

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955 -SKIKDA  
Faculté de technologie  
Département de génie civil  
Référence : D012124034D



جامعة 20 أوت 1955  
كلية التكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية  
المرجع : D012124034D

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de  
**Doctorat en Sciences**  
**En génie civil**  
**Option : Géotechnique**

**La prise en compte de l'anisotropie dans les  
calculs des ouvrages géotechniques**

Présentée par : **ARABET Leila**

Sous la direction du : **Pr. HIDJEB Mustapha**

Thèse soutenue publiquement le : 10/12/2024

Devant le jury compose de :

Président	MESSAST Salah	Professeur	Université de Skikda
Rapporteur	HIDJEB Mustapha	Professeur	Université de Skikda
Examineur	SBARTAI Badreddine	Professeur	Université de Annaba
Examineur	BENSEBTI Salaheddine	M.C.A	Université de Constantine



## Résumé

Le renforcement des sols avec des fibres est une pratique essentielle dans les travaux géotechniques. Malheureusement, malgré les progrès réalisés dans les méthodes de calcul, l'effet d'anisotropie est souvent négligé, ce qui conduit à des prédictions imprécises. Cette étude se concentre spécifiquement sur l'anisotropie dans les ouvrages géotechniques impliquant des sols renforcés par des fibres.

Pour mieux comprendre le comportement des sols renforcés en prenant en compte l'anisotropie, des essais de cisaillement direct ont été réalisés en laboratoire sur du sable renforcé avec des fibres d'alfa orientées dans différentes directions. L'objectif principal était de déterminer le facteur d'anisotropie à partir de ces essais.

À partir des résultats de ces essais, deux modèles ont été utilisés pour effectuer des prédictions : le modèle de Gray et Ohashi de 1983 (G.O), et un modèle basé sur les réseaux neuronaux artificiels (RNA), une technique d'intelligence artificielle. L'objectif était également d'évaluer la fiabilité du modèle de RNA dans la prédiction du comportement des sols renforcés. Les résultats des prédictions ont montré que les deux modèles étaient fiables, avec de très petites erreurs moyennes. Cependant, le modèle de RNA s'est avéré être plus performant, avec une erreur de prédiction inférieure à celle du modèle de G.O. De plus, le modèle de RNA fournit une seule équation pour la prédiction, tandis que le modèle de G.O., en fournit plusieurs. Il convient également de noter que le modèle de G.O., sous-estime les résultats lorsque les fibres se rompent.

En outre, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel PLAXIS pour évaluer l'influence de l'anisotropie sur les calculs géotechniques. Les résultats ont révélé l'impact significatif de l'anisotropie, en particulier lorsque le pourcentage de fibres était élevé (environ 1 %). De plus, cette anisotropie a directement affecté les calculs géotechniques, en particulier dans les cas où les fibres étaient orientées horizontalement et verticalement.

**Mots clés :** Anisotropie ; Fibre d'Alfa ; Ouvrages géotechniques ; PLAXIS ; RNA ; Sol renforcé.

**Abstract**

Soil reinforcement with fibers is an essential practice in geotechnical engineering. However, despite advancements in calculation methods, the effect of anisotropy is often overlooked, leading to inaccurate predictions. This study specifically focuses on anisotropy in geotechnical structures involving fiber-reinforced soils.

To better understand the behavior of reinforced soils while considering anisotropy, direct shear tests were conducted in the laboratory on sand reinforced with alpha fibers oriented in different directions. The primary objective was to determine the anisotropy factor based on these tests.

Using the results of these tests, two models were employed to make predictions: the Gray and Ohashi model (G.O.) and a model based on artificial neural networks (ANN), an artificial intelligence technique. The aim was also to evaluate the reliability of the ANN model in predicting the behavior of reinforced soils. The prediction results showed that both models were reliable, with very small average errors. However, the ANN model outperformed the G.O. model, exhibiting a lower prediction error. Additionally, the ANN model provided a single equation for prediction, whereas the G.O. model offered multiple equations. It is noteworthy that the G.O. model underestimates the results when fibers rupture.

Furthermore, simulations were performed using PLAXIS software to assess the influence of anisotropy on geotechnical calculations. The results revealed a significant impact of anisotropy, particularly when a high percentage of fibers (approximately 1%) was present. Moreover, this anisotropy directly affected geotechnical calculations, especially in cases where fibers were horizontally and vertically oriented.

**Keywords:** Anisotropy; Alfa fiber; Geotechnical structures; PLAXIS; ANN; Reinforced soil.

## ملخص

يعد تقوية التربة بالألياف ممارسة أساسية في الأعمال الجيوتقنية. لسوء الحظ، على الرغم من التقدم في الأساليب الحسابية، غالبًا ما يتم التغاضي عن تأثير تباين الخواص، مما يؤدي إلى تنبؤات غير دقيقة. تركز هذه الدراسة بشكل خاص على تباين الخواص في الهياكل الجيوتقنية التي تشمل التربة المقواة بالألياف.

لفهم سلوك التربة المقواة بشكل أفضل مع مراعاة تباين الخواص، تم إجراء اختبارات القص المباشر في المختبر على الرمال المقواة بألياف الحلفاء الموجهة في اتجاهات مختلفة. كان الهدف الرئيسي هو تحديد عامل التباين من هذه الاختبارات.

من نتائج هذه التجارب، تم استخدام نموذجين لعمل تنبؤات: نموذج جراي وأوهاشي لعام 1983، ونموذج يعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية، وهي تقنية ذكاء اصطناعي. كان الهدف أيضًا هو تقييم موثوقية نموذج الشبكات العصبية في التنبؤ بسلوك التربة المعززة. أظهرت نتائج التنبؤ أن كلا النموذجين كانا موثوقين، مع وجود أخطاء متوسطة صغيرة جدًا. ومع ذلك، وجد أن نموذج الشبكات العصبية يعمل بشكل أفضل، مع وجود خطأ تنبؤ أقل من نموذج جراي وأوهاشي. علاوة على ذلك، يوفر نموذج الشبكات العصبية معادلة واحدة للتنبؤ، بينما يوفر نموذج جراي وأوهاشي عدة معادلات. وتجدر الإشارة أيضًا إلى أن نموذج جراي وأوهاشي يقلل من النتائج عندما تنكسر الألياف.

بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام برنامج بلاكسيس لتقييم تأثير تباين الخواص على الحسابات الجيوتقنية. كشفت النتائج عن تأثير كبير لتباين الخواص، خاصة عندما كانت نسبة الألياف عالية (حوالي 1٪). علاوة على ذلك، أثر هذا التباين بشكل مباشر على الحسابات الجيوتقنية، خاصة في الحالات التي تم فيها توجيه الألياف أفقيًا وعموديًا.

**الكلمات المفتاحية:** تباين الخواص. ألياف الحلفاء، الهياكل الجيوتقنية، بلاكسيس، الشبكات العصبية الاصطناعية، تعزيز التربة.

## Remerciement

Au terme de cette étude, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon Directeur de thèse, le Professeur **HIDJEB Mustapha**, pour son aide précieuse, son soutien indéfectible, ses conseils fructueux et surtout pour sa confiance totale en moi, qui m'a encouragé à mener à bien ce travail.

Je souhaite également rendre hommage à la mémoire du regretté Professeur : **HAMMAMI Mounir**, dont la qualité scientifique reste gravée dans nos mémoires.

De plus, je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur **MESSAST Salah**, Professeur à l'Université de Skikda, qui a présidé le jury de ma thèse. Mes sincères remerciements également à Monsieur : **SBARTAI Badreddine**, Professeur à l'Université de Annaba, et **BENSEBTI Salaheddine** Maître de conférence à l'Université de Constantine 1, pour avoir accepté de juger ce travail. Leur présence et leur expertise sont une véritable marque de reconnaissance.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de cette étude. Leurs encouragements, leurs conseils et leur soutien ont été d'une valeur inestimable.

Avec mes plus sincères remerciements,

ARABET Leila.

## Dédicace

À la mémoire de ma mère bien-aimée, qui m'a guidée sur le chemin de la réussite académique. Tu resteras à jamais présente dans mon cœur.

À mon cher mari, tu as été bien plus qu'un partenaire de vie. Tu as été ma source d'espoir inébranlable, me poussant à aller de l'avant et à compléter ce travail avec détermination.

À mes précieux enfants, Adem et Mohamed Amir, votre présence dans ma vie a apporté une lumière inestimable. Cette réussite est dédiée à vous, mes chers enfants, en espérant que vous poursuivrez vos propres rêves avec détermination et passion.

À ma grande famille, je vous exprime ma gratitude sincère pour votre soutien indéfectible tout au long de ce parcours. Votre amour, vos encouragements et vos doua m'ont donné la force de persévérer malgré les défis rencontrés.

À mes amies, Asma BENBOUZA, Rachida MALAOUI et KRIMIL Farida, je vous suis reconnaissante pour les débats enrichissants et les échanges passionnés qui ont contribué à la finalisation de cette thèse.

Et enfin, à tous les doctorants qui, malgré les obstacles, poursuivent leur formation.

Avec tout mon amour,

ARABET Leila.

## Sommaire

Résumé	
Remerciement	
Dédicace	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des notations	
Introduction générale.....	2
<b>CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE : COMPORTEMENT ANISOTROPE DES SOLS RENFORCÉS</b>	
I.1 Introduction .....	6
I.2 Notion d'anisotropie.....	6
I.2.1 L'anisotropie des matériaux .....	6
I.2.2 La présence d'une anisotropie dans les masses de sols.....	7
I.2.3 La présence d'une anisotropie dans les masses de sols due à l'activité humaine .....	8
I.3 Généralités sur le comportement des sols renforcés.....	9
I.4 Étude de l'anisotropie des sols renforcés avec des fibres.....	13
I.4.1 Introduction .....	13
I.4.2 Modèles rhéologiques du comportement des sols renforcés par des fibres .....	14
I.4.2.1 Modèle de Waldron .....	14
I.4.2.2 Modèle de Gray et Ohashi (GO) .....	16
I.4.2.3 Modèle de Maher et Gray (MG).....	18
I.4.2.4 Modèle de Zornberg .....	21
I.4.2.5 Modèle de Shukla, Sivakugan et Singh .....	24
I.4.2.6 Modèle de Michalowski et Cermak.....	26
I.4.2.7 Modèle de Diambra et al. ....	27
I.4.2.8 Comparaison entre les modèles rhéologiques .....	29
I.4.3 Modèles numériques du comportement des sols renforcés par des fibres.....	29
I.4.4 Utilisation de l'intelligence artificielle pour prédire le comportement des sols renforcés par des fibres .....	32
I.4.4.1 Introduction .....	32

I.4.4.2	Réseau neuronal artificiel (RNA).....	33
I.4.4.3	L'application des RNAs en sol renforcé par des fibres.....	37
I.5	L'influence d'anisotropie sur les applications géotechniques pratiques.....	37
I.6	L'influence de renforcement dû aux fibres sur les ouvrages géotechniques.....	38
I.6.1	Les fondations.....	38
I.6.2	Les chaussées.....	42
I.6.3	Les remblais.....	44
I.6.4	Applications sismiques.....	46
I.7	Conclusion.....	46

## **CHAPITRE II: ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT DES SOLS RENFORCES**

II.1	Introduction.....	49
II.2	Matériaux utilisés.....	49
II.2.1	Le sol utilisé.....	49
II.2.2	La fibre utilisée.....	50
II.3	Le programme des essais.....	52
II.3.1	La préparation de l'échantillon.....	52
II.3.2	Procédure des essais.....	53
II.4	Résultats et discussions.....	54
II.4.1	L'effet de la teneur des fibres.....	54
II.4.2	L'effet de la longueur des fibres.....	57
II.4.3	L'effet d'orientation des fibres.....	60
II.5	Conclusion.....	64

## **CHAPITRE III : PREVISION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX**

III.1	Introduction.....	67
III.2	Les critères de performance des modèles.....	67
III.3	Prédiction de « $\tau_{\max}$ » avec l'utilisation du modèle de Gray et Ohashi.....	68
III.4	Prédiction de « $\tau_{\max}$ » à l'aide de réseaux de neurones artificiels.....	74
III.4.1	Introduction.....	74
III.4.2	L'architecture du réseau de neurone.....	75
III.4.3	L'application du réseau de neurone.....	76
III.4.4	Résultats et discussion.....	79

III.5	Etude paramétrique de la performance du modèle de RNA .....	83
III.5.1	Effet des nombres de neurone .....	83
III.5.2	Effet de nombre de couche cachée .....	83
III.5.3	Effet des paramètres d'entrée .....	84
III.6	Comparaison entre les deux modèles (GO et RNA).....	85
III.7	Conclusion.....	86

## **CHAPITRE IV : L'EFFET D'ORIENTATION DES FIBRES SUR LES OUVRAGES GEOTECHNIQUES**

IV.1	Introduction .....	88
IV.2	L'effet d'orientation des fibres sur une fondation superficielle .....	88
IV.2.1.	Le modèle numérique .....	88
IV.2.2.	Résultats et discussions .....	90
IV.2.2.1	Pression limite .....	90
IV.2.2.2	Les déformations à la rupture .....	93
IV.2.2.3	Mécanisme de rupture du sol.....	96
IV.3	L'effet d'orientation des fibres sur un rideau de palplanches .....	98
IV.3.1.	Le modèle numérique .....	98
IV.3.2.	Résultats et discussion.....	100
IV.3.2.1.	L'effet de l'épaisseur de la couche de sable renforcé .....	100
IV.3.2.2.	L'effet de l'emplacement de la semelle par rapport au mur de palplanches .....	103
IV.4	L'effet d'orientation des fibres sur un talus .....	105
IV.4.1.	Le modèle numérique .....	105
IV.4.2.	Résultats et discussions .....	107
IV.5	Conclusion.....	110
	Conclusion générale .....	114
	Références bibliographiques .....	120

## Liste des figures

### Chapitre I

#### SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

<b>Fig I.1.</b>	Une coupe stratigraphique d'un sol présentant des couches de sable causées par des tremblements de terre [33], (b) : Sol anisotrope en fonction des couches de dépôt [33].	8
<b>Fig I.2.</b>	Les applications géotechniques de renforcement des sols par l'ajout de fibres [38].	9
<b>Fig I.3.</b>	Un mur de soutènement supportant un remblai de sol systématiquement renforcé [44].	10
<b>Fig I.4.</b>	Le comportement postulé d'une cellule unitaire dans des conditions de déformation plane avec et sans inclusions : (a) sable dense avec inclusions, (b) sable meuble avec inclusions [45].	12
<b>Fig I.5.</b>	Le comportement de la fibre (a) sans aucune force (b) cisailée.	16
<b>Fig I.6.</b>	Le modèle de fibre flexible et élastique à travers la zone de cisaillement : (a) fibre verticale ; (b) fibre oblique avec un angle d'orientation donné par rapport à la direction de cisaillement [29].	17
<b>Fig I.7.</b>	La caractérisation de la zone de cisaillement de croisement de fibre unique lors de la déformation dans les essais triaxiaux : (a) Fibre intacte ; et (b) Fibre déformée [30].	20
<b>Fig I.8.</b>	L'effet de l'inclusion de fibres sur l'enveloppe de rupture du sable	21
<b>Fig I.9.</b>	L'effet de l'inclusion de fibres sur l'enveloppe de rupture du sable [32].	22
<b>Fig I.10.</b>	La représentation de la résistance équivalente au cisaillement selon l'approche discrète [32].	24
<b>Fig I.11.</b>	Un élément de sol granulaire fibré d'épaisseur « $\Delta L$ » [67].	26
<b>Fig I.12.</b>	La déformation plane d'un élément composite [27].	27
<b>Fig I.13.</b>	La condition de rupture anisotrope pour le sable renforcé par des fibres : (a) surface de rupture, et (b) coupe transversale de la surface de rupture.	27
<b>Fig I.14.</b>	La sphère et les coordonnées utilisées pour définir la fonction de distribution d'orientation [68].	28
<b>Fig I.15.</b>	Le maillage d'un échantillon de sol renforcé par des fibres aux différences finies étudié par le modèle Neeraja et al. [62].	30
<b>Fig I.16.</b>	Le comportement du sol renforcé par des fibres en différentes orientations [62].	30
<b>Fig I.17.</b>	Le modèle de la simulation tridimensionnelle étudié par Gong et al. [70].	31
<b>Fig I.18.</b>	Les forces de contact normales moyennes autour des fibres [70].	32
<b>Fig I.19.</b>	Le schéma du réseau BP.	34
<b>Fig I.20.</b>	Le schéma du réseau Hopfield.	35
<b>Fig I.21.</b>	Le schéma du réseau SOM [89].	36
<b>Fig I.22.</b>	La disposition de test pour le test de semelle à grande échelle (d'après [106]).	39
<b>Fig I.23.</b>	Le diagramme schématique de la configuration de test du modèle (d'après [107]).	40
<b>Fig I.24.</b>	Une coupe schématique de la configuration d'essai du lit de fondation (d'après [108]).	41
<b>Fig I.25.</b>	La géométrie du modèle utilisée en analyse numérique (d'après [109]).	42
<b>Fig I.26.</b>	Le chariot d'essai avec ensemble de roue simple de 13.608 kg (d'après [112]).	43
<b>Fig I.27.</b>	La géométrie et le maillage fini : un schéma de principe de la section d'essai [119].	45

---

## Chapitre II

### ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT DES SOLS RENFORCES

---

- Fig.II.1:** La courbe granulométrique du sol étudié..... 50
- Fig.II.2:** Fibre d'Alfa [130]. ..... 51
- Fig.II.3:** L'orientation des fibres dans l'échantillon de sol (a) verticale (b) inclinée (c) horizontale (d) aléatoire. .... 54
- Fig.II.4:** L'influence de la teneur des fibres d'Alfa sur le comportement de sable sous différentes contraintes normales : (a) variation de «  $\tau/\sigma_n$  » sous  $\sigma_n = 100\text{KPa}$ , (b) variation de «  $\tau/\sigma_n$  » sous  $\sigma_n = 200\text{KPa}$ , (c) variation de «  $\tau/\sigma_n$  » sous  $\sigma_n = 300\text{KPa}$  et (d) Coefficient d'amélioration des contrainte de cisaillement pour différents pourcentages d'Alfa..... 56
- Fig.II.5:** Variation des paramètres mécaniques de cisaillements en fonction de la teneur en fibres (a) Courbe intrinsèque (b) Variation de la cohésion (c) Variation d'angle du frottement. 57
- Fig.II.6:** L'influence de la longueur des fibres d'Alfa sur le comportement de sable sous différentes contraintes normales : (a) Variation de «  $\tau/\sigma_n$  », (b) Variation du coefficient d'amélioration des contrainte de cisaillement. .... 58
- Fig.II.7:** Variation des paramètres mécaniques de cisaillements en fonction de la longueur des fibres (a) Courbe intrinsèque (b) Variation de la cohésion (c) Variation d'angle du frottement. 59
- Fig.II.8:** Variation du coefficient d'amélioration des contraintes de cisaillement sous différents teneurs, longueurs et orientations des fibres (a et a') Direction verticale (b et b') direction inclinée (c et c') direction horizontale. .... 61
- Fig.II.9:** Variation des paramètres mécaniques de cisaillements en fonction de l'orientation des fibres (a) Variation de la cohésion (b) Variation d'angle du frottement..... 62

---

## Chapitre III

### PREVISION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

---

- Fig. III.1:** Comparaison de la valeur de «  $\tau_{\max}$  » obtenue par les essais et le modèle de G.O. selon les directions suivantes : (a) verticale, (b) inclinée et (c) horizontale (différentes longueurs des fibres). 71
- Fig. III.2:** Les différents coefficients de performance pour la prédiction de «  $\tau_{\max}$  » avec l'utilisation du modèle G.O (différentes longueurs des fibres). ..... 72
- Fig. III.3:** Comparaison de la valeur «  $\tau_{\max}$  » obtenue par les essais et le modèle de G.O. selon les directions : (a) verticale, (b) inclinée et (c) horizontale (différentes teneurs en fibres)..... 73

<b>Fig. III.4:</b> Les différents coefficients de performance pour la prédiction de « $\tau_{max}$ » avec l'utilisation du modèle G.O (différentes teneurs en fibres).....	74
<b>Fig. III.5:</b> La structure de base du modèle RNA proposé.....	75
<b>Fig. III.6:</b> L'organigramme de conception de RNA utilisé. ....	76
<b>Fig. III.7:</b> Choix du modèle RNA optimal (cas du modèle A2). ....	77
<b>Fig. III.8:</b> Les différents types des fonctions de transfert.....	78
<b>Fig. III.9:</b> L'architecture de meilleure modèle optimal de RNA (A15). ....	80
<b>Fig. III.10:</b> La corrélation entre les données d'entraînement pour $\tau_{max}$ cible et prédite (A15). 81	81
<b>Fig. III.11:</b> La corrélation entre les données de validation pour $\tau_{max}$ cible et prédite (A15).82	82
<b>Fig. III.13:</b> Valeurs de RMSE pour différents nombres neurones. ....	83
<b>Fig. III.14:</b> Valeurs de RMSE pour différents nombres de couches cachées. ....	84

## Chapitre IV

### L'EFFET D'ORIENTATION DES FIBRES SUR LES OUVRAGES GEOTECHNIQUES

<b>Fig IV.1:</b> Modèle géométrique de la fondation modélisée (a) modèle en 3D (b) coupe A'A'. 89	89
<b>Fig IV.2:</b> La pression limite obtenue par PLAXIS. ....	90
<b>Fig IV.3:</b> Effet d'anisotropie sur semelle carrée en fonction de « h/B »: (a) Pression limite (b) indice d'amélioration de la pression limite « $I_q$ ».....	92
<b>Fig IV.4:</b> Le tassement en fonction de « h/B » (a) Indice de déformabilité « DI », (b) Indice de déplacement par rapport à la direction aléatoire « $I_{Dep}$ ».....	95
<b>Fig IV.5:</b> Mécanisme de rupture du sol renforcé (h/B = 0.5) pour les directions : (a) Aléatoire (b) Verticale (c) Inclinée et (d) Horizontale.....	96
<b>Fig IV.6:</b> Mécanisme de rupture du sol renforcé (h/B = 0.75) pour les directions : (a) Aléatoire (b) Verticale (c) Inclinée et (d) Horizontale.....	96
<b>Fig IV.7:</b> Mécanisme de rupture du sol renforcé (h/B = 1) pour les directions : (a) Aléatoire (b) Verticale (c) Inclinée et (d) Horizontale.....	97
<b>Fig IV.8:</b> Mécanisme de rupture du sol renforcé (h/B = 1.25) pour les directions : (a) Aléatoire (b) Verticale (c) Inclinée et (d) Horizontale.....	97
<b>Fig IV.9:</b> Modèle géométrique du rideau de palplanche modélisée (a) modèle en 3D (b) coupe A'A'. 99	99
<b>Fig IV.10:</b> La contrainte active sur le rideau de palplanche obtenue par PLAXIS (zone d'interface). 100	100
<b>Fig IV.11:</b> Variation de la déflexion en fonction de « U/H » : (a) au sommet du rideau de palplanches (b) le long du rideau de palplanches (cas de U/H = 0.2).....	102
<b>Fig IV.12:</b> Variation de la déflexion en fonction de X/H (a) Déflexion au sommet de rideau de palplanche, (b) Indice de diminution de déflexion « $I_{Ds}$ » par rapport à la direction aléatoire. 104	104

- Fig IV.13:** Modèle géométrique du talus modélisé (a) modèle en 3D (b) coupe A'A' [162].  
106
- Fig IV.14:** Résultats obtenus par PLAXIS (a) Cercle de glissement (b) Coefficient de sécurité  
107
- Fig IV.15:** Les cercles de glissement dans les différentes directions d'ajout des fibres cas de  $\text{tg}(\alpha)=5/1$  (a) Aléatoire, (b) Verticale, (c) Inclinée, (d) Horizontale. .... 108
- Fig IV.16:** Variation du coefficient de sécurité en fonction de la pente étudiée..... 109

## Liste des tableaux

---

### Chapitre I

#### SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

---

<b>Tableau I.1</b>	Comparaison entre les modèles rhéologiques étudiés.....	29
--------------------	---	----

---

### Chapitre II

#### ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT DES SOLS RENFORCES

---

<b>Tableau II.1</b>	Propriétés de sable de Jijel.....	49
<b>Tableau II.2</b>	Propriétés mécaniques d'Alfa [129]. .....	52
<b>Tableau II.3</b>	Variations des contraintes de cisaillement anisotropes « $I'_s$ » pour différentes teneurs en fibres d'Alfa.....	63
<b>Tableau II.4</b>	Variations des contraintes de cisaillement anisotropes « $I'_s$ » pour différentes longueurs des fibres d'Alfa.....	64

---

### Chapitre III

#### PREVISION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

---

<b>Tableau III.1</b>	Différents architectures des modèles de RNA proposés.....	77
<b>Tableau III.2</b>	Les coefficients de performance pour chaque modèle optimal. ....	79
<b>Tableau III.3</b>	Les coefficients de performance obtenus par différents scénarios. ....	85
<b>Tableau III.4</b>	Comparaison entre le modèle de G.O et RNA développé.....	85

---

### Chapitre IV

#### L'EFFET D'ORIENTATION DES FIBRES SUR LES OUVRAGES GEOTECHNIQUES

---

<b>Tableau IV.1</b>	Les paramètres des sols. ....	89
<b>Tableau IV.2</b>	Les paramètres de la fondation. ....	89
<b>Tableau IV.3</b>	Les coefficients de l'équation IV.02, utilisés pour tracer les courbes de $q_{lim} = f(h/B)$ . ....	93
<b>Tableau IV.4</b>	Les coefficients de l'équation IV.05, utilisés pour tracer les courbes de $DI = f(h/B)$ . ....	96

<b>Tableau IV.5</b>	Les paramètres de la fondation.....	99
<b>Tableau IV.6</b>	Les coefficients de l'équation IV.7, utilisés pour tracer les courbes de $D_s = f(X/H)$ dans la condition $U/H = 0.2$ .....	105
<b>Tableau IV.7</b>	Les coefficients de l'équation IV.10, utilisés pour tracer les courbes de $FS = f(tg\alpha)$ .....	110

## Liste des notations

$E_{Renforcement}$ : Le module d'élasticité en traction (longitudinal) des armatures	[KN/m <sup>2</sup> ]
$E_{sol}$ : Le module d'élasticité moyen du sol.	[KN/m <sup>2</sup> ]
$C_{ur}$ : La cohésion de sol non renforcé	[KN/m <sup>2</sup> ]
$\varphi_{ur}$ : L'angle de frottement de sol non renforcé	[°]
$\tau_{ff}$ : La contrainte de cisaillement à la rupture de sol renforcé par fibre	[KN/m <sup>2</sup> ]
$\Delta S$ : L'augmentation de la contrainte de cisaillement par les fibres	[KN/m <sup>2</sup> ]
$\tau'$ : La contrainte tangentielle mobilisée à l'interface sol-fibre au début du glissement	[KN/m <sup>2</sup> ]
$n_i$ : Nombre « i » de fibre	[-]
$A_s$ : La section transversale totale de cisaillement du sol	[m <sup>2</sup> ]
$L_i$ : Longueur « i » de fibre	[m]
$l_f$ : La longueur de la fibre sollicitée en traction par le cisaillement du sol	[m]
$\theta$ : angle de distorsion de fibre	[°]
$x$ : déplacement de cisaillement parallèle à la zone de cisaillement	[m]
$z$ : Epaisseur de la zone de cisaillement estimé selon Roscoe (1970)	[m]
$K$ : Le taux de distorsion de cisaillement	[-]
$A_f$ : L'aire cumulée des fibres dans un plan à l'intérieur de la masse de sol	[m <sup>2</sup> ]
$A$ : L'aire totale du plan dans la masse de sol renforcé	[m <sup>2</sup> ]
$i$ : L'angle d'orientation initial de la fibre par rapport à la zone de cisaillement	[°]
$\sigma_f$ : La résistance à la traction mobilisée des fibres par unité de surface de sol renforcé de fibres	[KN/m <sup>2</sup> ]
$E_f$ : Le module ou la rigidité longitudinale de la fibre	[KN/m <sup>2</sup> ]
$\tau_f$ : La contrainte de glissement d'interaction le long de la fibre	[KN/m <sup>2</sup> ]
$D_f$ : Le diamètre de la fibre	[m]
$\sigma_{conf}$ : Contrainte de confinement	[KN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{crit}$ : Contrainte de confinement critique obtenu par les travaux de Maher (1988)	[KN/m <sup>2</sup> ]
$N_s$ : Nombre attendu de fibres coupant une unité de surface	[-]
$\zeta$ : Coefficient empirique dépendant de la granulométrie du sable	[-]
$D_{50}$ : Taille moyenne des grains	[m]
$S_p$ : Sphéricité des particules	[-]
$C_U$ : Coefficient d'uniformité du sable	[-]
$\delta$ : Angle interaction de fibre	[°]
$\sigma_R$ : La force de traction distribuée induite par les fibres par unité de surface	[KN/m <sup>2</sup> ]
$\alpha$ : Coefficient empirique qui rend compte de la distribution des fibres	[-]
$c_{i,c}$ et $c_{i,\varphi}$ : Les coefficients d'interaction	[-]
$a$ : L'adhérence entre le sol et la fibre	[-]
$\sigma_{crit}$ : La contrainte normale critique	[KN/m <sup>2</sup> ]
$L_{e,av}$ : La longueur moyenne d'enrobage des fibres distribuées au hasard	[m]
$c_R$ : La cohésion apparente dans le sol granulaire renforcé par de fibres	[KN/m <sup>2</sup> ]
$c_{RS}$ : La contrainte normale de confinement améliorée dans le sol granulaire renforcé par de fibres	[KN/m <sup>2</sup> ]
$G_f$ : La densité des solides fibreux	[-]
$R$ et $p$ : Des invariants dans le plan de l'état de contrainte macroscopique	[KN/m <sup>2</sup> ]

$\theta_0$ : L'inclinaison de la direction de déformation incrémentale nulle	[°]
$\dot{\epsilon}_1$ : Le taux de déformation principale majeure des échantillons de sol renforcé	[-]
$\dot{\epsilon}_3$ : Le taux de déformation principale mineure des échantillons de sol renforcé	[-]
$D_{10}$ , $D_{30}$ et $D_{60}$ : Les diamètres effectifs	[m]
$C_c$ : Coefficient de courbure	[-]
$E_s$ : Équivalent de sable	[-]
$w$ : Teneur en eau	[-]
$w_L$ : Limite de liquidité	[-]
$w_p$ : Limite de plasticité	[-]
$e$ : Indice des vides	[-]
$I_p$ : Indice de plasticité	[-]
VBS : Indice de bleu méthylène	[-]
$d_h$ : Densité humide	[-]
$d_s$ : Densité des grains solides	[-]
$\gamma_f$ : Le poids volumiques des fibres	[KN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_s$ : Le poids volumiques des grains solides respectivement	[KN/m <sup>3</sup> ]
$M_f$ : La masse des fibres	[Kg]
$M_s$ : La masse de sol sec	[Kg]
$I'_s$ : Indice de variations des contraintes de cisaillement anisotropes	[-]
$\tau_{max,ani}$ : Contrainte de cisaillement maximale dans les directions des fibres : verticale, inclinée ou horizontale	[KN/m <sup>2</sup> ]
$\tau_{max,iso}$ : Contrainte de cisaillement maximale dans la direction des fibres aléatoire.	[KN/m <sup>2</sup> ]
RMSE : Erreur quadratique moyenne	[-]
MAE : Erreur absolue moyenne	[-]
$\tau_{prédite}$ : Les valeurs prédites de la résistance à la cisaillement du sol renforcé.	[KN/m <sup>2</sup> ]
$\tau_{(expérimentale)}$ : les valeurs cibles de la résistance à la cisaillement du sol renforcé.	[KN/m <sup>2</sup> ]
$k_f$ : Le facteur de réduction de la résistance au cisaillement de l'interface dû au renforcement.	[-]
$\gamma'_{unsat}$ : Poids volumique sec	[KN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma'_{sat}$ : Poids volumique saturé	[KN/m <sup>3</sup> ]
$\nu$ : Coeff. de poisson	[-]
$\gamma_{fond}$ : Poids volumique de la fondation	[KN/m <sup>3</sup> ]
$q_{lim,ani}$ : La pression limite des sols renforcés par ajout des fibres dans la direction verticale, inclinée ou horizontale	[KN/m <sup>2</sup> ]
$q_{lim,iso}$ : La pression limite des sols renforcés par ajout des fibres dans la direction aléatoire	[KN/m <sup>2</sup> ]
DI : L'indice de déformabilité	[-]
$S_{renf}$ : Le tassement de la fondation reposant sur des sols renforcés par ajout de fibres	[m]
$S_{non-renf}$ : Le tassement de la fondation reposant sur des sols non renforcés	[m]
$I_{Dep}$ : L'indice d'augmentation du déplacement à la rupture	[-]
$S_{ani}$ : Le tassement de la fondation reposant sur des sols renforcés par ajout de fibres dans la direction verticale, inclinée ou horizontale	[m]
$S_{iso}$ : Le tassement de la fondation reposant sur des sols renforcés par ajout de fibres dans la direction aléatoire	[m]
$D_{ani}$ : Déflexion au sommet du rideau de palplanches adjacente au sol renforcé par l'ajout de fibres dans la direction verticale, inclinée ou horizontale	[m]

$D_{iso}$ : Déflexion au sommet du rideau de palplanches adjacente au sol renforcé par l'ajout de fibres dans la direction aléatoire	[m]
$SR$ : Le facteur de réduction de résistance	[-]
$FS$ : Le facteur de sécurité	[-]

# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction générale

Le renforcement de sol est une technique importante pour assurer la stabilité des sols, notamment en cas de catastrophe naturelle. L'Algérie, confrontée à de tels défis, a adopté une politique de développement à travers le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Le gouvernement algérien encourage la recherche de solutions en utilisant les ressources naturelles renouvelables disponibles dans la région. Dans cette optique, les fibres naturelles de palmier, de diss et de sisal ont été identifiées comme des ressources renouvelables pouvant être utilisées pour renforcer les sols de manière économique [1-3].

Les propriétés mécaniques de ces fibres ont été étudiées et ont démontré leur capacité à augmenter la résistance et la stabilité des sols [4-6]. En outre, leur utilisation offre une alternative durable, économique et écologique pour renforcer les sols [7], tout en optimisant l'utilisation des ressources renouvelables disponibles dans la région.

Cependant, lors de la préparation du sol renforcé par des fibres, le processus de compactage peut entraîner une anisotropie dans l'orientation des fibres [8]. Cette anisotropie peut avoir un impact significatif sur la performance du sol renforcé en altérant la direction de la force de renforcement [9]. Malheureusement, la plupart des modèles mécaniques utilisés dans le calcul du comportement de ces sols supposent qu'ils ont un comportement isotrope, ce qui n'est pas toujours le cas.

L'anisotropie est un facteur crucial dans les sciences géotechniques, et bien que de nombreuses recherches aient été menées sur ce sujet [10, 11], la plupart d'entre elles se concentrent sur la mécanique des roches plutôt que sur celle des sols. Pourtant, l'anisotropie peut également être observée dans les sols et avoir des effets significatifs. De nombreuses études ont ainsi démontré que le comportement anisotrope des sols peut influencer la stabilité des pentes [12-15], la portance des fondations [16-19], les performances des chaussées [20, 21], la stabilité des murs de soutènement [22, 23] ou encore celle des tunnels [24, 25].

En 1979, Oda et Koishikawa [26] ont rapporté que le coefficient de capacité portante dû au poids propre, noté " $N\gamma$ ", pourrait être surestimé de 40% à 50% si l'anisotropie dans un sol granulaire était ignoré. Des études menées par Michalowski et Cermak en 2002 [27] ont montré que l'utilisation de modèles isotropes pour prédire le comportement des sols granulaires renforcés par des fibres conduit à des prédictions inexacts de la résistance attribuée aux fibres.

Les fibres peuvent affecter la résistance et la déformabilité des sols de différentes manières en fonction de leur orientation, de leur géométrie et de leur proportion [28], entraînant ainsi une anisotropie dans les propriétés mécaniques des sols renforcés par des fibres qui peut influencer la réponse de l'ouvrage géotechnique [28]. Cependant, il est important de comprendre l'impact de l'anisotropie résultant du renforcement des sols par des fibres sur les calculs des ouvrages géotechniques afin de garantir leur sécurité et leur durabilité

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'influence réelle de l'anisotropie causée par le renforcement des sols granulaires locaux avec des fibres végétales sur les performances de stabilité et de portance des structures géotechniques. En outre, l'étude se penche sur le comportement anisotrope des sols lorsqu'ils sont soumis à des contraintes de cisaillement, en prenant en compte la disponibilité des matériaux de traitement, leur coût et leur impact sur l'environnement.

Bien que la recherche sur le renforcement des sols ait considérablement avancé ces dernières années, le développement de modèles constitutifs pour les sols renforcés par des fibres, en prenant en compte leur effet d'anisotropie, a un progrès peu marqué. Bien que certaines tentatives aient été faites pour créer des modèles pouvant prédire la résistance des sols renforcés de fibres en conditions anisotropes, le besoin d'un nouveau modèle reste nécessaire [9, 29-32]. Par conséquent, l'objectif de cette étude est de développer un nouveau modèle pour prédire la contrainte de cisaillement de ces sols, tout en prenant en compte l'effet de l'anisotropie.

Afin de réaliser les objectifs de cette étude, des essais ont été menés en laboratoire. En se basant sur les résultats obtenus, des analyses numériques ont été effectuées pour créer des modèles de réseaux de neurones permettant de prédire le comportement des sols renforcés par des fibres en prenant en compte leur anisotropie. Une comparaison a été réalisée entre un modèle analytique et ce modèle pour mieux comprendre ce comportement. De plus, une analyse par éléments finis a été utilisée pour étudier l'effet de cette anisotropie sur les ouvrages géotechniques.

Cette thèse commence par une introduction générale qui contient un aperçu générale sur le problème étudié, son importance et son objectif. Elle s'organise à quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** de ce document présente une revue de la littérature qui traite de l'effet de l'anisotropie sur le comportement des sols et des ouvrages géotechniques en général, ainsi que l'effet d'anisotropie induit par le renforcement des sols avec des

fibres en particulier. Ce chapitre expose également les modèles rhéologiques et numériques associés à ce phénomène. En outre, il décrit les méthodes de prédiction de ces sols à l'aide de nouvelles techniques d'intelligence artificielle. La dernière partie de ce chapitre examine des exemples concrets illustrant l'influence des sols fibrés sur des ouvrages géotechniques réels.

- **Le deuxième chapitre** a pour but de présenter une étude expérimentale des sols anisotropes, en détaillant les matériaux et la méthodologie utilisés pour réaliser cette étude. Les résultats des essais sont également examinés et comparés à ceux des recherches présentées dans le premier chapitre.
- Dans **le troisième chapitre**, un modèle basé sur l'intelligence artificielle est présenté pour prédire le comportement de résistance au cisaillement du sable renforcé par des fibres, dans différentes directions. Le processus de dérivation est décrit et les résultats du modèle sont présentés. Ensuite, les résultats prédits sont comparés aux résultats expérimentaux et au modèle analytique de Gray et Ohashi de 1983 [29]. Enfin, la capacité du modèle proposé est évaluée et discutée.
- **Le quatrième chapitre** présente les résultats d'une étude numérique portant sur différents ouvrages de géotechnique. Une modélisation est effectuée afin d'analyser l'effet d'anisotropie sur ces ouvrages, et les résultats obtenus sont discutés.

À la fin de cette thèse, une conclusion générale résume et conclut le travail de recherche accompli. Cette conclusion propose également plusieurs suggestions pour des recherches futures qui pourraient être menées dans la continuité de cette étude.

CHAPITRE I  
SYNTHESE  
BIBLIOGRAPHIQUE :  
COMPORTEMENT ANISOTROPE DES SOLS  
RENFORCES

## **I.1 Introduction**

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur l'effet de l'anisotropie sur le comportement des sols et des ouvrages géotechniques. Tout d'abord, nous avons défini le terme "anisotropie" dans le domaine de la géotechnique, puis nous avons concentré nos recherches sur l'anisotropie des sols renforcés par des fibres, en exposant leurs modèles rhéologiques et numériques. En outre, nous avons effectué une synthèse sur la prédiction de ces sols à l'aide de nouvelles techniques d'intelligence artificielle. Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons examiné des exemples illustrant l'influence des sols fibrés sur des ouvrages géotechniques réels.

## **I.2 Notion d'anisotropie**

### **I.2.1 L'anisotropie des matériaux**

La transformation d'un produit dépend de ses caractéristiques matérielles, qui peuvent entraîner des comportements différents lorsqu'ils sont soumis à des processus spécifiques. Une compréhension complète de ces propriétés est essentielle pour sélectionner les matériaux les plus adaptés et guider le choix des procédures les mieux adaptées pour obtenir des propriétés mécaniques et physiques spécifiques.

Les matériaux peuvent être classés à une échelle macroscopique en deux types de base : isotropes ou anisotropes. L'isotropie est dérivée des termes grecs "iso", qui signifie "égal", et "tropos" ou "tropikos", qui se rapporte à la "direction". En revanche, le préfixe "an" indique une disparité par rapport au sens du mot racine, donc anisotrope signifie l'opposé complet d'isotrope.

L'isotropie signifie un comportement uniforme dans toutes les directions, tandis que l'anisotropie se réfère à la tendance du matériau à réagir différemment aux contraintes appliquées dans différentes directions. Un matériau isotrope est très malléable et peut être façonné en n'importe quelle forme. Étant donné que les propriétés de ses microcomposants sont les mêmes dans toutes les orientations, son comportement est également hautement prévisible. Les métaux, les verres, la plupart des liquides et les polymères sont des exemples de matériaux isotropes.

Les matériaux anisotropes naturels sont souvent différents types de bois et de roche, entre autres. Ces types de roches ont pour la plupart une structure stratifiée tandis que les bois sont

naturellement renforcés, comme en témoignent les orientations de leurs fibres. La microstructure des matériaux anisotropes est généralement composée de différentes couches qui sont liées entre elles dans les matériaux naturels ou d'un certain nombre d'ingrédients moulés ensemble. Les composites sont l'un des exemples d'application des matériaux anisotropes. L'anisotropie du sol peut également avoir des implications importantes pour les problèmes liés aux ouvrages de géotechnique.

### I.2.2 La présence d'une anisotropie dans les masses de sols

Les sols sont des matériaux isotropes qui peuvent se retrouver dans des circonstances anisotropes en raison de leur historique de dépôt et de chargement passé, également appelé anisotropie induite (consolidation en condition œdométrique, érosion, chargements, contraintes tectoniques, etc.) ou de l'hétérogénéité de leur structure, connue sous le nom d'anisotropie inhérente (Fig. I.1) [33]. Cette anisotropie se manifeste par des arrangements anisotropes de particules et des forces portées par les contacts entre les particules. Étant donné que les particules de sol ne sont généralement ni sphériques ni sous-sphériques, l'anisotropie du tissu géométrique comprend la disposition des centres des particules et l'orientation des particules. En principe, si l'on connaît ce tissu géométrique ainsi que les informations sur l'orientation et l'activation des contacts entre les particules et les forces de contact, ainsi que les caractéristiques des actions inter-particulaires, la réponse mécanique du système sol pourrait être anticipée [34].



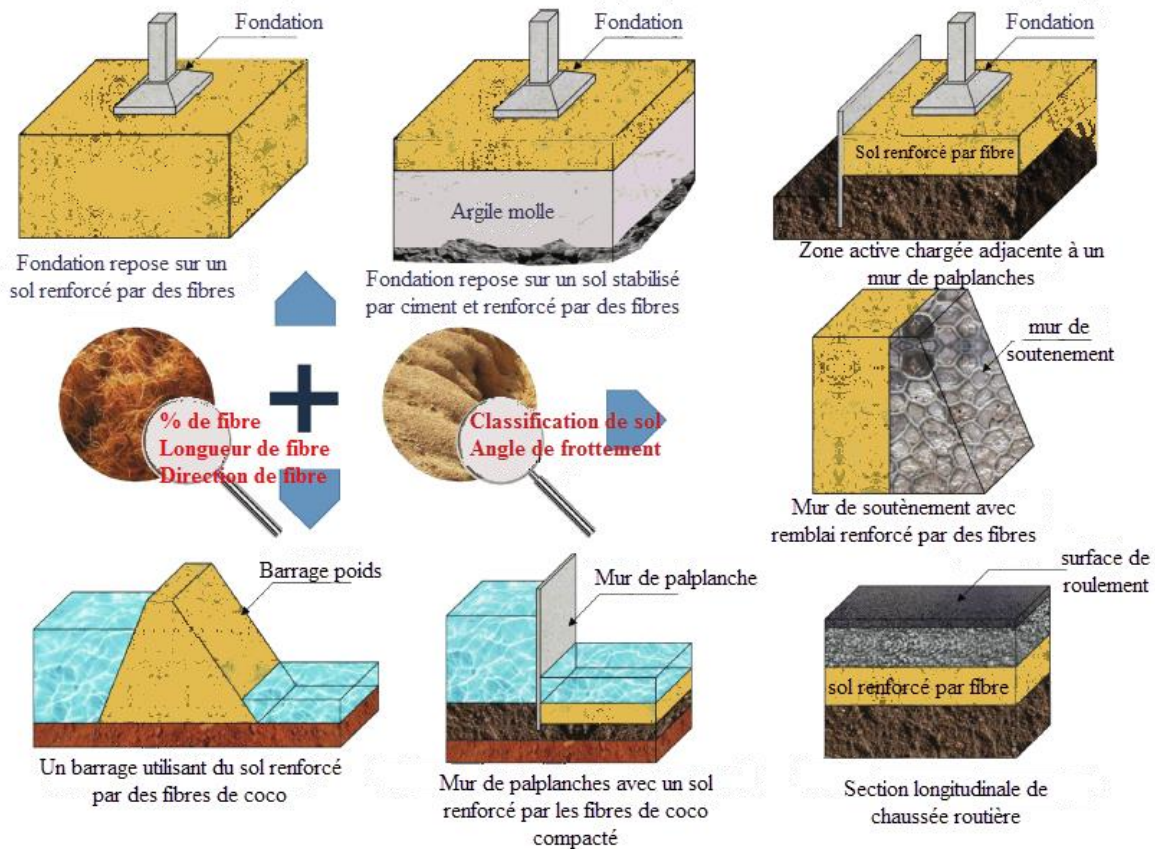


**Fig I.1.** Une coupe stratigraphique d'un sol présentant des couches de sable causées par des tremblements de terre [33], (b) : Sol anisotrope en fonction des couches de dépôt [33].

### **I.2.3 La présence d'une anisotropie dans les masses de sols due à l'activité humaine**

Les avancées technologiques dans les secteurs du génie civil, tels que la construction de barrages, de ports pour les porte-conteneurs géants et les réseaux de transport urbain, nécessitent des infrastructures de grande envergure. Pour garantir la résistance et la déformabilité du sol pendant la construction, différentes techniques d'amélioration du sol sont mises en œuvre, en fonction de son type et du niveau de service requis. Parmi les techniques les plus courantes, on peut citer l'utilisation de géotextiles, l'injection de produits chimiques dans les sols à faible résistance, l'ajout de ciment aux sols mixtes et le renforcement des sols avec différents matériaux, tels que des fibres synthétiques ou naturelles (Fig. I.2).

L'ajout de matériaux artificiels pour la stabilisation des sols peut impacter leur comportement mécanique, les rendant anisotropes. Par exemple, l'ajout de fibres dans un remblai peut causer une séparation des couches dans un sol initialement homogène (Fig. I.2). À grande échelle, le comportement des sols traités peut ressembler à celui d'un sol naturellement périodiquement sédimenté et donc anisotrope. Il est donc important de développer un modèle de calcul adapté pour en tenir compte [35-37].



**Fig I.2.** Les applications géotechniques de renforcement des sols par l'ajout de fibres [38].

### I.3 Généralités sur le comportement des sols renforcés

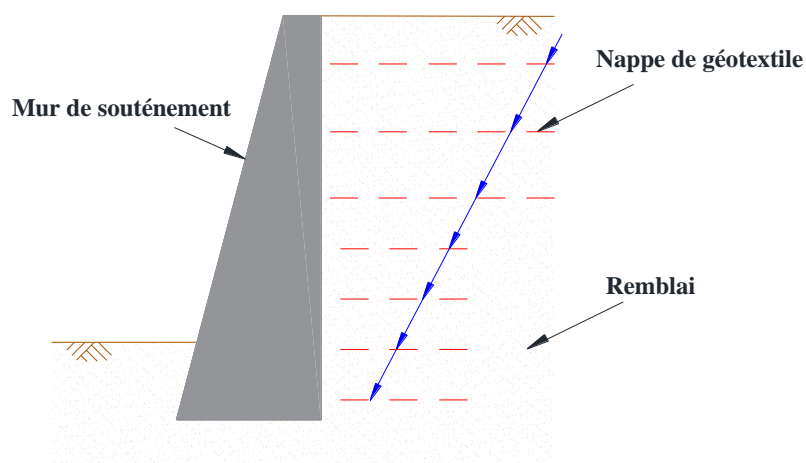
Le sol est largement utilisé en tant que matériau de construction dans de nombreux projets de génie civil et géotechnique, où il joue un rôle crucial en soutenant les fondations structurales. Cependant, malgré leur résistance à la compression, les sols sont relativement faibles en traction. Afin d'améliorer leurs propriétés techniques, différents types et formes de renforcement sont utilisés dans la construction moderne en génie civil, environnemental, minier et agricole. Ces renforcements ont donné naissance à un matériau relativement nouveau appelé « sol renforcé », qui est un matériau composite où des éléments résistants à la traction sont incorporés dans un massif de sol faible en traction.

Le renforcement des sols est un concept qui n'est pas récent, étant donné que les sols ont été renforcés depuis la préhistoire. Les insectes, oiseaux et animaux utilisent également le renforcement du sol sous différentes formes pour créer des structures adaptées à leurs besoins. Toutefois, la forme moderne de renforcement des sols a été développée pour la première fois sous forme de bandes métalliques par Vidal [39, 40] et a été brevetée sous le nom de "Terre Armée" [41]. Les bandes métalliques sont disponibles avec des surfaces lisses ou

nervurées. Afin d'éviter les problèmes de corrosion, les bandes d'acier sont souvent galvanisées de manière appropriée pour maintenir leur durée de vie dans le sol. D'après les statistiques de Gowthaman et al. (2018) [5], après son invention par Vidal en 1969 [40], plus de 4000 applications de renforcement des sols ont été réalisées dans plus de 37 pays.

Dans la plupart des applications modernes, le renforcement des sols se fait souvent à l'aide d'inclusions continues de renforcement géosynthétique ou géonaturel, telles que des feuilles, des filets, des mailles, des grilles, des bandes ou des barres, qui sont disposées selon un schéma défini dans la masse du sol, permettant ainsi d'obtenir un sol systématiquement renforcé. Une étude approfondie sur l'historique, l'utilisation et le comportement des sols renforcés à l'aide de géosynthétiques a été discutée dans la recherche de Holtz en 2017[42].

À noter que les renforts géosynthétiques ou géonaturels, ainsi que les bandes métalliques, sont normalement orientés dans une direction privilégiée. Ainsi, l'orientation du renforcement est généralement unidimensionnelle et est installée séquentiellement en couches alternées selon les exigences de conception de l'application spécifique[43]. Figure I.3 illustre un exemple de sol systématiquement renforcé où des renforts géosynthétiques sont installés selon une disposition régulière en couches alternées. Le renforcement permet de réduire significativement la pression latérale des terres, diminuant ainsi l'épaisseur du mur [44].



**Fig I.3.** Un mur de soutènement supportant un remblai de sol systématiquement renforcé [44].

En ce qui concerne la rigidité, les renforts en acier et en fibre de verre, sous forme de bandes et de barres, avec un module d'élasticité élevé, sont souvent considérés comme des renforts idéalement inextensibles. En revanche, les renforts géosynthétiques et géo-naturels, y compris les racines de plantes, ayant un module d'élasticité relativement faible, sont considérés comme

des renforts idéalement extensibles. McGown et al. (1978) ont expliqué cette distinction entre ces deux catégories de renforcement de sol de la manière suivante [45]:

- Pour des armatures idéalement inextensibles,

$$\frac{E_{\text{Renforcement}}}{E_{\text{sol}}} > 3000 \quad (\text{I.01})$$

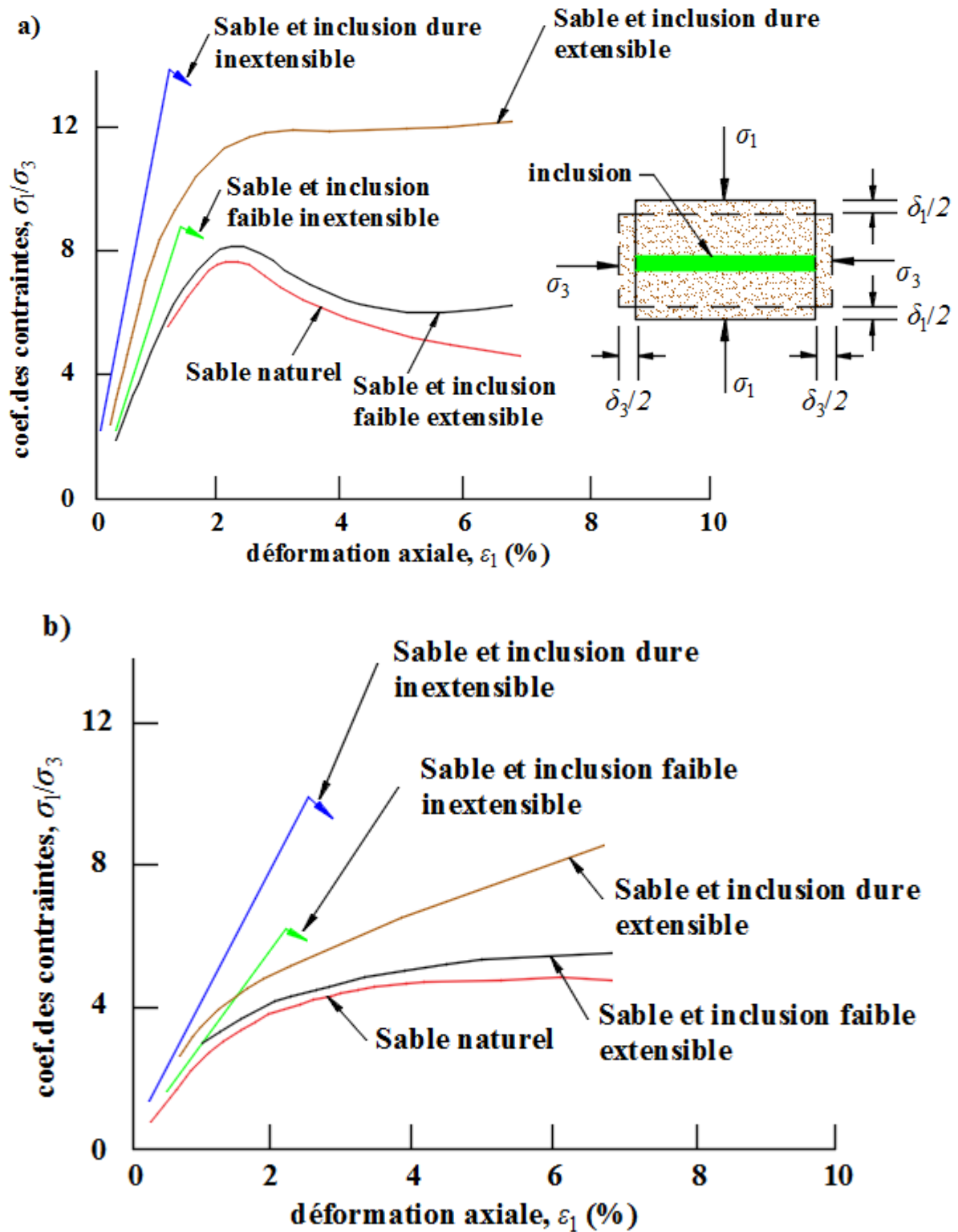
- Pour des renforts idéalement extensibles,

$$\frac{E_{\text{Renforcement}}}{E_{\text{sol}}} < 3000 \quad (\text{I.02})$$

Avec :

- $E_{\text{Renforcement}}$  : Le module d'élasticité en traction (longitudinal) des armatures ;
- $E_{\text{sol}}$  : Le module d'élasticité moyen du sol.

Il convient de noter que la différence entre l'influence des renforcements inextensibles et extensibles est importante en termes de comportement contrainte-déformation du système de sol renforcé, comme indiqué dans la Figure I.4 [45]. Lorsque le sol est renforcé avec une armature extensible, le système présente une plus grande ductilité et une perte de résistance post-pic moins importante par rapport au sol seul ou au sol renforcé avec une armature inextensible [44, 45]. Les renforts inextensibles ont généralement des contraintes de rupture inférieures aux contraintes de traction maximales dans le sol non renforcé, ce qui peut entraîner des défaillances catastrophiques. En revanche, les renforts extensibles peuvent avoir des contraintes de rupture supérieures aux contraintes de traction maximales dans le sol non renforcé, ce qui les rend moins susceptibles de se rompre.



**Fig I.4.** Le comportement postulé d'une cellule unitaire dans des conditions de déformation plane avec et sans inclusions : (a) sable dense avec inclusions, (b) sable meuble avec inclusions [45].

Cependant, Les techniques conventionnelles de stabilisation présentent des problèmes environnementaux majeurs tels que des émissions importantes de dioxyde de carbone, des coûts énergétiques élevés et des pollutions environnementales (air, terre et eau) [46, 47]. De plus, ces

techniques épuisent les ressources non renouvelables et peuvent entraîner la libération de substances lourdes et dangereuses dans l'environnement. Par conséquent, les ingénieurs cherchent désormais à améliorer les sols de manière durable en utilisant des techniques respectueuses de l'environnement [5], étant donné les préoccupations actuelles sur la santé future de la planète. Ces approches respectueuses de la nature sont hautement préférées dans le domaine de l'ingénierie géotechnique et géo-environnementale.

Le renforcement des sols en fibres naturelles est devenu une technique de plus en plus populaire dans les applications géotechniques en tant que méthode de renforcement durable des sols. Il offre des avantages uniques tels que le respect de l'environnement, l'abondance des ressources, la consommation d'énergie minimale, la rentabilité et un potentiel élevé par rapport à d'autres matériaux établis [5, 6, 44, 48-55].

Les fibres ajoutées au sol peuvent prendre diverses formes, textures, rigidités, inclusions, longueurs ou orientations, mais la quantité, la longueur et l'orientation des fibres sont les principales préoccupations pour les applications pratiques[29]. Les sols renforcés en fibres peuvent être regroupés en deux types: (i) les sols renforcés en fibres distribuées orientées (ODFS) et (ii) les sols renforcés en fibres distribuées de manière aléatoire (RDFS) [5].

Pour les ODFS, la répartition directionnelle des fibres dans les applications pratiques est clairement anisotrope. Des recherches menées par Michalowski et Cermak en 2002 [27] ont montré que l'utilisation de modèles isotropes conduit à des prédictions inexactes de la résistance attribuée aux fibres. En effet, les modèles isotropes sous-estiment l'avantage des fibres lorsque la charge est perpendiculaire au plan d'orientation préférentiel des fibres. Par conséquent, des modèles anisotropes plus complexes doivent être utilisés pour une prédiction précise de la résistance des sols renforcés en fibres orientées.

## **I.4 Étude de l'anisotropie des sols renforcés avec des fibres**

### **I.4.1 Introduction**

Des études antérieures ont examiné l'impact de l'orientation des fibres sur la résistance des sols renforcés par des fibres. Gray et Ohashi [29] ont découvert que l'orientation optimale des fibres par rapport à la direction de la déformation principale maximale entraîne une augmentation maximale de la résistance au cisaillement. Michalowski [56] a développé un modèle théorique utilisant la technique d'homogénéisation pour incorporer une distribution

anisotrope de l'orientation des fibres pour les sols granulaires renforcés par des filaments continus. Michalowski et Cermak [27] ont mené des expériences pour étudier l'anisotropie de la résistance du sable renforcé de fibres et ont découvert que les fibres orientées dans la direction de la plus grande extension contribuent le plus à la résistance du composite. Cette observation a également été expliquée théoriquement à travers une approche d'homogénéisation. Michalowski [9] a développé une condition de rendement anisotrope pour le sable renforcé de fibres en utilisant la méthode cinématique du calcul limite.

Les recherches de Li [57, 58], Diambra et al. [59], Ibrahim et al. [60], et Mandolini et al. [61] ont confirmé que les sols renforcés par des fibres présentent une anisotropie qui affecte significativement leur résistance à la traction. Ces études ont également souligné l'importance de la méthode de mise en place pour l'état de déformation et l'anisotropie dans les sols renforcés. Étant donné que les sols sont intrinsèquement anisotropes, des études plus approfondies menées par Neeraja et al. [62] et Ghadr et al. [63] ont cherché à comprendre de la dépendance de l'anisotropie sur le comportement plastique des géomatériaux. Ils ont conclu que l'anisotropie est une caractéristique inhérente des sols qui ne peut être surmontée par les méthodes de mise en place.

## **I.4.2 Modèles rhéologiques du comportement des sols renforcés par des fibres**

### **I.4.2.1 Modèle de Waldron**

Le modèle repose sur l'utilisation de l'équation de Coulomb (Eq. I.03), dans lequel la contrainte de cisaillement de sol non renforcé est en fonction de la cohésion «  $C_{ur}$  » et l'angle de frottement «  $\varphi_{ur}$  » de sol non renforcé :

$$\tau = C_{ur} + \sigma_n \tan \varphi_{ur} \quad (\text{I.03})$$

Plusieurs hypothèses ont été faites par Waldron [64] pour la prédiction de la contrainte de cisaillement des sols renforcés par des fibres :

- Les fibres traversent une zone de cisaillement horizontale d'une épaisseur  $Z$  avec une orientation verticale, comme le montre la Fig. I.5, et ce  $Z$  ne change pas pendant le cisaillement ;

- Les fibres de différentes classes de diamètre «  $d_i$  » sont flexibles et linéairement élastiques avec le module de Young «  $E$  » ;
- L'angle de frottement du sol «  $\varphi$  » n'est pas affecté par les fibres, par conséquent l'équation de Coulomb pour le sol renforcé par de fibres devient :

$$\tau_{ff} = C_{ur} + \sigma_n \tan \varphi_{ur} + \Delta S \quad (\text{I.04})$$

Les fibres de ce modèle répondront à la charge de traction, de glissement dans le sol ou de la rupture, donc l'augmentation de la contrainte de cisaillement par les fibres «  $\Delta S$  » calculé selon les différents cas suivants :

a) Prolongation de fibres

$$\Delta S = [\pi (\tau' Z)^{1/2} \gamma \delta / 2A_s] \sum_{i=1}^m E_i^{1/2} n_i d_i^{3/2} \quad (\text{I.05})$$

Avec :

- $\tau'$  : La contrainte tangentielle mobilisée à l'interface sol-fibre au début du glissement ;
- $\gamma = (\sec \beta - 1)^{1/2}$  ;
- $\delta = (\sin \beta + \cos \beta \tan \varphi)$  ;
- $n_i$  : Nombre «  $i$  » de fibre ;
- $A_s$  : La section transversale totale de cisaillement du sol.

b) Glissement de fibres

$$\Delta S = [\pi \tau' \delta / 2A_s] \sum_{i=1}^j L_i n_i d_i \quad (\text{I.06})$$

Avec :

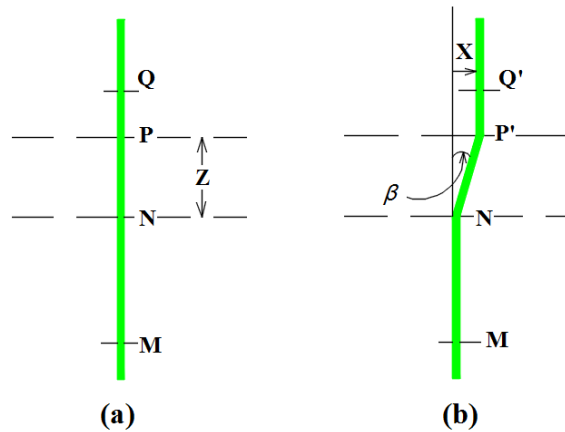
- $L_i$  : Longueur «  $i$  » de fibre.

c) Rupture de fibres

L'effet de renforcement d'une fibre sera perdu si le cisaillement du sol augmente la contrainte de traction maximale dans la fibre «  $T_n$  » jusqu'à la contrainte de rupture «  $T_f$  ». La longueur de la fibre nécessaire pour mobiliser «  $T_f$  » obtenue à partir de l'équation suivante :

$$l_f = T_f d / 2\tau' \quad (I.07)$$

Où «  $l_f$  » est la longueur de la fibre sollicitée en traction par le cisaillement du sol. Soit «  $L$  » la longueur réelle de la racine ; alors si  $L > l_f$ , la fibre peut être cassée, mais si  $L < l_f$ , la fibre glissera et ne cassera pas.

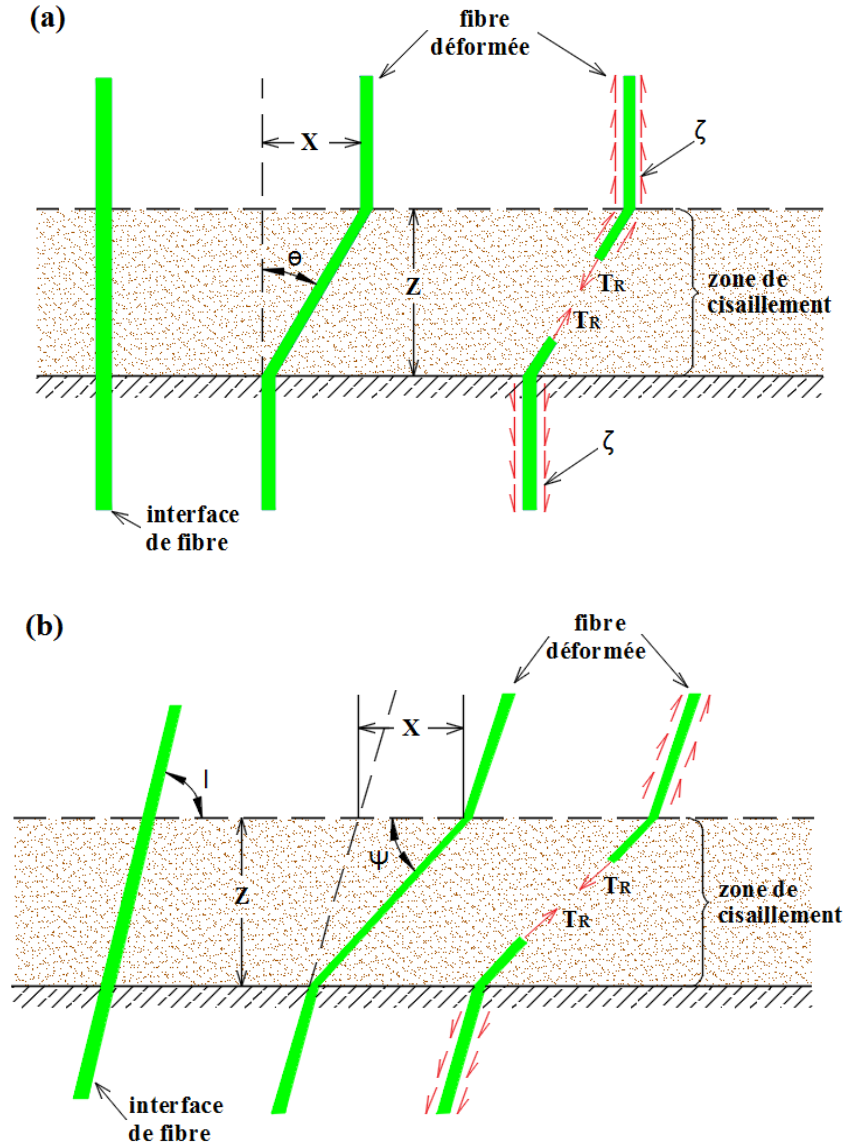


**Fig I.5.** Le comportement de la fibre (a) sans aucune force (b) cisailée.

#### I.4.2.2 Modèle de Gray et Ohashi (GO)

Sur la base de l'approche d'équilibre des forces, le modèle de Gray et Ohashi a établi la résistance au cisaillement du sol renforcé de fibres «  $\tau_{ff}$  » comme une combinaison des augmentations de la résistance au cisaillement ( $\Delta S$ ) et des paramètres de résistance au cisaillement du sol non renforcé «  $\tau_{ur}$  » (voir Eq. I.04).

On pense que le cisaillement du sol le long de la fibre élastique crée une déformation de la fibre, abaissant sa résistance à la traction (voir Fig. I.6).



**Fig I.6.** Le modèle de fibre flexible et élastique à travers la zone de cisaillement : (a) fibre verticale ; (b) fibre oblique avec un angle d'orientation donné par rapport à la direction de cisaillement [29].

Les équations suivantes sont utilisées pour calculer les augmentations de résistance au cisaillement ( $\Delta S$ ) :

a) Pour les fibres disposées à 90 degrés du plan de cisaillement initial (Eq. I.08) :

$$\Delta S = T_R [\sin \theta + \cos \theta \cdot \tan \varphi_{ur}] \quad (\text{I.08})$$

b) Pour les fibres orientées initialement à un certain angle arbitraire «  $i$  » avec l'horizontale (Eq. I.09) :

$$\Delta S = T_R [\sin(90 - \psi) + \cos(90 - \psi) \cdot \tan \varphi_{ur}] \quad (\text{I.09})$$

Avec:

- $\psi = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{k + (\tan^{-1} i)^{-1}} \right]$ ;
- $T_R = \left( \frac{A_f}{A} \right) \sigma_f$ ;
- $\theta$ : angle de distorsion de fibre =  $[\tan(x/z)]^{-1}$ ; « x » : déplacement de cisaillement parallèle à la zone de cisaillement et « z » : épaisseur de la zone de cisaillement estimé selon Roscoe (1970) [65] ;
- $k = (x/z)$ : le taux de distorsion de cisaillement ;
- $A_f$  : L'aire cumulée des fibres dans un plan à l'intérieur de la masse de sol ;
- $A$  : L'aire totale du plan dans la masse de sol renforcé ;
- $i$  : L'angle d'orientation initial de la fibre par rapport à la zone de cisaillement ;
- $\sigma_f$ : La résistance à la traction mobilisée des fibres par unité de surface de sol renforcé de fibres (Eq. I.10 et I.11) ;

▪ Linéaire :

$$\sigma_f = \left( \frac{4E_f \tau_f}{D_f} \right)^{1/2} [z(\sec \theta - 1)]^{1/2} \quad (\text{I.10})$$

▪ Parabolique :

$$\sigma_f = \left( \frac{8E_f \tau_f}{D_f} \right)^{1/2} [z(\sec \theta - 1)]^{1/2} \quad (\text{I.11})$$

Avec :

- $E_f$ : Le module ou la rigidité longitudinale de la fibre ;
- $\tau_f$ : La contrainte de glissement d'interaction le long de la fibre ;
- $D_f$ : Le diamètre de la fibre.

#### I.4.2.3 Modèle de Maher et Gray (MG)

Ce modèle est basé sur les approches statiques, et selon les hypothèses suivantes [30] :

- Les fibres de renforcement ont une longueur constante «  $L$  » et un diamètre «  $d$  », le modèle peut être étendu pour gérer d'autres alternatives possibles où «  $L$  » et «  $d$  » sont donnés par des fonctions de distribution. Les fibres n'offrent également aucune résistance à la flexion.

- La plus petite partie «  $X^*$  » d'une longueur de fibre de part et d'autre d'un plan de rupture est uniformément répartie entre zéro et la moitié de la longueur de fibre ( $0 \leq X^* \leq L/2$ ).
- Les fibres ont une probabilité égale de faire tous les angles possibles avec n'importe quel axe fixe choisi arbitrairement (c'est-à-dire le plan de rupture de Coulomb dans les essais triaxiaux sur un sol granulaire).
- Les fibres dans la masse de sol, et de manière équivalente, leurs points d'intersection avec tout plan de rupture, sont distribuées de manière aléatoire selon un processus de Poisson.
- Les composites sable-fibres présentent des courbes d'enveloppe de rupture bilinéaires, avec une rupture bilinéaire qui se produit à une contrainte de confinement critique «  $\sigma_{crit}$  ». À des contraintes de confinement inférieures à la valeur critique, les fibres glissent lors de la déformation, tandis qu'à des contraintes de confinement supérieures à la valeur critique, les fibres se tendent ou se rompent.

D'après la Figure I.7, la force de tension exercée sur la fibre peut être fractionnée en deux composantes : une tangentielle et une normale à la zone de cisaillement. La composante normale mobilise une résistance supplémentaire au cisaillement dans le sable en augmentant la contrainte de confinement sur la zone de cisaillement. En revanche, la composante tangentielle s'oppose directement au déplacement de cisaillement. L'expression suivante permet d'estimer l'élévation de la résistance au cisaillement du renfort fibreux, notée «  $\Delta S$  » :

- Pour :  $0 < \sigma_{conf} < \sigma_{crit}$

$$\Delta S = N_s \left( \pi \frac{d^2}{4} \right) (2\sigma_{conf} \tan \delta) (\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi_{ur}) (\zeta) \quad (\text{I.12})$$

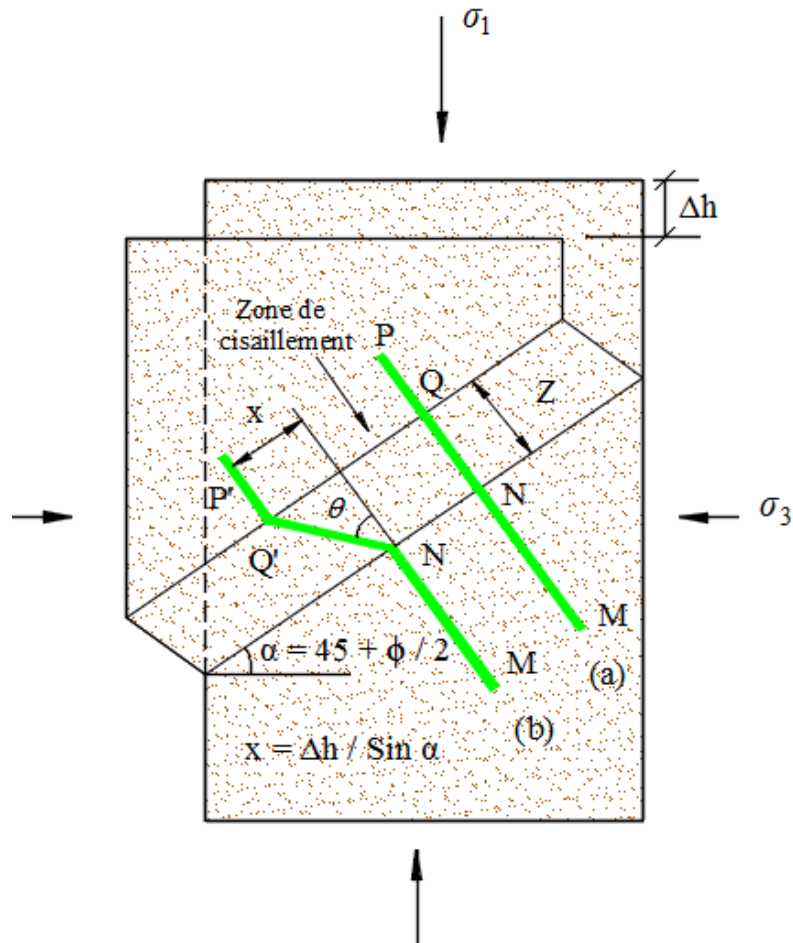
- Pour :  $\sigma_{conf} > \sigma_{crit}$

$$\Delta S = N_s \left( \pi \frac{d^2}{4} \right) (2\sigma_{crit} \tan \delta) (\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi_{ur}) (\zeta) \quad (\text{I.13})$$

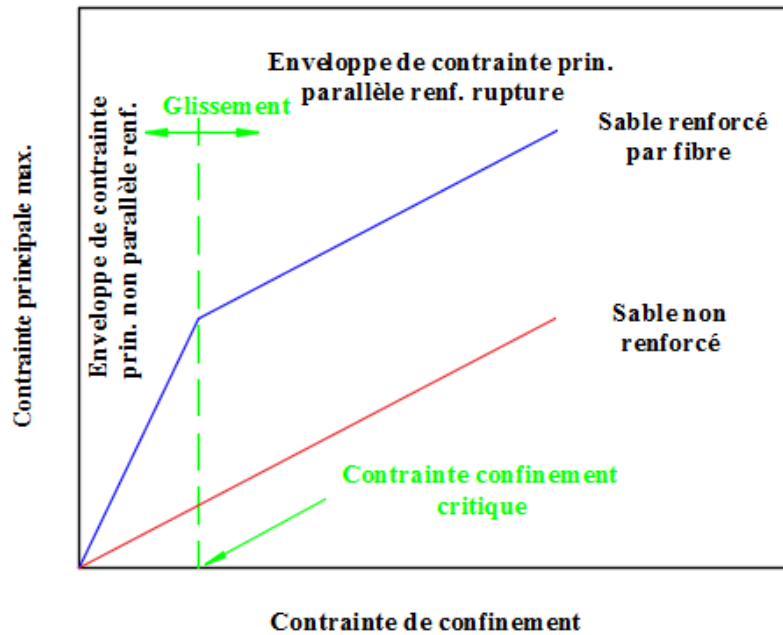
Avec :

- $\sigma_{conf}$  : Contrainte de confinement ;
- $\sigma_{crit}$  : Contrainte de confinement critique obtenu par les travaux de Maher (1988) [66] (voir Fig I.8);

- $N_s$  : Nombre attendu de fibres coupant une unité de surface ;
- $\zeta$  : Coefficient empirique dépendant de la granulométrie du sable (taille moyenne des grains «  $D_{50}$  » sphéricité des particules «  $S_p$  » coefficient d'uniformité du sable «  $C_U$  ») et des paramètres de la fibre, tels que l'allongement et le frottement d'interaction.
- $\delta$  : Angle interaction de fibre.



**Fig I.7.** La caractérisation de la zone de cisaillement de croisement de fibre unique lors de la déformation dans les essais triaxiaux : (a) Fibre intacte ; et (b) Fibre déformée [30].



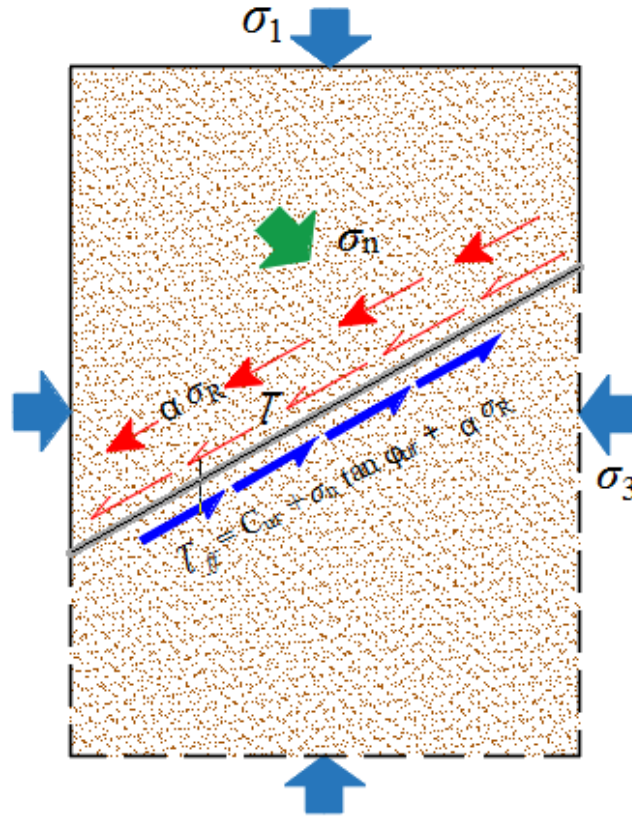
**Fig I.8.** L'effet de l'inclusion de fibres sur l'enveloppe de rupture du sable

#### I.4.2.4 Modèle de Zornberg

Zornberg (2002) [32] a développé un modèle discret visant à prédire la résistance au cisaillement du sol renforcé de fibres en utilisant les propriétés indépendantes des fibres et du sol, telles que la quantité, le rapport d'aspect des fibres et la résistance au cisaillement du sol non renforcé. Les fibres contribuent à l'augmentation de la résistance au cisaillement en mobilisant la contrainte de traction le long du plan de cisaillement (Fig. I.9). Par conséquent, la résistance au cisaillement «  $\tau_{ff}$  » du sol renforcé de fibres a les deux composantes suivantes : la résistance au cisaillement «  $\tau_{ur}$  » du sol et la force de traction distribuée induite par les fibres par unité de surface «  $\sigma_R$  ».

$$\tau_{ff} = C_{ur} + \sigma_n \tan \varphi_{ur} + \alpha \sigma_R \quad (\text{I.14})$$

$\alpha$  : Coefficient empirique qui rend compte de la distribution des fibres. Si de fibres orientées de manière aléatoire, «  $\alpha$  » est égal à 1. Pour toute orientation préférée, «  $\alpha$  » doit être choisi de manière appropriée entre 0 et 1.



**Fig I.9.** L'effet de l'inclusion de fibres sur l'enveloppe de rupture du sable [32].

a) Arrachement de fibres

Sous de faibles contraintes de confinement, lorsque la rupture est régie par l'arrachement des fibres, la force de traction distribuée induite par les fibres peut être estimée comme suit :

$$\sigma_{RP} = a_r p_{vf} (c_{i,c} C_{ur} + c_{i,\varphi} \sigma \tan \varphi_{ur}) \quad (\text{I.15})$$

Où «  $a_r$  » est le rapport d'aspect des fibres, «  $p_{vf}$  » correspond à la concentration volumétrique en fibres et «  $\sigma$  » est la contrainte normale moyenne agissant sur les fibres. Les paramètres «  $c_{i,c}$  » et «  $c_{i,\varphi}$  » sont des coefficients d'interaction définis comme :

$$c_{i,c} = a/C_{ur} \quad (\text{I.15.a})$$

$$c_{i,\varphi} = \tan \delta / \tan \varphi_{ur} \quad (\text{I.15.b})$$

Où «  $a$  » est l'adhérence entre le sol et la fibre et «  $\delta$  » est l'angle de frottement de l'interface. Notez que la tension distribuée induite par la fibre est influencé par la présence en fibre «  $p_{vf}$  »,

du rapport d'aspect de la fibre «  $a_r$  » et des coefficients d'interaction «  $c_{i,c}$  » et «  $c_{i,\varphi}$  » si la rupture est régie par l'arrachement de la fibre.

En utilisant l'équation (I.15) (avec :  $\sigma_R = \sigma_{RP}$ ), et l'équation (I.14) est exprimé pour obtenir la force au cisaillement du sol renforcé de fibres lorsque la rupture est régie par l'arrachement des fibres comme :

$$\tau_{ff} = C_{RP} + (\tan \varphi_{ur})_{RP} \sigma \quad (\text{I.16})$$

Avec :

$$C_{RP} = (1 + \alpha a_r p_{vf} c_{i,c}) C_{ur} \quad (\text{I.16.a})$$

$$(\tan \varphi_{ur})_{RP} = (1 + \alpha a_r p_{vf} c_{i,\varphi}) \tan \varphi_{ur} \quad (\text{I.16.b})$$

#### b) Rupture de fibres

Lorsque la rupture est régie par l'élasticité des fibres, c'est-à-dire la rupture par traction des fibres, la force de traction distribuée induite par les fibres est fonction de la quantité en fibres «  $p_{vf}$  » et de la force à la tension «  $\sigma_f$  » des fibres individuelles et peut être estimée comme suit :

$$\tau_{ff} = C_{Rt} + (\tan \varphi_{ur})_{Rt} \sigma \quad (\text{I.17})$$

Avec :

$$C_{Rt} = C_{ur} + \alpha p_{vf} \sigma_{ur} \quad (\text{I.17.a})$$

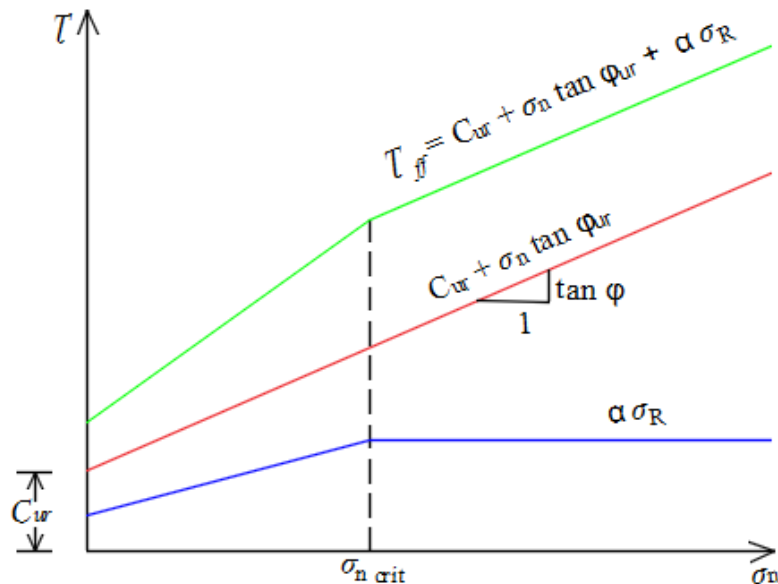
$$(\tan \varphi_{ur})_{Rt} = \tan \varphi_{ur} \quad (\text{I.17.b})$$

Notez que Zornberg (2002) [32] a présenté le modèle discret pour la conception des pentes de sol renforcé de fibres. Les fibres en tant qu'éléments discrets sont considérées comme contribuant à la stabilité en mobilisant les contraintes de traction sur toute la longueur de la zone de cisaillement/rupture, comme le montre la Fig. I.10. A la contrainte normale critique :

$$\sigma_{crit} = \frac{\sigma_f - a_r c_{i,c} C_{ur}}{a_r c_{i,\varphi} \tan \varphi_{ur}} \quad (\text{I.18})$$

Ainsi, la contrainte normale critique «  $\sigma_{crit}$  » à laquelle le mode déterminant de la rupture des fibres passe du décollement des fibres jusqu'à la dégradation des fibres est fonction de la force de tension des fibres, de la force de cisaillement du sol et du rapport d'aspect, mais est indépendante de la quantité en fibres.

A noter que la force à l'arrachement d'une fibre de longueur «  $L$  », si elle doit être quantifiée, doit être estimée sur le côté le plus court des deux parties de la fibre interceptées par la surface de rupture. La longueur de la partie la plus courte de la fibre interceptée par la surface de rupture varie de zéro à «  $L/2$  ». Statistiquement, la longueur moyenne d'enrobage des fibres distribuées au hasard «  $L_{e, av}$  » peut être définie analytiquement comme :  $L_{e, av} = L/4$  [32].



**Fig I.10.** La représentation de la résistance équivalente au cisaillement selon l'approche discrète [32].

#### I.4.2.5 Modèle de Shukla, Sivakugan et Singh

Shukla et al. (2010) [67] ont créé un modèle mathématique simple pour estimer le comportement de résistance au cisaillement des sols granulaires renforcés par de fibres sous des contraintes de confinement élevées, où l'on peut supposer qu'il n'y a pas d'arrachement des fibres. La résistance au cisaillement «  $\tau_{ff}$  » du sol renforcé par de fibres a l'expression suivante :

$$\tau_{ff} = c_R + \sigma_{RS} \tan \varphi_{ur} \quad (\text{I.19})$$

Avec :

- «  $c_R$  » : la cohésion apparente dans le sol granulaire renforcé par de fibres

$$c_R = \sigma \left[ 2 A_r a_r \tan \varphi_i \sin i \sin \psi \left( \frac{1 - \sin \varphi_{ur} \sin(\varphi_{ur} - 2i)}{\cos^2 \varphi_{ur}} \right) \right] \quad (\text{I.19.a})$$

- «  $c_{RS}$  » : la contrainte normale de confinement améliorée dans le sol granulaire renforcé par de fibres

$$c_{RS} = \sigma \left[ 1 + 2 A_r a_r \tan \varphi_i \sin i \sin \psi \left( \frac{1 - \sin \varphi_{ur} \sin(\varphi_{ur} - 2i)}{\cos^2 \varphi_{ur}} \right) \right] \quad (\text{I.19.b})$$

- «  $A_r$  » : Rapport de surface ;
- «  $a_r$  » : Rapport d'aspect (=  $L/d$ ) ;
- «  $\sigma$  » : La contrainte de confinement normale ;
- «  $\psi$  » : L'angle de distorsion.

L'accroissement de la force de cohésion du sol granulaire due à l'inclusion de fibres peut être décrite en termes de rapport sans dimension, appelé rapport de résistance au cisaillement « SSR » défini par l'équation ci-dessous :

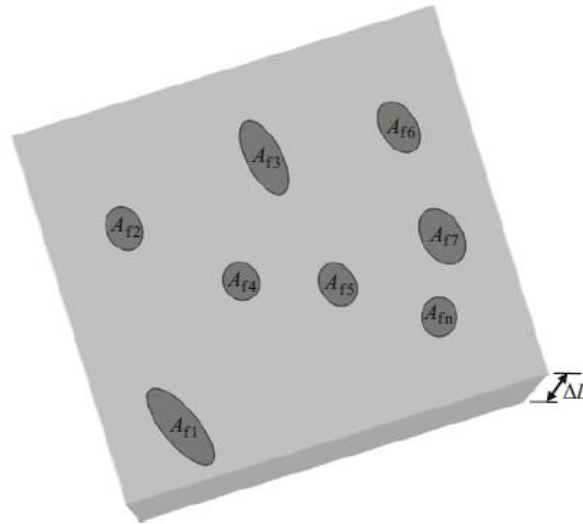
$$SSR = \frac{\tau_{ff}}{\tau_{ur}} = 1 + 2 \beta_1 \beta_2 \left[ \frac{\rho_f \{G/G_f(1 + e_s)\}}{1 + \rho_f \{G/G_f(1 + e_s)\}} \right] \times \left[ \frac{\sin i}{1 + 2 \beta_1 \beta_2 (\sigma/E_f)} + \frac{\sqrt{\cos^2 i + 4 \beta_1 \beta_2 (\sigma/E_f) \{1 \beta_1 \beta_2 (\sigma/E_f)\}}}{\{1 + 2 \beta_1 \beta_2 (\sigma/E_f)\} \tan \varphi_{ur}} \right] \quad (\text{I.20})$$

Avec :

$$\beta_1 = a_r \tan \varphi_i \sin i \quad (\text{I.20.a})$$

$$\beta_2 = \frac{1 - \sin \varphi_{ur} \sin(\varphi_{ur} - 2i)}{\cos^2 \varphi_{ur}} \quad (\text{I.20.b})$$

Notez que : «  $\rho_f$  » la teneur en fibres, «  $\sigma/E_f$  » le rapport de la contrainte de confinement au module des fibres, «  $G_f$  » la densité des solides fibreux et «  $i$  » l'alignement initial des fibres en relation avec la zone de cisaillement «  $z$  » pour tous ensemble spécifique de paramètres dans leurs plages pratiques (Fig I.11).



**Fig I.11.** Un élément de sol granulaire fibré d'épaisseur «  $\Delta L$  » [67].

#### I.4.2.6 Modèle de Michalowski et Cermak

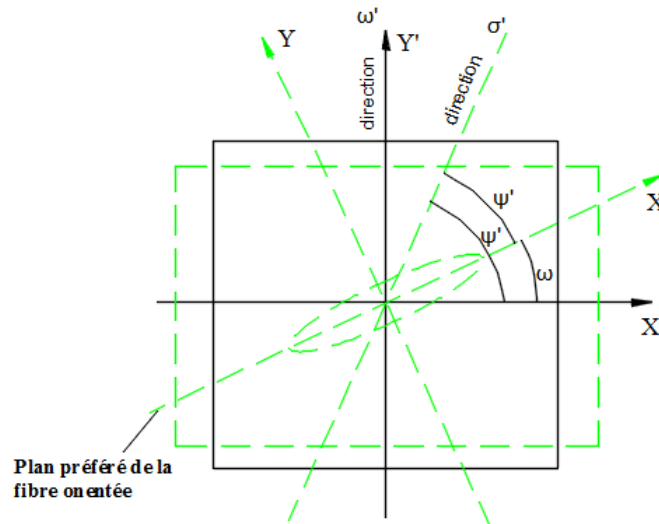
Michalowski et Cermak (2002) [27] ont développé un critère de rupture pour le sable renforcé par des fibres orientées. Le critère prend en compte la contribution d'une seule fibre à la dissipation de travail lors de la rupture du sable renforcé et intègre cette dissipation sur toutes les fibres présentes dans le sable renforcé (Fig I.12). Ce critère de rupture peut être utilisé directement dans les méthodes de résolution des problèmes de stabilité du sable fibré. Sa forme est la suivante :

$$f = R - F(p, \psi) = 0 \quad (\text{I.21})$$

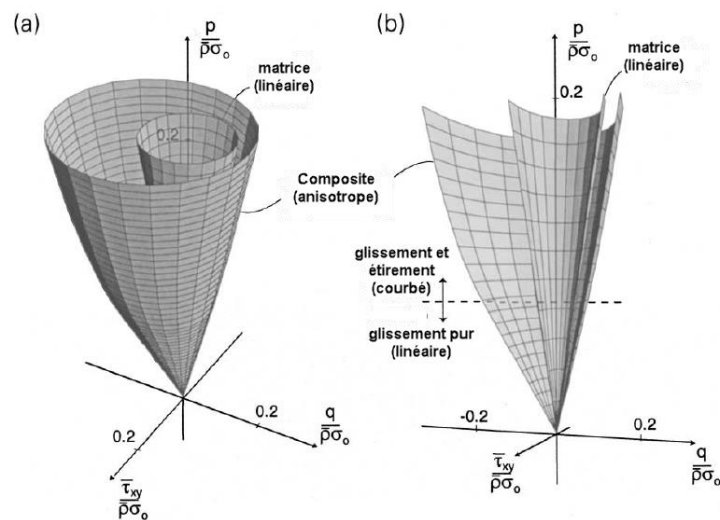
Où «  $R$  » et «  $p$  » sont des invariants dans le plan de l'état de contrainte macroscopique, et «  $\psi$  » est l'angle de la force principale majeure composite par rapport à l'axe de référence «  $x$  » (Fig I.13). Pour indiquer l'anisotropie du sol renforcé par des fibres Michalowski et Cermak propose deux paramètres  $A$  et  $B$  ; si  $A = 1$  et  $B = 0$  le sol est isotrope (sol renforcé par des fibres aléatoires et sans aucune force de compactage) [27].

$$R = \sqrt{\frac{(\bar{\sigma}_x - \bar{\sigma}_y)^2}{4} + \bar{\tau}_{xy}^2} \quad (\text{I.21.a})$$

$$p = \frac{\bar{\sigma}_x - \bar{\sigma}_y}{2} \quad (\text{I.21.b})$$



**Fig I.12.** La déformation plane d'un élément composite [27].



**Fig I.13.** La condition de rupture anisotrope pour le sable renforcé par des fibres : (a) surface de rupture, et (b) coupe transversale de la surface de rupture.

#### I.4.2.7 Modèle de Diambra et al.

Le modèle constitutif anisotrope proposé par Diambra et al.[59, 68, 69] repose sur la distribution spécifique d'inclinaison des fibres et sur le modèle de Michalowski et Cermak (2002) [27]. Dans ce modèle, le sol est considéré comme le composant actif tandis que les fibres sont considérées comme le composant réactif. Diambra et al.[68] ont introduit une série d'hypothèses pour décrire le comportement de ce modèle :

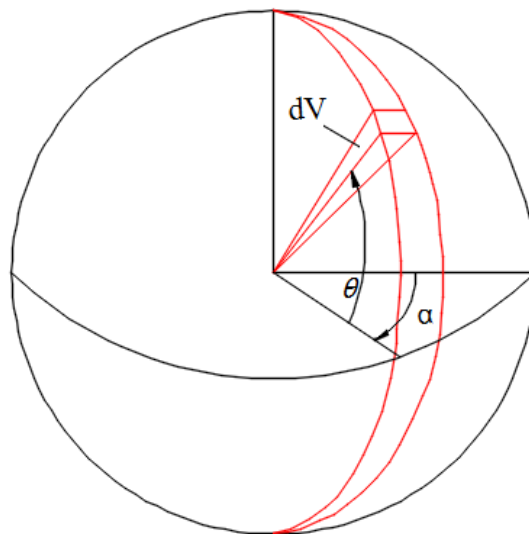
- La matrice sableuse en présence de fibres peut être modélisée selon le même modèle que le sol non renforcé ;

- Les fibres sont considérées comme des forces orientées plutôt que comme un matériau continu superposé, avec une force à la traction et une rigidité, mais une compression et une flexion négligeables ;
- Les efforts de traction dans le sol tendent à étirer les fibres, ce qui nécessite un certain ancrage mécanique pour leur interaction avec le sol ;
- Les fibres étirées augmentent la contrainte normale sur le sol et contribuent également directement à la contrainte de cisaillement ; Au fur et à mesure que les contraintes augmentent, les fibres peuvent soit se rompre en atteignant leur résistance à la traction, soit être arrachées du sol ;
- La présence de fibres doit être prise en compte lors du calcul du volume spécifique opérationnel ou du taux de vide du sol.

Pour déterminer l'angle d'orientation effectif des fibres, en prenant en compte une condition de déformation nulle et le cercle de Mohr exprimé en termes de contraintes principales majeures et mineures (Fig I.14), Diambra et al. [59] ont proposé la formule suivante :

$$\theta_0 = \arctan \sqrt{-\frac{\dot{\varepsilon}_3}{\dot{\varepsilon}_1}} \quad (I.22)$$

Où, «  $\theta_0$  » est l'inclinaison de la direction de déformation incrémentale nulle ; «  $\dot{\varepsilon}_1$  » et «  $\dot{\varepsilon}_3$  » sont respectivement les taux de déformation principale majeure et mineure des échantillons.



**Fig I.14.** La sphère et les coordonnées utilisées pour définir la fonction de distribution d'orientation [68].

### I.4.2.8 Comparaison entre les modèles rhéologiques

Le Tableau I.1 résume les différents modèles présentés, à l'exception des modèles de Waldron, de MG et de SSS qui ont en condition isotrope. La majorité des modèles présentent une loi de comportement élasto-plastique anisotrope et ont été développés pour des concentrations de fibres faibles (<10%) afin de ne pas prendre en compte l'interaction entre les fibres.

**Tableau I.1** Comparaison entre les modèles rhéologiques étudiés.

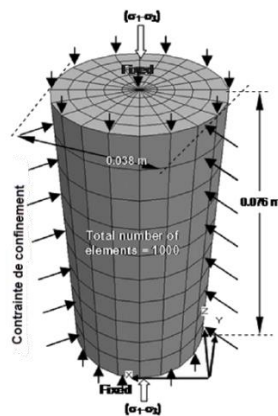
Modèle	Méthode	Condition	Type de sol	Types de fibres	Les paramètres	Types d'essai
Modèle de Waldron	Statique	Isotrope	Limon argileux	Naturelle	$\tau', \gamma, \delta, \tau_{ur}, n_i, A_s, L_i, l_f, d, T_f$	Boite de cisaillement direct
Modèle de Gray et Ohashi (GO)	Statique	Anisotrope	Sable dense et lâche	Synthétique / naturelle	$\tau_{ur}, \sigma_f, i, A, A_f, k, \theta, T_R, \psi, d, L$	Boite de cisaillement direct
Modèle de Maher et Gray (MG)	Statique	Isotrope	Sable	Synthétique / naturelle	$\tau_{ur}, d, L, \delta, \zeta, N_s, \sigma_{crit}, \sigma_{conf}$	Triaxial
Modèle de Zornberg	Equilibre limite	Anisotrope	Argile / sable	Synthétique	$\tau_{ur}, L_{e,av}, L, \sigma_{crit}, \alpha, c_{i,\varphi}, c_{i,c}, a_r, \sigma_R, \sigma_f, p_{vf}$	Triaxial
Modèle de Shukla, Sivakugan et Singh (SSS)	Equilibre des forces	Isotrope	Granulaire	Synthétique	$i, G_f, \sigma/E_f, \rho_f, SSR, \psi, \sigma, a_r, A_r, c_R, c_{RS}$	Boite de cisaillement direct
Modèle de Michalowski et Cermak	Cinématique	Anisotrope	Sable	Synthétique	$\theta_0, \psi, p, R, q, \bar{\rho}, \sigma_o, \rho(\theta), A, B$	Triaxial
Modèle de Diambra et al.	Cinématique	Anisotrope	Sable	/	$\theta_0, \alpha, R, \bar{\rho}, N_{tot}^H, N_{tot}^V, \rho(\theta), A, n, B$	Triaxial

### I.4.3 Modèles numériques du comportement des sols renforcés par des fibres

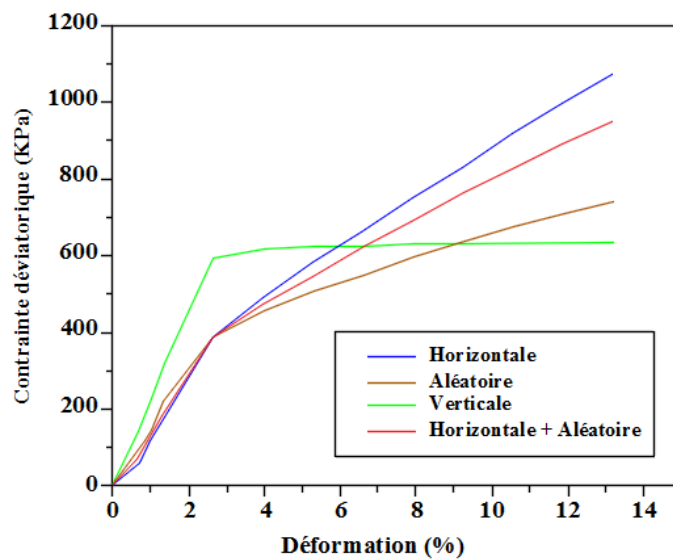
Plusieurs chercheurs ont étudié la réponse mécanique des sols renforcés par des fibres à l'aide de programmes et de codes d'analyse numérique qu'ils ont développés eux-mêmes, ou en utilisant des logiciels commerciaux basés sur la méthode des éléments finis (MEF) ou des

différences finis (MDF). Certains scientifiques ont également proposé des modèles constitutifs reposant sur des suppositions pour résoudre des problèmes de valeur limite associés à l'analyse numérique de sols renforcés par des fibres.

Neeraja et al. [62] ont réalisé une analyse numérique de l'influence de l'orientation des fibres pour la relation contrainte-déformation des sols sableux renforcés par des fibres synthétiques, en utilisant le code FLAC 3D (voir Fig I.15). Les résultats ont montré que la distribution dans laquelle toutes les fibres étaient alignées horizontalement offrait une meilleure réponse contrainte-déformation que la distribution aléatoire des fibres. Les fibres verticales, étant comprimées, ne peuvent pas apporter beaucoup d'amélioration de la résistance. Les résultats ont également montré que l'hypothèse de distribution aléatoire des fibres est conservatrice, et que la réponse contrainte-déformation de la distribution proposée est plus réaliste (Fig I.16).



**Fig I.15.** Le maillage d'un échantillon de sol renforcé par des fibres aux différences finies étudié par le modèle Neeraja et al. [62].

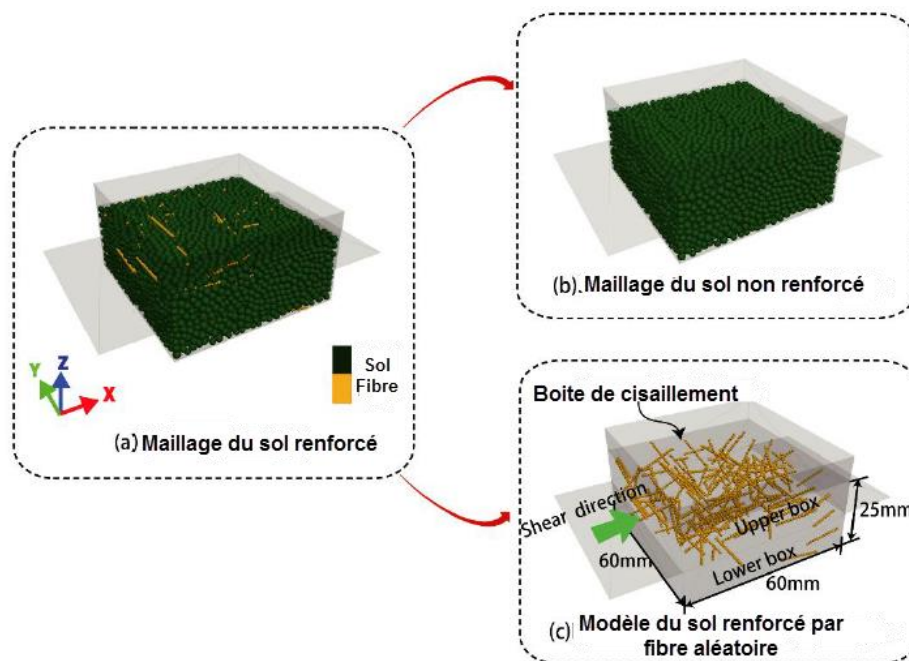


**Fig I.16.** Le comportement du sol renforcé par des fibres en différentes orientations [62].

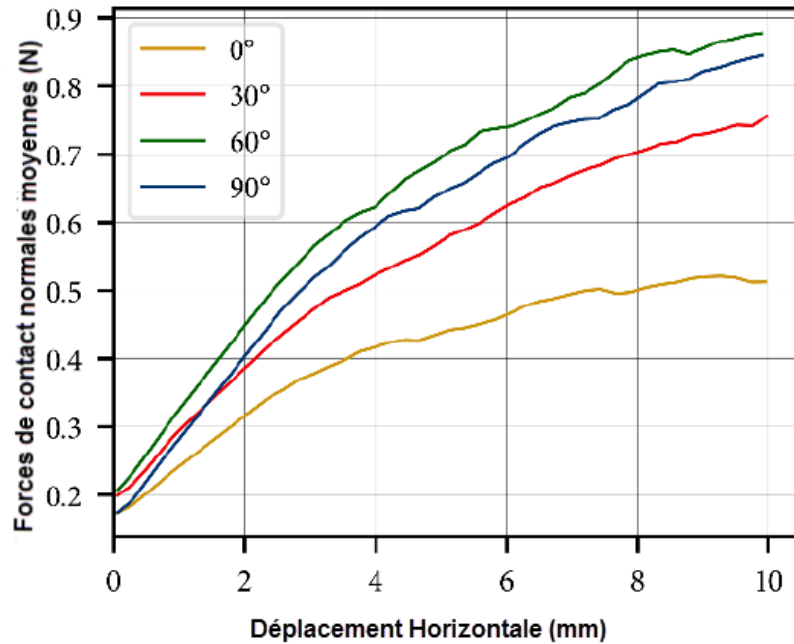
Gong et al. [70] ont mené des analyses par MDF à l'aide du code FLAC 3D pour étudier le comportement anisotrope des sables renforcés par des fibres soumis à une charge de cisaillement direct (voir Fig I.17).

Les résultats indiquent que lorsque l'orientation perpendiculaire des fibres par rapport à l'axe de la force de cisaillement maximise l'effet de renforcement des fibres sur la résistance du composite. Cette orientation privilégiée est également perpendiculaire à la direction de la force principale maximale. En outre, l'orientation des fibres peut avoir un impact sur le champ de déplacement des particules. Les fibres ayant une orientation de  $60^\circ$  entraînent également la plus grande augmentation de la contrainte normale autour du corps de la fibre et de la zone de contact efficace, ce qui augmente le frottement de glissement entre les fibres et la matrice composite (voir Fig I.18).

La modélisation a révélé des différences significatives dans la force de traction des fibres en fonction de leur orientation. Les fibres disposées à un angle de  $60^\circ$  ont généré la contrainte de traction la plus élevée, suggérant que le renforcement des fibres était principalement dû au processus de tension. L'effet de renforcement élevé observé pour ces fibres peut s'expliquer par leur potentiel accru de stockage/dissipation d'énergie, ce qui permet au système de particules de transférer et de supporter des charges de manière relativement stable.



**Fig I.17.** Le modèle de la simulation tridimensionnelle étudié par Gong et al. [70].



**Fig I.18.** Les forces de contact normales moyennes autour des fibres [70].

## I.4.4 Utilisation de l'intelligence artificielle pour prédire le comportement des sols renforcés par des fibres

### I.4.4.1 Introduction

Les avancées technologiques ont conduit les modèles prédictifs à adopter des approches basées sur l'intelligence artificielle (IA). Les méthodes d'IA sont conçues pour reproduire la pensée humaine ou les compétences cognitives dans le traitement de défis techniques en utilisant des calculs. Cette technique s'avère être une approche appropriée pour résoudre les défis techniques qui impliquent de nombreuses entrées ou variables aléatoires, pour lesquelles la corrélation entre les entrées et les sorties est inconnue. Les réseaux de neurones artificiels (RNA), une branche de l'IA, sont utilisés pour créer des modèles mathématiques basés principalement sur des données expérimentales, permettant ainsi de faire des prédictions sans être explicitement programmés pour le faire [71].

Le réseau de neurones artificiels (RNA) est un outil informatique dont l'architecture est inspirée de celle du cerveau biologique [72, 73]. Comme d'autres applications d'intelligence artificielle ou activités exécutées par des machines, l'utilisation du RNA dans l'ingénierie géotechnique pour la stabilisation des sols permet de surmonter les complexités et les

limitations supposées des méthodes traditionnelles, tout en économisant du temps et des ressources, et en obtenant des résultats plus fiables [74].

#### **I.4.4.2 Réseau neuronal artificiel (RNA)**

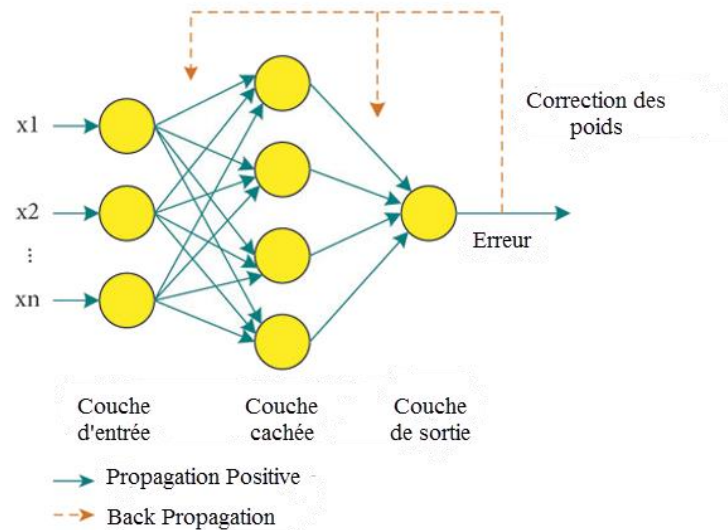
Les RNA sont des systèmes d'optimisation automatisés capables d'apprendre la relation et les interdépendances entre plusieurs variables d'entrée d'un système donné et de modéliser ces relations sous la forme de fonctions mathématiques pour une prédiction facile [75]. Ces outils ont été utilisés avec succès dans l'étude de systèmes complexes pour identifier des modèles et modéliser des problèmes réels impliquant des relations fonctionnelles non linéaires en ingénierie géotechnique [76].

Les RNAs sont classés en fonction de plusieurs critères tels que la condition d'apprentissage (réseaux supervisés et non supervisés), la topographie du modèle (réseaux feed-forward ou récurrents), le nombre de couches cachées (réseaux superficiels ou profonds) et l'algorithme d'apprentissage (réseau de Back-Propagation, réseau de Hopfield, réseaux cartographiques auto-organisés « SOM ») [77].

##### **A. Les réseaux de Back-Propagation**

Les réseaux de back-propagation (BP) sont des catégories de réseaux de neurones artificiels, ils ont utilisé pour la reconnaissance de formes et la classification de données. Ils fonctionnent en effectuant des ajustements itératifs de leurs poids, basés sur les erreurs de prédiction, afin d'apprendre plus efficacement les caractéristiques des données d'entrée.

Le schéma de base d'un réseau de BP comprend généralement une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche de sortie (voir Figure I.19). La couche d'entrée contient des nœuds représentant les caractéristiques des données d'entrée, et chaque couche cachée contient des nœuds qui effectuent des calculs sur les entrées reçues de la couche précédente. La couche de sortie fournit le résultat de prédiction ou de classification du réseau. Les nœuds de chaque couche sont reliés entre eux par des poids qui représentent la force des connexions. Dans un réseau BP, ces pondérations sont ajustées pendant la phase d'apprentissage en fonction de l'erreur entre les prédictions du réseau et les sorties cibles réelles.



**Fig I.19.** Le schéma du réseau BP.

Le réseau BP est largement utilisé en géotechnique pour résoudre les problèmes de classification, de reconnaissance de formes, d'approximation et d'interpolation de fonctions.

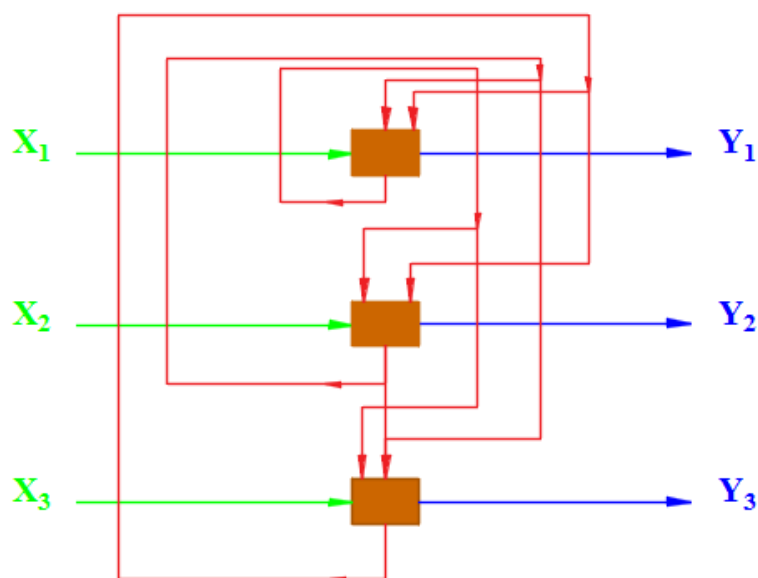
Il peut efficacement diviser le sol et prédire ses propriétés. Wang et al. (2007) ont établi un modèle de rétro-analyse du réseau BP pour prédire le tassement du remblai de sol [78]. En ce qui concerne la classification des sols, Zhai et al. (2006) [79] ont développé un modèle de classification de la texture des sols basé sur l'algorithme des RNAs. Ils ont constaté que la technique RNA a des performances relativement inférieures lorsque l'échantillon de données est insuffisant. Cependant, lorsque les données d'entraînement sont suffisantes, les approches de RNA peuvent traiter efficacement la classification de la texture du sol [79].

Goudjil et Arabet (2021) [72] ont expérimenté l'utilisation du réseau BP pour prédire la déflexion de pieux soumis à une charge latérale et proches d'une pente. Les résultats ont été confrontés à ceux obtenus par une approche numérique et expérimentale, ce qui a démontré que l'introduction du réseau BP a permis d'augmenter la rapidité de calcul et la fiabilité des résultats.

## B. Réseaux Hopfield

Un réseau de Hopfield est un type de RNA récurrent qui a été inventé par John Hopfield en 1982. Il appartient à la catégorie des réseaux auto-associatifs, ce qui implique qu'il est capable de sauvegarder et rappeler des modèles à partir de son ensemble d'apprentissage. Il existe deux types de réseaux de Hopfield: le réseau de neurones de Hopfield discret (DHNN) et le réseau de neurones de Hopfield continu (CHNN), qui diffèrent par leurs fonctions de transfert respectives [80]. Le DHNN est largement utilisé dans les applications de nos jours. La

fonction d'activation du DHNN est la fonction de rampe, déterminée par la conception de poids de la fonction de "Lyapunov". En exploitant cycliquement le réseau, elle permet de converger vers un point d'équilibre mémorisé par le réseau, c'est-à-dire le point stable de la fonction de Lyapunov. La matrice de poids "w" et le vecteur déviateur "b" sont choisis pour obtenir la valeur minimale de la fonction de Lyapunov (Fig. I.20). Ainsi, la recherche d'un point d'équilibre dans le réseau de Hopfield est transformée en une recherche de la valeur minimale de la fonction quadratique [81]. Le DHNN présente trois avantages majeurs : (a) une bonne convergence, (b) un nombre fini de points d'équilibre, et (c) une stabilité favorable [82].



**Fig I.20.** Le schéma du réseau Hopfield.

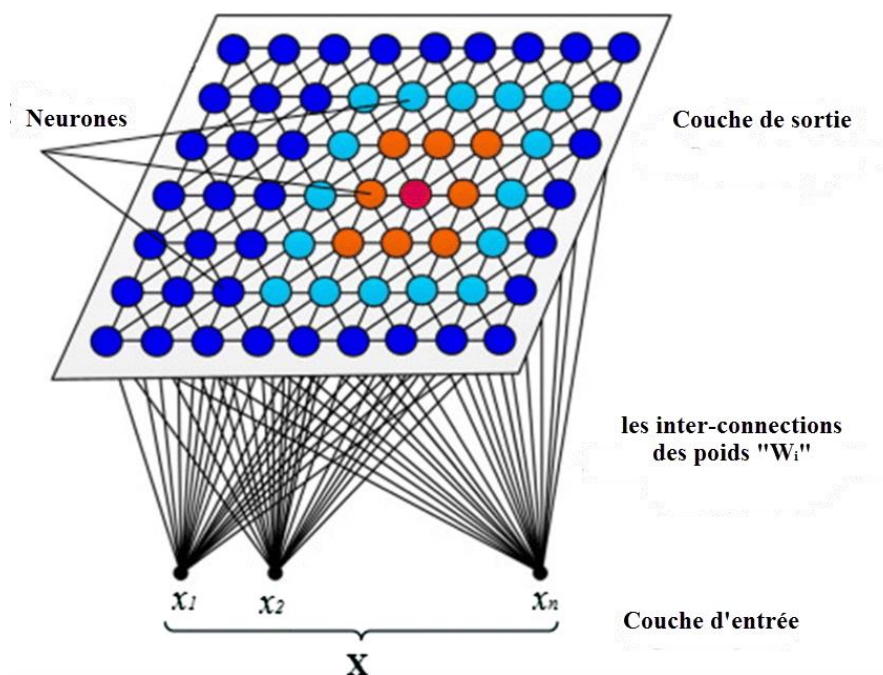
Le réseau de Hopfield est largement utilisé en ingénierie géotechnique pour résoudre divers problèmes tels que l'optimisation combinatoire, la classification, la reconnaissance de formes et la mémoire associative [83].

Cai et Zhao (1998) [84] ont développé un système d'ingénierie des roches basé sur le réseau Hopfield et ont démontré que celui-ci est un outil utile pour informatiser le système d'ingénierie des roches. Le réseau de Hopfield peut être utilisé pour prédire la déformation de la roche et pour estimer l'affaissement, comme l'a montré Ambrožič et Turk (2003) [85] dans leur étude sur l'affaissement de surface dû à l'exploitation minière souterraine. Les résultats de leur recherche ont montré que le modèle suggéré est capable de produire des résultats satisfaisants, indépendamment de l'approche de la présentation de l'affaissement. Santos et Celestino (2008) [86] ont étudié l'utilisation du réseau Hopfield multicouche pour prédire le tassement du

tunnel et ont montré que ce réseau préforme mieux pour prévoir le phénomène, tout en soulignant que les taux d'excavation ont une grande influence sur le tassement.

### C. Réseaux cartographiques auto-organisés « SOM »

Les réseaux SOM (Self-Organizing Map) sont des types de RNA non supervisé, largement utilisé pour la compression de données et la représentation graphique des données de grande taille [87]. Le réseau SOM est constitué d'une couche d'entrée et d'une couche compétitive, où les neurones sont interconnectés de manière complète, comme illustré dans la figure I.21. Le processus d'entraînement du réseau SOM consiste à introduire les données d'échantillonnage dans le réseau, et les neurones de la couche compétitive calculent l'écart entre les données d'échantillonnage et leur propre vecteur de poids. Le neurone qui a la plus petite différence devient alors l'unité la mieux assortie. Ensuite, les vecteurs de poids de l'unité la mieux assortie et des neurones voisins sont ajustés pour minimiser l'écart entre les données d'échantillonnage et les vecteurs de poids. Ce processus est répété jusqu'à ce que le modèle converge [88].



**Fig I.21.** Le schéma du réseau SOM [89].

Le réseau SOM est couramment utilisé en géotechnique pour résoudre des problèmes de classification, d'agrégation, de visualisation et de traitement d'images [90]. Il est capable de segmenter et de prédire la nature des sols et des roches.

Mokarram et al. (2018) [91] ont exploré l'utilisation du réseau SOM pour regrouper des sols en vue d'évaluer leur fertilité. Ils ont conclu que le SOM est un outil de visualisation de

données efficace et qu'il peut classifier avec précision les sols en fonction de leur évaluation de la fertilité. En ce qui concerne la roche, Chuahan et al. (2016) [92] ont utilisé la technique SOM pour produire des images segmentées en 2D du score de la roche. Les résultats ont montré que cette technique est utile pour construire des images segmentées en 2D du score de la roche et aider à l'analyse de la microstructure du score de la roche.

#### **I.4.4.3 L'application des RNAs en sol renforcé par des fibres**

Les techniques d'IA ont été efficacement appliquées pour résoudre les problèmes liés au comportement des sols renforcés par des fibres. Une étude menée par Chou et al. (2016) [93] ont examiné plusieurs techniques basées sur l'IA pour prédire l'angle de frottement maximal de ces sols, y compris des méthodes de classification et de régression, des RNAs et des modèles de méta-ensemble tels que le vote et la hiérarchisation. Leurs résultats ont montré que le modèle de RNA était supérieur aux autres modèles pour prédire l'angle de frottement des sols renforcés par des fibres, avec un pourcentage d'erreur absolu moyen (MAPE) de 3,27 % [93].

Chou et Ngo (2018) [94] ont développé un système d'apprentissage automatique d'intelligence pour prédire la résistance au cisaillement des sols renforcés par des fibres. Leurs résultats ont montré que ce système était plus précis que les méthodes empiriques, avec une amélioration de la précision de 44,7 % à 99,7 % en termes de MAPE.

Par la suite, Garg et al. (2020) [95] ont développé une relation fonctionnelle entre le facteur mécanique du sol renforcé et sa teneur en fibres, sa masse volumique et sa teneur en vapeur d'eau pour quatre sols différents renforcés de fibres, en utilisant la méthode de RNA. Les résultats ont prouvé que le modèle de prédiction utilisé était suffisamment précis pour estimer la force à la compression des sols renforcés de fibres.

### **I.5 L'influence d'anisotropie sur les applications géotechniques pratiques**

L'effet d'anisotropie peut avoir une influence sur la stabilité, la capacité de charge et la résistance au cisaillement dans une large gamme d'applications géotechniques pratiques, en fonction de la direction de la charge et de la direction des ajouts utilisés dans le sol. Par conséquent, il est crucial tenir compte de l'effet d'anisotropie lors de l'élaboration et de l'analyse des ouvrages géotechniques, surtout lorsque les charges sont orientées de manière à maximiser les effets de l'anisotropie.

Meyerhof (1978) l'un des premiers pionniers à travailler sur le sujet de l'anisotropie, a étendu la théorie classique de la capacité portante pour tenir compte de la force au cisaillement dépendante de la direction du sol en proposant un angle de frottement équivalent.

Par la suite, Oda et Koishikawa (1979) ont montré que le coefficient de capacité portante dû au poids propre  $N\gamma$  pourrait être surestimé de 40% à 50% si l'anisotropie d'un sol est ignorée [26]. Ces premières études ont incité d'autres recherches expérimentales et numériques sur le problème de la semelle sur un sol anisotrope, notamment des essais de modèles expérimentaux à petite échelle [96], des essais de centrifugation (par exemple, des essais statiques [97], des essais dynamiques [98]) et des analyses par la MEF des défis de valeurs aux limites [96, 99]. Plusieurs études numériques récentes [100-102] basées sur des modèles constitutifs construits dans le contexte de la théorie de l'état limite anisotrope [103, 104] ont contribué à élucider l'impact de l'anisotropie inhérente et de l'anisotropie induite. Ces études offrent une alternative efficace pour résoudre des problèmes géotechniques réalistes et contribuent à améliorer la compréhension de la façon dont l'anisotropie affecte les performances techniques des sols, comme les fondations.

Cependant, il est crucial de calculer avec précision le coefficient de sécurité des talus. Jamshidi Chenari et Alaei [105] ont étudié ce problème en prenant en considération l'effet d'anisotropie de l'hétérogénéité du sol non-drainé sur la performance d'une pente argileuse. Ils ont démontré que le coefficient de variation du sol et l'anisotropie de l'hétérogénéité de la résistance au cisaillement non-drainé ont un effet significatif sur la fiabilité des calculs du facteur de sécurité. De plus, ils ont montré que l'anisotropie de l'hétérogénéité a un double effet sur l'indice de fiabilité en fonction du niveau de facteur de sécurité adopté.

## **I.6 L'influence de renforcement dû aux fibres sur les ouvrages géotechniques**

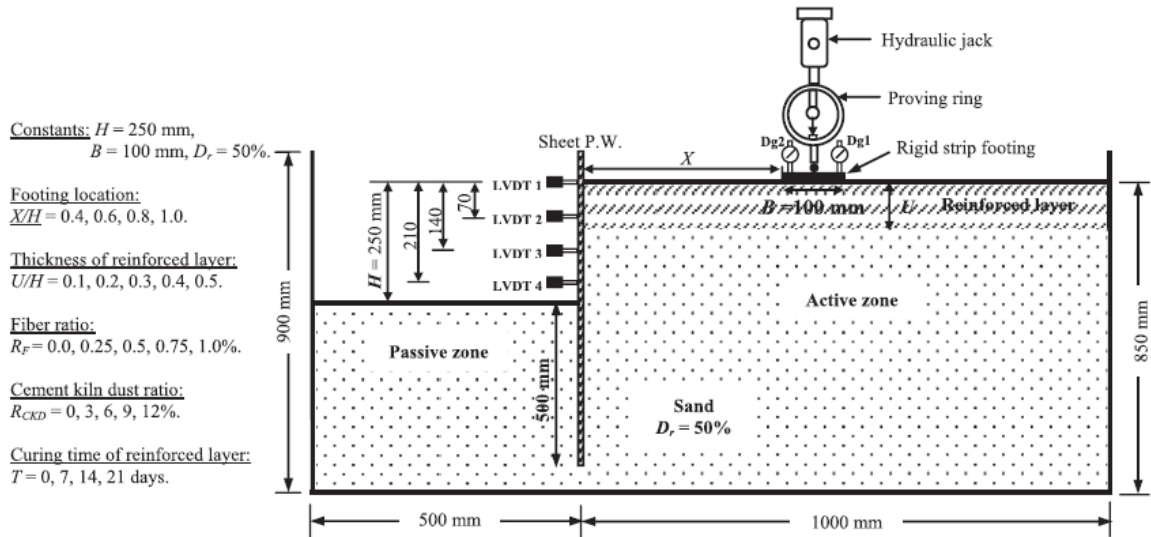
### **I.6.1 Les fondations**

Maheshwari et al. (2011) [106] ont étudié l'effet de l'introduction de fibres sur la portance d'une semelle isolée en utilisant des essais en laboratoire et un modèle à l'échelle réelle (Figure I.22). Les résultats ont confirmé que la portance d'un sol non renforcé était de 64 KN/m<sup>2</sup>, mais qu'elle augmentait à 250 KN/m<sup>2</sup> avec l'introduction de fibres.



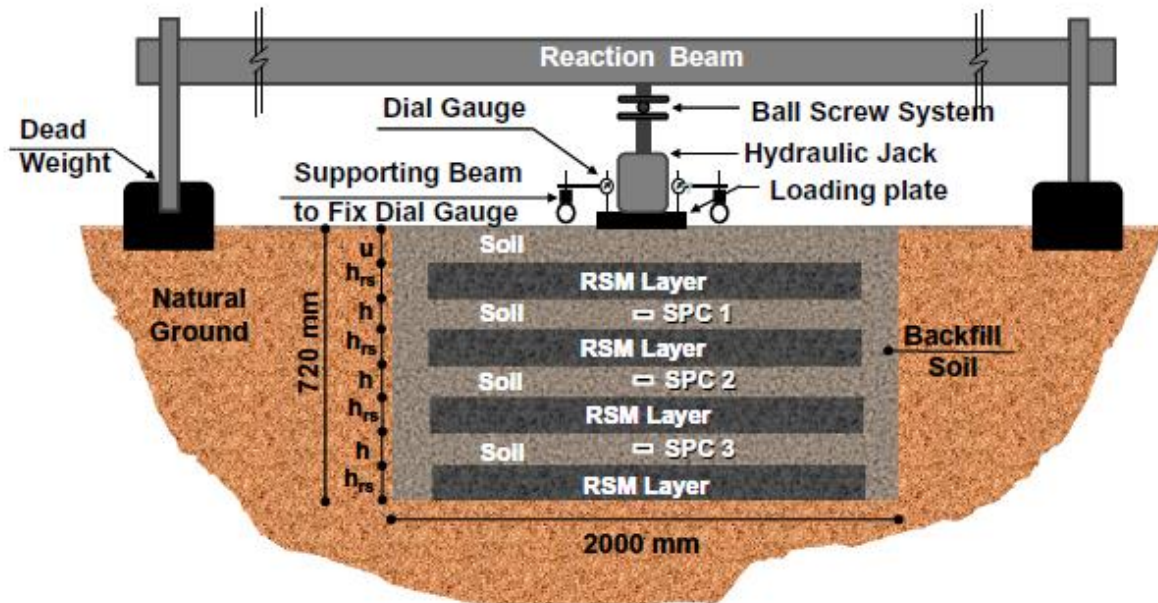
**Fig I.22.** La disposition de test pour le test de semelle à grande échelle (d'après [106]).

Nasr (2014) [107] a examiné les bénéfices potentiels du renforcement de la zone active derrière un mur de palplanches en utilisant des fibres de polypropylène et de la poussière de four à ciment. L'essai consistait à charger une semelle filante rigide reposant sur la surface du remblai de sable dans la zone active adjacente au mur de palplanches dans un bassin d'essai en acier (Fig. I.23). Les résultats ont montré que l'inclusion de fibres dans le sable cimenté derrière le mur de palplanches a eu un effet significatif sur la réduction de la déformation latérale le long du mur de palplanches. Quand la profondeur de la couche de sable renforcé est passée de 25 à 125 mm pour un taux d'inclusion de fibres donné, la pression limite de la semelle filante sur le sable cimenté renforcé de fibres dans la zone active a augmenté de manière significative.



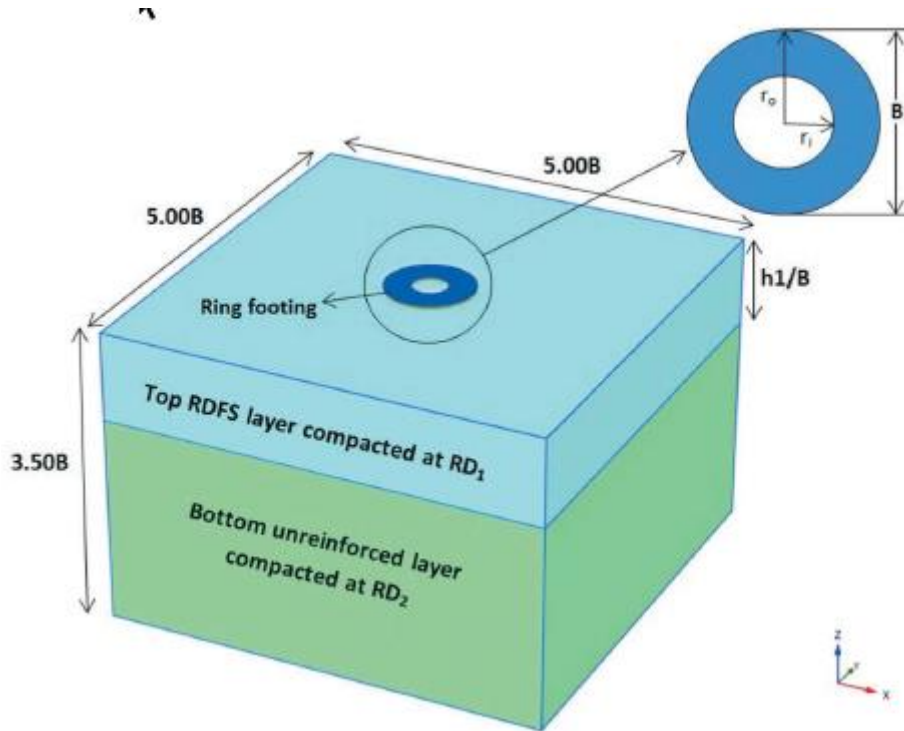
**Fig I.23.** Le diagramme schématique de la configuration de test du modèle (d'après [107]).

Moghaddas Tafreshi et al. (2019) [108] ont mené des études expérimentales et numériques pour évaluer l'effet de l'incorporation de plusieurs couches de mélange de fibres en caoutchouc dans le sol sur la portance et le tassement d'une semelle. Des essais de charge de plaque ont été réalisés dans une fosse d'essai extérieure creusée dans un sol naturel de dimensions  $2 \times 2 \text{ m}$  en plan et  $0.720 \text{ m}$  de profondeur, en utilisant une plaque circulaire de  $0.3 \text{ m}$  de diamètre. Les valeurs de pression d'appui pour l'installation d'une, deux, trois et quatre couches de mélange étaient environ 1.26, 1.47, 1.52 et 1.54 fois supérieures, respectivement, à celles du sol non renforcé [108]. Les couches de mélange ont réduit la contrainte verticale transférée à travers la profondeur de la fondation en répartissant la charge sur une zone plus large. Par exemple, à une pression de semelle appliquée de  $560 \text{ KPa}$ , la pression transférée à une profondeur de  $570 \text{ mm}$  était d'environ 58 %, 45 % et 35 % pour une, deux et trois couches de mélange, respectivement, par rapport à la contrainte transférée dans le sol non renforcé. L'analyse numérique a montré que la présence de couches sol-caoutchouc entraînait une expansion des zones passives dans la fondation [108].



**Fig I.24.** Une coupe schématique de la configuration d'essai du lit de fondation (d'après [108]).

Une étude numérique a été réalisée pour des semelles annulaires et circulaires reposant sur des lits de sable stratifiés renforcés de fibres (Fig. I.25) ; l'effet du pourcentage de fibres, de l'épaisseur du sable renforcé de fibres sur différents types de semelle a été étudié par Sharma et Kumar (2019) [109]. Ils ont été observé qu'il y a une formation d'arche inversée de sol sous la semelle annulaire, cette formation d'arc inversé est similaire au « phénomène d'effet de blocage » qui est le résultat de l'effet d'interférence des fondations rapprochées. Ce phénomène a entraîné une meilleure performance de l'anneau que les fondations circulaires. De plus, En fournissant une couche FRS (Fiber Reinforced Soil) supérieure compactée relativement élevée par rapport à la couche inférieure de sable non renforcée, le mouvement ascendant du sol diminue, et en fournissant la même densité relative pour la couche supérieure FRS et la couche inférieure de sable non renforcée, le mouvement ascendant du sol augmente. Ce comportement est dû au fait qu'à mesure que la semelle avance vers le bas, la couche de sable non renforcée du fond relativement moins dense est compactée, ce qui entraîne un moindre déplacement vers le haut par rapport au cas où les deux couches sont compactées à la même densité relative que celle de la densité relative de la couche FRS supérieure.



**Fig I.25.** La géométrie du modèle utilisée en analyse numérique (d'après [109]).

Une étude numérique a été réalisée par Mohammadi et al. (2022) [110] pour examiner le tassement élastique et la portance d'une fondation en bande sur un sol granulaire renforcé par des fibres. Les résultats ont montré que les fibres alignées verticalement ont le plus grand impact sur la diminution de la déformation verticale et l'accroissement de la portance. En outre, à mesure que la teneur en fibres augmente, la déformation verticale diminue et la portance augmente. Théoriquement, il n'y a pas de limite à l'augmentation de la portance (ou la réduction de la déformation verticale) et celle-ci augmente indéfiniment.

## I.6.2 Les chaussées

L'utilisation de fibres dans les chaussées permet de réduire la zone d'ancrage [48], Cependant, certaines options telles que le clouage du sol, les micropieux et le renforcement en géosynthétiques peuvent poser des problèmes si des obstructions souterraines telles que des services publics enterrés sont présentes. En effet, de nombreuses entreprises de services publics exigent une zone de décalage/sécurité minimale pour leur infrastructure. Par conséquent, dans des scénarios tels que lorsqu'une structure ou une chaussée se trouve au sommet d'une pente, des excavations importantes pour développer un ancrage approprié pour le renforcement planaire peuvent ne pas être réalisables sans impacter l'accotement et/ou la chaussée [48].

Gregory et Chill (1998a) [111] ont présenté une étude de cas d'un talus composée d'argiles à Beaumont, Texas, qui a échoué à plusieurs reprises au fil des ans. Les réparations précédentes consistaient simplement à excaver les matériaux défailants et à les replacer en couches compactées. Finalement, le talus a été réparé en utilisant la technique de renforcement par fibres, et la zone renforcée n'a plus connu de rupture par la suite.

Santoni et Webster (2001) [112] ont effectué une validation sur le terrain via des essais de circulation de camions sur une chaussée de sable mal nivelée renforcée avec 1 % de fibre de polypropylène (PP) (Fig. I.26). Les fibres ont été mélangées au sable avec le mélangeur rotatif automoteur puis retournées au moyen d'un chargeur frontal pour assurer un mélange sable-fibre uniforme. Les résultats des tests indiquent qu'une couche de 203 mm de sable renforcé de fibres avec un revêtement pulvérisé de résine d'arbre pourrait facilement supporter 5000 passages de camions militaires avec un poids brut de véhicule de 19.1 tonnes avec très peu de dommages à la chaussée. Une couche de 102 mm de sable renforcé de fibres pourrait supporter plus de 1000 passages d'une charge d'avion C-130 avec moins de 41 mm d'orniérage.



**Fig I.26.** Le chariot d'essai avec ensemble de roue simple de 13.608 kg (d'après [112]).

Tingle et al., (2002) [113] ont poursuivi les travaux de Santoni et Webster (2001) [112] sur le sable moyen et fin renforcé de fibres de PP et ont conclu que les fibres amélioraient la résistance à l'orniérage et la valeur *CBR* dans deux types de sable différents. Par rapport aux fibres de 76 mm de longueur, les fibres de 51 mm de longueur semblaient dans leur étude être plus appropriées pour une utilisation sur le terrain. Les auteurs ont également souligné que les

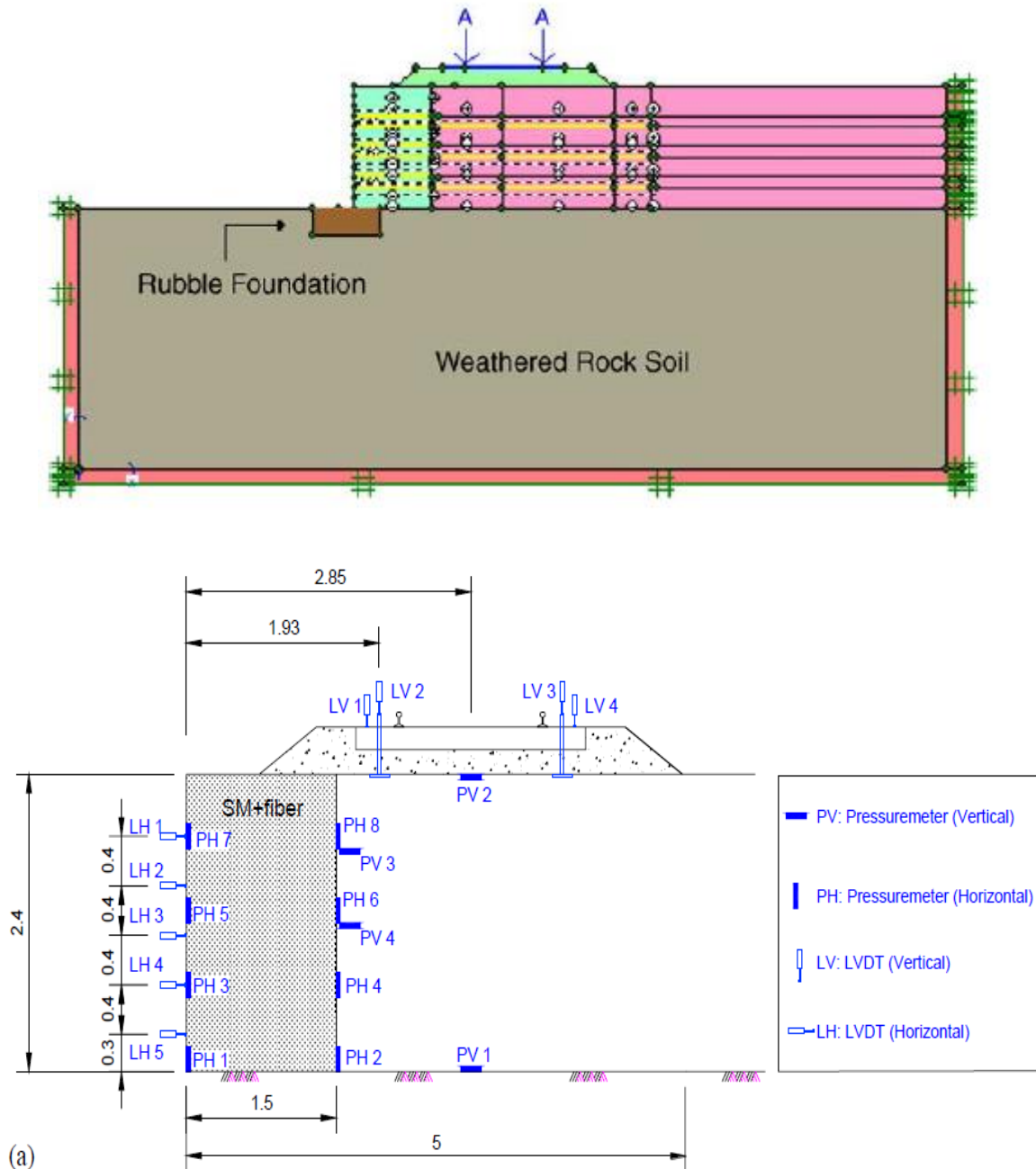
sables renforcés de fibres constituaient un choix acceptable en tant que matériau de construction traditionnel pour les routes temporaires ou à faible volume. Dans les deux études, les fibres ont été mélangées au sable en quatre passages avec un mélangeur rotatif automoteur utilisé par les ingénieurs de l'armée américaine. Des essais de terrain similaires ont également été menés sur des chaussées renforcées de fibres de PP décrites dans Lindh et Eriksson (1992) [114], dans lesquelles les auteurs mélangeant le composite de sable, d'eau et de fibres plastiques dans une centrale à béton de type malaxeur à tambour, et ont obtenu un effet de mélange satisfaisant. Crockford et al., (1993) et Grogan et Johnson (1994) [115, 116] ont constaté que l'orniérage d'une chaussée diminuait et que le nombre de passages à la rupture dans les essais routiers sur le terrain augmentait avec l'ajout de fibres.

Chandra et al. (2008) [117] ont examiné les avantages du renforcement des sols de fondation dans les chaussées souples. Trois types de sols et un type de fibre de polypropylène ayant des rapports d'aspect de 50, 84 et 100 ont été étudiés. Ils ont constaté que pour une épaisseur de fondation constante, l'épaisseur de la couche de chaussée diminue de 38.52 à 16.67 % pour les différents types de sols renforcés ; par conséquent, la chaussée reposant sur des sols de fondation renforcés est bénéfique pour réduire les matériaux de construction et les économies réelles dépendraient de l'option exercée par le concepteur pour réduire l'épaisseur d'une couche individuelle.

### **I.6.3 Les remblais**

Falorca et al., (2011) [118] ont érigé un remblai d'essai mesurant 50 m de long et 10 m de large en utilisant du sable limoneux renforcé de fibres de PP sur le campus de l'Université de Beira Interior (Covilhã, Portugal) pour étudier la faisabilité d'utiliser le renforcement en fibres PP dans les travaux de remblayage. Le composite a été préparé en superposant le sol et les fibres, puis en étalant une quantité nécessaire de sol sur les fibres et enfin, en utilisant une fraise rotative pour produire un mélange uniforme. Des tests de chargement de plaques ont été réalisés sous des charges et des décharges répétées. Les résultats ont indiqué que le sol renforcé était plus compressible que le sol non renforcé, mais que les fibres de PP pouvaient améliorer le tassement élastique des sols. Le matériau composite a satisfait aux exigences de rigidité pour plusieurs applications de construction, confirmant ainsi sa viabilité pratique en tant qu'alternative aux matériaux de construction traditionnels.

Park et Tan (2005) [119] ont construit des murs de soutènement en limon sableux renforcé de fibres de PP, avec et sans renforcement, pour évaluer l'effet des fibres sur la résistance et la stabilité du sol. Le sol a été mélangé à l'aide d'un mélangeur portable et les murs de soutènement avaient une longueur de 22 m, une largeur de 1.5 m et une hauteur de 2.4 m (Fig. I.27). Les résultats ont montré que l'utilisation de fibres a permis de réduire la pression active exercée par le sol sur le mur et le déplacement de celui-ci, améliorant ainsi la stabilité de l'ensemble.



**Fig I.27.** La géométrie et le maillage fini : un schéma de principe de la section d'essai [119].

### **I.6.4 Applications sismiques**

Les propriétés de ténacité et de ductilité des fibres renforcées de sol (FRS) peuvent être bénéfiques pour les structures soumises à des charges sismiques. Selon Makiuchi et Minegishi (2001) [120], il existe deux types de techniques de renforcement de sol utilisant des fibres synthétiques qui sont déjà utilisées pour la résistance aux tremblements de terre au Japon. La première méthode consiste à mélanger de longues fibres de polyester à un sol sablonneux, et des applications réussies de cette méthode sur le terrain ont été décrites par Leflaive (1988) [121]. La deuxième technique était celle de l'utilisation de fibres courtes, mais les auteurs n'ont pas fourni plus de détails.

Keshavarz et al. (2020) [122] ont étudié la portance des semelles filantes sur une couche de sols granulaires renforcés par des fibres, en prenant en compte la distribution anisotrope de l'orientation des fibres et en ignorant la défaillance des fibres. Les résultats ont montré que la profondeur de la zone de rupture augmente avec un accroissement de la quantité de renforcement ou une diminution du coefficient sismique horizontal. De plus, la prise en compte de la distribution anisotrope des orientations des fibres conduit à une portance supérieure par rapport à une distribution isotrope.

### **I.7 Conclusion**

En conclusion, l'ajout de fibres pour renforcer les sols est de plus en plus courant dans la construction d'ouvrages géotechniques. Cette méthode présente des avantages en termes d'amélioration des propriétés mécaniques des sols, ainsi que sur le plan économique et environnemental. Cependant, il est important de prendre en compte l'effet anisotrope de cette amélioration, qui dépend de l'orientation des fibres lors de la compression du sol.

Nous avons réalisé une étude approfondie sur le comportement et les modèles rhéologiques des sols renforcés par des fibres. Les résultats obtenus ont démontré que la plupart de ces modèles présentent une loi de comportement élastoplastique anisotrope, à l'exception des modèles de Waldron, de MG et de SSS [64]. Il est essentiel de noter que ces modèles ont été développés pour des concentrations de fibres faibles, inférieures à 10 %, dans le but de ne pas tenir compte de l'interaction entre les fibres. Cependant, d'autres approches numériques ont été développées en utilisant des logiciels commerciaux tels que PLAXIS et FLAC, ainsi que des méthodes basées sur l'intelligence artificielle. Ces dernières méthodes s'avèrent appropriées pour résoudre les défis techniques impliquant de nombreuses variables aléatoires, pour

lesquelles la corrélation entre les entrées et les sorties est inconnue. Dans notre synthèse bibliographique, nous nous sommes intéressés à la branche de l'apprentissage automatique (RNA) dans l'étude du comportement de ces sols.

Cependant, l'étude bibliographique révèle des incohérences dans la prédiction du comportement anisotrope des sols renforcés par des fibres, notamment en ce qui concerne les paramètres de résistance au cisaillement. Ces incohérences peuvent être dues à une orientation excessive des expériences précédentes, qui se sont principalement concentrées sur les propriétés des matériaux et la distribution aléatoire des fibres utilisées [5, 30, 66, 111, 113, 117, 119, 123].

De plus, la plupart des travaux réalisés dans le domaine de l'application des sols renforcés par des fibres en géotechnique ont démontré de nombreux avantages liés à l'ajout de fibres dans le sol, tels que l'augmentation de la pression limite, la réduction du tassement élastique et l'amélioration de la stabilité, entre autres. Cependant, la plupart de ces études n'ont pas pris en compte l'effet d'anisotropie de ces sols, à l'exception des travaux suivants :

- L'étude menée par Mohammadi et al. (2022) [110] a examiné le tassement élastique et la capacité portante d'une fondation en bande sur un sol granulaire renforcé par des fibres orientées. Les résultats ont clairement démontré que les fibres alignées verticalement avaient un impact significatif sur la réduction des déformations verticales et l'augmentation de la capacité portante. De plus, à mesure que la concentration en fibres augmentait, les déformations verticales diminuaient tandis que la capacité portante augmentait.
- Les travaux réalisés par Keshavarz et al. (2020) [122] ont étudié la capacité portante des semelles filantes sur une couche de sols granulaires renforcés par des fibres, en prenant en compte la distribution anisotrope de l'orientation des fibres et en négligeant la défaillance des fibres. Les résultats ont révélé que la profondeur de la zone de rupture augmentait avec une augmentation de la quantité de renforcement ou une diminution du coefficient sismique horizontal. De plus, la prise en compte de la distribution anisotrope des orientations des fibres conduisait à une capacité portante supérieure par rapport à une distribution isotrope.

Ces deux études mettent en évidence l'importance cruciale de prendre en compte l'effet d'anisotropie de ces types de sols lors du calcul des ouvrages géotechniques. De plus, il est essentiel de développer des modèles et des approches qui intègrent pleinement cet aspect afin d'obtenir une évaluation plus précise.

CHAPITRE II

ETUDE EXPERIMENTALE  
DU COMPORTEMENT DES  
SOLS RENFORCES

## II.1 Introduction

Le principal objectif du programme d'essais expérimentaux dans cette étude était d'évaluer la résistance au cisaillement du sol renforcé par des fibres à travers des essais de cisaillement direct à la boîte. Des variations ont été apportées au pourcentage, à la longueur et à l'orientation des fibres utilisées, afin d'observer l'effet d'orientation des fibres sur le sol renforcés. Les sections suivantes décrivent les propriétés des matériaux, l'instrumentation, les procédures d'essai et l'étendue du programme d'essais expérimentaux. Les résultats des essais sont présentés à la fin de cette section.

## II.2 Matériaux utilisés

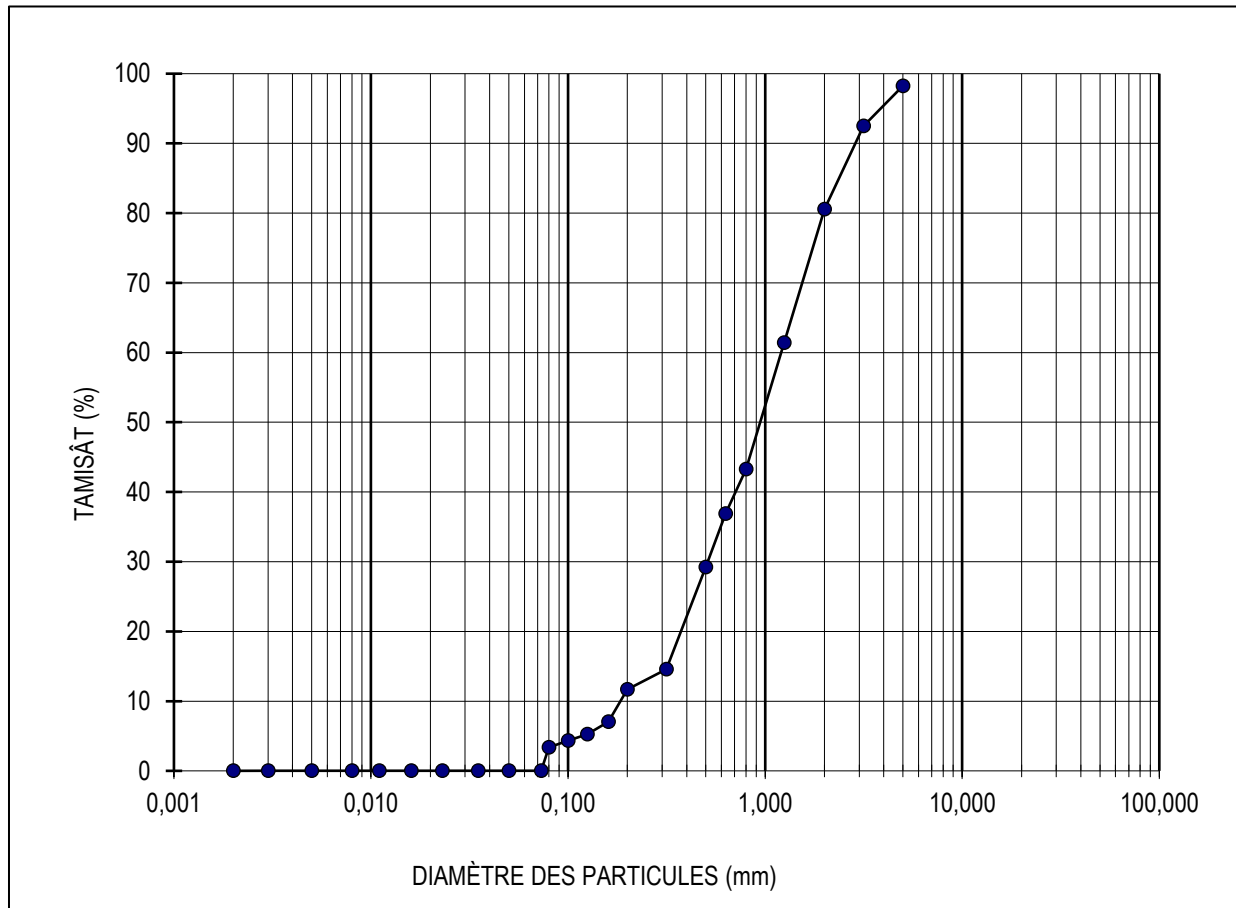
### II.2.1 Le Sol utilisé

Le sol utilisé dans ce travail est un matériau issu de la région de Jijel (Algérie). Il a été employé pour la construction des parties supérieures des terrassements (PST) dans le cadre d'un projet routier dans cette région. Selon le système GTR, il est classé comme un sable peu argileux « **B<sub>2</sub>** » et comme un sable mal gradué « **S<sub>m</sub>** » selon le système LCPC. Les particules de sable sont majoritairement arrondies à sub-arrondies et sont composées principalement de quartz et d'autres minéraux. Le diamètre moyen,  $D_{50}$ , est de 1.0 mm et la densité spécifique des grains solides est de 2.65. Selon la courbe granulométrique établie selon la norme « NF P 94- 56 : 1996 », comme illustré dans la Figure II.1, le coefficient d'uniformité est de 6.0 et le coefficient de courbure est d'environ 1.66. Les taux de vide maximum et minimum sont respectivement de 0.75 et 0.50. Les propriétés physiques du sol sont récapitulées dans le tableau II.1.

**Tableau II.1** Propriétés de sable de Jijel.

Propriété physique	Valeur	Unité	Norme
Diamètre effectif « $D_{10}$ »	0.20	mm	NF P 94-056
Diamètre effectif « $D_{30}$ »	0.50	mm	NF P 94-056
Diamètre moyen « $D_{50}$ »	1,00	mm	NF P 94-056
Diamètre effectif « $D_{60}$ »	1,20	mm	NF P 94-056
Coefficient d'uniformité « $C_u$ »	6.00	-	NF P 94-056
Coefficient de courbure « $C_c$ »	1.66	-	NF P 94-056
Équivalent de sable « $E_s$ »	34	%	NF P 18-598
Teneur en eau « $w$ »	25.85	%	NF P 94-050

<b>Limite de liquidité « <math>w_L</math> »</b>	8.27	%	NF P 94-051
<b>Limite de plasticité « <math>w_p</math> »</b>	1.00	%	NF P 94-051
<b>Indice des vides « <math>e</math> »</b>	0.521	-	-
<b>Indice de plasticité « <math>I_p</math> »</b>	7.27	%	NF P 94-051
<b>Indice de bleu méthylène « VBS »</b>	0.215	%	NF P 94-068
<b>Densité humide « <math>d_h</math> »</b>	19.00	KN/m <sup>3</sup>	NF P 94-054
<b>Densité des grains solides « <math>d_s</math> »</b>	26.50	KN/m <sup>3</sup>	NF P 94-049



**Fig.II.1:** La courbe granulométrique du sol étudié.

## II.2.2 La fibre utilisée

L'utilisation de fibres naturelles ou synthétiques pour renforcer le sol présente plusieurs avantages, notamment :

- Elles sont bon marché, disponibles localement et respectueuses de l'environnement [57, 124, 125] ;
- Elles peuvent améliorer la résistance du sol [4, 29, 123], réduire les propriétés de gonflement et de retrait [4].

- Elles ne sont pas significativement affectées par les conditions météorologiques, contrairement au ciment, à la chaux et aux autres techniques de stabilisation chimique [57].
- Le renforcement du sol avec des fibres peut inhiber la propagation des fissures de traction et modifier le mécanisme de rupture après la formation initiale.

Dans ce travail, nous avons utilisé la fibre d'Alfa, également connue sous le nom de « Esparto grass », comme matériau de renforcement en raison des avantages mentionnés ci-dessus. En outre, elle est appréciée pour sa qualité de résistance et sa grande disponibilité dans notre région. Cette fibre provient d'une source renouvelable [126].

L'Alfa est une plante pérenne commune en Méditerranée, qui se développe naturellement dans les régions désertiques et semi-désertique en Libye, Tunisie, Algérie, Maroc et Espagne [126-128]. Elle a une section circulaire avec une zone centrale creuse, et ses feuilles sont cylindriques, très robustes et longues de 50 à 60 centimètres (Fig II.2) [129]. Sa densité est faible ( $1400 \text{ Kg/m}^3$ ) [126].



**Fig.II.2:** Fibre d'Alfa [130].

L'Alfa possède une structure hétérogène et sa composition chimique est principalement composée de cellulose (40 à 50 %), de lignine (8 à 20 %), d'hémicellulose (22,15 à 28 %), de cendres minérales (5 à 7 %) et de 1,5 % de cire [131, 132].

Les propriétés mécaniques de l'alfa ont été relevées par plusieurs chercheurs à l'aide d'un test de traction uniaxiale sur les fibres extraites des feuilles. Les valeurs des propriétés recensées dans les études antérieures ont été synthétisées dans le tableau II.2.

**Tableau II.2** Les propriétés mécaniques d'Alfa [129].

Source	Diamètre moy. ( $\mu\text{m}$ )	E (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Elongation à la rupture (%)
[126]	-	$8 \pm 2.7$	$75 \pm 24.09$	$2.8 \pm 2$
[133]	-	21.5	247	1.96
[134]	70	$71 \pm 23$	$1480 \pm 800$	$2.8 \pm 2$
[132]	$24.34 \pm 8.6$	$58 \pm 17$	$1327 \pm 342$	$2.4 \pm 0.6$

## II.3 Le programme des essais

### II.3.1 La préparation de l'échantillon

Différentes méthodes ont été décrites pour la préparation des échantillons, visant à éviter la ségrégation des fibres et à permettre leur répartition uniforme et leur orientation dans le sol [135-137]. Le comportement en cisaillement peut être influencé par le type de méthode de préparation des échantillons utilisé [138]. Ainsi, pour assurer la cohérence des éprouvettes non renforcées et renforcées par les fibres, tous les échantillons de sol utilisés pour les essais ont été préparés de manière identique. Le sable a été asséché dans un four à  $105^\circ\text{C}$ .

Des essais de renforcement par des fibres ont été réalisés à l'aide d'un appareil de cisaillement en boîte. Les fibres naturelles étaient toujours disposées selon un motif régulier, avec des espacements approximativement équidistants entre elles et les côtés de la boîte de cisaillement, selon la procédure décrite dans la recherche de Gray et Ohachi (1983)[29]. Les fibres d'Alfa ont été insérées dans l'échantillon de sol selon des orientations, des longueurs et des teneurs souhaitées.

En se basant sur la relation développée par Anagnostopoulos et al. (2013) [139] (Eq. II.1), on peut calculer la masse et le contenu des fibres utilisés dans l'échantillon de sable renforcé, en prenant en compte l'état de densité relative du sable.

$$\rho_f = \frac{(1 + e_0) \times \gamma_f \times \rho_V}{(1 + e_0) \times (\gamma_f - \gamma_s) \times \rho_V \times \gamma_s} \quad (\text{II.01})$$

Avec :

- $\gamma_f$  et  $\gamma_s$  : les poids volumiques des fibres et des grains solides respectivement ;
- Le pourcentage des fibres par volume :  $\rho_V = V_f/V_{total}$

La masse des fibres  $M_f$  et la masse de sol sec  $M_s$  ajoutées lors de l'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande ont été calculées en utilisant les relations suivantes :

$$M_s = \frac{V}{(1 + e_0)} \frac{(1 - \rho_f) \times \gamma_s \times \gamma_f}{(1 + \rho_f) \times \gamma_f + \rho_f \times \gamma_s} \quad (\text{II.02})$$

$$M_f = \frac{V}{(1 + e_0)} \frac{\rho_f \times \gamma_s \times \gamma_f}{(1 + \rho_f) \times \gamma_f + \rho_f \times \gamma_s} \quad (\text{II.03})$$

### II.3.2 La procédure des essais

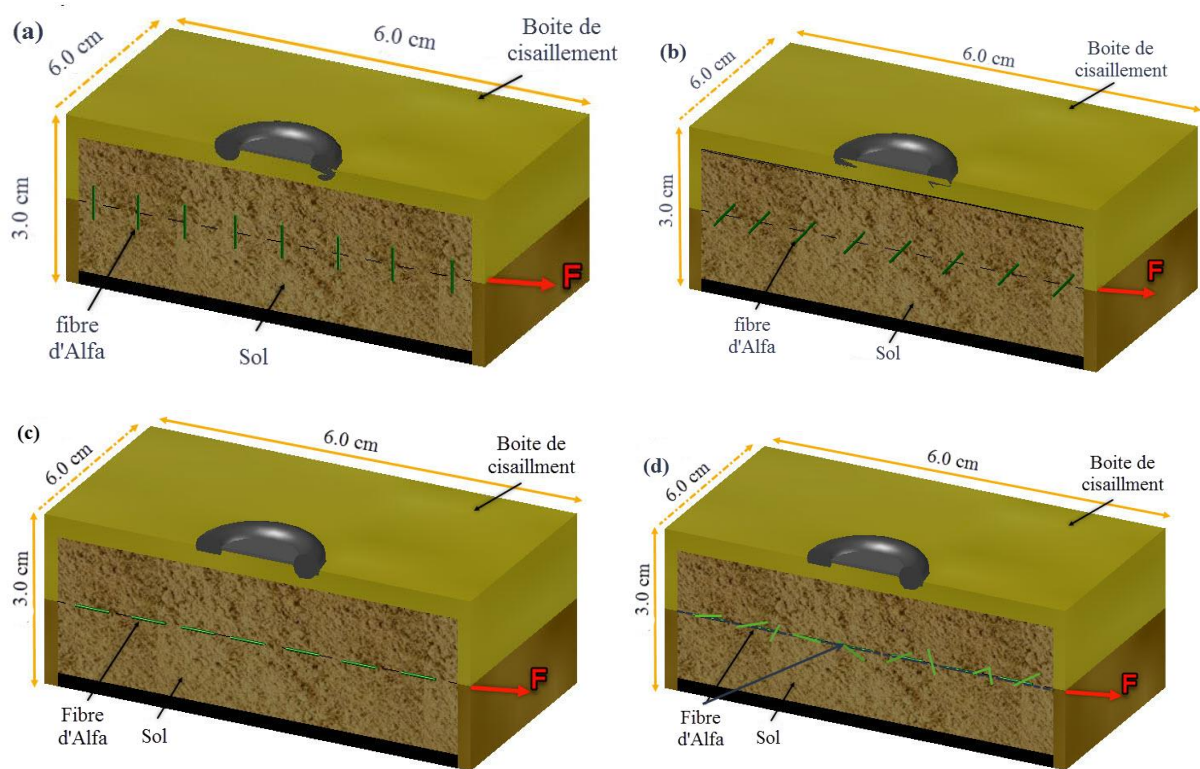
Le sable préparé est placé dans la boîte de cisaillement direct avec une densité relative de 60% (Fig. II.3). Les dimensions intérieures de la boîte sont de 6.0 cm de longueur, 6.0 cm de largeur et 2.5 cm de hauteur. Elle est divisée en deux sections rigides qui peuvent coulisser horizontalement l'une sur l'autre (NF P 94-071-1). L'essai consiste à déplacer l'une des sections par rapport à l'autre à une vitesse constante de 0.02 mm/s. Les essais ont été réalisés dans des conditions non consolidées drainées sous des contraintes normales de 100, 200 et 300 kPa, respectivement.

L'échantillon de sable non renforcé a été pris comme cas de référence. Cependant, pour étudier l'effet d'orientation des fibres, l'échantillon renforcé par des fibres aléatoires a été utilisé comme cas de référence pour lequel l'orientation des fibres a été variée. En effet, les études de Gray et Ohachi (1983) [29] ont démontré que le sol renforcé par des fibres aléatoires est de type isotrope.

Le sable renforcé a été étudié dans trois cas de renforcement :

- La fibre est orientée aléatoirement, verticalement, horizontalement et inclinée de 45° par rapport au sens de cisaillement (Fig. II.3) ;
- Le contenu en fibre par rapport à la masse sèche de sable varie de 0 à 1.0 % avec un pas de 0.25 % ;
- La longueur de fibre varie de 1.0 cm à 2.5 cm avec un pas de 0.5 cm.

Ces essais ont été réalisés en utilisant également les mêmes contraintes normales que celles utilisées pour le sable non renforcé.



**Fig.II.3:** L'orientation des fibres dans l'échantillon de sol (a) verticale (b) inclinée (c) horizontale (d) aléatoire.

## II.4 Résultats et discussions

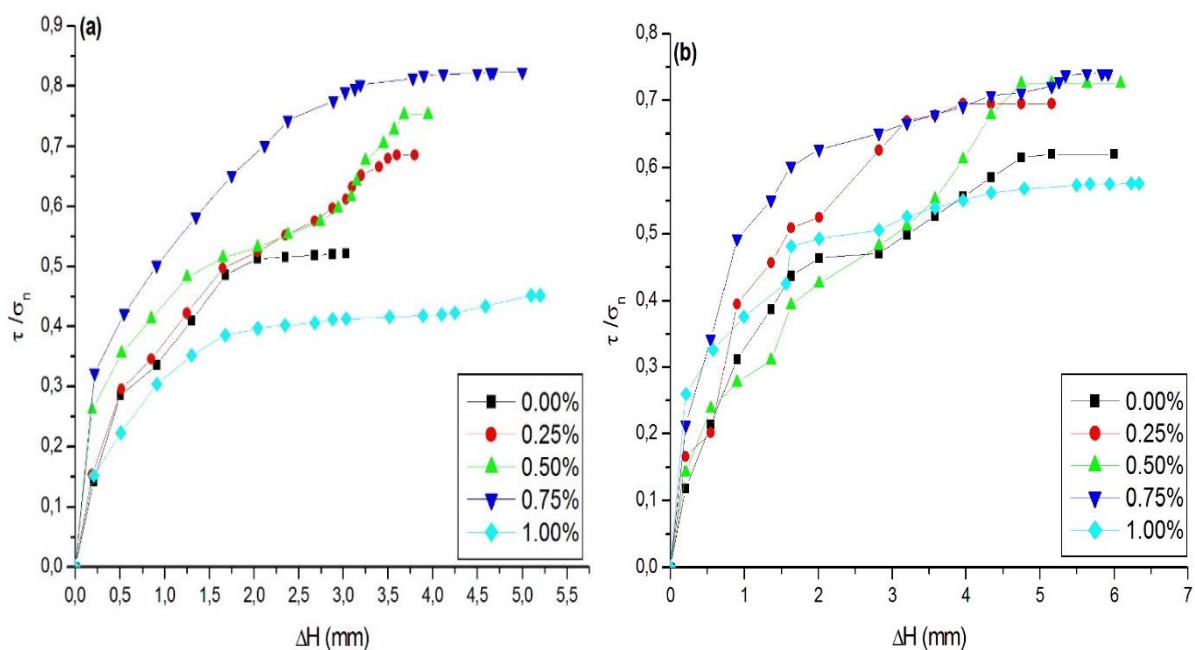
### II.4.1 L'effet de la teneur des fibres

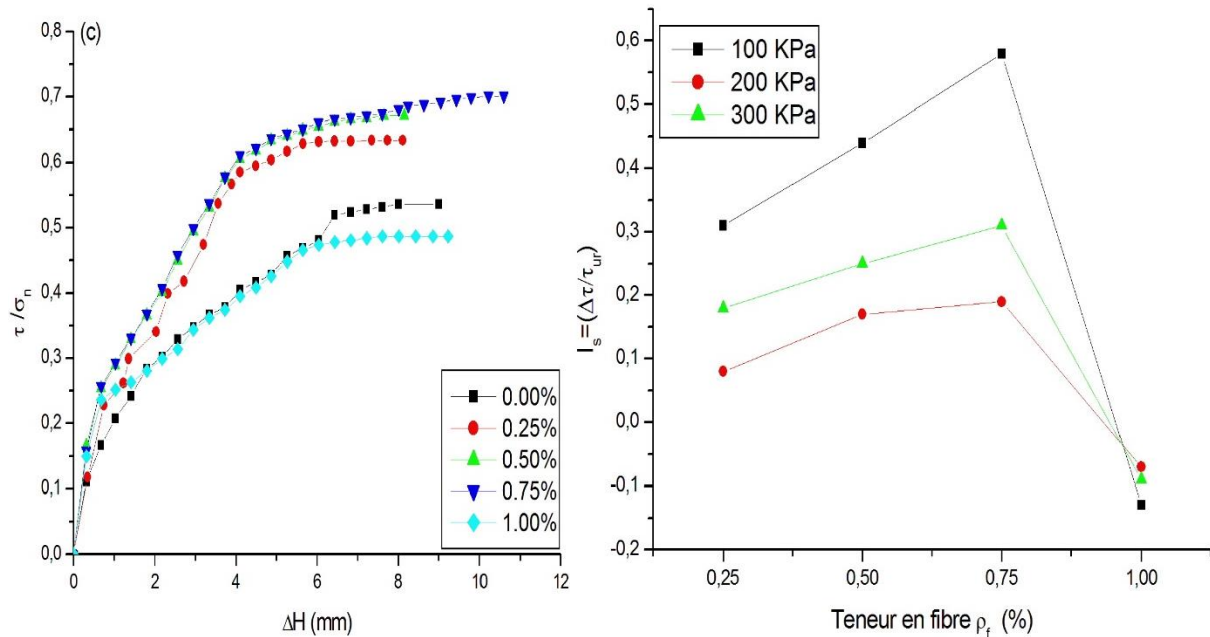
La figure II.4 expose les résultats de l'ajout de fibres d'Alfa dans du sable sec, réparties aléatoirement, sous différentes pressions normales ( $\sigma_n = 100, 200$  et  $300$  KPa). Le comportement a été décrit en utilisant le rapport de la contrainte de cisaillement ( $\tau/\sigma_n$ ), comme indiqué dans les travaux de Harrison (2006) et Falorca et Pinto (2011) [118, 140].

Les résultats présentés dans les figure II.4a, b et révèlent que le rapport «  $\tau/\sigma_n$  » est fonction du pourcentage de fibres d'Alfa ajouté à la densité apparente en état sec, ce qui confirme les études antérieures [29-31, 57, 59, 67, 118, 123, 129, 141]. Ce rapport montre une tendance à la hausse avec l'augmentation de la proportion de fibres jusqu'à 0.75%. Au-delà de cette valeur, il décroît. La figure II.4d indique que le coefficient d'amélioration des contraintes de cisaillement ( $I_s = \Delta\tau/\tau_{ur}$ ) varie de 10% à 60% pour une teneur en fibres de 0.25% à 0.75%, mais diminue

d'environ 10% au-delà de ce seuil sous différentes contraintes normales. Ces résultats s'apparentent à ceux obtenus par Falorca et Pinto (2011) [118] sur des sables renforcés par du polypropylène, où le taux optimal de fibres oscillait entre 0.5% et 1% du poids de sol sec, avec un «  $I_s$  » variant entre 40% et 90%. Wei et al (2018) [142] ont noté que l'élévation de la proportion de fibres accroît l'aire d'interaction entre les fibres et les grains de sol, ce qui entraîne une augmentation du frottement à l'interface. Les fibres peuvent également créer des réseaux qui renforcent l'effet de confinement spatial dans le sol. Cependant, au-delà d'une certaine valeur seuil de teneur en fibres, celles-ci ne sont plus uniformément dispersées dans le sol à cause du chevauchement et du bobinage, ce qui peut entraîner la formation de poches d'air et de zones d'interface faible, diminuant ainsi la performance mécanique de la mixture sol / fibres [142].

Les valeurs maximales du rapport «  $\tau/\sigma_n$  » pour une pression normale de 100 KPa sont de 0.69, 0.75, 0.82 et 0.45 respectivement pour des teneurs en fibres d'Alfa de 0.25 %, 0.50 %, 0.75 % et 1.0 %. Toutefois, ces valeurs diminuent pour des pressions normales de 200 et 300 KPa (voir Figure II.4.a, b et c). Ainsi, l'influence de la teneur en fibres d'Alfa montre une diminution des rapports de pression de cisaillement maximal avec l'augmentation de la pression normale. Ce résultat est compréhensible car, au cours du cisaillement direct, les particules de sable ont tendance à se déplacer autant que possible plutôt que de s'écraser. Falorca et Pinto (2011) ont également observé cette tendance dans leur étude, en montrant que l'augmentation de la force au cisaillement était plus importante pour les faibles pressions normales [118].

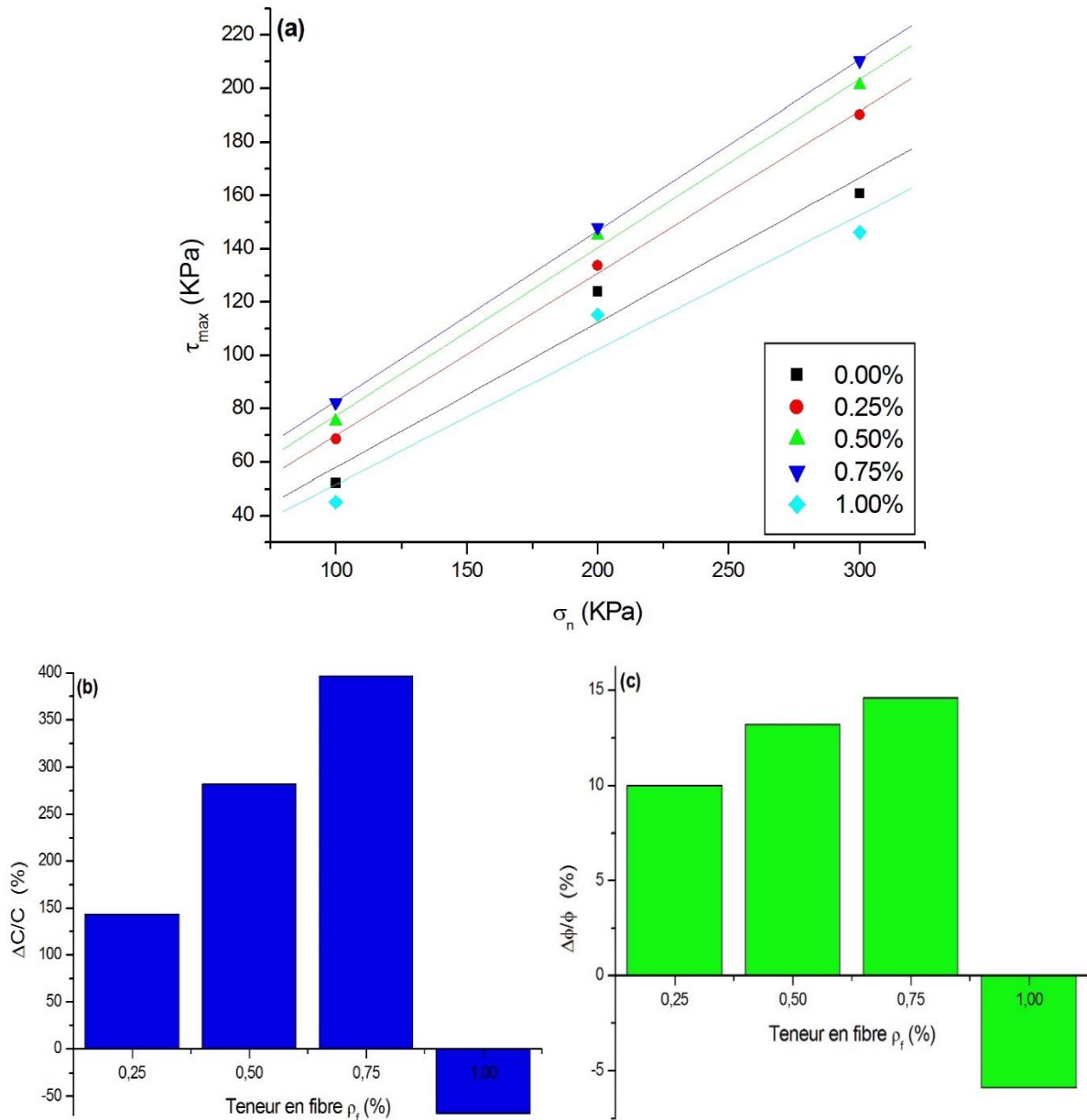




**Fig.II.4:** L'influence de la teneur des fibres d'Alfa sur le comportement de sable sous différentes contraintes normales : (a) variation de «  $\tau/\sigma_n$  » sous  $\sigma_n = 100\text{KPa}$ , (b) variation de «  $\tau/\sigma_n$  » sous  $\sigma_n = 200\text{KPa}$ , (c) variation de «  $\tau/\sigma_n$  » sous  $\sigma_n = 300\text{KPa}$  et (d) Coefficient d'amélioration des contrainte de cisaillement pour différents pourcentages d'Alfa.

La figure II.5.a représente la courbe intrinsèque pour différents pourcentages d'ajout de fibres d'alfa dans le sable sec. Il est clair que la pression de cisaillement maximale ( $\tau_{\max}$ ) varie de manière proportionnelle avec l'augmentation de la pression normale, que le sable soit renforcé ou non renforcé. Cependant, les pentes des courbes "M" sont presque identiques tandis que la cohésion varie considérablement d'une courbe à l'autre. En effet, la cohésion est nettement supérieure pour l'échantillon avec 0.75 % d'ajout de fibres par rapport aux autres échantillons.

Ces résultats démontrent que l'ajout de fibres d'Alfa dans le sable sec entraîne une augmentation considérable de la cohésion par rapport au sable non renforcé, jusqu'à une certaine limite où elle devient presque la même (voir Figure II.5.b). En revanche, l'angle de frottement varie légèrement pour tous les pourcentages d'ajout de fibres (voir Figure II.5.c). Ces mêmes observations ont été faites par Tang et al. (2007), Falorca et Pinto (2011) et Li et al. (2014) [118, 137, 143]. Michalowski and Zhao (1996) ont expliqué que l'ajout de fibres dans la phase plastique des fibres provoque le déplacement horizontal des particules de sol jusqu'à ce que les fibres s'étirent, augmentant ainsi la capacité de retenir les particules et favorisant le développement de l'adhérence [31].



**Fig.II.5:** Variation des paramètres mécaniques de cisaillements en fonction de la teneur en fibres  
 (a) Courbe intrinsèque (b) Variation de la cohésion (c) Variation d'angle du frottement.

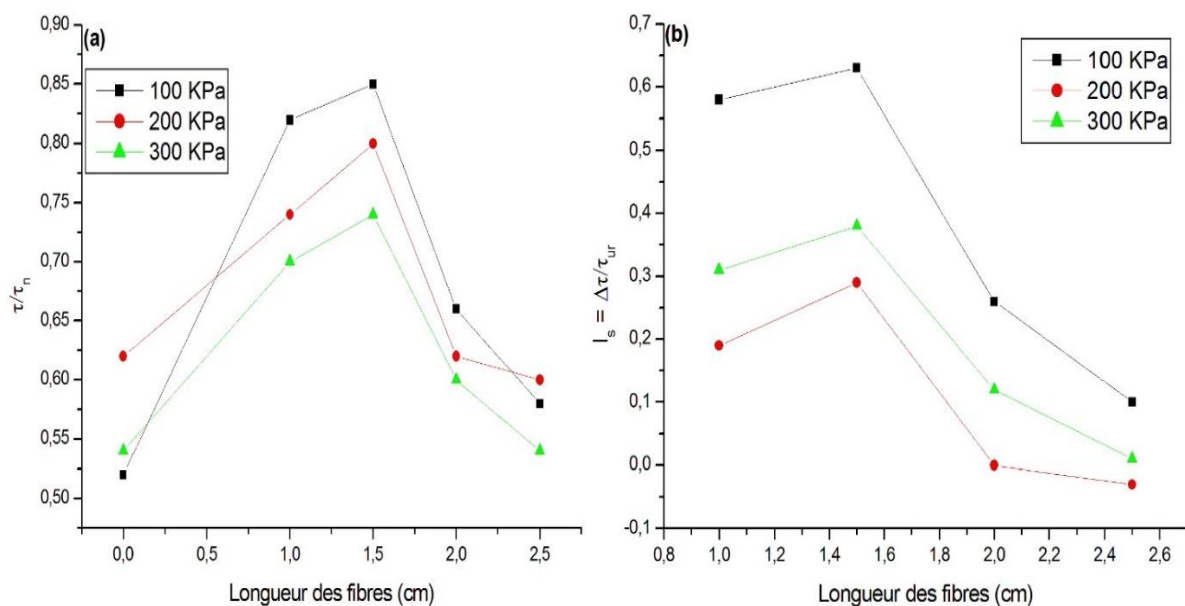
## II.4.2 L'effet de la longueur des fibres

Des essais de cisaillement direct en boîte ont été réalisés pour évaluer l'influence de la longueur des fibres d'Alfa (1, 1.5, 2 et 2.5 cm) sur le comportement du sable sec soumis à différentes pressions normales (100, 200 et 300 KPa). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure II.6.

La figure II.6.a., montre que le rapport «  $\tau/\sigma_n$  » augmente avec la longueur des fibres, mais cette augmentation est limitée au-delà d'une certaine longueur (environ 1.5 cm), au-delà de

laquelle elle diminue. Des observations similaires ont été faites sur la figure II.6.b, où le coefficient «  $I_s = \Delta\tau/\tau_{ur}$  » augmente avec l'ajout de fibres d'Alfa jusqu'à un maximum à 1.5 cm. De plus, il a été constaté que l'augmentation de la force au cisaillement était plus importante pour les pressions normales faibles. Des études antérieures ont également montré que la résistance au cisaillement du sol est proportionnelle à la longueur des fibres jusqu'à une certaine valeur limite, par exemple dans les travaux de Mirzababaei et al. (2018) et d'autres auteurs [29, 30, 118, 137, 144].

Les résultats obtenus pour les pressions normales de 100, 200 et 300 KPa montrent que les rapports de la contrainte de cisaillement au pic sont respectivement de 0.85, 0.80 et 0.74, et que les coefficients d'amélioration des contraintes de cisaillement au pic sont respectivement de 63 %, 29 % et 34 %. Il est donc clair que l'effet de la longueur des fibres est plus significatif que celui de la teneur en fibres.

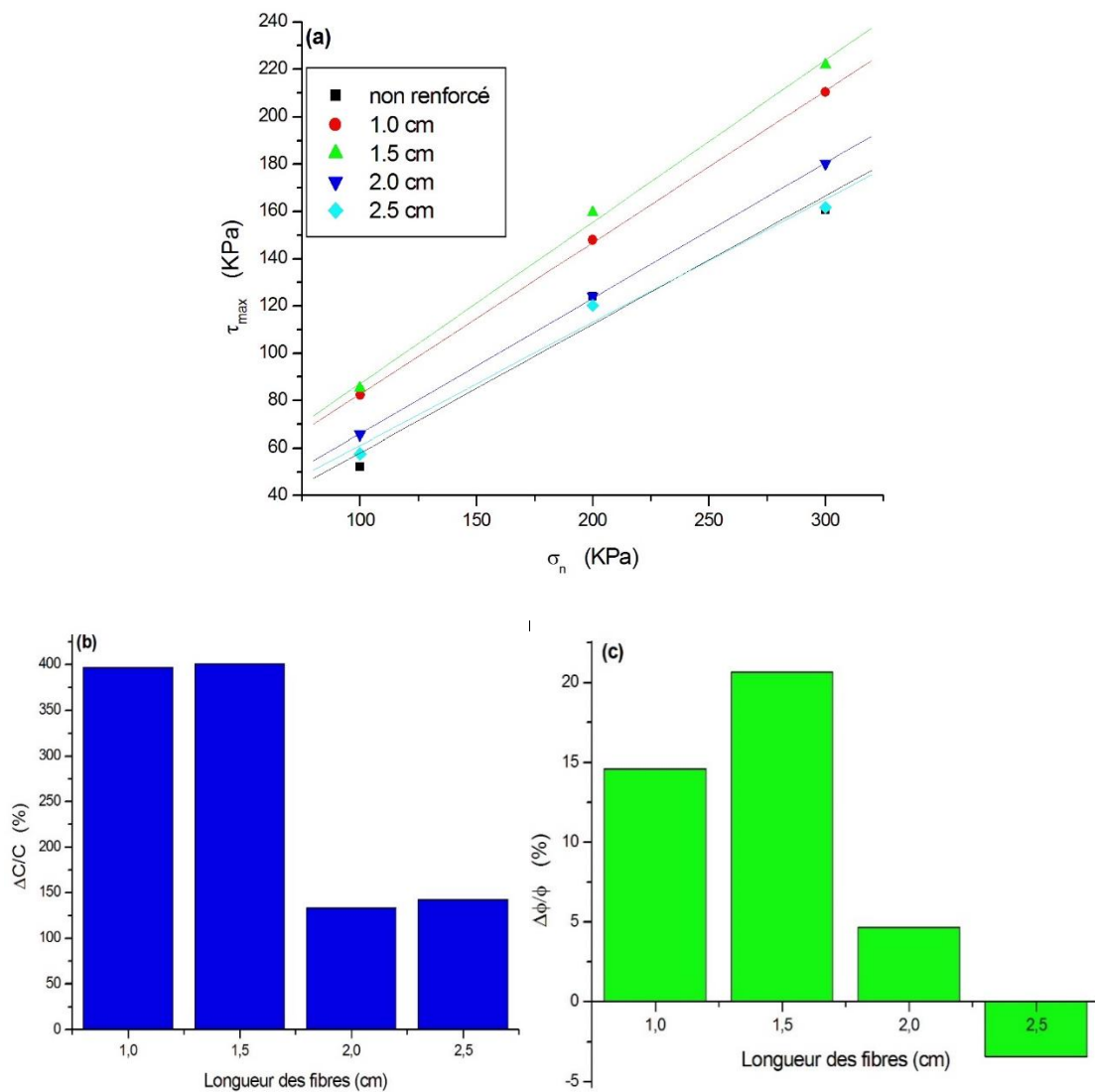


**Fig.II.6:** L'influence de la longueur des fibres d'Alfa sur le comportement de sable sous différentes contraintes normales : (a) Variation de «  $\tau/\sigma_n$  », (b) Variation du coefficient d'amélioration des contraintes de cisaillement.

D'après l'étude de Hsueh et Becher (1993), les fibres longues augmentent la force de frottement grâce à leur frottement d'interaction lorsqu'elles se frottent contre les particules du sol en cisaillement [145]. Par conséquent, l'amélioration de la force au cisaillement d'un sol renforcé par des fibres dépend de la longueur de ces dernières. Comme on peut le voir sur la figure II.7.a, cette relation est clairement démontrée, avec des courbes intrinsèques pour différents pourcentages d'ajout de fibres d'Alfa dans le sable sec.

Les pentes des courbes "M" sont presque identiques, tandis que la cohésion varie considérablement d'une courbe à l'autre. En particulier, elle est nettement plus élevée pour l'échantillon renforcé par des fibres d'Alfa de 1.5 cm de longueur. L'angle de frottement et la cohésion à la longueur optimale augmentent d'environ 20 % et 400 % respectivement (figure II.7.b et c), ce qui montre que l'amélioration de la force au cisaillement est principalement due à l'augmentation de la force d'adhérence dans le sable sec. Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés par Mirzababaei et al. (2018) ainsi que d'autres chercheurs [29, 31, 118, 123, 144].

Il a été découvert par Prabakar et Sridhar (2002) que l'utilisation de fibres longues et en grande quantité réduisait la force intergranulaire du sol, ce qui signifie que les grains de sol et les fibres ne fonctionnent pas comme une matrice unique et cohérente [146].



**Fig.II.7:** Variation des paramètres mécaniques de cisaillements en fonction de la longueur des fibres  
 (a) Courbe intrinsèque (b) Variation de la cohésion (c) Variation d'angle du frottement.

### II.4.3 L'effet d'orientation des fibres

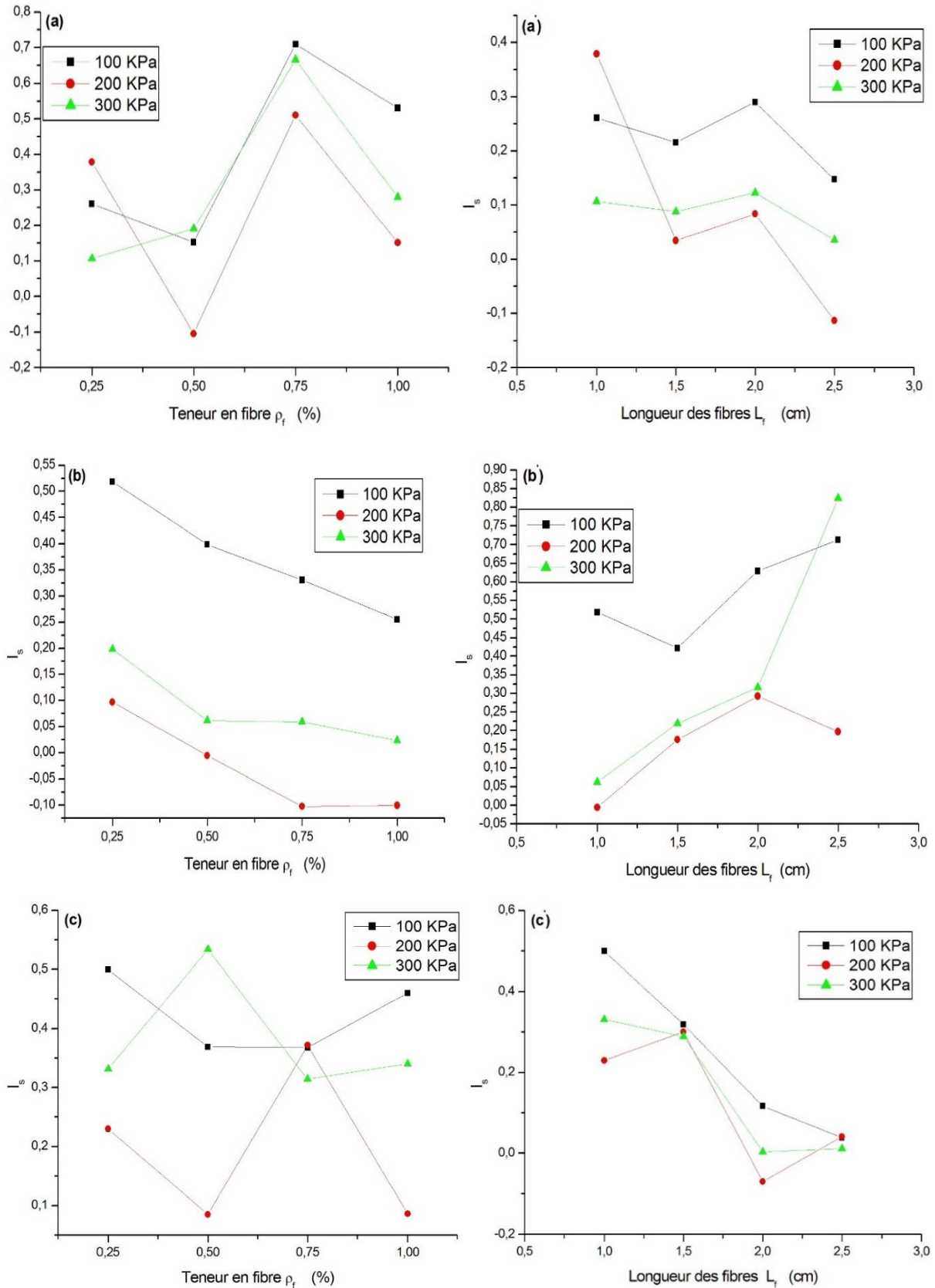
La figure II.8 présente les variations du coefficient d'amélioration de cisaillement «  $I_s$  » en fonction de la teneur et de la longueur des fibres d'Alfa, pour différentes orientations des fibres: verticale, inclinée de 45°, horizontale et aléatoire. Comme indiqué dans les paragraphes précédents, le coefficient d'amélioration augmente continuellement avec l'augmentation de la teneur en fibres et de leur longueur, jusqu'à atteindre un pic. Cependant, il est important de noter que ce pic varie en fonction de l'orientation des fibres.

- Orientation verticale : le pic est atteint avec 0.75% de teneur en fibres et 2 cm de longueur des fibres (Figure II.8.a et a').
- Orientation inclinée : le pic est atteint avec 0.25% de teneur en fibres et 2.5 cm de longueur des fibres (Figure II.8.b et b').
- Orientation horizontale : le pic est atteint avec 0.25% de teneur en fibres et 1 cm de longueur des fibres (Figure II.8.c et c').

Les résultats montrent que le taux d'accroissement du coefficient d'amélioration des contraintes de cisaillement au pic diffère selon la direction des fibres d'Alfa.

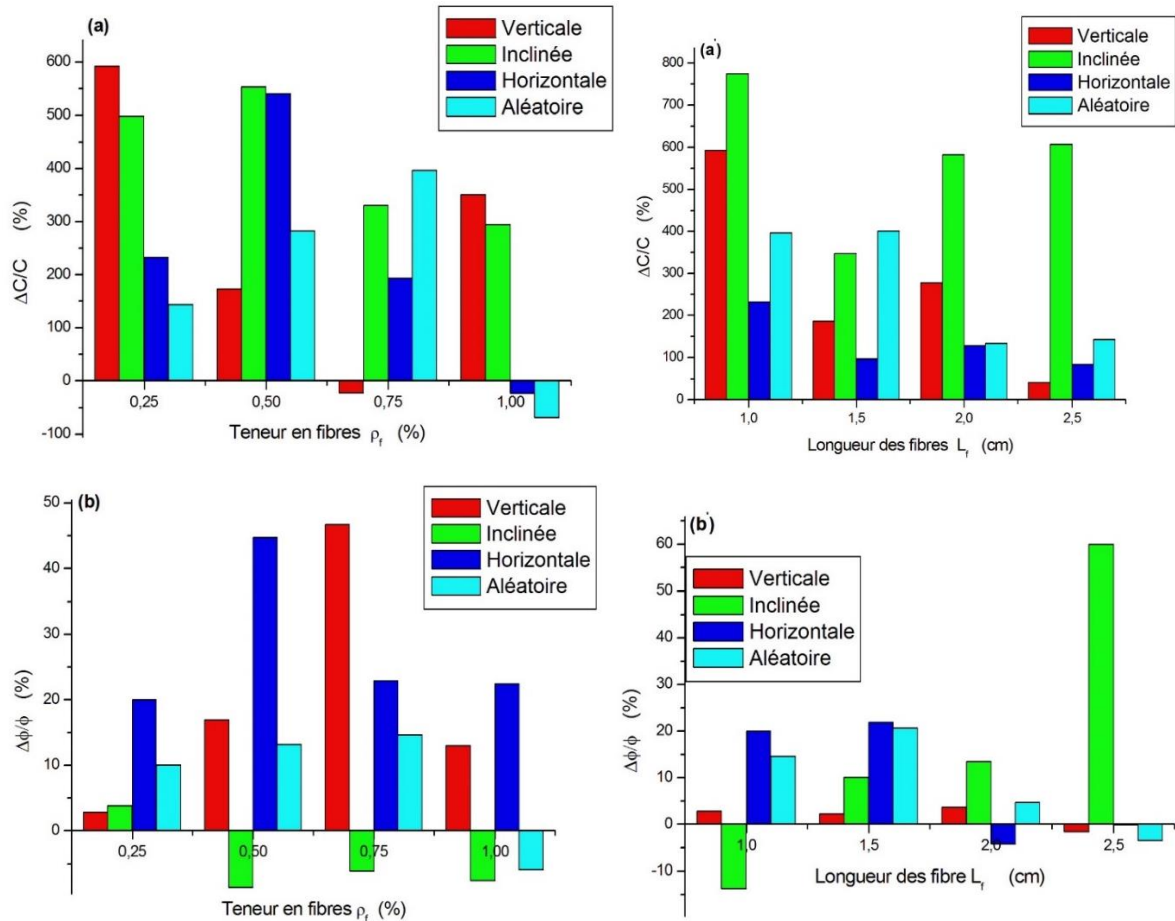
- Pour la direction verticale, une teneur en fibre de 0.75 % et une longueur de fibre de 2 cm ont produit un taux d'accroissement compris entre 50 % et 70 % ;
- Pour la direction inclinée de 45°, une teneur en fibre de 0.25 % et une longueur de fibre de 2.5 cm ont produit un taux d'accroissement compris entre 10 % et 50 % ;
- Pour la direction horizontale, une teneur en fibre de 0.25 % et une longueur de fibre de 1 cm ont produit un taux d'accroissement compris entre 20 % et 50 %.

Les résultats obtenus montrent que l'amélioration de la résistance au cisaillement du sable sec par les fibres d'Alfa dépend non seulement des caractéristiques géométriques des fibres, mais aussi de leur orientation dans le sol. Ce dernier paramètre influe directement sur l'effet d'anisotropie du sol. Contrairement aux recherches de Gray et Ohashi (1983) qui ont montré que les fibres orientées à 60° par rapport au plan de cisaillement donnent les meilleurs résultats, [29], nos recherches ont montré que la direction verticale a une résistance au cisaillement plus élevée que les autres directions lorsque la teneur en fibres est variable. En revanche, si on varie la longueur des fibres, la direction horizontale donne une meilleure résistance.



**Fig.II.8:** Variation du coefficient d'amélioration des contraintes de cisaillement sous différents teneurs, longueurs et orientations des fibres (a et a') Direction verticale (b et b') direction inclinée (c et c') direction horizontale.

La figure II.9 présente les variations de la cohésion et de l'angle de frottement pour chaque direction de renforcement en fibres. Ces variations diffèrent d'une direction à l'autre et ne suivent pas une relation linéaire continue, comme indiqué dans les travaux de Harrison (2006) [140]. De plus, pour les teneurs et les longueurs élevées de fibre, la cohésion et l'angle de frottement ont diminué dans toutes les directions, sauf pour la direction inclinée de 45°.



**Fig.II.9:** Variation des paramètres mécaniques de cisaillements en fonction de l'orientation des fibres  
(a) Variation de la cohésion (b) Variation d'angle du frottement.

Afin de mieux appréhender l'effet d'orientation des fibres sur le comportement du sol examiné, une comparaison a été effectuée entre les résultats obtenus et ceux d'un échantillon de sable sec renforcé par des fibres aléatoires, c'est-à-dire l'échantillons isotrope, comme indiqué précédemment [9, 29]. Le tableau II.3 résume les variations des contraintes de cisaillement des fibres orientées «  $I'_s$  » (équation II.04) pour différentes teneurs en fibres d'Alfa.

$$I'_s = \frac{(\tau_{max,ani} - \tau_{max,iso})}{\tau_{max,iso}} \quad (II.04)$$

Avec :

- $\tau_{max,ani}$  : Contrainte de cisaillement maximale dans les directions des fibres : verticale, inclinée ou horizontale ;
- $\tau_{max,iso}$  : Contrainte de cisaillement maximale dans la direction des fibres aléatoire.

**Tableau II.3** Variations des contraintes de cisaillement des fibres orientées «  $I'_s$  » pour différents teneurs en fibres d'Alfa.

	Fibre (%)	Contrainte normale (KPa)		
		100	200	300
<b>Verticale</b>	0.25	-0.04	0.28	-0.06
	0.50	-0.20	-0.23	-0.05
	0.75	0.08	0.27	0.27
	1.00	0.77	0.24	0.41
<b>Inclinée</b>	0.25	0.16	0.02	0.01
	0.50	-0.03	-0.15	-0.15
	0.75	-0.16	-0.25	-0.19
	1.00	0.45	-0.03	0.12
<b>Horizontale</b>	0.25	0.14	0.14	0.12
	0.50	-0.05	-0.07	0.22
	0.75	-0.13	0.15	0.01
	1.00	0.69	0.17	0.47

Les résultats obtenus indiquent que l'effet d'orientation des fibres sur la résistance au cisaillement est observé à des teneurs en fibres élevées (d'environ 1.0 %) dans toutes les directions. De plus, cet effet est plus marqué sous faible contrainte normale que sous forte contrainte normale, pouvant entraîner une augmentation de la force maximale au cisaillement pouvant aller jusqu'à 70 % (par exemple, dans les directions horizontale et verticale sous une pression normale de 100 KPa). Les directions verticale et horizontale présentent des effets d'anisotropie similaires pour une teneur en fibres de 1 %. Enfin, la direction inclinée à 45° présente un effet d'orientation moins important que les autres directions.

Le tableau II.4 révèle que la variation de la longueur des fibres dans différentes directions n'a pas une grande impact sur la contrainte maximale de cisaillement, sauf dans la direction inclinée. Dans cette direction, l'effet d'orientation sur la contrainte maximale de cisaillement peut atteindre jusqu'à 88 % lorsque la longueur de la fibre est de 2.5 cm et la contrainte normale est de 300 KPa. Dans les autres directions, la variation ne dépasse pas 20 %.

**Tableau II.4** Variations des contraintes de cisaillement des fibres orientées « I's » pour différentes longueurs des fibres d'Alfa.

	Fibre (cm)	contrainte normale (KPa)		
		100	200	300
<b>Verticale</b>	1	-0.20	0.15	-0.15
	1.5	-0.25	-0.20	-0.21
	2	0.02	0.08	0.01
	2.5	0.04	-0.09	0.03
<b>Inclinée</b>	1	-0.04	-0.17	-0.19
	1.5	-0.13	-0.07	-0.12
	2	0.29	0.29	0.17
	2.5	0.55	0.23	0.81
<b>Horizontale</b>	1	-0.05	0.03	0.02
	1.5	-0.19	0.01	-0.07
	2	-0.11	-0.07	-0.10
	2.5	-0.06	0.07	0.01

## II.5 Conclusion

Le chapitre deux de cette étude s'est concentré sur une expérience en laboratoire visant à examiner les propriétés du sable de Jijel renforcé par des fibres végétales d'Alfa, en utilisant l'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. L'orientation des fibres a été étudiée selon différentes directions : aléatoire, verticale, inclinée et horizontale. Les résultats obtenus fournissent des informations significatives, résumées comme suit :

Premièrement, l'ajout de fibres d'Alfa dans le sable a un effet considérable sur le renforcement de sa résistance au cisaillement. Il est cependant crucial de maintenir une teneur optimale en fibres afin d'éviter des effets néfastes sur la résistance de la combinaison sable/fibre.

Deuxièmement, l'amélioration des propriétés du sable dépend non seulement de la quantité et de la longueur des fibres, mais aussi de leur orientation dans le sol. L'orientation des fibres joue un rôle déterminant dans la détermination de la teneur optimale et de la longueur des fibres, ce qui confère une meilleure résistance au cisaillement.

Troisièmement, l'effet d'orientation des fibres se manifeste par des variations significatives dans le niveau de renforcement des fibres, en fonction de leur teneur et de leur longueur, dans la matrice sable/fibre. Ces variations sont particulièrement prononcées lorsque la teneur en fibres est élevée (environ 1.0 %) dans toutes les directions.

Quatrièmement, l'effet d'orientation des fibres est plus prononcé sous une faible contrainte normale que sous une forte contrainte normale. Cependant, lorsque la longueur des fibres varie, l'effet d'orientation des fibres a peu d'impact sur la contrainte maximale de cisaillement, à l'exception de la direction inclinée. Dans ce cas précis, la contrainte maximale peut augmenter jusqu'à 88 % lorsque la longueur des fibres est de 2.5 cm et la contrainte normale atteint 300 kPa.

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte l'orientation des fibres dans l'amélioration des propriétés du sable renforcé par des fibres d'Alfa. Ils mettent également en évidence la nécessité de respecter une teneur optimale en fibres pour garantir un renforcement efficace sans effets indésirables. Les conclusions de cette étude expérimentale fournissent une base solide pour les futures recherches et les applications pratiques dans le domaine de la géotechnique renforcée par des fibres.

CHAPITRE III  
PREVISION DES  
RESULTATS  
EXPERIMENTAUX

### III.1 Introduction

Ce chapitre aborde l'estimation de la contrainte de cisaillement maximale dans un système de sol renforcé par des fibres d'Alfa en utilisant deux méthodes distinctes. La première méthode est basée sur une solution analytique qui utilise le modèle de Gray et Ohashi de 1983, tandis que la seconde méthode repose sur une méthode basée sur l'IA.

Les modèles existants dans la littérature pour les sols renforcés par des fibres se sont principalement concentrés sur les caractéristiques géométriques des fibres et des sols. Toutefois, peu d'études ont examiné les modèles pour les sols renforcés par des fibres orientées. Ce chapitre se concentre sur l'étude de la résistance au cisaillement du sable sec renforcé par des fibres d'Alfa, en utilisant les résultats d'essais effectués avec une boîte de cisaillement direct.

Le modèle de Gray et Ohashi est utilisé dans ce chapitre pour prédire la contrainte de cisaillement maximale. En outre, une approche spéculative basée sur l'intelligence artificielle est également présentée et expliquée en détail. Le processus de développement de ces deux modèles est présenté en plusieurs étapes dans la section III.4. Les résultats expérimentaux discutés dans le chapitre II sont ensuite comparés aux résultats prédits par le modèle développé et le modèle analytique de Gray et Ohashi dans la section III.5.

### III.2 Les critères de performance des modèles

Plusieurs paramètres sont utilisés pour évaluer la performance des modèles de prédiction en géotechnique. Les critères statistiques couramment utilisés dans la plupart des recherches récentes incluent  $R^2$  (le coefficient de détermination), E (l'erreur moyenne : équation III.01), RMSE (erreur quadratique moyenne : Root Mean Square Error) et MAE (erreur absolue moyenne : Mean Absolute Error) [72, 73, 147-150].

$$E (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\tau_{(expérimentale)} - \tau_{(prédite)}}{\tau_{(expérimentale)}} (\%) \quad (\text{III.01})$$

Avec :  $\tau_{prédite}$ ,  $\tau_{(expérimentale)}$  sont respectivement les valeurs prédites et cibles de la résistance à la cisaille du sol renforcé.

Le coefficient de détermination «  $R^2$  » est un paramètre utilisé en statistiques pour voir de la précision d'une régression linéaire (équation III.02). En terme mathématiquement, il

représente la part de la variation d'une variable dépendante qui peut être expliquée par une ou plusieurs variables indépendantes dans un modèle de régression. Ce coefficient est généralement exprimé sous forme d'une valeur entre 0 et 1 ou en pourcentage, il indique dans quelle mesure la variation d'une variable explique la variation de l'autre variable.

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_1^n (\tau_{prédite} - \tau_{(expérimentale)})^2}{\sum_1^n (\tau_{(expérimentale)} - moy(\tau_{(expérimentale)}))^2} \right] \quad (III.02)$$

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) mesure l'écart moyen au carré entre les valeurs prédites et les valeurs réelles (équation III.03). C'est une mesure courante de précision dans des domaines tels que la finance, l'économétrie et l'ingénierie. En revanche, l'écart absolu moyen (MAE) mesure l'écart moyen entre les valeurs prédites et les valeurs réelles (équation III.04). C'est une mesure courante dans des domaines tels que l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle. Un modèle est considéré comme plus précis si sa RMSE ou son MAE est plus faible. Le choix entre RMSE et MAE dépend des préférences et du contexte d'utilisation de l'utilisateur. Par exemple, RMSE peut être plus approprié pour des erreurs de grande amplitude, tandis que MAE peut être plus appropriée pour des erreurs uniformément réparties.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (\tau_{prédite} - \tau_{(experimental)})^2} \quad (III.03)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\tau_{prédite} - \tau_{(expérimentale)}| \quad (III.04)$$

### III.3 Prédiction de « $\tau_{max}$ » avec l'utilisation du modèle de Gray et Ohashi

La prédiction de la contrainte de cisaillement maximale «  $\tau_{max}$  » a été discutée dans le chapitre I par Gray et Ohashi. Ce modèle nécessite de déterminer deux paramètres essentiels : la contrainte de cisaillement maximale du sol non renforcé «  $\tau_{ur}$  » et l'augmentation de la contrainte par les fibres ajoutées «  $\Delta S$  », le premier paramètre est simplement défini par l'essai de boîte de cisaillement directe et le deuxième est développé dans la recherche de GO avec

l'utilisation des équations I.08 et I.09 pour la direction verticale et la direction inclinée, respectivement.

Selon la recherche menée par Dallel en 2012 [126], la fibre d'Alfa présente une rigidité longitudinale, ou module d'élasticité «  $E_f$  », d'environ 8 GPa. Le diamètre moyen de la fibre d'Alfa utilisée dans notre étude est d'environ 1,0 mm.

La contrainte de glissement d'interaction le long de la fibre peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

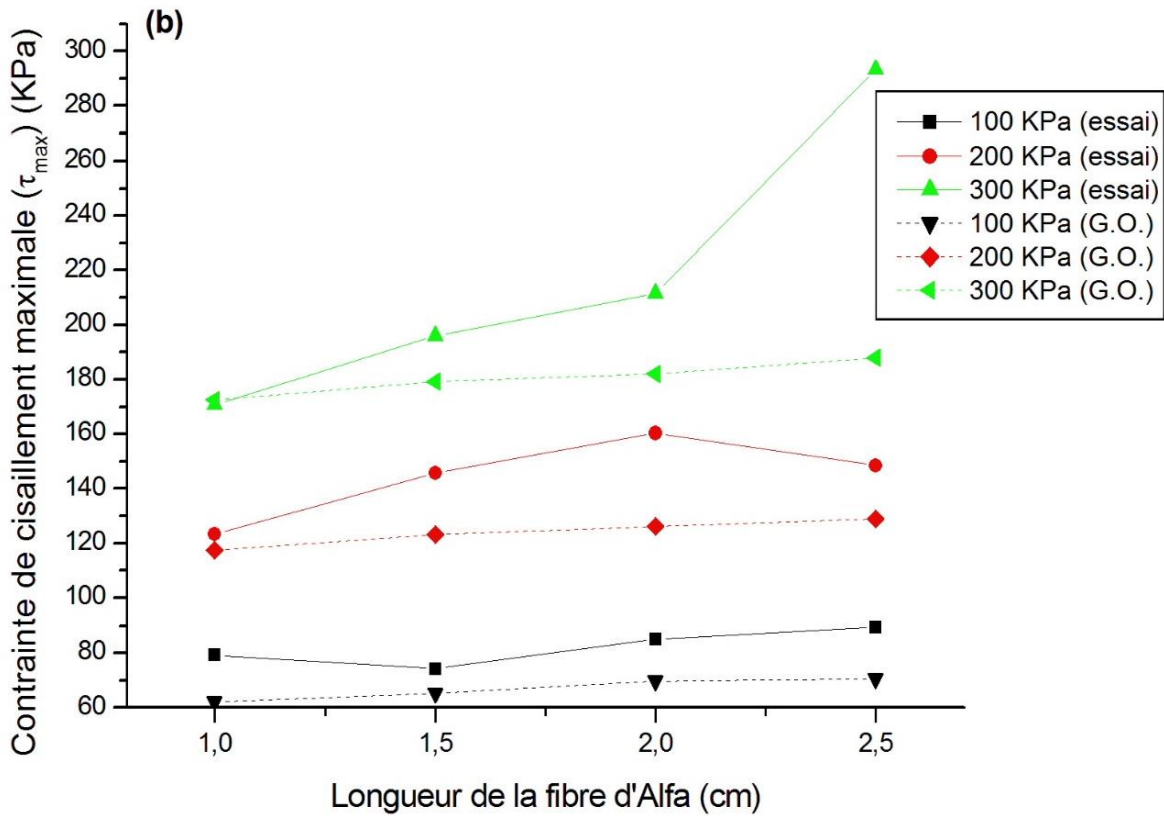
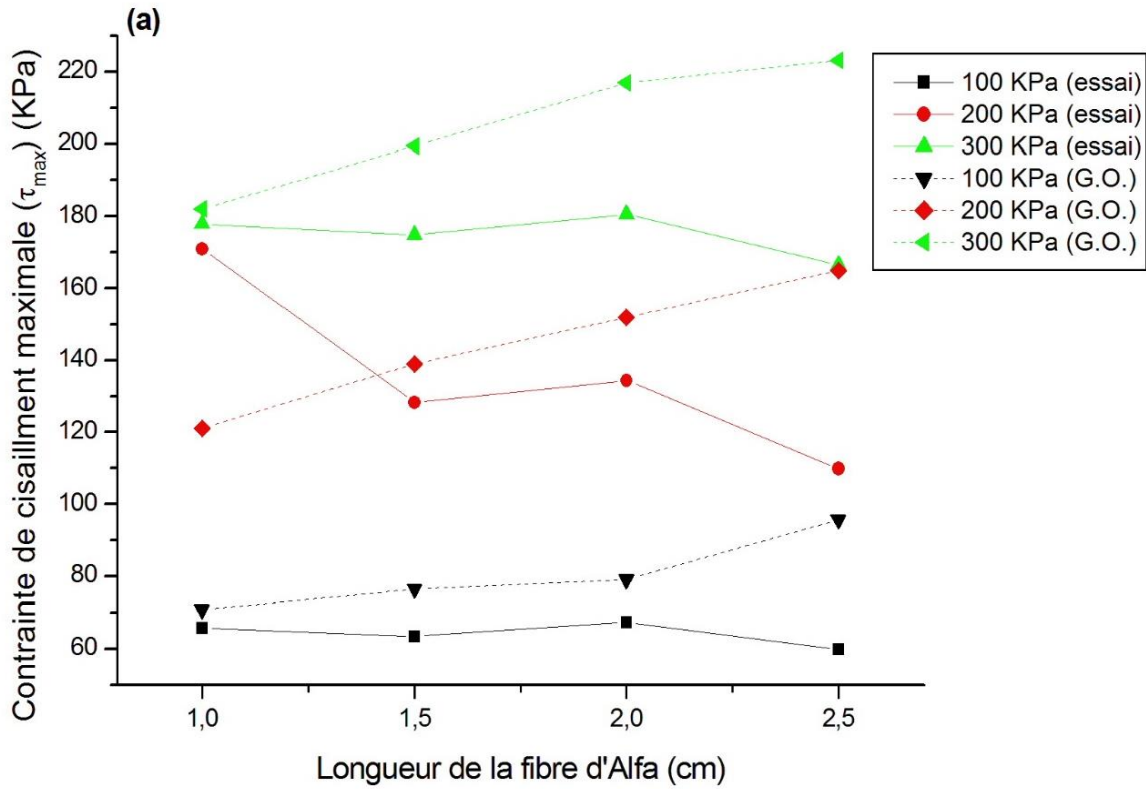
$$\tau_f = k_f \sigma_n \quad (\text{III.05})$$

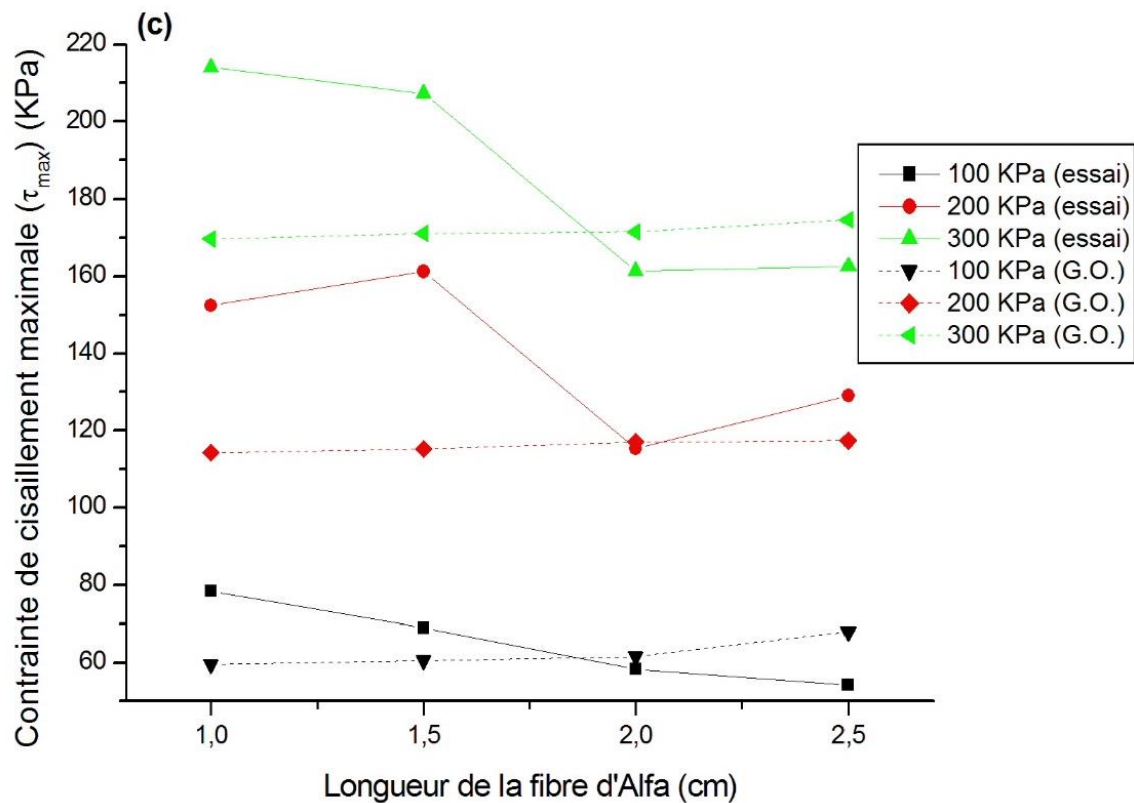
Où : «  $k_f$  » est le facteur de réduction de la résistance au cisaillement de l'interface dû au renforcement.

Selon les recherches de KHELIFI (2017) [129], ce coefficient dépend de l'orientation des fibres, du type de sol et de la contrainte normale appliquée. Dans notre cas, «  $k_f$  » est égal à 0.68, 0.34 et 0.87 pour les directions horizontale, verticale et inclinée, respectivement.

Selon Roscoe (1970) [65], l'épaisseur estimée de la zone de cisaillement, «  $z$  », est de  $l/2$ ,  $\cos i$  ( $l/2$ ) et  $l$  pour les directions verticale, inclinée et horizontale, respectivement. De plus, le déplacement de cisaillement parallèle à la zone de cisaillement, «  $x$  », correspond au déplacement au moment de la rupture.

En utilisant les équations I.08 et I.09, nous avons généré les courbes illustrées dans la Figure III.1. Cette figure montre que le modèle G.O prédit avec précision les résultats expérimentaux dans toutes les directions, surtout pour les contraintes normales de 100 KPa. Nous avons aussi remarqué que le modèle G.O est plus précis dans les directions verticale et inclinée pour les fibres de faible longueur. Toutefois, il est important de noter que la contrainte de cisaillement maximale dans la direction inclinée de 2.5 cm de fibre d'Alfa, sous une contrainte normale de 300 KPa, est sous-estimée par rapport à l'essai. Cette sous-estimation pourrait être due à l'absence de prise en compte de la rupture de la fibre lors des calculs effectués par le modèle. En effet, la rupture de la fibre d'Alfa est clairement observée dans cet échantillon. En outre, contrairement aux attentes, la courbe de contrainte de cisaillement ne présente pas de pic dans ce modèle. La contrainte augmente de manière linéaire avec l'ajout de fibres de différentes longueurs et dans toutes les directions.



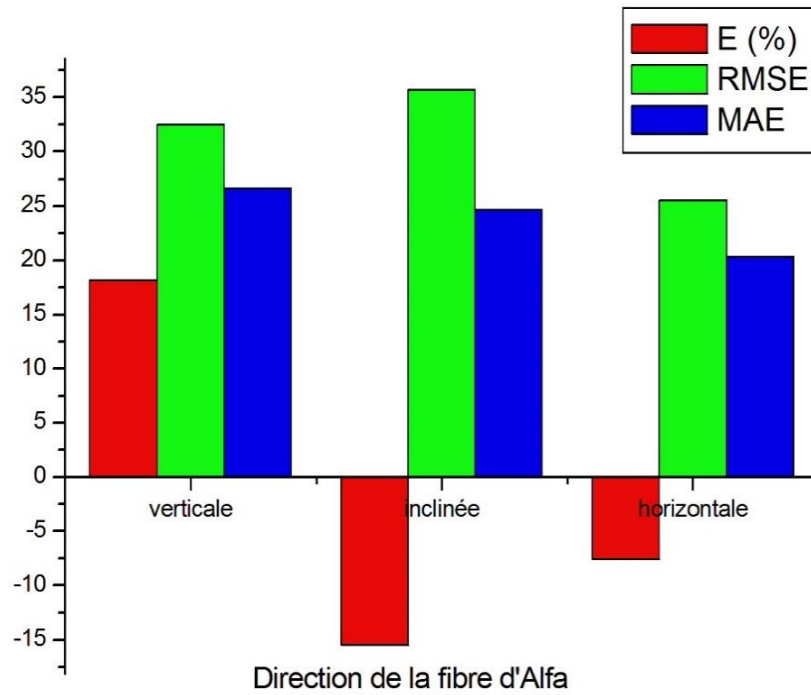


**Fig. III.1:** Comparaison de la valeur de «  $\tau_{max}$  » obtenue par les essais et le modèle de G.O. selon les directions suivantes : (a) verticale, (b) inclinée et (c) horizontale (différentes longueurs des fibres).

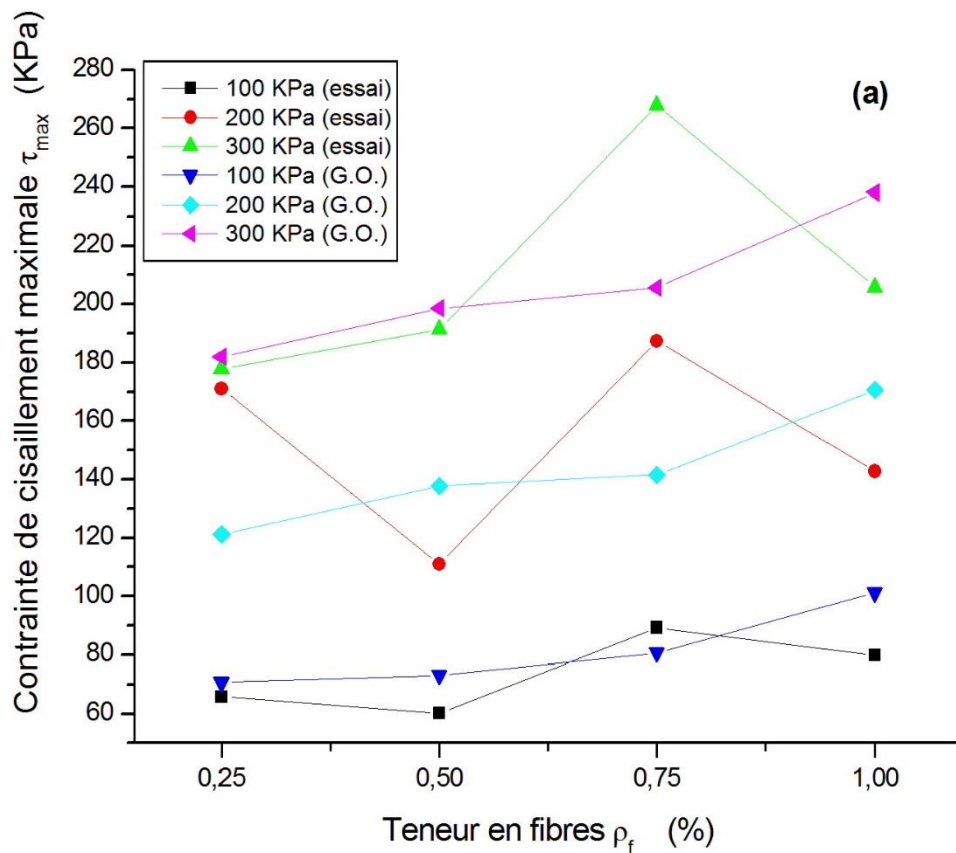
La figure III.2 illustre les coefficients de performance du modèle de Gray et Ohashi (1983) pour estimer la valeur maximale de la contrainte de cisaillement dans différentes directions étudiées. Les résultats démontrent une erreur moyenne acceptable, n'excédant pas les 20%. Cependant, les coefficients RMSE et MAE sont élevés, ce qui peut être attribué à des erreurs de prédiction dans certains cas, tels que les fibres de 2.5 cm inclinées et soumises à des contraintes normales de 300 kPa.

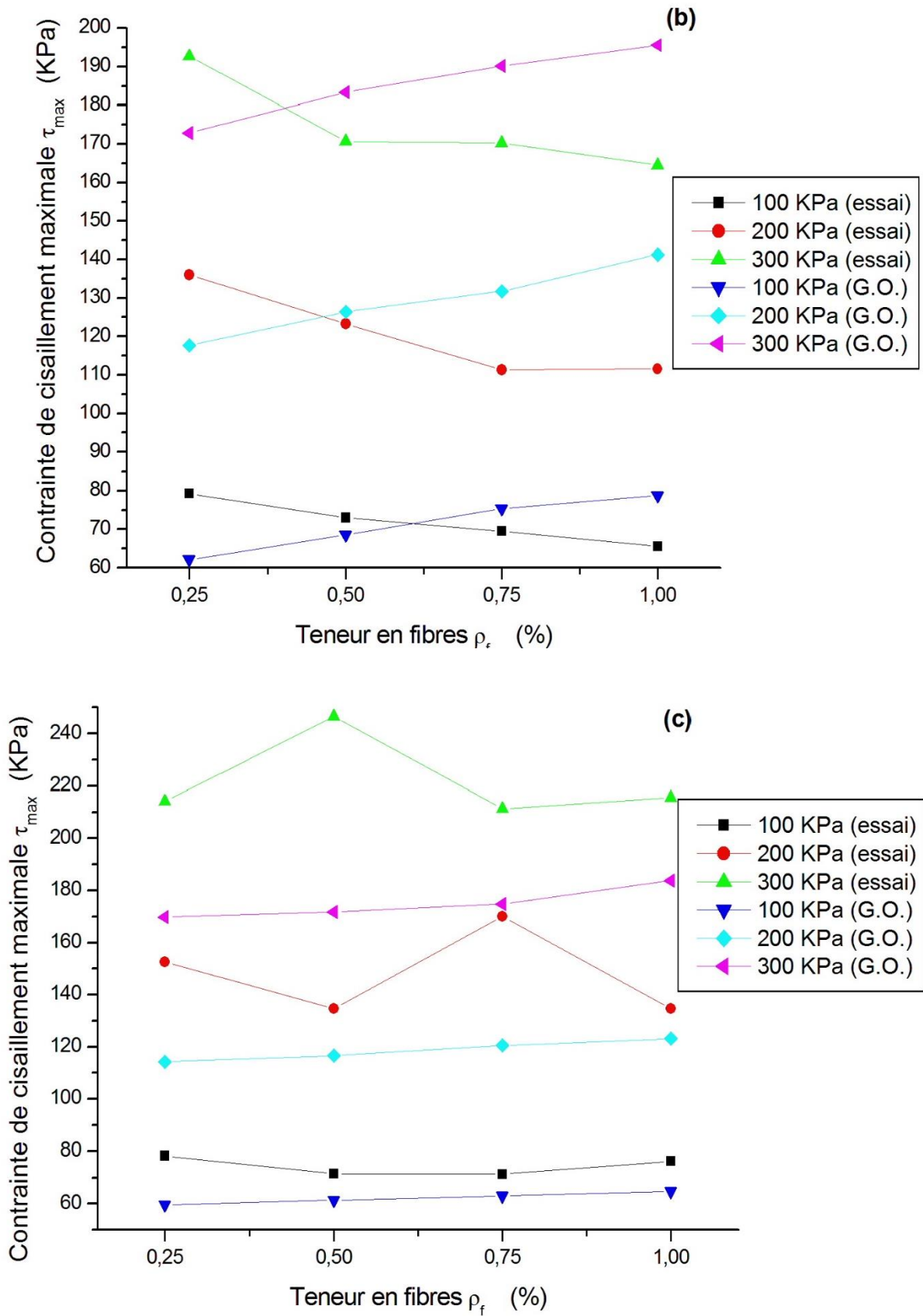
En outre, il convient de noter que la performance dans la direction horizontale est supérieure à celle des autres directions. Cette différence peut être attribuée à la méthode de placement des fibres ou à la méthode générale d'exécution de ces essais.

La figure III.3 présente une comparaison entre les valeurs prédites par le modèle G.O. et les résultats expérimentaux de la contrainte maximale de cisaillement «  $\tau_{max}$  », en fonction de la variation du pourcentage de fibres. Nous avons constaté que les prédictions du modèle G.O. sont assez proches de la réalité, surtout pour les faibles valeurs de la contrainte normale. Par ailleurs, la figure III.4 met en évidence une meilleure performance dans la direction verticale, avec une petite valeur d'erreur moyenne par rapport aux autres directions.

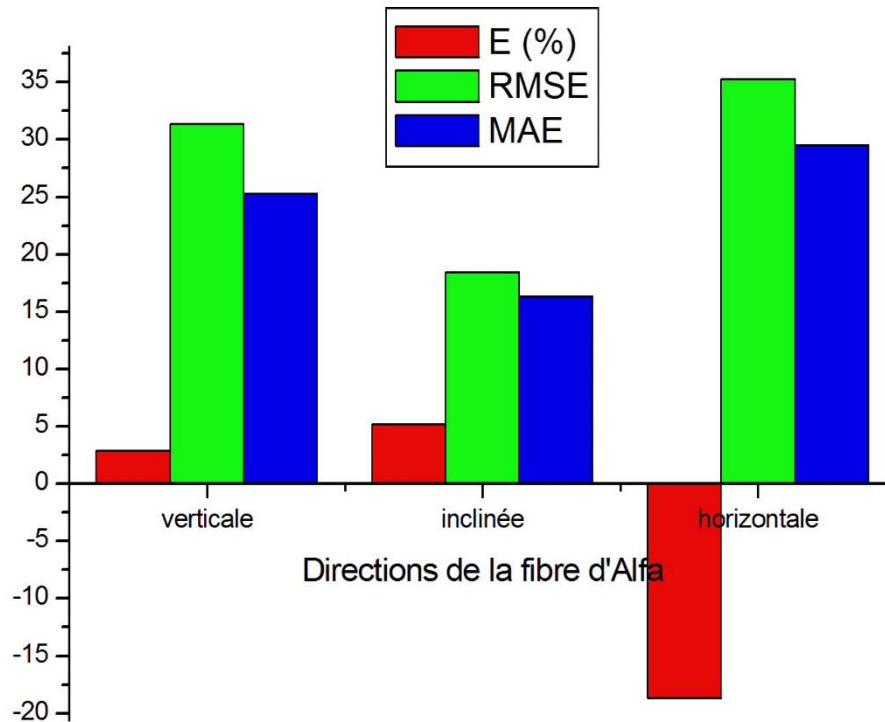


**Fig. III.2:** Les différents coefficients de performance pour la prédiction de «  $\tau_{max}$  » avec l'utilisation du modèle G.O (différentes longueurs des fibres).





**Fig. III.3:** Comparaison de la valeur «  $\tau_{max}$  » obtenue par les essais et le modèle de G.O. selon les directions : (a) verticale, (b) inclinée et (c) horizontale (différentes teneurs en fibres).



**Fig. III.4:** Les différents coefficients de performance pour la prédiction de «  $\tau_{max}$  » avec l'utilisation du modèle G.O (différentes teneurs en fibres).

### III.4 Prédiction de « $\tau_{max}$ » à l'aide de réseaux de neurones artificiels

#### III.4.1 Introduction

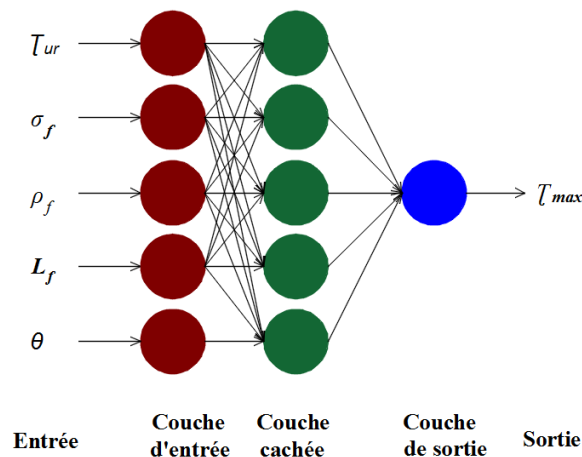
De nos jours, les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont de plus en plus utilisés pour résoudre des problèmes complexes. Cependant, pour obtenir de bons résultats avec ces modèles, il est essentiel de bien comprendre comment les paramètres influencent leurs performances. C'est pourquoi de nombreuses recherches ont été menées pour étudier l'effet des différents paramètres, notamment la fonction d'activation, sur la performance du modèle de RNA afin d'assurer une bonne généralisation [151, 152]. Dans notre étude, nous avons utilisé la technique de croissance [153], qui consiste à commencer par une construction simple et à ajouter des neurones et des couches cachées jusqu'à ce que les performances soient satisfaisantes. Nous avons ainsi exécuté un grand nombre de simulations pour déterminer la meilleure performance de modèle de RNA. Nous avons entraîné diverses structures de RNA avec différents ensembles de fonctions d'activation, de nombre de couches cachées et de nombre de neurones à la couche cachée. Pour l'algorithme d'apprentissage, nous avons utilisé la back-propagation de

Levenberg-Marquardt (LM), qui est le plus couramment utilisé pour l'apprentissage supervisé [154].

Cependant, l'utilisation d'un nombre insuffisant de neurones peut mener à un sous-apprentissage ou à un traitement de données inadéquat dans un ensemble de données complexe. À l'inverse, l'utilisation d'un grand nombre de neurones peut allonger le temps d'entraînement, compliquant ainsi la formation en temps voulu. Un sur-apprentissage peut survenir s'il y a trop de neurones, créant ainsi une surabondance d'informations pour le réseau ou si l'ensemble de données d'entraînement ne contient pas les données appropriées [155]. Par conséquent, l'utilisation de la technique d'investigation est la meilleure méthode pour déterminer le nombre optimal de neurones.

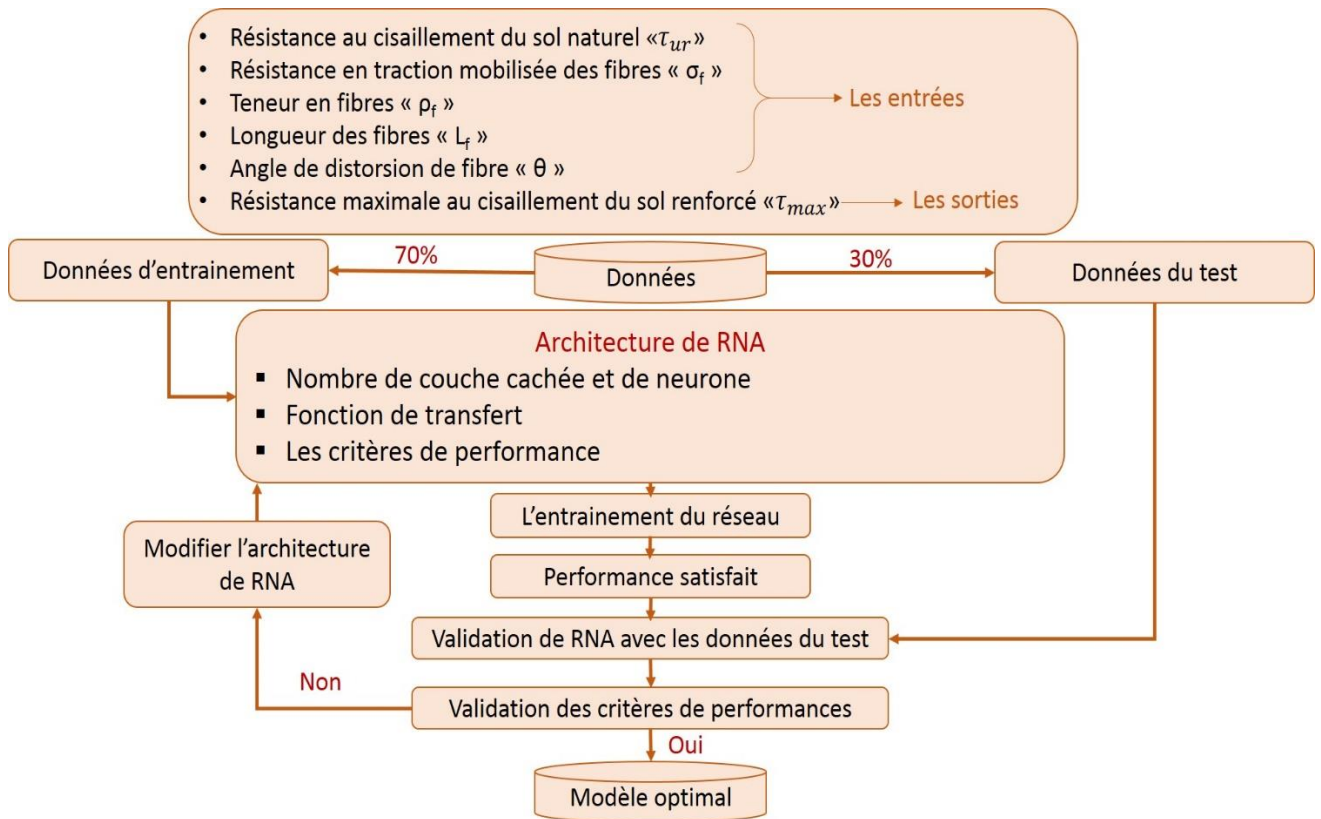
### III.4.2 L'architecture du réseau de neurone

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé une base de données issue de nos précédentes expériences pour créer un modèle de réseau neuronal. Cette base de données se compose de 75 ensembles de données, dont 70% ont été utilisés pour entraîner le modèle, et les 30% restants ont été réservés à la validation du modèle à l'aide de l'algorithme de calcul de l'erreur de validation. Les paramètres d'entrée du modèle sont la résistance au cisaillement du sol non renforcé «  $\tau_{ur}$  », la résistance en traction mobilisée des fibres «  $\sigma_f$  », la teneur en fibres «  $\rho_f$  », la longueur des fibres «  $L_f$  » et l'angle de distorsion de fibre «  $\theta$  ». Ces paramètres ont été choisis car ils ont été identifiés comme les plus influents sur la résistance au cisaillement du sol renforcé, selon des études expérimentales et théoriques [9, 29, 59, 156]. Enfin, la résistance maximale au cisaillement du sol renforcé est la sortie du modèle, telle qu'illustrée dans la figure ci-dessous.



**Fig. III.5:** La structure de base du modèle RNA proposé.

En termes simples, l'apprentissage consiste à trouver les meilleures pondérations des connexions neuronales pour faire des prévisions précises à partir d'un ensemble de données d'entraînement. Après avoir développé le réseau de neurones, il est nécessaire de tester sa qualité en utilisant des exemples qui n'ont pas été utilisés lors de l'apprentissage. Cette étape est appelée validation et permet d'évaluer la qualité des prévisions du modèle neuronal. Un modèle bien validé doit fournir un taux élevé de prévisions précises sur l'ensemble de validation. Si le réseau de neurones n'a pas de performances satisfaisantes, il faudra soit modifier son architecture, soit changer l'ensemble d'apprentissage. Pour une meilleure compréhension de la conception d'un réseau de neurones (RNA), la figure III.6 présente l'organigramme utilisé dans cette recherche.



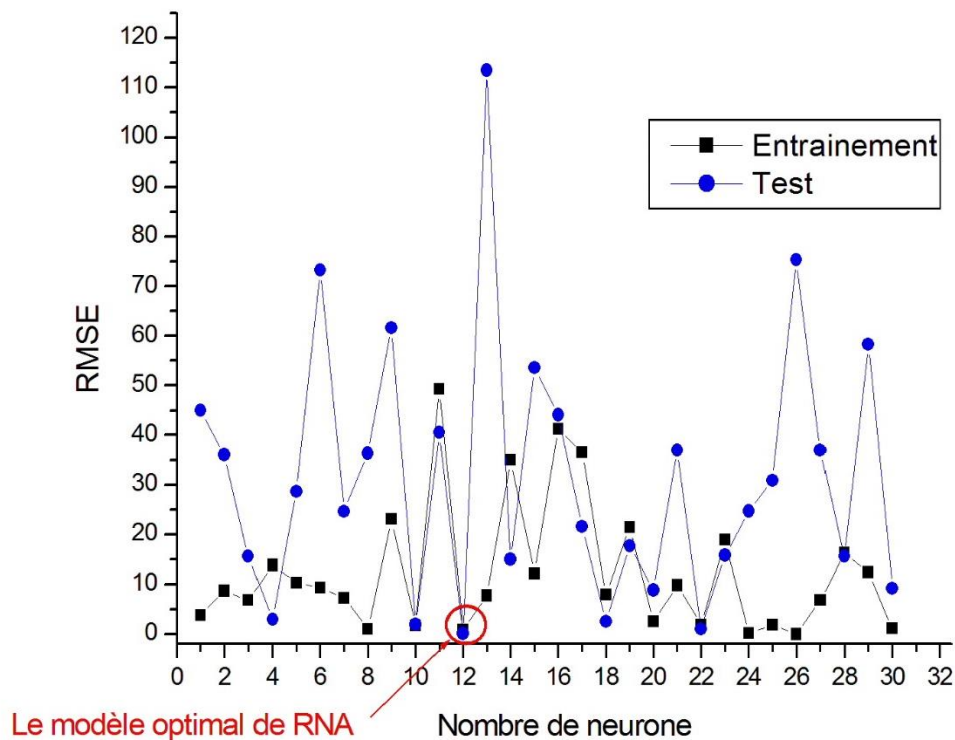
**Fig. III.6:** L'organigramme de conception de RNA utilisé.

### III.4.3 L'application du réseau de neurone

D'abord, pour l'application de RNA nous avons commencé par une couche cachée avec un nombre de neurones égale à 01 en utilisant la fonction de transfert « Sigmoid ». Puis, on a augmenté le nombre de couches cachées à deux, à trois et à quatre en changeant au fur et à mesure le nombre de neurones et la fonction de transfert dans les couches cachées.

Le choix du modèle ANN optimal repose sur des critères de performance tels que RMSE et MAE, qui sont comparés aux valeurs cibles des ensembles d'entraînement et de validation. Si ces critères sont très satisfaisants, cela indique que l'architecture sélectionnée fonctionne bien.

La figure ci-dessous illustre le choix du meilleur modèle ANN indiqué dans le Tableau III.1, en l'occurrence le modèle A2, en utilisant les valeurs de RMSE pour différents nombres de neurones comme exemple de critère de performance.



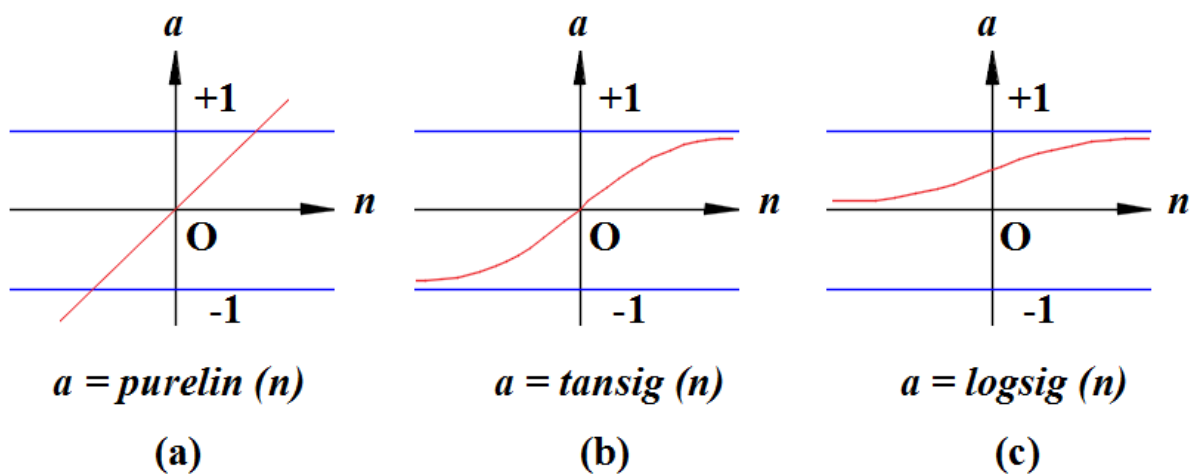
**Fig. III.7:** Choix du modèle RNA optimal (cas du modèle A2).

**Tableau III.1** Différents architectures des modèles de RNA proposés.

N° modèle RNA	Nbr de couche cachée	Nbr de neurones	Fonction de transfert		Le modèle optimale de RNA
			Entrée	Sortie	
A1	1	1 à 30	Sigmoid	Linéaire	24
A2	1	1 à 30	Tangente Hyperbolique	Linéaire	12
A3	1	1 à 30	Linéaire	Linéaire	29
A4	1	1 à 30	Tangente Hyperbolique	Tangente Hyperbolique	2
A5	1	1 à 30	Linéaire	Tangente Hyperbolique	29
A6	1	1 à 30	Sigmoid	Tangente Hyperbolique	30

<b>A7</b>	1	1 à 30	Sigmoid	Sigmoid	25
<b>A8</b>	1	1 à 30	Tangente Hyperbolique	Sigmoid	25
<b>A9</b>	1	1 à 30	Linéaire	Sigmoid	6
<b>A10</b>	2	1 à 30 1 à 30	Tangente Hyperbolique Tangente Hyperbolique	Tangente Hyperbolique	3-19
<b>A11</b>	2	1 à 30 1 à 30	Tangente Hyperbolique Tangente Hyperbolique	Linéaire	4-9
<b>A12</b>	2	1 à 30 1 à 30	Linéaire Linéaire	Linéaire	8-11
<b>A13</b>	2	1 à 30 1 à 30	Linéaire Linéaire	Tangente Hyperbolique	8- 1
<b>A14</b>	3	1 à 30 1 à 30	Linéaire Linéaire	Linéaire	3-9-6
<b>A15</b>	4	1 à 30 1 à 30 1 à 30	Linéaire Linéaire Linéaire	Linéaire	12-10-25- 10

La figure III.8 présente les différents types de fonctions de transfert qui ont été cités dans le tableau III.1. On peut y retrouver "Purelin" qui désigne la fonction linéaire, "logsig" qui désigne la fonction sigmoïde et "tansig" qui désigne la fonction tangente hyperbolique.



**Fig. III.8:** Les différents types des fonctions de transfert

### III.4.4 Résultats et discussion

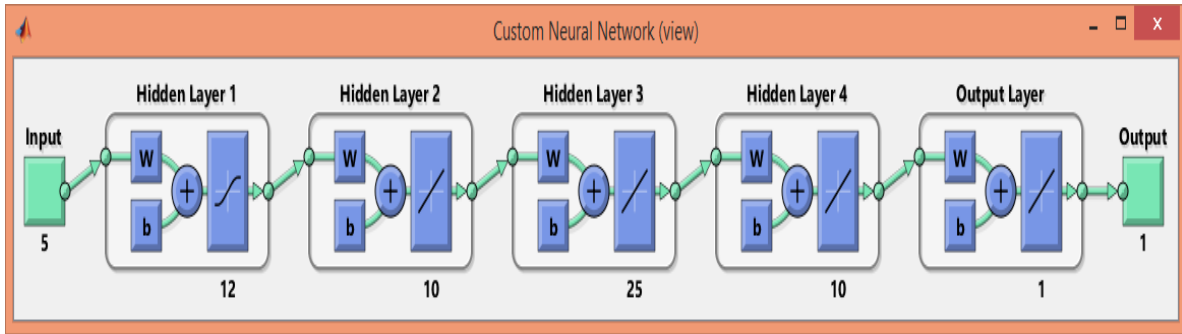
Les résultats de RMSE, MAE et  $R^2$  pour chaque modèle optimal de RNA (de A1 à A15) sont présentés dans la Table III.2 en prenant en compte les données d'entraînement, de validation et l'ensemble des données.

Le modèle A15 est le plus performant avec 57 neurones répartis en 4 couches cachées, comme indiqué dans la Figure III.9. Pour les modèles A1, A2 et A11, bien que l'entraînement ait été efficace, ils ne sont pas capables de généraliser les prédictions de manière précise en dehors des données d'entraînement, en d'autres termes, ils ne peuvent pas prédire avec précision de nouvelles données. En analysant les valeurs de RMSE, MAE et  $R^2$  des modèles A7, A8 et A9, on peut noter que la fonction de transfert "sigmoïde" dans la couche de sortie donne des résultats moins performants que les autres types de fonction de transfert.

Nous avons remarqué lors de l'optimisation du modèle ANN que l'augmentation du nombre de neurones n'a pas de corrélation avec les valeurs RMSE et que ce changement est aléatoire. Cependant, nous avons constaté que l'augmentation du nombre de couches cachées permet de réduire les valeurs RMSE jusqu'à ce qu'elles soient presque égales. Les mêmes résultats ont été obtenus par May, H.V.T., et al. (2021) [157].

**Tableau III.2** Les coefficients de performance pour chaque modèle optimal.

	RMSE Ent.	MAE Ent.	RMSE Val.	MAE Val.	RMSE Glo.	MAE Glo.	E Glo. %	$R^2$ Ent.	$R^2$ Val.	$R^2$ Glo.
<b>A1</b>	0.081	3.080	72.053	21.741	5.382	10.596	-3.664	0.992	0.820	0.886
<b>A2</b>	6.286	11.303	18.713	19.196	0.602	13.715	-0.253	0.938	0.827	0.900
<b>A3</b>	0.013	15.561	3.220	19.006	0.242	16.949	2.235	0.851	0.797	0.832
<b>A4</b>	0.002	33.104	4.506	38.780	0.293	34.839	11.550	0.339	0.262	0.318
<b>A5</b>	9.707	17.560	23.161	20.371	0.555	18.419	4.079	0.827	0.821	0.819
<b>A6</b>	63.194	16.608	24.453	28.551	4.613	20.257	0.287	0.903	0.492	0.757
<b>A7</b>	259.847	51.872	202.907	56.492	38.738	53.284	54.801	0.141	0.115	0.108
<b>A8</b>	321.020	46.351	231.911	53.502	46.635	48.536	58.461	0.554	0.344	0.501
<b>A9</b>	352.123	52.086	125.542	45.105	42.760	50.258	56.758	0.407	0.139	0.297
<b>A10</b>	38.635	25.309	59.366	21.533	7.662	24.155	-3.500	0.634	0.833	0.684
<b>A11</b>	8.993	10.752	23.499	23.085	0.648	14.520	1.090	0.938	0.748	0.879
<b>A12</b>	0.039	13.916	70.602	23.188	4.595	16.749	-0.645	0.894	0.802	0.833
<b>A13</b>	18.476	17.295	17.734	21.041	2.970	18.439	6.193	0.851	0.731	0.817
<b>A14</b>	15.639	18.039	18.039	21.197	16.069	0.155	17.437	0.806	0.892	0.836
<b>A15</b>	6.004	2.080	35.422	14.848	1.714	5.981	-1.601	0.998	0.891	0.960



**Fig. III.9:** L'architecture de meilleur modèle optimal de RNA (A15).

L'équation III.06 est utilisée pour prédire la résistance maximale au cisaillement des sables secs renforcés par la fibre d'Alfa dans différentes directions.

$$\tau_{max\_pr} = purelin.(LW_{i4}.A_i^4 + b_i^5) \quad (III.06)$$

Avec :

$$[A_i^4] = purelin.(LW_{i3}.A_i^3 + b_i^4) \quad (IIIa.06)$$

$$[A_i^3] = purelin.(LW_{i2}.A_i^2 + b_i^3) \quad (IIIb.06)$$

$$[A_i^2] = purelin.(LW_{i1}.A_i^1 + b_i^2) \quad (IIIc.06)$$

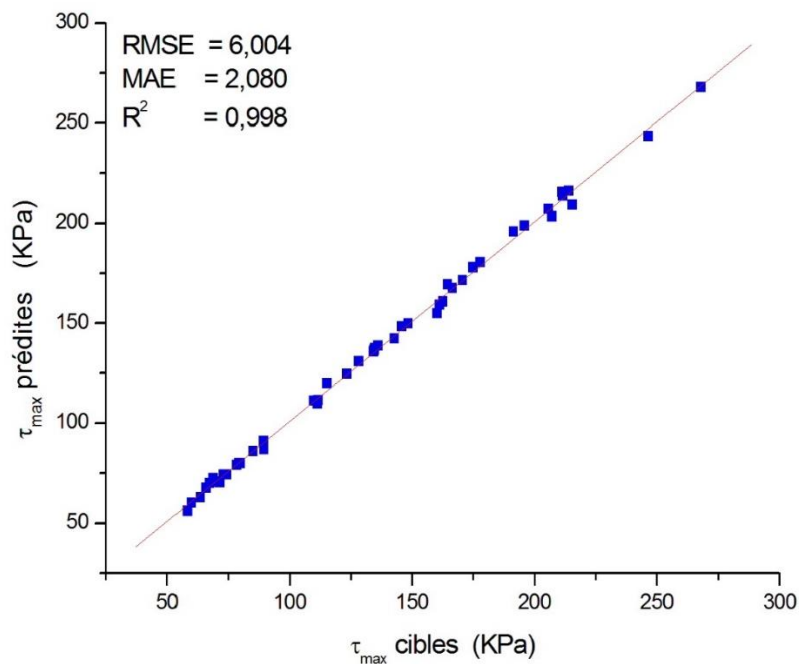
$$[A_i^1] = tansig.(IW_i.p + b_i^1) \quad (III d.06)$$

Où :

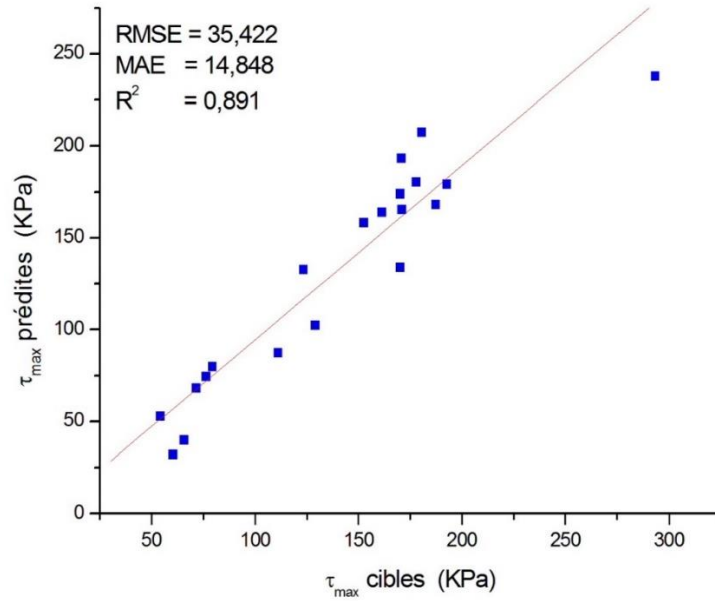
- $p$  : Matrice des entrées ;
- $IW_i.p$  : Matrice de poids représentant la connexion des poids entre les neurones de la couche d'entrée et les neurones de la première couche cachée ;
- $LW_{i1}$  : Matrice de poids représentant la connexion des poids entre les neurones de la première et de la deuxième couche cachée ;
- $LW_{i2}$  : Matrice de poids représentant la connexion des poids entre les neurones de la deuxième et de la troisième couche cachée ;
- $LW_{i3}$  : Matrice de poids représentant la connexion des poids entre les neurones de la troisième et de la quatrième couche cachée ;
- $LW_{i4}$  : Matrice de poids représentant la connexion des poids entre les neurones de la quatrième couche cachée et les neurones de sortie ;

- $b_i^1, b_i^2, b_i^3, b_i^4$  et  $b_i^5$  : sont les vecteurs de biais respectifs des neurones de la première, deuxième, troisième et quatrième couche cachée, ainsi que le vecteur de biais de la couche de sortie ;
- $purelin(x) = x$  ;
- $Tansig(n) = \frac{2}{1+e^{-2n}} - 1$ .

Les figures III.10 et III.11 présentent la corrélation entre les données d'entraînement et de validation pour la résistance maximale au cisaillement cible et prédite des sables secs renforcés avec des fibres d'Alfa dans différentes directions, en utilisant le modèle de réseau neuronal artificiel optimal (A15). Les valeurs de RMSE (6,004), MAE (2,080) et  $R^2$  (0,998) indiquent une forte proximité entre les valeurs cibles et prédites pour l'ensemble de données d'entraînement. Les valeurs de RMSE (35,422), MAE (14,848) et  $R^2$  (0,891) pour l'ensemble de données de validation confirment que le modèle de réseau neuronal artificiel proposé dans cette étude est la méthode la plus fiable et performante.

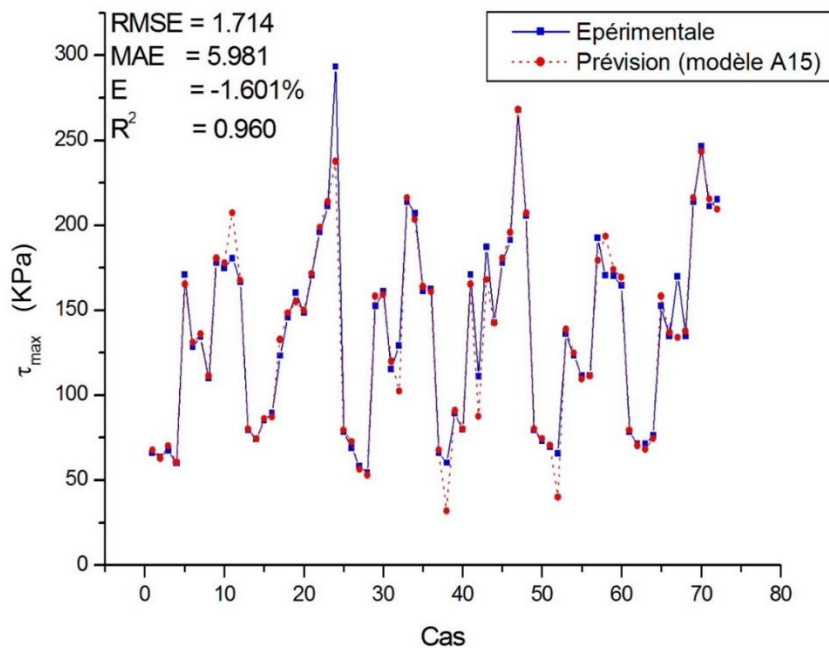


**Fig. III.10:** La corrélation entre les données d'entraînement pour  $\tau_{\max}$  cible et prédite (A15).



**Fig. III.11:** La corrélation entre les données de validation pour  $\tau_{\max}$  cible et prédite (A15).

Étant donné que la résistance au cisaillement varie d'un exemple à l'autre dans l'ensemble de données, nous avons créé un graphique dans lequel nous avons comparé la résistance au cisaillement maximale mesurée avec celle estimée pour chaque cas. La figure III.12 montre que, globalement, les valeurs prédites obtenues à partir de la fonction approximative développée dans cette étude concordent bien avec les valeurs mesurées du modèle expérimental, comme en témoignent les faibles valeurs de RMSE (=1,714) et MAE (=5,981), ainsi que la faible erreur moyenne ( $E=-1,601\%$ ) et les valeurs élevées de  $R^2$  (=0,960 proche à l'unité).

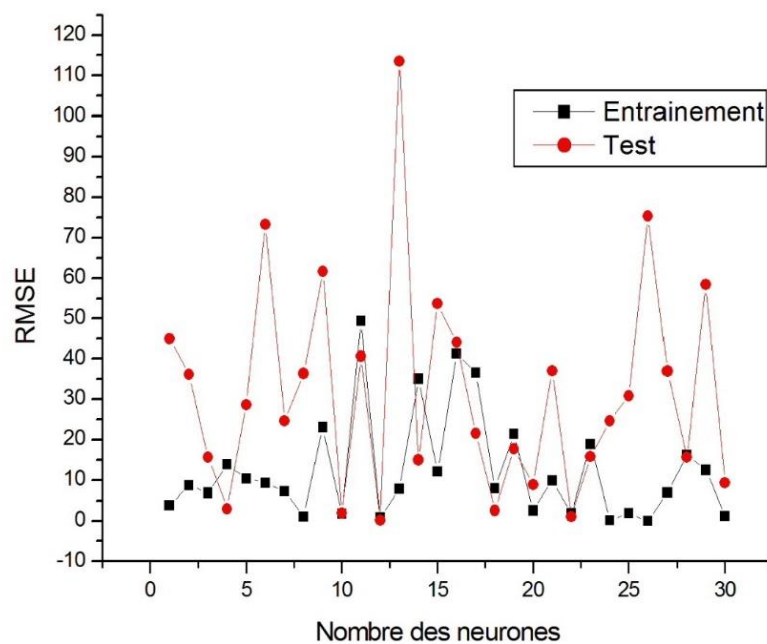


**Fig. III.12:** La comparaison entre toutes les données pour  $\tau_{\max}$  cible et prédite (A15).

### III.5 Etude paramétrique de la performance du modèle de RNA

#### III.5.1 Effet des nombres de neurone

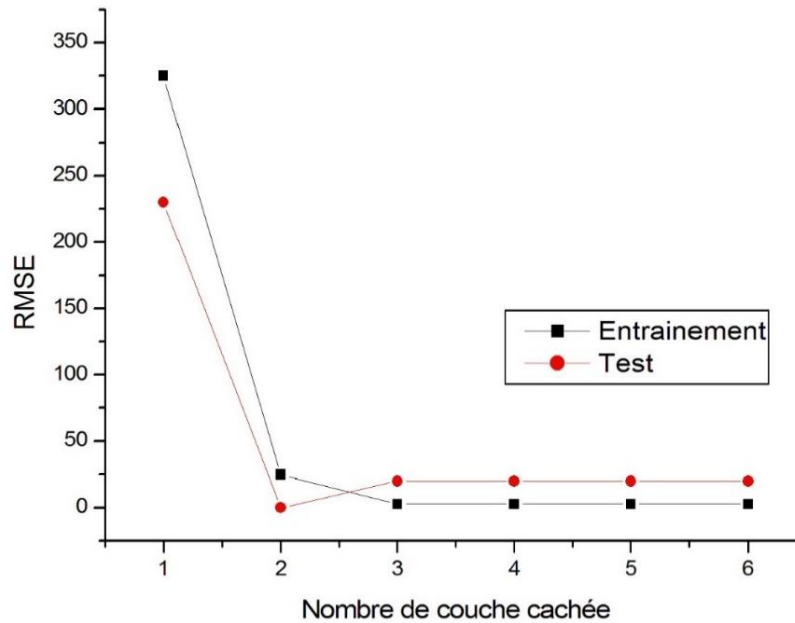
Dans le cas de changement du nombre de neurones dans la couche cachée, nous avons pris comme exemple le modèle A2 (Tableau III.1). La figure III.13 a présente différentes valeurs de RMSE pendant l'entraînement et le test de ce modèle. Nous avons constaté que l'augmentation du nombre de neurones n'a pas de relation avec les valeurs de RMSE, donc ce changement est arbitraire.



**Fig. III.13:** Valeurs de RMSE pour différents nombres neurones.

#### III.5.2 Effet de nombre de couche cachée

Nous avons changé le nombre de couches cachées, on prend l'exemple A15 (Tableau III.1), la figure III.14 montre que l'augmentation du nombre de couches cachées diminue les valeurs d'entraînement et de test de RMSE jusqu'à ce qu'elles aient presque les mêmes valeurs. Mai et al. (2021) ont obtenu les mêmes résultats [157].



**Fig. III.14:** Valeurs de RMSE pour différents nombres de couches cachées.

### III.5.3 Effet des paramètres d'entrée

Pour déterminer le type de sol, il est nécessaire d'utiliser le paramètre de résistance au cisaillement naturel du sol «  $\tau_{ur}$  » tandis que pour caractériser le type de renforcement utilisé, on utilise la résistance à la traction mobilisée des fibres «  $\sigma_f$  ». Ces informations sont utilisées comme points de départ pour définir le mélange sol/fibre. Les premières entrées du modèle RNA sont donc constituées de «  $\tau_{ur}$  » et «  $\sigma_f$  ». Les propriétés physiques des fibres sont ensuite ajoutées une par une, à savoir la teneur en fibres «  $\rho_f$  », la longueur de fibres «  $L_f$  » et l'angle de distorsion de cisaillement «  $\theta$  ». Ainsi, sept scénarios d'entrée ont été créés :

- Modèle 1 :  $\tau_{ur}$  et  $\sigma_f$  en entrées ;
- Modèle 2 :  $\tau_{ur}$ ,  $\sigma_f$ , et  $\rho_f$  en entrées ;
- Modèle 3 :  $\tau_{ur}$ ,  $\sigma_f$ , et  $L_f$  en entrées ;
- Modèle 4 :  $\tau_{ur}$ ,  $\sigma_f$ , et  $\theta$  en entrées ;
- Modèle 5 :  $\tau_{ur}$ ,  $\sigma_f$ ,  $\rho_f$ , et  $\theta$  en entrées ;
- Modèle 6 :  $\tau_{ur}$ ,  $\sigma_f$ ,  $L_f$ , et  $\theta$  en entrées ;
- Modèle 7 :  $\tau_{ur}$ ,  $\sigma_f$ ,  $\rho_f$ , et  $L_f$  en entrées.

Le tableau ci-dessous présente les différentes performances (RMSE, MAE,  $R^2$  et E) obtenues par le modèle RNA développé dans cette étude avec plusieurs scénarios d'entrée.

**Tableau III.3** Les coefficients de performance obtenus par différents scénarios.

	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>E %</b>
<b>Modèle 1</b>	4.2287	19.1771	0.804788	2.94303
<b>Modèle 2</b>	5.48762	24.7788	0.715196	5.1462
<b>Modèle 3</b>	4.49209	20.3564	0.80715	8.48181
<b>Modèle 4</b>	1.57089	11.8521	0.878053	-1.85433
<b>Modèle 5</b>	10.032	20.4044	0.770767	-4.32914
<b>Modèle 6</b>	22.7965	29.7921	0.56882	-20.5882
<b>Modèle 7</b>	4.45715	14.495	0.843241	-2.10526
<b>Modèle A15</b>	1.714	5.981	0.960	-1.601

Après avoir évalué les performances des 7 modèles, il apparaît que le  $R^2$  est inférieur à 0.9 et que les autres paramètres sont élevés par rapport à notre modèle étudié « A15 ». Cela suggère que les 5 paramètres étudiés sont essentiels pour prédire avec précision la résistance maximale au cisaillement du sol renforcé.

### III.6 Comparaison entre les deux modèles (GO et RNA)

Le tableau III.3 compare le modèle G.O. et le modèle RNA développé dans cette étude, les différentes mesures de performance (RMSE, MAE,  $R^2$  et erreur relative moyenne) montrent que le modèle RNA optimal permet une estimation plus précise de la résistance maximale au cisaillement du sol renforcé par fibre d'Alfa que le modèle G.O. D'autres études, menées par Raja et al. (2023) et Chou, J. S. et al. (2016) [93, 148], ont également démontré que les modèles RNA ont permis une amélioration générale des mesures de performance pour prédire la résistance au cisaillement dans différents types de sols renforcés par des géosynthétiques ou des fibres synthétiques. Nos résultats sont similaires, mais dans le cas de sols sableux secs renforcés par des fibres naturelles d'Alfa et dans différentes directions.

**Tableau III.4** Comparaison entre le modèle de G.O et RNA développé.

	<b>Modèle de Gray et Ohashi</b>				<b>Modèle de RNA développé</b>			
	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>E (%)</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>E (%)</b>
Verticale	31.93	26.00	0.680	10.53				
Inclinée	28.44	20.50	0.732	-5.10	1.714	5.981	0.960	-1.601
Horizontale	30.81	24.91	0.719	-13.12				

En outre, nous avons remarqué que le modèle G.O requiert deux équations et plusieurs paramètres pour estimer la résistance maximale au cisaillement, alors que notre modèle basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) rend la prédiction plus simple grâce à une seule équation et moins de paramètres à spécifier.

### **III.7 Conclusion**

En conclusion, ce chapitre présente une étude analytique et numérique sur le comportement anisotrope du sable renforcé par des fibres d'Alfa. Deux méthodes ont été utilisées pour estimer le comportement de ces sols : une méthode analytique basée sur le modèle de Gray et Ohashi de 1983 et une approche spéculative basée sur l'intelligence artificielle.

Les résultats expérimentaux ont été comparés avec les résultats prédits par les deux modèles. Le modèle G.O. s'est révélé plus précis dans les directions verticale et inclinée pour les fibres de faible longueur, mais il sous-estime la contrainte de cisaillement maximale dans la direction inclinée avec des fibres d'Alfa de 2.5 cm. En faisant varier la teneur en fibre, le modèle G.O. est plus précis dans la direction verticale et pour les faibles valeurs de contraintes normales.

Le modèle de réseau neuronal (RNA) a également montré des performances satisfaisantes dans l'estimation de la contrainte de cisaillement maximale. Comparé au modèle analytique, ce modèle est probablement plus précis et utilise une seule équation pour estimer la valeur de la contrainte maximale de cisaillement. Le modèle de RNA nécessite la définition de paramètres simples, contrairement au modèle G.O. qui utilise plusieurs paramètres. De plus, le modèle G.O. ne prend pas en compte la rupture des fibres, ce qui conduit à des résultats moins précis, tandis que le RNA prend en compte ce facteur.

La précision du modèle de RNA est étroitement liée aux paramètres d'entrée utilisés pour estimer la contrainte maximale de ces sols. En revanche, la relation entre la performance et le changement du nombre de neurones dans le RNA est arbitraire. Cependant, une augmentation du nombre de couches cachées améliore généralement les performances du modèle de RNA, jusqu'à atteindre une certaine limite où elles se stabilisent.

## CHAPITRE IV

# L'effet d'orientation des fibres SUR LES OUVRAGES GEOTECHNIQUES

## **IV.1 Introduction**

En se basant sur le deuxième chapitre, il a été déterminé que l'effet d'orientation des fibres a une incidence sur les propriétés du sable étudié lorsque le pourcentage de fibres ajoutées atteint environ 1 %. Ce chapitre propose une modélisation d'ouvrages géotechniques qui utilisent un sable renforcé par 1 % de ces fibres, dans le but d'examiner l'influence de l'orientation des fibres sur la stabilité et les performances de ces ouvrages géotechniques. Enfin, une étude paramétrique est réalisée pour approfondir les analyses et les connaissances dans ce domaine.

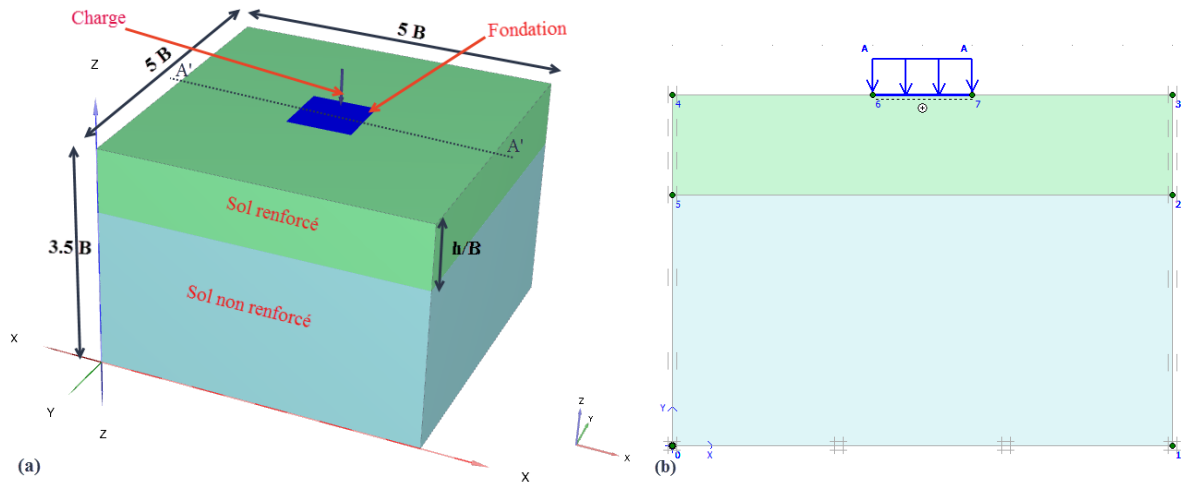
## **IV.2 L'effet d'anisotropie sur une fondation superficielle**

### **IV.2.1. Le modèle numérique**

On a réalisé une étude numérique à l'aide du logiciel PLAXIS pour analyser une semelle carrée de 200 cm reposant sur des couches de sable renforcé par des fibres d'Alfa distribuées de différentes manières. PLAXIS est un outil EF utilisé pour l'analyse de la déformation, de la stabilité et de l'écoulement des eaux souterraines dans les applications d'ingénierie géotechnique. Le modèle a été construit à l'aide d'un maillage d'éléments finis composé d'éléments de sol (triangulaires à 15 nœuds) [158], d'éléments de plaque unidimensionnel (barres à cinq nœuds) et d'éléments d'interface (triangulaires à cinq nœuds par paire) [158]. Les paramètres d'entrée pour la semelle et les sols ont été déterminés et la semelle a été modélisée comme une plaque rigide avec une interface parfaitement rugueuse pour limiter le mouvement relatif à l'interface semelle-sol.

La géométrie du modèle utilisée dans l'analyse EF est présentée dans la figure IV.1 et les paramètres d'entrée sont répertoriés dans le tableau IV.1. La couche de sol a été positionnée à « 5 B » dans les deux directions et la profondeur a été fixée à « 3.5 B » pour éviter les effets de frontière (Boussinesq 1885) [109].

Les paramètres d'entrée pour le sable non renforcé et le sable renforcé par des fibres ont été déterminés dans le chapitre II. Pour la modélisation du sol, le modèle constitutif utilisé dans PLAXIS était le modèle de Mohr-Coulomb linéairement élastique parfaitement plastique suivant la règle d'écoulement non-associative. Cependant, pour la fondation, le modèle élastique linéaire a été utilisé. Les valeurs des paramètres du sol et de la fondation considérés dans cette modélisation sont listées dans les tableaux IV.1 et IV.2, respectivement.



**Fig IV.1:** Modèle géométrique de la fondation modélisée (a) modèle en 3D (b) coupe A'A'.

**Tableau IV.1** Les paramètres des sols.

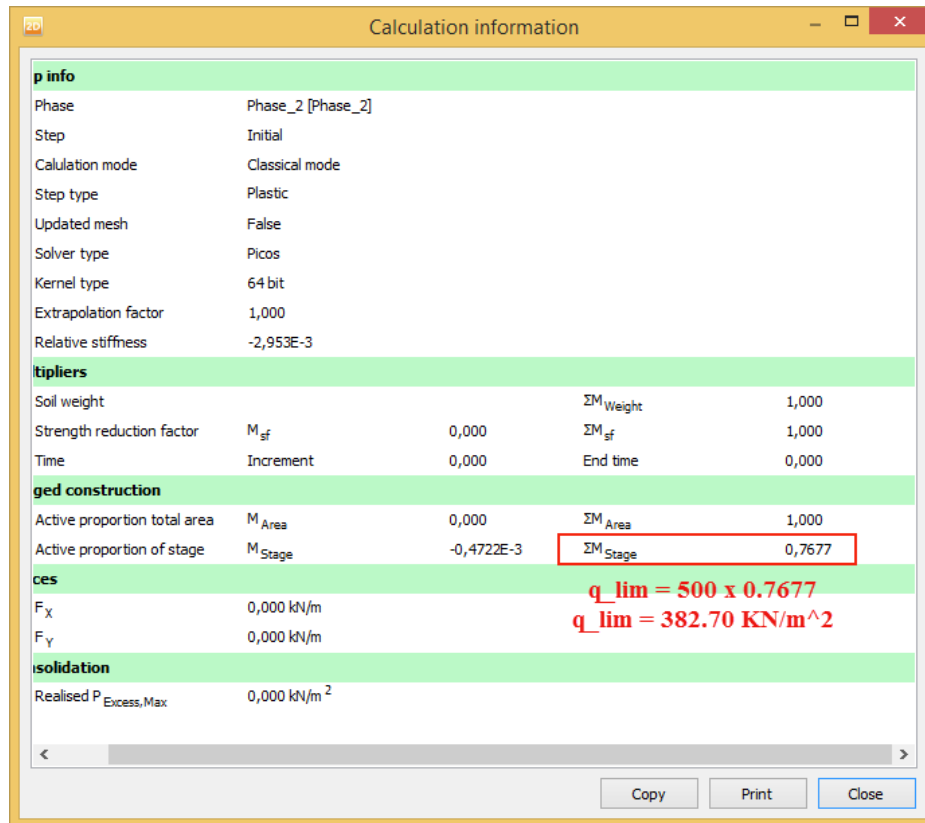
	Unité	Sol non renforcé	Sol renforcé
<b>Epaisseur h/B</b>	-	0	0.5, 0.75, 1.0 et 1.25
<b>Poids volumique sec <math>\gamma'_{unsat}</math></b>	KN/m <sup>3</sup>	19.50	19.50
<b>Poids volumique saturé <math>\gamma'_{sat}</math></b>	KN/m <sup>3</sup>	19.50	19.50
<b>Coeff. de poisson <math>\nu</math></b>	-	0.30	0.30
<b>Module de Young E</b>	KN/m <sup>2</sup>	7000	7000
<b>Cohésion C</b>	KN/m <sup>2</sup>	3.78	1.21 (Aléatoire), 17.04 (Verticale), 7.89 (Inclinée), 5.6 (Horizontale)
<b>Angle de frottement <math>\phi</math></b>	°	28.46	26.79 (Aléatoire), 32.16 (Verticale), 26.32 (Inclinée), 34.84 (Horizontale)
<b>Angle de dilatance <math>\psi</math></b>	°	0	$\phi - 30$ ( $\phi > 30^\circ$ , si non = $0^\circ$ )

**Tableau IV.2** Les paramètres de la fondation.

	Unité	Fondation
<b>B</b>	m	2
<b>Epaisseur</b>	m	0.25
<b>Poids volumique <math>\gamma_{fond}</math></b>	KN/m <sup>3</sup>	24.0
<b>Coeff. de poisson <math>\nu</math></b>	-	0.25
<b>Module de Young E</b>	KN/m <sup>2</sup>	$2.1 \times 10^8$

Pour évaluer la fiabilité de notre modèle, nous avons comparé la pression limite obtenue par la modélisation d'une semelle posée sur un sol non renforcé (Figure IV.2) à la valeur

théorique obtenue par la méthode de Terzaghi (la pression limite par Terzaghi est de  $406 \text{ KN/m}^2$ ). Les résultats ont révélé une similitude remarquable avec une erreur d'environ 8%. Ce niveau de concordance entre les résultats de notre étude et la solution analytique de Terzaghi renforce la fiabilité de notre modèle numérique.



**Fig IV.2:** La pression limite obtenue par PLAXIS.

## IV.2.2. Résultats et discussions

### IV.2.2.1 Pression limite

Les figures IV.3a et IV.3b présentent respectivement les résultats de la pression limite «  $q_{lim}$  » par rapport au sol non renforcé et de l'indice d'amélioration de la pression limite par rapport au sol isotrope (direction aléatoire) «  $I_q$  » (Equation IV.01) de la semelle modélisée. Cette dernière repose sur un sol non renforcé et renforcé par 1.0 % des fibres ajoutées dans différentes directions.

Les résultats montrent une augmentation proportionnelle de la pression limite «  $q_{lim}$  » en fonction de l'épaisseur de la couche renforcée dans les directions horizontale et verticale, tandis que pour les deux autres directions, elle reste presque inchangée (figure IV.3, a). En outre, la pression limite de la semelle renforcée avec une teneur de 1.0 % en fibres est nettement plus élevée dans les directions horizontale et verticale, avec une augmentation allant de 0.95 à 2.85

fois la pression limite du sol non renforcé en fonction de l'épaisseur. Les travaux de Moghaddas Tafreshi et al. (2019) [108] ont montré que les valeurs de pression limite pour l'installation d'une, deux, trois et quatre couches de mélange sol/fibre de caoutchouc étaient environ 1.26, 1.47, 1.52 et 1.54 fois supérieures, respectivement, à celles du sol non renforcé.

En revanche, dans la direction aléatoire, la pression limite est inférieure à celle du sol non renforcé. Toutefois, la direction inclinée présente une pression limite presque similaire à celle du sol non renforcé. Ces résultats sont expliqués dans le chapitre II, où il est indiqué que la performance mécanique de la mixture sol/fibres est réduite au-delà d'une certaine valeur seuil de teneur en fibres dans la direction aléatoire, car les fibres ne sont plus uniformément dispersées dans le sol. Cela peut entraîner la formation de poches d'air et de zones d'interface faibles.

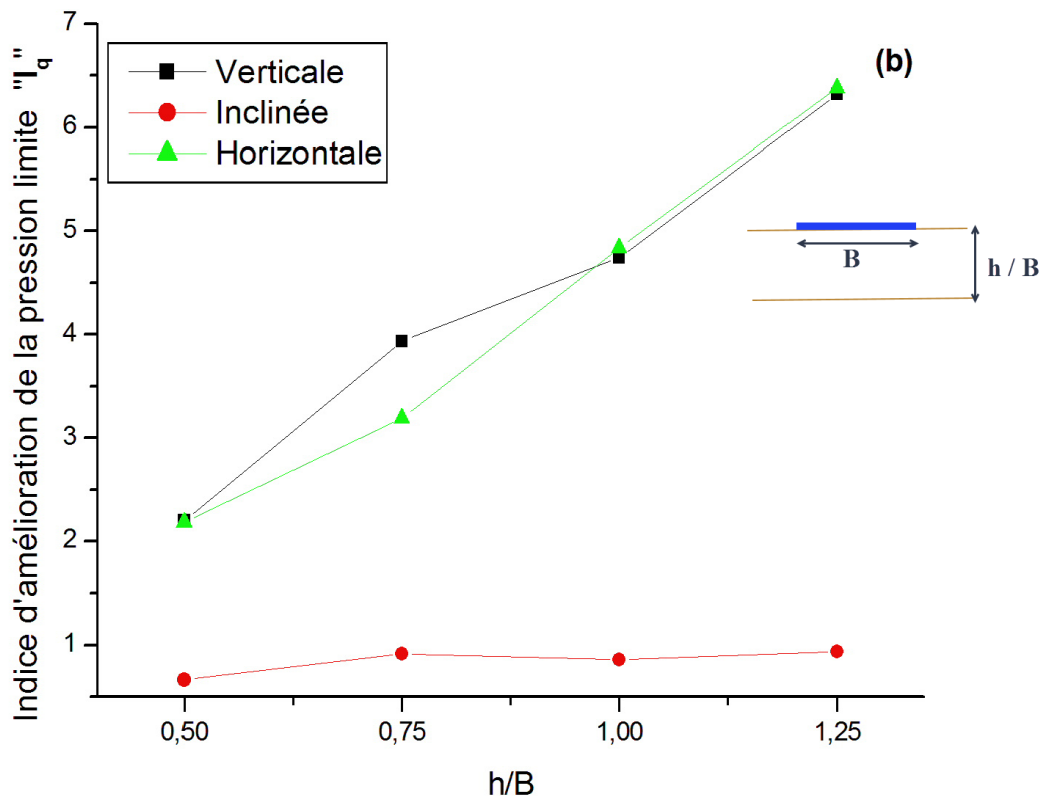
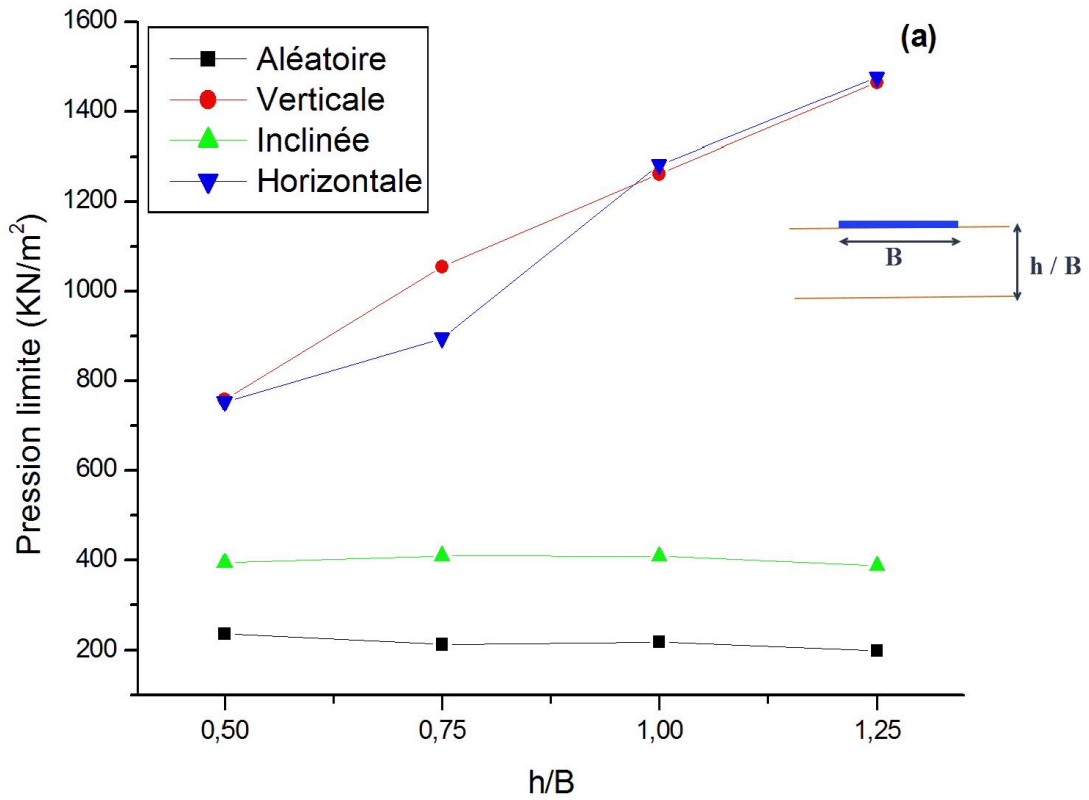
$$I_q = \frac{(q_{lim,ani} - q_{lim,iso})}{q_{lim,iso}} \quad (IV.01)$$

Avec :

- $q_{lim,ani}$ : La pression limite des sols renforcés par ajout des fibres dans la direction verticale, inclinée ou horizontale ;
- $q_{lim,iso}$ : La pression limite des sols renforcés par ajout des fibres dans la direction aléatoire.

La figure IV.3, b met en évidence que l'indice «  $I_q$  » présente une augmentation significative dans les directions horizontale et verticale (augmentation de 2 à 7 fois la pression limite de la direction aléatoire pour les deux directions) et qu'il est proportionnel à l'augmentation de l'épaisseur de la couche de sol renforcée. En revanche, dans la direction inclinée, il augmente avec l'épaisseur mais atteint une valeur presque constante au-delà de 0.75 B. De plus, dans la direction inclinée, l'indice «  $I_q$  » ne dépasse pas l'unité.

Ces observations suggèrent que l'incorporation des fibres d'Alfa dans le sable avec différentes épaisseurs change la pression limite du sable. De plus, la comparaison entre le comportement du sable renforcé par des fibres d'Alfa disposées de manière aléatoire et son comportement dans les autres directions montre des différences significatives.



**Fig IV.3:** Effet d'anisotropie sur semelle carrée en fonction de «  $h/B$  »: (a) Pression limite (b) indice d'amélioration de la pression limite «  $I_q$  ».

Les données numériques ont révélé une forte corrélation ( $R^2 > 0.97$ ) entre les interpolations polynomiales basées sur l'équation IV.02, utilisant les coefficients ( $a_i$ ) du tableau IV.3. Ces équations ont démontré leur précision dans la prédiction de la pression limite de la semelle superficielle reposant sur sol renforcé par des fibres d'Alfa, se situant dans leur plage de validité. Les prédictions ont présenté des erreurs moyennes de 0.08 % dans la direction aléatoire, 0.01 % dans la direction verticale, 0.0005 % dans la direction inclinée et 0.198 % dans la direction horizontale.

$$q_{lim} = a_1 + a_2(h/B) + a_3(h/B)^2 \quad (IV.02)$$

**Tableau IV.3** Les coefficients de l'équation IV.02, utilisés pour tracer les courbes de  $q_{lim} = f(h/B)$ .

$a_i$	Aléatoire	Verticale	Inclinée	Horizontale
$a_1$	254.125	64.8955	307.2625	352.5576
$a_2$	-41.8	1582.358	246.65	654.1056
$a_3$	0.00	-372,92	-145.8	209.472
$R^2$	1.00	0.999	0.997	0.971

#### IV.2.2.2 Les déformations à la rupture

Il convient de considérer un autre facteur important pour décrire le comportement de fondation sur ce type de sol : l'indice de déformabilité « DI », qui a été proposé et défini par plusieurs chercheurs, dont Nasr en 2014 (voir l'équation IV.03) [107]. Cet indice permet de caractériser la ductilité de la couche de sable renforcée par des fibres.

$$DI = \frac{S_{renf}}{S_{non-renf}} \quad (IV.03)$$

On utilise les notations suivantes :

- $S_{renf}$ : pour le tassement de la fondation reposant sur des sols renforcés par ajout de fibres ;
- $S_{non-renf}$ : pour le tassement de la fondation reposant sur des sols non renforcés.

La Figure IV.4,a illustre comment l'indice de déformabilité évolue en fonction de l'épaisseur de la couche de sol renforcée « h ». Les résultats indiquent que la présence d'un pourcentage de 1.0 % de fibres aléatoires dans la couche renforcée diminue sa ductilité par rapport au sol non renforcé. Cette diminution de la ductilité est en corrélation avec la baisse de la pression limite et de la contrainte de cisaillement, due à une teneur élevée en fibres.

Les résultats obtenus pour les autres directions d'ajout de fibres mettent en évidence une ductilité nettement plus élevée dans les directions verticale et horizontale, variant de 2.0 à 3.0 fois celle du sol non renforcé. En revanche, l'ajout de fibres dans la direction inclinée ne semble pas apporter une amélioration significative de la ductilité. Ces résultats sont en accord avec les observations issues des essais antérieurs.

Afin d'étudier l'effet d'orientation des fibres sur le tassement à la rupture de la fondation étudiée, nous avons développé un nouvel indicateur appelé l'indice d'augmentation du déplacement à la rupture «  $I_{Dep}$  ». Cet indice permet de quantifier la variation du déplacement à la rupture entre le sable renforcé par des fibres disposées de manière aléatoire et les autres orientations. La formule exacte de cet indice est détaillée dans l'équation IV.04 :

$$I_{Dep} = \frac{S_{ani} - S_{iso}}{S_{iso}} \quad (IV.04)$$

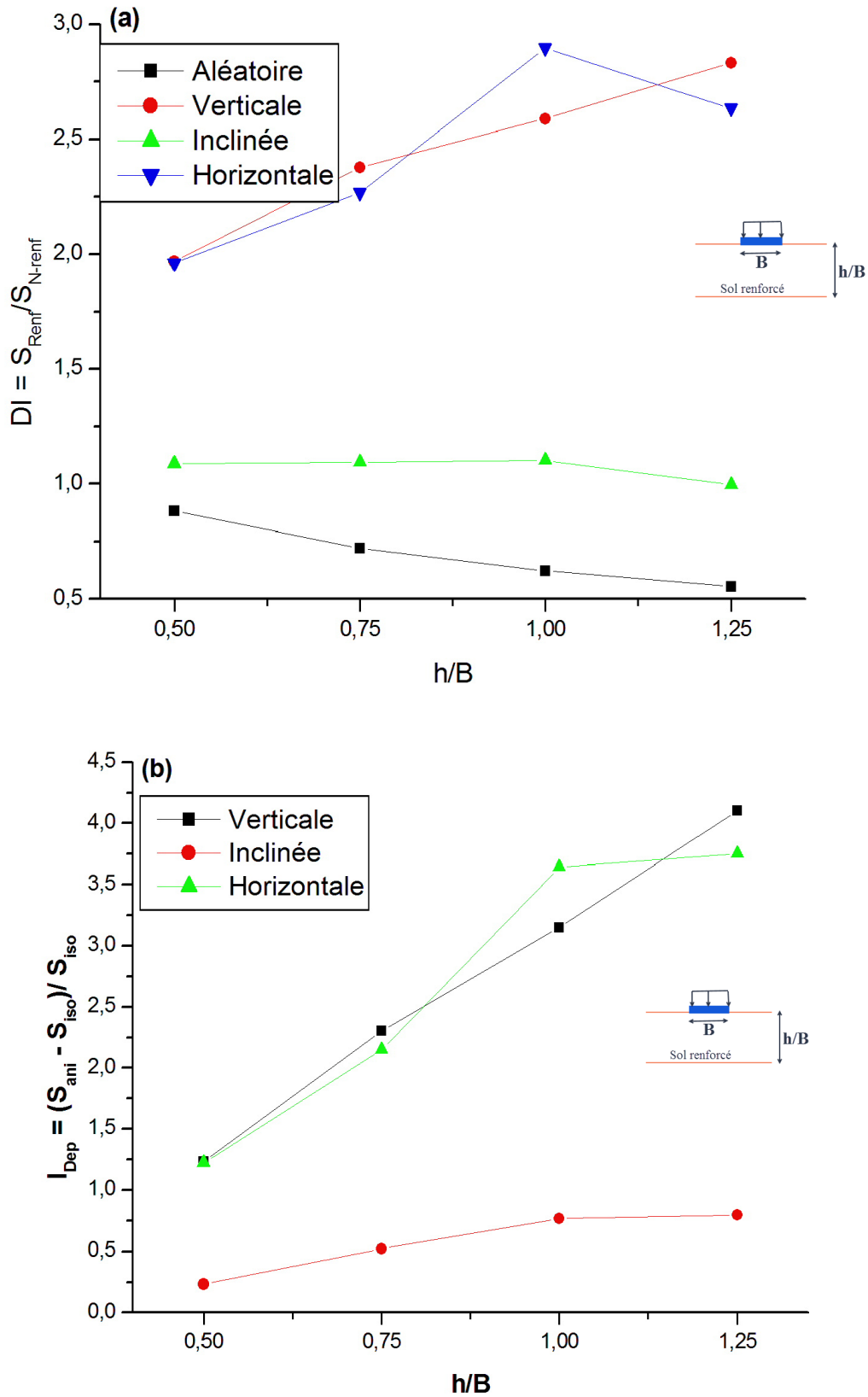
Où :

- $S_{ani}$  : correspond au tassement de la fondation reposant sur des sols renforcés par ajout de fibres dans la direction verticale, inclinée ou horizontale ;
- $S_{iso}$  : correspond au tassement de la fondation reposant sur des sols renforcés par ajout de fibres dans la direction aléatoire.

Les résultats montrent que l'indice d'augmentation de déplacement à la rupture est très élevé dans les directions horizontale et verticale, avec une augmentation allant de 1.25 à 4.25 fois celle de la direction aléatoire (Figure IV.4.b). En revanche, pour la direction inclinée, l'augmentation allant de 0.25 à 1.0 fois le tassement à la rupture de la direction aléatoire.

Les résultats obtenus par PLAXIS concernant l'indice de déformabilité (DI) ont révélé une corrélation significative ( $R^2 = 1$ ) entre les interpolations polynomiales basées sur l'équation IV.05, utilisant les coefficients «  $a_i$  » du tableau IV.4. Ces équations ont démontré leur précision dans la prédiction de la valeur de l'indice « DI » pour la fondation superficielle reposant sur un sol renforcé par 1.0 % des fibres d'Alfa, dans leur plage de validité. Les erreurs moyennes de prédiction étaient très négligeables, inférieures à  $7 \times 10^{-5}$  % pour toutes les directions d'ajout des fibres.

$$DI = a_1 + a_2(h/B) + a_3(h/B)^2 + a_4(h/B)^3 \quad (IV.05)$$



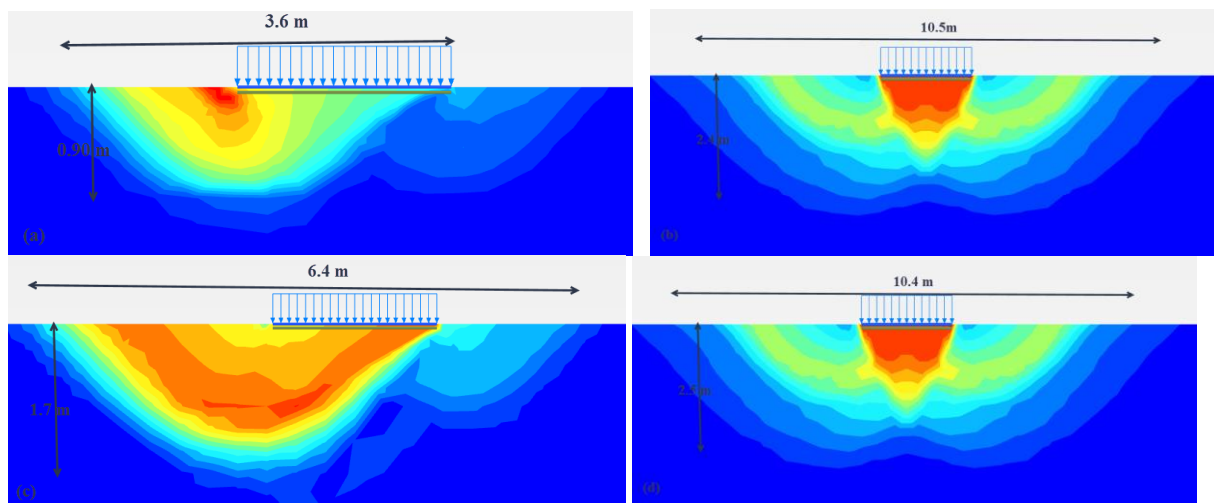
**Fig IV.4:** Le tassement en fonction de « h/B » (a) Indice de déformabilité « DI », (b) Indice de déplacement par rapport à la direction aléatoire « I<sub>Dep</sub> ».

**Tableau IV.4** Les coefficients de l'équation IV.05, utilisés pour tracer les courbes de  $DI = f(h/B)$ .

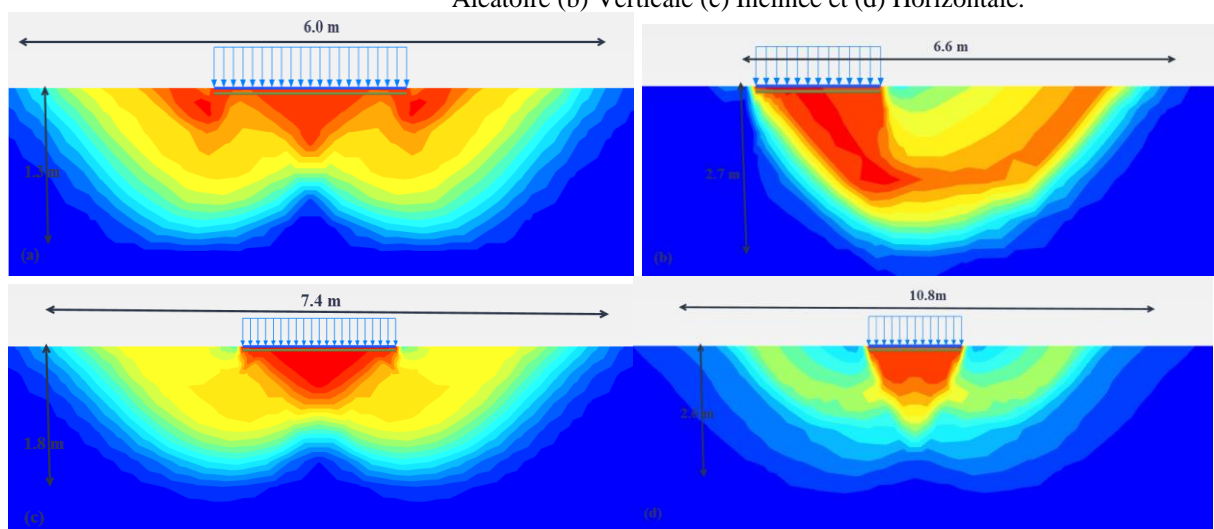
$a_i$	Aléatoire	Verticale	Inclinée	Horizontale
$a_1$	1.54877	-0.37707	1.52363	7.12921
$a_2$	-1.94336	7.64739	-1.9281	-22.8785
$a_3$	1.4178	-7.1453	2.71292	31.52137
$a_4$	-0.39953	2.46422	-1.20664	-12.87615
$R^2$	1.00	1.00	1.00	1.00

### IV.2.2.3 Mécanisme de rupture du sol

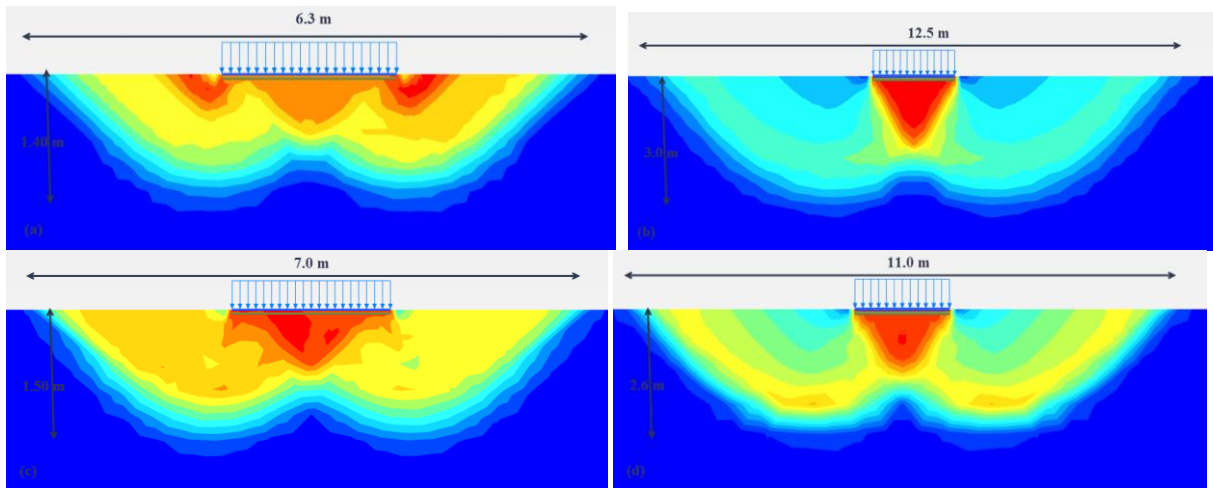
Les illustrations IV.5, IV.6, IV.7 et IV.8 exposent les modes de rupture de sol renforcé avec 1% d'Alfa, sous une semelle superficielle de 2.0 m, dans différentes directions. Les contours de l'incrément de déformation plastique de cisaillement à la rupture obtenus par PLAXIS ont été utilisés [159]. Les mécanismes de rupture varient selon l'orientation d'ajout de l'Alfa et l'épaisseur de la couche de renfort ( $h/B$ ).



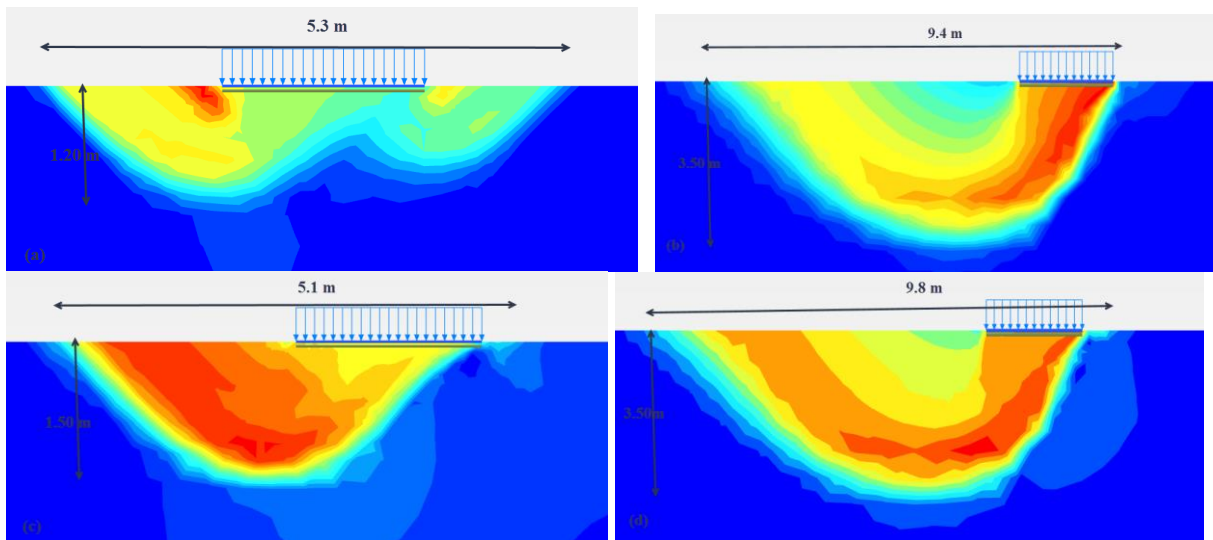
**Fig IV.5:** Mécanisme de rupture du sol renforcé ( $h/B = 0.5$ ) pour les directions : (a) Aléatoire (b) Verticale (c) Inclinée et (d) Horizontale.



**Fig IV.6:** Mécanisme de rupture du sol renforcé ( $h/B = 0.75$ ) pour les directions : (a) Aléatoire (b) Verticale (c) Inclinée et (d) Horizontale.



**Fig IV.7:** Mécanisme de rupture du sol renforcé ( $h/B = 1$ ) pour les directions : (a) Aléatoire (b) Verticale (c) Inclinée et (d) Horizontale.



**Fig IV.8:** Mécanisme de rupture du sol renforcé ( $h/B = 1.25$ ) pour les directions : (a) Aléatoire (b) Verticale (c) Inclinée et (d) Horizontale.

Les résultats obtenus par PLAXIS ont montré que les directions d'ajout horizontale et verticale conduisent à la formation de surfaces de rupture plus étendues que celles obtenues dans les cas d'ajout aléatoire et incliné. Cette observation s'explique par l'augmentation remarquable d'indice «  $I_q$  » dans les directions horizontale et verticale. Dans la plupart des cas, sauf pour les directions où «  $h/B$  » est égal à 0.5 (directions d'ajout aléatoire et incliné), 0.75 (direction d'ajout verticale) et 1.25 (directions d'ajout aléatoire et incliné), le mécanisme de rupture suit la forme de Prandtl de 1920 [159]. Ce mécanisme est symétrique par rapport à l'axe central de la fondation et se caractérise par la formation de trois zones triangulaires, dont une zone centrale élastique sous la fondation et deux autres adjacentes aux deux zones de cisaillement radial.

Les figures IV.5 b, IV.8 b et IV.8 d montrent le mécanisme de rupture unidirectionnel où la fondation et le sol immédiatement en dessous se comportent comme un corps rigide, tandis qu'un mécanisme de rupture bidirectionnel s'observe pour «  $h/B$  » égal à 0.5 (direction inclinée) et 1.25 (directions aléatoire et inclinée). Enfin, pour un «  $h/B$  » de 0.5, un mécanisme de rupture en forme de coin a été observé dans le cas d'ajout aléatoire.

En conclusion, ces observations soulignent l'impératif de considérer l'orientation des fibres lors de la conception de fondations reposant sur un sol renforcé par des fibres afin d'assurer une résistance adéquate à la rupture.

### **IV.3 L'effet d'orientation des fibres sur un rideau de palplanches**

#### **IV.3.1. Le modèle numérique**

Pour cette modélisation, le modèle de Nasr de 2014 [107], déjà cité dans la synthèse bibliographique (voir Figure I.23), a été utilisé comme base. Les dimensions du maillage ont été choisies de manière à garantir que les limites n'affectent pas les résultats calculés [107].

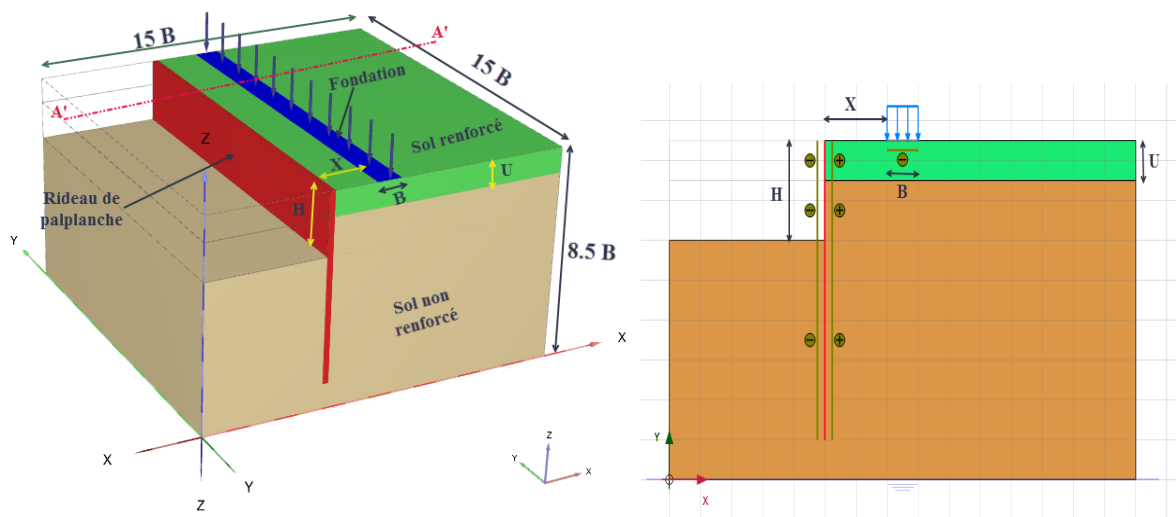
Les critères non linéaires de Mohr-Coulomb ont été choisis pour modéliser le comportement du sable en raison de leur simplicité, de leur importance pratique et de la disponibilité des paramètres nécessaires. Les paramètres utilisés dans la modélisation du sol de Mohr-Coulomb sont présentés dans le tableau IV.1. Les analyses ont été effectuées pour des conditions de drainage sans pression d'eau interstitielle et les calculs de maillage pour les éléments de sol étaient basés sur des éléments triangulaires à 15 nœuds, conformément au manuel PLAXIS [158].

Le rideau de palplanches et la semelle ont été modélisés comme des éléments de plaque ayant un comportement élastique linéaire. Les plaques dans le modèle d'éléments finis 2D sont composées d'éléments de poutre ayant trois degrés de liberté par nœud. Lorsque des éléments de sol à 15 nœuds sont utilisés, chaque élément de poutre est défini par 5 nœuds. Les éléments de poutre sont basés sur la théorie des plaques de Mindlin [160], qui prend en compte les déviations de faisceau dues au cisaillement et à la flexion. Pour la modélisation des plaques élastiques, une rigidité axiale «  $EA$  » et une rigidité en flexion «  $EI$  » doivent être spécifiées comme propriétés du matériau (tableau IV.5).

L'interaction entre le mur de palplanches, la semelle et le sol environnant a été simulée à l'aide d'éléments d'interface situés au contact entre deux éléments. Les éléments d'interface, qui

ont une épaisseur physique nulle, ont été reliés aux éléments du sol par cinq paires de nœuds. La matrice de rigidité des éléments d'interface a été obtenue en utilisant les points d'intégration de Newton-Cotes [158]. Les paramètres d'interface ont été simulés dans PLAXIS en attribuant une valeur appropriée (comme indiqué dans le manuel du programme [158]) pour le facteur de réduction de résistance dans l'interface par rapport aux résistances du sol correspondantes.

Les limites du modèle ont été définies de manière à fixer certaines parties dans les directions X et Y. En conséquence, les lignes verticales ont été bloquées horizontalement ( $\varepsilon_x = 0$ ) tandis que la ligne inférieure horizontale a été bloquée dans les directions horizontale et verticale ( $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.0$ ). La charge uniforme a été appliquée à la semelle (élément de poutre) en utilisant l'option de charge répartie.



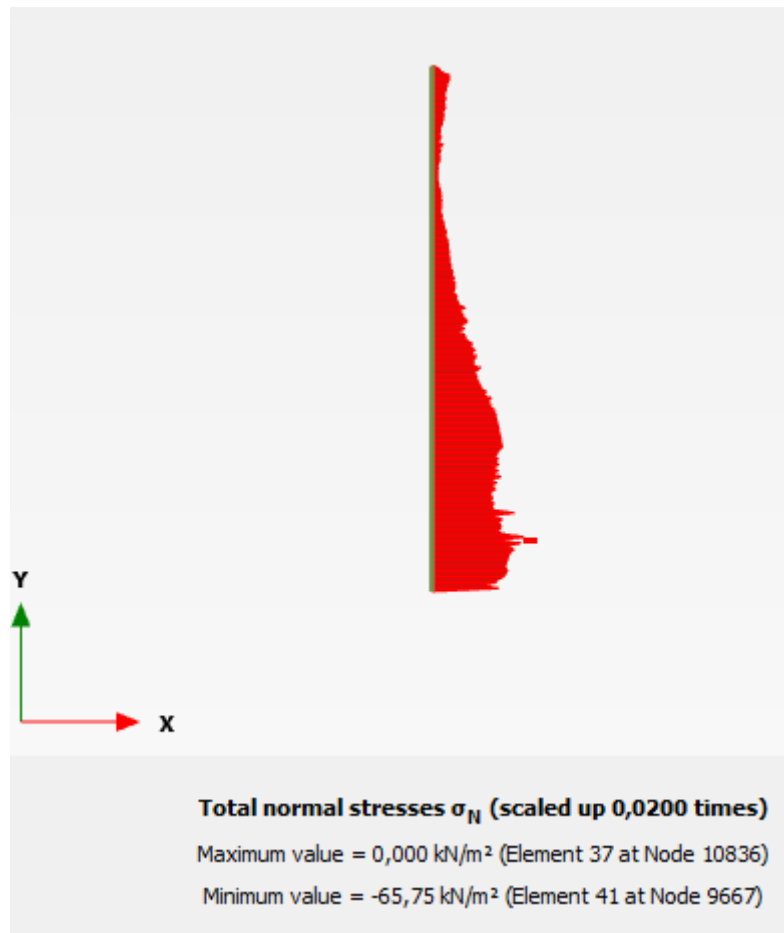
**Fig IV.9:** Modèle géométrique du rideau de palplanche modélisée (a) modèle en 3D (b) coupe A'A'.

**Tableau IV.5** Les paramètres de la fondation.

	Unité	Fondation	Rideau de palplanche
<b>Largeur</b>	m	15.0	15.0
<b>Longueur</b>	m	2.0	7.50
<b>EA</b>	KN	$100.5 \times 10^6$	$21 \times 10^6$
<b>EI</b>	KN/m <sup>2</sup>	$5.234 \times 10^6$	$240 \times 10^3$
<b>Coeff. de poisson <math>\nu</math></b>	-	0.20	0.20

Afin d'évaluer la fiabilité de notre modèle, nous avons comparé la contrainte active exercée sur le rideau de palplanches obtenue par la modélisation de PLAXIS avec la valeur théorique déduite à partir de méthodes analytiques (la contrainte active maximale à une profondeur de

$z = 7.5$  m étant de  $64.97 \text{ KN/m}^2$ ) (Figure IV.10). Les résultats ont montré une similitude remarquable avec une marge d'erreur d'environ 1.0 %. Cette correspondance entre les résultats de notre étude et la solution analytique renforce la crédibilité de notre modèle numérique.



**Fig IV.10:** La contrainte active sur le rideau de palplanche obtenue par PLAXIS (zone d'interface).

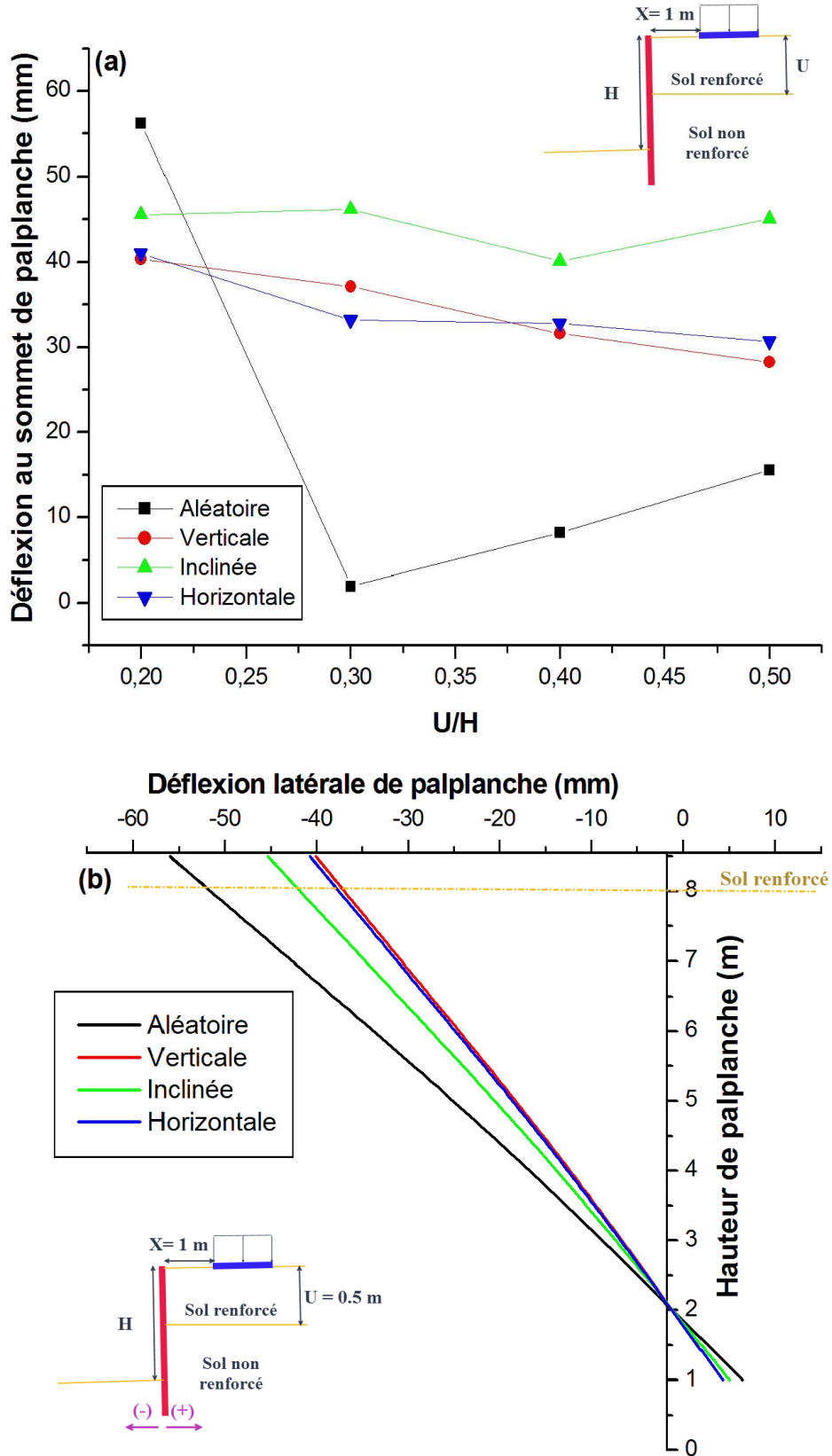
## IV.3.2. Résultats et discussion

### IV.3.2.1. L'effet de l'épaisseur de la couche de sable renforcé

La Figure IV.11, illustre la relation entre la déflexion au sommet du rideau de palplanches, notée «  $D_s$  », et l'épaisseur de la couche de sable renforcé par des fibres, notée «  $U$  », dans le cas où la charge de fondation est constante ( $100 \text{ KPa}$ ) et  $X/H = 0.6$ . Les résultats montrent que la valeur de «  $D_s$  » varie considérablement en fonction de l'épaisseur de la couche renforcée dans toutes les directions, sauf la direction inclinée. Lorsque cette épaisseur augmente, la déflexion diminue pour les directions horizontale et verticale considérées, ce qui peut s'expliquer principalement par l'augmentation de la contrainte de cisaillement du sable renforcé dans ces deux directions. En revanche, pour la direction aléatoire, la valeur de «  $D_s$  » suit une

courbe en U, avec une diminution suivie d'une augmentation. Cette augmentation se produit principalement pour des rapports U/H compris entre 0.3 et 0.5 pour la direction aléatoire. Nous avons observé une rupture du sol sous la fondation à partir de 0.3H, ce qui explique l'augmentation de la déflexion dans cette plage d'épaisseur. En ce qui concerne la direction inclinée, la déflexion reste presque constante pour les différentes épaisseurs de la couche renforcée par des fibres, sauf lorsque l'épaisseur de la couche atteint 0.4H, où le sol a subi une rupture, entraînant ainsi une différence de déflexion observée.

La déviation latérale, ou «  $D_h$  », est la principale cause de défaillance des murs de palplanches. Cependant, l'ajout de renforts en fibres peut améliorer le comportement global d'un rideau de palplanches [161]. Cette section a pour objectif d'évaluer l'impact de l'orientation des fibres sur le rideau de palplanches. Pour ce faire, nous avons mesuré la déviation latérale le long du mur de palplanches, comme illustré à la Figure IV.11,b. Les résultats ont montré que le sommet de la palplanche était la zone la plus touchée par la déformation latérale et que, en raison de l'ancrage du rideau de palplanches dans du sable, une déflexion latérale positive et négative a été observée le long du rideau. Lorsque les fibres étaient disposées verticalement ou horizontalement, la valeur de «  $D_h$  » était presque identique et plus faible que dans le cas d'une orientation aléatoire. Cette réduction était de 28.35 % et 27.24 % respectivement pour les orientations verticales et horizontales au sommet de la palplanche. Dans le cas d'une orientation inclinée, la réduction de «  $D_h$  » par rapport à l'orientation aléatoire était d'environ 18.99 %.



**Fig IV.11:** Variation de la déflexion en fonction de « U/H » : (a) au sommet du rideau de palplanches (b) le long du rideau de palplanches (cas de U/H = 0.2).

### IV.3.2.2. L'effet de l'emplacement de la semelle par rapport au mur de palplanches

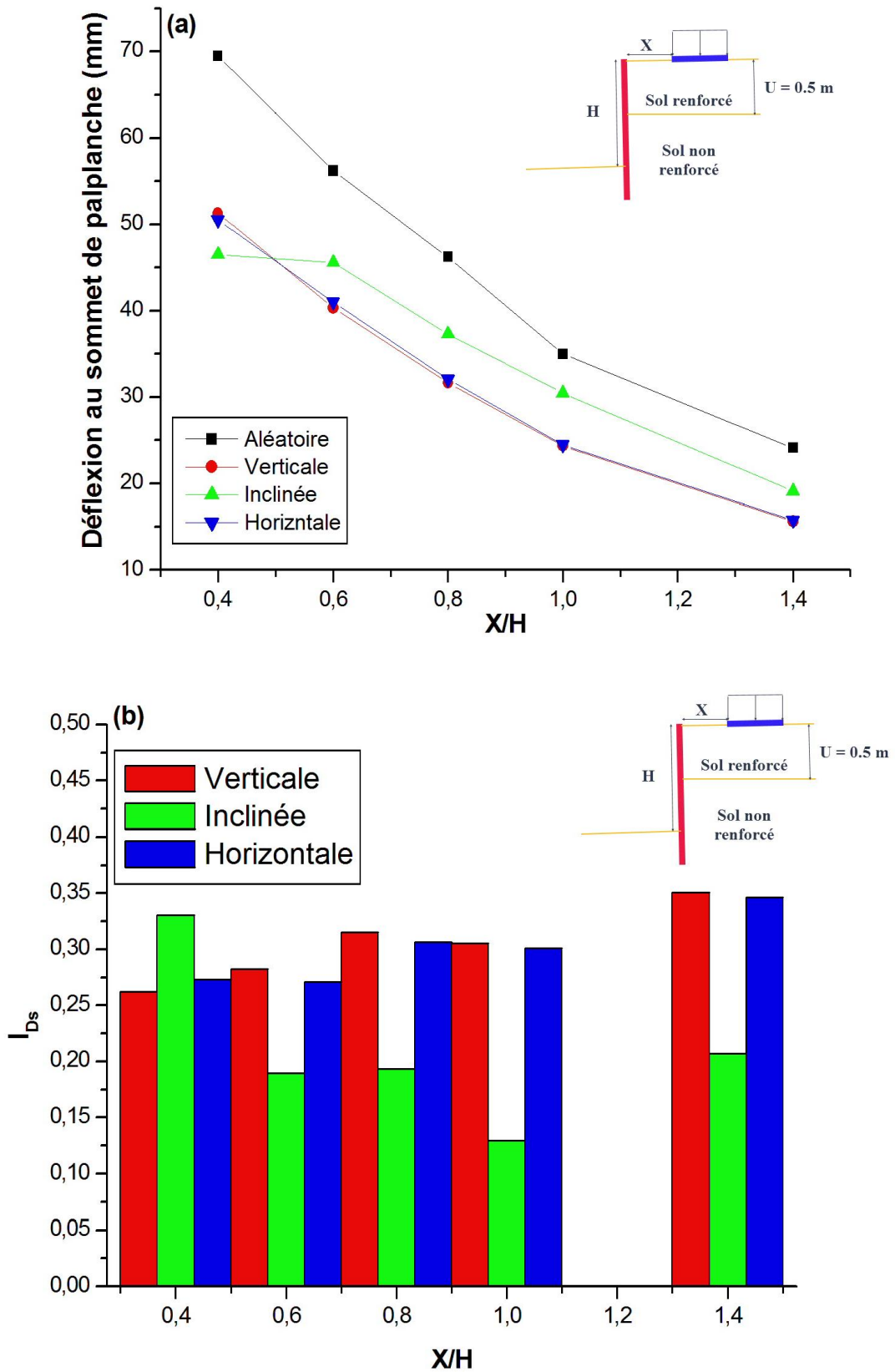
Une série de modélisations a été réalisée afin d'examiner l'impact de l'emplacement d'une semelle filante derrière et parallèlement à un rideau de palplanches dans le cas où  $U/H = 0.2$ . Lorsque des semelles filantes sont supportées par un sol de remblai uniforme et soumises à une charge uniformément répartie, elles subissent un déplacement latéral uniquement lorsque les appuis latéraux ne sont pas équilibrés des deux côtés. Lorsqu'une semelle est située à proximité d'un mur, le soutien latéral fourni par le mur peut être inférieur ou supérieur de chaque côté, en fonction de l'emplacement de la semelle et de la rigidité du mur [107]. La variation de la déflexion au sommet du rideau de palplanches «  $D_s$  » en fonction de différents rapports  $X/H$  est présentée à la Figure IV.12, a. D'après la figure IV.12, a, la valeur de  $D_s$  diminue avec l'augmentation de  $X/H$ , quelle que soit la direction d'ajout des fibres. Cette diminution est particulièrement marquée lorsque le sol est renforcé par des fibres à la fois dans la direction verticale et horizontale. La déflexion au sommet du rideau de palplanches est réduite par rapport au cas aléatoire d'environ 0.26 à 0.35 fois pour les deux directions verticale et horizontale (figure IV.12, b). Cependant, la réduction de la valeur de «  $D_s$  » est de l'ordre de 0.13 à 0.33 fois le cas aléatoire dans la direction inclinée. Par conséquent, il est important de prendre en compte l'effet d'orientation des fibres par des fibres d'Alfa sur la réduction de la déflexion au sommet du rideau de palplanches, ainsi que sur les différents rapports d'emplacement de la fondation ( $X/H$ ).

L'équation IV.06 définit le coefficient  $I_{Ds}$  comme suit :

$$I_{Ds} = \frac{D_{ani} - D_{iso}}{D_{iso}} \quad (IV.06)$$

Où :

- $D_{ani}$  : Déflexion au sommet du rideau de palplanches adjacente au sol renforcé par l'ajout de fibres dans la direction verticale, inclinée ou horizontale ;
- $D_{iso}$  : Déflexion au sommet du rideau de palplanches adjacente au sol renforcé par l'ajout de fibres dans la direction aléatoire.



**Fig IV.12:** Variation de la déflexion en fonction de X/H (a) Déflection au sommet de rideau de palplanche, (b) Indice de diminution de déflexion « I<sub>Ds</sub> » par rapport à la direction aléatoire.

Les données numériques ont montré une forte corrélation ( $R^2 > 0.98$ ) avec les interpolations polynomiales décrites par l'équation IV.07, utilisant les coefficients ( $a_i$ ) du tableau IV.6. Ces équations ont démontré leur capacité à prédire avec précision la déflexion au sommet du rideau de palplanche (dans le cas de  $U/H = 0.2$ ) dans leur plage de validité. Les erreurs moyennes de prédiction étaient de 0.227 % pour la direction aléatoire, 0.001 % pour la direction verticale, 0.050 % pour la direction inclinée et 0.009 % pour la direction horizontale.

$$D_s = a_1 + a_2(X/H) + a_3(X/H)^2 \quad (\text{IV.07})$$

**Tableau IV.6** Les coefficients de l'équation IV.7, utilisés pour tracer les courbes de  $D_s = f(X/H)$  dans la condition  $U/H = 0.2$ .

$a_i$	<b>Aléatoire</b>	<b>Verticale</b>	<b>Inclinée</b>	<b>Horizontale</b>
<b>a1</b>	102.37596	78.29751	56.04832	76.02583
<b>a2</b>	-92.1098	-76.80436	-18.05902	-71.13505
<b>a3</b>	25.81609	22.89341	-6.17323	20.00442
<b>R<sup>2</sup></b>	0.99	0.99	0.98	0.99

## IV.4 l'effet d'orientation des fibres sur un talus

### IV.4.1. Le modèle numérique

Le facteur de sécurité a été évalué en utilisant le logiciel PLAXIS. Afin d'étudier l'impact d'orientation des fibres sur la stabilité d'un talus renforcé avec 1.0 % de fibres d'Alfa orientées dans différentes directions, nous avons pris en compte les paramètres de rigidité du sol renforcé, de résistance au cisaillement et la variation de l'angle de la pente modélisée. Pour discrétiser le matériau du sol, nous avons utilisé le modèle Mohr-Coulomb à déformation simple comprenant 581 éléments. Dans le domaine 2D, les conditions aux limites ont été définies de manière à permettre le déplacement vertical libre sur les faces limites, à l'exception de la base inclinée, qui a été considérée comme immobile. Le maillage a été généré en utilisant la méthode de triangulation, avec une résolution de mailles de taille moyenne.

La figure IV.13 présente une représentation schématique simplifiée du talus, basée sur le modèle de Kumar et al. [162], en montrant sa géométrie, ses dimensions et les conditions aux limites. Afin d'évaluer l'effet de l'anisotropie des fibres sur la stabilité du talus, le facteur de sécurité « FS » a été calculé en utilisant la méthode des éléments finis [163]. Le calcul du FS dans PLAXIS s'appuie sur les procédures de réduction de la résistance ( $\phi$ -c) [158, 162, 164].

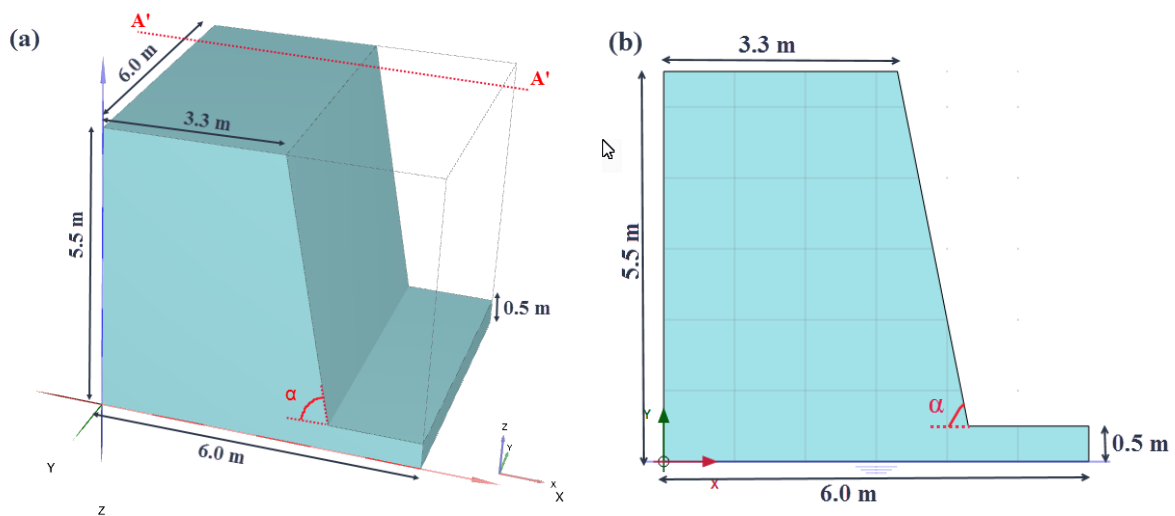
Les techniques de réduction de la résistance pour l'analyse de la stabilité des pentes par éléments finis ont été adoptées avec succès par plusieurs chercheurs [164, 165]. Cette approche d'analyse permet de déterminer le facteur de sécurité du talus en réduisant systématiquement les paramètres de résistance au cisaillement,  $C'$  et  $\varphi'$ , qui sont définis dans les équations (IV.08) et (IV.09) :

$$C' = \frac{C}{SR} \quad (IV.08)$$

$$\varphi' = \tan^{-1} \left( \frac{\tan(\varphi)}{SR} \right) \quad (IV.09)$$

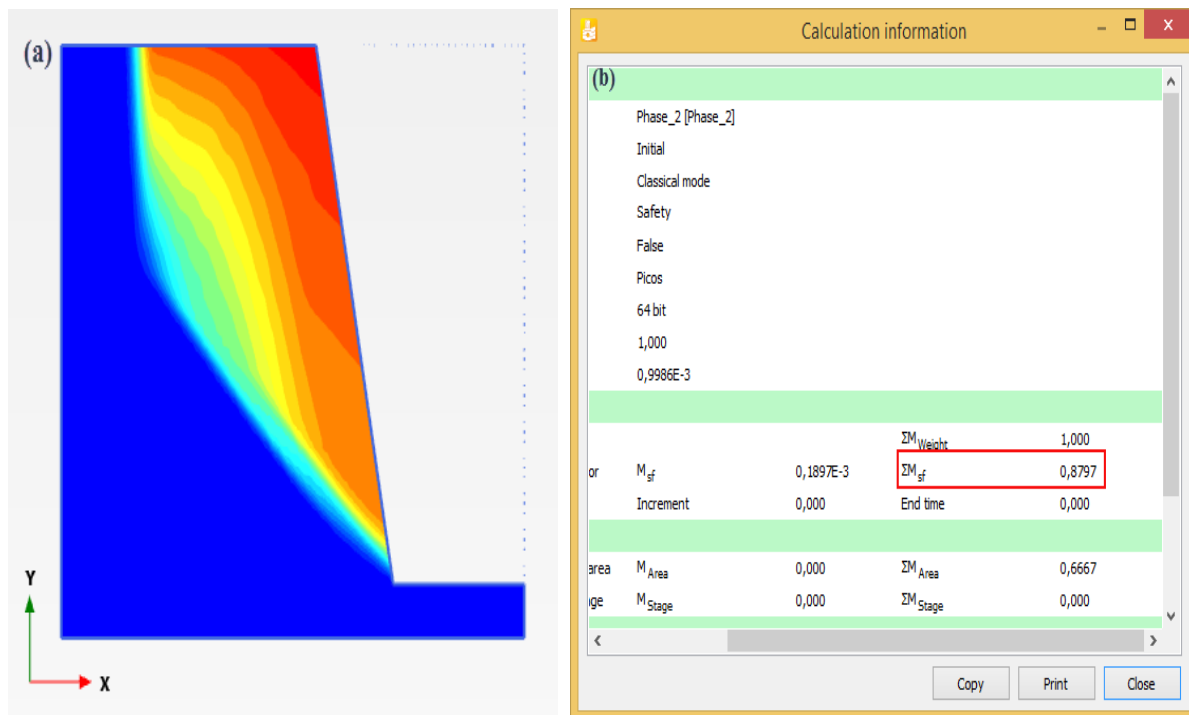
Où «  $SR$  » représente le facteur de réduction de résistance. Le facteur de sécurité «  $FS$  » pour la stabilité du talus est déterminé en obtenant la valeur de «  $SR$  » qui conduit au point de rupture du talus.

Les paramètres d'entrée utilisés pour la validation du modèle ont été extraits de l'étude de Kumar et al. [162]. Dans la première étude de validation numérique, le facteur de sécurité «  $FS$  » du talus a été déterminé en utilisant une pente  $\text{tg}(\alpha)$  de 5/1 et une hauteur «  $H$  » de 5.0 m.



**Fig IV.13:** Modèle géométrique du talus modélisé (a) modèle en 3D (b) coupe A'A' [162].

La figure IV.14 présente le cercle de glissement ainsi que le coefficient de sécurité obtenu à partir de notre simulation basée sur le modèle de Kumar et al. [162]. Ces résultats démontrent une erreur négligeable par rapport à la modélisation de Kumar ( $FS = 0.88$ ), ce qui confirme la validité de notre modèle. Par conséquent, nous sommes en mesure de poursuivre notre étude en utilisant les paramètres établis, comme indiqué dans le tableau IV.1.



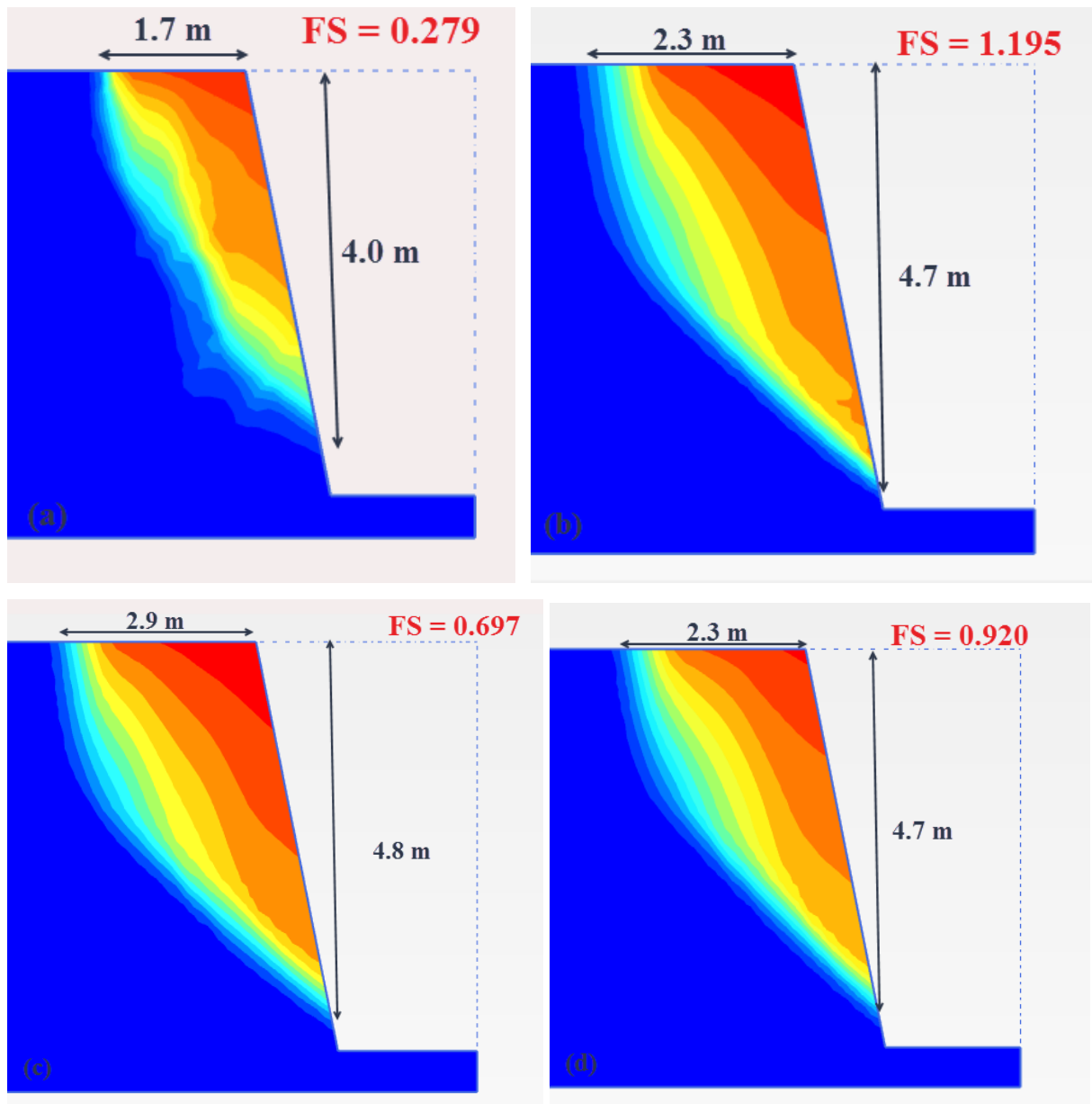
**Fig IV.14:** Résultats obtenus par PLAXIS (a) Cercle de glissement (b) Coefficient de sécurité

#### IV.4.2. Résultats et discussions

La figure IV.15 présente les cercles de glissement ainsi que les coefficients de sécurité obtenus lors de la modélisation d'un talus avec une pente  $\text{tg}(\alpha)$  de 5/1, dans lequel le sol est renforcé en ajoutant des fibres d'Alfa dans différentes directions. Les résultats montrent que le facteur de sécurité dépend principalement de la direction des fibres ajoutées dans le sol.

Pour un talus renforcé par des fibres disposées de manière aléatoire, le facteur de sécurité est de 0.279 (figure IV.15, a), ce qui indique une instabilité du talus. En revanche, lorsque le talus est renforcé par des fibres orientées verticalement, le facteur de sécurité augmente considérablement à 1.195 (figure IV.15, b), ce qui confère au talus une stabilité accrue. Pour les deux autres directions, horizontale et inclinée, les valeurs du facteur de sécurité sont respectivement de l'ordre de 0.95 et 0.697 (figure IV.15, c et IV.15, d).

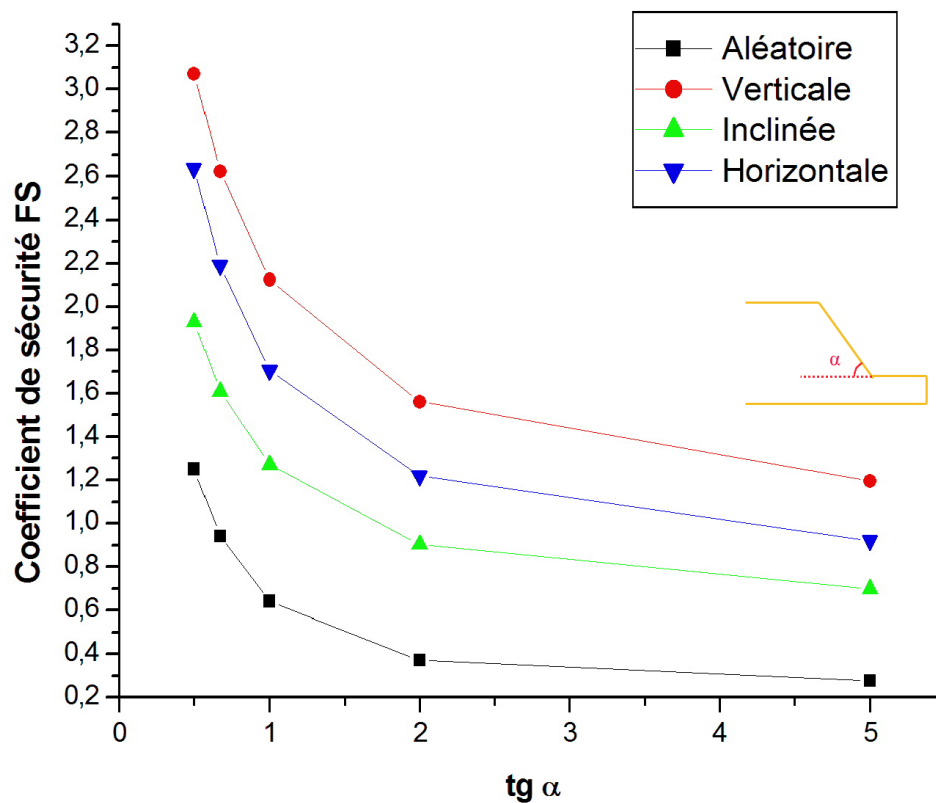
La forme du cercle de glissement est pratiquement similaire dans tous les cas étudiés, de même que la zone affectée par le glissement, à l'exception du cas où les fibres sont orientées dans la direction inclinée.



**Fig IV.15:** Les cercles de glissement dans les différentes directions d'ajout des fibres cas de  $\text{tg}(\alpha)=5/1$   
 (a) Aléatoire, (b) Verticale, (c) Inclinée, (d) Horizontale.

Dans le but d'explorer l'impact de la pente sur l'orientation des fibres des sols renforcés avec 1.0 % d'Alfa, nous avons procédé à une variation de l'angle de la pente, représenté par  $\text{tg}(\alpha)$ , en utilisant les valeurs suivantes : 2/1, 1/1, 2/3 et 1/2. Les coefficients de sécurité correspondants ont été déterminés par le logiciel PLAXIS et sont présentés dans la Figure IV.16, en fonction de la pente étudiée pour différents cas de sols. Les résultats obtenus révèlent une relation linéaire entre le coefficient de sécurité et la diminution de la pente, indépendamment de la direction d'ajout des fibres. Ces observations sont en concordance avec les travaux de recherche de Tsige et al. [163], qui ont étudié l'influence de la pente sur des sols renforcés par divers types de fibres végétales réparties de manière aléatoire.

Cependant, il convient de souligner que la disposition des fibres d'Alfa dans le sol modifie l'angle nécessaire pour assurer la stabilité du talus en fonction de la direction considérée. Dans le cas des directions verticale et horizontale, une pente  $\text{tg}(\alpha)$  inférieure ou égale à 5/1 et 2/1 respectivement est requise pour garantir la stabilité du talus. En revanche, pour la direction inclinée, il est nécessaire de réduire la pente à un angle  $\text{tg}(\alpha)$  égal à 2/3. Toutefois, dans le contexte d'un sol renforcé par des fibres distribuées de manière aléatoire, un talus stable peut être obtenu avec une pente  $\text{tg}(\alpha)$  inférieure ou égale à 1/2.



**Fig IV.16:** Variation du coefficient de sécurité en fonction de la pente étudiée.

Les données numériques ont été analysées afin d'établir une relation significative entre celles-ci et les interpolations polynomiales basées sur l'équation IV.10. Cette équation est caractérisée par l'utilisation de coefficients ( $a_i$ ) qui sont répertoriés dans le tableau IV.7. Les résultats obtenus ont révélé une corrélation très élevée, atteignant un coefficient de détermination ( $R^2$ ) supérieur à 0,99.

Il convient de souligner que les interpolations polynomiales, fondées sur les coefficients mentionnés précédemment, se sont avérées extrêmement précises pour prédire le coefficient de sécurité en l'absence de chargement, dans la plage de validité considérée. Les erreurs moyennes de prédiction pour différentes orientations étaient de 0,079 % pour la direction aléatoire,

0.103 % pour la direction verticale, 0.205 % pour la direction inclinée et 0.116 % pour la direction horizontale.

$$FS = a_1 + a_2 \operatorname{tg}(\alpha) + a_3 \operatorname{tg}^2(\alpha) + a_4 \operatorname{tg}^3(\alpha) \quad (\text{IV.10})$$

**Tableau IV.7** Les coefficients de l'équation IV.10, utilisés pour tracer les courbes de  $FS = f(\operatorname{tg}\alpha)$ .

$a_i$	Aléatoire	Verticale	Inclinée	Horizontale
$a_1$	2.2906	4.615	3.0128	4.1911
$a_2$	-2.6386	-3.8467	-2.7163	-3.8983
$a_3$	1.1022	1.5123	1.0849	1.5786
$a_4$	-0.131	-0.176	-0.1268	-0.186
$R^2$	0.99	0.99	0.99	0.99

## IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons concentré sur l'étude de l'effet d'orientation des fibres résultant du renforcement du sable de Jijel avec l'ajout de 1.0 % de fibres d'Alfa selon différentes directions dans des ouvrages géotechniques modélisés à l'aide du logiciel PLAXIS. Les résultats de la modélisation numérique démontrent l'importance de l'orientation des fibres selon l'ouvrage étudié :

- Les fondations superficielles, notamment les semelles carrées

Les résultats ont montré une augmentation significative de la pression limite dans les directions horizontale et verticale, atteignant jusqu'à 2.85 fois la pression limite du sol non renforcé. Cette amélioration est proportionnelle à l'épaisseur de la couche renforcée dans ces deux directions. En revanche, dans la direction inclinée, la pression limite reste comparable à celle du sol non renforcé, tandis que dans la direction aléatoire, la pression limite est inférieure.

Par ailleurs, l'ajout de fibres a également eu un impact sur la ductilité du sol renforcé. Lorsque des fibres étaient ajoutées de manière aléatoire, la ductilité diminuait en raison de la teneur élevée en fibres, ce qui entraînait une réduction de la pression limite et de la contrainte de cisaillement. En revanche, dans les directions verticale et horizontale, l'ajout de fibres a nettement amélioré la ductilité, atteignant des valeurs de 2.0 à 3.0 fois supérieures à celle du sol non renforcé. Cependant, l'ajout de fibres dans la direction inclinée n'a pas montré d'amélioration significative de la ductilité. Ces résultats sont cohérents avec les essais antérieurs et soulignent l'importance de l'orientation des fibres dans le renforcement du sol.

L'étude a également révélé que l'indice d'augmentation du déplacement à la rupture est très élevé dans les directions horizontale et verticale du sable renforcé par l'ajout de fibres d'Alfa, avec une augmentation allant de 1.25 à 4.25 fois celle de la direction aléatoire. En revanche, pour la direction inclinée, l'augmentation du déplacement à la rupture varie de 0.25 à 1.0 fois celui de la direction aléatoire.

En ce qui concerne les mécanismes de rupture des sols renforcés, il a été observé que les directions d'ajout de fibres horizontale et verticale induisent la formation de surfaces de rupture plus étendues par rapport aux cas d'ajout aléatoire et incliné. De plus, la forme des surfaces de rupture présente une variabilité d'un cas à l'autre.

- Dans le contexte du rideau de palplanches

L'ajout de fibres d'Alfa a également eu un effet sur la déflexion au sommet du rideau. L'épaisseur de la couche renforcée a montré une influence significative sur cette déflexion, avec des variations en fonction de la direction d'ajout des fibres. Dans les directions horizontale et verticale, la déflexion diminuait avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche renforcée. En revanche, dans la direction aléatoire, la déflexion suivait une courbe en U, avec une diminution suivie d'une augmentation pour des rapports  $U/H$  compris entre 0.3 et 0.5. Cela s'explique par la rupture du sol sous la fondation à partir d'une épaisseur de  $0.3H$ , ce qui entraîne une augmentation de la déflexion. Dans le cas de la direction inclinée, la déflexion reste relativement constante pour différentes épaisseurs de la couche renforcée, mais une différence de déflexion a été observée lorsque l'épaisseur atteint  $0.4H$  en raison de la rupture du sol.

Il convient de noter que la direction des fibres dans le sol renforcé a également un impact sur la déflexion au sommet du rideau de palplanches en fonction du rapport d'emplacement de la fondation «  $X/H$  ». l'effet d'orientation des fibres varie en fonction de la direction d'ajout des fibres. Dans les directions verticale et horizontale, la déflexion est considérablement réduite par rapport au cas aléatoire, atteignant une réduction d'environ 0.26 à 0.35 fois. En revanche, dans la direction inclinée, la réduction de la déflexion par rapport au cas aléatoire est de l'ordre de 0.13 à 0.33 fois.

- Dans le contexte de la stabilité du talus

Les résultats obtenus révèlent une relation linéaire entre le coefficient de sécurité et la diminution de la pente, indépendamment de la direction d'ajout des fibres. Cependant, il est

important de noter que la disposition des fibres d'Alfa dans le sol modifie l'angle nécessaire pour assurer la stabilité du talus en fonction de la direction considérée. Dans le cas des directions verticale et horizontale, une pente  $\text{tg}(\alpha)$  inférieure ou égale à 5/1 et 2/1 respectivement est requise pour garantir la stabilité du talus. En revanche, pour la direction inclinée, il est nécessaire de réduire la pente à un angle  $\text{tg}(\alpha)$  égal à 2/3. Toutefois, dans le contexte d'un sol renforcé par des fibres distribuées de manière aléatoire, un talus stable peut être obtenu avec une pente  $\text{tg}(\alpha)$  inférieure ou égale à 1/2.

Enfin, une analyse de régression multiple a été effectuée pour prédire plusieurs paramètres en fonction des caractéristiques du sol renforcé. Les résultats ont montré que les modèles de prédiction étaient en accord raisonnable avec les valeurs obtenues par la modélisation numérique. Cela suggère que les modèles de régression peuvent être utilisés comme outils pratiques pour estimer la pression limite, le déplacement à la rupture, la déflexion et le coefficient de sécurité des ouvrages géotechniques dans la plage de validité considérée.

**CONCLUSION  
GENERALE**

## Conclusion générale

Dans le cadre de cette étude, nous avons porté une attention particulière à l'effet de l'anisotropie dans le calcul des ouvrages géotechniques. Pour approfondir cette problématique, nous avons entrepris une série d'expérimentations, de prédictions et d'analyses numériques sur ces ouvrages.

Notre première étape a consisté en une étude expérimentale réalisée en laboratoire. Nous avons utilisé l'essai de cisaillement direct pour évaluer les performances du sable de Jijel renforcé par des fibres végétales d'Alfa, qui étaient orientées selon différentes directions : aléatoire, verticale, inclinée et horizontale. Les résultats obtenus lors de cette étude ont été très instructifs :

- L'ajout de fibres d'Alfa dans le sable peut considérablement renforcer sa résistance au cisaillement. Il est cependant important de respecter une teneur optimale en fibres pour éviter des effets néfastes sur la résistance du mélange sable/fibre.
- L'amélioration du sable ne dépend pas uniquement de la quantité et de la longueur des fibres, mais également de leur orientation dans le sol.
- L'orientation des fibres modifie la valeur optimale de leur teneur et de leur longueur, ce qui confère une meilleure résistance au cisaillement.
- l'effet d'orientation des fibres se manifeste par des variations significatives du niveau de renforcement en fibres, en fonction de leur teneur et de leur longueur, dans la matrice sable/fibre. Ces variations sont particulièrement prononcées lorsque la teneur en fibres est élevée (environ 1.0 %) dans toutes les directions.
- l'effet d'orientation des fibres est plus marqué sous une faible contrainte normale que sous une forte contrainte normale. Cependant, lorsque la longueur des fibres varie, l'effet d'orientation des fibres a peu d'incidence sur la contrainte maximale de cisaillement, sauf dans la direction inclinée. Dans ce cas précis, la contrainte maximale peut augmenter jusqu'à 88 % lorsque la longueur des fibres est de 2.5 cm et la contrainte normale atteint 300 KPa.

La deuxième étape de cette étude a été consacrée à l'analyse analytique et numérique du comportement du sable renforcé par des fibres d'Alfa orientées dans les différentes directions, afin de mieux le comprendre. Deux approches ont été utilisées : une méthode analytique basée sur le modèle de Gray et Ohashi de 1983, et une approche basée sur l'intelligence artificielle.

Les résultats obtenus ont été comparés aux résultats expérimentaux. Le modèle G.O. s'est avéré plus précis dans les directions verticale et inclinée pour les fibres de faible longueur, mais il a sous-estimé la contrainte de cisaillement maximale dans la direction inclinée avec des fibres d'Alfa de 2.5 cm. Lorsque la teneur en fibres varie, le modèle G.O. présente une meilleure précision dans la direction verticale et pour les faibles valeurs de contraintes normales.

Le modèle de réseau neuronal (RNA) a également démontré des performances satisfaisantes dans l'estimation de la contrainte de cisaillement maximale. Comparé au modèle analytique, le modèle RNA est probablement plus précis et utilise une seule équation pour estimer cette contrainte maximale. De plus, il requiert des paramètres simples, contrairement au modèle G.O. qui utilise plusieurs paramètres. Le modèle G.O. ne prend pas en compte la rupture des fibres, ce qui entraîne des résultats moins précis, tandis que le modèle RNA tient compte de ce facteur.

La précision du modèle RNA dépend des paramètres d'entrée utilisés pour estimer la contrainte maximale de ces sols. Cependant, la relation entre les performances et le nombre de neurones dans le RNA est arbitraire. Néanmoins, l'ajout de couches cachées améliore généralement les performances du modèle RNA jusqu'à atteindre une limite où elles se stabilisent.

La dernière étape de cette étude se concentre sur l'effet d'orientation des fibres résultant du renforcement du sable de Jijel avec l'incorporation de 1.0 % de fibres d'Alfa dans des ouvrages géotechniques. Les résultats obtenus grâce à la modélisation numérique ont révélé les conclusions suivantes :

A. Pour la fondation superficielle :

- Une augmentation significative de la pression limite a été observée dans les directions horizontale et verticale, atteignant jusqu'à 2.85 fois la pression limite du sol non renforcé. Cette amélioration est proportionnelle à l'épaisseur de la couche renforcée dans ces deux directions. En revanche, dans la direction inclinée, la pression limite reste comparable à celle du sol non renforcé, tandis que dans la direction aléatoire, la pression limite est inférieure.
- L'ajout de fibres a un impact sur la ductilité du sol renforcé. L'ajout aléatoire de fibres réduit la ductilité en raison de la concentration élevée de fibres, ce qui entraîne une diminution de la pression limite et de la contrainte de cisaillement. En revanche, dans

les directions verticale et horizontale, l'ajout de fibres améliore considérablement la ductilité, atteignant des valeurs de 2.0 à 3.0 fois supérieures à celles du sol non renforcé. Toutefois, l'ajout de fibres dans la direction inclinée n'a pas montré d'amélioration significative de la ductilité. Ces résultats confirment l'importance de l'orientation des fibres dans le renforcement du sol.

- L'indice d'augmentation du déplacement à la rupture est élevé dans les directions horizontale et verticale du sable renforcé par l'ajout de fibres d'alfa, avec une augmentation allant de 1.25 à 4.25 fois celle observée dans la direction aléatoire. En revanche, dans la direction inclinée, l'augmentation du déplacement à la rupture varie de 0.25 à 1.0 fois celle de la direction aléatoire.
- L'ajout de fibres dans les directions horizontale et verticale favorise la formation de surfaces de rupture plus étendues par rapport aux cas d'ajout aléatoire et incliné. De plus, la forme des surfaces de rupture présente une variabilité d'un cas à l'autre.

**B. Pour le rideau de palplanches :**

- Dans les directions horizontale et verticale, l'augmentation de l'épaisseur de la couche renforcée entraînait une diminution de la déflexion. En revanche, dans la direction aléatoire, la déflexion suivait une courbe en forme de U, avec une diminution suivie d'une augmentation pour des rapports U/H compris entre 0.3 et 0.5. Cette variation s'explique par la rupture du sol sous la fondation à partir d'une épaisseur de 0.3H, ce qui entraîne une augmentation de la déflexion. Dans le cas de la direction inclinée, la déflexion restait relativement constante pour différentes épaisseurs de la couche renforcée, mais une différence de déflexion a été observée lorsque l'épaisseur atteignait 0.4H en raison de la rupture du sol.
- L'incorporation de fibres d'Alfa dans le sol a un impact sur la déflexion au sommet du rideau de palplanches en fonction du rapport d'emplacement de la fondation "X/H". L'effet de l'anisotropie varie selon la direction d'ajout des fibres. Dans les directions verticale et horizontale, la déflexion est considérablement réduite par rapport au cas aléatoire, atteignant une réduction d'environ 0.26 à 0.35 fois. En revanche, dans la direction inclinée, la réduction de la déflexion par rapport au cas aléatoire est d'environ 0.13 à 0.33 fois.

**C. Pour la stabilité du talus :**

- Il existe une relation linéaire entre le coefficient de sécurité et la diminution de la pente, indépendamment de la direction d'ajout des fibres.

- la disposition des fibres d'Alfa dans le sol modifie l'angle nécessaire pour assurer la stabilité du talus en fonction de la direction considérée. Dans les directions verticale et horizontale, une pente inférieure ou égale à 5/1 et 2/1 respectivement est requise pour garantir la stabilité du talus. En revanche, dans la direction inclinée, il est nécessaire de réduire la pente à un angle  $\text{tg}(\alpha)$  égal à 2/3. Toutefois, dans le cas d'un sol renforcé par des fibres distribuées de manière aléatoire, un talus stable peut être obtenu avec une pente inférieure ou égale à 1/2.

Enfin, une analyse de régression multiple a été réalisée pour prédire plusieurs paramètres en fonction des caractéristiques du sol renforcé. Les résultats ont montré que les modèles de prédiction étaient raisonnablement conformes aux valeurs obtenues par la modélisation numérique. Cela suggère que les modèles de régression peuvent être utilisés comme outils pratiques sans passer à la modélisation numérique pour estimer la pression limite, le déplacement à la rupture, la déflexion et le coefficient de sécurité des ouvrages géotechniques dans la plage de validité considérée.

Le travail présenté offre des perspectives intéressantes pour des recherches futures dans le domaine de la prise en compte d'anisotropie dans le calcul des ouvrages géotechniques. Voici quelques pistes de développement potentielles :

- Étendre l'étude à d'autres types de fibres : Cette recherche s'est concentrée sur l'incorporation de fibres d'Alfa dans le sol renforcé. Il serait intéressant d'explorer l'effet d'autres types de fibres, tels que les fibres synthétiques ou les fibres métalliques, sur les performances géotechniques.
- Adaptation du taux d'apprentissage : Le taux d'apprentissage est un paramètre clé dans l'algorithme de rétropropagation. L'exploration de méthodes adaptatives pour ajuster dynamiquement le taux d'apprentissage tout au long du processus d'apprentissage peut améliorer la convergence et la stabilité du modèle. Des techniques telles que l'adaptation de taux d'apprentissage basée sur le gradient (SGDR) ou l'adaptation basée sur l'erreur peuvent être considérées.
- Approfondir l'analyse des mécanismes de rupture : L'étude en cours a mis en évidence des variations au niveau des surfaces de rupture en fonction de l'orientation des fibres. Il serait judicieux d'approfondir cette analyse afin d'améliorer notre compréhension de l'effet de l'anisotropie sur le calcul des ouvrages géotechniques.

- Étudier l'influence d'autres paramètres géotechniques : Outre l'épaisseur de la couche renforcée, d'autres paramètres géotechniques peuvent influencer les performances du sol renforcé, tels que la densité, la teneur en eau ou la granulométrie. Il serait intéressant d'étudier l'impact de ces paramètres sur l'efficacité de la prise en compte de l'anisotropie dans les calculs, afin d'établir des recommandations spécifiques adaptées aux différentes conditions géotechniques.
- Évaluer les aspects économiques liés à la prise en compte de l'anisotropie dans le calcul des ouvrages géotechniques : Il serait nécessaire d'analyser les coûts liés à la collecte des données nécessaires à la caractérisation de l'anisotropie, ainsi que les coûts de simulation et d'analyse plus complexes. Parallèlement, il serait intéressant d'évaluer les bénéfices potentiels, tels que l'amélioration de la sécurité, la durabilité accrue des ouvrages et la réduction des risques de défaillance.
- Explorer d'autres domaines d'application : Il serait pertinent d'étudier des cas spécifiques tels que les digues côtières ou les remblais routiers, où les effets de l'anisotropie pourraient différer des fondations superficielles et des talus.

En poursuivant ces perspectives de recherche, il sera possible de consolider les connaissances actuelles sur la prise en compte de l'effet d'anisotropie dans les calculs des ouvrages géotechniques et de développer des recommandations plus précises et adaptées aux différentes situations géotechniques.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références bibliographiques

1. Tang, Y., et al., *Mechanical Analysis of Palm-Fiber-Reinforced Sand through Triaxial Tests*. Sustainability, 2023. **15**(6): p. 5461.
2. Gheris, A. and A. Hamrouni, *Treatment of an expansive soil using vegetable (DISS) fibre*. Innovative Infrastructure Solutions, 2020. **5**(1): p. 30.
3. Berkane, H.A., et al., *Incorporating vegetal fibers for sustainable sandy soil*. Revista de la Construcción. Journal of Construction, 2023. **22**(1): p. 135-146.
4. Hejazi, S.M., et al., *A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers*. Construction and Building Materials, 2012. **30**: p. 100-116.
5. Gowthaman, S., K. Nakashima, and S. Kawasaki, *A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: Past findings, present trends and future directions*. Materials, 2018. **11**(4): p. 553.
6. Subramanian, G.K.M., M. Balasubramanian, and A.A. Jeya Kumar, *A review on the mechanical properties of natural fiber reinforced compressed earth blocks*. Journal of Natural Fibers, 2021: p. 1-15.
7. Carvalho, L.M.C.d., F.F. Monteiro, and M.D.T. Casagrande, *Large-scale direct shear testing in coir fibers reinforced sand*. Soils and Rocks, 2023. **46**.
8. Michalowski, R.L. and L. Shi, *Deformation patterns of reinforced foundation sand at failure*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2003. **129**(5): p. 439-449.
9. Michalowski, R., *Limit analysis with anisotropic fibre-reinforced soil*. Geotechnique, 2008. **58**(6): p. 489-501.
10. Mayne, P.W., *Stress anisotropy effects on clay strength*. Journal of geotechnical engineering, 1985. **111**(3): p. 356-366.
11. Mishra, P.N., et al., *Anisotropy in volume change behaviour of soils during shrinkage*. Acta Geotechnica, 2020. **15**: p. 3399-3414.
12. Lo, K.Y., *Stability of slopes in anisotropic soils*. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1965. **91**(4): p. 85-106.
13. Stockton, E., et al., *Influence of both anisotropic friction and cohesion on the formation of tension cracks and stability of slopes*. Engineering Geology, 2019. **249**: p. 31-44.
14. Bestuzheva, A. and A. Tarasov. *Influence of anisotropic properties of coarse gravel in calculation of dam slopes stability*. in *AIP Conference Proceedings*. 2023. AIP Publishing LLC.
15. He, Y., et al., *Slope stability analysis considering the strength anisotropy of  $c-\phi$  soil*. Scientific Reports, 2022. **12**(1): p. 18372.
16. Pakdel, P., R. Jamshidi Chenari, and M. Veiskarami, *An estimate of the bearing capacity of shallow foundations on anisotropic soil by limit equilibrium and soft computing technique*. Geomechanics and Geoengineering, 2019. **14**(3): p. 202-217.
17. Liang, W., et al., *Bearing capacity and failure of footing on anisotropic soil: A multiscale perspective*. Computers and Geotechnics, 2021. **137**: p. 104279.
18. Keawsawasvong, S., *Bearing capacity of conical footings on clays considering combined effects of anisotropy and non-homogeneity*. Ships and Offshore Structures, 2022. **17**(10): p. 2317-2328.
19. Veiskarami, M. and M.A. Shokoohi, *A Lower Bound Estimate of the Bearing Capacity of Foundations on Inherently Anisotropic Sands Implementing the Fabric Tensor*. Geotechnical and Geological Engineering, 2023. **41**(2): p. 831-845.
20. Cai, Y., A. Sangghaleh, and E. Pan, *Effect of anisotropic base/interlayer on the mechanistic responses of layered pavements*. Computers and Geotechnics, 2015. **65**: p. 250-257.

21. Zhang, Y., et al., *Modeling stress-dependent anisotropic elastoplastic unbound granular base in flexible pavements*. Transportation Research Record, 2018. **2672**(52): p. 46-56.
22. Hu, Z., Z.-x. Yang, and S.P. Wilkinson, *Active earth pressure acting on retaining wall considering anisotropic seepage effect*. Journal of Mountain Science, 2017. **14**: p. 1202-1211.
23. Banyong, R. and S. Keawsawasvong, *Stability of limiting pressure behind soil gaps in contiguous pile walls in anisotropic clays*. Engineering Failure Analysis, 2022. **134**: p. 106049.
24. Franzius, J., D. Potts, and J. Burland, *The influence of soil anisotropy and  $K_0$  on ground surface movements resulting from tunnel excavation*. Geotechnique, 2005. **55**(3): p. 189-199.
25. Wang, W., et al., *Active stability analysis of 3d tunnel face in nonhomogeneous and anisotropic soils*. Geotechnical and Geological Engineering, 2023: p. 1-21.
26. Oda, M., *Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material*. Soils and foundations, 1972. **12**(1): p. 17-36.
27. Michalowski, R.L. and J. Cermak, *Strength anisotropy of fiber-reinforced sand*. Computers and Geotechnics, 2002. **29**(4): p. 279-299.
28. Shalchian, M.M. and M. Arabani, *Application of plant-derived fibers in soil reinforcement on experimental, numerical, and case study scales: a review*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023. **82**(1): p. 19.
29. Gray, D.H. and H. Ohashi, *Mechanics of fiber reinforcement in sand*. Journal of geotechnical engineering, 1983. **109**(3): p. 335-353.
30. Maher, M.H. and D.H. Gray, *Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers*. Journal of geotechnical engineering, 1990. **116**(11): p. 1661-1677.
31. Michalowski, R.L. and A. Zhao, *Failure of fiber-reinforced granular soils*. Journal of geotechnical engineering, 1996. **122**(3): p. 226-234.
32. Zornberg, J., *Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil*. Geotechnique, 2002. **52**(8): p. 593-604.
33. Nguyen, T.L., et al., *Caractérisation et effet de l'anisotropie sur le comportement de sols reconstitués*. Canadian geotechnical journal, 2011. **48**(10): p. 1520-1536.
34. Chen, Y.-C., I. Ishibashi, and J. Jenkins, *Dynamic shear modulus and fabric: part I, depositional and induced anisotropy*. Geotechnique, 1988. **38**(1): p. 25-32.
35. Gerrard, C. *Elastic models of rock masses having one, two and three sets of joints*. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1982. Elsevier.
36. Rowe, R.K. and J.R. Booker, *Finite layer analysis of nonhomogeneous soils*. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1982. **108**(1): p. 115-132.
37. Reiffsteck, P., *Expérimentation et modélisation de structures en sol renforcé par un géotextile tridimensionnel alvéolaire*. Revue Française de géotechnique, 1998(82): p. 49-62.
38. Chou, J.-S., et al., *Bio-inspired optimization of weighted-feature machine learning for strength property prediction of fiber-reinforced soil*. Expert Systems with Applications, 2021. **180**: p. 115042.
39. Vidal, H., *La Terre Armée', Annals of "L'Institut Technique de Batiment et des Travaux Public"*. Serie Materiaux, 1966. **30**: p. 223-224.
40. Vidal, H., *The principle of reinforced earth*. Highway research record, 1969(282).
41. Schlosser, F. and N.-T. Long, *Recent results of French research on reinforced earth*. Journal of the construction Division, 1974. **100**(3): p. 223-237.

42. Holtz, R., *46th Terzaghi lecture: geosynthetic reinforced soil: from the experimental to the familiar*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2017. **143**(9): p. 03117001.
43. Ling, H.I., D. Leshchinsky, and F. Tatsuoka, *Reinforced soil engineering: advances in research and practice*. 2003.
44. Shukla, S.K., *Fundamentals of fibre-reinforced soil engineering*2017: Springer.
45. McGown, A., K. Andrawes, and M. Al-Hasani, *Effect of inclusion properties on the behaviour of sand*. Geotechnique, 1978. **28**(3): p. 327-346.
46. Sakaray, H., N. Togati, and I.R. Reddy, *Investigation on properties of bamboo as reinforcing material in concrete*. International Journal of Engineering Research and Applications, 2012. **2**(1): p. 77-83.
47. Altaf, H., et al., *SOIL REINFORCEMENT WITH NATURAL FIBERS FOR LOW INCOME HOUSING FACILITY*. 2021.
48. Hatami, K., G. Gregory, and G.S. Garland Jr, *Guidelines for the Use of Fiber Reinforced Soil (FRS) in Highway Construction*, 2018.
49. Tabakouei, A.R., et al., *Coupled specimen and fiber dimensions influence measurement on the properties of fiber-reinforced soil*. Measurement, 2022. **188**: p. 110556.
50. Xiao, Y., et al., *Experimental studies on compressive and tensile strength of cement-stabilized soil reinforced with rice husks and polypropylene fibers*. Construction and Building Materials, 2022. **344**: p. 128242.
51. Teja, M.D. and M. Muttharam, *Durability Study on Coir Fiber-Reinforced Soil*, in *Ground Characterization and Foundations*2022, Springer. p. 33-39.
52. Akhil, K., N. Sankar, and S. Chandrakaran, *Effect of Aperture Size on the Performance of Bamboo Mat Reinforced Soil Bed*. Journal of Natural Fibers, 2021: p. 1-12.
53. Syed, M. and A. GuhaRay, *Effect of natural fiber reinforcement on strength response of alkali activated binder treated expansive soil: Experimental investigation and reliability analysis*. Construction and Building Materials, 2021. **273**: p. 121743.
54. Bordoloi, S., et al., *Infiltration characteristics of natural fiber reinforced soil*. Transportation Geotechnics, 2017. **12**: p. 37-44.
55. Bordoloi, S., A. Garg, and S. Sekharan, *A review of physio-biochemical properties of natural fibers and their application in soil reinforcement*. Advances in Civil Engineering Materials, 2017. **6**(1): p. 323-359.
56. Michalowski, R., *An estimate of the influence of soil weight on bearing capacity using limit analysis*. Soils and foundations, 1997. **37**(4): p. 57-64.
57. Li, C., *Mechanical response of fiber-reinforced soil*2005: The University of Texas at Austin.
58. Li, C. and J.G. Zornberg, *Mobilization of reinforcement forces in fiber-reinforced soil*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2013. **139**(1): p. 107-115.
59. Diambra, A., et al., *Fibre reinforced sands: experiments and modelling*. Geotextiles and Geomembranes, 2010. **28**(3): p. 238-250.
60. Ibraim, E., et al., *Assessment of laboratory sample preparation for fibre reinforced sands*. Geotextiles and Geomembranes, 2012. **34**: p. 69-79.
61. Mandolini, A., A. Diambra, and E. Ibraim, *Strength anisotropy of fibre-reinforced sands under multi-axial loading*. Geotechnique, 2019. **69**(3): p. 203-216.
62. Neeraja, V., K. Geetha Manjari, and G. Sivakumar Babu, *Numerical analysis of effect of orientation of fibers on stress-strain response of fiber reinforced soil*. International Journal of Geotechnical Engineering, 2014. **8**(3): p. 328-334.
63. Ghadr, S., H. Bahadori, and A. Assadi-Langroudi, *Anisotropy in sand-fibre composites and undrained stress-strain implications*. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2019. **5**(3): p. 1-13.

64. Waldron, L. and S. Dakessian, *Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties*. Soil science, 1981. **132**(6): p. 427-435.
65. Roscoe, K.H., *The influence of strains in soil mechanics*. Geotechnique, 1970. **20**(2): p. 129-170.
66. Maher, M.H., *Static and dynamic force response of sands reinforced with discrete, randomly distributed fibers* 1988: University of Michigan.
67. Shukla, S., N. Sivakugan, and A. Singh, *Analytical model for fiber-reinforced granular soils under high confining stresses*. Journal of materials in civil engineering, 2010. **22**(9): p. 935-942.
68. Diambra, A., et al., *Determination of fibre orientation distribution in reinforced sands*. Geotechnique, 2007. **57**(7): p. 623-628.
69. Diambra, L.A., *Genome sequence and analysis of the tuber crop potato*. Nature, 2011. **475**.
70. Gong, L., L. Nie, and Y. Xu, *Discrete element analysis of the strength anisotropy of fiber-reinforced sands subjected to direct shear load*. Applied Sciences, 2020. **10**(11): p. 3693.
71. Kandiri, A., E.M. Golafshani, and A. Behnood, *Estimation of the compressive strength of concretes containing ground granulated blast furnace slag using hybridized multi-objective ANN and salp swarm algorithm*. Construction and Building Materials, 2020. **248**: p. 118676.
72. Goudjil, K. and L. Arabet, *Assessment of deflection of pile implanted on slope by artificial neural network*. Neural Computing and Applications, 2021. **33**(4): p. 1091-1101.
73. Belaabed, F., et al., *Utilization of computational intelligence approaches to estimate the relative head of PK-Weir for submerged flow*. Neural Computing and Applications, 2021. **33**(19): p. 13001-13013.
74. Arabet, L., M. Hidjeb, and F. Belaabed, *A Comparative Study of Reinforced Soil Shear Strength Prediction by the Analytical Approach and Artificial Neural Networks*. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2022. **12**(6): p. 9795-9801.
75. Stepniewska-Dziubinska, M.M., P. Zielenkiewicz, and P. Siedlecki, *Development and evaluation of a deep learning model for protein–ligand binding affinity prediction*. Bioinformatics, 2018. **34**(21): p. 3666-3674.
76. Lal, B. and S.S. Tripathy, *Prediction of dust concentration in open cast coal mine using artificial neural network*. Atmospheric Pollution Research, 2012. **3**(2): p. 211-218.
77. Chao, Z., et al. *The application of artificial neural network in geotechnical engineering*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. IOP Publishing.
78. Wang, Z.-l., Y.-c. Li, and R. Shen, *Correction of soil parameters in calculation of embankment settlement using a BP network back-analysis model*. Engineering Geology, 2007. **91**(2-4): p. 168-177.
79. Zhai, Y., et al., *Soil texture classification with artificial neural networks operating on remote sensing data*. Computers and Electronics in Agriculture, 2006. **54**(2): p. 53-68.
80. Park, J., et al., *Economic load dispatch for piecewise quadratic cost function using Hopfield neural network*. IEEE transactions on power systems, 1993. **8**(3): p. 1030-1038.
81. Paik, J.K. and A.K. Katsaggelos, *Image restoration using a modified Hopfield network*. IEEE Transactions on image processing, 1992. **1**(1): p. 49-63.
82. Zhu, Y. and Z. Yan, *Computerized tumor boundary detection using a Hopfield neural network*. IEEE transactions on medical imaging, 1997. **16**(1): p. 55-67.
83. Ferentinou, M. and M. Sakellariou, *Computational intelligence tools for the prediction of slope performance*. Computers and Geotechnics, 2007. **34**(5): p. 362-384.

84. Cai, J., J. Zhao, and J. Hudson, *Computerization of rock engineering systems using neural networks with an expert system*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998. **31**: p. 135-152.
85. Ambrožič, T. and G. Turk, *Prediction of subsidence due to underground mining by artificial neural networks*. Computers & geosciences, 2003. **29**(5): p. 627-637.
86. Santos Jr, O.J. and T.B. Celestino, *Artificial neural networks analysis of Sao Paulo subway tunnel settlement data*. Tunnelling and underground space technology, 2008. **23**(5): p. 481-491.
87. Ferentinou, M., T. Hasiotis, and M. Sakellariou, *Application of computational intelligence tools for the analysis of marine geotechnical properties in the head of Zakynthos canyon, Greece*. Computers & geosciences, 2012. **40**: p. 166-174.
88. Rizzo, R., M. Allegra, and G. Fulantelli. *Hypertext-like structures through a SOM network*. in *Proceedings of the tenth ACM Conference on Hypertext and hypermedia: returning to our diverse roots: returning to our diverse roots*. 1999.
89. Shirani Faradonbeh, R., et al., *Application of self-organizing map and fuzzy c-mean techniques for rockburst clustering in deep underground projects*. Neural Computing and Applications, 2020. **32**: p. 8545-8559.
90. Rokne, J., et al. *Integrating SOM and fuzzy k-means clustering for customer classification in personalized recommendation system for non-text based transactional data*. in *ICIT 2017-8th International Conference on Information Technology, Proceedings*. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
91. Mokarram, M., M. Najafi-Ghiri, and A.R. Zarei, *Using self-organizing maps for determination of soil fertility (case study: shiraz plain)*. Soil and Water Research, 2018. **13**(1): p. 11-17.
92. Chauhan, S., et al., *Processing of rock core microtomography images: Using seven different machine learning algorithms*. Computers & geosciences, 2016. **86**: p. 120-128.
93. Chou, J.-S., K.-H. Yang, and J.-Y. Lin, *Peak shear strength of discrete fiber-reinforced soils computed by machine learning and metaensemble methods*. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016. **30**(6): p. 04016036.
94. Chou, J.-S. and N.-T. Ngo, *Engineering strength of fiber-reinforced soil estimated by swarm intelligence optimized regression system*. Neural Computing and Applications, 2018. **30**: p. 2129-2144.
95. Garg, A., et al., *Investigation of mechanical factor of soil reinforced with four types of fibers: An integrated experimental and extreme learning machine approach*. Journal of Natural Fibers, 2020. **17**(5): p. 650-664.
96. Azami, A., S. Pietruszczak, and P. Guo, *Bearing capacity of shallow foundations in transversely isotropic granular media*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010. **34**(8): p. 771-793.
97. !!! INVALID CITATION !!!
98. Qin, J., X. Zeng, and H. Ming, *Centrifuge modeling and the influence of fabric anisotropy on seismic response of foundations*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2016. **142**(3): p. 04015082.
99. Loukidis, D. and R. Salgado, *Effect of relative density and stress level on the bearing capacity of footings on sand*. Geotechnique, 2011. **61**(2): p. 107-119.
100. Chaloulos, Y.K., A.G. Papadimitriou, and Y.F. Dafalias, *Fabric effects on strip footing loading of anisotropic sand*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2019. **145**(10): p. 04019068.
101. Gao, Z., D. Lu, and X. Du, *Bearing capacity and failure mechanism of strip footings on anisotropic sand*. Journal of Engineering Mechanics, 2020. **146**(8): p. 04020081.

102. Gao, Z., J. Zhao, and X. Li, *The deformation and failure of strip footings on anisotropic cohesionless sloping grounds*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2021. **45**(10): p. 1526-1545.
103. Dafalias, Y.F., A.G. Papadimitriou, and X.S. Li, *Sand plasticity model accounting for inherent fabric anisotropy*. Journal of Engineering Mechanics, 2004. **130**(11): p. 1319-1333.
104. Li, X.S. and Y.F. Dafalias, *Anisotropic critical state theory: role of fabric*. Journal of Engineering Mechanics, 2012. **138**(3): p. 263-275.
105. Jamshidi Chenari, R. and R. Alaie, *Effects of anisotropy in correlation structure on the stability of an undrained clay slope*. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2015. **9**(2): p. 109-123.
106. Maheshwari, K., A. Desai, and C. Solanki. *Application and modeling of fiber reinforced soil*. in *Proceedings of Indian geotechnical conference*. 2011.
107. Nasr, A.M., *Behavior of strip footing on fiber-reinforced cemented sand adjacent to sheet pile wall*. Geotextiles and Geomembranes, 2014. **42**(6): p. 599-610.
108. Moghaddas Tafreshi, S.N., et al., *Experimental and numerical investigation of footing behaviour on multi-layered rubber-reinforced soil*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019. **23**(1): p. 29-52.
109. Sharma, V. and A. Kumar, *Numerical study of ring and circular foundations resting on fibre-reinforced soil*. International Journal of Geotechnical Engineering, 2019.
110. Mohammadi, H., N. Hataf, and M. Veiskarami, *A numerical study on the behaviour of foundations resting on fibre reinforced soils using an innovative enhanced soil-fibre finite element*. Geomechanics and Geoengineering, 2022. **17**(2): p. 613-629.
111. Gregory, G.H. and D.S. Chill. *Stabilization of earth slopes with fiber reinforcement*. in *Proc., 6th Int. Conf. on Geosynthetics*. 1998. International Geosynthetics Society.
112. Santoni, R.L. and S.L. Webster, *Airfields and roads construction using fiber stabilization of sands*. Journal of transportation engineering, 2001. **127**(2): p. 96-104.
113. Tingle, J.S., R.L. Santoni, and S.L. Webster, *Full-scale field tests of discrete fiber-reinforced sand*. Journal of transportation engineering, 2002. **128**(1): p. 9-16.
114. Lindh, E. and L. Eriksson, *T5/2 Sand reinforced with plastic fibres: A field experiment*, 1992, Statens Väg-och Trafikinstitut. VTI särtryck 174.
115. Crockford, W.W., W.P. Grogan, and D. Chill, *Strength and life of stabilized pavement layers containing fibrillated polypropylene* 1993.
116. Grogan, W. and W. Johnson, *STABILIZATION OF HIGH PLASTICITY CLAY AND SILTY SAND BY INCLUSION OF DISCRETE FIBRILLATED POLYPROPYLENE FIBERS FOR USE IN PAVEMENT SUBGRADES. FINAL REPORT*, 1994.
117. Chandra, S., M. Viladkar, and P.P. Nagrale, *Mechanistic approach for fiber-reinforced flexible pavements*. Journal of transportation engineering, 2008. **134**(1): p. 15-23.
118. Falorca, I., L. Gomes, and M. Pinto, *A full-scale trial embankment construction with soil reinforced with short randomly distributed polypropylene microfibrils*. Geosynthetics International, 2011. **18**(5): p. 280-288.
119. Park, T. and S.A. Tan, *Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber*. Geotextiles and Geomembranes, 2005. **23**(4): p. 348-361.
120. Minegishi, K., K. Makiuchi, and R. Takahashi. *Strength-deformational characteristics of EPS beads-Mixed lightweight geomaterial subjected to cyclic loadings*. in *Proceeding of the international workshop on lightweight geo-materials*. 2002.
121. Leflaive, E., *Durability of geotextiles: the French experience*. Geotextiles and Geomembranes, 1988. **7**(1-2): p. 23-31.

122. Keshavarz, A., M. Nemati, and A. Fazeli, *Seismic Bearing Capacity of Strip Foundations on Fiber-Reinforced Granular Soil*. Geotechnical and Geological Engineering, 2021. **39**: p. 1033-1047.
123. Gray, D.H. and T. Al-Refeai, *Behavior of fabric-versus fiber-reinforced sand*. Journal of geotechnical engineering, 1986. **112**(8): p. 804-820.
124. Sivakumar Babu, G. and A. Vasudevan, *Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil*. Journal of materials in civil engineering, 2008. **20**(9): p. 571-577.
125. Singh, H. and M. Bagra, *Improvement in CBR value of soil reinforced with jute fiber*. International journal of innovative research in science, engineering and technology, 2013. **2**(8): p. 3447-3452.
126. Dallel, M., *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil*, 2012, Université de Haute Alsace-Mulhouse.
127. Omar, A. and M.B. Khadra, *Esparto grass (Stipa tenacissima L.), raw material of papermaking. First part*. Химия растительного сырья, 2007(4): p. 25-30.
128. Ramírez, D., et al., *Seasonal water-use efficiency and chlorophyll fluorescence response in alpha grass (Stipa tenacissima L.) is affected by tussock size*. Photosynthetica, 2008. **46**: p. 222-231.
129. KHELIFI, Z., *Contribution à l'étude du comportement des sols renforcés à l'aide des fibres végétales d'alfa*, 2017.
130. Salim, M.H., et al., *Alfa fibers, their composites and applications*, in *Plant fibers, their composites, and applications* 2022, Elsevier. p. 51-74.
131. Meirhaeghe, C. and H. Bewa, *Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France*. Étude FRD subventionnée par l'ADEME, 2011. **16**: p. 65.
132. Hanana, S., et al., *An efficient enzymatic-based process for the extraction of high-mechanical properties alfa fibres*. Industrial Crops and Products, 2015. **70**: p. 190-200.
133. Brahim, S.B. and R.B. Cheikh, *Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite*. Composites Science and Technology, 2007. **67**(1): p. 140-147.
134. Bessadok, A., et al., *Alfa fibres for unsaturated polyester composites reinforcement: Effects of chemical treatments on mechanical and permeation properties*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009. **40**(2): p. 184-195.
135. Maher, M. and Y. Ho, *Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite*. Journal of geotechnical engineering, 1994. **120**(8): p. 1381-1393.
136. Santoni, R.L., J.S. Tingle, and S.L. Webster, *Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2001. **127**(3): p. 258-268.
137. Tang, C., et al., *Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil*. Geotextiles and Geomembranes, 2007. **25**(3): p. 194-202.
138. Vaid, Y.P., S. Sivathayalan, and D. Stedman, *Influence of specimen-reconstituting method on the undrained response of sand*. Geotechnical Testing Journal, 1999. **22**(3).
139. Anagnostopoulos, C.A., et al., *Shear strength of sands reinforced with polypropylene fibers*. Geotechnical and Geological Engineering, 2013. **31**: p. 401-423.
140. Harrison, A.T., *A performance framework for the soil strengthening properties of fibre-reinforced sand*, 2006, University of Bristol.
141. Shewbridge, S.E. and N. Sitar, *Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear*. Journal of geotechnical engineering, 1989. **115**(8): p. 1134-1147.

142. Wei, L., et al., *Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber*. Construction and Building Materials, 2018. **172**: p. 300-308.
143. Li, J., et al., *Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014. **6**(2): p. 133-137.
144. Mirzababaei, M., et al., *Effect of fiber reinforcement on shear strength and void ratio of soft clay*. Geosynthetics International, 2018. **25**(4): p. 471-480.
145. Hsueh, C. and P. Becher, *Some considerations of two-way debonding during fibre pull-out*. Journal of materials science letters, 1993. **12**(24): p. 1933-1936.
146. Prabakar, J. and R. Sridhar, *Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil*. Construction and Building Materials, 2002. **16**(2): p. 123-131.
147. Tiwari, L.B., A. Burman, and P. Samui, *Modelling soil compaction parameters using a hybrid soft computing technique of LSSVM and symbiotic organisms search*. Innovative Infrastructure Solutions, 2023. **8**(1): p. 2.
148. Raja, M.N.A., et al., *Predicting and validating the load-settlement behavior of large-scale geosynthetic-reinforced soil abutments using hybrid intelligent modeling*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023. **15**(3): p. 773-788.
149. Hegazi, E.H., et al., *Prediction of Soil Moisture Content from Sentinel-2 Images Using Convolutional Neural Network (CNN)*. Agronomy, 2023. **13**(3): p. 656.
150. Ansari, M.A. and L.B. Roy, *Experimental and ANN-based model of footing pressure of a layered soil reinforced with geogrid*. Innovative Infrastructure Solutions, 2023. **8**(3): p. 100.
151. Özkan, C. and F.S. Erbek, *The comparison of activation functions for multispectral Landsat TM image classification*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003. **69**(11): p. 1225-1234.
152. Isa, I., et al. *Suitable MLP network activation functions for breast cancer and thyroid disease detection*. in *2010 second international conference on computational intelligence, modelling and simulation*. 2010. IEEE.
153. Hagan, M.T., H.B. Demuth, and M. Beale, *Neural network design*1997: PWS Publishing Co.
154. Jeremiah, J.J., et al., *Results of application of artificial neural networks in predicting geo-mechanical properties of stabilised clays—a review*. Geotechnics, 2021. **1**(1): p. 147-171.
155. Sheela, K.G. and S.N. Deepa, *Review on methods to fix number of hidden neurons in neural networks*. Mathematical problems in engineering, 2013. **2013**.
156. Ramkrishnan, R., et al. *Soil reinforcement and slope stabilization using natural jute fibres*. in *New Solutions for Challenges in Applications of New Materials and Geotechnical Issues: Proceedings of the 5th GeoChina International Conference 2018—Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes: From Failure to Sustainability, held on July 23 to 25, 2018 in HangZhou, China*. 2019. Springer.
157. Mai, H.-V.T., et al., *Investigation of ann model containing one hidden layer for predicting compressive strength of concrete with blast-furnace slag and fly ash*. Advances in Materials Science and Engineering, 2021. **2021**: p. 1-17.
158. Manual, T., *PLAXIS 2D*. Delft University of Technology & PLAXIS, Netherlands, 2016.
159. Van Baars, S., *100 year prandtl's wedge-intermediate report*, 2016, University of Luxembourg.
160. Bitar, I. and B. Richard. *Formulation d'une plaque Mindlin-Reissner à cinématique enrichie*. in *Colloque National, Association Française du Génie Parasismique 2019, AFPS*. 2019.

161. Georgiadis, M. and C. Anagnostopoulos, *Lateral pressure on sheet pile walls due to strip load*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1998. **124**(1): p. 95-98.
162. Kumar, B.D. and J. Mandal, *Study on Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Slopes*. International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 2008.
163. Tsige, D., S. Senadheera, and A. Talema, *Stability analysis of plant-root-reinforced shallow slopes along mountainous road corridors based on numerical modeling*. Geosciences, 2019. **10**(1): p. 19.
164. Fawaz, A., E. Farah, and F. Hagechade, *Slope stability analysis using numerical modelling*. American Journal of Civil Engineering, 2014. **2**(3): p. 60-67.
165. Liu, J.Q. and J.L. Liu. *Slope Stability Analysis with Finite Element Method*. in *Advanced Materials Research*. 2012. Trans Tech Publ.