70</b> : Courbe de cisaillement de l'essai 25.....	101
<b>Figure IV.71</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 25.....	102
<b>Figure IV.72</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 25.....	102
<b>Figure IV.73</b> : Courbe de cisaillement de l'essai 24.....	103
<b>Figure IV.74</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 24.....	103
<b>Figure IV.75</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 24.....	104
<b>Figure IV.76</b> : La cohésion en fonction des longueurs d'Alfa de 0.25% (direction verticale).....	105
<b>Figure IV.78</b> : Déformation des fibres de 2 et 2.5 cm.....	105
<b>Figure IV.78</b> : Angle de frottement en fonction de longueur d'Alfa de 0.25% (direction verticale).....	106
<b>Figure IV.79</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 14.....	106
<b>Figure IV.80</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 14.....	107
<b>Figure IV.81</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 14.....	107
<b>Figure IV.82</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 15.....	108
<b>Figure IV.83</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 15.....	108
<b>Figure IV.84</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 14.....	109
<b>Figure IV.85</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 16.....	109
<b>Figure IV.86</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 16.....	110
<b>Figure IV.87</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 16.....	110
<b>Figure IV.88</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 17.....	111
<b>Figure IV.89</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 17.....	111
<b>Figure IV.90</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 17.....	112
<b>Figure IV.91</b> : La cohésion en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction aléatoire).....	113
<b>Figure IV.92</b> : Angle de frottement en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction aléatoire)1.....	113
<b>Figure IV.93</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 29.....	114
<b>Figure IV.94</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 29.....	114
<b>Figure IV.95</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 29.....	115
<b>Figure IV.96</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 28.....	115
<b>Figure IV.97</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 28.....	116
<b>Figure IV.98</b> : Courbe intrinsèque de l'essai 28.....	116
<b>Figure IV.99</b> : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 27.....	117

**Figure IV.100** : Courbe déformation volumique & déformation  $\epsilon$  de l'essai 27.....117

**Figure IV.101** : Courbe intrinsèque de l'essai 27.....118

**Figure IV.102** : La cohésion en fonction des longueurs d'Alfa de 0.75% (direction aléatoire).....119

**Figure IV.103**: Angle de frottement en fonction de longueur d'Alfa de 0.25% (direction aléatoire).....119

**Liste des tableaux**

**Tableau I.1** : Principales techniques de renforcement de sols (Jenck, 2005).....8

**Tableau II.1** : Les avantages et les inconvénients des différentes fibres végétales.....22

**Tableau II.2** : Propriétés physiques de la fibre d’Alfa par rapport aux différentes fibres végétales.....23

**Tableau II.3** : Propriétés mécaniques en traction de la fibre d’Alfa par rapport aux différentes fibres végétales.....24

**Tableau II.4** : La répartition territoriale de la fibre d’alfa dans quelques pays.....25

**Tableau III.1** : La teneur en eau.....33

**Le tableau III.2** : Les résultats de la masse volumique sèche en g/cm<sup>3</sup>.....34

**Tableau III.3** : Lectures pour calculer l’équivalent de sable par piston.....37

**Tableau III.4** : Résultat de l’essai limite de liquidité.....41

**Tableau III.5** : Classification des sols.....41

**Tableau III.6** : Degré de plasticité de sol.....42

**Tableau III.7** : Classification des sols d’après l’essai de bleu de méthylène.....44

**Tableau III.8** : Les résultats de granulométrie.....52

**Tableau III.9** : Propriétés mécaniques de la fibre d’alfa.....53

**Tableau III.10** : Propriétés mécaniques des fibres d’Alfa.....60

**Tableau IV.1** : Programme des essais effectués.....61

**Tableau IV.2** : Récapitulatif des résultats obtenus par l’ajout des % d’Alfa (direction horizontale).....71

**Tableau IV.3** : Récapitulatif des résultats obtenus par l’ajout des longueurs de 0.25% d’Alfa (direction horizontale).....77

**Tableau IV.4** : Récapitulatif des résultats obtenus par l’ajout des % d’Alfa (direction inclinée) .....85

**Tableau IV.5** : Récapitulatif des résultats obtenus par l’ajout des longueurs de 0.25% d’Alfa (direction inclinée).....91

**Tableau IV.6** : Récapitulatif des résultats obtenus par l’ajout des % d’Alfa (direction verticale).....98

**Tableau IV.7** : Récapitulatif des résultats obtenus par l’ajout des longueurs de 0.25% d’Alfa (direction verticale).....104

**Tableau IV.6** : Récapitulatif des résultats obtenus par l'ajout des % d'Alfa (direction aléatoire).....12

**Tableau IV.9** : Récapitulatif des résultats obtenus par l'ajout des longueurs de 0.75% d'Alfa (direction aléatoire).....118

**Tableau IV.13** : Récapitulatif des pourcentages optimum avec les longueurs optimales des des fibres d'alfa.....120

### Introduction générale :

Grâce à des techniques innovantes, il est désormais possible de construire sur tous types de sols. Du simple ouvrage à la prouesse architecturale, le savoir-faire des ingénieurs est mobilisé pour analyser, étudier, renforcer et consolider les sols. Le géotechnicien sonde et détermine les caractéristiques des sols afin de concevoir, au sein de bureaux d'études, les fondations des ouvrages. Le renforcement des sols même s'il est généralement invisible est la pierre angulaire de tout ouvrage construit sur un sol aux caractéristiques mécaniques médiocres. Les développements technologiques actuels en matière de renforcement des sols s'orientent vers des solutions techniques plus économes et plus respectueuses de l'environnement.

L'utilisation des fibres naturelles pour renforcer le sol est une idée ancienne et ancienne. Par conséquent, Il a été établi hors de tout doute que l'ajout de fibres dans le sol améliore les performances techniques générales du sol.

Le sol renforcé de fibres a été utilisé dans de nombreux pays dans un passé récent et de plus amples recherches sont en cours pour de nombreux aspects cachés de celui-ci. Le sol renforcé de fibres est efficace dans tous les types de sols (c'est-à-dire sable, limon et argile). Utilisation de matériaux naturels tels que le jute, le coco, le sisal, l'**Alfa** et le bambou, comme matériaux de renforcement dans le sol prévalent depuis longtemps et ils sont abondamment utilisés dans de nombreux pays comme l'Inde, les Philippines, le Bangladesh, etc.

Les principaux avantages de ces matériaux sont qu'ils sont disponibles localement et très bon marché. Ils sont biodégradables et donc ne crée pas de problème d'élimination dans l'environnement. Le traitement de ces matériaux sous une forme utilisable est un emploi d'activité de production dans les zones rurales de ces pays. Si ces matériaux sont utilisés efficacement, l'économie rurale peut le soulèvement et aussi le coût de la construction peuvent être réduits, si l'utilisation du matériau entraîne des effets bénéfiques en ingénierie de construction.

L'Algérie est parmi les pays, qui disposent d'extraordinaires ressources en fibres naturelles (de palmier, Alfa, Abaca, Chanvre, Cotton ...), malheureusement, leur valorisation dans les domaines pratiques, entre autre, dans le domaine de construction est encore peu exploitée. En Algérie, Alfa, également connu sous le nom « Esparto », est retenu pour sa grande disponibilité et sa compétitivité de prix. Il provient d'une source renouvelable et peut

être intégré de manière rationnelle dans la construction. Récemment, ces fibres ont été utilisées dans le domaine du textile pour la production de filaments (E. Rogge, 2010 et M. Dallel, 2012). L'utilisation de fibres d'Alfa comme renforcement dans une matrice a été rapportée pour des renforcements de matériaux polymères (L. Ghali & al., 2006 et H. Mechakra & al., 2015). De plus, dans le domaine de la construction, des fibres alfa ont été introduites dans une matrice de ciment, pour étudier son effet sur les caractéristiques physiques et mécaniques des composites de fibres-mortier (O. Bahloul & al., 2009 et A. Belkadi & al., 2015).

Dans cette mémoire, l'alfa a été utilisé pour le renforcement de sable (Sidi-Abdelaziz) de la wilaya de Jijel, dans le but de répondre à ces trois questions suivantes :

- ✓ Quel est l'effet d'ajout de fibre (longueur et pourcentage) sur le renforcement du sol ? ;
- ✓ Quelle est la direction idéale d'Alfa ajoutée par rapport à la direction de cisaillement ?;
- ✓ Quelle est la matrice idéale de renforcement pour chaque direction?;

Pour atteindre le but visé, le travail sera divisé en quatre chapitres y compris une introduction générale et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous présentons tout d'abord les caractéristiques de sol, ainsi que les différents problèmes rencontrés dans le sol, ensuite nous discutons une étude bibliographique détaillée sur les différentes techniques de renforcement de sol.

Le deuxième chapitre présente les différents types des fibres employées dans le domaine du renforcement des sols, plus une étude bibliographique approfondie sur le fibre d'Alfa.

Le troisième chapitre présente une série des essais effectués au laboratoire, afin de déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques de sol étudié.

Le quatrième chapitre porte sur une étude expérimentale basée sur l'essai de cisaillement direct à la boîte qui a été effectué dans le laboratoire pour calculer la cohésion, l'angle de frottement et la contrainte de cisaillement d'un sol renforcé par l'ajout d'Alfa. Enfin, une conclusion générale permet de faire une synthèse des résultats obtenus et de tirer quelques perspectives sur des suites liées à cette étude.



## I.1. Introduction :

Le développement économique et l'accroissement des populations des villes saturées entraînent l'extension des agglomérations. Ainsi, de plus en plus de constructions et d'infrastructure sont construites sur des sols de mauvaises qualités tels que les sols meubles dans les zones côtières ou sur les zones de dépôt de sédiments des rivières. Cela entraîne une importance grandissante des méthodes et techniques d'amélioration du sol.

Il est indispensable avant tout démarrage de travaux d'avoir une idée des caractéristiques du sol en présence. Ce chapitre consiste de connaître les principes généraux régissant son comportement, les différents problèmes rencontrés dans le sol et les différents types de renforcement de sol.

## I.2. Caractérisation des sols :

On distingue trois grandes familles de paramètres dont la connaissance est capitale pour la caractérisation d'un sol vis-à-vis de son renforcement :

### I.2.1. Les paramètres de nature :

Ils caractérisent ce qui ne varie pas (ou peu) dans le temps ou au cours des manipulations que peut subir le sol:

- **Granularité** : Les essais de granulométrie permettent de classer les sols en différentes catégories selon la dimension de leurs éléments:

- sols fins (sables, argiles, limons);
- sols granulaires;
- sols mixtes (sols fins à charge pierreuse).

- **Argilosité** : Elle caractérise à la fois la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol. On peut la mesurer à l'aide des paramètres suivants:

- l'indice de plasticité ( $I_p$ );
- la valeur de bleu de méthylène (MB).

- **Présence de constituants chimiques particuliers** : des éléments perturbateurs peuvent troubler les réactions entre le sol et l'agent de renforcement (matières organiques, sulfates et sulfures, chlorures, nitrates, etc.).

### **I.2.2. Les paramètres d'état des sols :** (teneur en eau)

Ces paramètres ne sont pas propres au sol mais sont fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. L'état hydrique conditionne :

- le choix de l'agent de renforcement le mieux adapté à appliquer.
- le bon déroulement des réactions entre le sol et l'agent de traitement;
- la qualité de la mise en œuvre (malaxage, compactage).

### **I.2.3. Les paramètres de comportement :**

#### **- Comportement des sols fins et problèmes typiques :**

Les dépôts de sols fins mous et compressibles (argiles, vases) sont fréquents dans les vallées et en bordure des côtes. Ces zones ont été longtemps considérées comme peu propices à la construction, mais on y construit maintenant fréquemment tous les types d'ouvrages (routes, réservoirs, piscines, etc.), au prix d'un traitement préalable des sols de fondation.

Ces sols fins ont trois caractéristiques essentielles :

- Ils subissent des déformations importantes sous les charges qui leur sont appliquées ;
- Leurs déformations ne sont pas instantanées, mais peuvent durer pendant des mois, voire des années ;
- Leur capacité portante est souvent trop faible pour supporter les charges prévues dans les projets.

Les problèmes que l'on rencontre en pratique sont tous liés aux trois caractéristiques précédentes : tassements excessifs, tassements différentiels, déformations à long terme, instabilité de l'ouvrage. On peut citer, à titre d'exemples :

- Le tassement des remblais d'accès à un pont, à l'entrée d'un bâtiment fondé sur pieux, avec formation d'une marche d'ampleur croissante et des effets parasites sur les fondations ;
  - Les tassements excessifs des fondations superficielles d'un bâtiment ;
  - Les ruptures d'ouvrages en cours de construction ou d'exploitation (remblais, silos, ... etc.).
- **Comportement des sols grenus et problèmes typiques :**

Contrairement à ce qui se passe dans le cas des sols fins, la perméabilité élevée des sols grenus fait que l'on n'observe d'augmentation des pressions interstitielles dans ces sols que dans le cas de la liquéfaction, généralement provoquée par des sollicitations sismiques. Les problèmes de sols grenus sont donc essentiellement des problèmes d'amplitudes de tassement, ainsi que des problèmes de résistance à la liquéfaction ; ces problèmes se posent pour l'essentiel dans le cas des sables lâches.

### **I.3. Quelques problèmes pathologiques des sols :**

#### **I.3.1. Le retrait-gonflement des sols fins :**

Le retrait-gonflement des argiles provoque des dégâts considérables aux constructions en Algérie. Bien qu'ils ne soient pas dangereux pour l'humain, ils engendrent des dépenses faramineuses aux budgets des collectivités locales. Les désordres occasionnés tant aux superstructures qu'aux infrastructures ont poussés les chercheurs à mieux comprendre ce phénomène et à prévoir des solutions à ce genre de problème.

En effet, les variations du volume du sol sont dues d'un part à l'interaction eau solide (à l'échelle microscopique et macroscopique) et d'autre part à la modification de l'état de contraintes en présence de l'eau. Ces dernières (variations) peuvent s'exprimer soit par un gonflement soit par un retrait et plus particulièrement les montmorillonites (smectites).

#### **I.3.2. Liquéfaction des sols grenus :**

Le phénomène de liquéfaction des sols peut être un effet induit des séismes. Sous l'effet d'une onde sismique, le sol perd une partie ou la totalité de sa portance. Le sol se comporte alors comme un liquide. Ce phénomène est généralement brutal et temporaire, les sols reprenant leur consistance solide après.

### **I.3.3. Instabilité des pentes :**

Les mouvements qui affectent les versants sont extrêmement variés par leur dimension, leur morphologie et leur évolution cinématique.

De nombreuses classifications ont été proposées, fondées sur différents critères : morphologie, cinématique, nature des matériaux, etc. Trois familles principales de phénomènes, à l'origine de déplacements importants de matériaux sur les talus et versants, peuvent être distinguées :

- Les glissements en terrain meuble ;
- Les éboulements en terrain rocheux ;
- Les coulées boueuses ou coulées de débris.

### **I.4. Historique sur le renforcement des sols :**

Les principes de base du renforcement du sol existent déjà dans la nature et sont démontrés par les animaux, les plantes et les oiseaux. La forme moderne du renforcement du sol a été appliquée pour la première fois par Vidal (1969). Basé sur le concept de Vidal, ingénieur des Ponts et Chaussées, et architecte, qui a publié les premiers résultats de ses recherches en 1963. « Au départ tout commence à la manière d'un jeu, en construisant un château de sable sur la plage de Saint-Tropez, racontait Henri Vidal lui-même. Mais le sable s'égrène. Alors est venue l'idée d'armer la construction avec des aiguilles de pins ». Et de cette idée est né le principe général du sol renforcé et le concept particulier de la terre renforcée.

Et après son invention, la technique de Terre renforcée a connu un large développement depuis quelques années dans le domaine du génie civil et une progression énorme. Cependant, depuis le début des années quatre-vingt, les technologies de renforcement des sols utilisant des inclusions diverses ont fait des progrès considérables. Si les mélanges de plusieurs sols (stabilisation dite mécanique) ou l'addition de faibles quantités de ciment, de chaux ou de bitume (stabilisation chimique), le préchargement allié au drainage, ou les injections sont des méthodes employées depuis longtemps pour améliorer les terrains défectueux, les renforcements par inclusions ont permis d'obtenir des résultats spectaculaires. La terre armée, c'est-à-dire la mise en place, dans un remblai en construction par couches, d'armatures plates en acier galvanisé liées à une peau formée d'écaillés en béton armé, fut, dans les années

soixante, le précurseur des renforcements par inclusions. Le renforcement par géogrilles, par géotextiles perméables, par géomembranes étanches, éventuellement par des systèmes mixtes calandrés drainant d'un seul côté, par la création de massifs par projection de fils et de sable (Texsol), par clouage, par ancrages battus ou forés scellés, précontraints ou non, ont modernisé et étendu la gamme des procédés.

Cependant, ces techniques permettent d'améliorer suffisamment les mauvais sols de façon à les rendre aptes à supporter les efforts des structures qu'on doit y construire.

### **I.5. Techniques de renforcement du sol :**

De nos jours, l'industrie de la construction est souvent confrontée à la problématique de la qualité géotechnique des terrains disponibles. La forte compressibilité de beaucoup de ces sols impose alors la nécessité de développer des techniques de renforcement permettant de rendre ces terrains utilisables. Ceci pour prévenir la construction dans un environnement qui risque de présenter deux aspects (Chevalier, 2008) :

- Des tassements absolus et/ou différentiels très importants.
- Des temps de tassement potentiellement très longs (jusqu'à plusieurs années).

Il existe de nombreuses techniques utilisées pour renforcer les sols de mauvaise qualité. Le tableau I.1 dresse l'inventaire des méthodes permettant de réduire les tassements des remblais édifiés sur sols compressibles. La fiabilité, les contraintes et la rentabilité du Renforcement varient suivant la méthode utilisée.

**Tableau I.1:** Principales techniques de renforcement de sols (Jenck, 2005).

Technique	Données nécessaires	Contrainte	Fiabilité	Commentaires
Préchargement	Compressibilité Perméabilité	Temps nécessaire	Peu fiable pour obtenir de faibles déplacements	Lent Peu cher
Préchargement avec drains verticaux	Compressibilité Perméabilités verticales et horizontales	Plus rapide	Plus flexible	Rapide Relativement cher
Remplacement du sol	Epaisseur de la couche	Mise en dépôt du sol Nouveau matériau	Bonne en cas de remplacement total	Rapide Cher
Colonnes ballastées, colonnes de sable compacté	Résistance et déformabilité du sol	Equipements Plot expérimental	Bonne après analyse de plots expérimentaux	Cher Rapide
Dalle sur pieux	Résistance du sol		Bonne	Très cher
Electro-osmose et injection	Propriétés chimico-physiques Compressibilité Perméabilité	Destruction des électrodes Alimentation électrique	Incertaine	Très cher
Remblai léger	Compressibilité Perméabilité	Protection du matériau léger	Peu fiable pour obtenir de faibles déplacements	Cher
Remblai sur inclusions rigides	Résistance et déformabilité du sol		Bonne	Cher Rapide
Colonnes de jet grouting	Résistance et déformabilité du sol		Bonne	Cher Rapide

## I.6. Différents types de renforcement de sol :

### I.6.1. Colonnes ballastées :

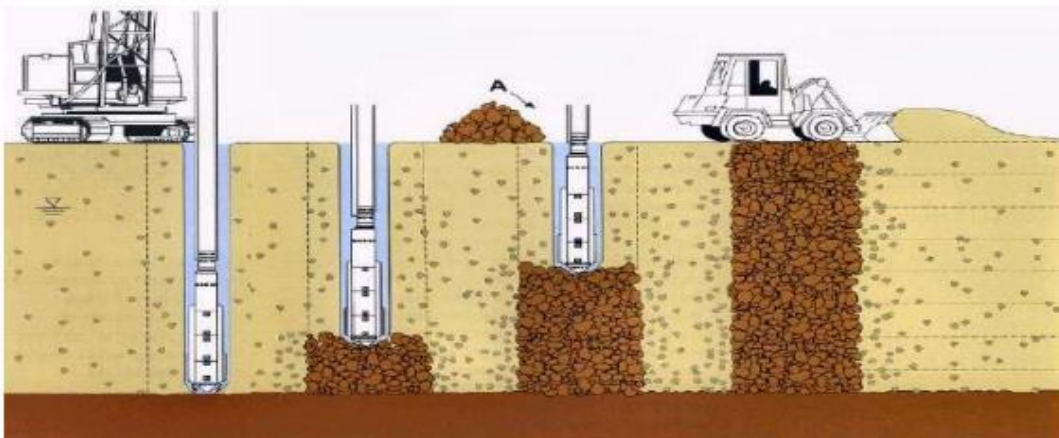
Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement du sol et compactés par passes successives. Ces colonnes ne comportent aucun liant sur toute leur profondeur. Elles peuvent être réalisées en maillages réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée. Leur dimensionnement tient compte du type d'ouvrage, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels ainsi que de la nature du sol à traiter.

Le procédé est adapté pour traiter les sols présentant des caractéristiques mécaniques faibles à très faibles (sables limoneux, argiles, limons, remblais hétérogènes...), mais il doit être exclu dans les sols présentant un caractère évolutif (matériaux organiques, tourbes...) dans lesquels l'étreinte latérale autour des colonnes n'est pas garantie à long terme. La réalisation des colonnes ballastées se fait suivant deux différentes techniques :

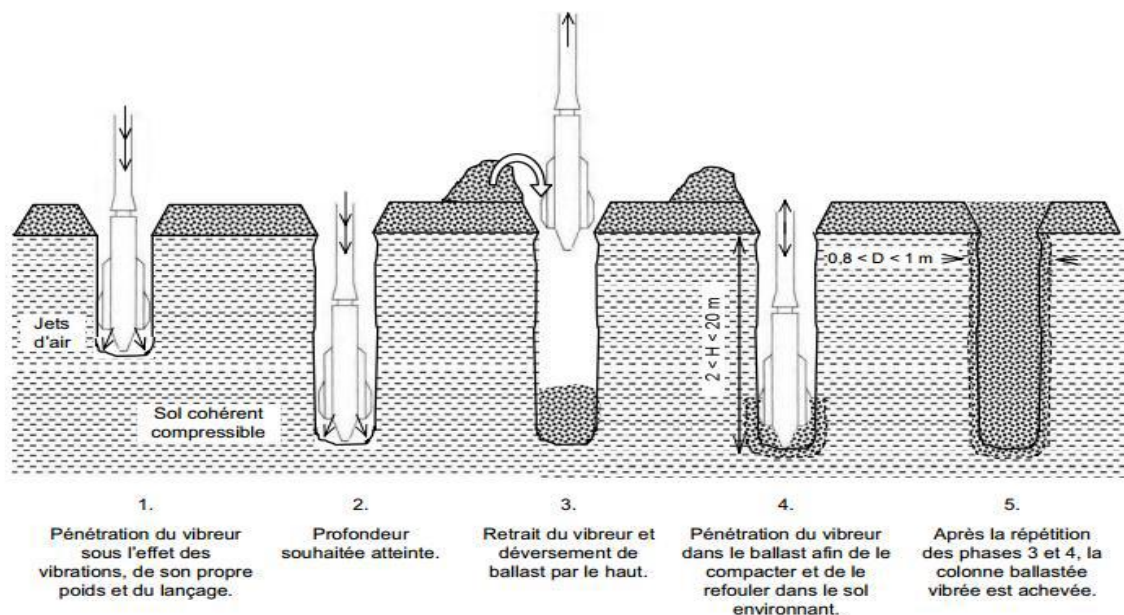
- **Par voie sèche** : On utilise le lançage à l'air (figure I.1).
- **Par voie humide** : On utilise le lançage à l'eau.

Le choix de l'outil et de la méthode de réalisation des colonnes dépend de la nature et de l'état de saturation du sol, des caractéristiques du matériau d'apport ainsi que du domaine d'utilisation du terrain renforcé. Les matériaux d'apport doivent donc être de qualité et de granulométrie contrôlée et doivent être les plus homogènes possibles (graves naturelles, roulées ou concassées).

Notons que la technique des colonnes ballastées est pénalisante en termes de moyens de surface. Elle nécessite un apport de matériaux de ballaste ainsi qu'un apport d'eau, ce qui génère parallèlement, une nécessité d'emprise suffisante pour l'atelier en surface.



**Figure I.1** : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide (Reiffsteck, 2010)



**Figure I.2** : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie sèche (Corneil, 2007)



### I.6.2. Jet-grouting :

Le traitement des sols par jet-grouting est une technique de renforcement de sol qui est née dans les années 50 au Royaume-Uni. La présence d'un substratum très profond rend l'ancrage des fondations difficile et coûteux. Il s'agit donc d'un procédé de mélange hydrodynamique permettant de former un béton de sol et d'ancrer les fondations dans la couche superficielle qui surplombe le substratum et qui a, en général, de moins bonnes caractéristiques mécaniques.

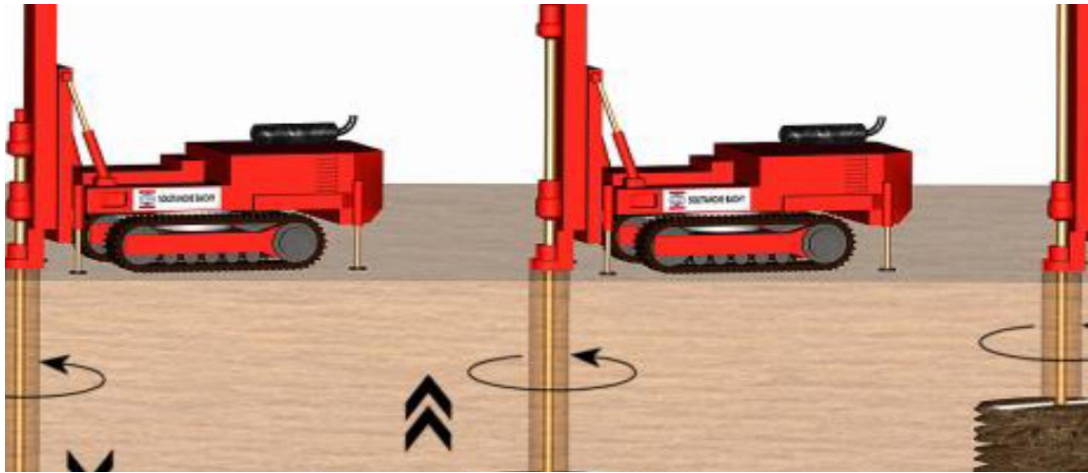
Afin d'appliquer la technique du jet grouting, il faut faire appel à trois phénomènes physiques :

- La déstructuration du terrain en profondeur en utilisant un jet rotatif à haute pression et à très grande vitesse dans le forage.
- L'extraction d'une partie du terrain vers la surface par des fluides de jetting.
- L'incorporation d'un liant apporté par le coulis permettant d'obtenir en profondeur une structure de renforcement ayant des caractéristiques mécaniques supérieures à celles du sol en place.

En premier lieu, il est nécessaire de réaliser un forage de 100 à 200 mm de diamètre sur la hauteur à traiter. Ce forage permet à l'outil d'injection (moniteur) d'arriver à la profondeur déterminée au préalable. La mise en rotation de l'outil vient en deuxième lieu en diffusant le coulis à une très haute pression (plusieurs dizaines de MPa). La remontée progressive du moniteur permet le traitement du sol sur la hauteur désirée en créant des colonnes de sol traité. Un excès du mélange sol-ciment doit nécessairement être évacué pendant la montée de l'outil afin d'éviter de créer un désordre au voisinage de la structure.

Le résultat final dépend de plusieurs paramètres reliés non seulement aux caractéristiques mécaniques du sol traité mais aussi du protocole du grouting, du dosage en ciment ainsi que du type de liant utilisé.





**Figure I.3** : Étapes de réalisation du renforcement de sol par jet grouting (Soletanche-Bachy).

### I.6.3. Inclusions rigides :

Cette technique est basée sur le principe de transmission de charge à travers des inclusions vers un horizon porteur et ceci afin d'améliorer la portance du sol de mauvaise qualité et de réduire les tassements excessifs.

Le principe de cette technique de renforcement est basé sur trois éléments principaux qui résument son fonctionnement (Figure I.4):

- Les inclusions rigides installées dans le sol compressible qui développent des efforts de frottement le long du fût de l'inclusion ainsi que des efforts en pointe. La possibilité de coiffer les inclusions par de petites barettes permet d'optimiser l'efficacité de cette technique.
- Le matelas de transfert de charge permettant d'assurer le mécanisme de répartition de charges et la transmission des efforts jusqu'aux têtes des inclusions.
- La nappe de géosynthétique permet d'augmenter les efforts pris en charge par les inclusions. Le tassement différentiel entre le sol du matelas granulaire et la tête des inclusions met cette nappe en tension, ce qui favorise l'efficacité des inclusions due au report de charge par effet membrane.

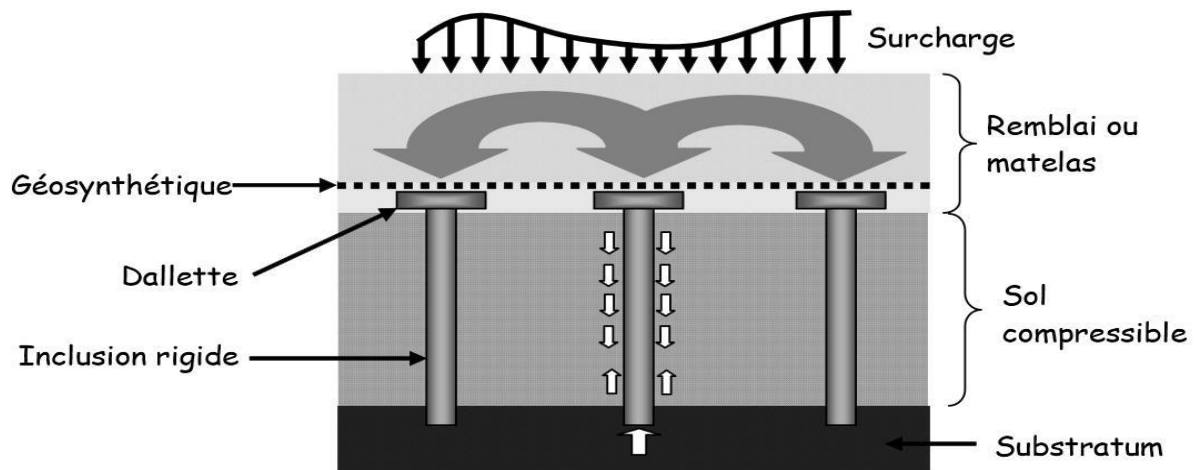


Figure I.4 : Schéma de principe de renforcement par inclusions rigides (Briançon, 2004)

#### I.6.4. Soil mixing :

Créée dans les pays scandinaves et au Japon pendant les années soixante, la technique de soil mixing est utilisée comme une méthode de traitement de sol permettant d'améliorer ses caractéristiques mécaniques et environnementales. Il s'agit de mélanger mécaniquement le sol sur place avec un liant hydraulique en utilisant un outil approprié (Probaha 1998).

Cette méthode de renforcement de sol présente de nombreux avantages qui font qu'elle est en plein essor depuis le début années 1990. En effet, cette technique ne nécessite pas d'avoir à gérer de déblais et de mise en décharge, ce qui la rend plus économique et écologique. De plus, cette technique est polyvalente, vu qu'elle peut être utilisée pour la stabilisation des pentes, la réalisation de parois étanches ainsi que le renforcement des terrains (Szymkiewicz, 2011).

#### I.6.5. Géosynthétiques :

##### - Définition :

Le nom "géosynthétique" désigne les nappes synthétiques utilisées en contact avec le sol. Mis en application depuis une vingtaine d'années dans le domaine du génie civil, les géosynthétiques sont principalement utilisés sous la forme de nappes pour assurer aussi bien un rôle de drain, de filtre, de séparation ou de renforcement. Ils permettent, lorsqu'ils sont incorporés dans la structure, de diminuer la quantité de matériaux utilisés, d'utiliser des matériaux de qualité limitée, d'empêcher l'interpénétration de deux couches, de renforcer en grande déformation un remblai sur sol mou.

### - Classification des géosynthétiques :

Les géosynthétiques peuvent être généralement classés en catégories selon le mode de fabrication. Les dénominations courantes et de brèves descriptions des géosynthétiques sont présentées ci-dessous.

- **Les géotextiles :** sont des nappes continues de fibres ou filaments tissés, non-tissés, tricotés ou thermo-soudés. Les nappes sont souples et perméables et ressemblent en général à des textiles. Les géotextiles sont utilisés pour des applications en séparation, filtration, drainage, renforcement et contrôle de l'érosion (figure I.5) (Bonbouza asma ; 2011)).



Figure I.5 : Les géotextiles.

- **Les géogrilles :** sont des géosynthétiques ressemblant à des grilles ouvertes. La principale application des géogrilles est le renforcement des sols. Une géogrille est une structure plane à base de polymère, constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entrelacement, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants et permettant le confinement du sol (Figure I.6 & I.7) (Bonbouza asma ; 2011).

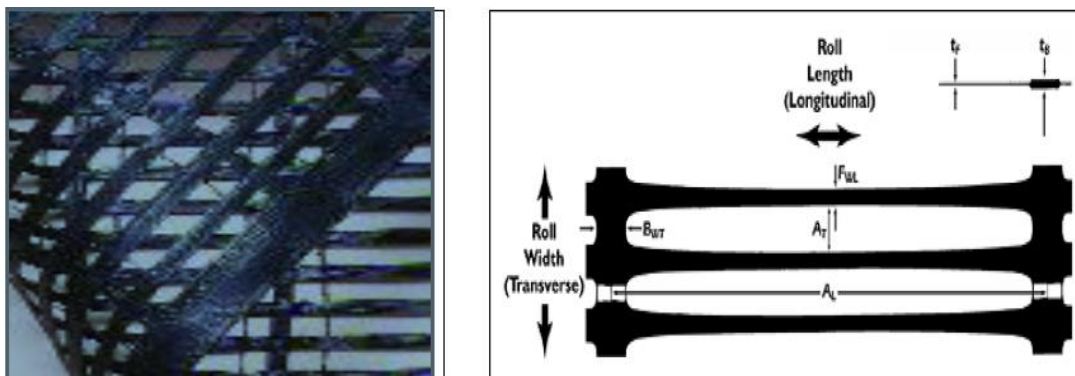


Figure I.6 : Géogrilles mono-axiales

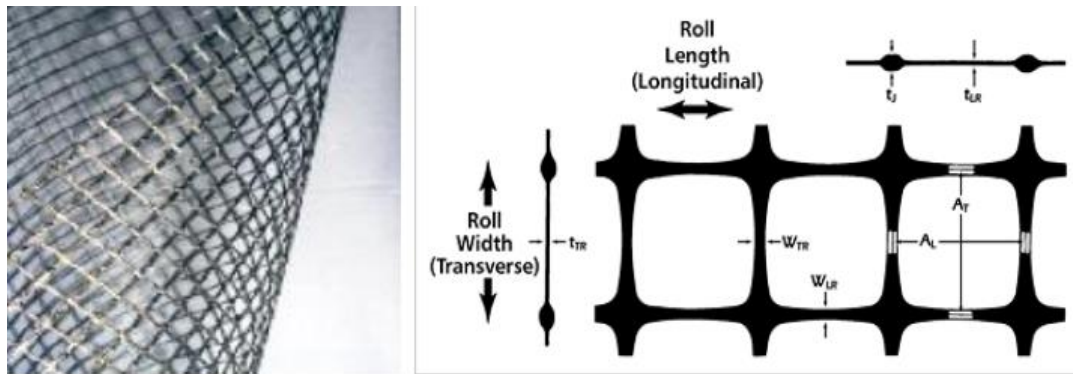


Figure I.7 : Géogrilles bi-axiales.

- **Les géofiles :** Sont des matériaux analogues aux grilles, constitués de deux ensembles de brins grossiers parallèles de polymères extrudés, s'entrecroisant selon un angle aigu constant. Le maillage forme une nappe ayant une porosité dans le plan qui est utilisée pour véhiculer des débits relativement importants de fluides ou de gaz.
- **Les géomembranes :** Sont des nappes souples continues fabriquées à partir d'un ou plusieurs matériaux synthétiques. Elles sont relativement imperméables et sont utilisées comme couche d'étanchéité pour le confinement des fluides ou des gaz et comme barrière à la vapeur.
- **Les géocomposites :** Sont des géosynthétiques fabriqués par association de deux ou plusieurs types de géosynthétiques. Ils incluent par exemple : géotextile-géofilet, géotextile-géogrille, géofilet-géomembrane.
- **Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) :** Sont des géocomposites préfabriqués avec une couche de bentonite incorporée de façon typique entre un géotextile supérieur et un géotextile inférieur ou collée à une géomembrane ou une couche unique de géotextile. Les géosynthétiques bentonitiques à base de géotextiles sont souvent cousus ou aiguilletés à travers le cœur de bentonite pour augmenter la résistance au cisaillement interne. Lorsqu'ils sont hydratés, ils sont efficaces comme barrière aux liquides et gaz et sont communément utilisés dans les étanchéités de décharges, souvent en association avec une géomembrane.
- **Les géotuyaux :** Sont des tuyaux perforés ou des tuyaux pleins en polymères utilisés pour le drainage des liquides ou gaz. Dans certains cas les tuyaux perforés sont entourés d'un filtre géotextile.

### I.6.6. La Terre Armée :

Cette technique consiste en l'association d'un matériau granulaire frottant et d'armatures linéaires flexibles de grande résistance à la traction. Le parement extérieur de l'ouvrage est relativement mince et souple; il est généralement constitué de panneaux en béton. Pour limiter la déformation de la structure on utilise des armatures en acier, relativement inextensibles vis-à-vis du sol de remblai et qui sont galvanisées pour empêcher la corrosion (Figure I.8).

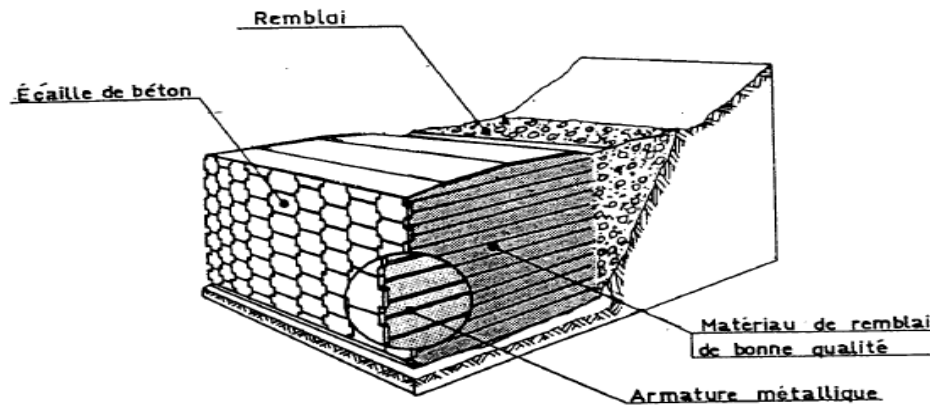


Figure I.8: Terre armée.

### I.6.7. Les micro-pieux :

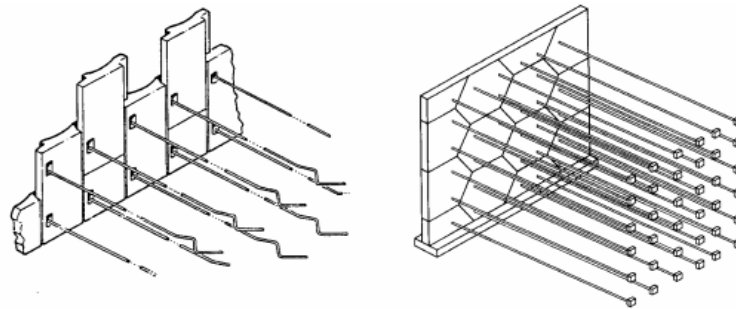
Cette technique consiste à mettre en place dans le sol de petits pieux injectés. Chaque pieu est constitué d'une barre ou d'un tube de quelques centimètres de diamètre entouré de coulis sur toute sa longueur. Le diamètre total est d'environ 10 à 15 cm. Cette technique est utilisée, principalement dans les sols de fondation, mais elle a aussi d'intéressantes applications pour la stabilisation des pentes, les ouvrages de soutènement et les reprises en sous-œuvre. Il s'agit d'inclusions plutôt rigides dans lesquelles les efforts mobilisés dépendent essentiellement de l'effet de structure du groupe de pieux. Les efforts principaux sont la traction et la compression.

### I.6.8. Le clouage :

C'est une technique de renforcement des sols in-situ à l'aide de barres passives, soit scellées dans des bous de forage, soit simplement battues dans le sol. Lorsque cette technique est utilisée pour des ouvrages de soutènement, les barres sont généralement horizontales et l'effort principal est la traction. Au contraire, quand cette technique est utilisée pour la stabilisation des pentes, les barres sont généralement verticales et les efforts principaux sont la flexion et le cisaillement.

### I.6.9. par ancrages :

Il s'agit de renforcer le sol par des barres métalliques au bout desquelles sont placés des blocs d'ancrage. Le renforcement est ainsi assuré par frottement ainsi que par contre butée. Les barres ont une section ronde pour réduire la surface soumise à la corrosion et sont liées au parement composé d'écailles en béton. La figure (I.9) montre le principe de renforcement par ancrages. (Didier fau ; 2010).



**Figure I.9 :** Renforcement par ancrages.

### I.6.10. Pneu usages :

Il convient de distinguer les pneus usagés (PU) et les pneus usagés non rechapé (PUNR). C'est ces derniers qui sont effectivement des déchets. En effet un pneu usagé et surtout celui du poids lourd, peut avoir une deuxième voir une troisième vie après rechapage. Des traces de vieillissement, peuvent apparaître sur les PUNR telles que l'usure de la bande de roulement, des craquelures ou des fissures. (Aoudai karima ; 2014).

### I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les caractéristiques de sol, ainsi que les différents problèmes rencontrés dans le sol (gonflement, liquéfaction et l'instabilité des pentes), ensuite nous avons fait une étude bibliographique détaillée sur les différentes techniques de renforcement de sol, qu'elles permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols. Chaque technique présente ses avantages et ses inconvénients en termes de portance, de nuisance sonore, de contrainte, de fiabilité et de coût.



## II.1. Introduction :

Le renforcement des sols même s'il est généralement invisible est la pierre angulaire de tout ouvrage construit sur un sol aux caractéristiques mécaniques médiocres. Les développements technologiques actuels en matière de renforcement des sols s'orientent vers des solutions techniques plus économes et plus respectueuses de l'environnement.

Dans les pays industrialisés, les éco-matériaux sous forme de fibres végétales offrent des perspectives intéressantes en raison de leur association de performances environnementales et techniques. Les fibres végétales représentent une alternative prometteuse aux matériaux synthétiques tels que les géotextiles. Dans ce cadre, leur utilisation dans le génie civil et en particulier dans le génie géotechnique est considérée comme une nouvelle technique pour résoudre les problèmes de renforcement des sols.

Ce chapitre consiste d'étudier le renforcement de sol par l'alfa (également connue sous le nom du Sparte), qu'elle retenue pour sa grande disponibilité en Algérie et sa compétitivité.

## II.2. Les fibres textiles :

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leurs origines : Naturelle ou Chimique. Ces deux catégories basiques peuvent encore être subdivisées en sous catégories. Ainsi, les fibres naturelles peuvent être d'origine végétale, animale ou minérale. Quant aux fibres chimiques, elles sont synthétiques ou artificielles selon l'origine du polymère utilisé, comme le montre la figure II.1.



Figure II.1. Classification générale des fibres textiles

**II.2.1. Les fibres naturelles :**

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leurs origines (Figure II.2) :

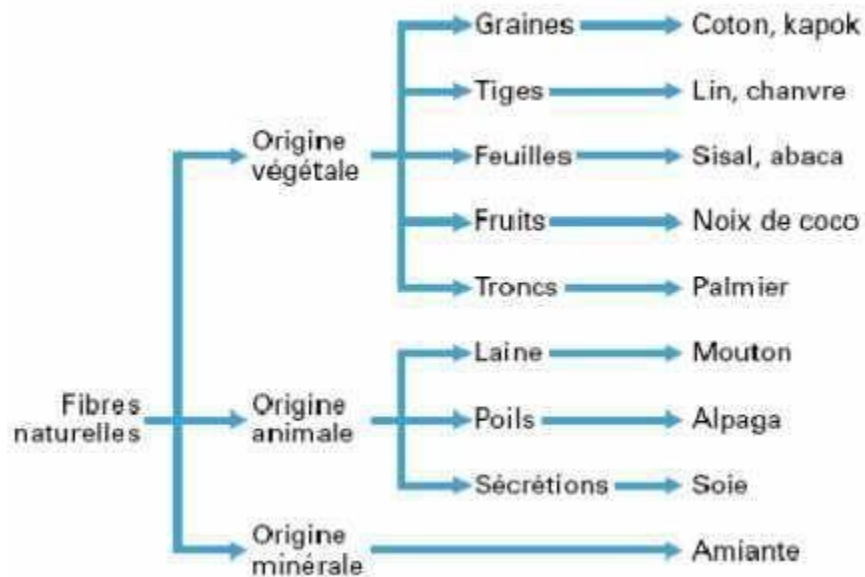


Figure II.2. Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013)

**II.2.1.1. Les fibres végétales :**

L'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la



valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO<sub>2</sub> et demandant peu d'énergie pour être produites.

### II.2.1.2. Les fibres animales :

La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant élevé (16-18%) et son élasticité importante (45%) (Feughelman, 1997) (Figure II.3). Les fibres animales sont classées selon leur provenance, on note essentiellement :

- Poils : la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, Cachemire,...
- Sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araigne



**Figure II.3.** Illustrations de quelques fibres animales, de gauche à droite: cocon de soie, fibres d'Angora et fibres d'Alpaga

### II.2.1.3. Les fibres minérales :

L'amiante est la seule fibre minérale naturelle. Elle a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérogènes qu'elle présente.

## **II.2.2. Les fibres chimiques :**

### **II.2.2.1. Fibres synthétiques :**

Sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances ou de composés fournis par l'industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 20<sup>ème</sup> siècle, après la réussite de la fibre de Viscose, depuis lors, un grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point; elles possèdent chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d'application. Ces fibres, tout comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage.

### **II.2.2.2. Fibres artificielles :**

Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction.

## **II.3. Les fibres végétales :**

### **II.3.1. Introduction :**

Le début de XXI<sup>ème</sup> siècle a marqué le retour des industries - européennes - aux fibres végétales. Avec l'intérêt croissant à l'environnement et l'encouragement des gouvernements et des institutions à l'investissement durable, la tendance est de s'orienter vers ce type de fibres écologiques et fonctionnelles. Ce retour est d'autant plus important, que les ressources pétrolières sont de plus en plus rares et coûteuses.

### **II.3.2. Classification des fibres végétales :**

Nous pouvons subdiviser les fibres végétales en 5 groupes selon leur origine (Figure II.4). Les fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok), les fibres libériennes extraites de liber de plantes (lin, chanvre, jute, ramie), les fibres extraites de feuilles (sisal, abaca), d'enveloppes de fruits (noix de coco) ou les fibres dures extraites des tiges de plantes.

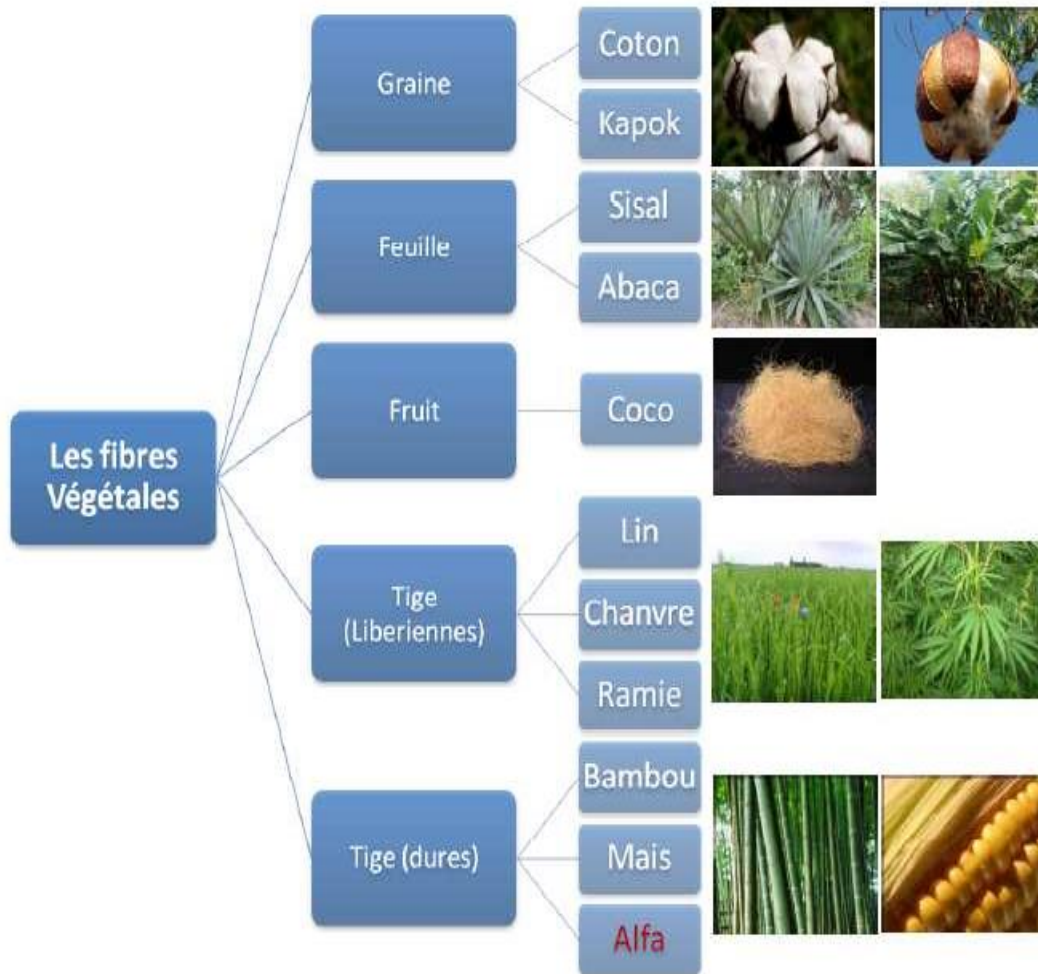


Figure II.4. Classification des fibres végétales selon l'origine

### II.3.3. Le processus d'extraction des fibres végétales :

Pour obtenir différentes fractions végétales à partir de paille, le processus d'extraction dit « classique » ou générique est composé de trois étapes bien distinctes (Figure II.5):

- ✓ La décortication : consiste, par une opération mécanique exercée sur la tige entière, à désolidariser la matière ligneuse (ou moelle) de la fibre libérienne.
- ✓ La séparation : consiste à séparer les différentes fractions végétales obtenues.
- ✓ L'affinage : se focalise sur les faisceaux afin de réduire le nombre de fibres unitaires par faisceau jusqu'à éventuellement l'obtention de élémentaires.

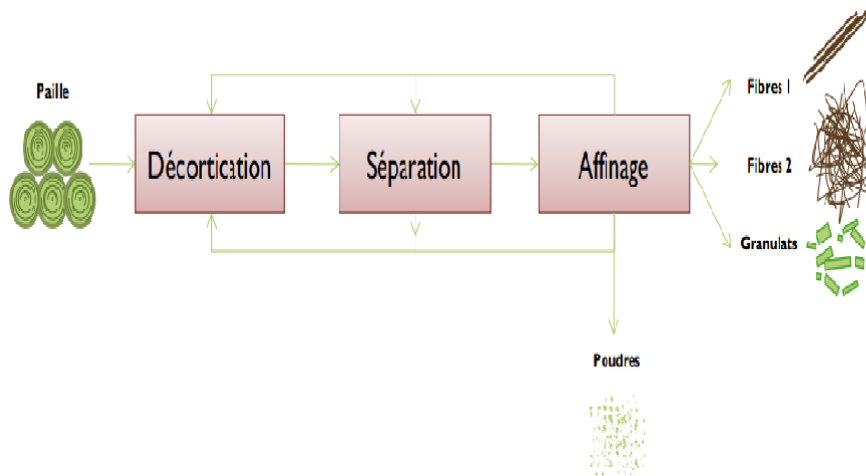


Figure II.5. Processus générique d'extraction des fibres végétales.

**II.3.4. Les avantages et les inconvénients des différentes fibres végétales :**

Le tableau II montre les avantages et les inconvénients des différentes fibres végétales utilisées dans le renforcement de sols :

**Tableau II .1.** Les avantages et les inconvénients des différentes fibres végétales

Les avantages :	Les inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leur biodégradabilité</li> <li>- Leur faible densité (allégement)</li> <li>- Leur renouvelabilité</li> <li>- Leurs bonnes propriétés mécaniques spécifiques (rapportées à leur densité et à leur section)</li> <li>- Leurs bonnes propriétés d'isolation acoustique et d'inertie thermique</li> <li>- L'absence de résidus après incinération</li> <li>- Un bilan carbone faible</li> <li>- Une hydrophilie (propriétés d'absorption/désorption d'eau)</li> <li>- Un faible comportement abrasif</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une faible stabilité dimensionnelle</li> <li>- Une faible tenue thermique (dégradation à 200° - 230°C)</li> <li>- Une variabilité de propriétés assez importante selon l'âge, le lieu de croissance, le climat, la direction (anisotropie) et même d'une fibre à une autre appartenant au même lot</li> <li>- Pour certaines applications, l'hydrophilie et la biodegradabilité peuvent être des freins</li> <li>- Une dépendance de la récolte (point de vue qualitatif et quantitatif)</li> </ul>

## II.4. La fibre d’Alfa :

### II.4.1. Présentation générale :

L’Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d’environ 1m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes. Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l’Alfa s’arrête, le désert commence (Figure II.6).

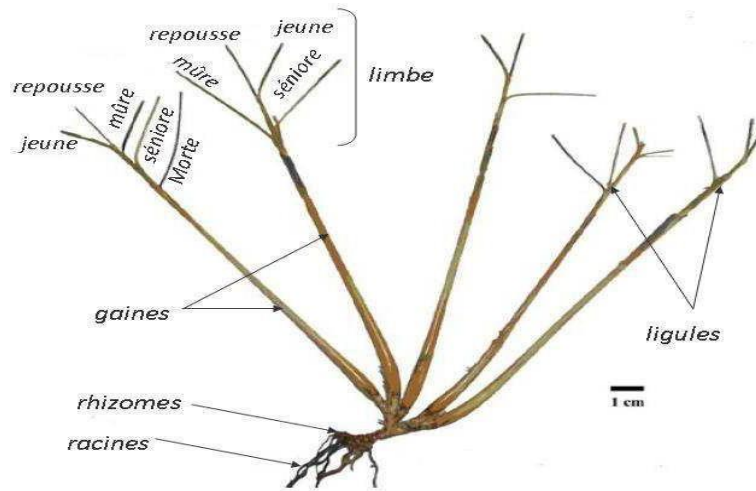


Figure II.6. Plante d’alfa.

### II.4.2. Propriétés des fibres d’alfa :

Le tableau II.2 montre les propriétés physiques de la fibre d’Alfa par rapport aux différentes fibres végétales :

Tableau II.2. Propriétés physiques de la fibre d’Alfa par rapport aux différentes fibres végétales

Fibres	Cellulose (%)	Angle microfibrillaire (°)	Diamètre (µm)	Longueur (mm)	Rapport L/d
Coton	85 - 90	33	19	35	1842
Lin	71	10	5 - 76	4 - 77	1687
Chanvre	70 - 74	6.2	10 - 51	5 - 55	960
Jute	61.1 - 71.5	8	25 - 200	9 - 70	110

<b>Ramie</b>	68.6 - 76.2	7.5	16 - 126	40 - 250	3500
<b>Sisal</b>	66 - 78	20	7 - 47	0.8 - 8	100
<b>Coco</b>	32 - 43	45	12 - 24	0.3 - 1	35
<b>Alfa</b>	45	-	5 - 95	5 - 50	1964

Le tableau II.3 montre les Propriétés mécaniques en traction de la fibre d'Alfa par rapport aux différentes fibres végétales.

**Tableau II.3.** Propriétés mécaniques en traction de la fibre d'Alfa par rapport aux différentes fibres végétales

<b>Fibres</b>	<b>E (GPa)</b>	<b>Allongement (%)</b>	<b>Contrainte (MPa)</b>	<b>Densité</b>
<b>Coton</b>	5.5 - 12.6	7 - 8	287 - 597	1.5 - 1.6
<b>Lin</b>	58	3.27	1339	1.53
<b>Chanvre</b>	35	1.6	389	1.07
<b>Jute</b>	26.5	1.5 - 1.8	393 - 773	1.44
<b>Ramie</b>	61.4 - 128	1.2 - 3.8	400 - 938	1.56
<b>Sisal</b>	9 - 21	3 - 7	350 - 700	1.45
<b>Coco</b>	4 - 6	15 - 40	131 - 175	1.15
<b>Alfa</b>	12.7	1.6	75 - 154	1.51

#### II.4.3. Répartition géographique :

L'alfa est trouvé dans les milieux arides méditerranéens à l'exclusion des secteurs désertiques. Sa terre d'élection est l'Afrique du Nord, et tout particulièrement les hauts plateaux du Maroc et de l'Algérie. Mais cette espèce est présente aussi en Espagne, au Portugal, aux Baléares, et elle s'étend vers l'Est jusqu'en Égypte en passant par la

Tunisie et la Libye. Au sud et à l'est, la limite naturelle de l'Alfa est déterminée par la sécheresse en bordure du Sahara. En revanche, au nord et à l'Ouest, c'est l'humidité croissante du climat qui l'élimine de la flore, elle est beaucoup plus rare dans les étages subhumide et surtout humide. La répartition territoriale connue à ce jour est estimée dans le tableau II.4 :

**Tableau II.4.** La répartition territoriale de la fibre d'alfa dans quelques pays.

Pays	Superficie (ha)
Algérie	4.000.000
Maroc	3.186.000
Tunisie	600.000
Espagne	300.000

#### II.4.4. La récolte de l'Alfa

L'Alfa se récolte après la maturation des graines, c'est-à-dire, à partir de juillet-août. La récolte commence par l'enlèvement des feuilles uniquement à la main, par arrachage, suivant la pratique adoptée depuis toujours, soit en enroulant les feuilles autour d'un bâton court, soit en se garnissant la main d'une tige de métal. Le javeleur saisit une poignée d'Alfa, l'enroule autour d'une tige métallique pour assurer sa prise et tire brusquement.

Avec son pied il retient les racines pour les empêcher d'être arrachées en même temps que les feuilles. Celles-ci sont liées en petites balles avec une tresse d'Alfa. Puis ces petites balles sont pressées pour constituer les grosses balles qui seront envoyées au centre de collecte. Ensuite, l'Alfa pesée sera stockée dans ces centres avant d'être transférée à l'usine, pour en extraire la pâte à papier en particulier (Figure II.7).

Aujourd'hui, il serait possible de mécaniser la récolte d'alfa, cependant, la voie de la mécanisation n'a pas été suivie, car d'un côté, la récolte manuelle fournit un revenu à quelques milliers de cueilleurs, et d'autre part, comme c'est une activité saisonnière, cela ne serait pas économiquement rentable, en plus de la difficulté d'accès et la topographie particulière des nappes alfatières.





**Figure II.7.** Les différentes méthodes de récolte d'alfa.

## II. 5. Les différentes recherches réalisées sur sable/fibre :

Le renforcement des sols avec des fibres est une technologie d'amélioration des sols qui n'a pas été pleinement utilisée dans la pratique de l'ingénierie. L'intérêt pour le renforcement des fibres dans les sols a commencé dans les années 1970 avec une tentative d'estimer l'influence des racines des plantes et des arbres sur la stabilité des pentes de la terre (Waldron, 1977)

Cependant, le sol renforcé par des fibres naturelles a souvent été étudié expérimentalement et théoriquement dans la littérature, par exemple (Consoli et al., 1998, Prabakar et Sridhar, 2002, Consoli et al., 2002, Consoli et al., 2003a, Michalowski and Cermak, 2003, Mofiz et al., 2004, Latha and Murthy, 2007, Michalowski, 2008, Consoli et al., 2009a, Consoli et al., 2010, Dos Santos et al., 2010a) .

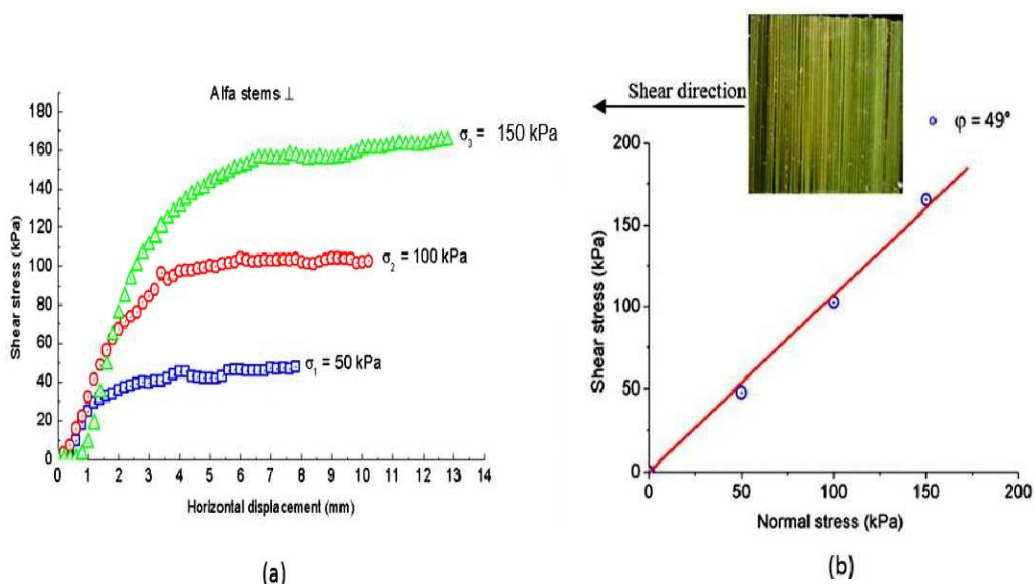
Swami, (2005) a indiqué qu'il y a une limite maximale de teneur en fibres (habituellement 0.25% à 1%) dans le sol au-delà duquel le mélange de fibres dans le sol devient très difficile. Les études de laboratoire sur le sol renforcé par des fibres ont été réalisées principalement à l'aide des essais suivants:

- ✓ Essai triaxial: (Gray et Alrefeai, 1986, Maher et Gray, 1990, Maher and Ho, 1993, Michalowski et Zhao, 1996, Consoli et al., 1998, Consoli et al., 2004, Consoli et al., 2005a, Consoli Et al., 2009c, Consoli et al., 2010, Dos Santos et al., 2010a).
- ✓ Essai de compression non confiné: (Frietag, 1986, Maher et Ho, 1994, Santoni et al., 2002, Kumar et Tabor, 2003).



- ✓ Essai de cisaillement direct: (Gray et Ohashi, 1983, Fatani et al., 1991, Bauer et Fatani, 1991, Ibraim et Fourmont, 2006).
- ✓ Essai de traction: (Setty et Rao, 1987, Ranjan et al., 1996, Consoli, 2002 etc.
- ✓ Essai de flexion: Maher et Ho (1994).

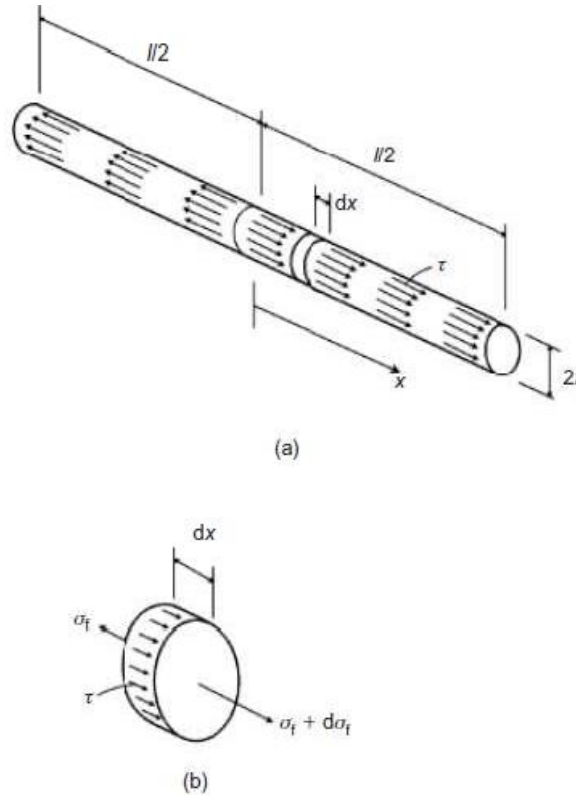
Khalifi Z., et al., 2016, ont étudié le comportement du sol renforcé par l'alfa à l'aide de l'essai de boîte de cisaillement directe ; l'alfa a été placé dans le plan de cisaillement selon trois orientations différentes ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$ ) par rapport à la direction de la force de cisaillement. Les angles de frottement mesurés sont relativement élevés malgré la surface apparemment lisse des fibres naturelles, ce qui favorise leur utilisation dans le renforcement du sol, en particulier dans la stabilité de la pente.



**Figure II.8 :** Courbes de cisaillement et intrinsèque (a et b) dans le plan perpendiculaire de l'axe de cisaillement.

Des estimations efficaces et assez précises de la contribution des fibres à la résistance du sol ont été faites pour les sols renforcés isotropes où les fibres étaient supposées être réparties uniformément dans toutes les directions (Michalowski & Zhao, 1996; Michalowski & Cermak, 2003). Cependant, en raison de la technologie de dépôt de sols renforcés par des fibres (mélange in situ, laminage, compactage), l'orientation des fibres a clairement un plan d'interaction préféré, donnant lieu à une amélioration des propriétés mécaniques du mélange (sol/fibre).

Les fibres se déforment lors de la déformation plastique du matériau de la matrice (sol-fibre), induisant une contrainte axiale  $\sigma_f$  dans les fibres. La figure II.8 montre l'état d'équilibre d'un élément infinitésimal.



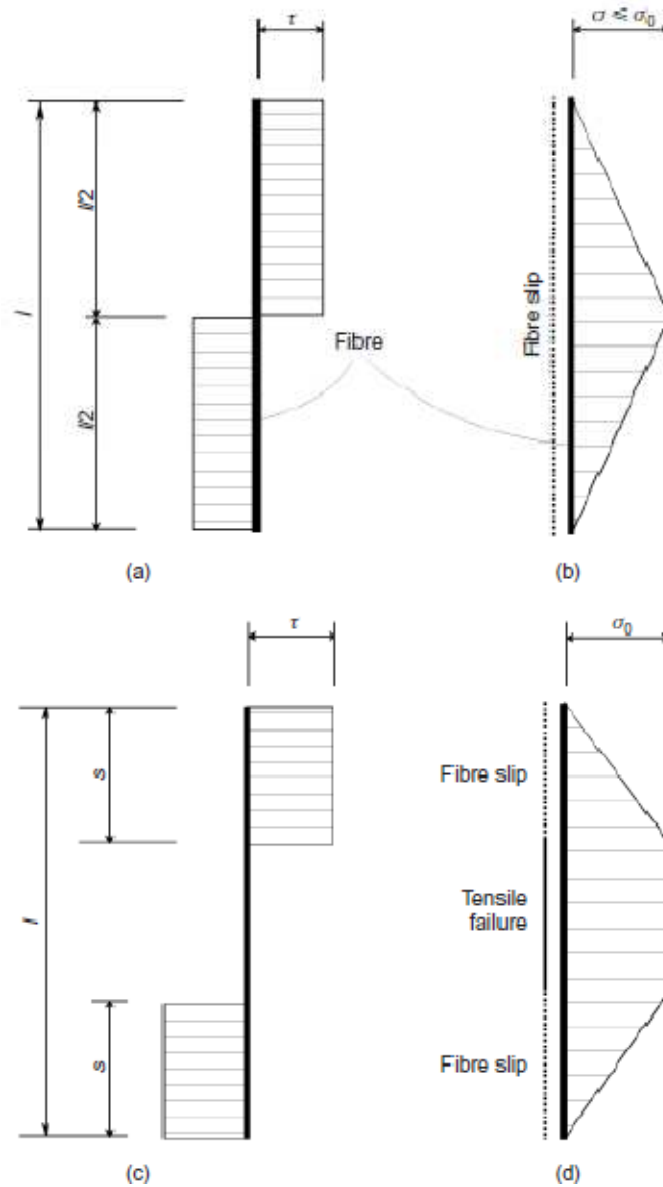
**Figure II.9 :** (a) Effort de cisaillement sur la surface de la fibre; (b) un élément infinitésimal

Si on prend  $\sigma_f = 0$  pour  $x = l/2$ , donc on détermine la contrainte axiale à l'intervalle  $0 \leq x \leq l/2$ , par l'équation suivante :

$$\sigma_f = \frac{2}{r} \frac{c}{2} (S - x) \dots \dots \dots (1)$$

Avec «  $r$  » étant le rayon de la fibre et «  $l$  » étant sa longueur. Cette distribution est illustrée sur la figure II.9 (b) et la répartition de la contrainte de cisaillement sur la surface de la fibre est représentée sur la figure II.9 (a). Cependant, si la contrainte de confinement est suffisamment importante (conduisant à une forte contrainte de cisaillement sur la surface de la fibre), la contrainte axiale dans l'équation (1) peut atteindre la limite de plasticité du matériau fibreux à  $0 \leq x \leq l/2$ , auquel cas la fibre va se déformer plastiquement dans sa partie médiane, en cohérence avec la déformation de la matrice (sol-fibre). Par conséquent, aucun glissement ne se produira

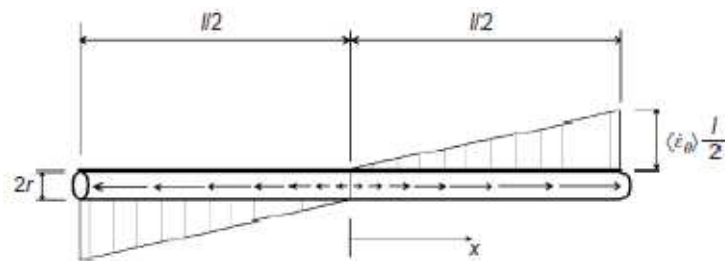
sur la section médiane de la fibre, comme indiqué sur la figure II.9 (c), et la contrainte de la fibre axiale restera constante dans cette partie (Figure II.9 (d)).



**Figure II.10 :** (a) Répartition idéale des contraintes de cisaillement sur la surface d'une fibre glissant dans une matrice déformante; (b) la contrainte axiale dans une fibre pendant le cisaillement pur ; (c) contrainte de cisaillement idéalisée sur une fibre défailante en traction; (d) contrainte axiale.

La distribution de la déformation le long d'une seule fibre rigide incorporée dans la matrice « sol-fibre » soumise à une traction uniforme est indiquée sur la figure II.10, avec le maximum aux deux extrémités, et avec le point médian de la fibre se déplace avec la même déformation que la matrice sol –fibre (déformation nulle).

L'orientation des fibres influe directement sur les déformations internes et une telle distribution de déformation garantit le taux de travail interne minimum.



**Figure II.11** : Répartition de déformation le long d'une seule fibre incorporée dans une matrice déformante.

## II.6. Conclusion :

Ce chapitre présente les différents types des fibres employées dans le domaine du renforcement des sols ; ensuite nous avons fait une étude bibliographique approfondie sur l'Alfa qui a été utilisé comme matériau de renforcement dans notre travail.

Selon les recherches effectuées dans ce domaine ; les sols renforcés par ces fibres sont des sols complexes (selon : la direction, longueur et le pourcentage des fibres ajoutées) qu'il convient de disposer d'un arsenal important d'outils et d'instruments de mesure pour analyser leurs comportement.



tements.

### III.1. Introduction :

Identifier un sol, c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques et chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés « essais d'identification ».

Ce chapitre, consiste à déterminer les paramètres physiques et mécaniques de notre sol étudié, dans le but de faciliter sa classification selon les différentes méthodes de classification.

### III.2. Le sol étudié

Le terrain de prélèvement des échantillons de sol se situe dans la zone dite « Sidi Abdelaziz » à la wilaya de Jijel, il s'agit d'un terrain plat, ayant une topographie régulière (figure III.1).



Figure III.1 : L'endroit du sol étudié.

## III.3. LES ESSAIS D'IDENTIFICATION

### III.3.1. La teneur en eau de sol (NF P 94-050)

#### III.3.1.1. Introduction :

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau « W » contenu par unité de poids de matériau sec.

**III.3.1.2. Principe de la méthode :**

L'essai consiste à déterminer la masse  $W_w$  de l'eau contenue dans un échantillon de sol en pesant le matériau en état, puis après l'avoir séché pour éliminer toute l'eau. On obtient alors  $W_s$ , la masse des grains solides (la masse de l'air étant supposé nulle). Le séchage se fait par la mise à l'étuve ou au four à micro-onde.

**III.3.1.3. Appareillage utilisée :**

- Une balance électrique de précision ;
- Une étuve électrique ;
- Des tares ;
- Cuillères ou louche de laboratoire.

**III.3.1.4. Mode opératoire :**

Peser le matériau dans l'état dans lequel il se trouve, c'est-à-dire humide : soit  $M_h$  ; Le sécher (étuve 105°C / 24h) ; Le peser sec, soit  $M_d$ .



**Figure III.2 :** Séchage du matériau.

**III.3.1.5. Résultats obtenus :**

La teneur en eau s'exprime en pourcentage (%) :

$$W(\%) = \frac{M_w}{M_d}$$

Où:

- $M_w$  : est la masse d'eau ;
- $M_d$ : est la masse de matériau sec.



Tableau III.1 : La teneur en eau

N° de la tare	Mt (g)	M <sub>h</sub> (g)	M <sub>d</sub> (g)	W(%)	W <sub>moyenne</sub> (%)
10	18	56	48	26.67	25.85
06	18	57	49	25.81	
08	18	52	45	25.93	
124	18	58	50	25	

D'après le tableau III.1, la teneur en eau de sol étudié égal 25.85 %.donc, le sol étudié est humide.

### III.3.2. Détermination de la masse volumique :

#### III.3.2.1. Introduction :

La masse volumique des grains solides est un paramètre de nature du sol, indique le caractère intrinsèque du sol. Il ne varie pas au cours du temps et utilisé pour connaître les paramètres d'état du sol (teneur en eau, indice des vides, porosité, équivalent de sable). La masse volumique s'exprime en  $t/m^3$ , en  $kg/dm^3$ , ou en  $g/cm^3$ .

#### III.3.2.2. Mesure de la masse volumique des sols au laboratoire :

Il existe trois méthodes généralement employées pour déterminer la masse volumique :

- Méthode de l'éprouvette graduée;
- Méthode au pycnomètre;
- Méthode par pesée hydrostatique.

On utilise la **Méthode de l'éprouvette graduée** : Cette méthode est très simple et très rapide. Elle utilise du matériel très courant de laboratoire. Toutefois sa précision est faible.

#### III.3.2.3. Appareillage utilisé :

- Un échantillon
- Éprouvette graduée rempli d'eau (Figure III.2).
- Une balance électrique.
- Une étuve électrique.

**III.3.2.4. Mode opératoire :**

Mettre dans une éprouvette graduée un volume d'eau  $V_1 = 1200$  ml ; Peser une masse de l'échantillon  $M = 400$  g ; Verser l'échantillon dans l'éprouvette remplie d'eau, éliminer aussi bien que possible les bulles d'air ; Relever le nouveau volume  $V_2$ .



**Figure III.3 :** Essai de l'éprouvette graduée.

La lecture des niveaux  $V_1$  et  $V_2$  doit se faire en bas du ménisque formé par l'eau. En effet, celle-ci a tendance à remonter sur les bords de l'éprouvette sur une hauteur de 1 à 2 mm, ce qui fausse bien sûr la lecture des volumes si la lecture est effectuée en haut du ménisque.

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

**III.3.2.7. Résultats obtenus :**

Le tableau III.2 donne les résultats du poids volumique en KN/m<sup>3</sup>:

**Le tableau III.2 :** Les résultats de la masse volumique sèche en g/cm<sup>3</sup>.

N°	Volume d'eau (ml)	Volume total (ml)	Masse volumique (KN/m <sup>3</sup> )
1	1200	1350	24.4
2	1200	1380	

### III.3.3. Équivalent de sable (NF P 18-598)

#### III.3.3.1. Définition :

Cet essai permet de mettre en évidence de matières très fines ou d'éléments argileux dans les sols ou agrégats fins. Pour un béton, ces fines risquent d'inhiber l'hydratation du liant et gênent l'adhérence avec les granulats.

#### III.3.3.2. Principe :

Dans le cas des sables, le degré de propreté est fourni par un essai appelé équivalent de sable désigné par symbole (E.S) qui consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage.

#### III.3.3.3. Appareillage :

- Eprouvettes cylindriques et transparentes en matières plastique, avec 2 traits repères ( $\Phi_{\text{int}} = 32 \text{ mm}$  ;  $h = 430 \text{ mm}$ ) ;
- Entonnoir;
- Tamis a fraction de 0/5 mm;
- Spatule;
- Balance électrique de précision;
- Chronomètre;
- Recipients;
- Machine agitatrice électrique ou manuelle capable d'imprimer à l'éprouvette un mouvement horizontal, rectiligne et sinusoïdal de 20 cm d'amplitude (90 allers et retours en 30 secondes) (Figure III.4) ;
- Règle de mesure;
- Piston taré comporte 3 vis format des butées (masse 1 kg) ;
- Solution lavante destiné à séparer les grains les uns des autres ;
- Tube laveur métallique plongeant.



**Figure III.4 :** Machine agitatrice manuelle.

#### III.3.3.4. Mode opératoire :

La solution lavante ayant été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère inférieur, la prise d'essai humide, correspondant à une masse sèche de  $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$  de matériau, est versée soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement.

Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour éliminer les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.

Laisser reposer dix minutes.

À la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation. Faire subir à l'éprouvette  $90 \text{ cycles} \pm 1 \text{ cycle}$  en  $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ . Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essai. Ôter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante. En descendant le tube laveur dans l'éprouvette, rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.

Faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale. Procéder de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, relever le tube laveur de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère. Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

Laisser reposer pendant 20 min  $\pm$  10 s en évitant toute vibration. Au bout de ces 20 min ; Mesurer à l'aide du réglet la hauteur  $h_1$  du niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette.

Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette.

Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le réglet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.

Lire la hauteur du sédiment  $h_2$  au niveau de la face supérieure du manchon. Arrondir les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  au millimètre le plus proche.

### III.3.3.5. Formules :

On en déduit l'équivalent de sable par piston qui, par convention est :

$$ESP = \left( \frac{h_2'}{h_1} \right) \times 100$$

D'où :

- $h_1$ : hauteur de sable propre+ hauteur des imputées (éléments fins) ;
- $h_2$  : hauteur de sable propre ;
- $h_2'$  : hauteur de sable propre par piston.

### III.3.3.6. Les résultats obtenus :

Le tableau III.3 présente les lectures pour calculer l'équivalent de sable par piston

**Tableau III.3 :** Lectures pour calculer l'équivalent de sable par piston.

	$h_1$ (cm)	$h_2'$ (cm)	Esp (%)	Esp (moyenne) (%)
Essai 01	23.9	3.5	14.64	34
Essai 02	24	3.7	15.4	
Essai 03	23	2.9	12.61	

D'après les résultats obtenus, le sol étudié contient des fines **ES= 34%**.

### III.3.4 : Les limites d'Atterberg (NF P 94-051):

#### III.3.4.1. Introduction :

Le comportement d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de sa teneur en eau en quatre états différents (état liquide, plastique, solide avec retrait et sans retrait).

L'intérêt de calculer les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) est de prévoir le comportement des sols fins pendant les phases de terrassement et / ou lorsqu'ils sont sollicités mécaniquement (contrainte admissible, module d'élasticité) et de prévoir aussi la consistance du sol .

#### III.3.4.2. Définition :

- **La limite de liquidité  $W_L$  ou  $L_L$**  (teneur en eau pondérale) sépare l'état liquide de l'état plastique;
- **La limite de plasticité  $W_p$  ou  $L_p$**  (teneur en eau pondérale) sépare l'état plastique de l'état solide ;
- **La limite de retrait  $W_r$  ou  $L_r$**  est la teneur en eau pondérale au-dessous de laquelle le volume de l'échantillon ne varie plus (Figure III.5)

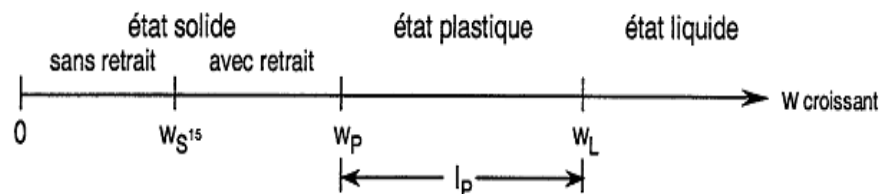


Figure III.5 : Les phases et les limites d'Atterberg.

#### III.3.4.3. Principe de détermination des limites d'Atterberg :

L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu soumis à des chocs répétés
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure.

#### III.3.4.4. Préparation de l'échantillon :

L'essai se faire sur la fraction du matériau appelée (mortier) qui passe au tamis de 0.40 mm, une quantité suffisante de matériau devant être tamisée pour obtenir 150 à 250 g de mortier. Avant le tamisage, le matériau doit être imbibé au moins 12 h, le tamisage s'effectue par voie humide, manuellement en remuant le matériau sur la toile du tamis à l'aide d'un pinceau souple, le refus devra être parfaitement propre. Après décantation de l'eau de lavage, on siphonne l'eau et on met le matériau à sécher.

#### III.3.4.5. Détermination de la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande :

##### III.3.4.5.a. Matériel utilisé :

- Appareil de Casagrande
- Outil à rainurer
- Divers : étuve, balance électrique, spatule, pissette et chronomètre indiquant la seconde.

##### III.3.4.5.b. Mis en place de l'échantillon :

Répartir la pate à la spatule, de façon homogène, dans la coupelle. La pate recouvre le fond de la coupelle sauf sur une partie d'environ 3 cm. Épaisseur au centre 15 à 20 mm, pourtour sensiblement horizontal (figure II.6).

Faire une rainure dans l'axe de la coupelle en tenant l'outil sensiblement perpendiculaire à cette coupelle. Tourner la manivelle 2 chocs par seconde. Compter le nombre de chocs **N** tout en observant le fond de la rainure. Arrêter lorsque les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur de 1 cm environ.

Si le nombre de chocs est inférieur à 15, laissé sécher l'échantillon puis recommencer l'essai ; Si le nombre est supérieur à 35, ajouter un peu d'eau (bien mélanger), puis recommencer l'essai ; Si  $15 \leq N \leq 35$ , prélever à l'aide de la spatule un peu de pate de chaque côté des lèvres de la rainure, et déterminer la teneur en eau **W**.

Par définition, la limite de liquidité  $W_L$  est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de **1 cm** pour un nombre de chocs **N égal à 25**



**Figure III.6** : Essai de la limite de liquidité (l'appareille de Casa grande).

#### III.3.4.6. Limite de plasticité $W_P$ du rouleau :

La limite de plasticité se mesure après celle de la limite de liquidité WL, il faut donc laisser l'échantillon sécher un peu plus. Faire une boulette de pate et la transformer en un cylindre on le roule (en le roulent) sur une surface plane propre, lisse, sèche et non absorbante (à la main ou à l'aide d'une plaque plane, un aller et retour par seconde).

Par définition, la limite de plasticité  $W_P$  est la teneur en eau du rouleau qui se fissure au moment ou son diamètre atteint  $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ . Le rouleau terminé doit avoir 10 cm à 15 cm de longueur et ne doit pas être creux. La limite de plasticité est atteinte lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint  $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ .

Si aucune fissure n'apparait, le rouleau est réintégré à la boulette. La pate est malaxée et légèrement séchée. Si la limite de plasticité atteinte, déterminer la teneur en eau du rouleau.. Faire un minimum de 2 essais et, si les valeurs s'écartent de plus de 2 % de la valeur moyenne, refaire un essai



**Figure III.7** : Détermination de la limite de plasticité.



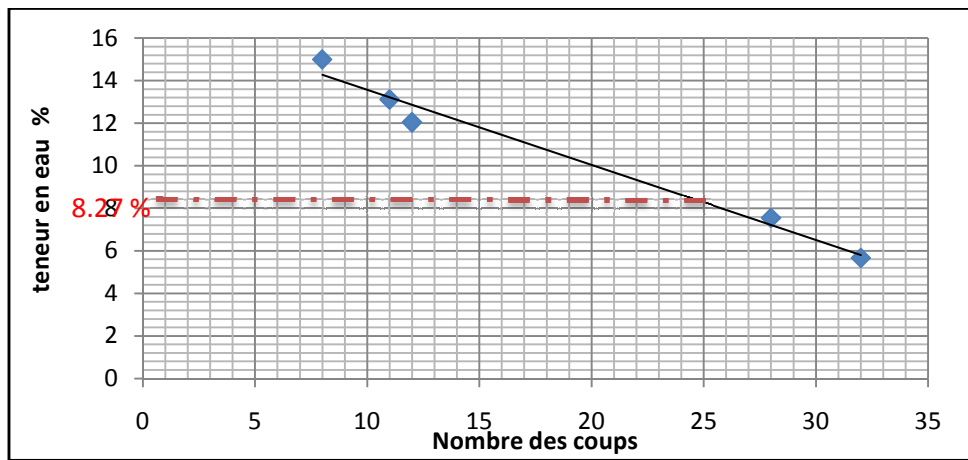
**III.3.4.7. Résultats obtenus :**

Le tableau III.4 : présente les lectures pour calculer la limite de liquidité

**Tableau III.4 :** Résultat de l'essai limite de liquidité

<b>Nombre de coups</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>28</b>	<b>32</b>
<b>Limite liquidité (%)</b>	15,00	13,12	12,05	7,56	5,684
<b>Moyenne (%)</b>	<b>8,27</b>				

D'après le tableau III.4 on peut tracer la courbe suivante (Figure III.8):



**Figure III.8:** La courbe de la limite de liquidité.

D'après la figure III.8 ; la limite de liquidité égal **8,27 %**, et d'après l'essai de plasticité la limite de plasticité égal **1 %**

**Indice de plasticité :**

$$I_p = W_L - W_P$$

$$I_p = 7,27\%$$

**III.3.4.8. Interprétation des résultats:**

Le tableau III.5 présente les différentes classifications de sol selon l'indice de plasticité  $I_p$

**Tableau III.5 :** Classification des sols

Type du sol	Limite de liquidité $W_L$ %	Indice de plasticité $I_p$ %
sable	$W_L < 35$	$I_p < 15$
Limon	$20 < W_L < 60$	$5 < I_p < 25$
Argile	$W_L > 30$	$I_p > 15$

Le tableau III.6 présente les différents degrés de plasticité du sol selon l'indice de plasticité  $I_p$ .

**Tableau III.6 :** Degré de plasticité de sol

Indice de plasticité $I_p$ (%)	degré de plasticité
12	Non plastique
12-25	Peu plastique
25-40	Plastique
40	Très plastique

D'après les résultats obtenus, et selon les deux tableaux de classifications le sol étudié est une « **Sable non plastique** ».

### III.3.5. Essai de bleu méthylène (NF P 94-068) :

#### III.3.5.1. Introduction:

La valeur au bleu désigné par VBS est le nombre de grammes de bleu nécessaire pour saturer 100 g de fines inférieur à 0.08 mm. Cet essai est réalisé sur la fraction 0/2 mm ou 0/5 mm et ramené par une règle de proportionnalité à la fraction 0/50.

#### III.3.5.2. Principe de l'essai:

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

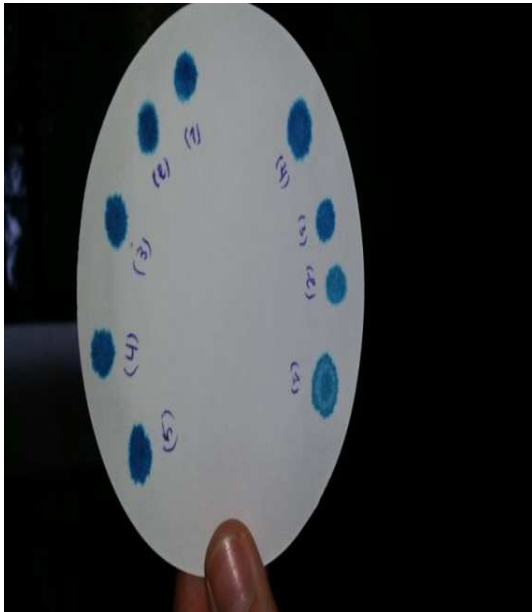
### III.3.5.3. Préparation de l'échantillon :

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/5 mm du matériau, car ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2 mm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et exprime donc de manière quantifiée la sensibilité du sol à l'eau.

On prépare 100 g de fraction 0/2 mm sèche que l'on met à tremper dans 500 ml d'eau déminéralisé. Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur à ailettes.

Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu'atteindre la saturation des particules d'argile. On prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm). Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif ;
- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide teintée de bleu, le test est positif.



**Figure III.9 :** Le déroulement de l'essai de bleu de méthylène.

D'après le tableau III.7 montre la classification de sol selon les valeurs de VBS

**Tableau III.7 :** Classification des sols d'après l'essai de bleu de méthylène.

$V_{BS} < 0,1$	sol insensible à l'eau
$0,2 \leq V_{BS} < 1,5$	peu sensible à l'eau
$1,5 \leq V_{BS} < 2,5$	sols limoneux peu plastiques
$2,5 \leq V_{BS} < 6$	sols limoneux de plasticité moyenne.
$6 \leq V_{BS} < 8$	sols argileux.
$8 \leq V_{BS}$	sols très argileux

Pour calculer la valeur au bleu du sol (VBS) en appliquant la formule suivante :

$$VBS = \frac{B}{m_0} \times 100$$

Avec :

- $B = V \times 0,01$  ( $B$  : est la masse de bleu introduite dans la solution (solution à 10g/l) ;
- $m_0$  : La masse sèche de la prise d'essai ;
- $V$  : est le volume de la solution de bleu utilisée (exprimé en centimètres cubes).

Dans notre sol, on trouve :

$$VBS = 0,215 \%$$

D'après le tableau III.7 et à partir des résultats obtenus de l'essai VBS, le sol étudié : est un sol peu sensible à l'eau.

### III.3.6. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des sols fait l'objet de deux normes :

- La norme (NF P 94-056) concerne l'analyse granulométrique par tamisage des éléments de dimension supérieure à 80  $\mu\text{m}$ .
- La norme (NF P 94-057) traite de l'analyse granulométrique par sédimentation des éléments passant à travers le tamis de 80  $\mu\text{m}$  d'ouverture.

### III.3.6.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056)

#### III.3.6.1.a. Principe :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions. Elle présente les proportions relative des différents dimensions de particule, et permet d'identifie quelle fraction de sol control ses propriétés.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (mailles circulaires), emboîtés les un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments supérieurs à  $80\mu\text{m}$  (NF P94-056) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à  $80\mu\text{m}$  (NF P94-057)

#### III.3.6.1.b. Équipements utilisés

Pour réaliser cette opération, nous avons utilisé les équipements suivants :

- Des tamis de différents diamètres (5 mm—0.08 mm) ;
- Un échantillon de 2000 g (sable) ;
- Une balance de 6 Kg, pesant au gramme près ;
- Une étuve thermostatique ;
- Un vibro-tamis électrique (figure III.10).



**Figure III.10 :** Granulométrie par tamisage.

Les résultats de l'analyse sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique ou l'on porte:

- Les diamètres des particules en abscisse (graduation logarithmique).
- les pourcentages en poids des tamisages cumulés en ordonnée. -

On détermine alors les caractéristiques du sol par deux coefficients :

- Coefficient de Hazen (ou coefficient d'uniformité)  $C_u$  :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Ce coefficient permet de savoir si la granulométrie est étalée ou uniforme.

- Coefficient de courbure la quantité coefficient de courbure  $C_c$  :

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} d_{60}}$$

Ce coefficient permet de savoir si la granulométrie est bien graduée ou non.

D'où :

- $D_{60}$  : Diamètre correspondant à 60% (tamisât)
- $D_{10}$ : Diamètre correspondant à 10% (tamisât), Il est appelé aussi « diamètre efficace »
- $D_{30}$  : Diamètre correspondant à 30% (tamisât)

### III.3.6.2. Essai granulométrique par sédimentation (NF P 94-057)

#### III.3.6.2.a. Introduction :

L'essai de l'analyse granulométrique par sédimentation s'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille circulaire de 80  $\mu\text{m}$  d'ouverture. Les particules de taille inférieure à 1  $\mu\text{m}$ , ne peuvent cependant pas être différenciées par cet essai. Cette dernière complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description et à sa classification.

**III.3.6.2.b. Principe :**

L'essai utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins est en fonctions de leurs dimensions.

La loi de Stokes donne, dans le cas de grains spécifiques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leurs vitesses de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules.

**III.3.6.2.c. Appareillage :**

- Agitateur manuel et densimètre à torpille de plage 0.995 à 1.030 ;
- Agitateur mécanique de type plongeant à vitesse égale à 10000 tr/min avec récipient ;
- Thermomètre à 0.5 °C ;
- Chronomètre ;
- Densimètre ;
- Balance ;
- Tamis 80  $\mu\text{m}$  ;
- Bac ;
- Etuve ;
- Deux éprouvettes de 2000 ml ;
- Un mélange d'eau distillée additionnée à un défloculant pour imbiber puis disperser l'échantillon. Ce mélange est constitué à partir de 440  $\text{cm}^3$  d'eau distillée et de 60  $\text{cm}^3$  d'une solution à 5 % d'héxametaphosphate de sodium préparée et conservée à l'abri de la lumière, au moins, depuis un mois (figure III.11).



**Figure III.11 :** Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie

**III.3.6.2.d. Mode opératoire :**

Les opérations décrites ci-dessous sont successivement à réaliser dans une salle d'essai dont la température doit être contrôlée. Le tamisât, au tamis de 80  $\mu\text{m}$ , de l'échantillon de sol, préparé selon la NF P 94-056, est recueilli avec son eau de lavage dans un bac, le tout est mis à décanter. Une fois redevenue claire, l'eau du bac est siphonnée sans entraîner d'éléments fins.

Le bac et son contenu sont ensuite placés dans une étuve. Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse du matériau contenu dans le bac ne varie pas de plus de 2/1000 entre deux pesées successives effectuées immédiatement après la sortie de l'étuve.

Sur le tamisât séché, désagrégé avec le pilon dans le mortier puis homogénéisé, prélever une prise d'essai de 80g (+ ou moins 10g).

Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique, ajouter 500  $\text{cm}^3$  du mélange spéciale et garder à la température ambiante. Laisser imbiber pendant au moins 15 h à la température ambiante. La prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau est de défloculant au moyen de l'agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant 3min minimum à 10000 tr/min.

Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation, compléter par de l'eau distillée jusqu'à 2000  $\text{cm}^3$ . Verser 2000  $\text{cm}^3$  de la même eau distillée dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propre.

Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre ; faire les lectures depuis le début de l'essai aussi longtemps que nécessaire, aux temps suivants : 0.5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 ; 80 ; 240 ; 1440 minute. Faire les lectures du densimètre au sommet du minisque. À partir de 5mn plonger le densimètre avec précaution dans la solution au minimum 30 s avant la mesure (figure III.12).



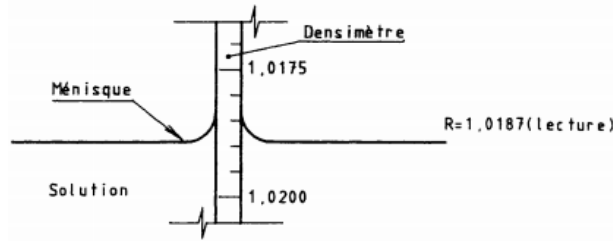


Figure III.12 : Lecture du densimètre

### III.3.6.2.e. Préparation de la prise d'essai :

Le tamisât au tamis de 80  $\mu\text{m}$ , de l'échantillon de sol, préparé selon la norme NF P94-056, est recueilli avec son eau de lavage dans un bac. Le tout est mis à décanter. Une fois redevenu claire, l'eau du bac est siphonnée sans entraîner d'éléments fins.

Le bac et son contenu sont ensuite placés dans une étuve pour sécher tout l'eau. Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse du matériau contenu dans le bac ne varie pas de plus de 2/1 000 entre deux pesées successives effectués immédiatement après la sortie de l'étuve. L'intervalle entre deux pesées est au minimum :

- De 4 h dans le cas d'un étuvage à 105 °C ;
- De 8 h dans le cas d'un étuvage à 50 °C.

Sur le tamisât séché, désagrégé avec le pilon dans le mortier puis homogénéisé, prélever une prise d'essai de 80 g  $\pm$  10 g. De l'agitateur mécanique, ajouter 500 cm<sup>3</sup> de la solution défloculante et garder à température ambiante. Laisser imbiber **pendant au moins 15 h à la température ambiante.**

Disperser à l'agitateur mécanique qui doit fonctionner à 10000 tours pendant au moins 3 min. Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation mécanique. Rincer le récipient ainsi que l'arbre et les palettes de l'agitateur avec de l'eau distillée. Le liquide de rinçage est recueilli dans l'éprouvette d'essai. Compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 2000 cm<sup>3</sup>.

Verser 2000 cm<sup>3</sup> d'eau distillée dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propres. Dans l'éprouvette d'essai, agiter verticalement et vigoureusement la suspension au moyen de l'agitateur manuel pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette.

Retirer l'agitateur ; déclencher au même chronomètre: par convention c'est le début de l'essai. Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre. Faire les lectures depuis le début de l'essai aussi longtemps que nécessaire aux temps suivants en min : **0.5- 1- 2- 5- 10- 20- 40- 80- 240- 1440.**

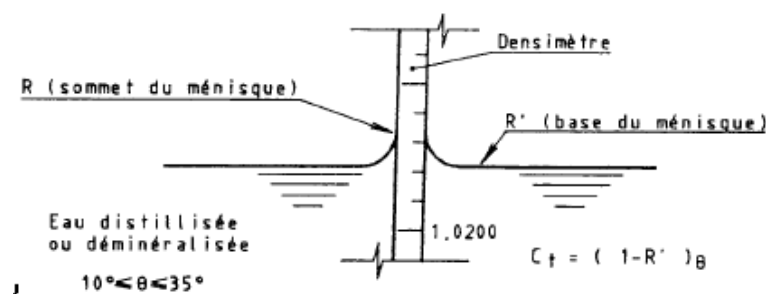
Noter à chaque lecture la densité de la solution à **0.0001** près et la température de l'eau se trouvant dans l'éprouvette témoin à **0.1 °C**. Faire les lectures du densimètre au **sommet** du ménisque. **A partir de la troisième lecture**, retirer le densimètre de la solution après chaque mesure, le nettoyer puis le plonger dans l'éprouvette de l'eau déminéralisée. **A partir de la quatrième lecture (5 mn)** plonger le densimètre dans la solution au moins **30 s** avant la mesure.

### III.3.6.2.f. Expression des résultats :

- Le pourcentage d'éléments inférieur ou égaux à D

$$\rho = \frac{V_s}{m} \times \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_e} \times \rho_e \left[ \frac{\rho_t}{\rho_e} - 1 \right]$$

- $V_s$ : volume de la suspension ;
- $m$ : la masse de sol sec prélevée ;
- $\rho_t$ : masse volumique de la suspension au temps « t »
- $\rho_t = R_c \times \rho_e = (R + C_m + C_t + C_d) \rho_e$
- $R_c$ : lecture corrigée du densimètre à l'instant « t »
- $R$  : lecture du densimètre (sommet de ménisque) à l'instant « t »
- $C_m$  : correction due au ménisque  $C_m = n^{-1} \sum_{i=1}^i (R - R')_i$



**Figure III.13.** Lecture corrigée du densimètre.

- $C_t$  : correction due aux variations de température en cours d'essai  $C_t = 1 - R'$  (figure III.13)

- Cd : correction due aux défloculant  $Cd = R1-R2$  (avec R1 lecture de ménisque à l'éprouvette de l'eau et  $R2 = R$  au même temps)
- N : nombre des mesures effectuées.
- Diamètre d'éléments D

De la formule de Stokes, le plus large diamètre des particules solides en suspension dans l'eau à un temps « t » est déduit :

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(\gamma_s - \gamma_e)}} \sqrt{\frac{Ht}{t}}$$

$\eta$ : La viscosité dynamique de la solution à l'instant « t »

$$\eta = \frac{0.00179}{1 + 0.03368 t + 0.00022 t^2}$$

$H_t$  : Profondeur effective du centre de poussée du densimètre à l'instant « t »

$$H_t = H - [100 H_1 (R + C_m - 1)] - H_c$$

$H_c$  : le déplacement du niveau de la solution lié à l'introduction di densimètre dans l'éprouvette d'essai (Pour calculer H, h et  $h_1$  voir la figure III.12)

$$H_c = 0.5 \frac{V_d}{A}$$

Avec :

- $V_d$  volume de densimètre et « A » la section droite de l'éprouvette d'essai.
- **t** : temps.

Les particules de sol ayant un diamètre plus grand que D calculé descendent plus bas que la zone de mesure. Ainsi, avec des lectures à l'hydromètre prises à des intervalles de temps variés, le pourcentage des particules plus finies peut être calculé et leur distribution représentée (figure III.14)



**Figure III.14:** Granulométrie par sédimentation.

**III.3.6.1.j. Les résultats obtenus :**

Le tableau III.8 contient le pourcentage massique de passent, en fonction de la série de tamis utilisés.

**Tableau III.8 :** Les résultats de granulométrie.

Dimension tamis (mm)	Tamisât (%)
5,000	98,250
3,150	92,500
2,000	80,550
1,250	61,400
0,800	43,250
0,630	36,900
0,500	29,200
0,315	14,550
0,200	11,700
0,160	7,050
0,125	5,250
0,100	4,350
0,080	3,370
0,073	0,021
0,050	0,025

0,035	0,025
0,023	0,021
0,016	0,023
0,011	0,023
0,008	0,021
0,005	0,021
0,003	0,017
0,002	0,006

La distribution de la taille des particules doit être présentée sous forme graphique sur un papier semi-logarithmique sur lequel la taille des particules en millimètres sera portée en abscisse (échelle logarithmique) et leur pourcentage pondéral en ordonnée (figure III.15).

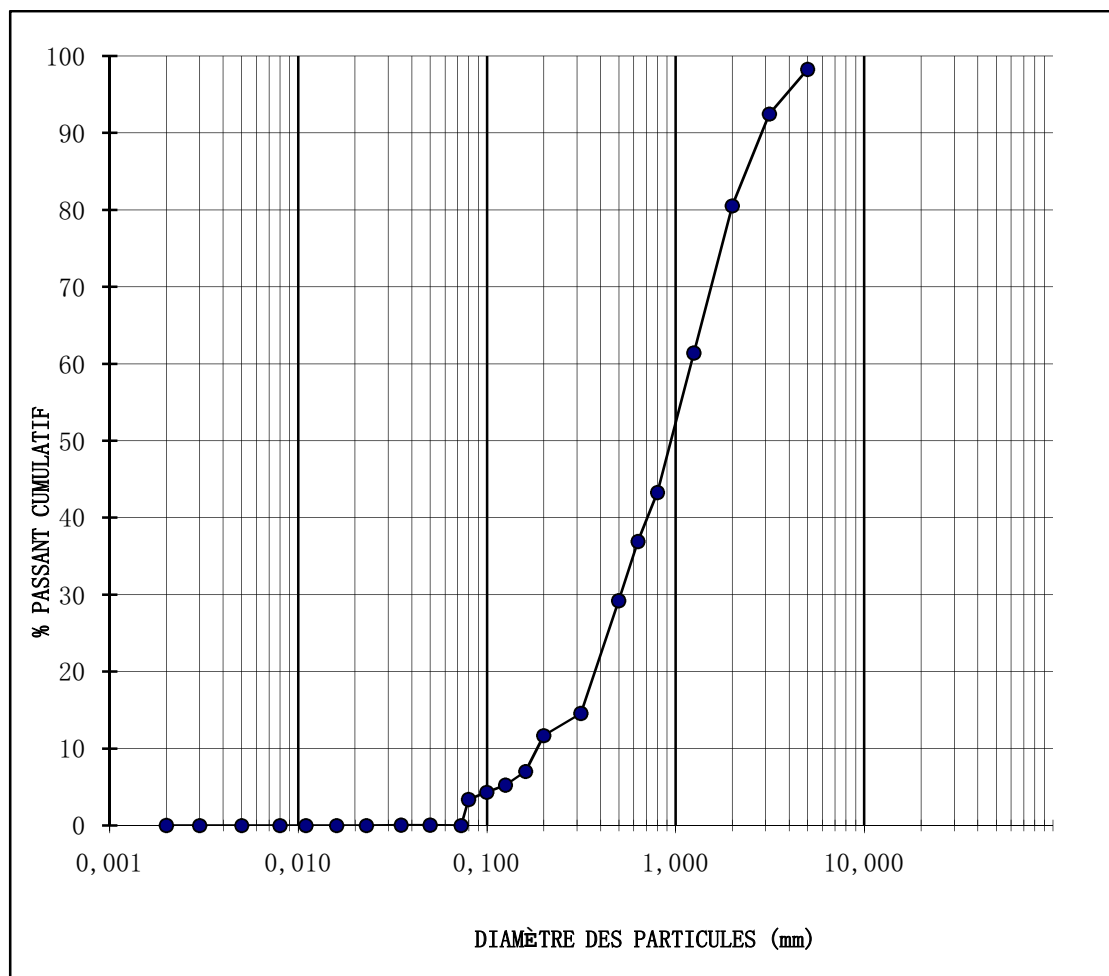


Figure III.15 : Courbe granulométrique.

Les diamètres effectifs de la courbe granulométrique sont :

- $D_{10} = 0,20$  mm ;
- $D_{30} = 0,50$  mm ;
- $D_{50} = 1,00$  mm ;
- $D_{60} = 1,20$  mm.

Les coefficients de la courbe granulométrique sont :

- $C_u = 6$  Courbe étalée
- $C_c = 1,66$  Courbe mal graduée

Selon le **GTR** avec l'utilisation de pourcentage des passantes 2 mm , valeur de VBS et l'indice de plasticité  $I_p$  le sol est classifié par **B<sub>2</sub>** (sable peu argileux)

Selon la classification de **LCPC** avec l'utilisation de pourcentage des passantes 80  $\mu\text{m}$  , et l'indice de plasticité  $I_p$ , le sol est classifié par **Sm** (Sable mal gradué).

### III.4. Essai de cisaillement direct à la boîte :

#### III.4.1. Introduction :

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondation, ouvrage de soutènement, remblais, talus...), il est nécessaire de connaître la résistance du sol. Mais cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent.

La résistance d'un sol peut être définie par nombreux essais, parmi eux : l'essai de cisaillement rectiligne dit (à la boîte).

#### III.4.2. Définition :

L'essai de cisaillement à la boîte permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne  $\varphi$  et sa cohésion  $C$ . Ces valeurs servent entre autres à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement.

### III.4.3. Principe de l'essai :

Dans l'essai de cisaillement à la boîte, on cherche à provoquer la rupture de l'échantillon suivant un plan imposé. L'échantillon est placé dans une boîte constituée de deux parties qui peuvent glisser horizontalement l'une sur l'autre. On applique à l'échantillon un effort normal de compression  $N$ , verticalement, par l'intermédiaire d'un piston et un effort tranchant  $T$ , horizontalement, en déplaçant la demi-boîte inférieure.

Un comparateur mesure la variation de hauteur de l'échantillon (figure III.16). Plusieurs essais sont effectués en faisant varier ( $\sigma$ ) et en trace la courbe intrinsèque.

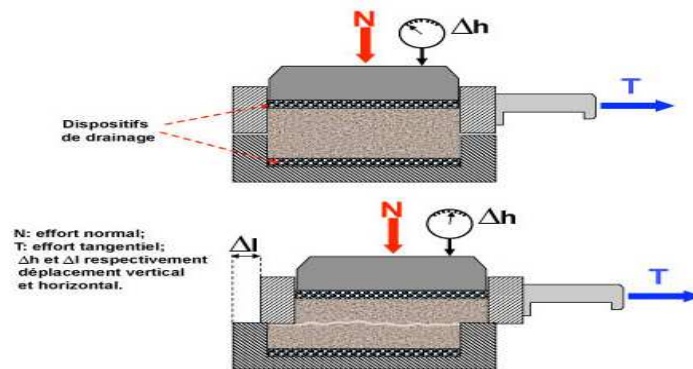


Figure III.16 : Principe de l'essai de cisaillement.

### III.4.4. Appareillages :

#### III.4.4.1. La machine de cisaillement à déformation contrôlés

Elle est constituée d'un bâti métallique sur lequel repose :

- Le panneau de commandes;
- Le chariot porte-boîte entraîné horizontalement à vitesse constante par un moteur. Il provoque le déplacement de la demi-boîte inférieure et d'une partie de l'éprouvette d'essai;
- Le bras de réaction communiquant à l'anneau dynamométrique les efforts appliqués sur la demi-boîte supérieure lors de cisaillement.
- L'anneau dynamométrique dont les déformations indiquent les efforts tangentiels développés dans le plan de cisaillement. Une table de calibrage est fournie pour permettre le passage du déplacement à l'effort;

- Un système levier-étrier appliquant sur le piston de la boîte les charges normales désirées à l'aide des différents poids.



**Figure III.17 :** La machine de cisaillement.

#### III.4.4.2. La boîte de cisaillement :

Elle se présente sous forme de deux demi-boîtes (l'une inférieure, l'autre supérieure), carré intérieurement, de même section droite, de longueur 6 cm.

La demi-boîte supérieure est équipée d'un bras de réaction qui se place lors de l'essai sur l'axe de l'anneau dynamométrique. Elles sont équipées des éléments suivants :

- Deux vis permettant de solidariser les deux demi-boîtes avant l'essai (pour faciliter la mise en place de l'échantillon). Le piston sert à l'application de la charge normale ;
- Deux pierres poreuses plates servent le filtre ;
- Deux plaques de drainage servant à faciliter le drainage de l'échantillon ;
- Le piston et la demi-boîte inférieure possèdent des orifices pour la mise en eau de l'échantillon ;



**Figure III.18 :** Les constituants de la boîte de cisaillement.



#### III.4.4.3. Les bâtis de consolidation :

Les bâtis de consolidation comportent

- Un disque à l'extrémité sur lequel reposent les poids
- Une tige support le comparateur pour la mesure de tassement des éprouvettes d'essais

#### III.4.4.4. Les poids :

Ce sont des disques métalliques plats. Ils sont fendus afin de permettre leur centrage et leur superposition sur le plateau de charge du levier du bâti de consolidation. Chaque bâti de consolidation dispose de sa propre série de poids afin de pouvoir effectuer simultanément la consolidation de différentes éprouvettes d'essai sous les contraintes normales désirées.



Figure III.19 : Les poids.

#### III.4.4.5. Appareillage d'usage courant :

- Étuve à 105°C;
- Un chronomètre donnant la seconde;
- Du papier filtre.

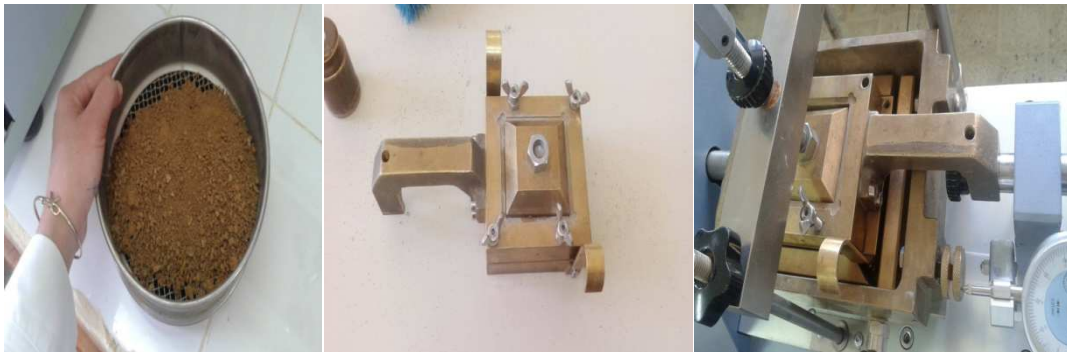
#### III.4.2. Mode opératoire :

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. L'essai consiste à:

- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant durant la durée de l'essai ( $\sigma = N/s$ ),

- Produire, après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N), un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif  $\Delta l$  à vitesse constante,
- Mesurer l'effort (T) correspondant ( $t = T/s$ ).

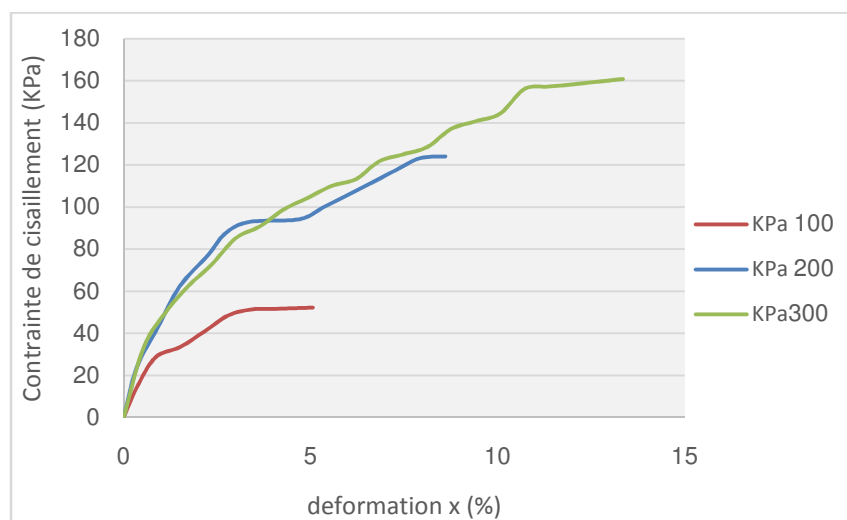
L'essai est réalisé sur une série d'au minimum 3 éprouvettes en faisant augmenter à chaque éprouvette la valeur de l'effort vertical (N). La contrainte verticale maximale  $\sigma_{max}$  ( $=N_{max}/s$ ) appliquée à la série d'éprouvette doit être supérieure à la contrainte effective verticale induite dans le sol après travaux.



**Figure III.20** : Mode opératoire de l'essai de cisaillement direct.

#### III.4.2.2. Résultats obtenus :

La figure III.20 présente la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa



**Figure III.20** : Courbe contrainte de cisaillement & déformation x.

La contrainte de cisaillement augmente avec les déplacements imposés a l'échantillon.

La figure III.21 présente la variation de déformation volumique en fonction de déformation  $x$  des trois contraintes normales :

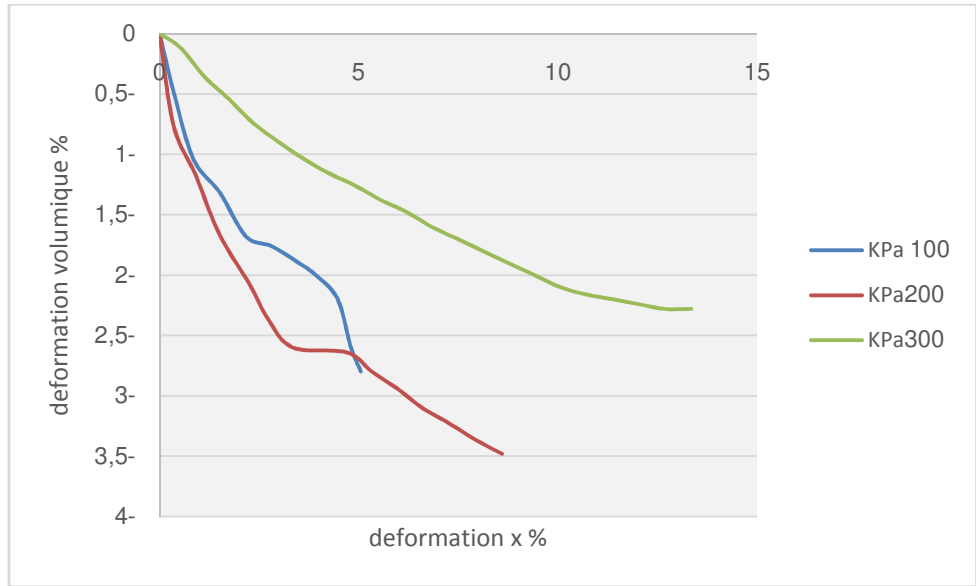


Figure III.21 : Courbe déformation volumique & déformation x.

La figure III.22 présente la courbe intrinsèque de notre sol étudié..

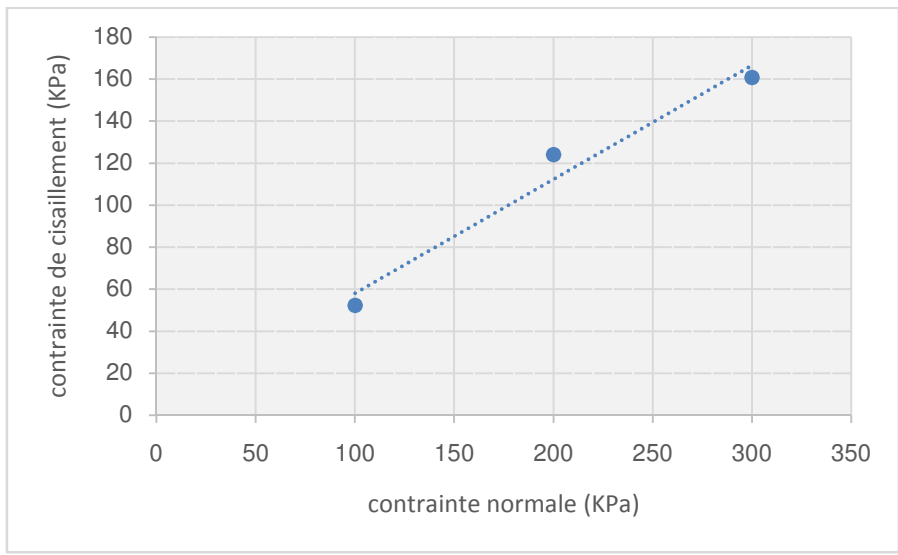


Figure III.22 : Courbe contrainte de cisaillement & contrainte normale.

On rapportant les points  $(\tau, \sigma)$  comme montré sur la figure III.22, on constate une variation linéaire de la contrainte de cisaillement avec la contrainte normale

appliquée. Ce qui confirme expérimentalement le critère d'équilibre limite énoncé par Mohr-coulomb, l'ajustement des points expérimentaux par une droite au sens des moindres carrés donne :  $\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi$ .

Donc, la cohésion égal **3.78 KPa** et l'angle de frottement égal **28.46°**.

### III.5. La fibre utilisée (fibre d'Alfa) :

Les fibres d'alfa sont de section circulaire avec une zone creuse centrale. Leur densité est faible (1400 kg / m<sup>3</sup>), elles sont biodégradables et elles proviennent d'une source renouvelable. La structure de la fibre d'alfa est hétérogène, constituée principalement de cellulose (40 % – 50 %), de lignine (17,71 % – 24 %), d'hémicellulose (22,15 % – 28 %) et de 5% de cire. En conséquence les fibres d'alfa sont très anisotropes comme la plupart des fibres naturelles.

**Tableau III.8 :** Propriétés mécaniques de la fibre d'alfa.

	$\varepsilon$ (%)	$\bar{\sigma}$ (MPa)	E (GPa)
Alfa	1.71	149	14.3

**Tableau III.9 :** Propriétés mécaniques des fibres d'Alfa.

Paramètre	$\bar{\sigma}$ (MPa)	$\Delta L$ (%)	E (GPa)
Valeur moyenne	63.83	3.12	2.05
Déviatoin standard	16.80	0.63	0.77
Coefficient de variance	26.31	20.12	37.55

### III.6. Conclusion :

Ce chapitre a pour but de présenter dans son ensemble notre démarche expérimentale ainsi que les moyens mis en œuvre et les protocoles développés pour atteindre les objectifs de ce travail, à savoir évaluer les propriétés mécaniques du sol utilisé en fonction des différents paramètres d'identification géotechniques du sol rencontré (classification, granulométrie, quantité des fines, teneur en eau et poids volumiques .....etc.). Nous avons aussi présenté les propriétés physiques et mécaniques de la fibre utilisée.

### IV.1. Introduction:

Ce chapitre a pour but d'étudier le comportement mécanique d'un sol renforcé par l'Alfa. Dans cette étude, des facteurs variables, comme le pourcentage, la direction et la longueur des fibres, ont pris en compte, de manière d'évaluer l'effet de ces paramètres sur notre sol non renforcé.

Les caractérisations mécaniques du sol traité sont définies à partir des mesures en laboratoire avec l'utilisation d'essai de la boîte de cisaillement direct, donc en comparant les paramètres suivants :

- La cohésion et l'angle de frottement non drainée ( $C_u, \phi_u$ ).
- La contrainte de cisaillement maximale  $\tau_{max}$  ;

### IV.2. Programme des essais réalisés :

Plusieurs essais de cisaillement direct ont été réalisés dans ce chapitre (la totalité de 33 essais, donc plus de 99 échantillons). Le tableau IV.1 montre le programme des essais réalisés :

**Tableau IV.1 :** Programme des essais effectués.

		Contrainte normale (KPa)	Direction de la fibre	Fibre d'alfa	
				% d'ajout	Longueur (cm)
Essai 1	Échantillon A1	100	-	0	0
	Échantillon A2	200	-	0	0
	Échantillon A3	300	-	0	0
Essai 2	Échantillon B1	100	Horizontal	0.25	1
	Échantillon B2	200	Horizontal	0.25	1
	Échantillon B3	300	Horizontal	0.25	1
Essai 3	Échantillon C1	100	Horizontal	0.5	1
	Échantillon C2	200	Horizontal	0.5	1
	Échantillon C3	300	Horizontal	0.5	1
Essai 4	Échantillon D1	100	Horizontal	0.75	1
	Échantillon D2	200	Horizontal	0.75	1
	Échantillon D3	300	Horizontal	0.75	1
Essai 5	Échantillon E1	100	Horizontal	1	1
	Échantillon E2	200	Horizontal	1	1
	Échantillon E3	300	Horizontal	1	1
Essai 6	Échantillon F1	100	Incliné	0.25	1
	Échantillon F2	200	Incliné	0.25	1
	Échantillon F3	300	Incliné	0.25	1

Essai 7	Échantillon G1	100	Incliné	0.5	1
	Échantillon G2	200	Incliné	0.5	1
	Échantillon G3	300	Incliné	0.5	1
Essai 8	Échantillon H1	100	Incliné	0.75	1
	Échantillon H2	200	Incliné	0.75	1
	Échantillon H3	300	Incliné	0.75	1
Essai 9	Échantillon I1	100	Incliné	1	1
	Échantillon I2	200	Incliné	1	1
	Échantillon I3	300	Incliné	1	1
Essai 10	Échantillon J1	100	Vertical	0.25	1
	Échantillon J2	200	Vertical	0.25	1
	Échantillon J3	300	Vertical	0.25	1
Essai 11	Échantillon K1	100	Vertical	0.5	1
	Échantillon K2	200	Vertical	0.5	1
	Échantillon K3	300	Vertical	0.5	1
Essai 12	Échantillon L1	100	Vertical	0.75	1
	Échantillon L2	200	Vertical	0.75	1
	Échantillon L3	300	Vertical	0.75	1
Essai 13	Échantillon M1	100	Vertical	1	1
	Échantillon M2	200	Vertical	1	1
	Échantillon M3	300	Vertical	1	1
Essai 14	Échantillon N1	100	Aléatoire	0.25	1
	Échantillon N2	200	Aléatoire	0.25	1
	Échantillon N3	300	Aléatoire	0.25	1
Essai 15	Échantillon O1	100	Aléatoire	0.5	1
	Échantillon O2	200	Aléatoire	0.5	1
	Échantillon O3	300	Aléatoire	0.5	1
Essai 16	Échantillon P1	100	Aléatoire	0.75	1
	Échantillon P2	200	Aléatoire	0.75	1
	Échantillon P3	300	Aléatoire	0.75	1
Essai 17	Échantillon Q1	100	Aléatoire	1	1
	Échantillon Q2	200	Aléatoire	1	1
	Échantillon Q3	300	Aléatoire	1	1
Essai 18	Échantillon R1	100	Horizontal	0.25	2.5
	Échantillon R2	200	Horizontal	0.25	2.5
	Échantillon R3	300	Horizontal	0.25	2.5
Essai 19	Échantillon S1	100	Horizontal	0.25	2
	Échantillon S2	200	Horizontal	0.25	2
	Échantillon S3	300	Horizontal	0.25	2
Essai 20	Échantillon T1	100	Horizontal	0.25	1.5
	Échantillon T2	200	Horizontal	0.25	1.5
	Échantillon T3	300	Horizontal	0.25	1.5
Essai 21	Échantillon U1	100	Incliné	0.25	2.5
	Échantillon U2	200	Incliné	0.25	2.5
	Échantillon U3	300	Incliné	0.25	2.5
Essai 22	Échantillon V1	100	Incliné	0.25	2
	Échantillon V2	200	Incliné	0.25	2
	Échantillon V3	300	Incliné	0.25	2
Essai 23	Échantillon W1	100	Incliné	0.25	1.5
	Échantillon W2	200	Incliné	0.25	1.5
	Échantillon W3	300	Incliné	0.25	1.5

Essai 24	Échantillon X1	100	Vertical	0.25	2.5
	Échantillon X2	200	Vertical	0.25	2.5
	Échantillon X3	300	Vertical	0.25	2.5
Essai 25	Échantillon Y1	100	Vertical	0.25	2
	Échantillon Y2	200	Vertical	0.25	2
	Échantillon Y3	300	Vertical	0.25	2
Essai 26	Échantillon Z1	100	Vertical	0.25	1.5
	Échantillon Z2	200	Vertical	0.25	1.5
	Échantillon Z3	300	Vertical	0.25	1.5
Essai 27	Échantillon a1	100	Aléatoire	0.75	2.5
	Échantillon a2	200	Aléatoire	0.75	2.5
	Échantillon a3	300	Aléatoire	0.75	2.5
Essai 28	Échantillon b1	100	Aléatoire	0.75	2
	Échantillon b2	200	Aléatoire	0.75	2
	Échantillon b3	300	Aléatoire	0.75	2
Essai 29	Échantillon c1	100	Aléatoire	0.75	1.5
	Échantillon c2	200	Aléatoire	0.75	1.5
	Échantillon c3	300	Aléatoire	0.75	1.5
Essai 30	Échantillon d1	100	Horizontal	0.25	2.5
	Échantillon d2	200	Horizontal	0.25	2.5
	Échantillon d3	300	Horizontal	0.25	2.5
Essai 31	Échantillon e1	100	Incliné	0.25	1
	Échantillon e2	200	Incliné	0.25	1
	Échantillon e3	300	Incliné	0.25	1
Essai 32	Échantillon f1	100	Vertical	0.25	1.5
	Échantillon f2	200	Vertical	0.25	1.5
	Échantillon f3	300	Vertical	0.25	1.5
Essai 33	Échantillon g1	100	Aléatoire	0.75	1
	Échantillon g2	200	Aléatoire	0.75	1
	Échantillon g3	300	Aléatoire	0.75	1

D'après le tableau IV.1 nous avons varié au début le pourcentage (0, 0.25, 0.5, 0,75 et 1%) et la direction (horizontale, verticale, incliné à 45° et aléatoire) d'alfa avec une longueur fixe de 1 cm ; donc le premier but est de trouver le pourcentage optimal de renforcement du sol dans les différentes orientations de fibre par rapport à l'axe de cisaillement. Puis nous avons varié la longueur des fibres (1, 1.5, 2 et 2.5 cm) dans chaque orientation, donc le deuxième but est trouver la longueur optimale de ce renforcement. Enfin, notre but principal est la détermination du mélange idéal pour le renforcement de sable « sable + % optimal d'alfa + la longueur optimale d'alfa » dans chaque orientation.



### IV.3. Préparation des mélanges:

La méthode que l'on utilise pour la préparation des mélanges est simple et nécessite des moyens de laboratoire :

- Des bacs ;
- Des petites pelles ;
- Balance électrique ;
- Des tamis.

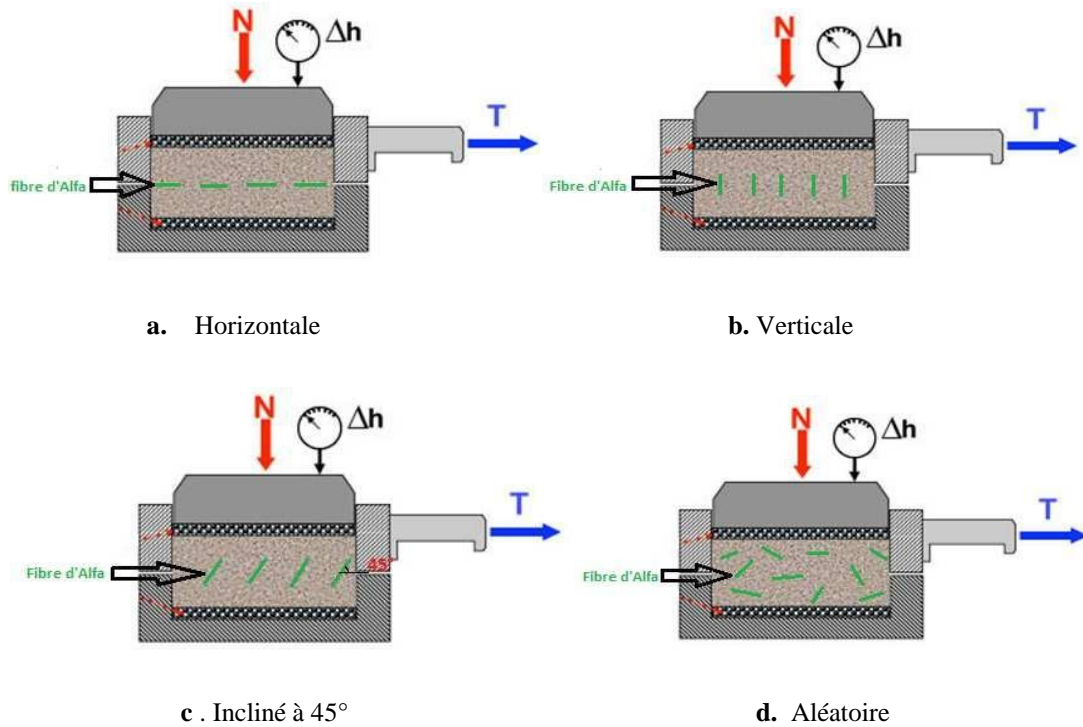
On prend chaque fois une quantité de sable tamisées à 5 mm puis on ajoute des quantités d'alfa suivant le pourcentage et la longueur voulus (figure IV.1).



**Figure IV.1** : Préparation des mélanges.

Le mélange est mis dans la boîte de cisaillement directe ; l'orientation des fibres se fait à l'état naturel de sol à l'aide des pelles pour la direction aléatoire et à la main pour les autres orientations (figure IV.2).





**Figure IV.2 :** Orientation des fibres d'Alfa dans l'échantillon de sol.

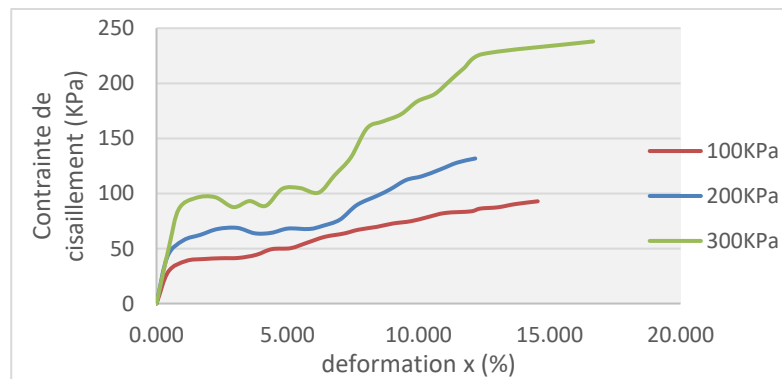
#### IV.4. Les résultats obtenus :

##### IV.4.1. Direction horizontale

##### IV.4.1.1 Différents pourcentage d'Alfa de 1 cm :

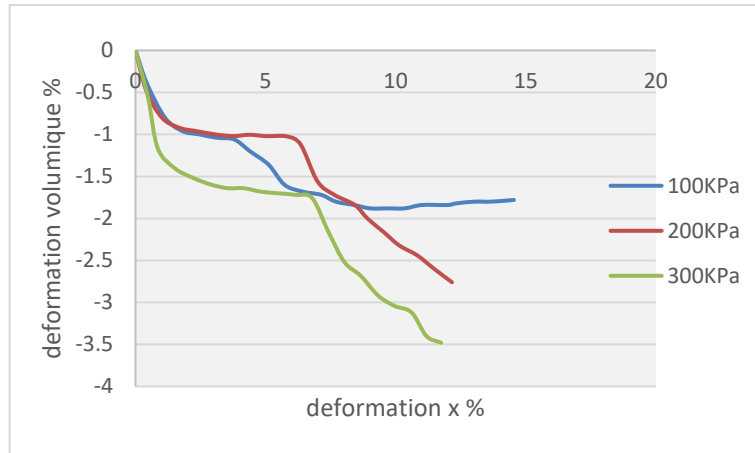
##### IV.4.1.1.a. Essai n°2 :

La figure IV.3 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction horizontale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



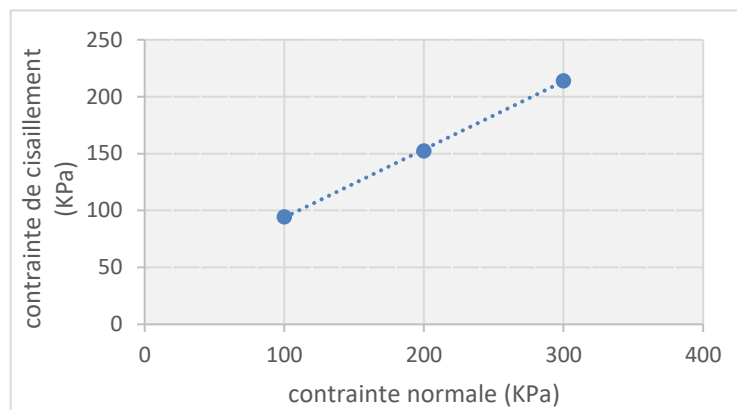
**Figure IV.3 :** Courbe de cisaillement de l'essai 2.

La figure IV.4 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.4 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 2.

La figure IV.5 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction horizontale.

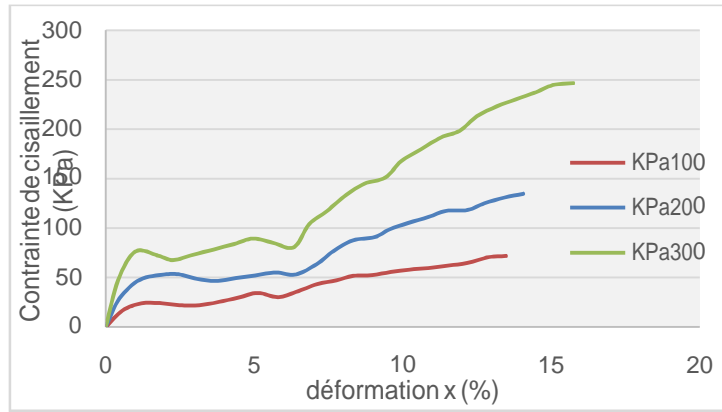


**Figure IV.5 :** Courbe intrinsèque de l'essai 2.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.5). La cohésion égale **34.06 KPa** et l'angle de frottement égal **30.88°**.

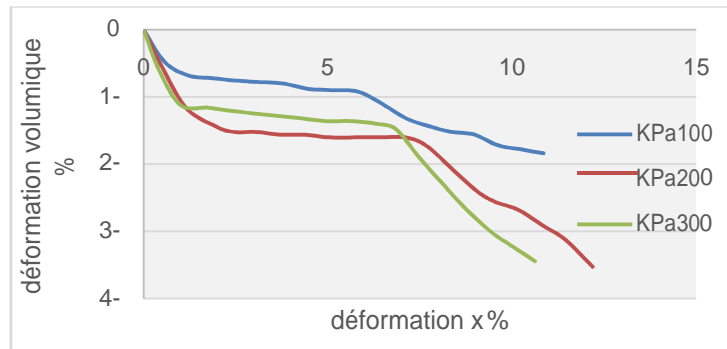
#### IV.4.1.2.b. Essai n°3 :

La figure IV.6 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.5 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction horizontale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



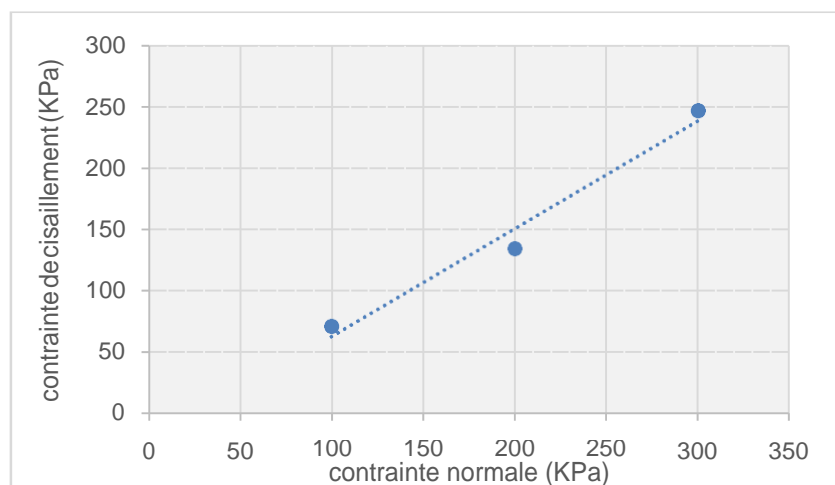
**Figure IV.6 :** Courbe de cisaillement de l'essai 3.

La figure IV.7 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.7 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 3.

La figure IV.8 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.5 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction horizontale.

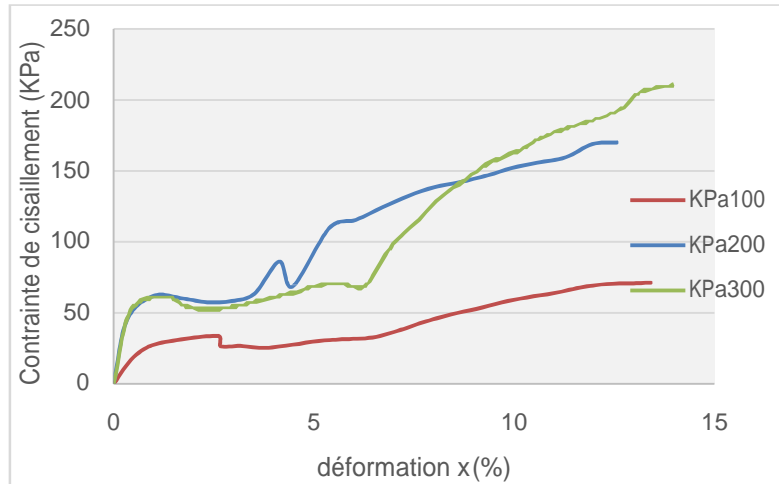


**Figure IV.8 :** Courbe intrinsèque de l'essai 3.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.8). La cohésion égale **24,19 KPa** et l'angle de frottement égal **41,18°**.

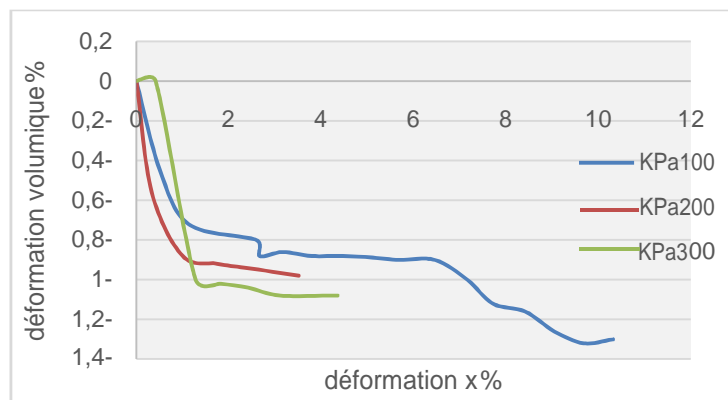
#### IV.4.1.2.c. Essai n°4 :

La figure IV.9 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.75 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction horizontale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



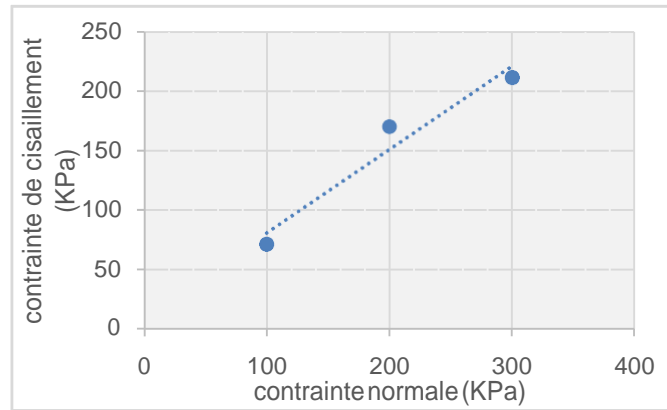
**Figure IV.9 :** Courbe de cisaillement de l'essai 4.

La figure IV.10 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.10 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 4.

La figure IV.11 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.75 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction horizontale.

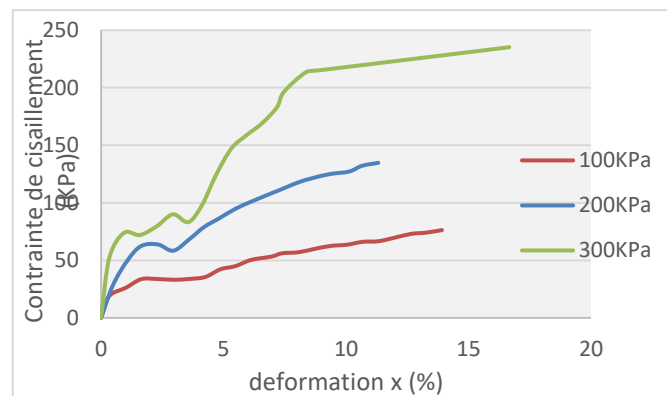


**Figure IV.11 :** Courbe intrinsèque de l'essai 4.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.11). La cohésion égale **11.09 KPa** et l'angle de frottement égal **34.95°**.

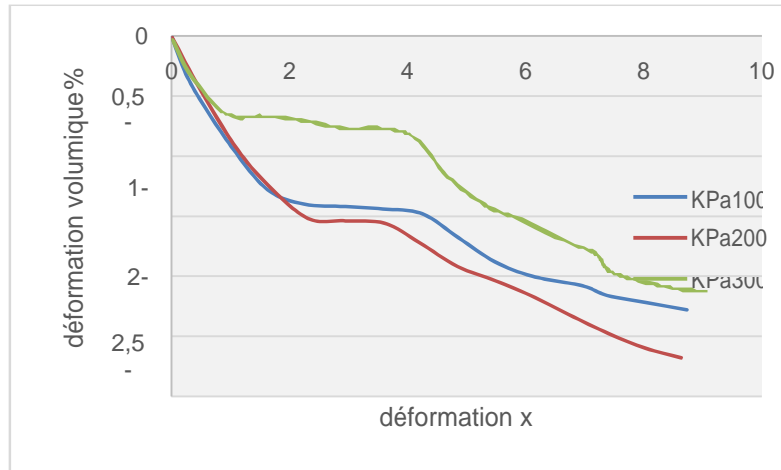
#### IV.4.1.2.d. Essai n°5 :

La figure IV.12 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 1 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction horizontale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



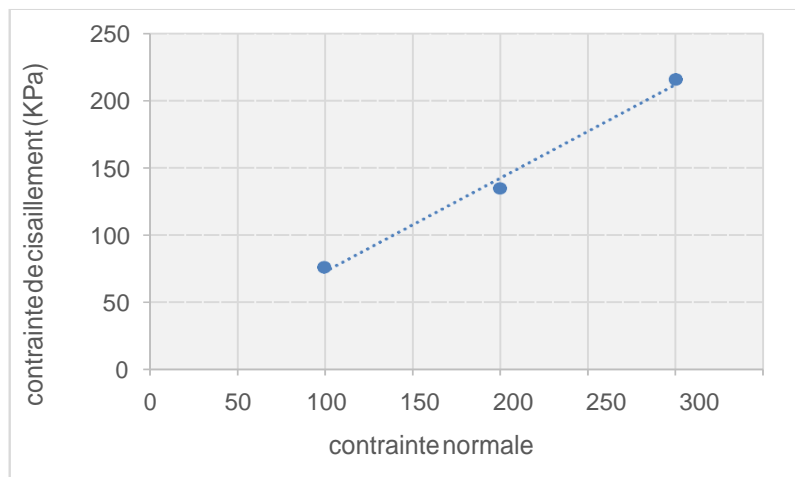
**Figure IV.12 :** Courbe de cisaillement de l'essai 5.

La figure IV.13 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.13 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 5.

La figure IV.14 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 1 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction horizontale.



**Figure IV.14 :** Courbe intrinsèque de l'essai 5.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.11). La cohésion égale **2.92 KPa** et l'angle de frottement égal **34.84°**.

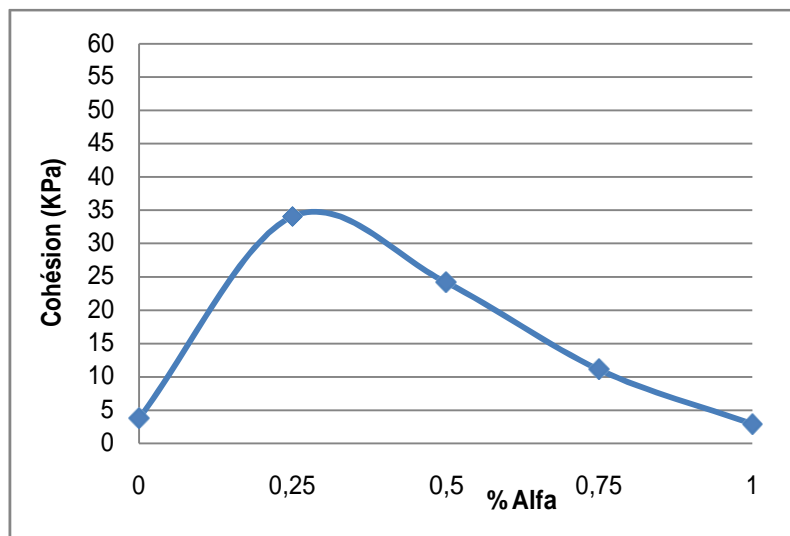
#### IV.4.1.1.e. Récapitulatifs des résultats :

Le tableau IV.2 donne les résultats obtenus par l'ajout des différents pourcentages d'Alfa (0.25, 0.5, 0.75 et 1 %) de 1 cm dans la direction horizontale.

**Tableau IV.2 :** Récapitulatif des résultats obtenus par l'ajout des % d'Alfa (direction horizontale).

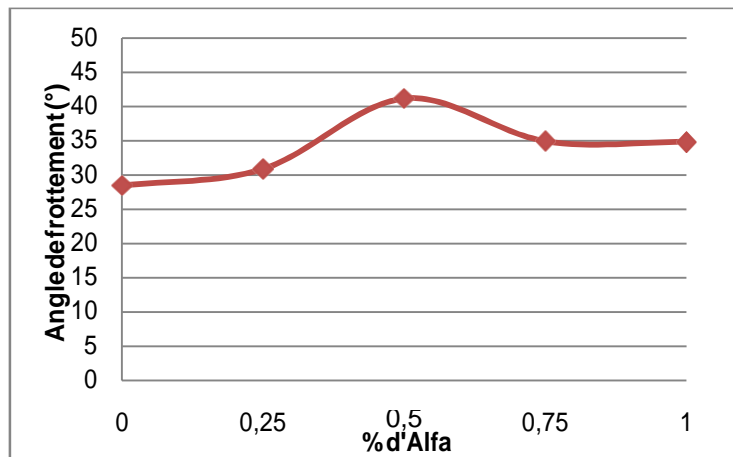
	Pourcentage (%)	Cohésion (KPa)	Angle de frottement (°)	Contrainte de cisaillement maximal (KPa)		
				100	200	300
Essai n°1	0	3,78	28,46	52,22	124,00	160,77
Essai n°2	0.25	34,06	30,88	94,44	152,50	214,04
Essai n°3	0.5	24,19	41,18	71,49	134,61	246,57
Essai n°4	0.75	11,09	34,95	71,43	170,10	211,28
Essai n°5	1	2,92	34,84	76,25	134,72	215,47

La figure IV.15 montre la variation de la cohésion en fonction des % de 1 cm d'Alfa avec une orientation horizontale.

**Figure IV.15 :** La cohésion en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction horizontale).

D'après la figure IV.15 la cohésion augmente avec les différents pourcentages d'ajout d'alfa jusqu'à 1% (petite diminution) par rapport au sol non renforcé. Cette diminution due à la liaison de contact (au plan de cisaillement), l'ajout de 1% d'alfa crée des vides entre les demi-boites donc une diminution de la cohésion. L'ajout de 0.25 % d'alfa augmente la cohésion 9 fois.

La figure IV.16 présente la variation d'angle de frottement en fonction des différents pourcentages d'Alfa dans la direction horizontale.



**Figure IV.16 :** Angle de frottement en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction horizontale).

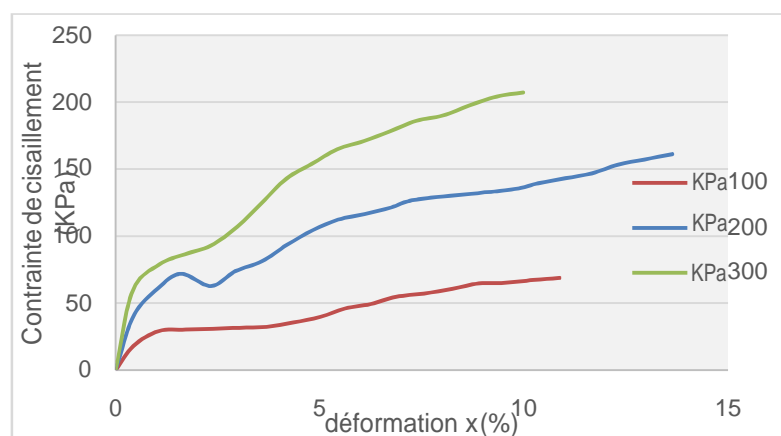
D'après la figure IV.16 l'angle de frottement augmente avec les différents pourcentages d'ajout d'alfa par rapport au sol non renforcé. Cette augmentation est due à la liaison de contact (au plan de cisaillement). L'ajout de 0.5 % d'alfa augmente l'angle de frottement 1,44 fois.

D'après les observations, la résistance de sol est plus élevée au pourcentage d'ajout de 0.25 %, donc c'est le pourcentage optimal recherché.

#### IV.4.1.2. Les différentes longueurs d'Alfa (0.25%):

##### IV.4.1.2.a. Essai n°20 :

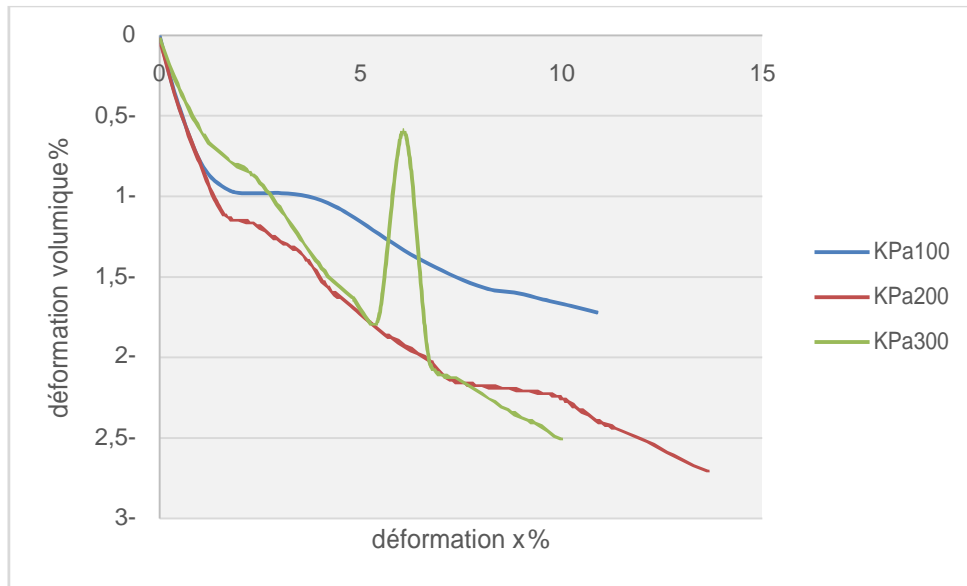
La figure IV.17 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 1.5 cm » dans la direction horizontale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.17 :** Courbe de cisaillement de l'essai 20.

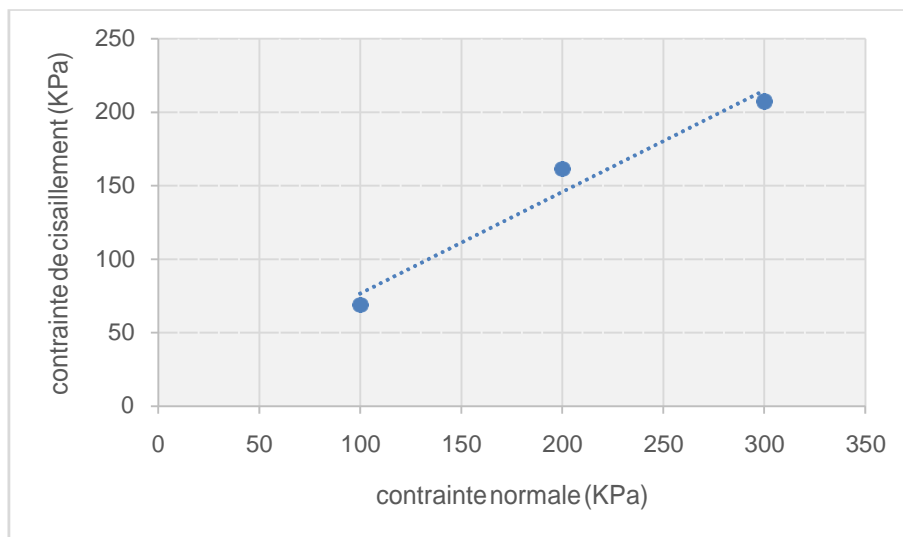


La figure IV.18 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.18 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 20.

La figure IV.19 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 1.5 cm » dans la direction horizontale.

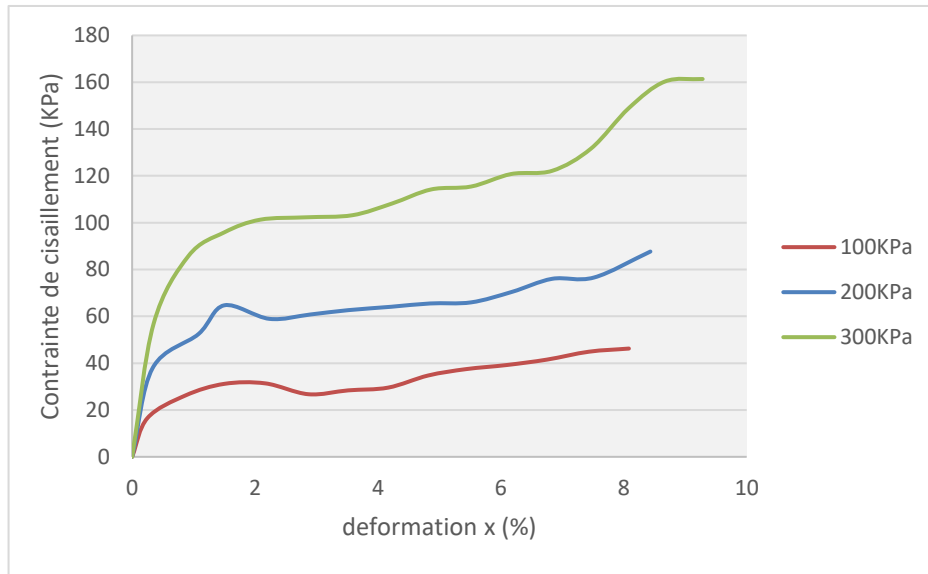


**Figure IV.19 :** Courbe intrinsèque de l'essai 20.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.19). La cohésion égale **7,452 KPa** et l'angle de frottement égal **34.64°**.

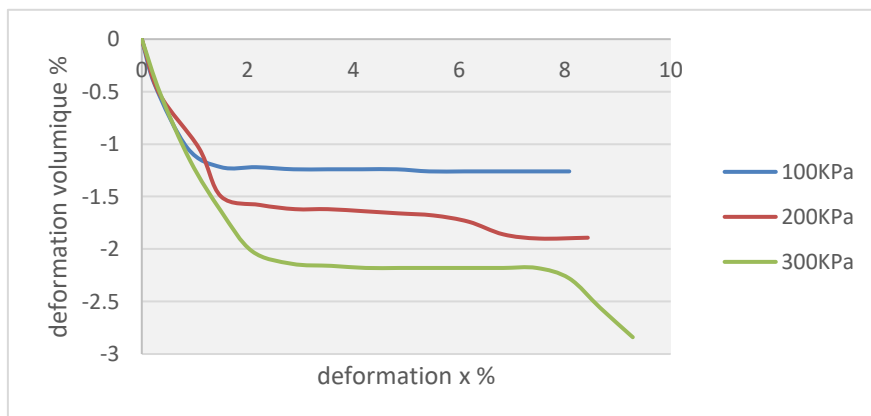
## IV.4.1.2.b. Essai n°19 :

La figure IV.20 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 2 cm » dans la direction horizontale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



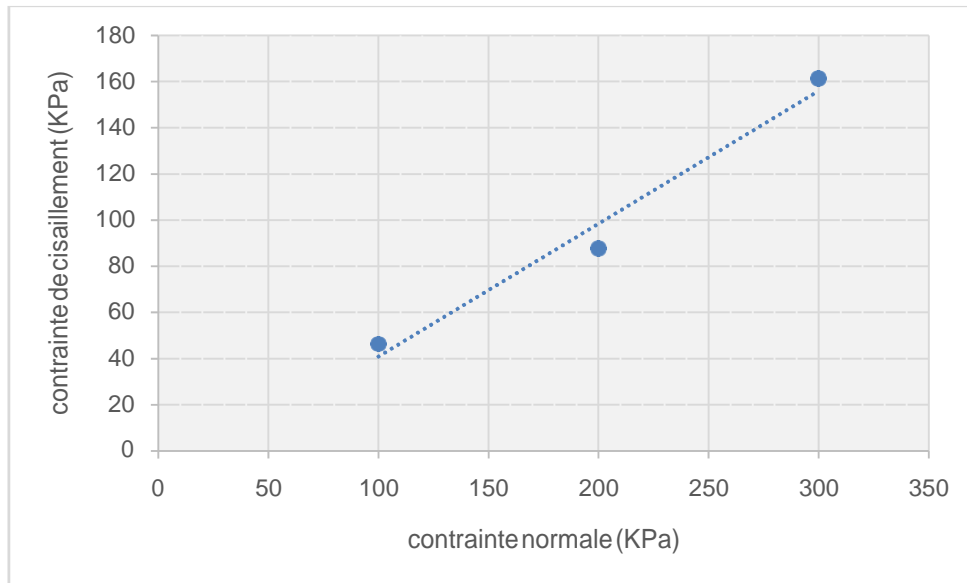
**Figure IV.20 :** Courbe de cisaillement de l'essai 19.

La figure IV.21 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.21 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 19.

La figure IV.22 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 2 cm » dans la direction horizontale.

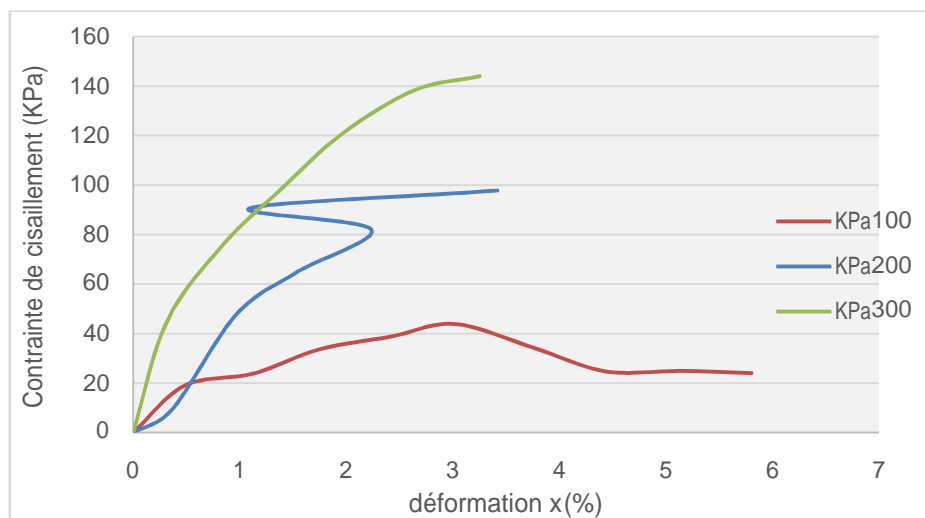


**Figure IV.22 :** Courbe intrinsèque de l'essai 19.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.19). La cohésion égale **16.70 KPa** et l'angle de frottement égal **29.89°**.

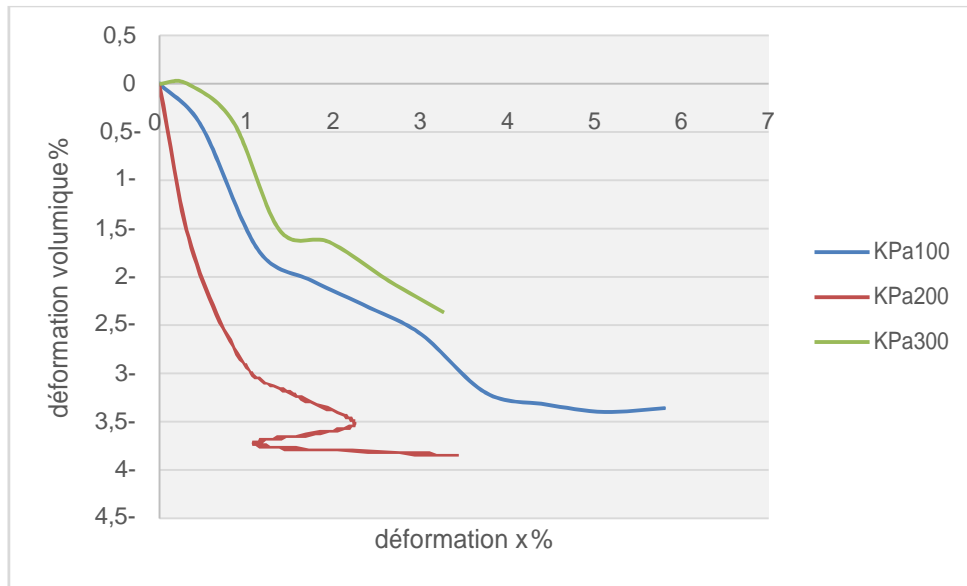
#### IV.4.1.2.c. Essai n°18 :

La figure IV.23 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 2.5 cm » dans la direction horizontale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



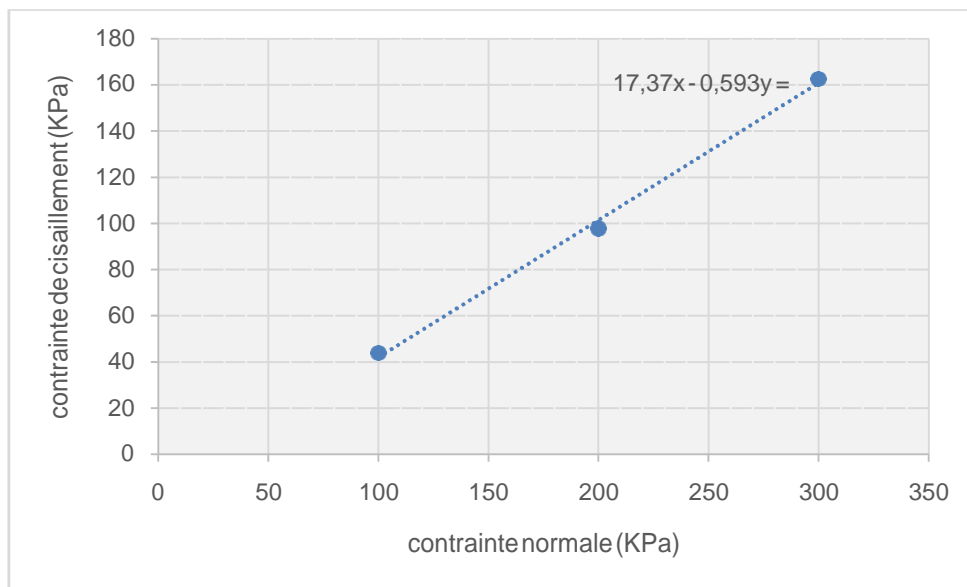
**Figure IV.23 :** Courbe de cisaillement de l'essai 18.

La figure IV.24 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.24 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 18.

La figure IV.25 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 2.5 cm » dans la direction horizontale



**Figure IV.25 :** Courbe intrinsèque de l'essai 18.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.25). La cohésion égale **17.37 KPa** et l'angle de frottement égal **30.66°**.

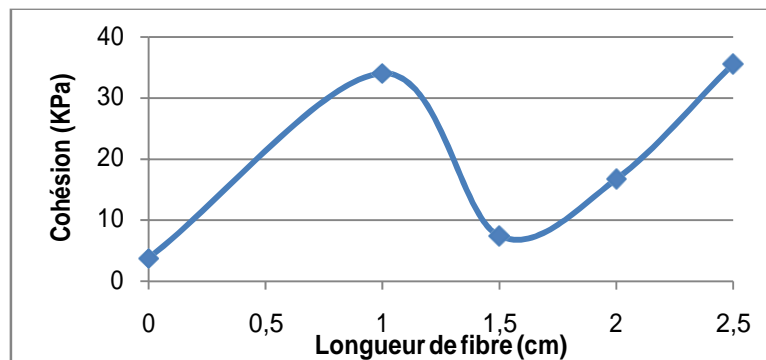
#### IV.4.1.2.D. Récapitulatifs des résultats :

Le tableau IV.3 donne les résultats obtenus par l'ajout de 0.25% des différentes longueurs d'Alfa (1, 1.5, 2 et 2.5 cm) dans la direction horizontale.

**Tableau IV.3 :** Récapitulatif des résultats obtenus par l'ajout des longueurs de 0.25% d'Alfa (direction horizontale).

	Longueur (cm)	Cohésion (KPa)	Angle de frottement (°)	Contrainte de cisaillement maximal (KPa)		
				100	200	300
Essai n°2	1	34,06	30,88	94,44	152,5	214,04
Essai n°20	1.5	7,45	34,64	68,87	161,30	207,22
Essai n°19	2	16,70	29,89	46,24	87,67	161,37
Essai n°18	2.5	35,58	30,66	43,82	43,16	162,59

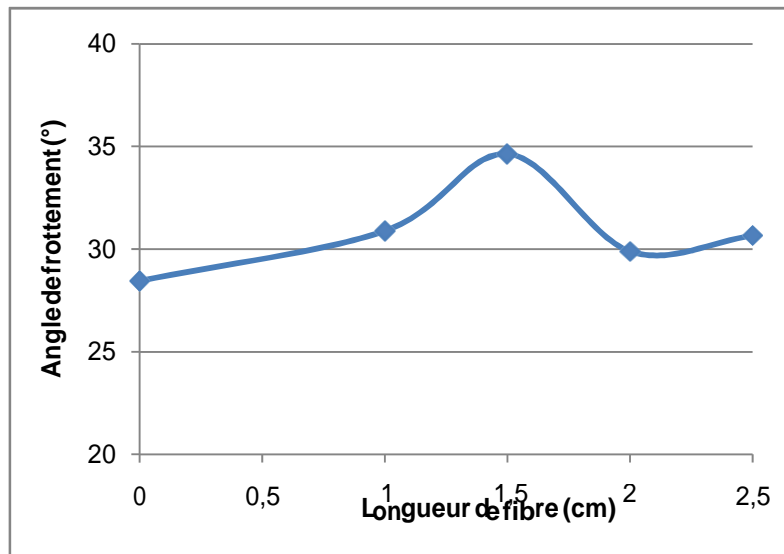
La figure IV.26 montre la variation de la cohésion en fonction des longueurs d'alfa avec 0.25% d'ajout et une orientation horizontale.



**Figure IV.26 :** La cohésion en fonction des longueurs d'Alfa de 0.25% (direction horizontale).

D'après la figure IV.26 la cohésion augmente avec les différentes longueurs sauf à 1.5 cm (presque la même) par rapport au sol non renforcé. Cette augmentation due à l'effet d'accrochage qu'il assure par les longueurs ; en effet, augmente la liaison de contact (au plan de cisaillement). On ne trouve pas une explication précise pour l'observation citée précédemment à 1.5 cm, peut être dû à une erreur dans l'exécution de l'essai (malgré qu'on a été répété cet essai plusieurs fois). L'ajout de 2.5 cm d'alfa de 0.25% augmente la cohésion 9.5 fois.

La figure IV.27 présente la variation d'angle de frottement en fonction des différents pourcentages d'Alfa dans la direction horizontale.



**Figure IV.27:** Angle de frottement en fonction de longueur d'Alfa de 0,25%(direction horizontale).

D'après la figure IV.27 l'angle de frottement augmente avec les différentes longueurs d'alfa (0,25%) par rapport au sol non renforcé. Cette augmentation est due à l'augmentation de l'interaction entre les particules de mélange (au plan de cisaillement). L'ajout de 1,5 cm d'alfa (0,25%) augmente l'angle de frottement 1,14 fois.

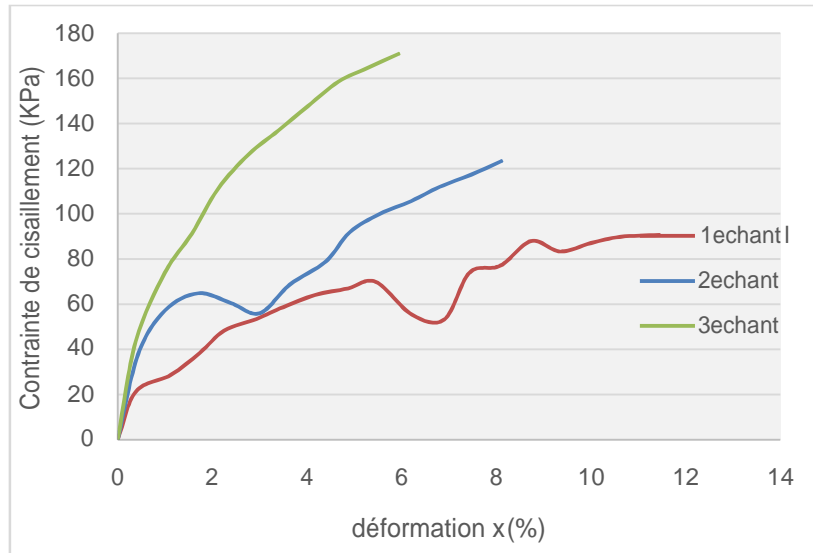
D'après les observations, la résistance de sol est plus élevée à 2,5 cm d'alfa, donc c'est la longueur optimale recherchée.

#### IV.4.2. Direction inclinée à 45°:

##### IV.4.2.1 Différents pourcentage d'Alfa de 1 cm :

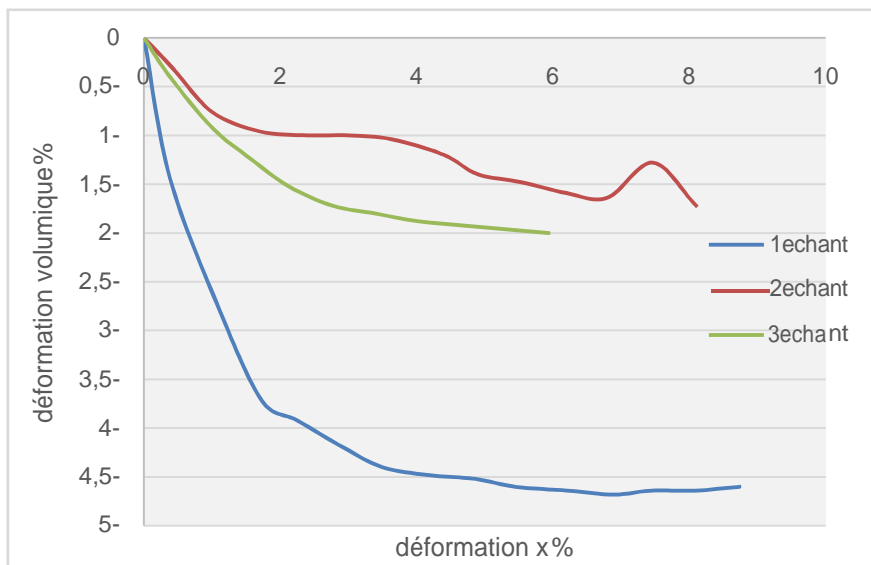
###### IV.4.2.1.a. Essai n°6 :

La figure IV.28 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0,25 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction inclinée à 45° pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



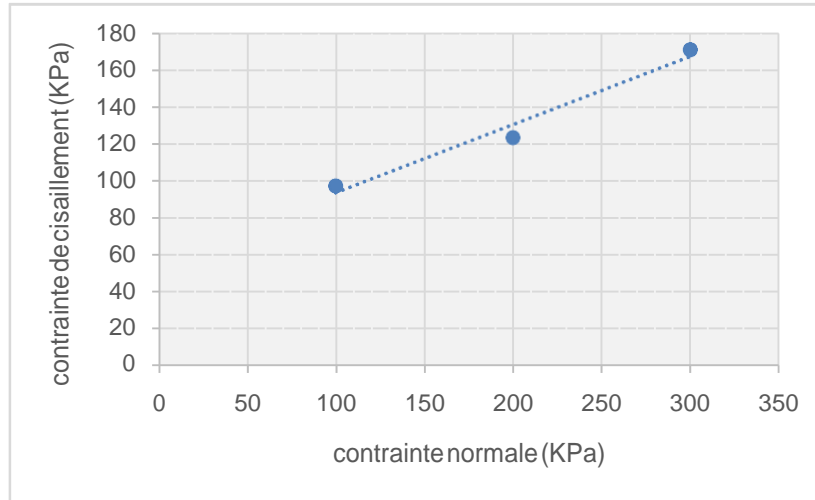
**Figure IV.28 :** Courbe de cisaillement de l'essai 6.

La figure IV.29 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.29 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 6.

La figure IV.30 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 1 cm » dans la direction inclinée à 45°.

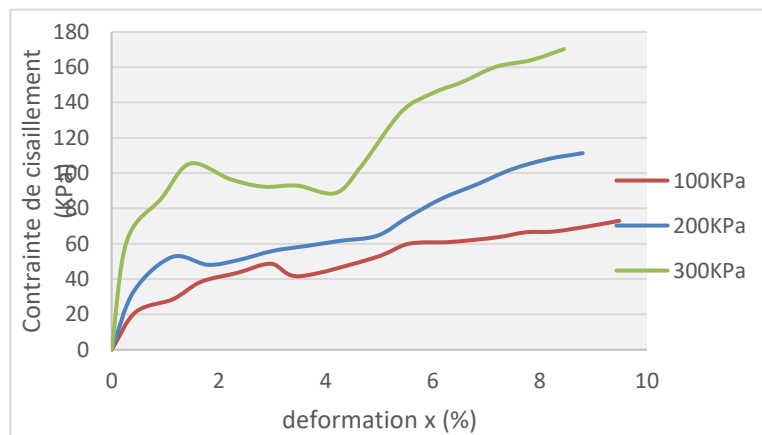


**Figure IV.30 :** Courbe intrinsèque de l'essai 6.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.19). La cohésion égale **56.96 KPa** et l'angle de frottement égal **20.15°**.

#### IV.4.2.1.b. Essai n°7 :

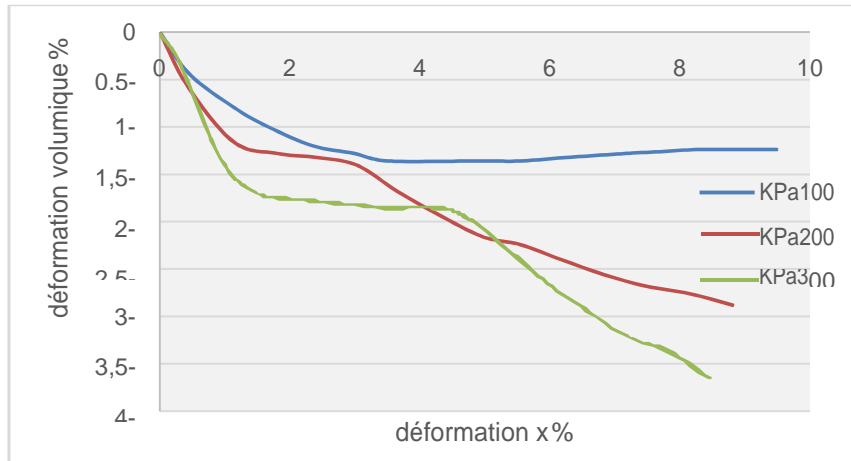
La figure IV.31 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.5 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction inclinée à 45° pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.31 :** Courbe de cisaillement de l'essai 7.

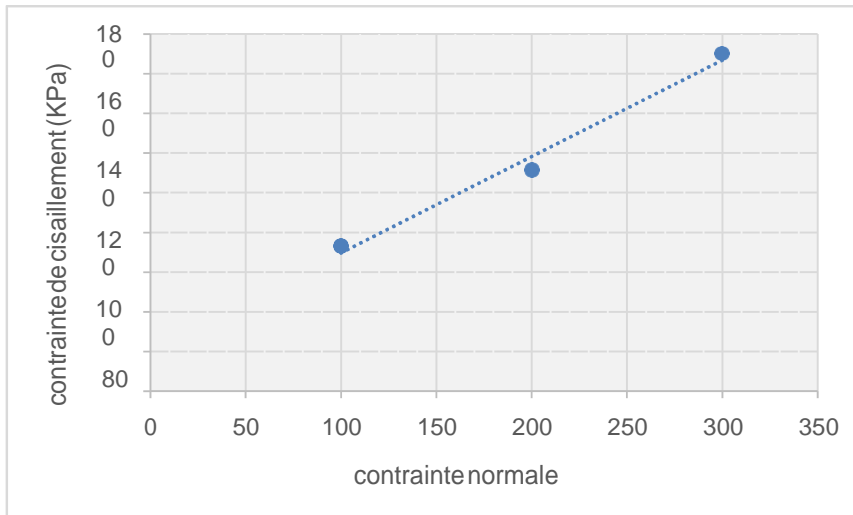
La figure IV.32 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.





**Figure IV.32 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l’essai 7.

La figure IV.33 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.5% d’Alfa de 1 cm » dans la direction inclinée à 45°.

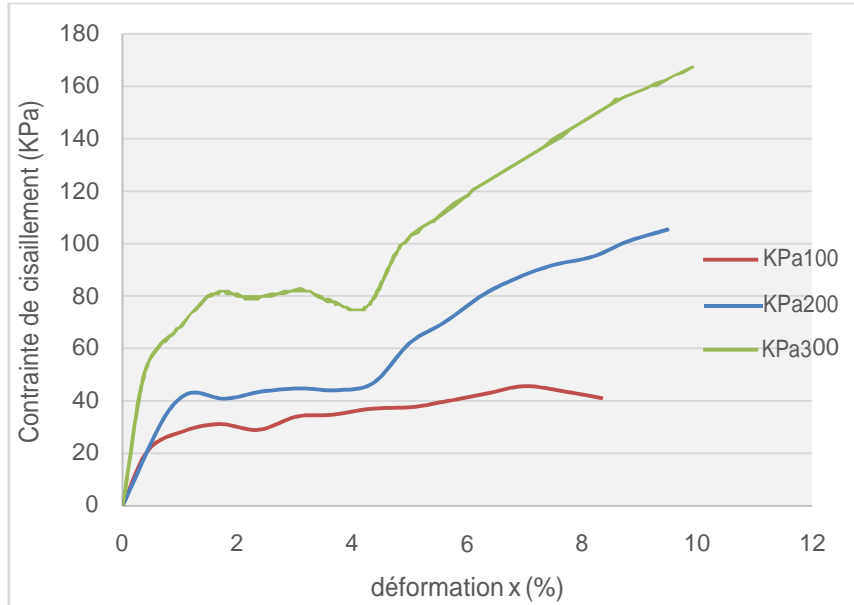


**Figure IV.33 :** Courbe intrinsèque de l’essai 7.

D’après la courbe intrinsèque (figure IV.33). La cohésion égale **21.01 KPa** et l’angle de frottement égal **25.87°**.

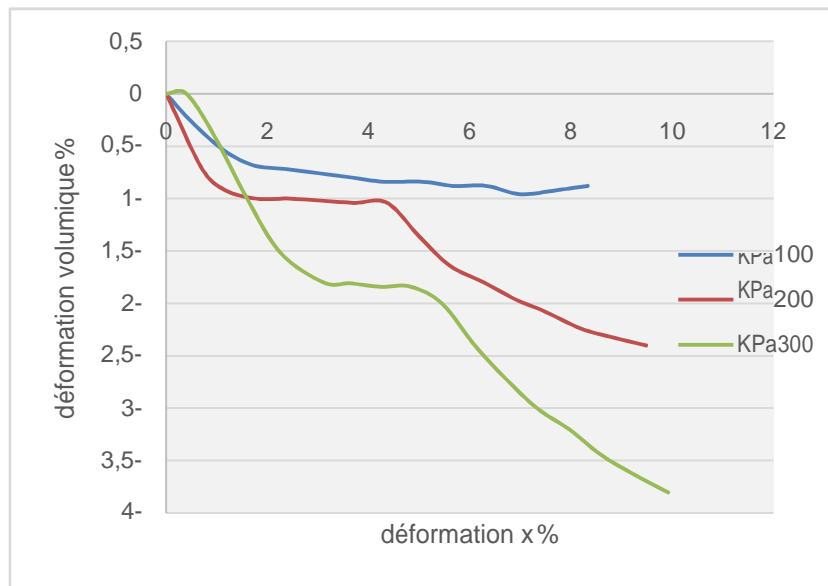
**IV.4.2.1.c. Essai n°8 :**

La figure IV.34 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.75 % d’Alfa de 1 cm » dans la direction inclinée à 45° pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



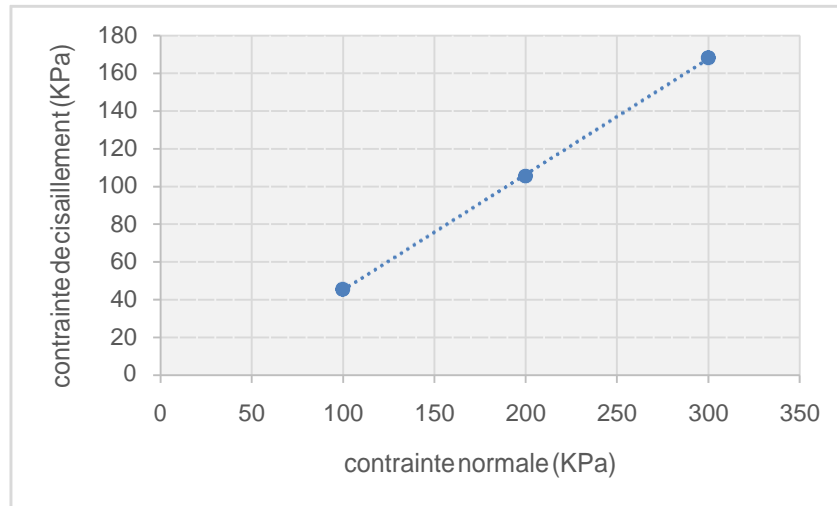
**Figure IV.34 :** Courbe de cisaillement de l'essai 8.

La figure IV.35 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.35 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 8.

La figure IV.36 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.75% d'Alfa de 1 cm » dans la direction inclinée à 45°.

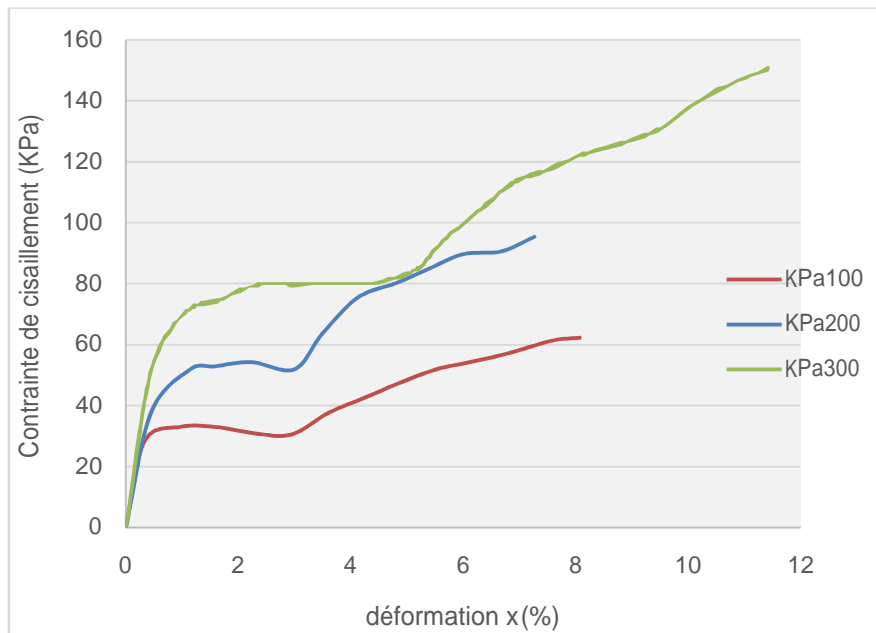


**Figure IV.36 :** Courbe intrinsèque de l'essai 8.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.36). La cohésion égale **15.17 KPa** et l'angle de frottement égal **31.38°**.

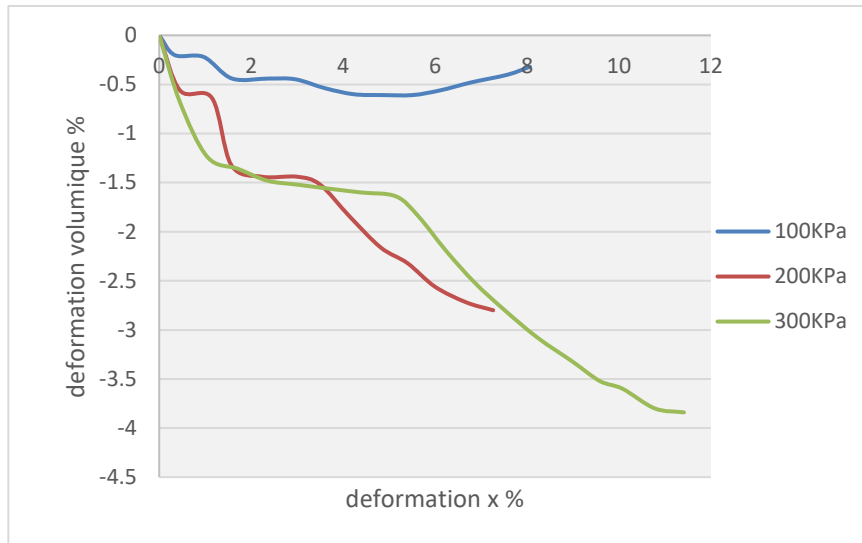
#### IV.4.2.1.d. Essai n°9 :

La figure IV.37 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 1 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction inclinée à 45° pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



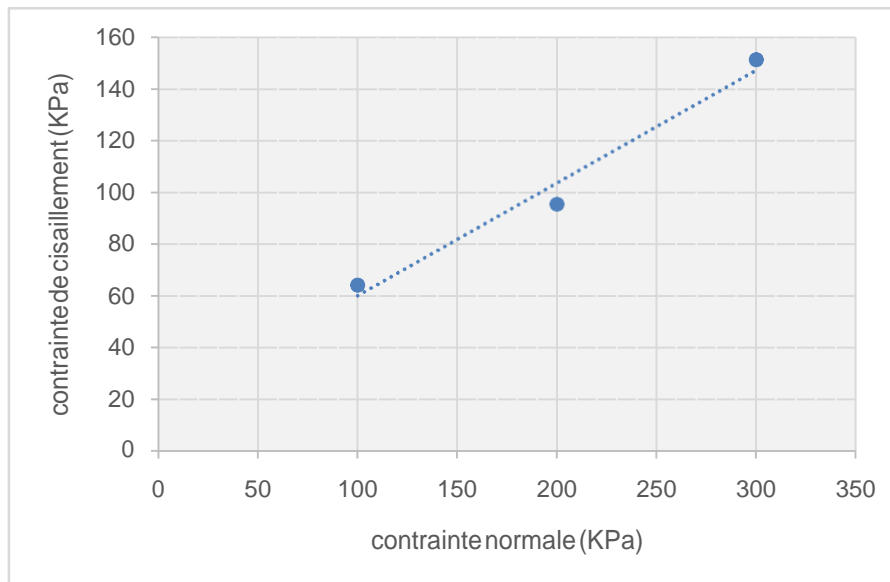
**Figure IV.37 :** Courbe de cisaillement de l'essai 9.

La figure IV.38 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.38 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 9.

La figure IV.39 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 1% d'Alfa de 1 cm » dans la direction inclinée à 45°.



**Figure IV.39 :** Courbe intrinsèque de l'essai 9.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.36). La cohésion égale **16.68 KPa** et l'angle de frottement égal **23.46°**.

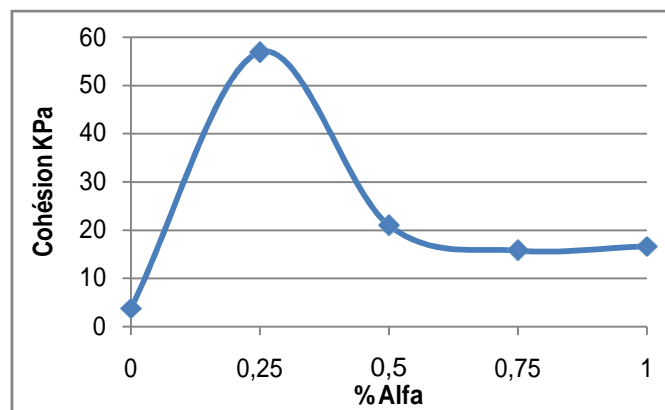
#### IV.4.2.1.e. Récapitulatifs des résultats :

Le tableau IV.4 donne les résultats obtenus par l'ajout des différents pourcentages d'Alfa (0.25, 0.5, 0.75 et 1 %) de 1 cm dans la direction inclinée à 45°.

**Tableau IV.4 :** Récapitulatif des résultats obtenus par l'ajout des % d'Alfa (direction inclinée).

	Pourcentage (%)	Cohésion (KPa)	Angle de frottement (°)	Contrainte de cisaillement maximal (KPa)		
				100	200	300
Essai n°1	0	3,78	28,46	52,22	124,00	160,77
Essai n°6	0.25	56,96	20,15	97,26	123,32	170,68
Essai n°7	0.5	21,01	25,87	73,04	111,32	170,22
Essai n°8	0.75	15,77	31,38	45,70	105,38	167,75
Essai n°9	1	16,68	23,46	64,22	95,39	155,83

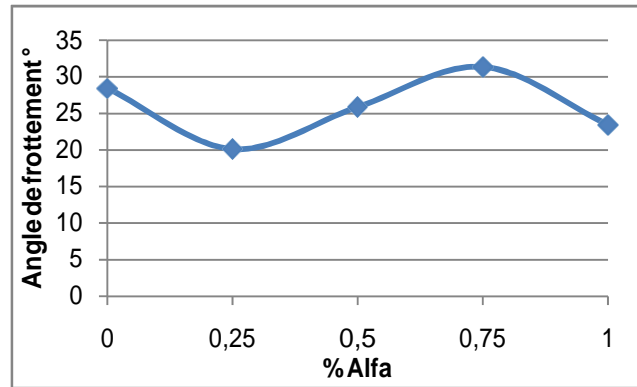
La figure IV.40 montre la variation de la cohésion en fonction des % de 1 cm d'Alfa avec une orientation inclinée à 45°.



**Figure IV.40 :** La cohésion en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction inclinée).

D'après la figure IV.40 la cohésion augmente avec les différents pourcentages d'ajout d'alfa par rapport au sol non renforcé. L'ajout des fibres crée une liaison élevée entre les grains solides de mélange. L'ajout de 0.25 % d'alfa augmente la cohésion 15 fois.

La figure IV.41 présente la variation d'angle de frottement en fonction des différents pourcentages d'Alfa dans la direction inclinée à 45°.



**Figure IV.41 :** Angle de frottement en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction inclinée).

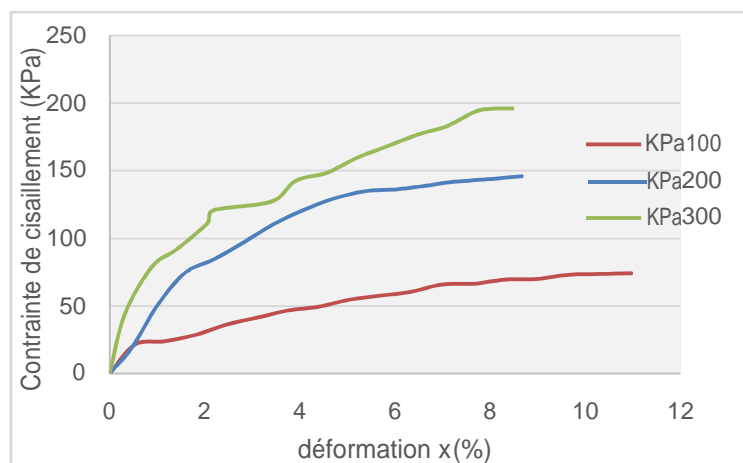
D'après la figure IV.41 l'angle de frottement augmente avec les différents pourcentages d'ajout d'alfa par rapport au sol non renforcé, sauf à 0.25% l'angle de frottement diminue puisque les forces de la cohésion sont très élevées, donc l'interaction est très rigide dans ce pourcentage d'ajout. L'ajout de 0.75 % d'alfa augmente l'angle de frottement 1,1 fois.

D'après les observations, la résistance de sol est plus élevée au pourcentage d'ajout de 0.25 %, donc c'est le pourcentage optimal recherché.

#### IV.4.2.2. Les différentes longueurs d'Alfa (0.25%) :

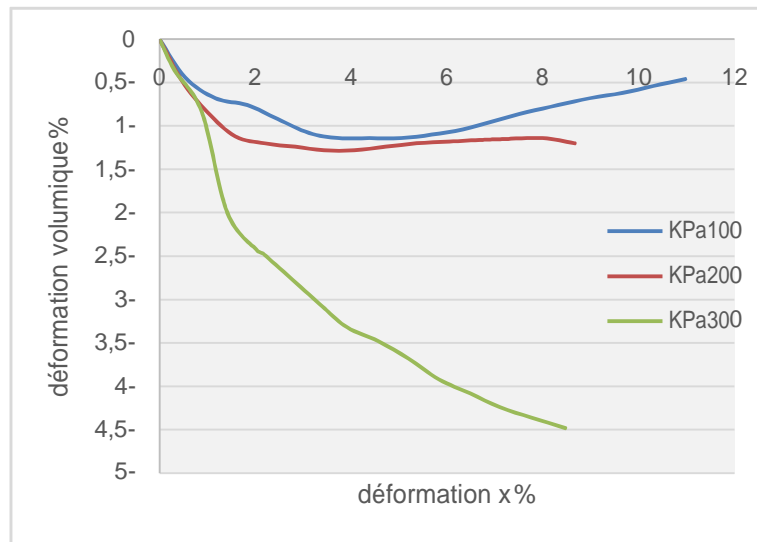
##### IV.4.2.2.a. Essai n°23 :

La figure IV.42 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 1.5 cm » dans la direction inclinée à 45° pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



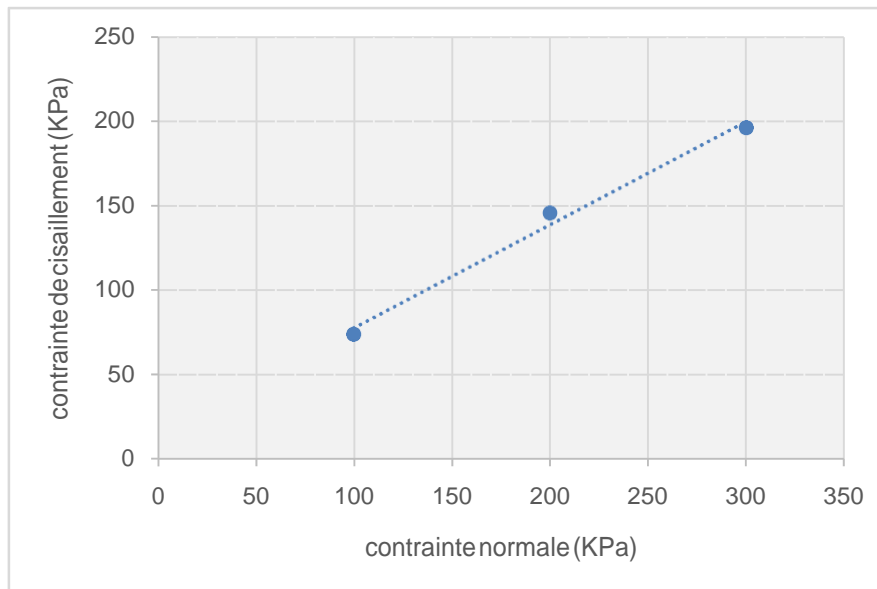
**Figure IV.42 :** Courbe de cisaillement de l'essai 23.

La figure IV.43 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.43** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 23.

La figure IV.44 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 1.5 cm » dans la direction inclinée

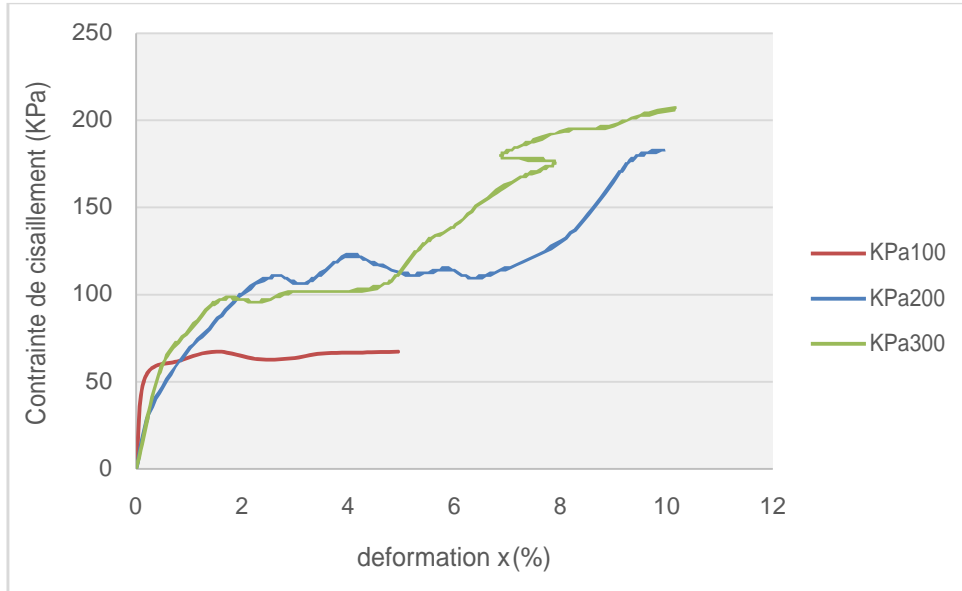


**Figure IV.44** : Courbe intrinsèque de l'essai 23.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.44). La cohésion égale **16.91 KPa** et l'angle de frottement égal **36.53°**.

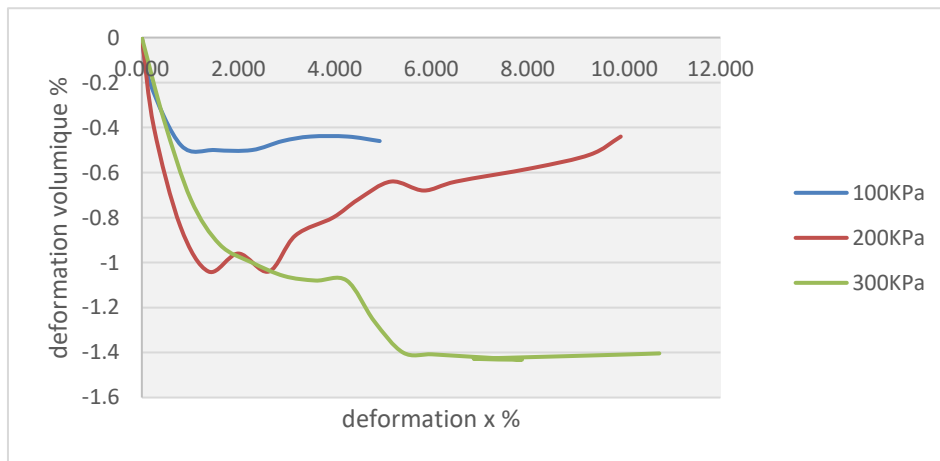
#### IV.4.2.2.b. Essai n°22 :

La figure IV.45 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 2 cm » dans la direction inclinée à 45° pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.45 :** Courbe de cisaillement de l'essai 22.

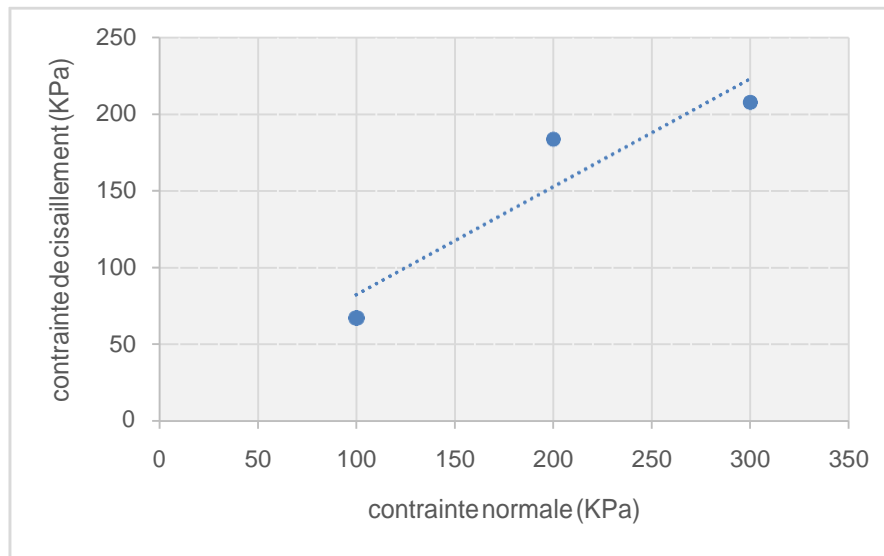
La figure IV.46 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.46 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 22.



La figure IV.47 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 2 cm » dans la direction inclinée

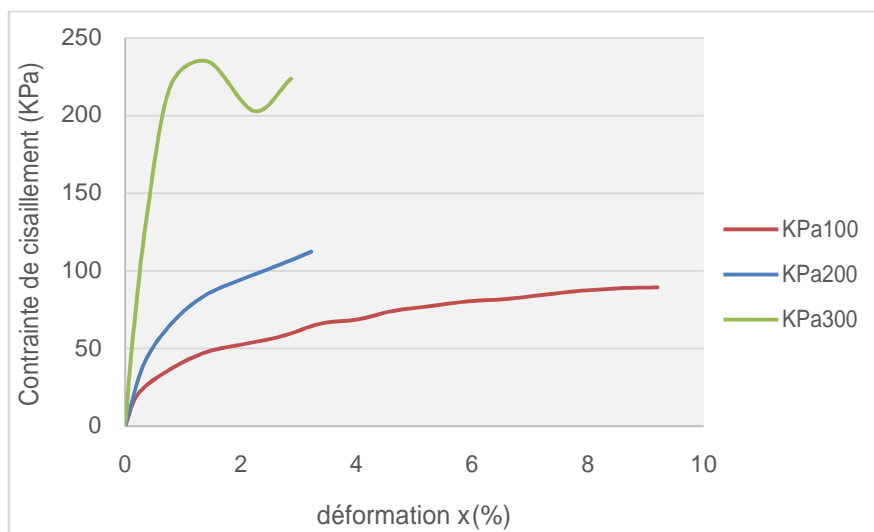


**Figure IV.47** : Courbe intrinsèque de l'essai 22.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.44). La cohésion égale **12.27 KPa** et l'angle de frottement égal **37.05°**.

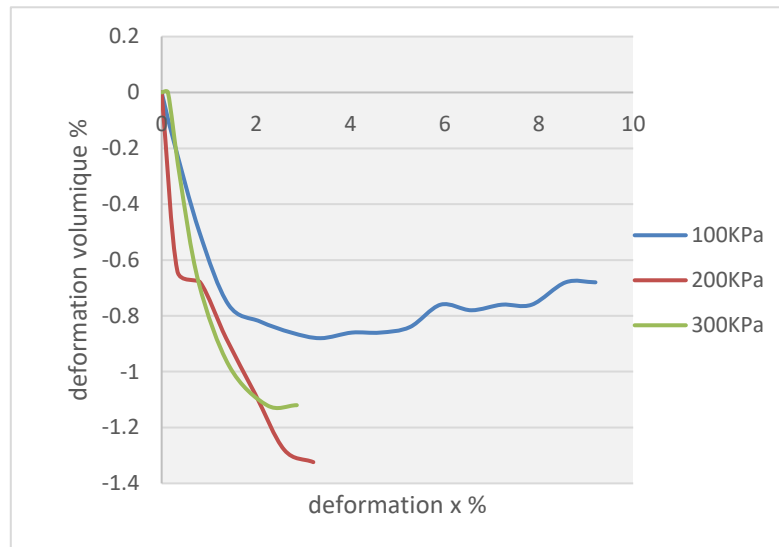
#### IV.4.2.2.c. Essai n°21 (Sable + 0.25% fibre d'alfa «2.5 cm») :

La figure IV.48 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 2.5 cm » dans la direction inclinée à 45° pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



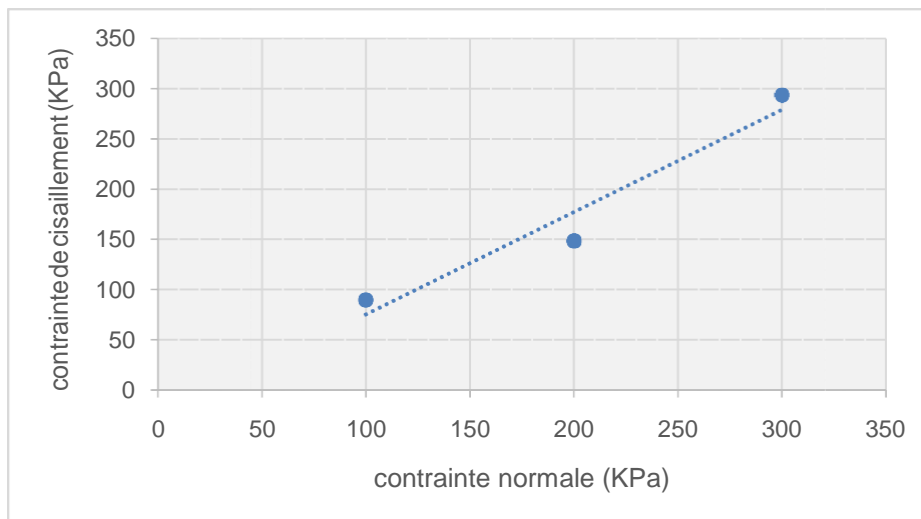
**Figure IV.48** : Courbe de cisaillement de l'essai 21.

La figure IV.49 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.49** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 21.

La figure IV.50 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 2.5 cm » dans la direction inclinée.



**Figure IV.50** : Courbe intrinsèque de l'essai 21.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.50). La cohésion égale **26.73 KPa** et l'angle de frottement égal **28.05°**.

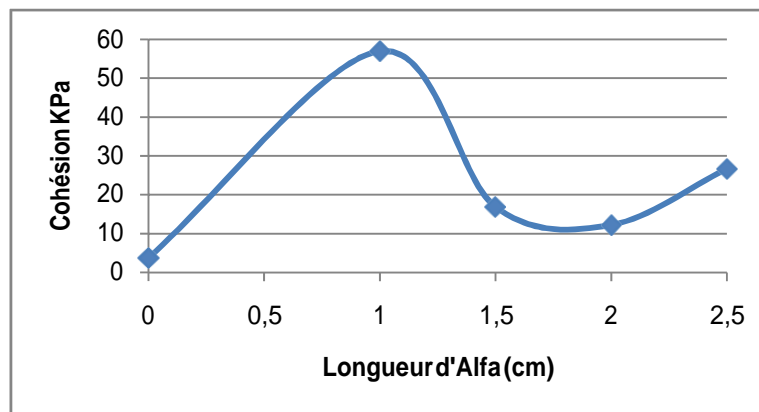
#### IV.4.1.2.d. Récapitulatifs des résultats :

Le tableau IV.5 donne les résultats obtenus par l'ajout de 0.25% des différentes longueurs d'Alfa (1, 1.5, 2 et 2.5 cm) dans la direction inclinée à 45°.

**Tableau IV.5 :** Récapitulatif des résultats obtenus par l'ajout des longueurs de 0.25% d'Alfa (direction inclinée).

	Longueur (cm)	Cohésion (KPa)	Angle de frottement (°)	Contrainte de cisaillement maximal (KPa)		
				100	200	300
Essai n°3	1	56,96	20,15	97,26	123,32	170,68
Essai n°23	1.5	16,91	36,53	74,25	145,80	196,04
Essai n°22	2	12,27	37,05	67,13	183,51	207,60
Essai n°21	2.5	26,73	28,05	89,45	148,48	293,25

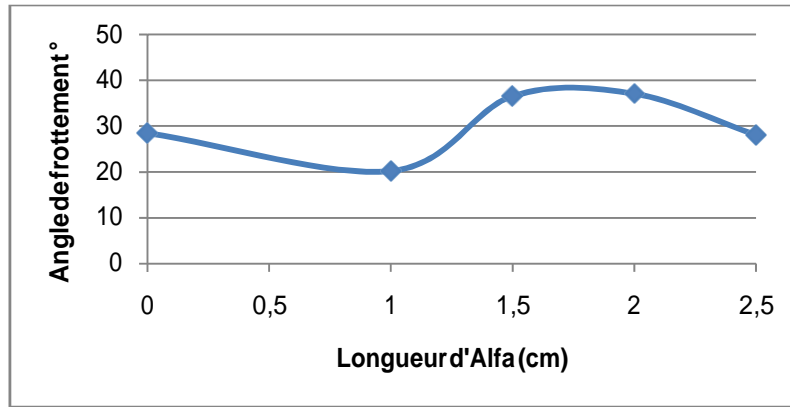
La figure IV.51 montre la variation de la cohésion en fonction des longueurs d'alfa avec 0.25% d'ajout et une orientation inclinée à 45°.



**Figure IV.51 :** La cohésion en fonction des longueurs d'Alfa de 0.25% (direction Inclinée).

D'après la figure IV.51 la cohésion augmente avec les différentes longueurs par rapport au sol non renforcé. Cette augmentation due à l'effet d'accrochage qu'il assure par les longueurs ; en effet, il a été augment la liaison de contact (au plan de cisaillement). L'ajout de 1 cm d'alfa de 0.25% augmente la cohésion 15 fois.

La figure IV.52 présente la variation d'angle de frottement en fonction des différents pourcentages d'Alfa dans la direction inclinée.



**Figure IV.52:** Angle de frottement en fonction de longueur d'Alfa de 0.25%(direction inclinée).

D'après la figure IV.52 l'angle de frottement augmente avec les différentes longueurs d'alfa (0.25%) par rapport au sol non renforcé. Sauf à 0.25% on observe une diminution due à la grande cohésion (interaction très rigide entre les particules solides). L'ajout de 2 cm d'alfa (0.25%) augmente l'angle de frottement 1,3 fois.

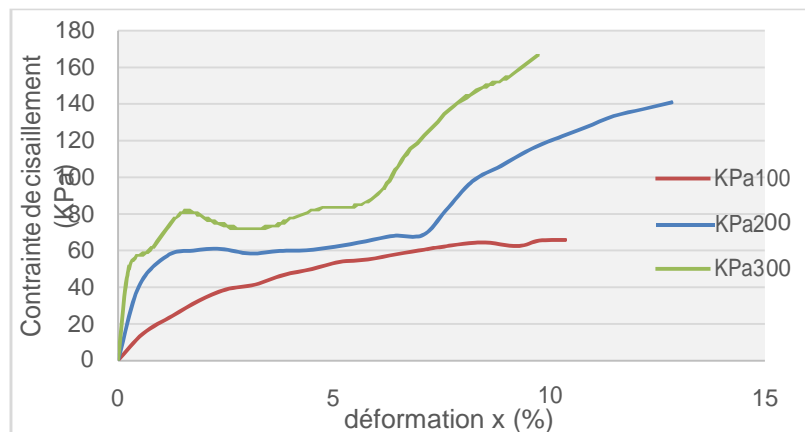
D'après les observations, la résistance de sol est plus élevée à 1 cm d'alfa, donc c'est la longueur optimale recherchée.

#### IV.4.3. Direction verticale :

##### IV.4.3.1 Différents pourcentage d'Alfa de 1 cm :

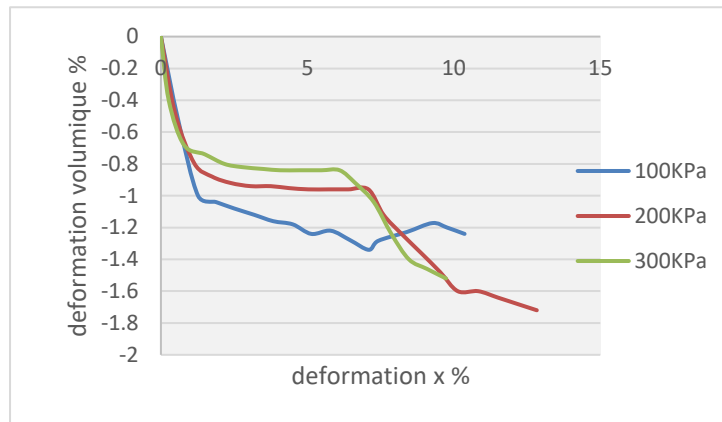
##### IV.4.3.1.a. Essai n°10:

La figure IV.53 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction verticale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



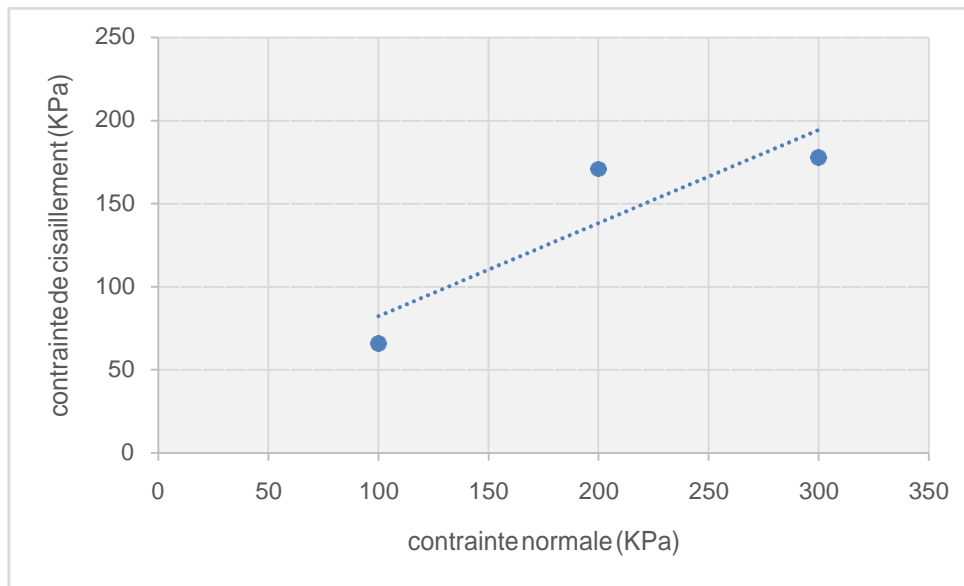
**Figure IV.53 :** Courbe de cisaillement de l'essai 10.

La figure IV.54 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.54 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 10.

La figure IV.55 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 1 cm » dans la direction verticale.

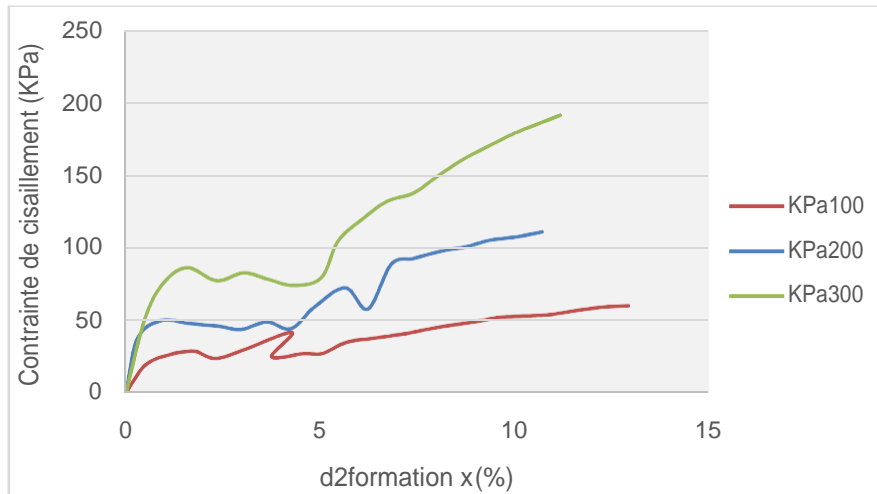


**Figure IV.55 :** Courbe intrinsèque de l'essai 10.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.55). La cohésion égale **26.18 KPa** et l'angle de frottement égal **29.25°**.

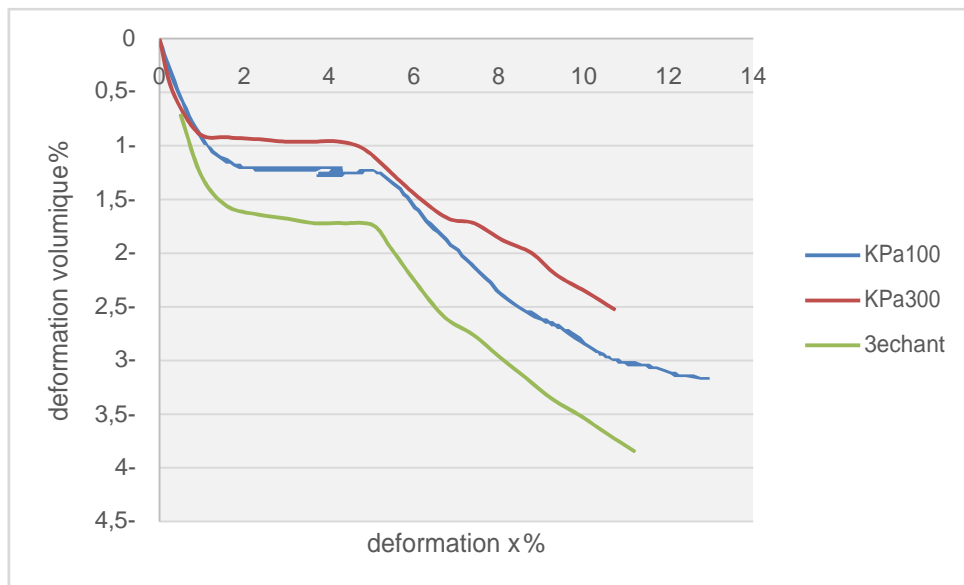
#### IV.4.3.1.b. Essai n°11 :

La figure IV.56 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.5 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction verticale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



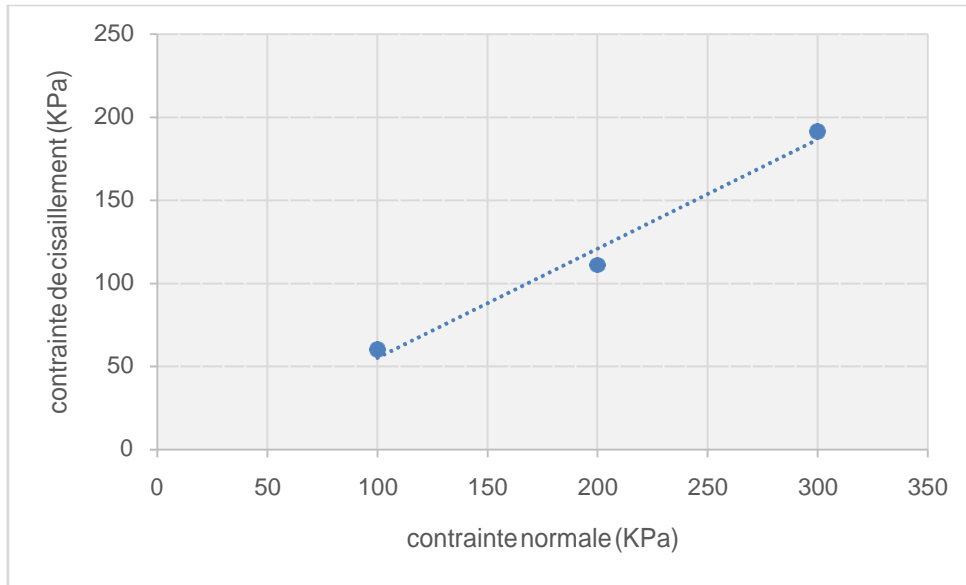
**Figure IV.56 :** Courbe de cisaillement de l'essai 11.

La figure IV.57 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.57 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 11.

La figure IV.58 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.5% d'Alfa de 1 cm » dans la direction verticale.

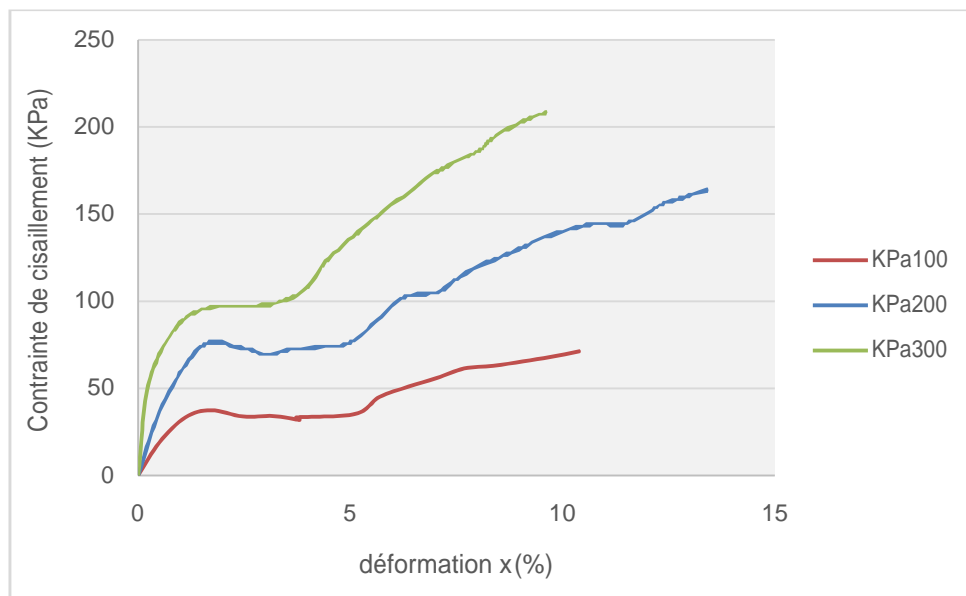


**Figure IV.58** : Courbe intrinsèque de l'essai 11.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.58). La cohésion égale **10.31 KPa** et l'angle de frottement égal **33.26°**.

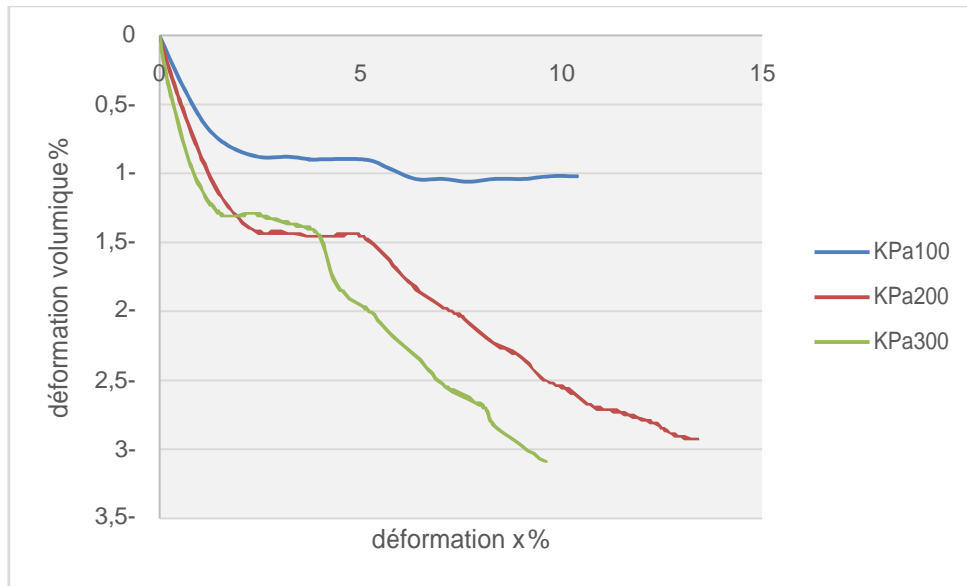
#### IV.4.3.1.c. Essai n°12 :

La figure IV.59 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.75 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction verticale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



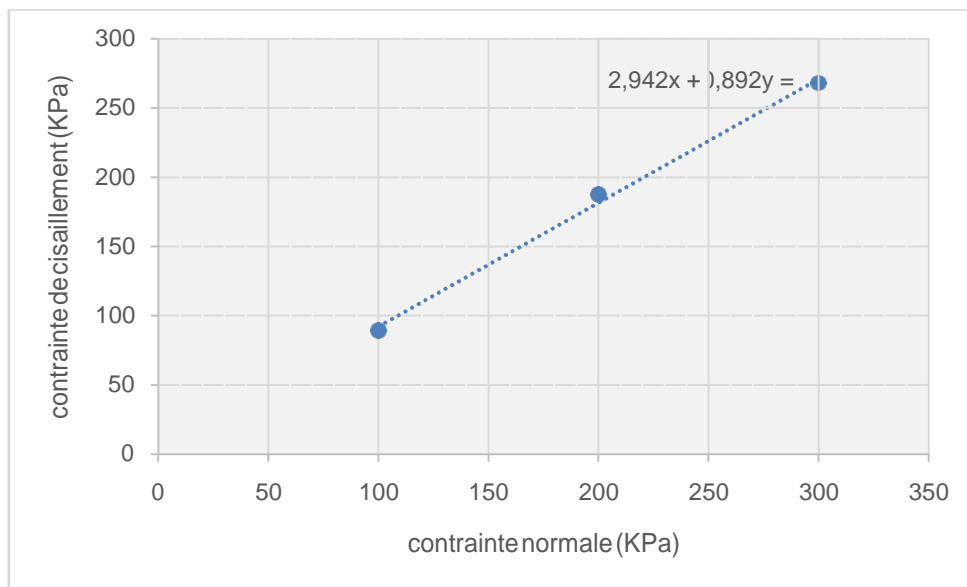
**Figure IV.59** : Courbe de cisaillement de l'essai 12.

La figure IV.60 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.60** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 12.

La figure IV.61 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.75% d'Alfa de 1 cm » dans la direction verticale.



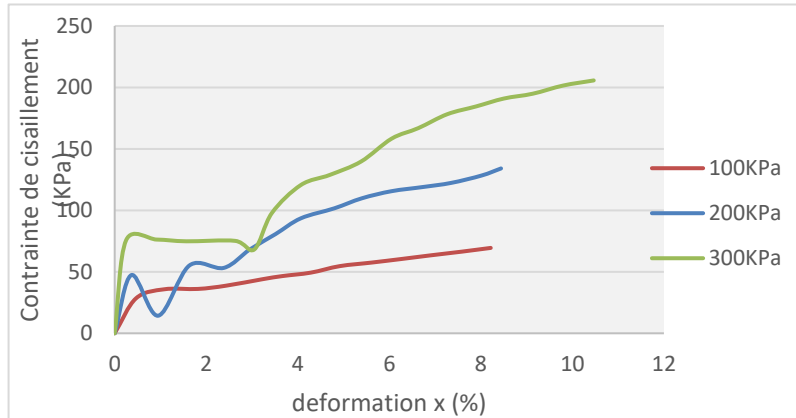
**Figure IV.61** : Courbe intrinsèque de l'essai 12.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.61). La cohésion égale **2.942 KPa** et l'angle de frottement égal **41.73°**.



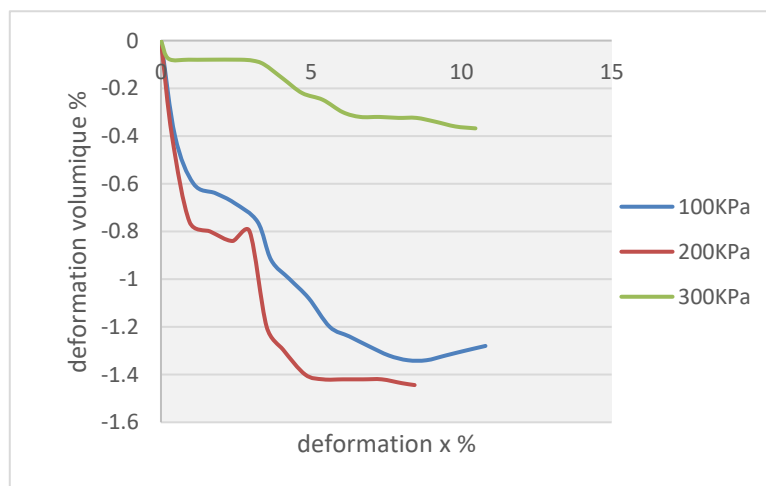
#### IV.4.3.1.d. Essai n°13 :

La figure IV.62 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 1 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction verticale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



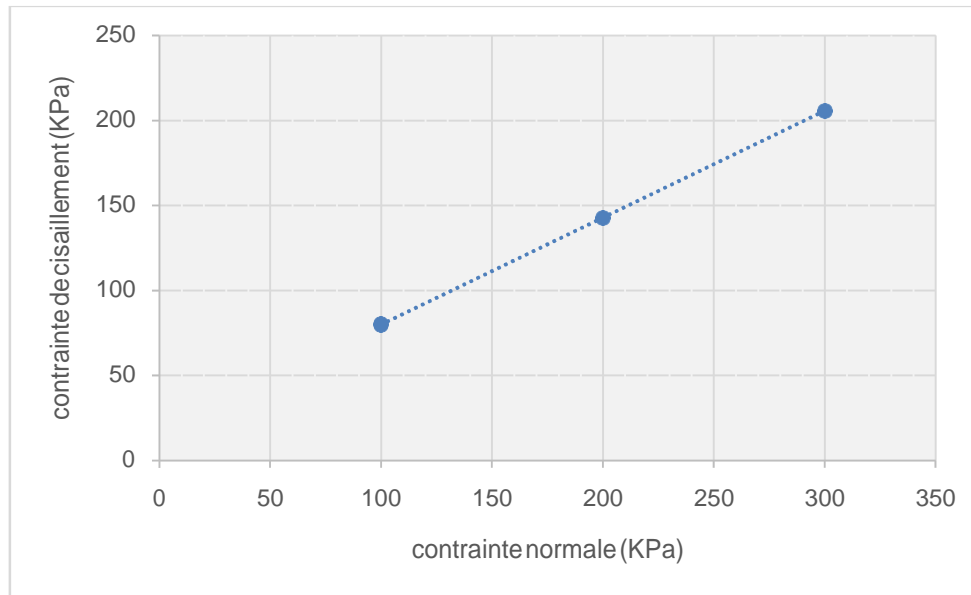
**Figure IV.62 :** Courbe de cisaillement de l'essai 13.

La figure IV.63 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.63 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 13.

La figure IV.64 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 1% d'Alfa de 1 cm » dans la direction verticale.



**Figure IV.64** : Courbe intrinsèque de l'essai 13.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.64). La cohésion égale **17.03 KPa** et l'angle de frottement égal **32.13°**.

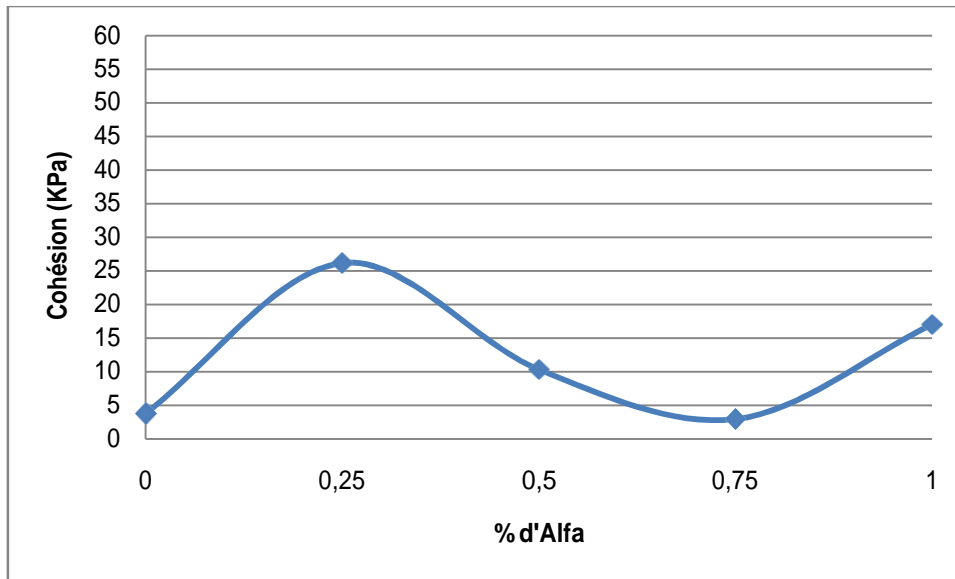
#### IV.4.3.1.e. Récapitulatifs des résultats :

Le tableau IV.6 donne les résultats obtenus par l'ajout des différents pourcentages d'Alfa (0.25, 0.5, 0.75 et 1 %) de 1 cm dans la direction verticale à 45°.

**Tableau IV.6** : Récapitulatif des résultats obtenus par l'ajout des % d'Alfa (direction verticale).

	Pourcentage (%)	Cohésion (KPa)	Angle de frottement (°)	Contrainte de cisaillement maximal (KPa)		
				100	200	300
Essai n°1	0	3,78	28,46	52,22	124,00	160,77
Essai n°10	0.25	26,18	29,25	65,85	170,97	177,91
Essai n°11	0.5	10,31	33,26	60,20	111,07	191,41
Essai n°12	0.75	2,94	41,73	89,27	187,37	267,82
Essai n°13	1	17,03	32,13	79,94	142,75	205,70

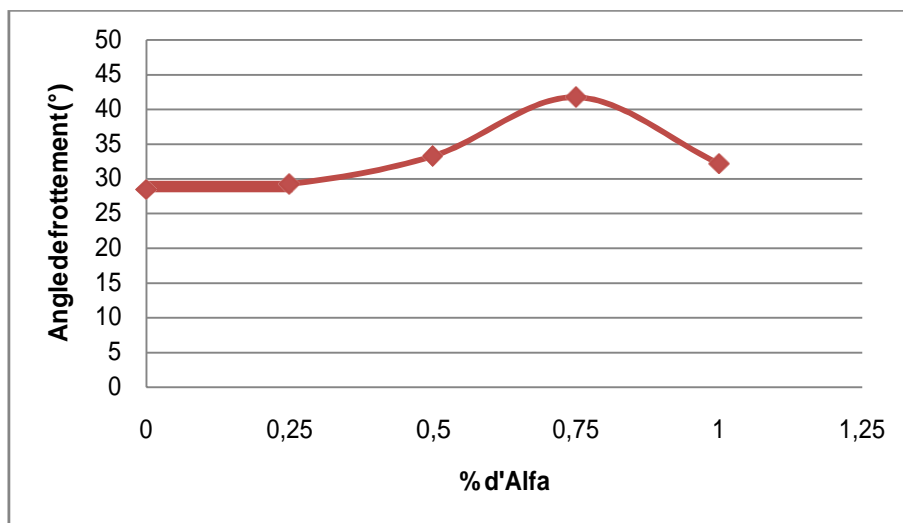
La figure IV.65 montre la variation de la cohésion en fonction des % de 1 cm d'Alfa avec une orientation verticale.



**Figure IV.65 :** La cohésion en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction verticale).

D'après la figure IV.65 la cohésion augmente avec les différents pourcentages d'ajout d'alfa (sauf l'ajout de 0.75% presque la même) par rapport au sol non renforcé. L'ajout des fibres crée une liaison élevée entre les grains solides de mélange. L'ajout de 0.25 % d'alfa augmente la cohésion 6.92 fois.

La figure IV.66 présente la variation d'angle de frottement en fonction des différents pourcentages d'Alfa dans la direction verticale.



**Figure IV.66 :** Angle de frottement en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction verticale).

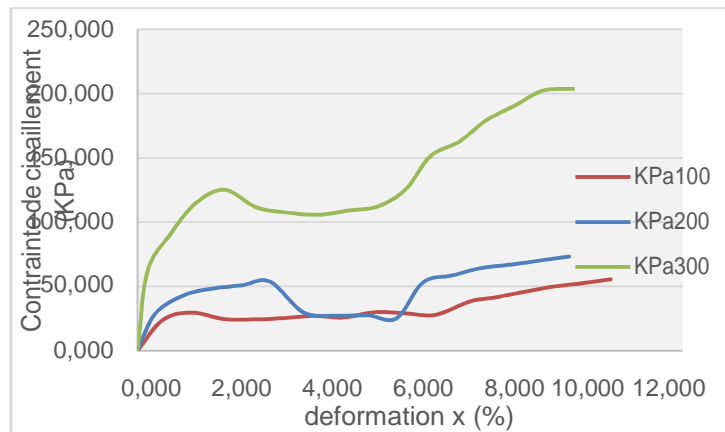
D'après la figure IV.66 l'angle de frottement augmente avec les différents pourcentages d'ajout d'alfa par rapport au sol non renforcé. L'ajout de 0.75 % d'alfa augmente l'angle de frottement 1,44 fois.

D'après les observations, la résistance de sol est plus élevée au pourcentage d'ajout de 0.25 %, donc c'est le pourcentage optimal recherché.

#### IV.4.3.2. Les différentes longueurs d'Alfa (0.25%) :

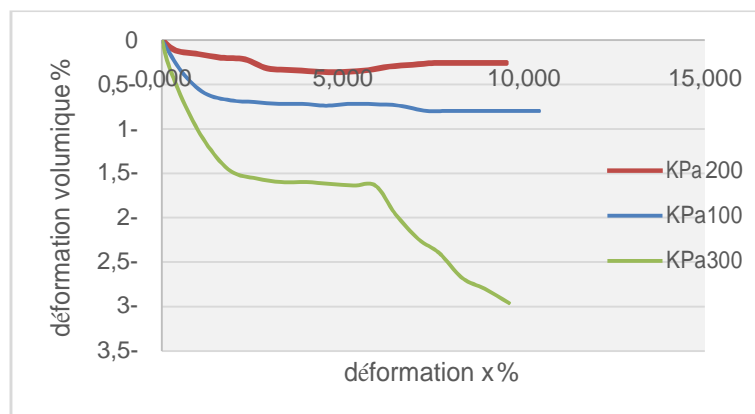
##### IV.4.3.2.a. Essai n°26 :

La figure IV.67 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 1.5 cm » dans la direction verticale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



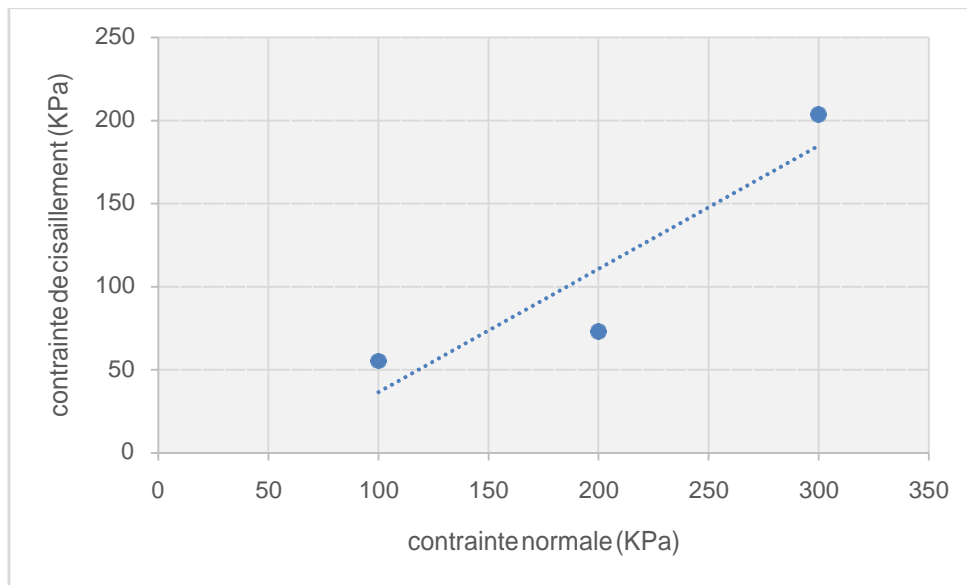
**Figure IV.67 :** Courbe de cisaillement de l'essai 26.

La figure IV.68 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.68 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 26.

La figure IV.69 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 1.5 cm » dans la direction verticale

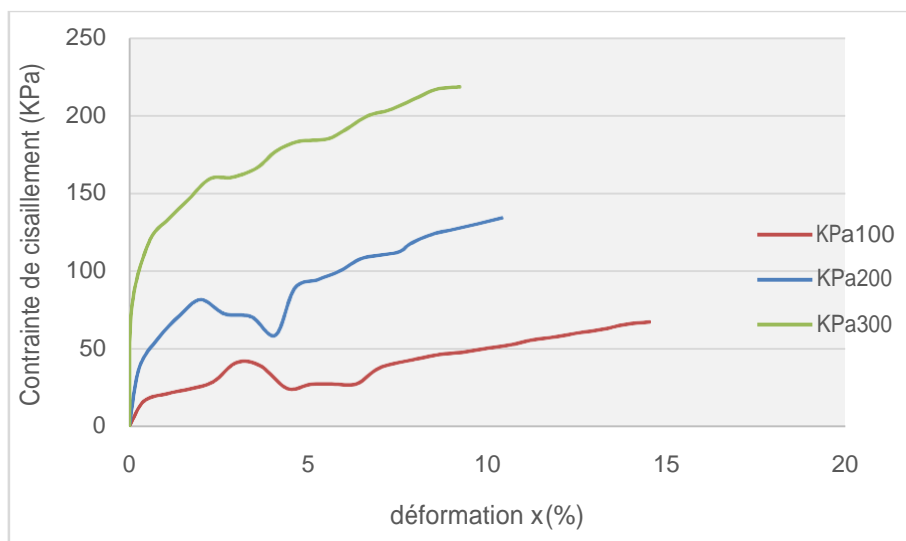


**Figure IV.69** : Courbe intrinsèque de l'essai 26.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.69). La cohésion égale **37.8 KPa** et l'angle de frottement égal **31.28°**.

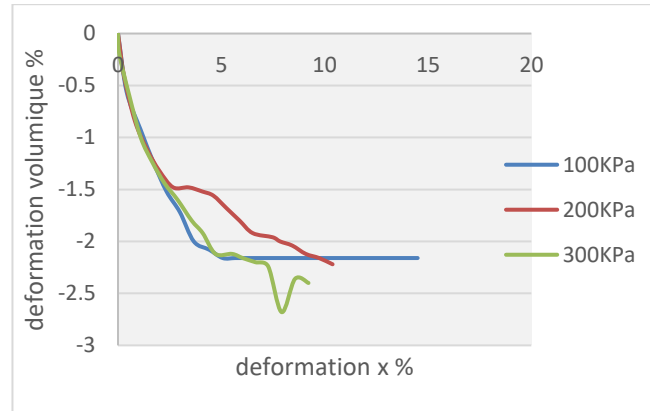
#### IV.4.3.2.b. Essai n°25 :

La figure IV.70 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 2 cm » dans la direction verticale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



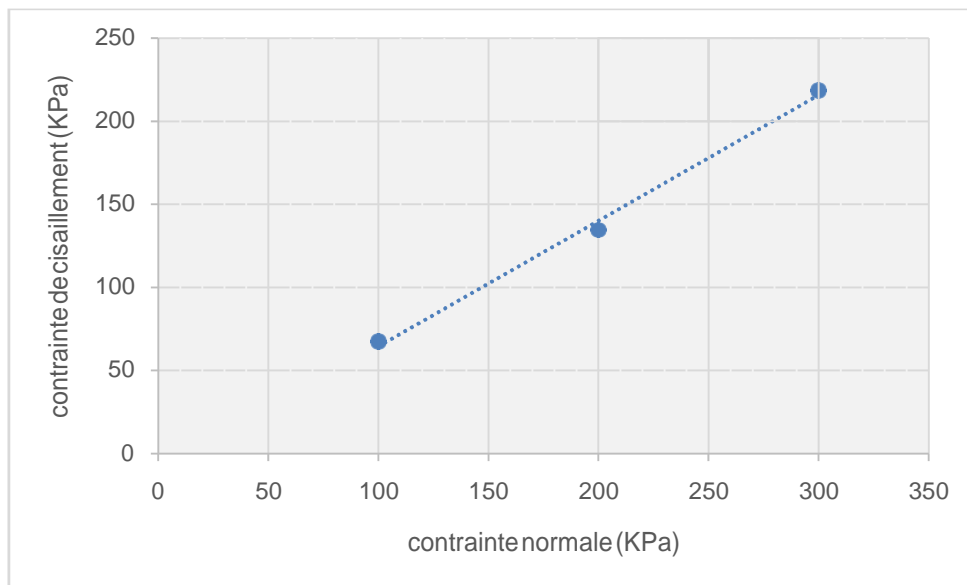
**Figure IV.70** : Courbe de cisaillement de l'essai 25.

La figure IV.71 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.71 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 25.

La figure IV.72 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 2 cm » dans la direction verticale

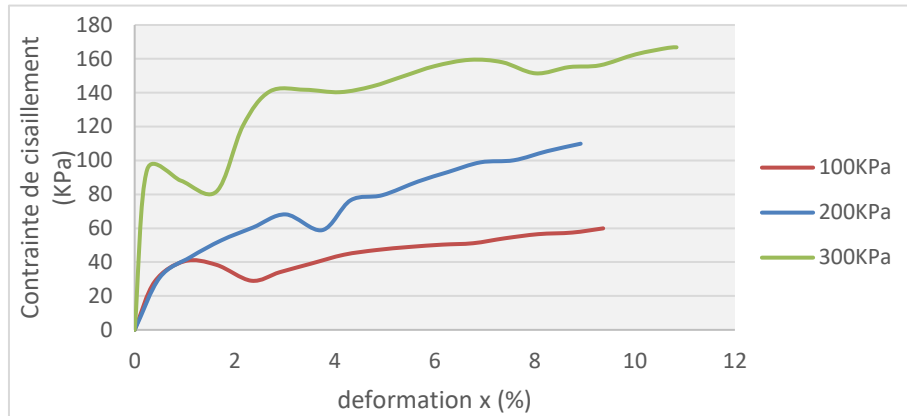


**Figure IV.72 :** Courbe intrinsèque de l'essai 25.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.72). La cohésion égale **11.01 KPa** et l'angle de frottement égal **37.05°**.

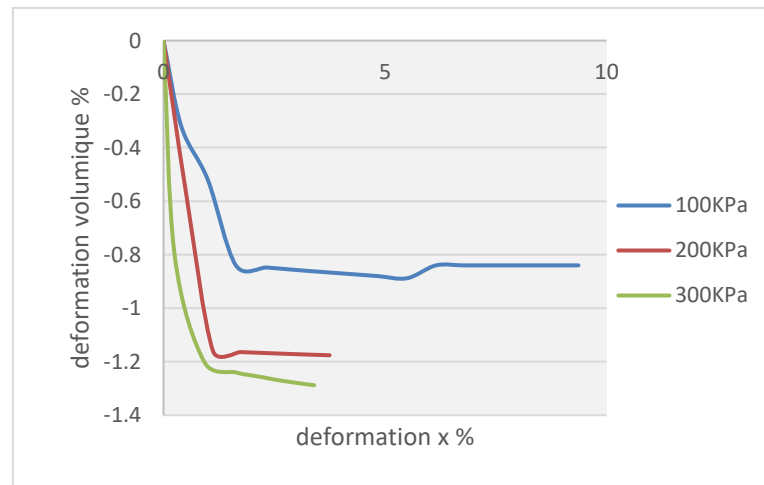
## IV.4.3.2.c. Essai n°24 :

La figure IV.73 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 2.5 cm » dans la direction verticale pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



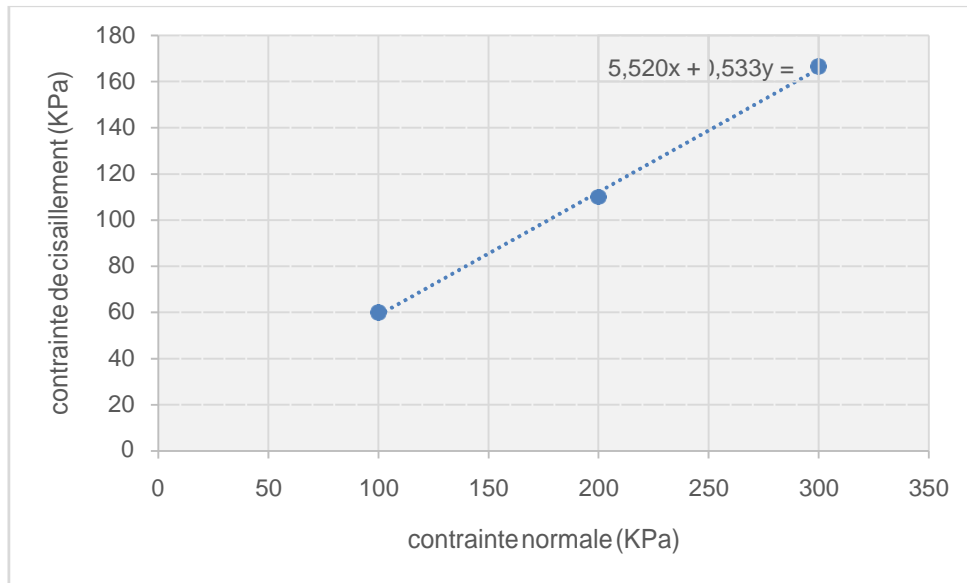
**Figure IV.73 :** Courbe de cisaillement de l'essai 24.

La figure IV.74 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.74 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 24.

La figure IV.75 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 2.5 cm » dans la direction verticale



**Figure IV.75 :** Courbe intrinsèque de l'essai 24.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.75). La cohésion égale **5.52 KPa** et l'angle de frottement égal **28.05°**.

#### IV.4.1.2.d. Récapitulatifs des résultats :

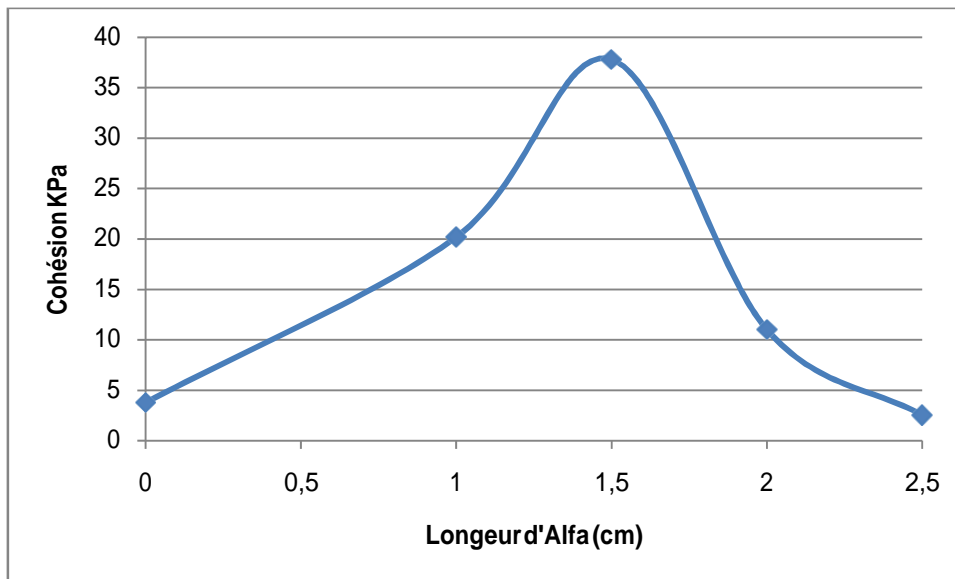
Le tableau IV.7 donne les résultats obtenus par l'ajout de 0.25% des différentes longueurs d'Alfa (1, 1.5, 2 et 2.5 cm) dans la direction verticale.

**Tableau IV.7 :** Récapitulatif des résultats obtenus par l'ajout des longueurs de 0.25% d'Alfa (direction verticale).

	Longueur (cm)	C (KPa)	$\Phi$ °	Contrainte de cisaillement maximal (KPa)		
				100	200	300
Essai n°4	1	20,18	29,25	65,85	170,97	177,91
Essai n°26	1.5	37,8	31,29	55,35	72,56	203,69
Essai n°25	2	11,01	35,06	67,38	134,37	218,47
Essai n°24	2.5	2,52	45,53	59,92	109,91	166,51

La figure IV.76 montre la variation de la cohésion en fonction des longueurs d'alfa avec 0.25% d'ajout et une orientation verticale.





**Figure IV.76 :** La cohésion en fonction des longueurs d'Alfa de 0.25% (direction verticale).

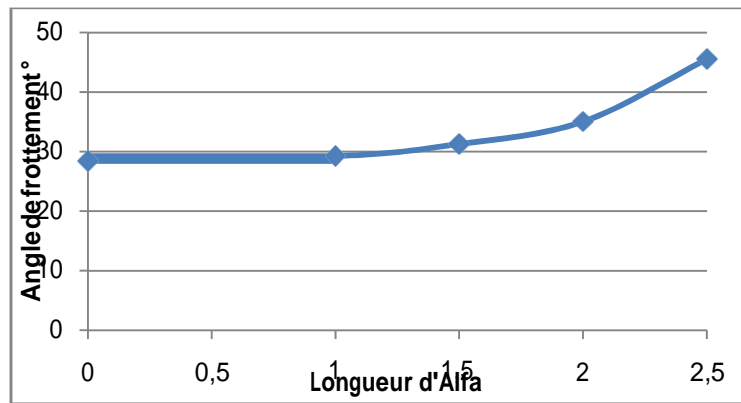
D'après la figure IV.76 la cohésion augmente fortement avec les différentes longueurs par rapport au sol non renforcé, jusqu'à 2 cm, on observe une chute dans la cohésion ; Cette diminution due à la rupture des fibres de 2 et 2.5 cm (voir la figure IV.77) par la force de cisaillement appliquée.



**Figure IV.77.** Déformation des fibres de 2 et 2.5 cm.

L'ajout de 1.5 cm d'alfa de 0.25% augmente la cohésion 10 fois.

La figure IV.78 présente la variation d'angle de frottement en fonction des différents pourcentages d'Alfa dans la direction verticale.



**Figure IV.78:** Angle de frottement en fonction de longueur d'Alfa de 0.25% (direction verticale).

D'après la figure IV.78 l'angle de frottement augmente avec les différentes longueurs d'Alfa par rapport au sol non renforcé. L'augmentation est très importante à 2 et 2.5 cm puisque la rupture des fibres crée des vides entre les particules solides. L'ajout de 2.5 cm d'Alfa (0.25%) augmente l'angle de frottement 1,6 fois.

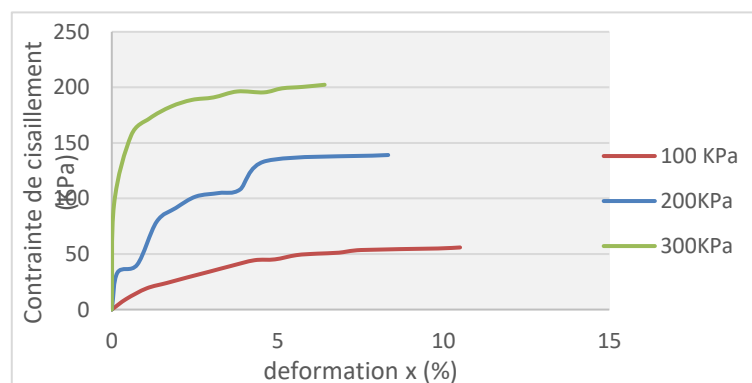
D'après les observations, la résistance de sol est plus élevée à 1.5 cm d'Alfa, donc c'est la longueur optimale recherchée.

#### IV.4.4. Direction aléatoire :

##### IV.4.4.1 Différents pourcentage d'Alfa de 1 cm :

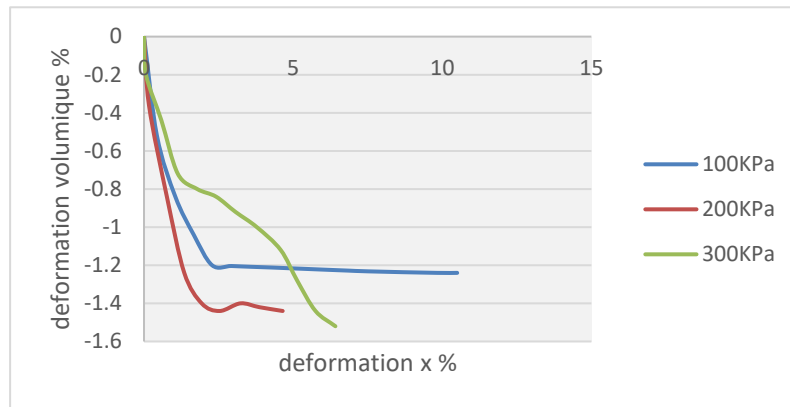
##### IV.4.4.1.a. Essai n°14 :

La figure IV.79 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.25 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction aléatoire pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



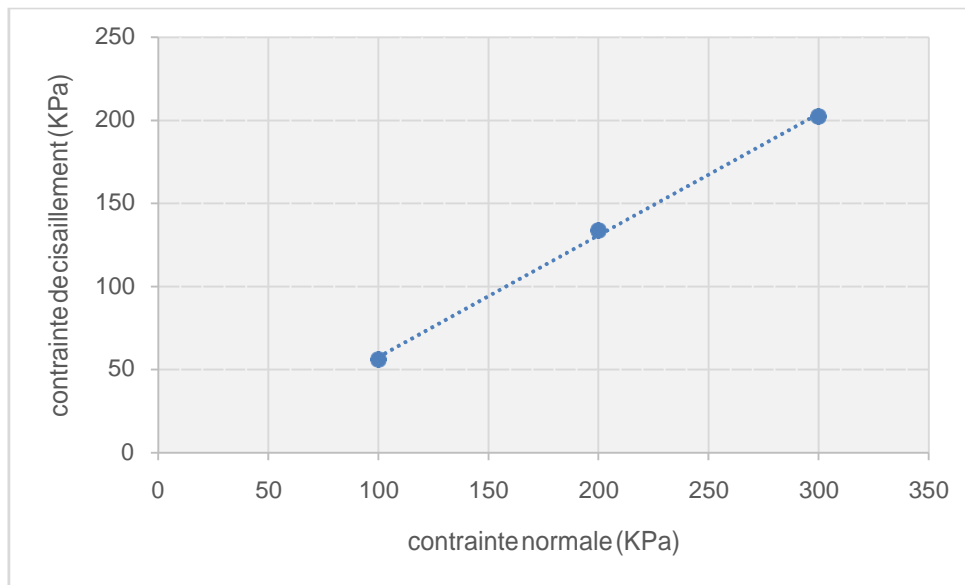
**Figure IV.79 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 14.

La figure IV.80 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.80 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 14.

La figure IV.81 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.25% d'Alfa de 1 cm » dans la direction aléatoire.

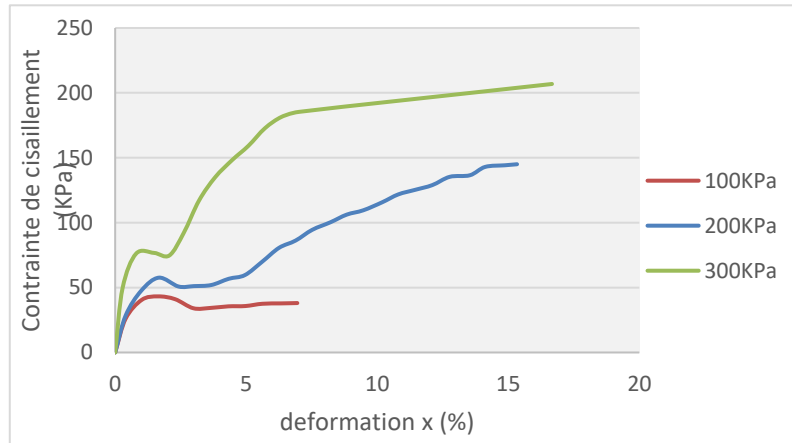


**Figure IV.81 :** Courbe intrinsèque de l'essai 14.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.81). La cohésion égale **15.75 KPa** et l'angle de frottement égal **36.20°**.

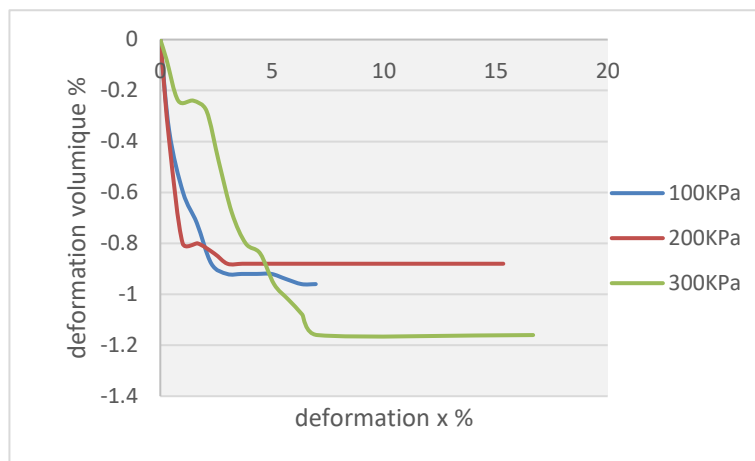
#### IV.4.4.1.b. Essai n°15 :

La figure IV.82 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.5 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction aléatoire pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



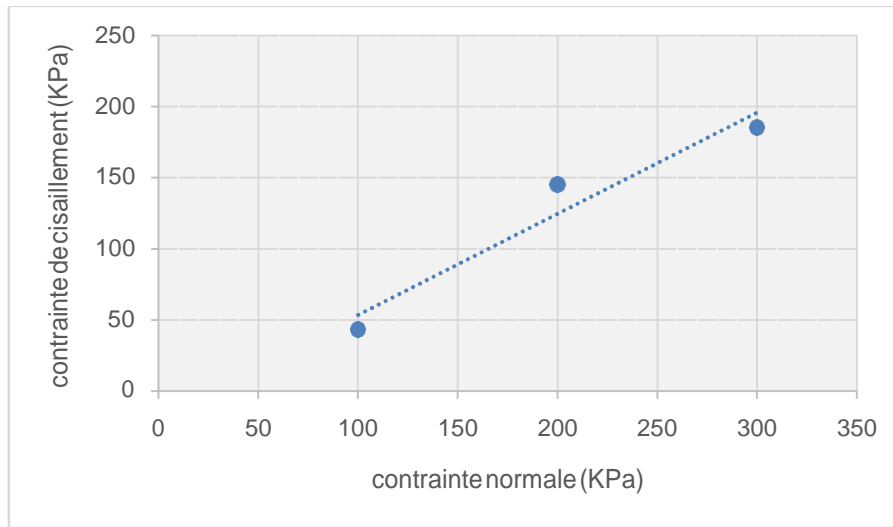
**Figure IV.82 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 15.

La figure IV.83 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.83 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 15.

La figure IV.84 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.5% d'Alfa de 1 cm » dans la direction aléatoire.

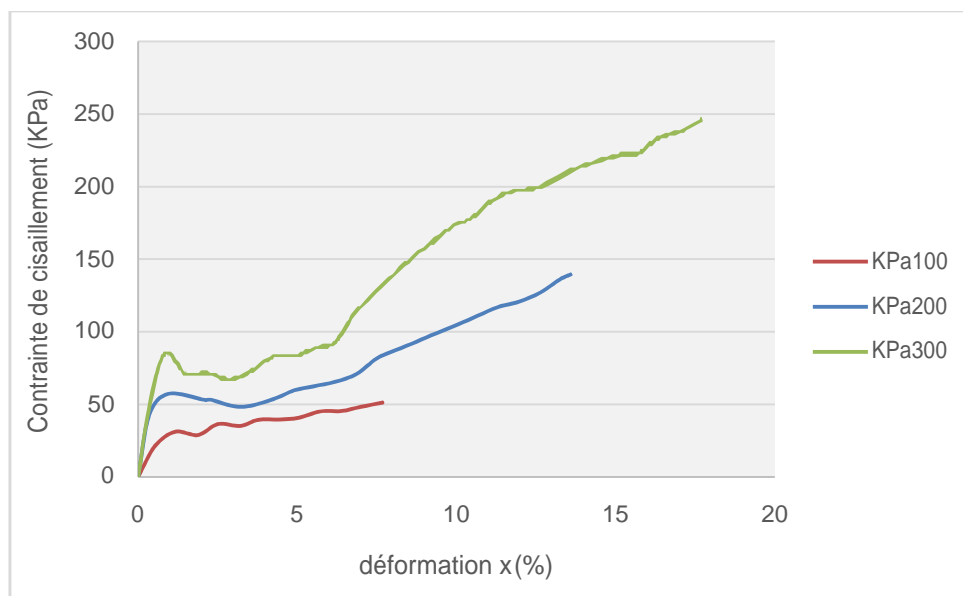


**Figure IV.84** : Courbe intrinsèque de l'essai 14.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.84). La cohésion égale **17.63 KPa** et l'angle de frottement égal **35.37°**.

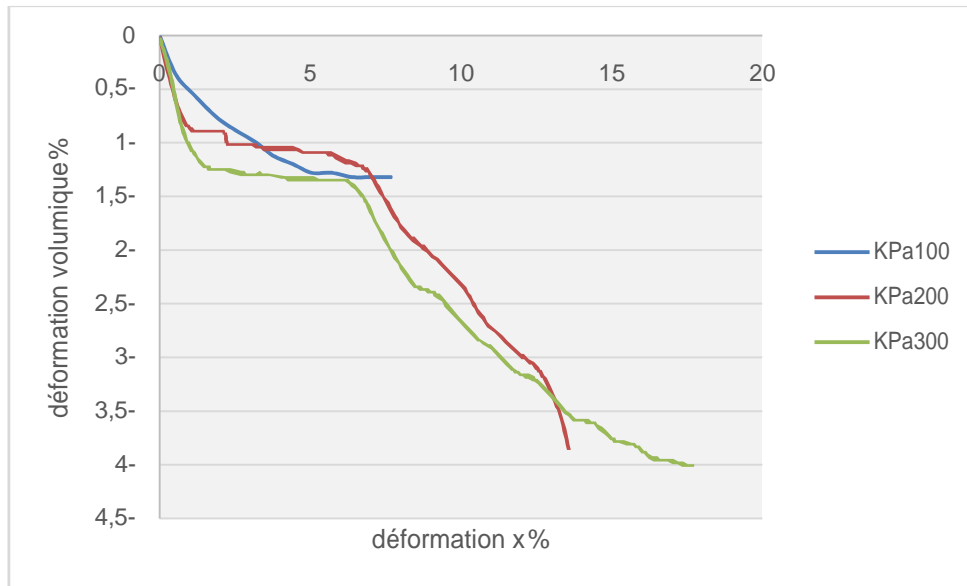
#### IV.4.4.1.c. Essai n°16 :

La figure IV.85 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.75 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction aléatoire pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



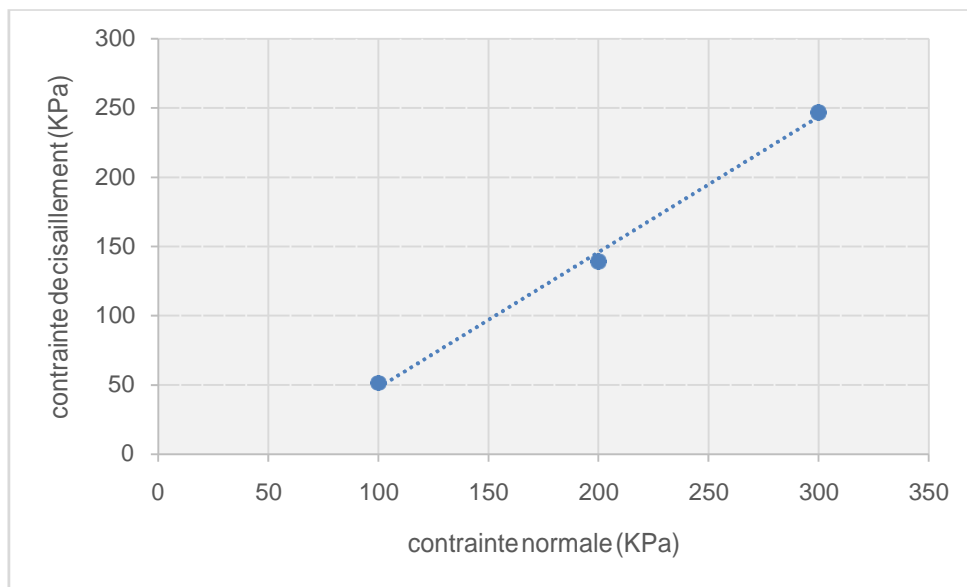
**Figure IV.85** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 16.

La figure IV.86 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.86** : Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 16.

La figure IV.87 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.75% d'Alfa de 1 cm » dans la direction aléatoire.

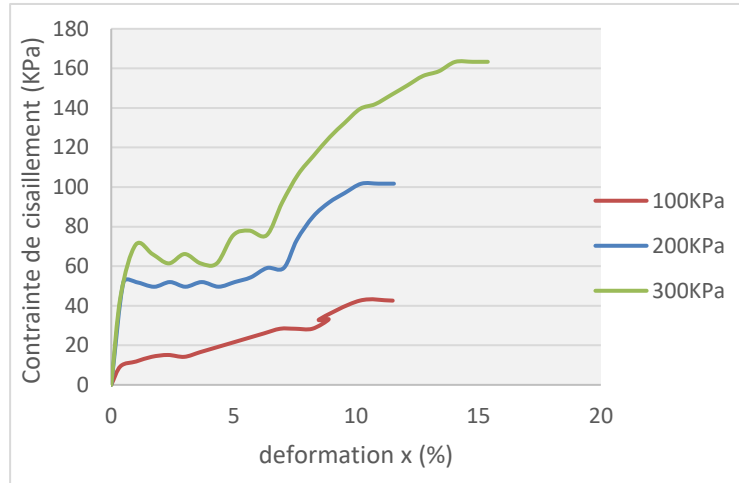


**Figure IV.87** : Courbe intrinsèque de l'essai 16.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.87). La cohésion égale **49,77 KPa** et l'angle de frottement égal **44.33°**.

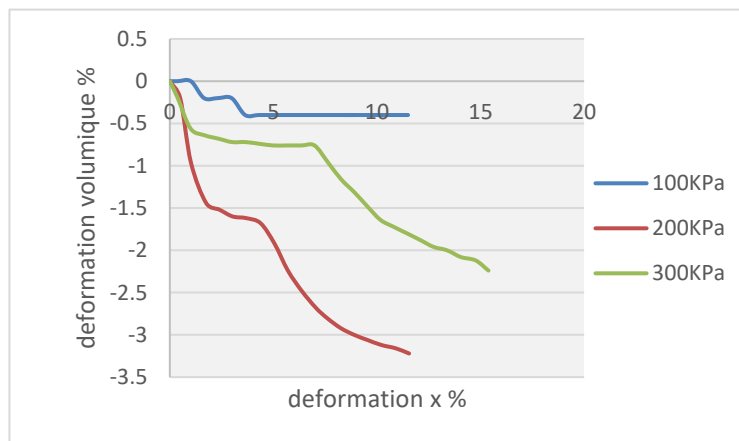
#### IV4.4.1.d. Essai n°17 :

La figure IV.88 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 1 % d'Alfa de 1 cm » dans la direction aléatoire pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



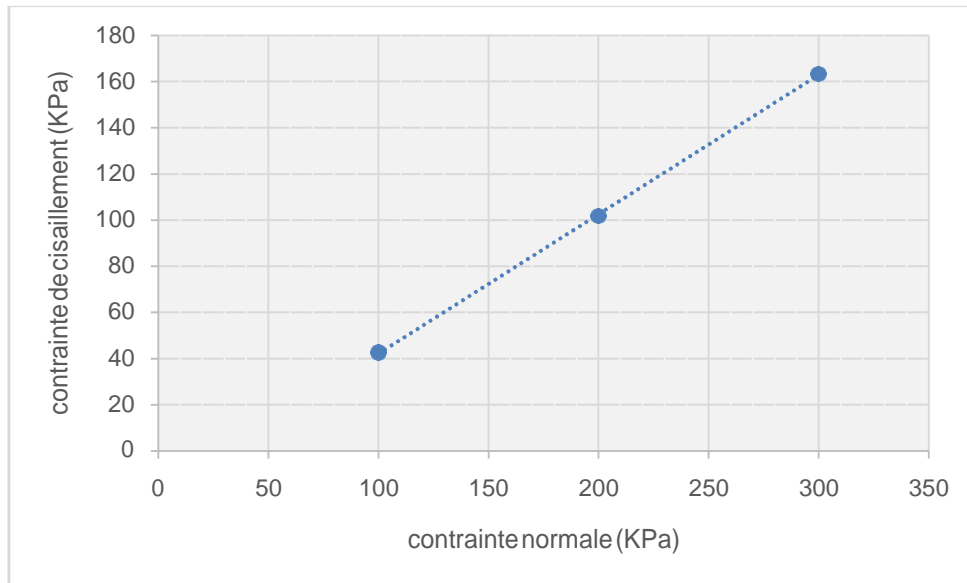
**Figure IV.88 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 17.

La figure IV.89 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.89 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 17.

La figure IV.90 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 1% d'Alfa de 1 cm » dans la direction aléatoire.



**Figure IV.90:** Courbe intrinsèque de l'essai 17.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.90). La cohésion égale **18.20 KPa** et l'angle de frottement égal **31.09°**.

#### IV.4.4.1.e. Récapitulatifs des résultats :

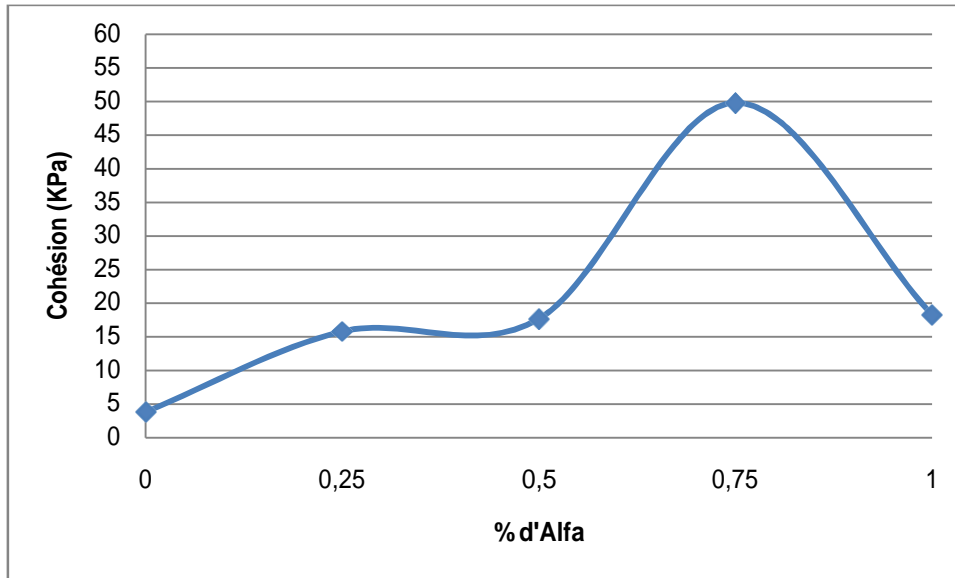
Le tableau IV.6 donne les résultats obtenus par l'ajout des différents pourcentages d'Alfa (0.25, 0.5, 0.75 et 1 %) de 1 cm dans la direction verticale à 45°.

**Tableau IV.6 :** Récapitulatif des résultats obtenus par l'ajout des % d'Alfa (direction aléatoire).

	%	C (KPa)	$\Phi$ (°)	Contrainte de cisaillement maximal (KPa)		
				100	200	300
Essai n°1	0	3,78	28,46	52,22	124,00	160,77
Essai n°14	0.25	15,75	36,20	55,93	133,72	202,35
Essai n°15	0.5	17,63	35,37	43,21	145,01	185,37
Essai n°16	0.75	49,77	44,33	51,14	139,34	246,63
Essai n°17	1	18,20	31,09	42,58	101,72	163,34

La figure IV.91 montre la variation de la cohésion en fonction des % de 1 cm d'Alfa avec une orientation aléatoire.

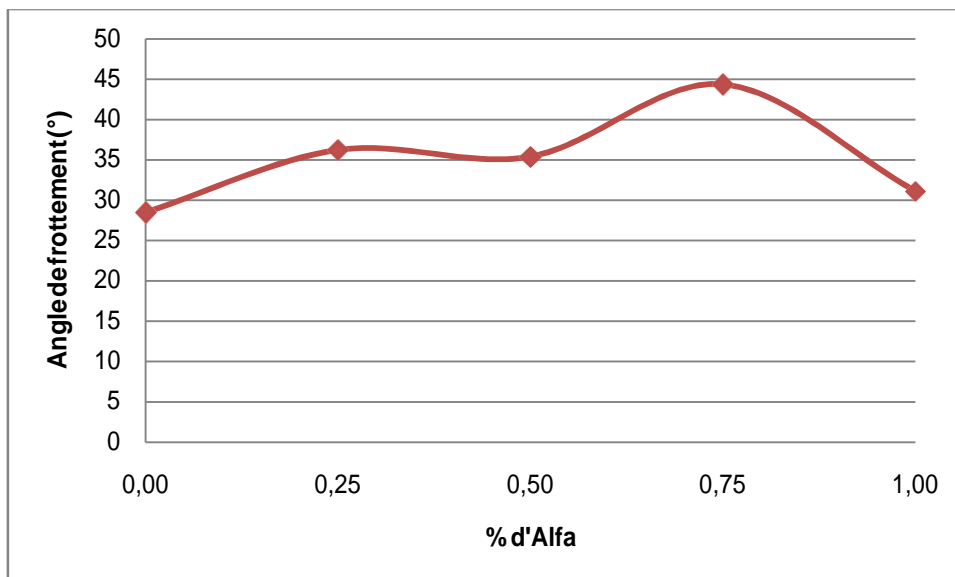




**Figure IV.91 :** La cohésion en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction aléatoire).

D'après la figure IV.65 la cohésion augmente avec les différents pourcentages d'ajout d'alfa par rapport au sol non renforcé. Sauf l'ajout de 1% des fibres crée une vide entre les grains solides de mélange, donc engendre une diminution par rapport au dernier ajout. L'ajout de 0.75 % d'alfa augmente la cohésion 13.17 fois.

La figure IV.92 présente la variation d'angle de frottement en fonction des différents pourcentages d'Alfa dans la direction aléatoire.



**Figure IV.92 :** Angle de frottement en fonction de % d'Alfa de 1cm (direction aléatoire).

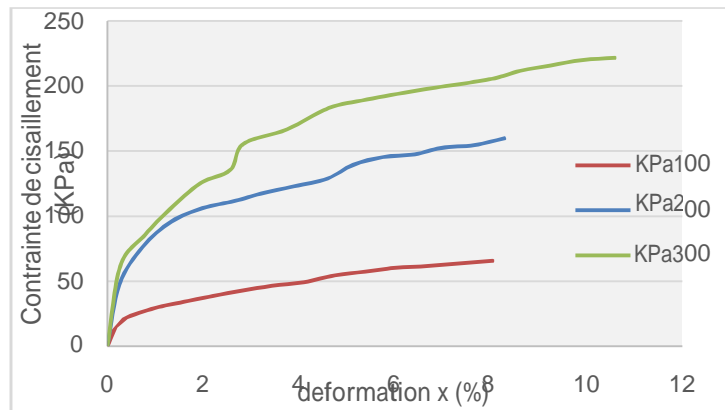
D'après la figure IV.92 l'angle de frottement augmente avec les différents pourcentages d'ajout d'alfa par rapport au sol non renforcé. L'ajout de 0.75 % d'alfa augmente l'angle de frottement 1,57 fois.

D'après les observations, la résistance de sol est plus élevée au pourcentage d'ajout de 0.75 %, donc c'est le pourcentage optimal recherché.

#### IV.4.4.2. Les différentes longueurs d'Alfa (0.75%) :

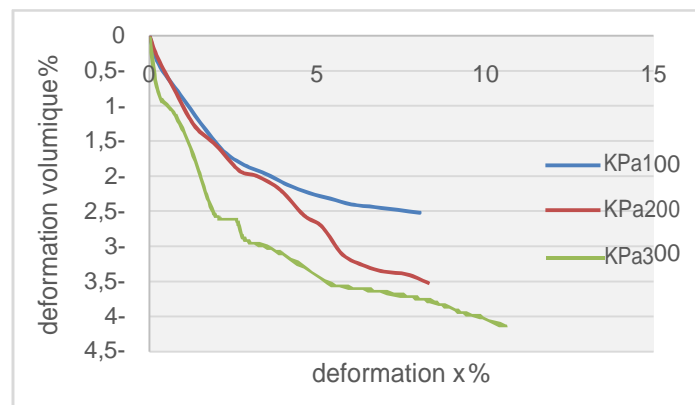
##### IV.4.4.2.a. Essai n°29 :

La figure IV.93 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.75 % d'Alfa de 1.5 cm » dans la direction aléatoire pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



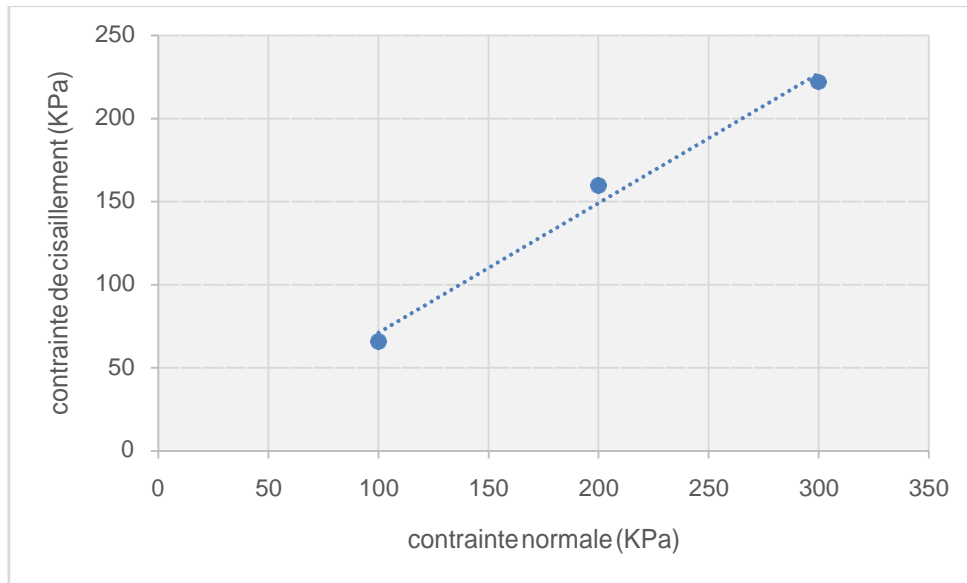
**Figure IV.93 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 29.

La figure IV.94 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.94 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 29.

La figure IV.95 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.75% d'Alfa de 1.5 cm » dans la direction aléatoire

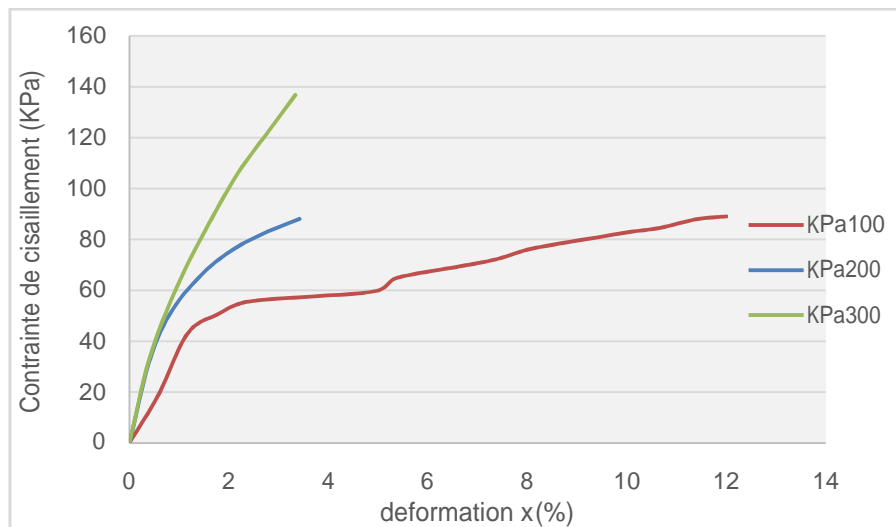


**Figure IV.95 :** Courbe intrinsèque de l'essai 29.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.69). La cohésion égale **7.036 KPa** et l'angle de frottement égal **37.95°**.

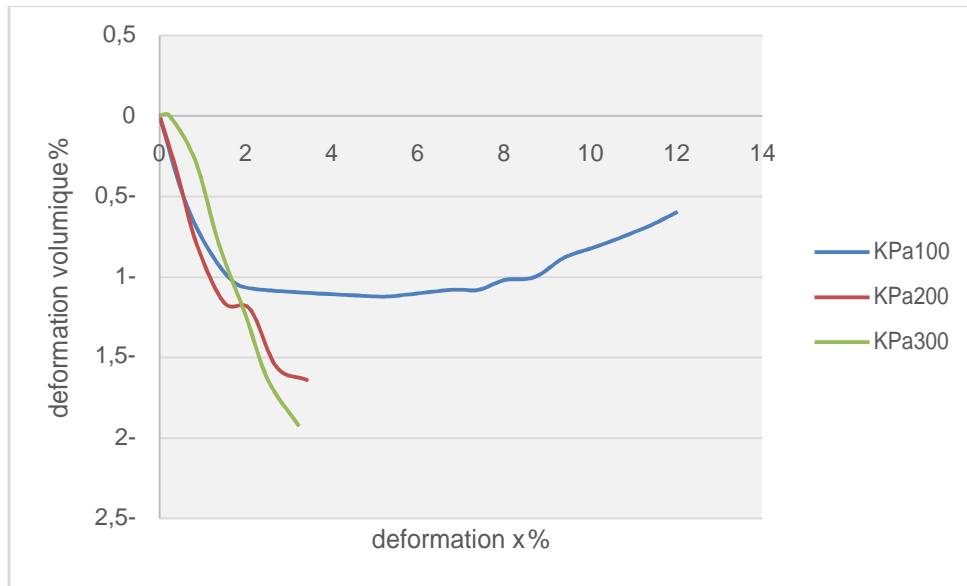
#### IV4.2.b. Essai n°28 :

La figure IV.96 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.75 % d'Alfa de 2 cm » dans la direction aléatoire pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



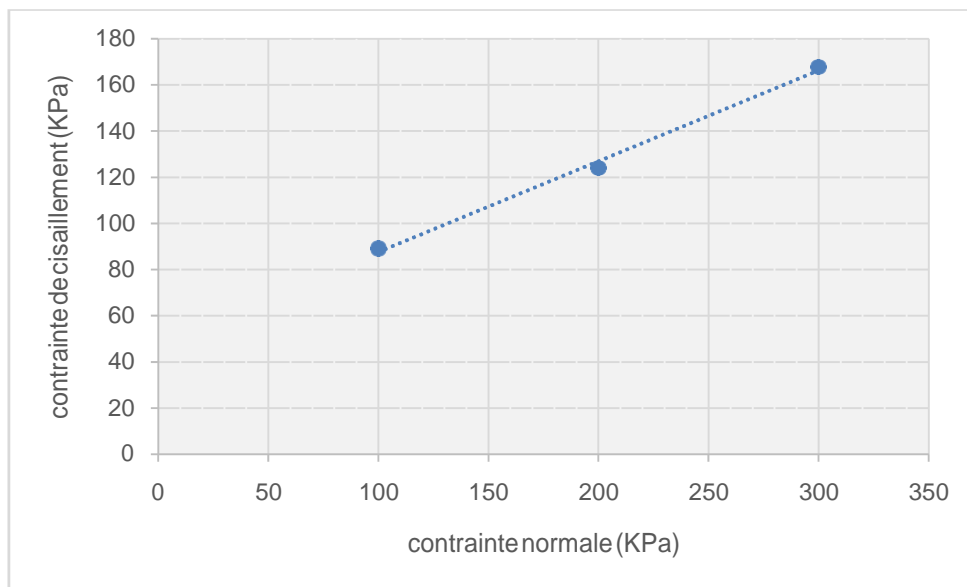
**Figure IV.96 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 28.

La figure IV.97 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.97 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 28.

La figure IV.98 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.75% d'Alfa de 2cm » dans la direction aléatoire

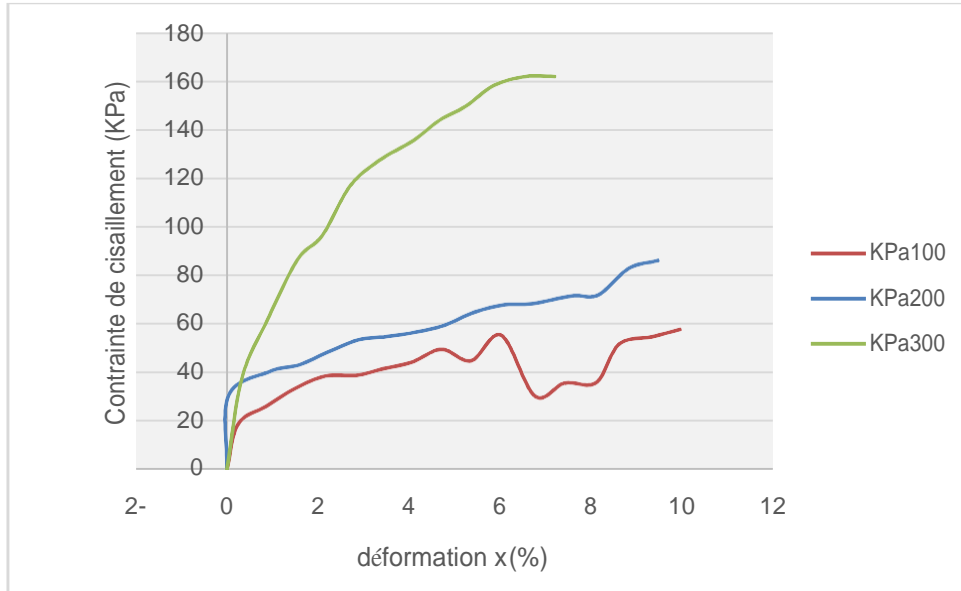


**Figure IV.98 :** Courbe intrinsèque de l'essai 28.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.69). La cohésion égale **48.36 KPa** et l'angle de frottement égal **21.40°**.

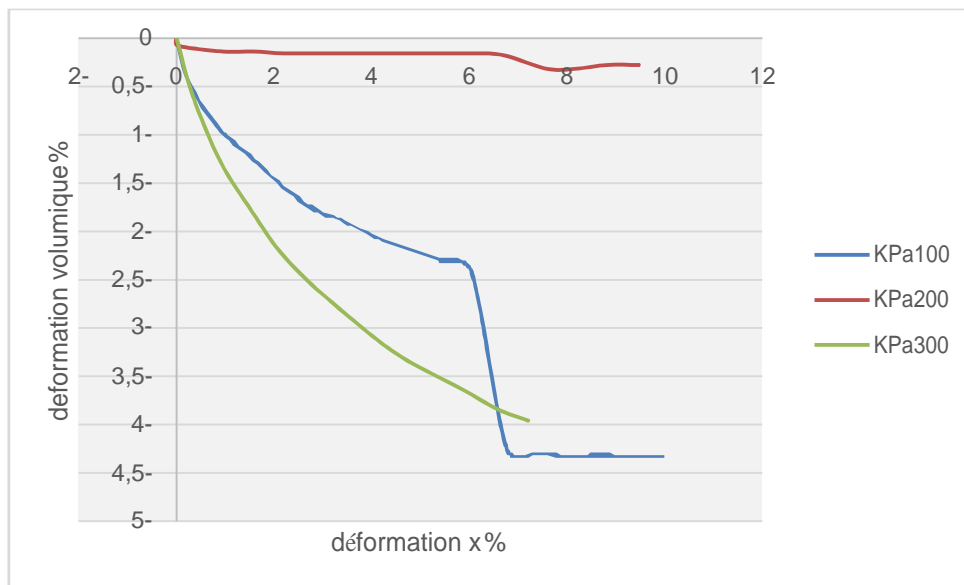
## IV.4.4.2.c. Essai n°27 :

La figure IV.99 montre la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives du mélange « sable + 0.75 % d'Alfa de 2.5 cm » dans la direction aléatoire pour les trois contraintes normales 100, 200 et 300 KPa.



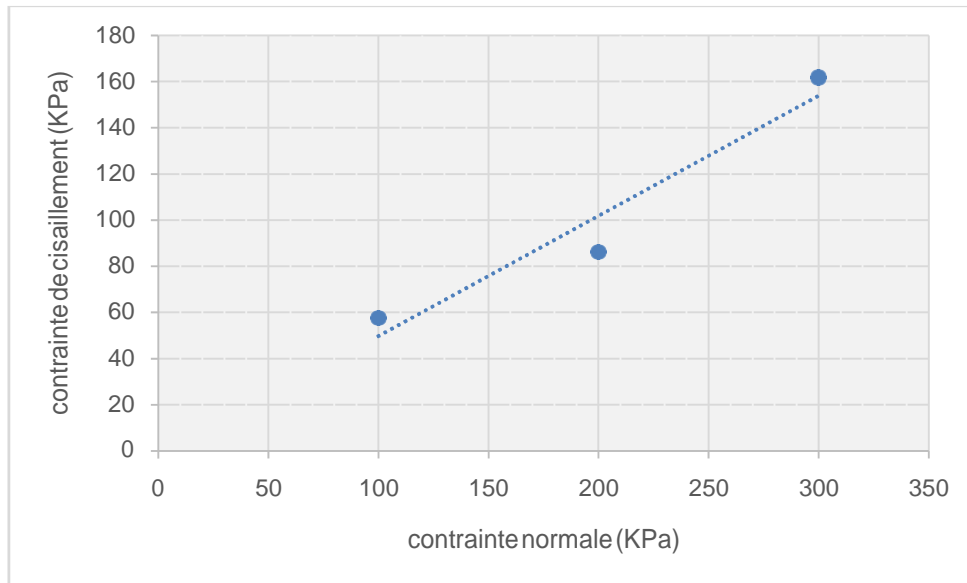
**Figure IV.99 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 27.

La figure IV.100 donne la variation de déformation volumique en fonction de déformation axiale pour «  $\sigma_n$  » égal : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure IV.100 :** Courbe déformation volumique & déformation x de l'essai 27.

La figure IV.101 montre la ligne intrinsèque du mélange « sable + 0.75% d'Alfa de 2.5 cm » dans la direction aléatoire



**Figure IV.101** : Courbe intrinsèque de l'essai 27.

D'après la courbe intrinsèque (figure IV.101). La cohésion égale **2.22 KPa** et l'angle de frottement égal **27.47°**.

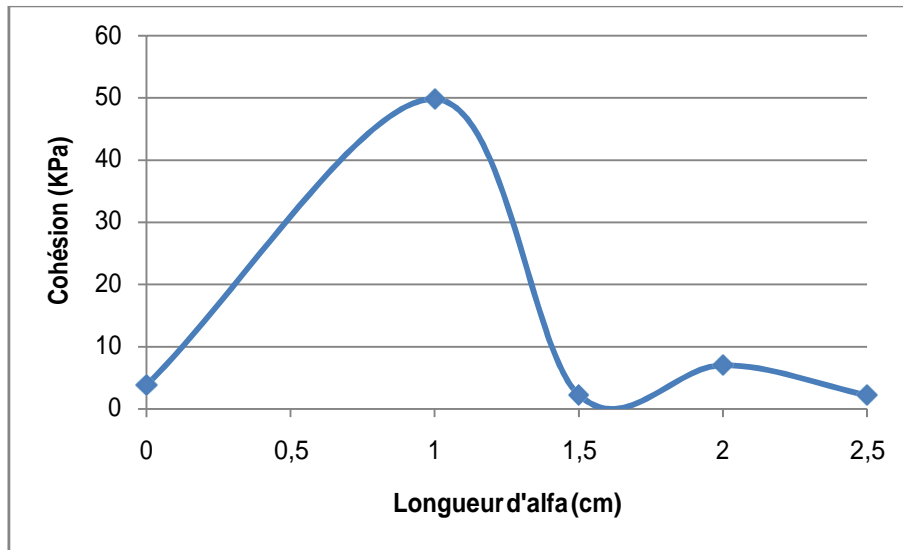
#### IV.4.4.2.d. Récapitulatifs des résultats :

Le tableau IV.9 donne les résultats obtenus par l'ajout de 0.75% des différentes longueurs d'Alfa (1, 1.5, 2 et 2.5 cm) dans la direction verticale.

**Tableau IV.9** : Récapitulatif des résultats obtenus par l'ajout des longueurs de 0.75% d'Alfa (direction aléatoire).

	Longueur (cm)	C (KPa)	$\Phi$ (°)	Contrainte de cisaillement maximal (KPa)		
				100	200	300
Essai n°5	1	49,77	44,33	51,14	139,34	246,63
Essai n°29	1.5	2,268	36,68	72,70	159,61	221,81
Essai n°28	2	7,036	37,95	65,72	124,01	167,620
Essai n°27	2.5	2,22	27,47	57,68	86,06	161,73

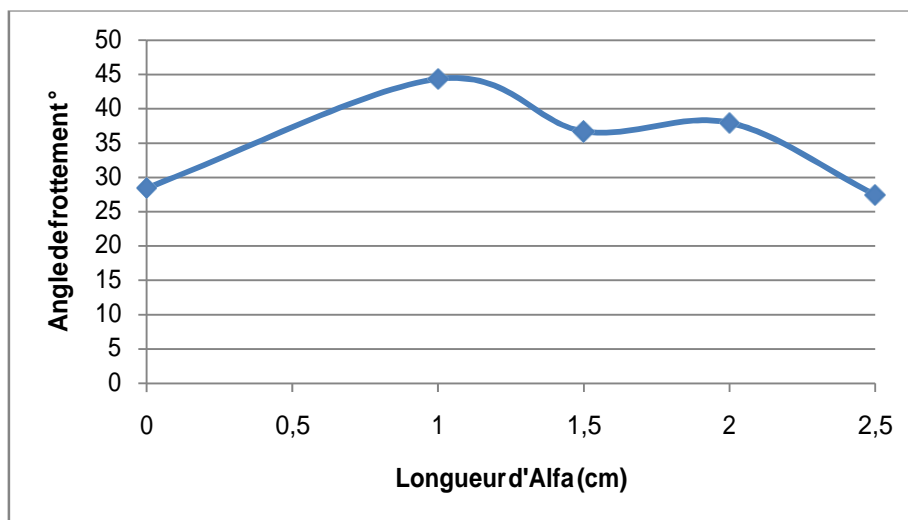
La figure IV.102 montre la variation de la cohésion en fonction des longueurs d'alfa avec 0.75% d'ajout et une orientation aléatoire.



**Figure IV.102 :** La cohésion en fonction des longueurs d'Alfa de 0.75% (direction aléatoire).

D'après la figure IV.102 la cohésion augmente avec les différentes longueurs (sauf à 1.5 cm) par rapport au sol non renforcé. Cette augmentation due à l'effet d'accrochage qu'il assure par les longueurs ; en effet, il a été augmenté la liaison de contact de mélange. L'ajout de 1 cm d'alfa de 0.75% augmente la cohésion 13.17 fois.

La figure IV.103 présente la variation d'angle de frottement en fonction des différents pourcentages d'Alfa dans la direction aléatoire.



**Figure IV.103:** Angle de frottement en fonction de longueur d'Alfa de 0.25%(direction aléatoire).

D'après la figure IV.103 l'angle de frottement augmente avec les différentes longueurs d'alfa (sauf à 2.5 cm) par rapport au sol non renforcé. L'ajout de 1 cm d'alfa (0.75%) augmente l'angle de frottement 1,57 fois.

D'après les observations, la résistance de sol est plus élevée à 1 cm d'alfa, donc c'est la longueur optimale recherchée.

#### IV.5. Récapitulatif des résultats obtenus dans les différentes directions d'Alfa :

Le tableau IV.10 présente le récapitulatif des résultats obtenus pour le renforcement du sol par l'Alfa dans les différentes directions (horizontale, inclinée, verticale et aléatoire) par rapport au plan de cisaillement :

**Tableau IV.13 :** Récapitulatif des pourcentages optimum avec les longueurs optimales des fibres d'Alfa.

	direction fibre	longueur fibre (cm)	% fibre	Cohésion (KPa)	Angle de frottement (°)	Contrainte de cisaillement max (KPa)		
						100	200	300
Essai 18	Horizontale	2,5	0,25	17,37	30,66	43,82	97,78	162,59
Essai 2	Inclinée	1	0,25	56,96	20,15	97,23	123,32	170,68
Essai 26	Verticale	1.5	0,25	37,64	36,53	55,34	73,05	203,68
Essai 5	Aléatoire	1	0.75	49,77	44,33	51,14	139,34	246,63

D'après ce tableau, on peut dire que l'orientation des fibres par rapport à l'axe de cisaillement influence directement le renforcement de sable ; et cela à cause des efforts réparties sur la fibre et l'interaction sol/fibre. La direction aléatoire donne une meilleure résistance par rapport aux autres directions.

#### IV.6. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons effectué un essai principal (Cisaillement à la boîte), dans le but d'étudier l'effet des différentes techniques de renforcement sur les paramètres obtenus pour cet essai.

Le cisaillement est achevé en utilisant le sol et les différents pourcentages des fibres d'Alfa (0.25, 0.5, 0.75 et 1 %) pour la longueur d'1 cm dans les 04 directions (horizontale, inclinée, verticale et aléatoire) dans le but de choisir le pourcentage



optimal. Ensuite, nous avons fixé le pourcentage pour chaque direction et nous avons varié dans la longueur (1.5, 2 et 2.5 cm) afin de choisir la longueur optimale.

Après la fin de ces essais, nous avons estimé que la direction horizontale a un pourcentage de 0.25 et de 2.5 cm de longueur, la direction inclinée a un pourcentage de 0.25 et de 1 cm de longueur la direction verticale a un pourcentage de 0.25 et de longueur d'1.5 cm, et pour la direction aléatoire le pourcentage est de 0.75 et la longueur est d'1 cm sont les meilleurs résultats pour le renforcement de sable étudié.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **A. Belkadi., C. Amouri., A. Guettala., H. Houari., A. Zendaoui.,** « Contribution à l'étude des performances rhéologiques et mécaniques des bétons autoplacants avec des fibres végétales (Chanvre et Alfa) ». Rencontres Universitaires de Génie Civil, Bayonne, France, May 2015.
- **AZZAZ I. et CHOUIKHA S.:** « *Étude numérique de la stabilité d'un remblai sur sol mol traité par des colonnes ballastées entouré par de géosynthétique* » ; thèse Master II ; université de ; 2017.
- **B. Ait Saadi., A. Pantet., G. Omont.,** «Elaboration et caractérisation d'un matériau de construction à base de fibres d'alfa et de plâtre ou de mortier ». 32èmes Rencontres de l'AUGC, Polytech Orléans, 4 au 6 juin 2014.
- **BJ Sushma ; DSV Prasad ; M AnjanKumar ; GVR Prasada Raju :** « A Study on Strength of Reinforced Flyash with Randomly Distributed Fibers » ; International Journal of Engineering Research and Developement ; November 2014.
- **Chen, W.F.:** « *Limit Analysis and Soil Plasticity* ». Elsevier, Amsterdam, Chen, W.F. 1975.
- **Dallel M.:** Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil ; Université de Haute Alsace – Mulhouse ; 2012 ; Français.
- **E. Rogge.,** « Extraction et étude des propriétés physiques et mécaniques des fibres d'Alfa (*Esparto grass*) en vue d'applications textiles ». Mémoire de master. Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace (UHA), Faculteit Ingenieurswetenschappen (UGent). 2009-2010.
- **Eid, H.T, Stark, T.D, Douglas, W.D. and Sherry, P.E. :** « Municipal solid waste
- **Focht, J. A. & O'neil, M. W.** (1985). Piles and other deep foundations. Proc. 11ème Conf. int. mécanique des sols. San Francisco, vol.. 1, 187-209.
- **Frost, J. D. & Han, J.** « Behavior of interfaces between fiber-reinforced polymers and sands ». Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999.
- **G.Sanglerat ; G.Olilari et B. Cambou :** « Problèmes pratiques de mécanique de mécanique des sols » ; édition Dunod ; 1984.

- **Gray, D. H., and Ohashi, H.:** « Mechanics of fiber reinforcement in sand » ; *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 1983.
- **H. Mechakra., A. Nour., S. Lecheb., A. Chellil.:** «Mechanical characterizations of composite material with short Alfa fibers reinforcement ». *Composite Structures* 124, 152-162,2015.
- **Khelifi Z. ; Allal M.A; Abou bekr N.; Taibi S. et Duchemin B.:** « *Experimental study of the sand-Alfa stems interface frictional resistance-application to compacted fill reinforcement* »; *International Journal of Applied Engineering Research* ; ISSN 0973-4562 ;Volume 11, 08 Novembre 2016.
- **L.Ghali., M. Zidi., S. Roudesli.,** “Physical and mechanical characterization of technical Esparto (Alfa) fibres”. *Journal of applied sciences* 6(11): 2450-2455, 2006.
- **Norme NF P 94-220-0** : concernant le dimensionnement des murs en terre armée
- **O. Bahloul, A. Bourzam, A. Bahloul,** « utilisation des fibres vegetales dans le renforcement de mortiers de ciment (cas de l’alfa) », *SBEIDCO-1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria)-October 12-14, 2009.*
- **Radoslaw L. Michalowski ; Aigen Zhao :** « FAILURE OF FIBER-REINFORCED GRANULAR SOILS » ; *JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING* ; Aout 1996.
- **Radoslaw L. Michalowski ; Aigen Zhao :** « Failure of unidirectionally reinforced composites with frictional matrix » ; *JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING* ; novembre 1996.
- **Radoslaw L. Michalowski ; Dimitrios Zekkos :** « Limit analysis of the reinforced soil and modeling strength of solid waste in landfills using the concepts of soil reinforcement » ; *Geosynthetics, Forging a Path to Bona Fide Engineering Materials GSP 275. ASCE* ; 2016.
- **Radoslaw L. Michalowski ; Jan Cermak :** « Strength anisotropy of fiber-reinforced sand » ; *journal Computers and geotechnics* ; 15 Octobre 2001.
- **Sanjay Kumar Shukla :** *Fundamentals of Fibre Reinforced Soil Engineering* » ; ISSN 2364-5156 ; ISBN 978-981-10-3061-1 ; Springer Nature Singapore 2017.
- **SETRA – LCPC :** « Les ouvrages en terre armée - Recommandations et règles de l’art » ; 1979 réédité en 1991.
- **SETRA-LCPC :** « Guide pour les Terrassements Routiers » ; 1992

slope failure 1. Waste and foundation properties » ; *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 2000.

### **Conclusion générale :**

**D**ans ce mémoire, nous avons présenté d'une façon générale les différentes techniques et les types de renforcement de sol. Nous avons également présenté les différents types des fibres employées dans ce domaine.

**L**e premier chapitre expérimental a pour but de présenter dans son ensemble notre démarche expérimentale ainsi que les moyens mis en œuvre et les protocoles développés pour atteindre les objectifs de ce travail, à savoir évaluer les propriétés mécaniques du sol utilisé en fonction des différents paramètres d'identification géotechniques du sol rencontré (classification, granulométrie, quantité des fines, teneur en eau et masse volumiques, .....etc.). Les caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre utilisée (l'alfa) sont obtenues à partir des recherches exécutées précédemment.

**D**ans le dernier chapitre, nous avons effectué un essai principal (Cisaillement à la boîte), dans le but d'étudier l'effet des différentes techniques de renforcement sur les paramètres obtenus pour cet essai. Ce travail tente de comprendre le comportement expérimental de l'interaction du sable avec les fibres d'alfa naturel. Le choix d'alfa est justifié par sa haute résistance à la traction. Des essais de cisaillement direct ont été effectués pour étudier le mécanisme d'interaction entre le sable et les fibres d'alfa naturelles. En faisant varier l'orientation des fibres par rapport à la direction de la force de cisaillement, les résultats expérimentaux montrent que le frottement de l'interface de cisaillement est un paramètre très important affectant la résistance au cisaillement du sol, donc influent directement sur le comportement mécanique de sol.

**L**es résultats montrent que le frottement inter-faciale alfa / sable ne dépend pas seulement de la rugosité intrinsèque des fibres individuelles, mais aussi des différentes orientations (horizontale, inclinée, verticale et aléatoire) des fibres d'alfa par rapport à la direction de la force de cisaillement.

**E**n outre, cette modification est intéressante car l'addition de fibres supprime les glissements de cisaillement catastrophiques des tas de sable sous leur propre poids.

**L**a matrice idéale de renforcement pour chaque direction est :

- ✓ Direction horizontale : 0.25% d'alfa de 2.5 cm de longueur ;
- ✓ Direction verticale : 0.25 % d'alfa 1.5 cm de longueur ;
- ✓ Direction inclinée à 45° : 0.25 % d'alfa 1.5 cm de longueur ;
- ✓ Direction aléatoire : 0.75 % d'alfa de 1 cm de longueur ;

*L*a direction aléatoire donne une meilleure résistance par rapport aux autres directions.

### **Les perspectives :**

*L*es perspectives et les suites à ce travail sont nombreuses :

- Étude des autres types de renforcement (type de fibre par exemple : fibre industrielle au lieu de fibre naturelle par exemple le polypropylène.....etc. ; ou autre type de fibres naturelles par exemple sisal fibre de palmier....etc.) ;
- Effectuer des autres essais (essai triaxial, CBR, ...).
- Étudier le comportement des sols sablaux renforcés à l'aide de l'appareil triaxial de révolution qui permettra sans doute d'approfondir la compréhension du comportement mécanique de ce sol (module de déformation des matériaux à des cycles de déchargement rechargement) ;
- Étudier le comportement des autres types de sol renforcés par l'alfa ;
- Valider des résultats trouvés par la modélisation numérique du sol renforcés.....  
etc.