

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département de **Génie civil et hydraulique**

N° :/2022

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie civil

SPECIALITE : Géotechnique

Thème

**Etude numérique de comportement des pieux composites sous
différentes charges**

Présenté Par : BOUKHEDENNA Youssra

Encadré Par : ARABET Leila

BOUROUIS Karima

Date de soutenance: 11 /09/2022

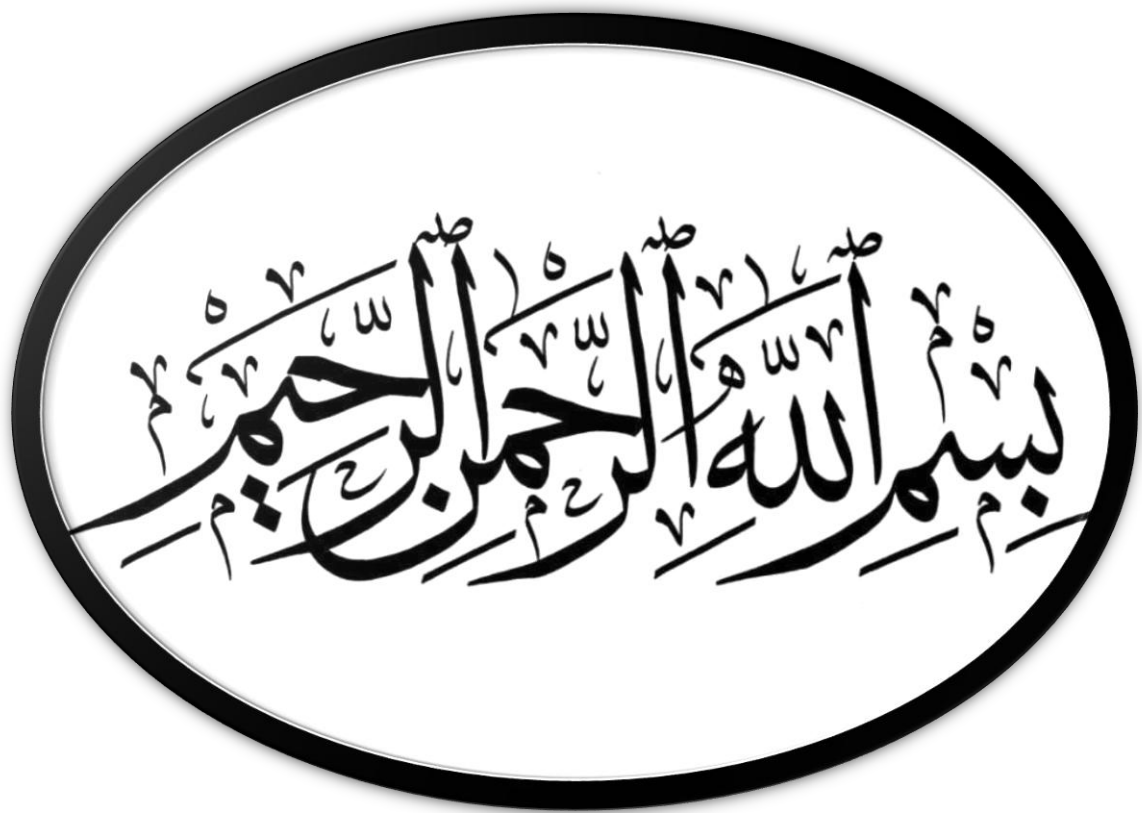
Jury de Soutenance

Président : BOUDJERDA Merouane Grade MCB Univ MSB Jijel

Encadreur : ARABET Leila Grade MAA Univ MSB Jijel

Examineur : LAAMARA Mohamed Grade Pr. Univ MSB Jijel

Promotion : 2021 /2022



Remerciements

Avant tout, nous remercions "Allah" de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté pour achever ce modeste travail.

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur Dr. **Arabat Leila**, d'avoir accepté la direction scientifique de ce travail ainsi que pour ses conseils, son aide précieuse et ses encouragements tout au long de ce travail.

Nous sommes très honorées à remercier :

Dr. **BOUDJERDA Merouane**, pour le grand privilège qu'elle nous a fait d'avoir accepté la Présidence de notre jury de soutenance ;

Pr. **LAAMARA Mohamed**, d'avoir accepté de consacrer du temps à examiner et juger ce travail.

Un chaleureux remerciement à nos parents pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et leur encouragements toutes les années d'étude.

Enfin Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour

Réaliser ce travail ; soit par leurs conseils et leurs connaissances scientifiques ; soit par leurs

Présence dans les moments difficiles. Sans oublier l'ensemble des enseignants ayant contribué à notre formation durant notre cycle d'étude.

Merci à Tous...

Dédicaces

Mon parcours universitaire s'est terminé après l'épuisement et les épreuves...

Et ici, je termine mon mémoire de fin d'étude avec toute la vigueur et l'activité.

Et je suis reconnaissante à tous ceux qui ont eu du mérite dans ma carrière et m'ont aidé.

Je dédie ce travail

À mes parents

En témoignage de l'amour, du respect et de la gratitude que je leur porte pour leur soutien et leur aide qu'ils m'ont apporté durant mes années d'études. Ils m'ont toujours soutenue et encouragé à suivre les chemins que je ne désirais. Jamais je ne les remercierai assez de m'avoir donné le meilleur d'eux-mêmes.

À mes frères et mes sœurs

À mes chères amies et mes camarades pour leurs encouragements permanents et leurs conseils, et surtout leur soutien moral

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du

Primaire, du moyen, du secondaire ou de

L'enseignement supérieur.

Boukhedenna Youssra

Dédicaces

Mon parcours universitaire s'est terminé après l'épuisement et les épreuves...

Et ici, je termine mon mémoire de fin d'étude avec toute la vigueur et l'activité.

Et je suis reconnaissante à tous ceux qui ont eu du mérite dans ma carrière et m'ont aidé.

Je dédie ce travail

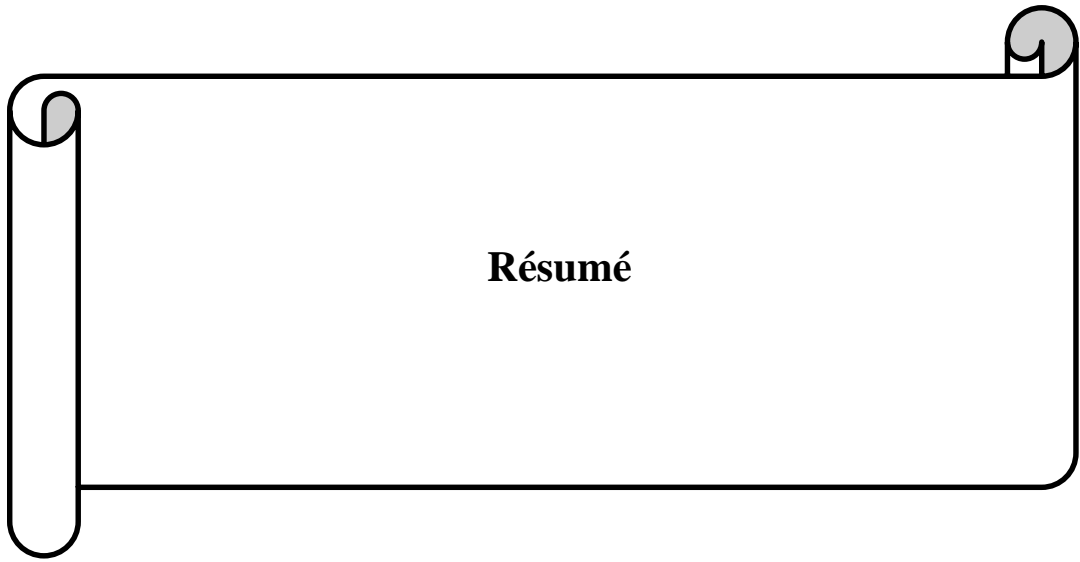
À mes parents

En témoignage de l'amour, du respect et de la gratitude que je leur porte pour leur soutien et leur aide qu'ils m'ont apporté durant mes années d'études. Ils m'ont toujours soutenue et encouragé à suivre les chemins que je ne désirais. Jamais je ne les remercierai assez de m'avoir donné le meilleur d'eux-mêmes.

À mes frères et mes sœurs

À mes chères amies et mes camarades pour leurs encouragements permanents et leurs conseils, et surtout leur soutien moral

Bourouis Karima



Résumé

Résumé :

Les matériaux de pieux les plus couramment utilisés sont l'acier, le béton et le bois. Ces matériaux peuvent se dégrader et le taux de dégradation peut être relativement rapide dans des environnements marins difficiles. Le coût élevé a stimulé l'intérêt pour les matériaux de pieu composites alternatifs tels que les polymères renforcés de fibres (PRF), les plastiques recyclés et les matériaux hybrides. Un projet de recherche a été entrepris pour étudier (1) le comportement des pieux composites isolés sous deux différentes charges statiques axiales ou latérale, (2) le comportement du groupe de pieux composites, en se basant sur le modèle de Yeou-Fong Li et al. 2021. Les résultats obtenus montrent que (1) le comportement dans le cas de pieu composite isolé est différent selon le matériau utilisé, type du sol d'ancrage et le type de chargement (2) le comportement du groupe de pieux composites est différent à ce du pieu isolé.

Mots clés : pieu composite, PLAXIS, modélisation numérique, polymères renforcés de fibres (PRF), plastiques recyclés, matériaux hybrides.

Abstract:

The most commonly used pile materials are steel, concrete and wood. These materials can degrade and the rate of degradation can be relatively rapid in harsh marine environments. The high cost has spurred interest in alternative composite pile materials such as fiber-reinforced polymers (FRP), recycled plastics and hybrid materials. A research project was to undertake (1) the behavior of isolated composite piles under two different axial or lateral static loads, (2) the behavior of the group of composite piles, based on the model of Yeou-Fong Li et al. 2021. The results showed that (1) the behavior in the case of a single composite pile is different depending on the material used; type of anchoring soil and the type of loading (2) the behavior of the group of composite piles is different away from the isolated pile.

Keywords: composite pile, PLAXIS, numerical modeling, fiber reinforced polymers (FRP), recycled plastics, hybrid materials.

الملخص:

المواد الأكثر استخدامًا في الخوازيق هي الفولاذ والخرسانة والخشب. يمكن أن تتحلل هذه المواد ويمكن أن يكون معدل التدهور سريعًا نسبيًا في البيئات البحرية القاسية. حفزت التكلفة المرتفعة لهته الخوازيق الاهتمام بمواد أخرى بديلة مثل البوليمرات المقواة بالألياف (FRP) والبلاستيك المعاد تدويره والمواد الهجينة. مشروعنا البحثي يدور حول دراسة (1) سلوك الخوازيق المركبة المعزولة تحت حملين مختلفين محوري أو جانبي، (2) سلوك مجموعة الخوازيق المركبة، بالاعتماد على نموذج Yeou-F Li وآخرون 2021. أظهرت النتائج (1) أن السلوك في حالة الخوازيق المركبة المعزولة يختلف باختلاف المادة المستخدمة ونوع تربة التثبيت ونوع التحميل (2) يختلف سلوك مجموعة الخوازيق المركبة عن تلك المعزولة.

الكلمات المفتاحية: الخازوق المركب، البلاستيك، النمذجة العددية، البوليمرات المقواة بالألياف (FRP)، البلاستيك المعاد تدويره، المواد الهجينة.

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des notations et abréviations

Introduction générale.....1

Chapitre 1 : Méthodes d'amélioration de sols

I-1 Introduction.....4

I-2 Historique sur le renforcement des sols.....5

I-3 Principe de renforcement des sols.....5

I-4 Les objectifs de renforcement des sols.....6

I-5 Les différents types de renforcement de sol.....8

I-5.1 Définitions des géosynthétiques.....13

I-5.2 Classification des géosynthétiques.....14

I-5.2.1 Les géotextiles.....14

I-5.2.2 Les géo-grilles.....14

I-5.2.3 Les géo filets.....14

I-5.2.4 Les géo membranes.....14

I-5.2.5 Les géo-composites.....14

I-5.2.6 Les géo synthétiques bentonitiques (GSB).....14

I-5.2.7 Les géo tuyaux14

I-6 Renforcement de sol par inclusions rigides.....15

I-7 Renforcement par amélioration dans la masse.....15

I-8 Renforcement de sol par colonnes ballastées.....17

I-9 Conclusion.....17

Chapitre 2 : Pieux Composites

II-1 Introduction	19
II-2 Historique sur les pieux composites.....	20
II-3 Les différents types de pieux composites.....	20
II-3.1 Les pieux composites en PRF.....	20
II-3.2 Les pieux à noyau en acier composite.....	22
II-3.3 Les pieux à matrice plastique renforcée.....	23
II-3.4 Les pieux pultrudés en fibre de verre.....	25
II-3.5 Les pieux en plastique renforcé par des fibres de verre.....	26
II-3.6 Les pieux creux en FRP.....	27
II-4 Les avantages et les inconvénients de pieux composites	28
II-5 Conception de pieux composites	29
II-5.1 Battage	30
II-5.1.1 Marteaux de battage.....	30
II-5.1.2 Résistance du sol aux forces motrices.....	30
II-5.1.3 Capacité du pieu à transférer les forces motrices à la pointe.....	31
II-5.1.4 Résistance du pieu à résister aux forces motrices.....	31
II-5.2 Chargement axiale	32
II-5.3 Chargement latérale	32
II-5.4 Capacité à long terme	33
II-6 Impact environnemental.....	35
II-7 Conclusion	36

Chapitre 3 : Étude de comportement d'un pieu composite

III.1 Introduction	38
III.2 Logiciel de modélisation numérique.....	38
III.3 Présentation de la procédure de modélisation	39
III-3.1 L'objectif d'étude	39
III-3.2 Modèle géométrique.....	39
III-3.3 Modèles constitutifs et paramètres géotechniques de modélisation.....	40
III-4. Modélisation numérique	41
III-4.1 Cas d'une seule couche de sol.....	41
III-4.1.1 Chargement axial	41
III-4.1.2 Chargement latéral.....	48
III-4.2 Cas de deux couches de sol.....	55
III-4.2.1 Chargement axial.....	56
III-4.2.2 Chargement latéral.....	64
III-4.3 Etude paramétrique.....	71
III-4.3.1 Variation d'angle du frottement	71
III-4.3.2 Variation de sol d'ancrage.....	73
III-5 Conclusion.....	77

Chapitre 4 : Étude de comportement du groupe de pieux composites

IV-1 Introduction.....	77
IV-2 Présentation de la procédure de modélisation.....	78
IV-2.1 L'objectif d'étude.....	78
IV-2.2 Modèle géométrique.....	79
IV-2.3 Les paramètres géotechniques de modélisation.....	80
III-3. Modélisation numérique.....	80
IV-3.1 Présentation de la modélisation numérique.....	80
IV-3.2 Résultats de la modélisation numérique.....	81
IV-3.2.1 Résultats du talus d'origine.....	82
IV-3.2.2 Résultats du talus d'origine après éventuelle érosion du lit de rivière.....	83
IV-3.2.3 Résultats du talus protégé en groupe de pieux composites.....	84
IV-3.2.4 Résultats du talus protégé en groupe de pieux composites après une possible érosion du lit de la rivière.....	85
III-4 Conclusion.....	86
Conclusion générale et perspectives.....	88
Références bibliographies.....	90
Annexe	

Liste De Figures

Chapitre I

Figure I.1 : Exemples de géo-cellules.....	7
Figure I.2 : Structure géo-composite.....	7
Figure I.3 Les géotextiles.....	8
Figure I.4 : Géo-grilles Tenseur.....	9
Figure I.5 : Géo-filet.....	9
Figure I.6 : Les géo-membranes.....	10
Figure I.7 : Une géo-membrane bitumineuse.....	10
Figure I.8 : Diffèrent types de géo-composites.....	11
Figure I.9 : Produit apparentés aux géo membranes (benthoniques).....	12
Figure I.10 : Les géo-tuyaux.....	12
Figure I.11 : Réseau d'inclusions rigides.....	13
Figure I.12 : Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales.....	13
Figure I.13 : Renforcement Par amélioration dans la masse.....	14
Figure I.14 : Principe de renforcement des sols par colonnes ballastées.....	15
Figure I.15 : Exemple de vibreur Keller (<i>Voie sèche, site : mosquée de Boudouaou</i>).....	16
Figure I.16: Exemple de vibreur Keller (<i>Voie humide</i>).....	16

Chapitre II

Figure II.1 : Dégradation des pieux : (a) pieux en BA (b) pieux en acier (c) pieux en bois.....	18
Figure II.2. : Pieu composite en PRF.....	20
Figure II.3. : Les pieux à noyau en acier composite (SRP).....	22
Figure II.4. : Les pieux à matrice plastique renforcée (RPF).....	24
Figure II.5. : Le pieu pultrudé en fibre de verre (PGF).....	25
Figure II.6. : Les pieux en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF).....	26
Figure II.7. : Les pieux creux en FRP.....	27
Figure III. 8 : Relation de charge en flexion.....	33

Chapitre III

Figure III.1 : Modèle numérique : (a) Chargement axial (b) Chargement latéral.....	39
Figure III.2 : la déformation du pieu PRF sous une charge de rupture.....	40
Figure III.3 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PRF sous une charge de rupture.....	41
Figure III.4 : la déformation du pieu SRP sous une charge de rupture.....	41
Figure III.5 : La contrainte déviatorique « q » du pieu SRP sous une charge de rupture.....	42
Figure III.6 : la déformation du pieu RPF sous une charge de rupture.....	42
Figure III.7 : La contrainte déviatorique « q » du pieu RPF sous une charge de rupture.....	43
Figure III.10 : la déformation du pieu PGF sous une charge de rupture.....	43
Figure III.11 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PGF sous une charge de rupture.....	44
Figure III.12 : la déformation du pieu GPRF sous une charge de rupture.....	44
Figure III.13 : La contrainte déviatorique « q » du pieu GPRF sous une charge de rupture.....	45
Figure III.14 : la déformation du pieu creux en FRP sous une charge de rupture.....	45
Figure III.15 : La contrainte déviatorique « q » du pieu FRP sous une charge de rupture.....	46
Figure III.16 : Comparaison entre les différents pieux composites étudiés (charge axiale).....	47
Figure III.17 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PRF sous une charge de rupture.....	47
Figure III.18 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (PRF).....	48

Figure III.19 : La contrainte déviatorique « q » du pieu SRP sous une charge de rupture.....	48
Figure III.20 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (SRP).....	49
Figure III.21 : La contrainte déviatorique « q » du pieu RPF sous une charge de rupture.....	49
Figure III.22 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (RPF).....	50
Figure III.23 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PGF sous une charge de rupture.....	50
Figure III.24 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (PGF).....	51
Figure III.25 : La contrainte déviatorique « q » du pieu GPRF sous une charge de rupture.....	51
Figure III.26 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (GPRF).....	52
Figure III.27 : La contrainte déviatorique « q » du pieu creux en FRP sous une charge de rupture.....	52
Figure III.28 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (creux en FRP).....	53
Figure III.29 : La force horizontale en fonction de déplacement pour les différents types des pieux composites.....	54
Figure III.30 : Modèle géométrique des pieux ancrés en deux couches de sol (a) chargement axial (b) chargement latéral.....	55
Figure III.31 : La déformation du pieu PRF sous une charge de rupture (deux couches).....	56
Figure III.32 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PRF sous une charge de rupture (deux couches).....	57

Figure III.33 : La déformation du pieu SRP sous une charge de rupture (deux couches).....	57
Figure III.34 : La contrainte déviatorique « q » du pieu SRP sous une charge de rupture (deux couches).....	58
Figure III.35 : La déformation du pieu RPF sous une charge de rupture (deux couches).....	58
Figure III.36 : La contrainte déviatorique « q » du pieu RPF sous une charge de rupture (deux couches).....	59
Figure III.37 : La déformation du pieu PGF sous une charge de rupture (deux couches).....	59
Figure III.38 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PGF sous une charge de rupture (deux couches).....	60
Figure III.39 : La déformation du pieu GPRF sous une charge de rupture (deux couches).....	60
Figure III.40 : La contrainte déviatorique « q » du pieu GPRF sous une charge de rupture (deux couches).....	61
Figure III.41 : La déformation du pieu creux en FRP sous une charge de rupture (deux couches).....	61
Figure III.42 : La contrainte déviatorique « q » du pieu creux en FRP sous une charge de rupture (deux couches).....	62
Figure III.43 : Comparaison entre les différents pieux composites étudiés (cas de deux couches).....	63
Figure III.44 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PRF sous une charge de rupture.....	64
Figure III.45 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (PRF).....	64
Figure III.46 : La contrainte déviatorique « q » du pieu SRP sous une charge de rupture.....	65

Figure III.47 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (SRP).....	65
Figure III.48 : La contrainte déviatorique « q » du pieu RPF sous une charge de rupture.....	66
Figure III.49 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (RPF).....	66
Figure III.50 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PGF sous une charge de rupture.....	66
Figure III.51 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (PGF).....	67
Figure III.52 : La contrainte déviatorique « q » du pieu creux en GPRF sous une charge de rupture.....	68
Figure III.53 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (GPRF).....	68
Figure III.54 : La contrainte déviatorique « q » du pieu creux en FRP sous une charge de rupture.....	69
Figure III.55 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (creux en FRP).....	69
Figure III.60 : La force horizontale en fonction de déplacement pour les différents types des pieux composites (deux couches).....	71
Figure III.61 : Variation de la charge ultime axiale en fonction d'angle du frottement pour les différents types des pieux composites.....	72
Figure III.62 : Variation de la charge ultime latérale en fonction d'angle du frottement pour les différents types des pieux composites.....	73
Figure III.63 : Comparaison entre les différents pieux composites ancrés dans l'argile (charge axiale).....	74
Figure III.64 : Comparaison entre les différents pieux composites ancrés dans l'argile (charge latérale).....	75

Chapitre IV

Figure IV.1 : (a) Le site réel d'étude, (b) le modèle géométrique étudié.....	79
Figure IV.2 : La section du pieu composite étudié d'après Yeou-Fong Li et al. 2021 [1].....	79
Figure IV.3 : Maillage raffiné du modèle utilisé.....	81
Figure IV.4 : Les eaux souterraines à l'état d'équilibre constituent la condition initiale des eaux souterraines.....	82
Figure IV.5 : Cercle de glissement et coefficient de sécurité du talus d'origine.....	83
Figure IV.6 : La zone d'érosion du lit de la rivière (zone désactivée en PLAXIS)	83
Figure IV.7 : Cercle de glissement et coefficient de sécurité du talus d'origine après éventuelle érosion du lit de la rivière.....	84
Figure IV.8 : Histogramme du coefficient de sécurité en cas du talus protégés talus protégé en différents types du groupe de pieux composites	85
Figure IV.9 : Histogramme du coefficient de sécurité en cas du talus protégé en différents types du groupe de pieux composites après une possible érosion du lit de la rivière.....	86

Liste Des Tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Les projets réalisés en pieux composites au monde.....	19
-----------------------------------------------------------------------	----

Chapitre III

Tableau III.1 : Propriétés du sol.....	39
Tableau III.2 : Propriétés des pieux composites.....	39
Tableau III.3 : Les déplacements et les contraintes déviatoriques « q » des différents pieux composites.....	46
Tableau III.4 : Les différentes contraintes des pieux composites en charge latérale.....	53
Tableau III.5 : Les déplacements et les contraintes déviatoriques « q » des différents pieux composites (deux couches).....	62
Tableau III.6 : Les différentes contraintes des pieux composites en charge latérale.....	70
Tableau III.7 : Variations de la charge ultime axiale et les déplacements des pieux composites en fonction d'angle du frottement.....	71
Tableau III.8 : Variations de la charge ultime latérale des pieux composites en fonction d'angle du frottement.....	73
Tableau III.9 : les contraintes déviatoriques et les déplacements des pieux composites ancrés dans l'argile (charge axiale).....	74
Tableau III.10 : les contraintes déviatoriques et les déplacements des pieux composites ancrés dans l'argile (charge latérale).....	75

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Caractéristiques mécaniques des différents pieux composites utilisés.....	80
Tableau IV.2 : Résultats obtenus du talus protégé en groupe de pieux composites.....	84
Tableau IV.3 : Résultats obtenus du talus protégé en groupe de pieux composites après une possible érosion du lit de la rivière.....	85



Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

*T*raditionnellement, les pieux sont constitués de matériaux tels que l'acier, le béton et le bois. Ces matériaux de pieux ont une durée de vie limitée et des coûts de maintenance élevés lorsqu'ils sont utilisés dans des environnements marins difficiles. Les problèmes de dégradation des pieux conventionnels comprennent l'attaque des chlorures sur le béton, la corrosion de l'acier et l'attaque des foreurs marins sur les pieux en bois. Les coûts élevés de réparation et de remplacement conduisent à la nécessité d'étudier la faisabilité de l'utilisation de matériaux composites pour les fondations sur pieux. Les matériaux composites sont considérés comme une alternative intéressante pour les environnements marins et autres environnements difficiles car ils résistent aux mécanismes de dégradation mentionnés ci-dessus.

*L*es pieux composites sont disponibles sur le marché depuis la fin des années 1980, mais jusqu'à présent, leur utilisation s'est limitée principalement aux pieux de défenses marines, aux pieux porteurs pour les structures légères et aux pieux d'essai expérimentaux. Les pieux composites n'ont pas encore été largement acceptés dans l'industrie du génie civil, principalement en raison de l'absence d'un long historique de performances, de la rareté d'essais de charge sur le terrain bien documentés et les recherches d'étude de comportement de ces types des pieux.

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer le comportement des pieux composites sous différentes charges statiques appliquées et dans les conditions drainées. Pour établir cet objectif, plusieurs informations et de données de performance ont été recueillies tels que les caractéristiques géotechniques des pieux composites.

*C*e mémoire est organisé en quatre chapitres et une annexe. Le premier chapitre présente des informations générales sur les méthodes d'amélioration des sols.

*L*e deuxième chapitre présente les différents types des pieux composites et une revue de la littérature sur les différents facteurs qui affectent leurs comportements.

*L*e troisième chapitre présente les résultats de l'étude numérique sur le comportement statique (chargement statique axial ou latéral) d'un seul pieu composite (pour cinq types de matériaux de pieux composites) ancré dans une couche de sable et deux couches de sol avec une étude paramétrique. Les matériaux du sol, les matériaux des pieux et les procédures de modélisation utilisées sont également décrits au chapitre trois.

*L*e quatrième chapitre présente les résultats de l'étude numérique du comportement du groupe de pieux composites (pour cinq types de matériaux de pieux composites), en se basant sur le modèle de Yeou-Fong Li et al. 2021.

*U*ne conclusion générale et des recommandations pour les travaux futurs sont présentées au fin de ce mémoire.

*L*es résultats des modélisations numériques effectués pour l'étude du comportement du groupe de pieux composites sont présentés en annexe

I. Introduction

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens.

Au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

I.2 Historique sur le renforcement des sols

Les principes de base du renforcement du sol existent déjà dans la nature et sont démontrés par les animaux, les plantes et les oiseaux. La forme moderne du renforcement du Sol a été appliquée pour la première fois par Vidal (1969). Basé sur le concept de Vidal, Ingénieur des Ponts et Chaussées, et architecte, qui a publié les premiers résultats de ses Recherche en 1963. « Au départ tout commence à la manière d'un jeu, en construisant un Château de sable sur la plage de Saint-Tropez, racontait Henri Vidal lui-même. Mais le sable s'égrène. Alors est venue l'idée d'armer la construction avec des aiguilles de pins ». Et de cette idée est né le principe général du sol renforcé et le concept particulier de la terre renforcée. [1]

Et après son invention, la technique de Terre renforcée a connu un large développement Depuis quelques années dans le domaine du génie civil et une progression énorme. Cependant, Depuis le début des années quatre-vingt, les technologies de renforcement des sols utilisant des inclusions diverses ont fait des progrès considérables. Si les mélanges de plusieurs sols (Stabilisation dite mécanique) ou l'addition de faibles quantités de ciment, de chaux ou de Bitume (stabilisation chimique), le pré-chargement allié au drainage, ou les injections sont des méthodes employées depuis longtemps pour améliorer les terrains défectueux, les renforcements par inclusions ont permis d'obtenir des résultats spectaculaires. La terre armée, C'est-à-dire la mise en place, dans un remblai en construction par couches d'armatures plates en acier galvanisé liées à une peau formée d'écailles en béton armé fut dans les années soixante, le précurseur des renforcements par inclusions. Le renforcement par géo-grilles, par géotextiles perméables, par géo-membranes étanches, éventuellement par des systèmes mixtes calandrés drainant d'un seul côté, par la création de massifs par projection de fils et de sable (Texsol), par

clouage, par ancrages battus ou forés scellés, précontraints ou non, ont modernisé et étendu la gamme des procédés.

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

I.3 Principe de renforcement des sols

Le renforcement du sol vise à pallier les problèmes de tassement, de portance ou de Liquéfaction d'un ouvrage. C'est une option qui permet de préserver le mode de fondation le plus économique et le plus simple à mettre en œuvre, qui n'est autre que les fondations superficielles. Le principe du sol renforcé est basé sur l'amélioration de ses caractéristiques de résistance.

La construction d'ouvrage sur des tels sols fait appel à des techniques relativement récentes pour traiter les sols afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques.

I.4. Objectifs de renforcement des sols

On renforce un sol pour les raisons suivantes :

- Augmenter la résistance du sol afin d'améliorer sa capacité portante ;
- Assurer la stabilité temporaire des travaux d'excavation sans recours aux systèmes d'étaie conventionnels ;
- Arrêter le mouvement d'une pente instable pour permettre des travaux de confortement permanent ;
- Diminuer la perméabilité des sols ;
- Permettre le percement d'un tunnel dans un terrain difficile ;
- Accélérer la consolidation d'un dépôt d'argile ;
- Contrôler les infiltrations d'eau autour d'un ouvrage ;
- Diminuer le potentiel de déformation volumique des sols ;
- Homogénéiser les sols pour réduire le risque de tassement différentiel ;
- Réduire la gélivité ;
- Effectuer des travaux de reprise en sous-œuvre ;
- Stabiliser un remblai nouvellement mis en place.

I.5 Les différents types de renforcement de sols

I.5.1 Définitions des géosynthétiques

En Génie Civil, les polymères font partie des matériaux qui sont utilisés dans les différents ouvrages géotechniques de soutènement, de protection de bassins d'étanchéité, sous les chaussées, dans les tunnels...etc. Leur emploi nécessite la maîtrise de leur comportement à long terme (la durée de vie exigée) et qui est généralement de l'ordre de 100 ans).

En règle générale, les défaillances de ces ouvrages sont d'ordre mécanique. La connaissance des lois de comportement (fluage, fatigue...) permet, en principe, d'établir des règles de conception garantissant que si la structure initiale du polymère est préservée, la rupture sera évitée dans un délai compatible avec les attentes des utilisateurs. Cependant, les polymères réagissent lentement avec leur environnement (en particulier avec l'oxygène) et l'évolution de leur structure se traduit par des ruptures prématurées, d'où l'importance pratique d'études de vieillissement, de ses mécanismes, de sa cinétique, et de ses conséquences.

Les principaux facteurs de vieillissement des polymères sont l'agressivité du milieu (oxygène, acides, bases, solvants ...etc.), la fatigue dynamique, la température et les rayonnements UV, tous ces facteurs pouvant évidemment être combinés. Dans les conditions d'emploi des géotextiles, le vieillissement du polypropylène (PP par la suite) est dû à la thermo-oxydation du polymère à basse température ($< 50^{\circ}\text{C}$) dans des atmosphères appauvries en oxygène. Il faut également noter que si ces matériaux sont en contact avec une phase aqueuse, l'influence de cet environnement sur la cinétique de thermo-oxydation doit être prise en compte.

Les géosynthétiques peuvent être produits à partir de différents polymères, polyester (PET) polyvinyle alcool (PVA), polypropylène (PP). L'avantage du PET est un faible allongement lié à une grande résistance à la traction (haute ténacité). L'avantage du PVA est un allongement extrêmement bas et une excellente résistance chimique. L'avantage du PP est aussi sa très bonne résistance chimique avec un allongement acceptable.

Les produits se distinguent par leurs propriétés géométriques en :

- Bandelettes, filaments : Produits plans, avec des dimensions typiques de l'ordre de 3-5m de largeur et d'environ 50-300m de long, tandis que l'épaisseur de l'ordre de quelques Millimètres ;

- Produits volumétriques, dans ce groupe, nous pouvons inclure principalement les Géo-cellules, qui ont la troisième dimension (hauteur) dans la fourchette comprise entre environ 0,1 et 0,25 m ; très souvent ils sont fabriqués à partir de bandes qui sont localement connectées et une fois étirées les cellules 3D sont créées, par exemple, sous la forme de nid d'abeilles.



Figure I.1 : Exemples de géo-cellules.

De la classification ci-dessus les plus souvent utilisés sont les produits plans et parmi eux, il est possible de distinguer : les géotextiles, les géo membranes (membrane plane imperméable à partir de polymères d'épaisseur entre environ 0,5 et 3 mm), les gorilles, les géo composites (produits créés par la combinaison de plus d'un géo synthétique).



Figure I.2 : Structure géo-composite.

Le bon fonctionnement du renforcement exige de la part du géosynthétique, un faible allongement sous sollicitation, et un choix judicieux doit être réalisé en fonction du type de sol. Pour des sols graveleux et non cohésifs (par exemple sables et graviers), les géo grilles conviennent mieux, tandis que les géotextiles tissés et les géo composites sont plus adaptés aux sols fins et homogènes (argiles,...).

Les produits géosynthétiques recèlent deux fonctions principales à savoir :

Fonctions mécaniques :

Les géosynthétiques sont utilisés pour les fonctions mécaniques pour régler des problèmes de :

- Séparation.
- Renforcement.
- Protection.
- Lutte contre l'érosion.

Les fonctions hydrauliques :

Les géosynthétiques sont utilisés pour les fonctions hydrauliques pour régler des problèmes de :

- Filtrage.
- Drainage.

I.5.2 Classification des géosynthétiques :

Les géosynthétiques peuvent être généralement classés en catégories selon le mode de fabrication [2]. Les dénominations courantes et de brèves descriptions des géosynthétiques sont :

I.5.2.1 Les géotextiles

Ils sont des nappes continues de fibres ou filaments tissés, non-tissés, tricotés ou thermo soudés. Les nappes sont souples et perméables et ressemblent en général à des textiles. Les géotextiles sont utilisés pour des applications en séparation, filtration, drainage, renforcement et contrôle de l'érosion. Ou les géotextiles sont des tissus généralement en matériaux synthétiques, destinés aux travaux de bâtiment, de génie civil et d'agriculture. Ils sont souvent et improprement appelés « Bidim », du nom du leader historique des fabricants de ce produit.



Figure I.3 Les géotextiles

I.5.2.2 Les géo-grilles

Les géo-grilles sont dotées d'une structure plane à base de polymère, constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistant à la traction et pouvant être assemblées par extrusion, par collage ou par entrelacement, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants. Les géo-grilles sont le plus souvent utilisées pour le renforcement de sol. Une géo-grille peut-être mono-axiale, bi-axiale, ou triaxiale, illustrée dans la Figure I.4 ci-dessous :

- **Mono-axiale** la résistance à la traction est plus importante dans un sens (longitudinal ou transversal) que dans l'autre.
- **Bi-axiale** la résistance à la traction est sensiblement équivalente dans le sens longitudinal et transversal ;
- **Triaxial**

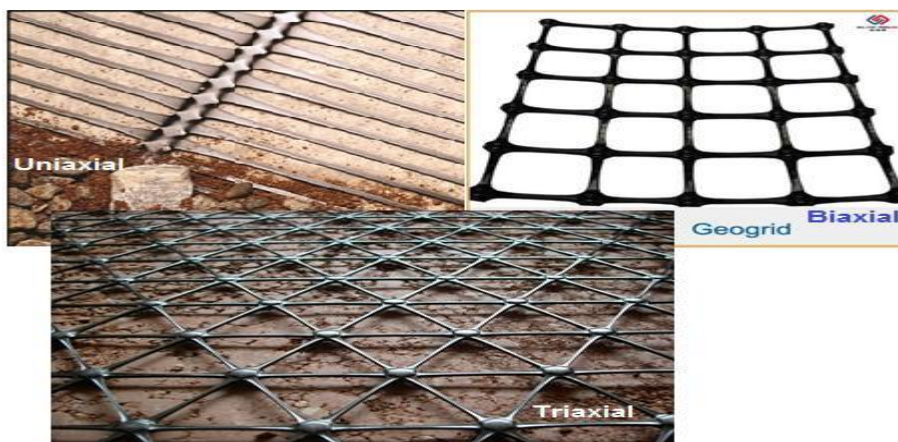


Figure I.4 : Géo-grilles Tenseur.

I.5.2.3 Les géo filets

Sont des matériaux analogues aux grilles, constitués de deux ensembles de brins grossiers parallèles de polymères extrudés, s'entrecroisant selon un angle aigu constant. Le maillage forme une nappe ayant une porosité dans le plan qui est utilisée pour véhiculer des débits relativement importants de fluides ou de gaz.



Figure I.5 : Géo-filet.

I.5.2.4 Les géo membranes

Une géo-membrane est un géo-synthétique à très faible perméabilité est bien adaptée au génie civil. Son utilisation est très simple, et la matière utilisée dans la géo-membrane est mince et souple, et très étanche qui est utilisée comme barrières contre les fluides. Une géo-membrane qui est illustrée dans la figure I.6 est étanche au liquide même sous des déformations de service, principalement en traction.



Figure I.6 : Les géo-membranes.

On distingue deux types de géo membranes : Géo membrane bitumineuse Une géo membrane bitumineuse est un produit de structure assemblée en usine constituée de géo synthétiques. Se présentant sous la forme d'une feuille et dans laquelle la fonction d'écran est essentiellement assurée par du bitume, comme le montre la figure 1.7 ci-après.



Figure I.7 : Une géo-membrane bitumineuse.

Géo-membrane de synthèse Une géo-membrane de synthèse est un géo-synthétique permettant d'assurer la fonction d'étanchéité. Elle est constituée de polymère, composé principalement d'élastomère et de thermoplastique. Les résines thermoplastiques les plus utilisées sont le polyéthylène haute densité (PEHD), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC). Les produits apparentés aux géomembranes sont les géosynthétiques bentonitiques

I.5.2.5 Les géo-composites

Les géo-composites sont des produits composés de deux matériaux ou plus, dont au moins l'un des composants est à base de géo-synthétique. Afin d'assurer plusieurs fonctions dans une structure, la plupart des géo composites sont utilisés dans les applications de drainage et de confinement des déchets. (ASTM, 1997). Voici quelque combinaison commune ; illustrée dans la figure I.8.

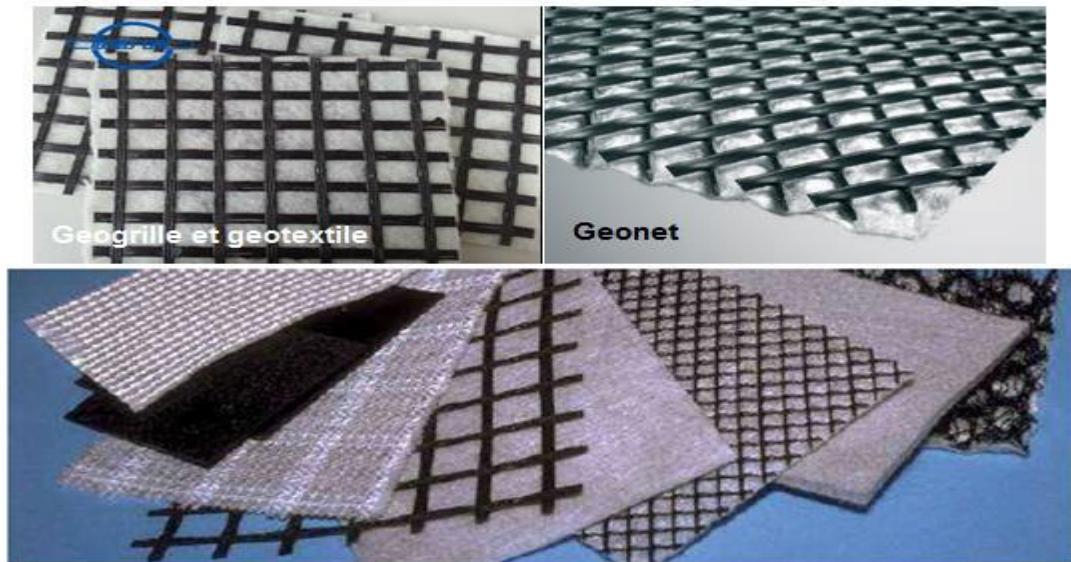


Figure I.8 : Différent types de géo-composites.

I.5.2.6 Les géo synthétiques bentonitiques (GSB)

Les géosynthétiques bentonitiques sont des produits de structure assemblée en usine, formés de géosynthétiques, se présentant d'un matériau composite étanche sous la forme d'une feuille et dans laquelle la fonction d'écran est essentiellement assurée par de l'argile. Il existe deux types de géosynthétiques bentonitiques illustrés dans la figure I.9 suivante :

- ceux pour lesquels, l'argile est fixée entre deux géotextiles ;
- ceux pour lesquels, l'argile est collée sur une géo membrane.



Figure I.9 : Produits apparentés aux géo membranes (benthoniques).

I.5.2.7 Les géo tuyaux

Sont des tuyaux perforés ou des tuyaux pleins en polymères utilisés pour le drainage des liquides ou gaz. Dans certains cas les tuyaux perforés sont entourés d'un filtre géotextile.



Figure I.10 : Les géo-tuyaux

I.6 Renforcement de sol par inclusions rigides

Le renforcement par inclusions rigides verticales est envisagé pour des ouvrages de types remblais, dallages, silos... lorsque le sol est trop compressible pour supporter sans tassements importants l'ouvrage à construire. On caractérise le renforcement par inclusions rigides verticales par la combinaison entre les inclusions qui assurent le renforcement et une plateforme de transfert de charge disposée entre le réseau d'inclusions et l'ouvrage ; cette plateforme assure la répartition de la charge entre les inclusions et le sol compressible (Figure I.11). Les inclusions peuvent être de différentes natures et construites par différentes méthodes que nous détaillerons par la suite. Ce type de fondations peut être défini par le fait que la charge s'applique simultanément aux têtes d'inclusions et au sol compressible, ce qui la différencie des méthodes de fondations traditionnelles. Le dimensionnement du réseau d'inclusions et de la plateforme de transfert de charge doit être tel que la part transmise aux inclusions soit beaucoup plus grande que celle transmise au sol. [3]



Figure I.11 : Réseau d'inclusions rigides.

Le rôle des inclusions est de transmettre la charge due au poids de l'ouvrage et les charges de service vers le substratum afin de réduire ou même annuler les tassements. Pour cela, les inclusions sont posées sur la couche dure ou légèrement ancrées dans celle-ci. Les inclusions peuvent aussi être coiffées par une tête plus large afin d'augmenter le taux de couverture et optimiser l'efficacité du dispositif. Les inclusions sont mobilisées d'une part par la charge directement appliquée sur leur tête mais aussi par l'effet d'accrochage du sol encaissant lorsque celui-ci tasse sous le chargement appliqué par le poids de l'ouvrage.

La plateforme de transfert de charge a un rôle tout aussi important puisque les mécanismes assurant la répartition de la charge s'y développent. Cette plateforme peut être composée de matériaux granulaires traités ou non traités ; elle peut être renforcée ou non par une ou plusieurs nappes géo synthétiques ; sa hauteur et ses caractéristiques mécaniques sont des paramètres importants vis-à-vis du développement des mécanismes de transfert de charge. [3]

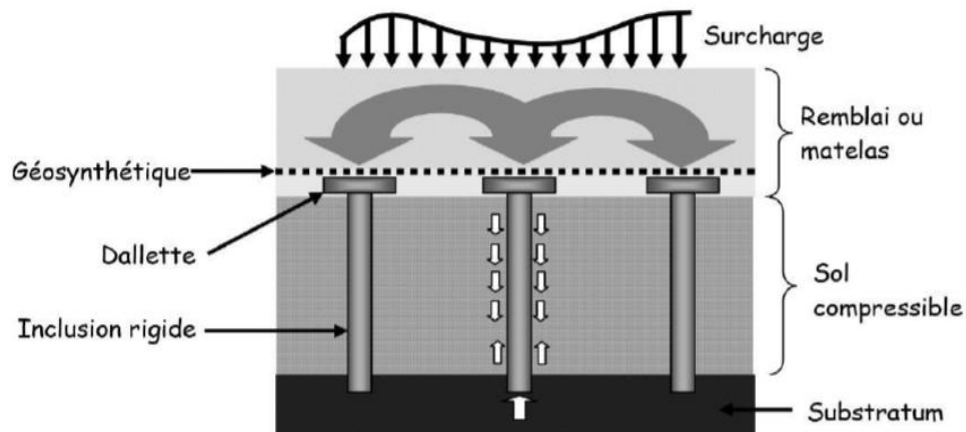


Figure I.12 : Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales.

I.7 Renforcement Par amélioration dans la masse

Ces techniques de vibre compactage permettent de renforcer les caractéristiques mécaniques du sol traité en changeant ses caractéristiques intrinsèques. La résistance au cisaillement des sols compressibles est augmentée pour assurer une meilleure portance, et leur compressibilité est réduite. Pour cela, on crée des colonnes au moyen d'une foreuse et d'un vibreur. Les vibrations permettent de compacter le terrain existant et le ballast vient combler le vide nouvellement créé. Cette technique est surtout utilisée sur les sols granuleux. [4]

Entre autres, il existe des techniques d'infiltration de liants ou de mortier. Ces techniques sont surtout utilisées dans le cas où le sol est constitué d'argiles gonflantes. Elles s'adaptent aussi bien aux constructions neuves qu'aux ouvrages anciens



Figure I.13 : Renforcement Par amélioration dans la masse.

I.8 Renforcement de sol par colonnes ballastées

Le procédé des colonnes ballastées est une technique d'amélioration de sol permettant de créer des colonnes de granulats expansées afin d'augmenter la portance d'un sol et d'en réduire sa compressibilité. Cette technique est particulièrement performante dont il est possible de mettre en œuvre des semelles superficielles avec une contrainte de sol de l'ordre de 0,2 à 0,3 MPa. C'est une alternative aux fondations profondes de type pieux et dalle portée, ou aux fondations semi-profondes de type puits. En effet, construire un ouvrage sur des colonnes ballastées permet de le fonder comme sur du «bon sol» et donc de respecter les règles usuelles de fondations superficielles. [5]

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives (Figure I.14). Ces colonnes ne comportent en particulier aucun liant sur leur hauteur. Elles peuvent être réalisées en maillages réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée. Leur dimensionnement tient compte du type d'ouvrage, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels ainsi que de la nature du sol à traiter.

Cette technique est utilisée dans les sols cohérents tels que les limons et les argiles. L'introduction latérale du ballast à la base du vibreur est réalisée soit gravitaire ment soit à l'aide d'une pompe à graviers. Ce remplissage est effectué par couches successives tout en maintenant la vibration afin de compacter le ballast et de continuer à refouler le sol. Dans certains cas particuliers, il est possible de procéder à un remplissage complémentaire de coulis bentonite-ciment simultanément à la mise en place du ballast à l'aide d'un tube latéral.

L'ensemble de ces opérations est réalisé par passes remontantes sur la totalité de la hauteur de terrain à consolider. [5]

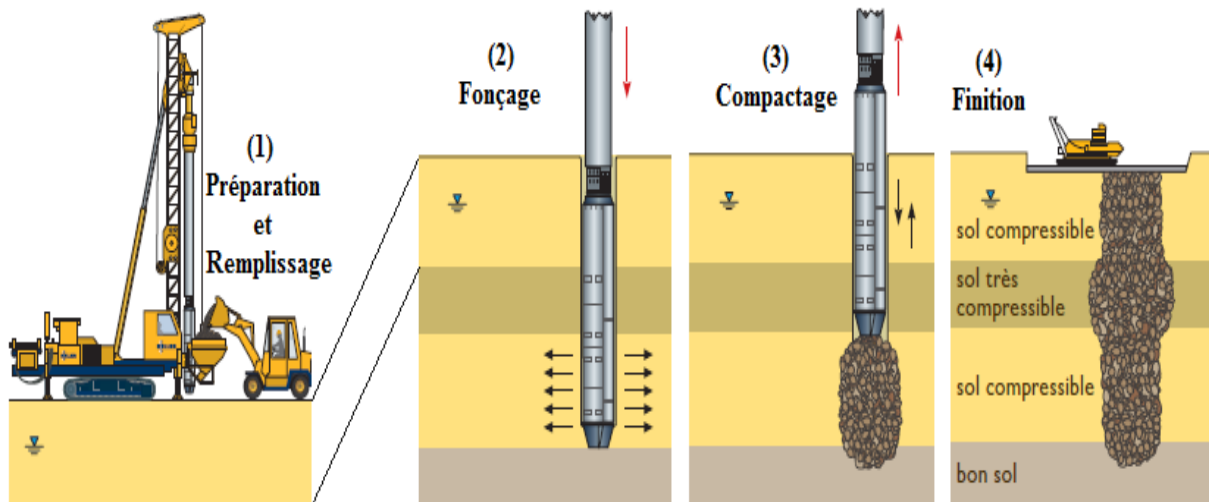


Figure I.14 : Principe de renforcement des sols par colonnes ballastées.

La réalisation des colonnes ballastées se fait suivant deux différentes techniques :

✚ Par voie sèche :

On utilise le lançage à l'air (Figure I.15). La réalisation des colonnes ballastées par voie sèche, dite encore par vibre- refoulement consiste à :

- auto-foncer le vibreur directement dans le sol par refoulement à l'aide de l'air jusque à la profondeur désignée ;
- remonter progressivement le vibreur tout on laissant descendre par gravité et par pression d'air, le ballast approvisionné par chargeur dans une benne coulissant le long du mât ;
- compacter le ballast par passes successives de l'ordre de 0.5 m jusqu'à la finition de la colonne



Figure I.15 : Exemple de vibreur Keller (Voie sèche, site : mosquée de Boudouaou)

✚ Par voie humide

On utilise le lançage à l'eau. Le choix de l'outil et de la méthode de réalisation des colonnes dépend de la nature et de l'état de saturation du sol, des caractéristiques du matériau d'apport ainsi que du domaine d'utilisation du terrain renforcé. Les matériaux d'apport doivent donc être de qualité et de granulométrie contrôlée et doivent être les plus homogènes possibles (graves naturelles, roulées ou concassées). [5]

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

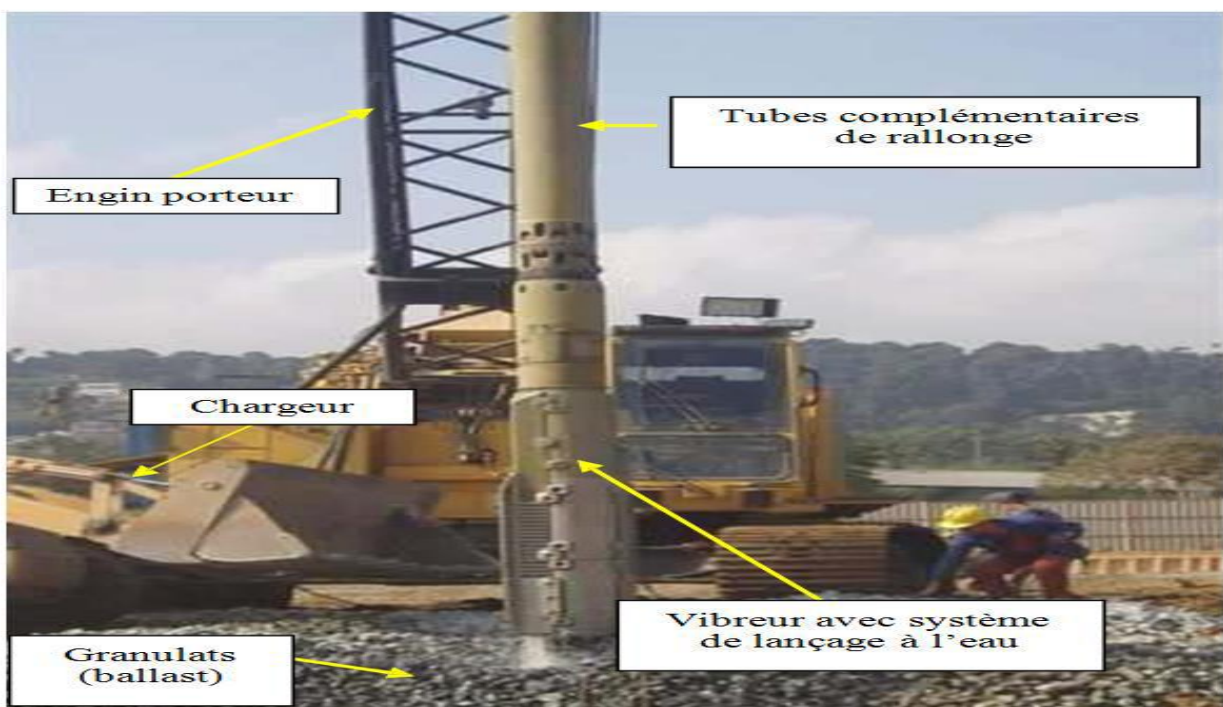
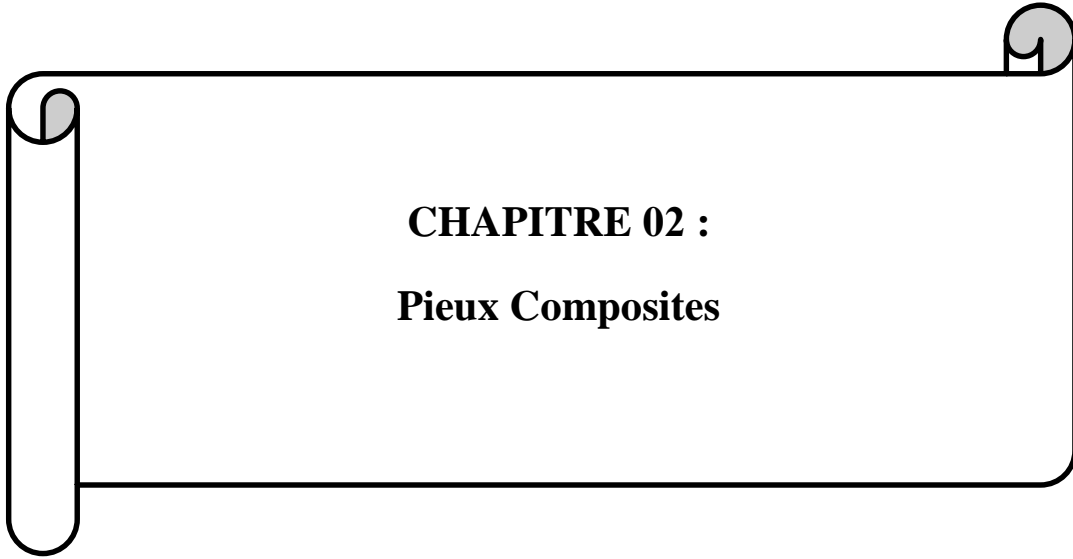


Figure I .16: Exemple de vibreur Keller (*Voie humide*).

I.9. Conclusion :

Nous avons exposé dans ce chapitre une étude bibliographique détaillée sur les différentes techniques de renforcement de sol, qu'elles permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols. Chaque technique présente ses avantages et ses inconvénients en termes de portance, de nuisances, de contrainte, de fiabilité et de coût.



CHAPITRE 02 :
Pieux Composites

II.1 Introduction

Les composites de fibres ont été une option viable pour remplacer les matériaux de pieux traditionnels tels que le béton, l'acier et le bois dans des conditions environnementales difficiles. Cependant, les pieux composites nécessitent une attention particulière en raison de leur durabilité dans ces environnements.

Ce chapitre présente un aperçu des technologies de pieux composites et un examen des différents facteurs qui affectent leurs comportements.

II.2 Historique sur les pieux composites

Les pieux composites font référence à des fondations sur pieux traditionnels qui utilisent des fibres de polymères, des plastiques recyclés et d'autres matériaux pour remplacer et/ou protéger l'acier ou le béton, dans le but de produire des pieux qui ont des coûts de maintenance inférieurs et une durée de vie plus longue que les pieux traditionnels, en particulier lorsque utilisés dans les applications marines et autres environnements corrosifs ; des exemples de pieux traditionnels détériorés sont présentés à la figure II.1.

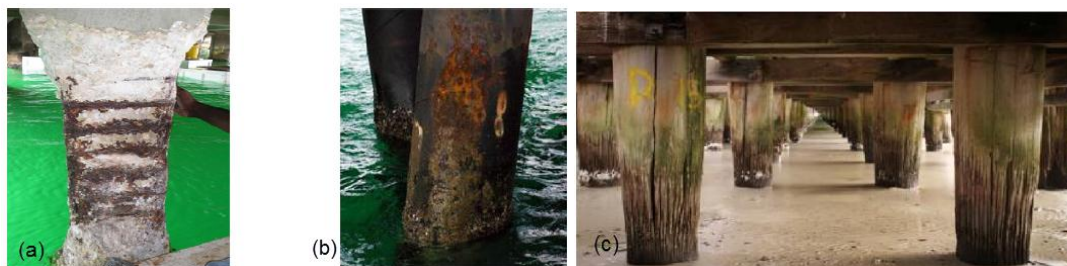


Figure II.1 : Dégradation des pieux : (a) pieux en BA (b) pieux en acier (c) pieux en bois [6].

Les pieux composites ont été utilisés pour la première fois aux États-Unis à la fin des années 1980 en remplacement des pieux de défense en bois au port de Los Angeles [7]. Le premier prototype de pieu composite a été enfoncé en 1987 et consistait en un tuyau en acier recouvert de plastique recyclé [8]. Depuis la première application de pieux composites en 1987, plusieurs autres projets ont utilisé des pieux composites. Une liste de projets sélectionnés où des pieux composites ont été utilisés est présentée dans le tableau I.1. Comme indiqué dans le tableau et rapporté par [9], les pieux composites ont été principalement utilisés comme pieux de défense marine, comme charge- pieux porteurs pour structures légères, et comme pieux d'essais expérimentaux.

Tableau II.1 : Les projets réalisés en pieux composites au monde.

Projet	Année	Type de pieux	Réf.
Port de Los Angeles, Californie	1987	Pieux en plastique avec âme en acier	[7,10]
Port de Newark, New Jersey	1991	Tuyau en acier avec coque en plastique épais	[10]
Station naval Roosevelt Roads, Porto Rico	1991	Tuyau en acier avec coque en plastique épais	[10]
Port d'Oakland, Californie	1993	Tuyau en acier avec coque en plastique épais	[10]
Pier Bravo, NAS North Island, San Diego, California	1995	Plastique recyclé renforcé avec cage d'armature en acier soudé	[11]
Port de la Nouvelle-Orléans, Los Angeles	1996	Plastique recyclé avec renfort en fibre de verre	[12]
Jetée de l'installation EMR de la marine américaine Ingleside, Texas	1997	Coque FRP avec noyau en béton	[13]

II.3 Les différents types de pieux composites

Plusieurs produits de pieux composites sont disponibles sur le marché aujourd'hui, tels que : Les pieux composites en PRF, les pieux à noyau en acier composite (SRP), les pieux à matrice plastique renforcée (RPF), les pieux pultrudés en fibre de verre (PGF), les pieux en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF) et les pieux creux en PRF. Parmi ces six types de pieux, les trois premiers sont considérés comme mieux adaptés aux applications porteuses.

Les sous-sections suivantes décrivent plus en détail ces trois candidats de pieux composites porteurs.

II.3.1 Les pieux composites en PRF

Le pieu composite le plus largement étudié et adopté est le pieu en polymère renforcé de fibres (PRF), qui se compose d'une coque extérieure en fibre de polymères et d'un remplissage en béton non armé illustré à la figure II.2. Les fibres de polymères sont la principale fibre de renforcement dans la plupart des coques en PRF en raison de leur légèreté, de leur résistance à la chaleur et de leur faible coût [14]. Des plastiques recyclés, des déchets post-consommation et industriels peuvent également être incorporés dans la coque en polymère tissé de fibres.

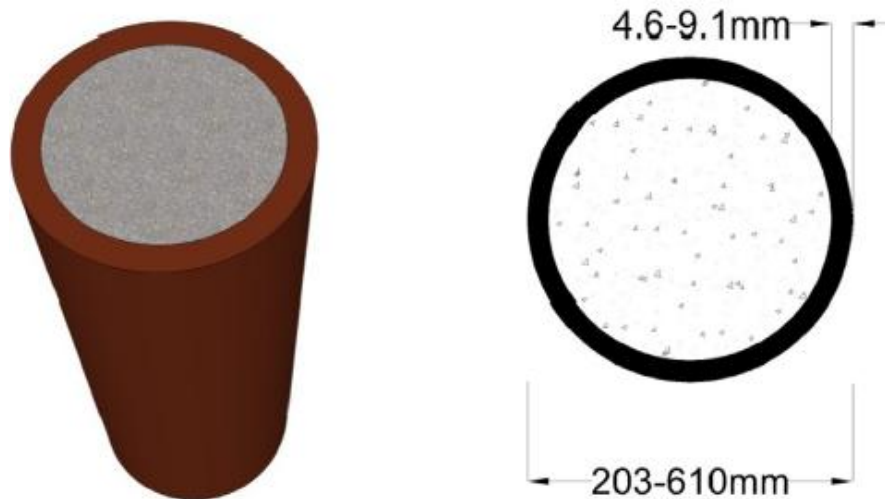


Figure II.2. : Pieu composite en PRF.

Lorsqu'ils sont fabriqués correctement, les composites PRF sont plus légers et ont une résistance à la traction plus élevée que l'acier. L'avantage structurel de ce pieu est dû aux efforts de confinement appliqués au béton via la coque en PRF lorsqu'il est en compression, en plus de la résistance à la compression supplémentaire et de la rigidité en flexion améliorée fournies par le béton, qui empêche le flambement local [15]. C'est la combinaison de la haute résistance à la traction de la coque renforcée de fibres et de la résistance à la compression du noyau en béton qui permet à ce pieu composite d'être utilisé pour des applications porteuses.

Il existe deux méthodes d'installation pour ce pieu ; le premier est d'enfoncer la coque FRP vide dans le sol, puis couler le béton in situ, et la seconde consiste à pré-couler le béton dans la coque et conduire les deux ensembles. La taille des pieux composites FRP varie de 203 à 610 mm de diamètre avec des épaisseurs de paroi de 4,6 à 9,1 mm [12]. Malgré leur excellent comportement porteur, le composite PRF a certaines limites en ce qui concerne leur installation et leur maniabilité.

Mirmiran et al., [16] ont constaté que des problèmes de stratification existaient lorsque les pieux remplis de béton PRF étaient enfoncés dans des sols marins. L'enveloppe devient légèrement non liée au noyau en béton, provoquant un mauvais transfert des forces d'entraînement axiales et, par conséquent, peut entraîner une installation inacceptable du pieu. Des chercheurs, tels que **Fam et Rizkalla** [17], ont suggéré l'utilisation de résine époxy pour renforcer la liaison afin de résoudre le problème de stratification.

Jayatilake et al., [18] ont étudié plus en détail l'effet d'interaction peau-noyau entre une coque en polymère renforcé de fibres et le noyau. L'étude a révélé que l'étendue d'interaction dépend davantage de la largeur du décollement à travers la poutre plutôt que de la longueur le long de la poutre ; par conséquent, une fabrication soignée est nécessaire pour s'assurer que l'époxy est réparti uniformément sur toute la largeur de la poutre pour éviter le décollement.

II.3.2 Les pieux à noyau en acier composite (SRP)

Les pieux en acier peuvent offrir de nombreux avantages par rapport aux pieux en béton, tels qu'une résistance à la traction plus élevée, moins de sensibilité aux dommages lors de la manipulation et de l'installation, et la facilité d'ajustement de la longueur sur site [19]. Les pieux porteurs tubulaires en acier présentent des rapports de rigidité élevés et, par conséquent, conviennent aux structures marines où le substratum rocheux est enfoui [20].

Le principal inconvénient de l'utilisation de pieux en acier dans les environnements marins est leur vulnérabilité à la corrosion. Depuis le début des années 1980, des chercheurs, tels que **Dismuke et al.** [21], ont travaillé sur l'élaboration de lignes directrices pour la protection cathodique des pieux en acier. Plus récemment, **Xichang et Yan** [22] ont mis en évidence l'efficacité du revêtement de flocons de verre époxy pour protéger les pieux tubulaires en acier de la corrosion par l'eau salée. Les préoccupations croissantes concernant l'impact environnemental des pieux revêtus de métaux lourds dans les environnements marins, ainsi que le coût de la protection cathodique, ont conduit les chercheurs à expérimenter des coques composites [23,24].

Les pieux composites à âme en acier sont constitués d'un tube en acier à paroi mince enfermé dans une coque épaisse en plastique recyclé, comme illustré ci-dessus à la figure II.3. Semblable aux pieux en FRP, la coque offre une protection contre la corrosion tandis que le noyau du tuyau en acier fournit la majorité de la capacité de charge.

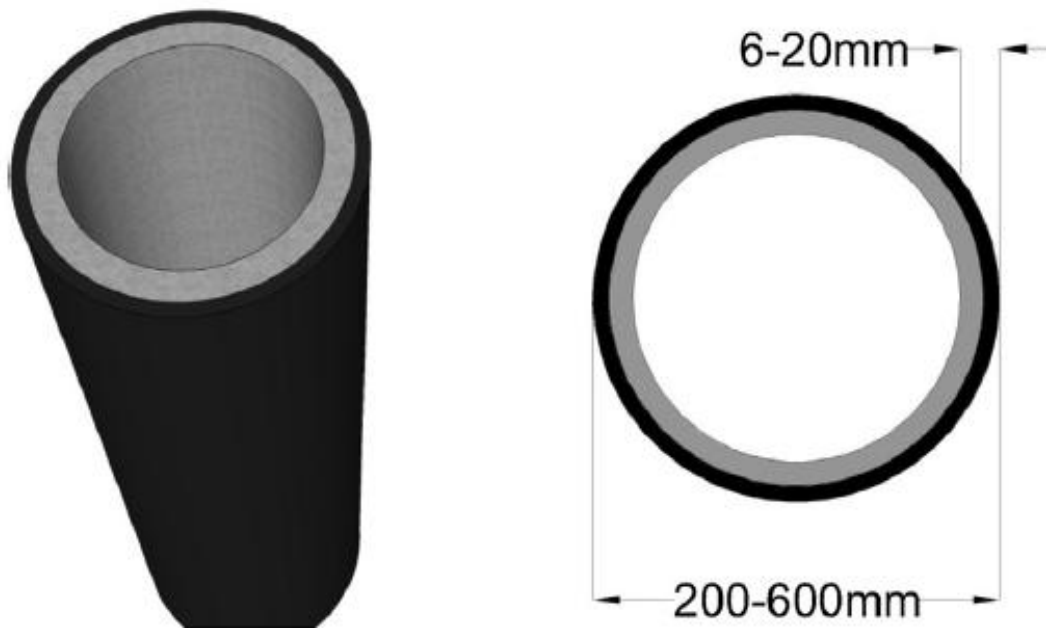


Figure II.3. : Les pieux à noyau en acier composite (SRP).

La coque en plastique recyclable peut être fabriquée à partir d'une gamme de plastiques ménagers et, généralement, a un diamètre compris entre 200 et 600 mm ; cependant, le tuyau en acier doit avoir une épaisseur de paroi d'au moins 6 mm pour les applications de garde-boue et de 20 mm pour le support de charge applications. Les pieux de ce type peuvent atteindre une portée maximale de 23 m [12].

Il y a quelques problèmes liés à la stratification entre la coque et le noyau, et les performances structurelles des pieux à noyau en plastique en tuyaux d'acier dans les environnements marins. **Lampo et al.** [23] ont constaté que des fissures apparaissant dans la coque en plastique un an après la date d'installation indiquaient l'utilisation de plastiques inappropriés pour former la coque. Cependant, **Pando et al.** [12] ont suggéré que ce problème est facilement résolu en ne plaçant le plastique recyclé que dans des zones exposées à l'eau, ce qui sollicite moins le plastique et évite d'endommager les extrémités du tas lors du battage. La conception des pieux tubulaires en acier est un sujet de recherche bien établi et, par conséquent, très peu de travaux récents ont été menés sur l'amélioration de ce type de pieux [25].

II.3.3 Les pieux à matrice plastique renforcée (RPF)

Contrairement aux deux pieux composites précédents, qui utilisaient des coques externes en RPF, les pieux RPF sont structurellement renforcés avec des fibres polymères dans le noyau. Ces pieux composites comprennent un noyau de matrice en plastique recyclé renforcé avec des tiges en acier ou en RPF, comme illustré à la figure II.4 ci-dessous.

La matrice plastique est généralement constituée de plastiques recyclés trouvés dans les ménages, tels que les cartons de lait et les bouteilles de shampoing, ce qui les rend attractifs d'un point de vue environnemental [26]. De plus, lorsque des tiges de RPF sont utilisées pour renforcer la matrice plastique, le pieu composite devient entièrement recyclable [27]. Ces pieux sont produits à l'aide d'un procédé d'extrusion en continu, ce qui permet aux pieux d'atteindre des longueurs de 32m et éventuellement plus. Le traitement chimique des pieux avec des antioxydants et des inhibiteurs ultraviolets permet aux pieux de rester bien protégés aux effets de la lumière [28].

Les pieux sont produits dans des tailles allant de diamètres de 254 à 430 mm et généralement renforcés avec 6 à 16 tiges d'acier ou de RPF avec des diamètres de 25 à 35 mm [25]. Ce type de pieu est majoritairement utilisé comme pieu de protection dans les applications marines ; cependant, **Lindsay** [27] a signalé qu'ils pourraient également fonctionner dans des applications de support de charge et a découvert qu'un pieu de 305 mm de diamètre est capable de supporter des charges de travail allant jusqu'à 20 tonnes.

Les problèmes courants avec les pieux en plastique renforcé comprennent le décollement des tiges de renforcement et les taux de fluage relativement élevés observés sous des charges utilisables. **Iskander et al.** [9] ont constaté que les pieux PRF expérimentaux utilisés dans leur étude présentaient une déflexion importante sous chargement latéral et axial et se déformaient facilement lors de l'installation. Cependant, ils ont conclu que « toutes les analyses effectuées montrent que les pieux composites pourraient être poussés à des capacités raisonnables pour les pieux porteurs.

Zureick et Kim [40] ont testé les données de charge et de déflexion sur ces pieux, et ont constaté que les pieux sont adaptés aux applications de support de charge. **Juran et Komornik** [25] ont également constaté que bien que les RPF testés aient une faible rigidité, il n'y avait pas de décollement visible entre les barres en fibre de verre et la matrice en plastique, comme indiqué par les précédents chercheurs. Certains fabricants ont adapté la conception pour minimiser le fluage et empêcher le décollement en introduisant une spirale en acier pour le

renfort. Cependant, ce processus est beaucoup plus coûteux que l'arrangement de renforcement standard, ce qui rend ce type de pieu généralement plus coûteux et complexe à fabriquer que les autres types mentionnés dans ce chapitre.

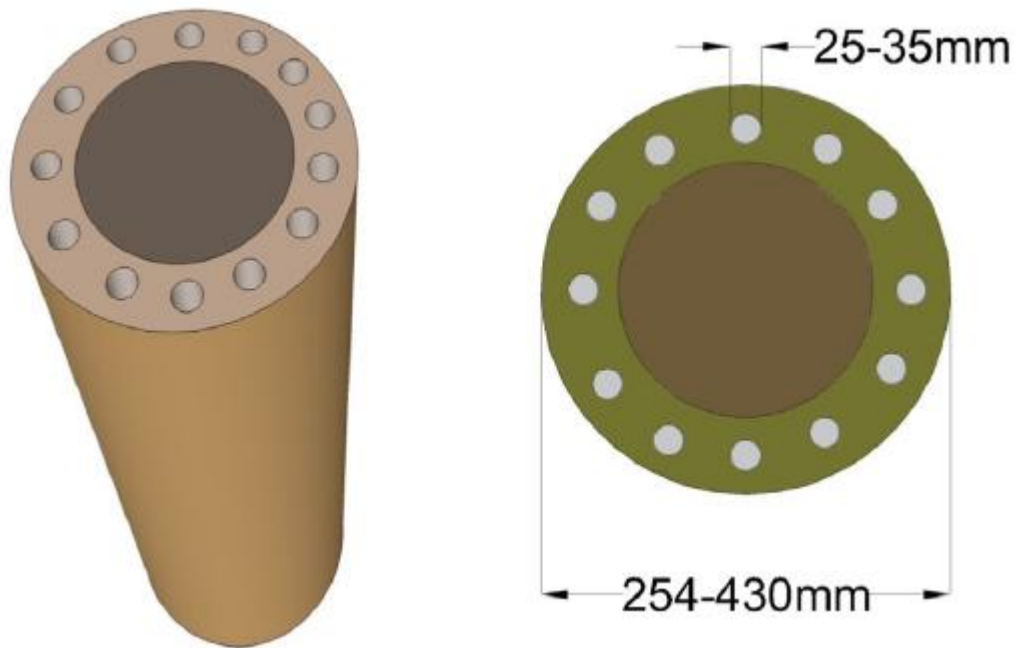


Figure II.4. : Les pieux à matrice plastique renforcée (RPF).

II.3.4 Les pieux pultrudés en fibre de verre (PGF)

Un autre type de pieu RPF structurellement renforcé est le pieu pultrudé en fibre de verre. Ces pieux comprennent une coque en polyéthylène haute densité (HDPE) avec un noyau de grille en fibre de verre pour fournir une résistance structurelle et limiter la déformation, comme indiqué ci-dessous à la figure II.5. La grille est composée de quatre plaques qui se croisent et les espaces sont remplis de HDPE, rembourrages en mousse de polyéthylène ou bois en plastique [25]. Il n'y a qu'une application dans les environnements marins comme piles et feuilles de défense murs de pieux en raison de leur capacité à absorber l'impact des navires.

Lampo et al. [23] ont constaté que ce type de pieu ne convient pas aux applications de support de charge en raison de la mauvaise performance sous axial et latéral chargements.

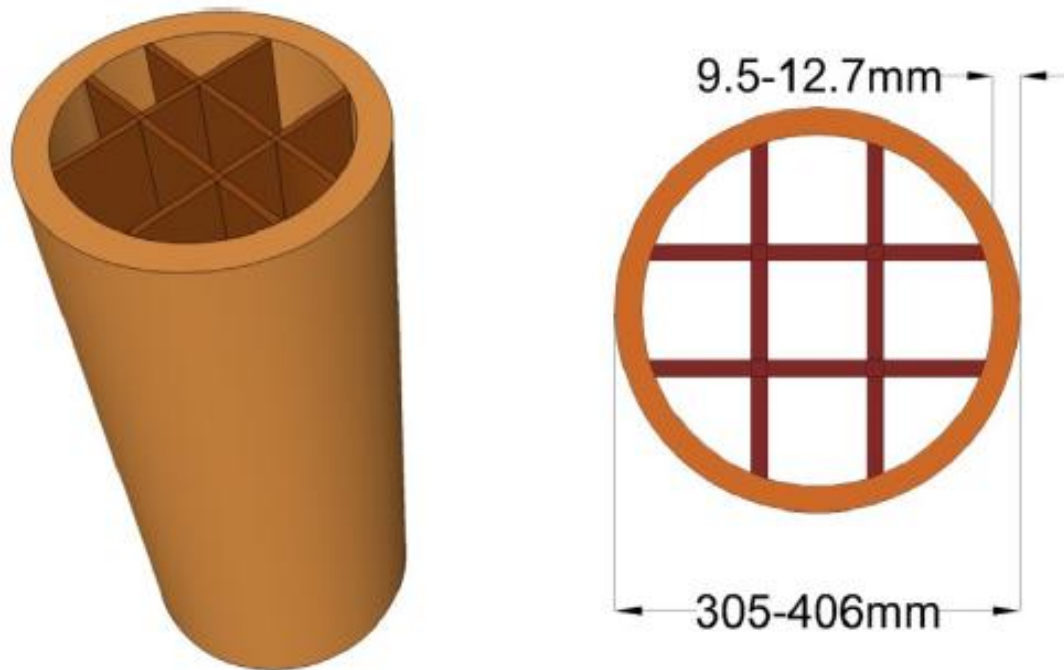


Figure II.5. : Le pieu pultrudé en fibre de verre (PGF).

II.3.5 Les pieux en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF)

Ce type de pieu se compose d'une matrice en plastique recyclé avec un renfort en fibre de verre aléatoire partout. La coque est faite de fibre de verre durcie et collée à une âme en matrice plastique puis remplie de mousse pour minimiser la masse du pieu comme on le voit sur la figure II.6. Ces pieux sont généralement produits en diamètres de 250 mm à 7,5 m de longueur et utilisés pour les applications de défense [23].

En 2006, **Juran et Komorik** [25] ont effectué des essais de compression axiale sur deux échantillons de pieux de bois et ont constaté que la réponse non linéaire à la charge axiale dépend de la vitesse de déformation. Le module de Young s'est avéré être de 0,37GPa, ce qui est plus de 40 fois inférieur à celui du béton, ce qui signifie que ce type de pieu n'est pas adapté à la plupart des applications porteuses.

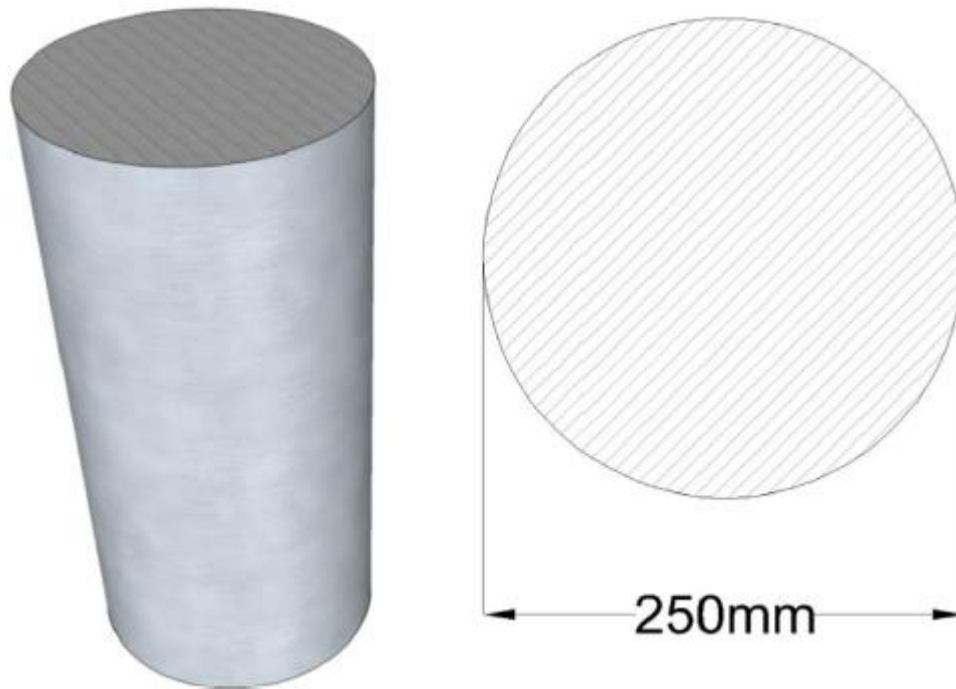


Figure II.6. : Les pieux en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF).

II.3.6 Les pieux creux en FRP

Un substitut efficace aux pieux en bois peut être obtenu simplement en utilisant l'enveloppe extérieure des pieux remplis de béton FRP. L'actuel la coque elle-même est constituée d'une matrice thermodurcissable, qui est renforcée avec des fibres de verre et est produit par pultrusion, enroulement filamentaire ou un procédé de moulage par transfert de résine. Le diamètre extérieur de ce pieu peut atteindre jusqu'à 460 mm avec une épaisseur de paroi allant jusqu'à 22 mm ce qui le rend potentiellement adapté aux applications de support de charge [12]. Aucun problème de cautionnement n'existe pour ces types de pieux puisqu'ils se composent simplement d'une coque extérieure et peuvent supporter une marine légère structure.

Velez [14] a testé les performances du verre et du carbone pieux en polymère renforcé de fibres dans de l'argile molle à la fois drainé et non drainées. Ses résultats ont montré que les pieux creux en PRF avaient une plus grande adhérence d'interface que l'acier et une charge axiale similaire capacité, mais présentait une plus grande déflexion de la tête du pieu que l'acier. Pearson Billings est l'un des fabricants d'un creux à base de fibre de verre Pieu FRP disponible en diamètres de 203,2 à 600 mm. Pieux Pearson produits ont été utilisés pour des applications marines comme défense pieux en plus des pieux porteurs dans les projets domestiques, comme on le voit ci-dessous dans la figure II.7.

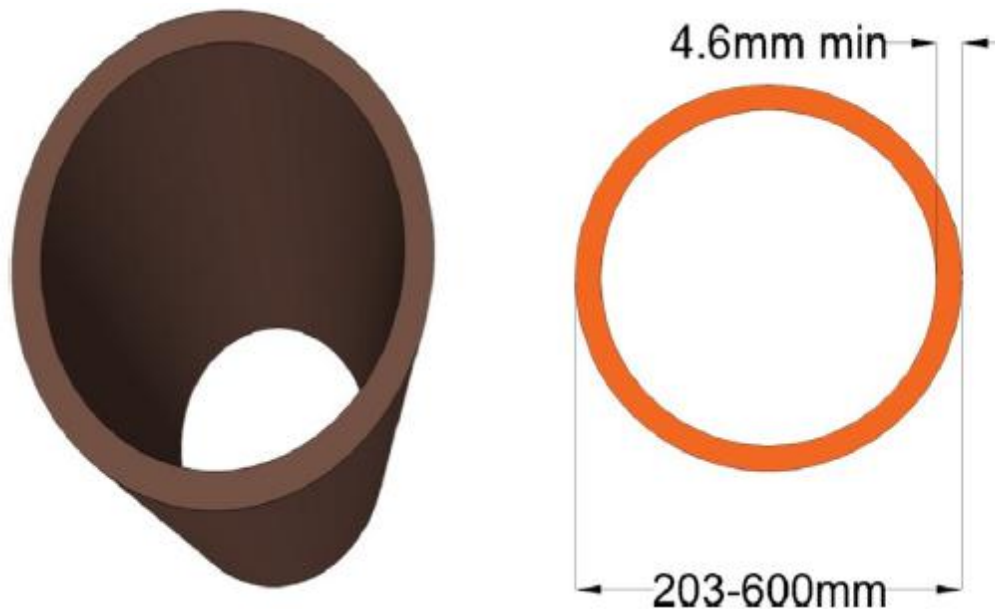


Figure II.7. : Les pieux creux en FRP.

Ces pieux ont une durée de vie estimée à plus de 100 ans, sont résistants à la corrosion et ont un module de Young moyen de 28GPa (lorsqu'il est renforcé avec un remplissage synthétique), soit 13 GPa supérieure à celle du béton [22]. L'absorption d'eau est évaluée à 25% par le constructeur, ce qui reste un chiffre discutable pour éléments structuraux en milieu marin. CMI est aussi un autre fabricant qui a développé le pieu 'Ultra Composite', qui a une résistance à la compression ultime beaucoup plus élevée évaluée à 165,4MPa pour le pieu de diamètre 457,2 mm [22].

Malgré le petit volume de recherches entreprises sur le l'installation et la surveillance des pieux creux en PRF, ils semblent une option attrayante et viable pour les applications de support de charge dans le marin environnement si un guide d'installation systématique est développé.

II.4 Les avantages et les inconvénients de pieux composites

Les avantages des pieux composites par rapport aux pieux traditionnels les pieux de matériaux incluent leur rapport résistance / poids plus élevé, corrosif résistance, durabilité et leur immunité à la pourriture et à la détérioration en milieu marin [29]. Ces avantages généraux avoir de multiples effets positifs, comme la réduction des transports et les coûts d'installation en raison de leur poids léger, et aussi moins entretien nécessaire pendant toute la durée de vie du pieu.

Encore un avantage d'utiliser des matériaux composites par rapport aux matériaux de velours traditionnels est qu'ils peuvent incorporer des matériaux recyclables et réutiliser les

plastiques, ce qui a un impact positif immédiat sur l'environnement. Tel est le cas pour les pieux à matrice en plastique recyclé qui utilisent des plastiques recyclés pour la noyau et fibre de verre recyclable pour la coque qui fait la pile respectueux de l'environnement grâce à une énergie grise réduite [26].

Les inconvénients éventuels des pieux concernent le coût de production, l'installation et la performance structurelle à long terme. Depuis ces pieux sont relativement nouveaux dans l'industrie du génie civil, les fabricants doivent encore trouver des méthodes de production bon marché, ce qui rend ces pieux généralement plus chers que les pieux traditionnels [30]. Cependant, à mesure que les pieux composites deviennent plus largement adoptés dans le domaine civil l'ingénierie, les coûts devraient diminuer [28]. Le poids léger de ces piles signifie une baisse des coûts de transport et de main-d'œuvre, ce qui pourrait compenser les coûts du pieu lui-même.

Un autre inconvénient des composites avec coques et noyaux est le laminage entre les interfaces suite au chassage des pieux. Cette question a récemment gagné en popularité parmi les chercheurs, comme **O'keeffe** [31] et **Sirmanna** [39], qui ont testé les époxy, qui peut être injecté entre le noyau et la coque, pour permettre suffisamment cohésion et transfert des forces motrices. Cependant, une étude sur le laminage doit encore être testée sur le terrain afin de développer des directives de conduite efficaces pour différents composites de type coque pieux. Les effets à long terme des environnements marins sur les pieux composites ont fait l'objet de peu de tests et de recherches réels à ce jour.

Soudki et Green [32], **Toutanji et Rey** [33] et **Karbhari** [34] ont tous étudié les effets du gel-dégel à long terme sur les pieux composites. **Kong et al.** [35] ont été les premiers chercheurs à étudier le comportement à long terme des pieux en béton confiné en RPF sous des charges soutenues et ont découvert que les tubes en GPRF étaient fiables pour protéger le noyau du pieu du gel-dégel sous des charges axiales. Le comportement en flexion des pieux composites sous charge soutenue dans des environnements marins froids doit encore être étudié avant de pouvoir être largement adopté dans les structures porteuses [36].

II.5 Conception des pieux composites

Les pieux composites porteurs pourraient bien devenir une solution durable pour une utilisation dans la plupart des fondations profondes dans les régions tropicales où des inondations saisonnières se produisent et où la construction sur pilotis est répandue. Par conséquent, il est impératif que les problèmes de conception, tels que la maniabilité, comportement de charge axiale et latérale et durabilité de différents des pieux sont étudiés et

comparés dans une gamme de situations pour déterminer quels types conviennent aux applications de support de charge et quels domaines doivent être améliorés.

Les méthodes traditionnelles de conception de pieux suggéré par **Poulous et Davis** [37], **Randolph et Murphy** [38], **Tomlinson** [39] **Bowles** [41], **Budhu** [42] et **Das** [43] sont toujours valable dans une certaine mesure pour l'analyse des charges ultimes pieux composites. Cependant, en raison de la nature unique des composites matériaux, d'autres problèmes, tels qu'une faible rigidité, surviennent, qui nécessitent de nouvelles méthodes de dimensionnement afin de déterminer le tassement et la déformation avec précision. Plus récemment, des chercheurs, comme **Han et al.** [44], ont modifié les méthodes de conception traditionnelles pour tenir compte pour les propriétés uniques des pieux composites. Cette rubrique met en lumière laboratoire existant et essais sur le terrain de trois composites porteurs pieux en cours de fabrication. Les types de pieux discutés comprennent des pieux remplis de béton PRF, une matrice en plastique renforcé pieux et pieux creux en coquille de PRF. Lors de l'évaluation de ces types de pieux, les capacités de conception géotechnique et structurelle de ces pieux sont explorées et l'absence de certains tests est mise en évidence.

II.5.1 Battage

La maniabilité du pieu est la capacité du pieu à être entraîné de manière sûre et économique, de sorte qu'il porte la capacité portante prévue [45]. Un obstacle majeur empêchant la mise en œuvre de pieux composites dans les applications structurelles quotidiennes est le manque de procédures et de directives établies pour le fonçage des pieux. Comme mentionné précédemment, les pieux composites avec des coques renforcées rencontrent des problèmes de stratification tandis que les pieux à base de plastique et de caoutchouc subissent des déviations plus importantes. Ces problèmes rendent difficile l'enfoncement des pieux à la profondeur prévue et la garantie qu'ils supportent la charge de conception prévue. Pour comprendre les problèmes de maniabilité des pieux composites, les chercheurs doivent d'abord comprendre les composants qui affectent les performances de fonçage.

Plusieurs facteurs principaux influencent l'aptitude au battage des pieux : l'énergie délivrée au pieu par le marteau de battage, la résistance du sol aux efforts de battage, la capacité du pieu à transférer les efforts de battage vers la pointe, et enfin la résistance de le pieu pour résister aux forces motrices [25].

II-5.1.1 Marteaux de battage

La fonction du marteau pieu est de fournir suffisamment d'énergie à la tête du pieu pour enfoncer le pieu à la longueur souhaitée. L'enfoncement à percussion peut être réalisé grâce à l'utilisation de marteaux pilons, à vapeur à simple effet, à vapeur à double effet, diesel, hydrauliques ou vibratoires.

Un problème clé dans la conduite de pieux est de choisir un type de marteau qui peut fournir avec succès l'énergie au pieu tout en évitant les dommages.



Figure II.8. : Marteaux de battage.

II.5.1.2 Résistance du sol aux forces motrices

La résistance offerte par le sol aux forces d'entraînement est principalement attribuée à la résistance de frottement sur les côtés et la pointe du pieu. Les conditions du sol, telles que l'angle de frottement et la résistance au cisaillement, ont également un impact sur la résistance du sol aux forces motrices.

II.5.1.3 Capacité du pieu à transférer les forces motrices à la pointe

L'impédance (rigidité dynamique) est une mesure de l'efficacité avec laquelle le pieu peut transmettre l'énergie de la tête au pied, puis au sol. L'impédance de pieu pour les pieux traditionnels et composites peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$z = \rho A c$$

Où :

- z = impédance (kg/s) ;
- c = vitesse de l'onde de compression (en m/s) = $(E / \rho) 0.5$;
- ρ = masse volumique (kg/m^3) ;
- A = aire de la section transversale (m^2) ;
- E = module d'élasticité (composite) (MPa).

II.5.1.4 Résistance du pieu à résister aux forces motrices

Généralement, si un pieu a une bonne réponse à l'impact axial et un bon comportement d'absorption d'énergie, il présentera une forte résistance aux forces d'entraînement et, par conséquent, limitera les dommages et les ruptures. L'impact répété des marteaux de battage doit également être pris en compte sous la forme de «réponse à la fatigue d'impact», qui mesure la capacité d'un pieu à résister à des charges axiales répétitives. La réponse à la fatigue d'impact

II.5.2 Chargement axial

Une série de facteurs influencent la capacité de charge axiale des pieux, notamment la rigidité axiale, les contraintes résiduelles restant dans le pieu/sol après l'installation et la résistance du pieu aux forces axiales. Sous chargement vertical, les pieux composites ont deux mécanismes de rupture ; d'une part, l'écrasement des fûts de pieux sous chargement en compression (rupture structurale) et, d'autre part, la rupture du sol à la base et sur les côtés du pieu (rupture géotechnique) [44]. Parmi les cas de défaillance susmentionnés, la valeur inférieure est considérée comme la capacité de charge ultime du pieu sous chargement vertical et, dans la plupart des cas, le mode de défaillance sol-pieu prévaut.

Les trois principales méthodes de détermination des capacités axiales des pieux sont les essais de charge de compression structurelle, l'analyse statique (basée sur les paramètres de résistance estimés des sols) et l'analyse dynamique (énergie ou équation des vagues).

II.5.3 Chargement latéral

La flèche maximale tolérable est le plus souvent le facteur déterminant qui influence le comportement du pieu sous des charges latérales. Les paramètres importants qui influencent la déflexion du pieu comprennent la charge latérale elle-même, la résistance du sol au mouvement horizontal et la rigidité en flexion du pieu (module de Young multiplié par le deuxième moment de surface). Les méthodes standard d'analyse des pieux traditionnels sous charges latérales

comprennent la méthode de réaction du sous-sol, la méthode p–y, la théorie du continuum élastique et les méthodes basées sur les éléments finis.

Bien que ces méthodes modélisent le pieu comme une poutre élastique, pour les types de pieux composites, cela pourrait ne plus être valable en raison du module de cisaillement relativement faible « G », qui donne lieu à des déformations de cisaillement plus importantes. **Han et Frost** [46] ont proposé l'utilisation d'une analyse par éléments finis pour mesurer les déviations latérales en étendant la solution du continuum élastique pour tenir compte de la déformation par cisaillement et du glissement pieu-sol.

Dans leur article le plus récent, **Han et al.** [44] ont montré que la déflexion latérale normalisée des pieux composites structuraux en PRF peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$W = \frac{W^* H}{\sqrt[5]{(E_{zz} I_{yy})^2 \eta^3}}$$

Où :

- W = déviation horizontale (mm) ;
- W* = latéral normalisé déflexion (mm) ;
- E_{zz} = module longitudinal de la section du pieu en axe z directions (MPa) ;
- I_{yy} = moment d'inertie de la section sur axe y (mm⁴) ;
- η = constante de réaction du sol de fondation ;
- H = horizontale force (kN).

Cette solution montre que l'étendue de la déviation latérale peut être réduite en utilisant des pieux composites avec des modules de cisaillement plus élevés. Le module de cisaillement est un produit des propriétés de la section comme l'épaisseur de paroi et le rayon. En augmentant ces propriétés, la déviation latérale peut être limitée.

Les méthodes utilisées pour analyser le comportement de chargement latéral des pieux composites diffèrent avec chaque type de pieu.

II.5.4 Capacité à long terme

Le comportement à long terme des pieux traditionnels en acier, en béton et en bois dans les environnements marins a fait l'objet de nombreuses recherches par de nombreux chercheurs. Les études sur la durabilité des pieux composites en milieu marin remontent à l'expérience de **Sen et Mullins** [47] sur la dégradation des polymères géosynthétiques.

Les auteurs ont découvert que la thermoxydation affecte les plastiques polyoléfinés (qui sont utilisés dans les SRP, GPRF et les pieux à noyau de tuyaux en acier) et peut entraîner une diminution de la résistance portante allant jusqu'à 50 % sur une période de 85 ans. Cependant, les échantillons testés étaient beaucoup plus minces que les pieux composites, et un temps beaucoup plus long est nécessaire pour la thermoxydation des pieux composites grandeur nature. **Pando et al.** [13] ont mené des expériences sur la durabilité des pieux PRF remplis de béton en mesurant l'absorption d'humidité et la perte relative de résistance et de rigidité. Ils ont découvert que la principale raison de la perte de rigidité et de résistance des pieux composites PRF est due à l'absorption d'eau et aux dommages à l'interface fibre/matrice, qui provoquent également le décollement et la corrosion des fibres de verre. Les auteurs ont conclu qu'à long terme (50 à 75 ans), les pieux composites PRF entraîneraient une diminution approximative de la capacité axiale et en flexion de 5 % et 24 %. Cela pose un problème dans la conception critique de la déflexion, d'autant plus que les effets de fluage et d'exposition chimique n'ont pas été pris en compte.

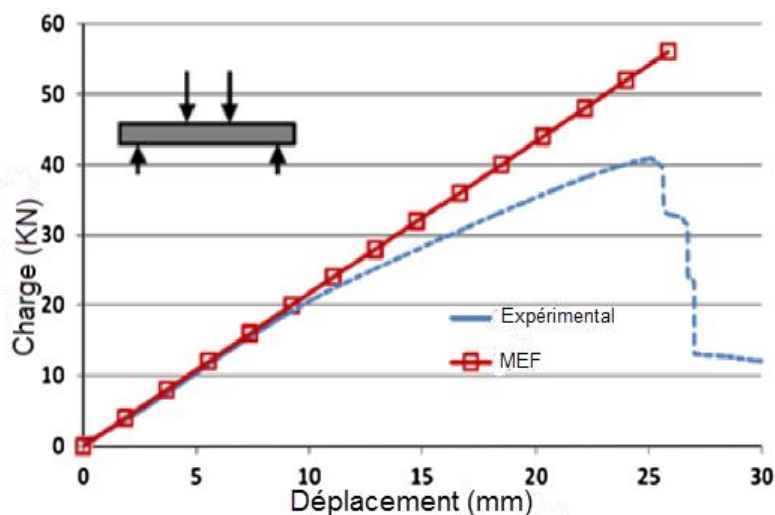


Figure III. 8 : Relation de charge en flexion.

Un autre problème courant pour les pieux en milieu marin est les effets à long terme du gel-dégel. **Kong et al.** [35] ont étudié le comportement de chargement à long terme des pieux en béton PRF dans l'eau de mer douce et salée, et ont constaté que le PRF était résistant au gel-dégel.

Plus récemment, des coques en PRF ont été utilisées pour traiter le bois détérioré et les pieux en béton corrodés. **Sen et Mullins** [47] ont étudié la réparation d'urgence de pieux de pont en béton armé à l'aide d'un emballage PRF composé à la fois de carbone et de verre. L'étude a révélé que la nature légère, la haute résistance et le faible coût de l'emballage PRF à base de verre constituent une solution viable et rentable pour la réparation et la prévention de la corrosion des pieux partiellement submergés.

Reddy et al. [48] ont modernisé des spécimens de pieux en béton armé avec des coques PRF et ont constaté une augmentation de la charge axiale ultime et de la capacité de charge latérale de 43 % et 28 %, respectivement. **D'Entremont et al.** [49] ont confirmé les résultats du chercheur précédent utilisant un composite renforcé de fibres de verre pour restaurer et renforcer les pieux en bois. Les auteurs ont découvert que l'épissage d'un échantillon de pieux en bois à l'aide de petites attaches paysagères traitées, puis leur emballage dans du GPRF entraînait une augmentation de la résistance à la flexion de 32 %.

La majorité des études de durabilité réalisées sur des pieux composites ont été spécifiquement réalisées sur des palplanches en raison de leur grande surface et de leur taux d'absorption d'eau. Un chercheur qui a étudié les effets du fluage sur les pieux porteurs était **Acare** [50]. L'auteur a étudié les effets à long terme du fluage et du retrait des pieux tubulaires en acier remplis de béton et a déterminé un coefficient de fluage relatif pour les calculs de comportement à long terme. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer la durabilité des pieux composites porteurs qui contiennent des plastiques, tels que les pieux FRP et SRP, car les plastiques recyclables font de plus en plus partie de la future industrie de la construction.

II.6 Impact environnemental

Dans certains cas, la capacité structurelle à long terme des pieux composites dépasse celle des pieux traditionnels, tels que les pieux remplis de béton PRF sur des pieux en béton précontraint. Cependant, le principal avantage des pieux composites par rapport aux pieux traditionnels n'est pas sa capacité de charge, mais sa faible énergie grise potentielle et son faible coût de cycle de vie.

Le composite SRP a son noyau fabriqué à partir de matériaux plastiques recyclables trouvés dans les produits domestiques, tandis que ses barres de renforcement en fibre de verre proviennent également de plastiques recyclables, ce qui le rend 100 % recyclable. Les Composites produit également des pieux composites pultrudés en fibre de verre respectueux

de l'environnement, qui sont fabriqués à partir de matériaux recyclables à 85 %, ont une durée de vie de plus de 75 ans et ne libèrent pas de pesticides, d'antifongiques ou de conservateurs dans l'environnement marin.

Iskander et Hasan [28] ont souligné les avantages des pieux composites PRF dans le projet de rajeunissement du port de New York, qui comprenait :

Pas de corrosion, de pourriture ou de détérioration due au térébrant marin attaque.

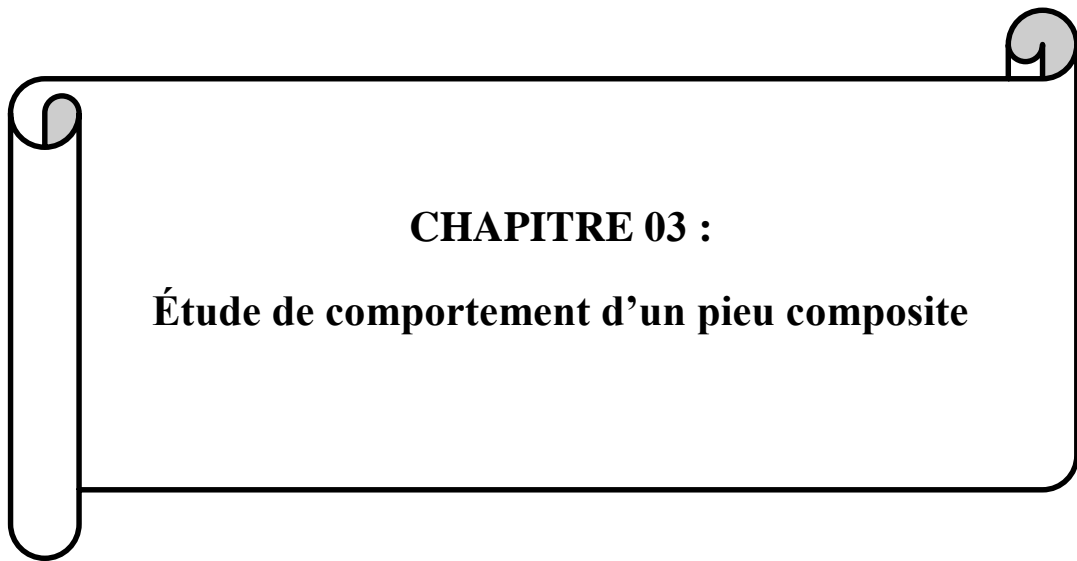
- Pas de corrosion, de pourriture ou de détérioration à la suite d'une attaque de térébrants marins.
- L'épanouissement de la vie marine suite à l'enlèvement des piles de bois traité à la créosote, qui libèrent des produits chimiques dans le port.
- Les risques pour la santé des travailleurs manipulant des pieux en bois traité sont pratiquement inexistantes avec les pieux en PRF.
- Moins de coûts d'entretien et de cycle de vie par rapport aux pieux en bois, qui nécessitent un traitement fréquent.
- Minimisation des déchets solides car les pieux sont 100 % recyclables et peuvent être utilisés pour d'autres applications.

Gaudes [51] a décrit un avantage environnemental supplémentaire des pieux composites, en ce sens qu'ils ne nécessitent pas de traitement chimique supplémentaire en raison de leurs propriétés anticorrosives intégrées. Lorsqu'une protection contre les rayons UV est nécessaire, la couleur de la coque peut être rendue naturellement foncée en ajoutant des additifs respectueux de l'environnement.

D'autres études environnementales sont nécessaires pour déterminer les effets environnementaux négatifs potentiels des pieux composites.

II.7 Conclusion

Les pieux composites semblent être une alternative attrayante aux matériaux de pieux traditionnels dans les environnements marins en raison de leur nature non corrosive, de leurs performances structurelles et de leur légèreté, de leur coût relativement faible et de leur faible énergie intrinsèque.



CHAPITRE 03 :
Étude de comportement d'un pieu composite

III.1 Introduction

Dans cette partie de notre travail, nous allons modéliser des différents types de pieu composite ancré dans plusieurs types de sols et sous différentes conditions de chargement, dans le but d'étudier le comportement de ces types de pieux, en utilisant le logiciel Plaxis 2D ; la méthode sur laquelle est basé le logiciel dans les calculs numérique est la méthode des éléments finis. Pour qu'on puisse faire tous les calculs nécessaires, on doit lui préciser tous les données du projet.

III.2 Logiciel de modélisation numérique

PLAXIS est un programme basé sur la méthode de calcul des éléments finis en deux ou trois dimensions spécialement conçues pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations peuvent être représentées par un modèle plan. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier.

PLAXIS est un programme spécialement conçues pour l'analyse de la déformation et de la stabilité pour divers types d'applications géotechniques. Le programme utilise une interface d'utilisateur graphique pratique qui permet aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis (voir l'annexe 1).

PLAXIS se compose de quatre sous-programmes :

- Le programme d'entrée « PLAXIS Input » est un préprocesseur, utilisé pour définir la géométrie du problème, pour créer le maillage d'éléments finis.
- Le programme d'entrée « PLAXIS Calculat » est un préprocesseur, utilisé pour définir les phases de calcul.
- Le programme de sortie « PLAXIS Output » est un post-processeur, utilisé pour inspecter les résultats des calculs dans une vue tridimensionnelle ou en coupe.
- Le programme de sortie « PLAXIS Curve » est un post-processeur et pour tracer des graphiques des points géométriques sélectionnés.

III.3 Présentation de la procédure de modélisation

III-3.1 L'objectif d'étude

La réalisation et l'extension des ports augmentent ces dernières années en Algérie (par exemple : l'extension du port de Djen-Djen et la réalisation de port de Tipaza). L'action drastique des vagues sur les éléments de construction en mer provoque une érosion le long du construction, et pour le protéger, un mur de retenue d'eau est construit. Le bois, le béton et l'acier sont les matériaux de construction existants pour les murs de soutènement qui sont généralement conçus pour une durée de vie de trente ans [52-54]. Il a été rapporté que les murs de rétention d'eau existants se détériorent en raison des réactions chimiques des environnements marins défavorables qui provoquent une rupture prématurée et augmentent les coûts de maintenance [55–60]. Pour éviter l'industrie recherche un matériau de construction durable pour mur de soutènement qui présente une excellente résistance à l'eau de mer et aux produits chimiques, nécessite peu d'entretien et présente une bonne durabilité.

Les pieux composites peuvent fournir une solution alternative à cet égard. Ils offrent un rapport résistance/poids élevé, une résistance élevée à la corrosion et aux chocs, une bonne durabilité et un faible entretien [61,62]. D'autre part, le système d'assemblage modulaire peut minimiser le coût de construction en réduisant la période de construction [63].

Dans ce chapitre nous avons modélisé des différents types de pieux composites ancrés dans des plusieurs types de sols et sous un différent chargement (axiale et latérale), et cela pour étudier le comportement de ces pieux.

III-3.2 Modèle géométrique

Le modèle numérique est symétrique, il sera modélisé par un modèle géométrique en **déformation plane** dans les dimensions : 11 m × 20 m (voir la figure III.1), et avec les hypothèses suivantes.

- Le sol est supposé être milieu continu ;
- Les déformations sont considérées planes ;
- Le comportement du sol obéit à la loi de MOHR-COULOMB ;
- Le comportement du pieu obéit à la loi Élastique ;
- Le terrain modélisé est considéré étant saturé d'eau.

Les conditions aux limites : pour les côtés gauche et droite de sol en permet uniquement les déplacements verticaux (les déformations horizontales sont négligées), pour le substratum en bloque toutes les déformations.

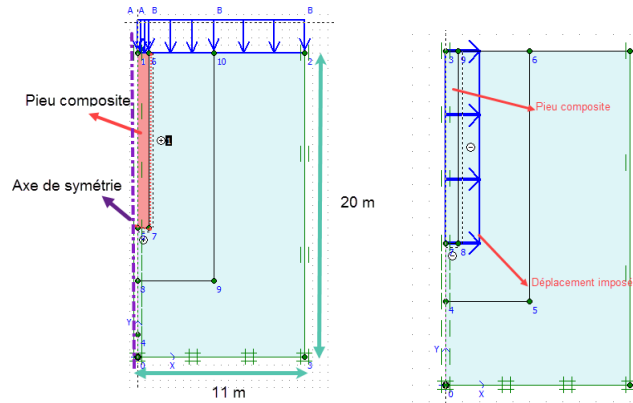


Figure III.1 : Modèle numérique : (a) Chargement axial (b) Chargement latéral.

III-3.3 Modèles constitutifs et paramètres géotechniques de modélisation

Le tableau III.1 résume les propriétés de sol :

Tableau III.1 : Propriétés du sol.

Paramètres	Nom	Sable	Argile	Unité
Modèle du Comportement	-	M-C	M-C	-
Type de Comportement	Type	Drainé	Drainé	-
Poids volumique sec	γ_{unsat}	18.6	16	KN/m ³
Poids volumique saturé	γ_{sat}	19	18	KN/m ³
Module de Young	E	40000	50000	KN/m ²
Coefficient de poisson	ν	0.33	0.35	-
Cohésion	C	5	25	KN/m ²
Angle de frottement	Φ	28	10	°
Angle de dilatance	Ψ	0	0	°
Coefficient de perméabilité	$k_x = k_y$	5	$1 \cdot 10^{-3}$	m/jour

Le tableau III.2 résume les propriétés des pieux composites :

Tableau III.2 : Propriétés des pieux composites.

Paramètres	Nom	PRF	SRP	RPF	PGF	GPRF	Creux en FRP	Unité
Modèle de comportement	-	Élastique	Élastique	Élastique	Élastique	Élastique	Élastique	-
Module d'élasticité	E	$70 \cdot 10^5$	$200 \cdot 10^3$	$\frac{[141 \text{ à } 2.5]}{2.5} \cdot 10^3$	$305 \cdot 10^6$	$2.197 \cdot 10^6$	$23 \cdot 10^3$	KN/m ²
Poids volumique	γ	19.5	78.49	14	19	18.75	19.27	KN/m ³
Coefficient de poisson	ν	0.3	0.3	0.4	0.28	0.33	0.25	-
Réf.	-	[66]	[65]	[64]	[61]	[67]	[65]	

III.4 Modélisation numérique

III.4.1 Cas d'une seule couche de sol

On utilise le modèle géométrique cité au paragraphe III.3.2 et les différentes caractéristiques des pieux du tableau III.2, ces pieux sont ancrés dans une seule couche du sable (Tableau III.1) pour voir leurs comportements dans ce type de sol et sous deux types de chargement (charge axiale ou latérale).

III-4.1.1 Chargement axial

On fait la modélisation numérique des différents pieux et en se basant sur le modèle géométrique de la figure III.1.a, pour les étapes du calcul on augmente la charge avec l'utilisation d'incrément de charge jusqu'à la rupture.

Les figures suivantes de III.2 à III.9 présentent respectivement la déformation et la contrainte déviatorique « q » des différents pieux étudiés sous une charge axiale de rupture.

- **Les pieux composites en (PRF) :**

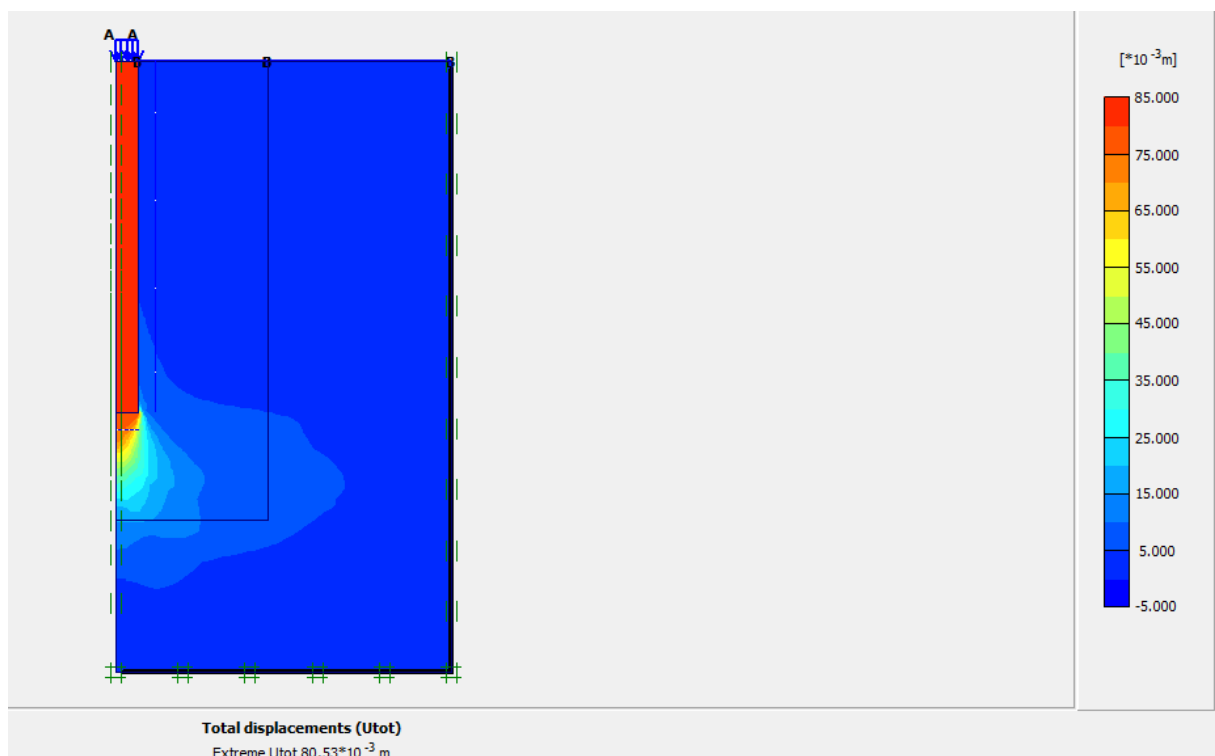


Figure III.2 : la déformation du pieu PRF sous une charge de rupture.



Figure III.3 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PRF sous une charge de rupture.

▪ **Les pieux à noyau en acier composite (SRP) :**

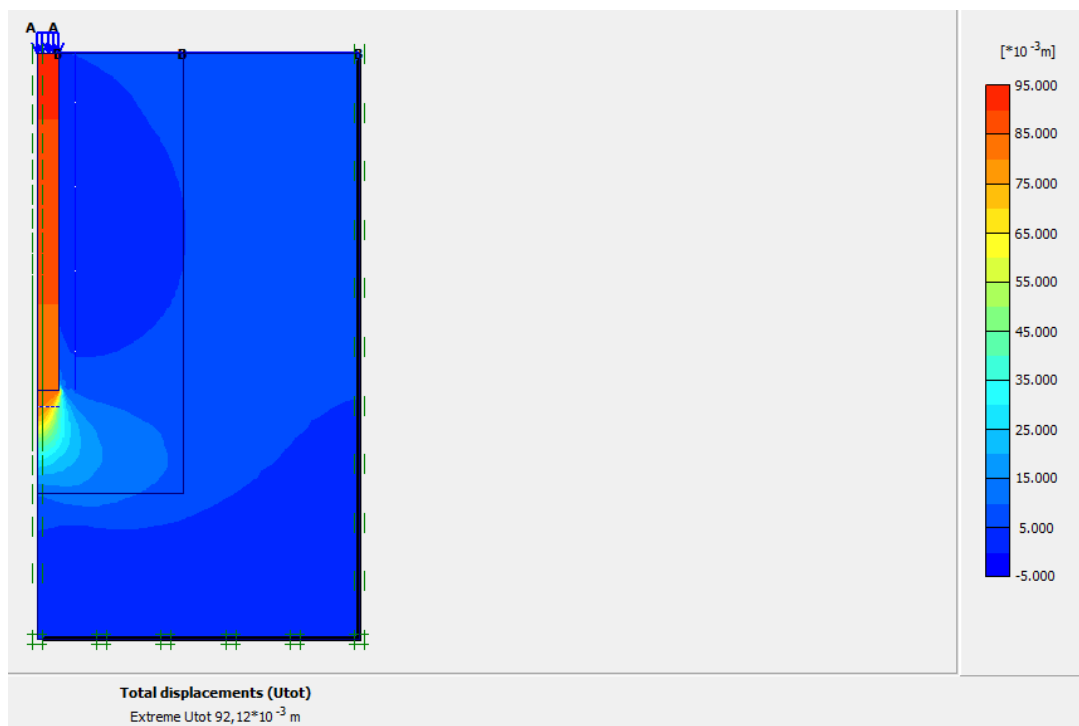


Figure III.4 : la déformation du pieu SRP sous une charge de rupture.

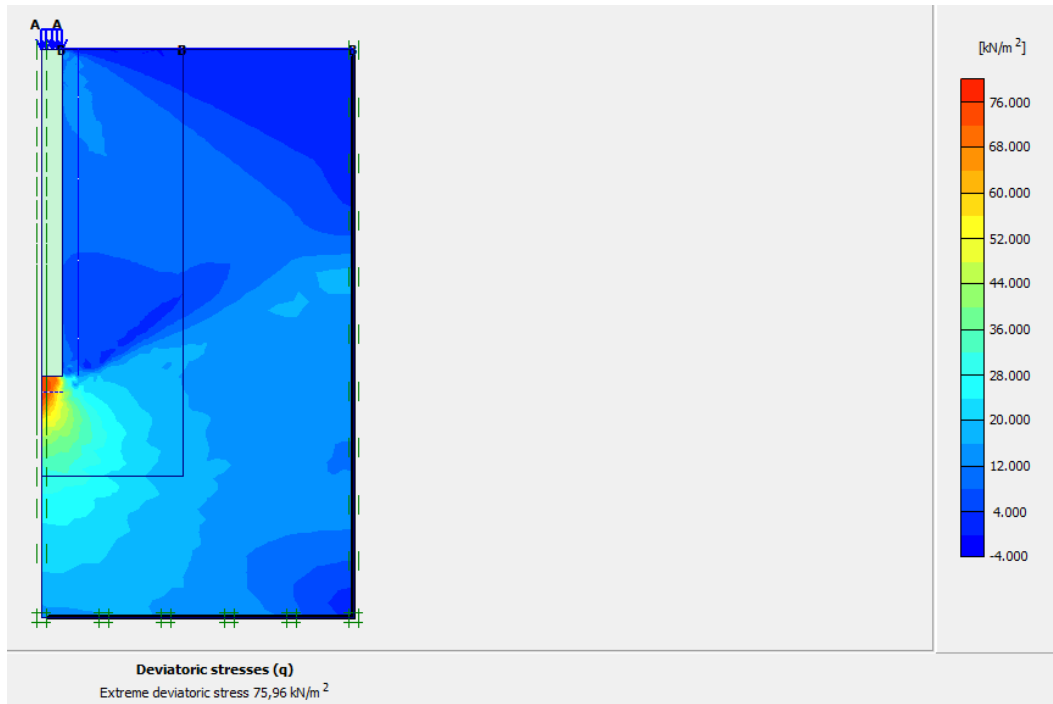


Figure III.5 : La contrainte déviatorique « q » du pieu SRP sous une charge de rupture.

▪ **Les pieux à matrice plastique renforcée (RPF):**

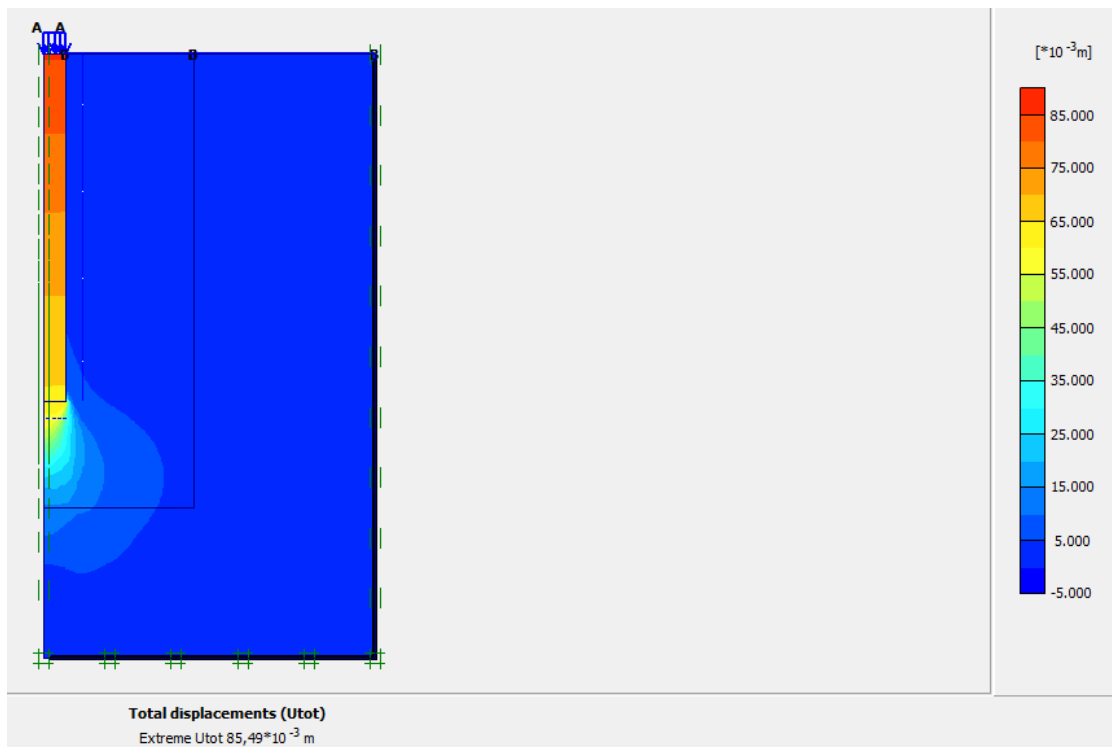


Figure III.6 : la déformation du pieu RPF sous une charge de rupture.

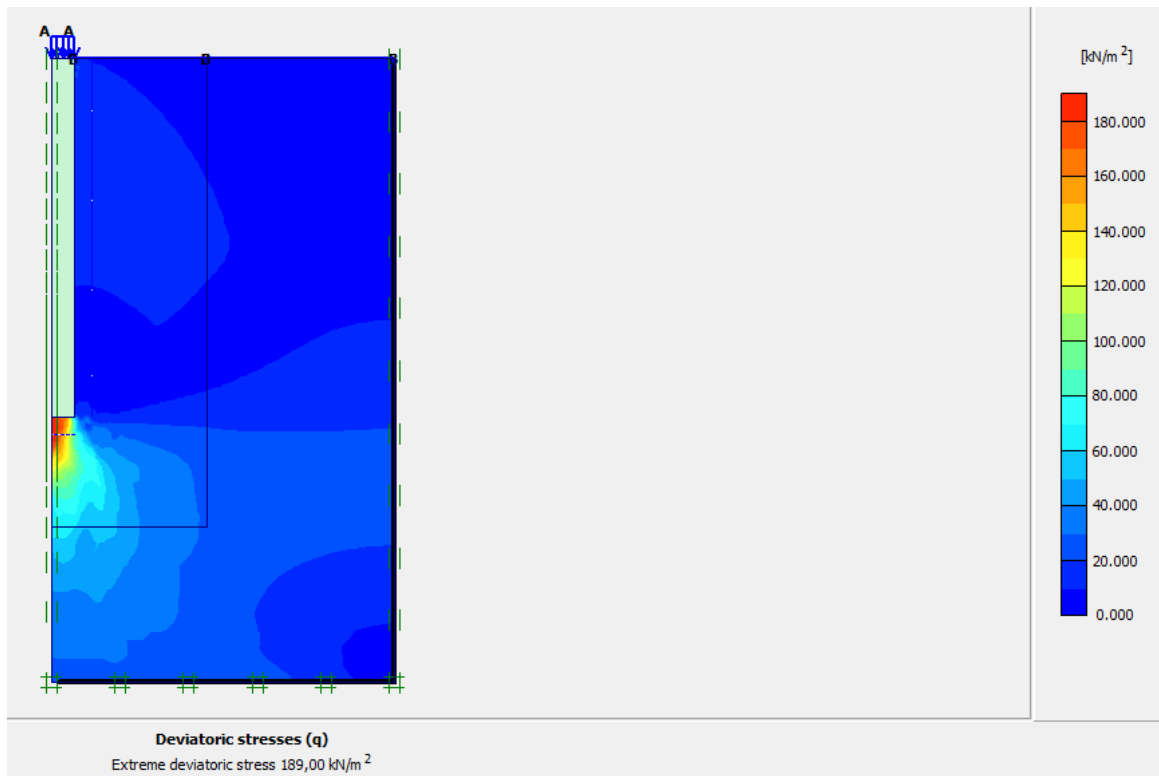


Figure III.7 : La contrainte déviatorique « q » du pieu RPF sous une charge de rupture.

▪ **Les pieux pultrudés en fibre de verre (PGF):**

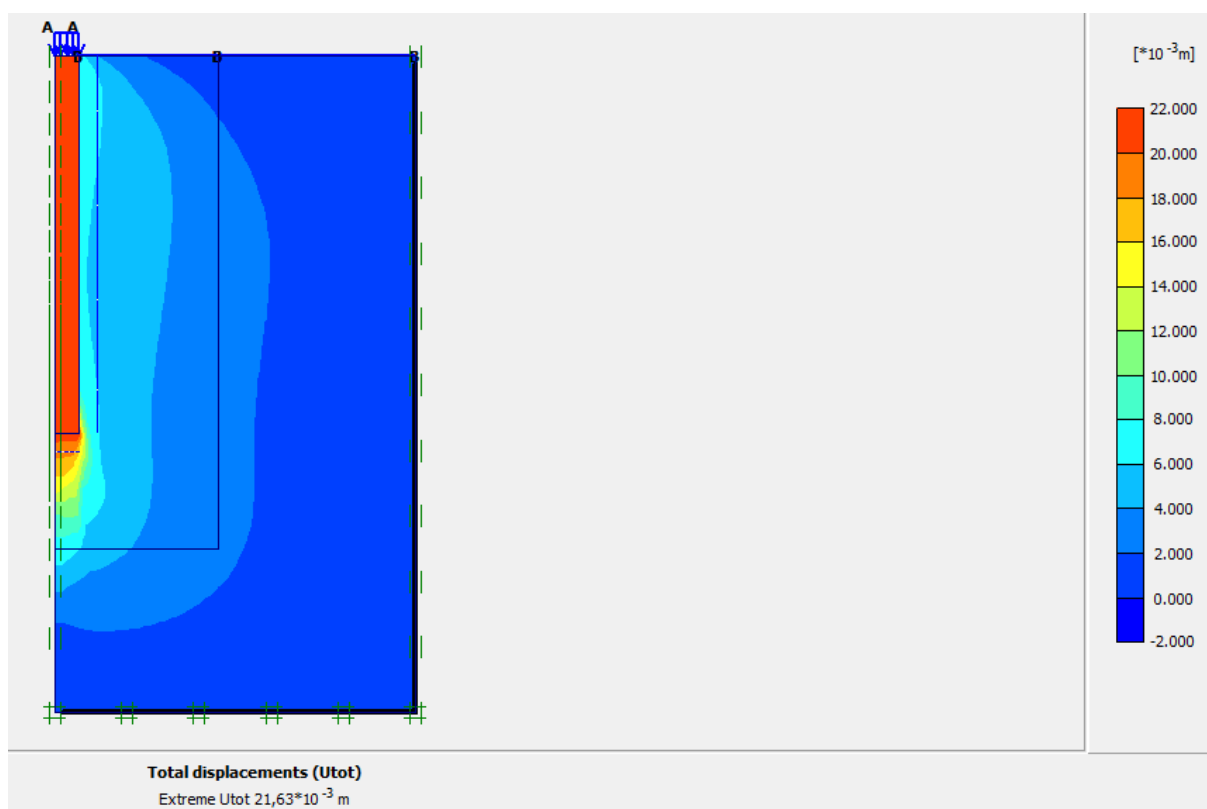


Figure III.8 : la déformation du pieu PGF sous une charge de rupture.

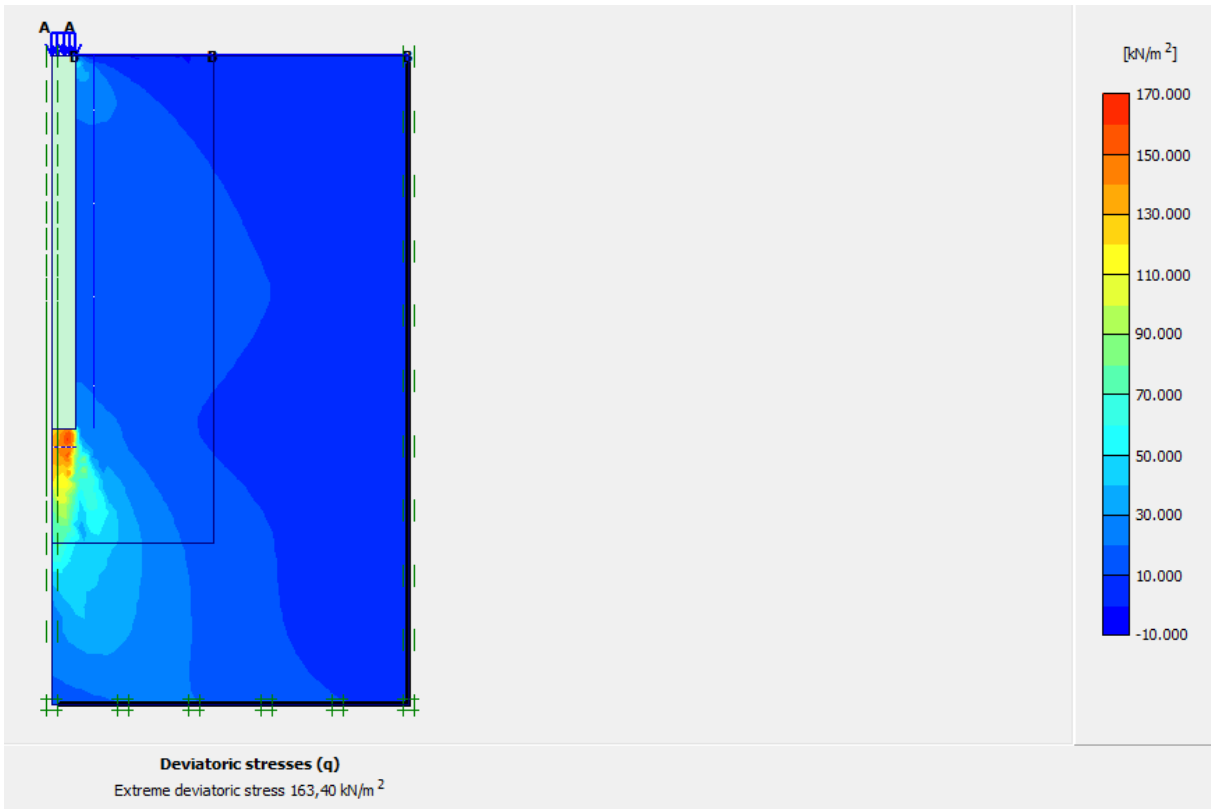


Figure III.9 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PGF sous une charge de rupture.

▪ **Les pieux en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF) :**

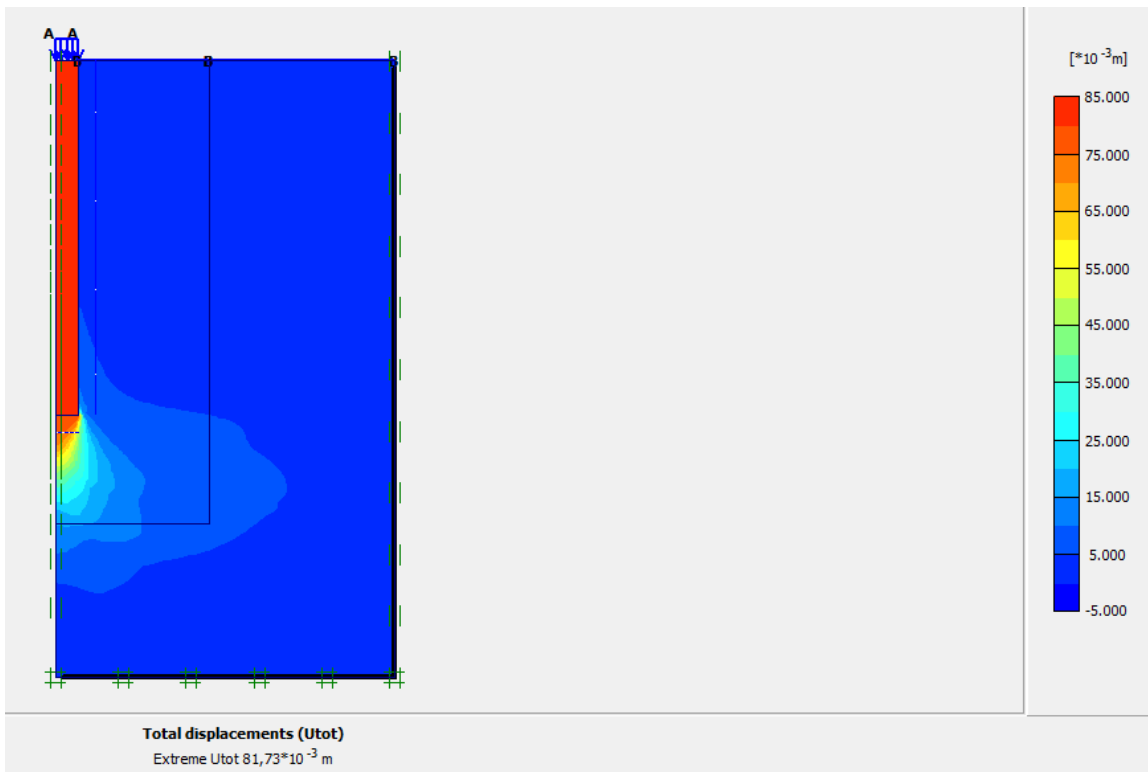


Figure III.10 : la déformation du pieu GPRF sous une charge de rupture.

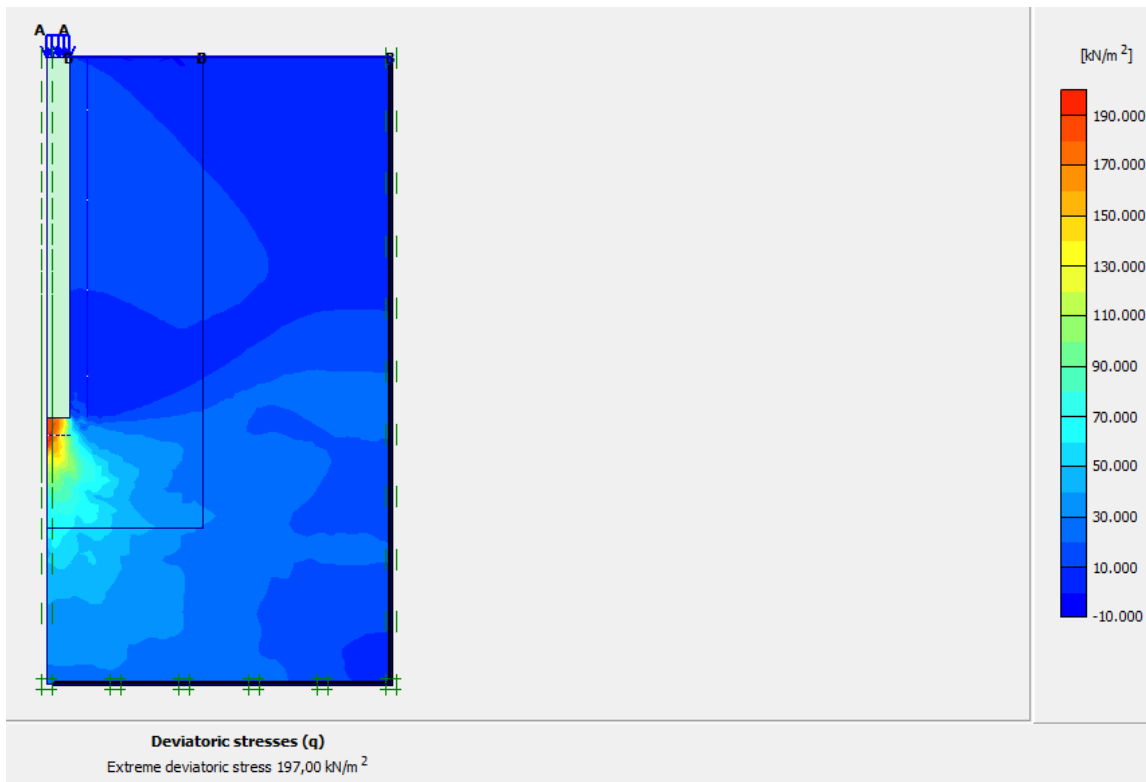


Figure III.11 : La contrainte déviatorique « q » du pieu GPRF sous une charge de rupture.

▪ **Les pieux creux en FRP :**

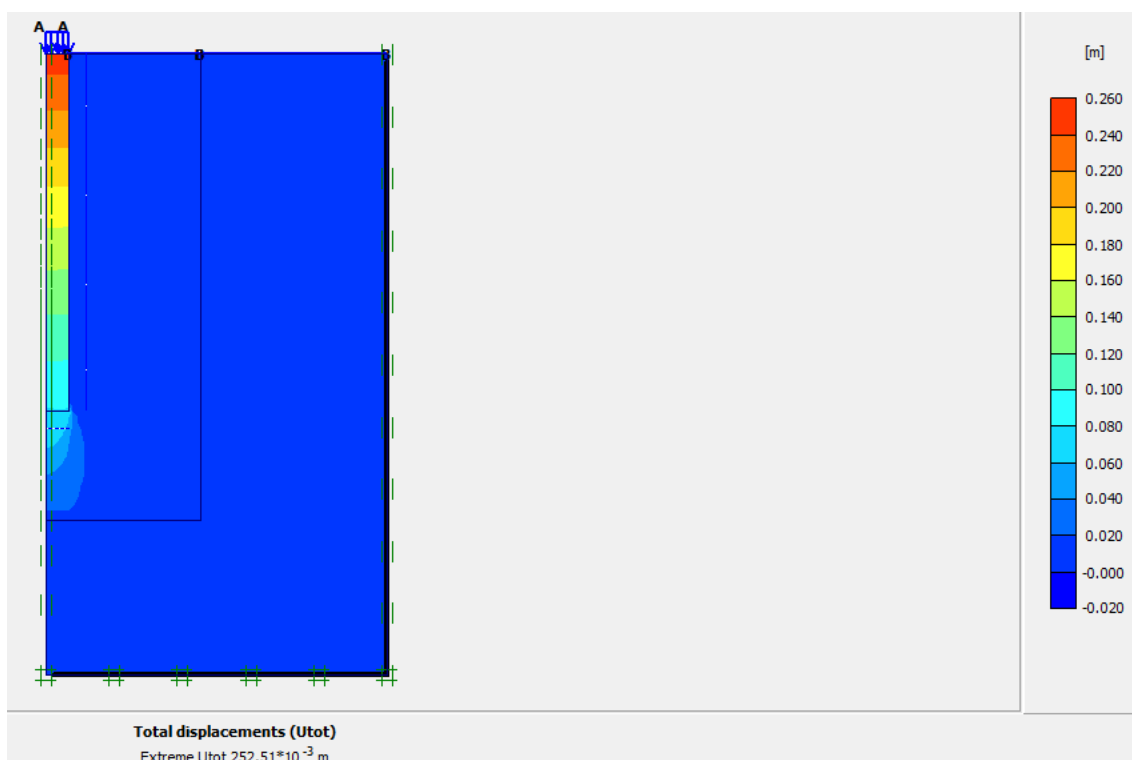


Figure III.12 : la déformation du pieu creux en FRP sous une charge de rupture.



Figure III.13 : La contrainte déviatorique « q » du pieu FRP sous une charge de rupture.

Le tableau III.3 résume les résultats des figures III.2 jusqu'à III.15

Tableau III.3 : Les déplacements et les contraintes déviatoriques « q » des différents pieux composites.

	PRF	SRP	RPF	PGF	GPRF	Creux en FRP
Déplacement (mm)	80.53	92.12	85.49	21.63	81.73	252.51
q (Kpa)	196.2	75.96	189,00	163.40	197,00	221.90

Selon les résultats obtenus on remarque que le pieu pultrudés en fibre de verre (PGF) résiste mieux que les autres pieux composites étudiés est cela peut être dû au module d'élasticité élevé.

La courbe ci-dessous montre le chargement en fonction de déplacement au point ($x=0.19\text{m}$ et $y=8.5\text{m}$). Ces courbes montrent clairement que le comportement du pieu pultrudés en fibre de verre (PGF) et le mieux comportement, et que le comportement du pieu en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF) et à matrice plastique renforcée (RPF) est presque le même.

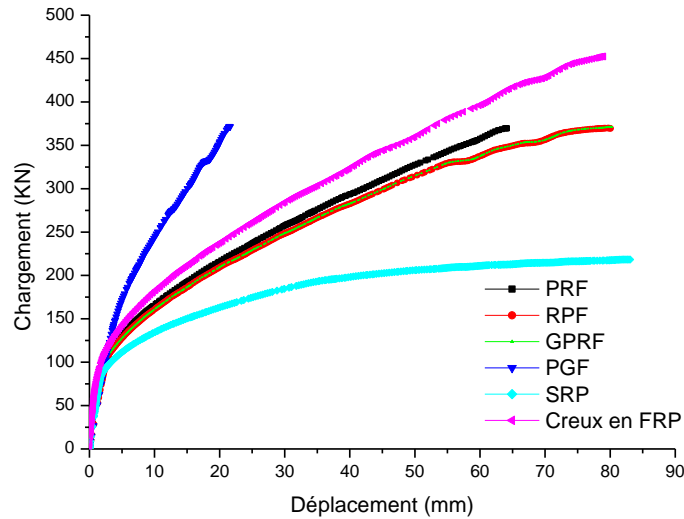


Figure III.14 : Comparaison entre les différents pieux composites étudiés (charge axiale).

III-4.1.2 Chargement latéral

On fait la modélisation numérique des différents pieux et en se basant sur le modèle géométrique de la figure III.1.b, pour les étapes du calcul on augmente le déplacement imposé jusqu'à 20% du diamètre de pieu.

Les figures suivantes de figure III.17 au figure III.28 présentent respectivement la contrainte déviatorique « q », la contrainte normale et la contrainte de cisaillement des différents pieux étudiés sous une charge latérale de rupture.

▪ Les pieux composites en (PRF) :

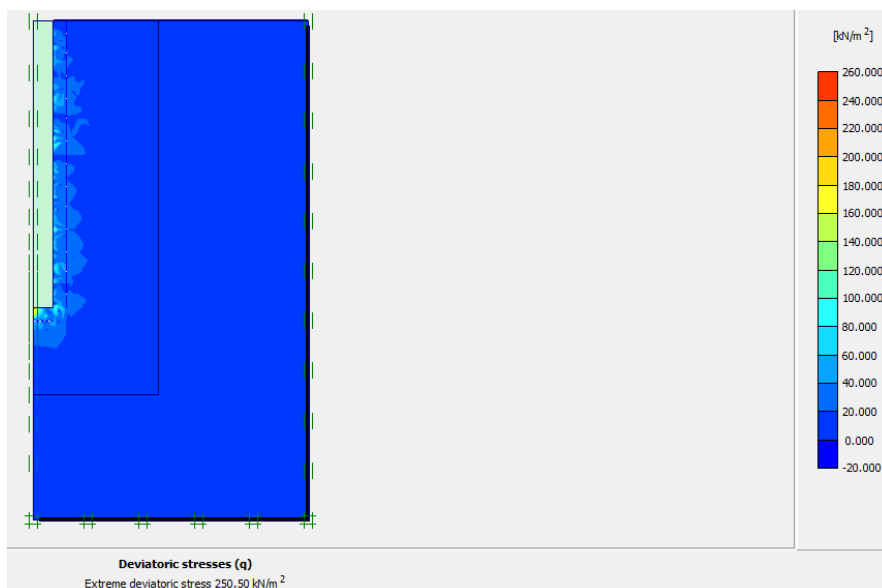


Figure III.15 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PRF sous une charge de rupture.

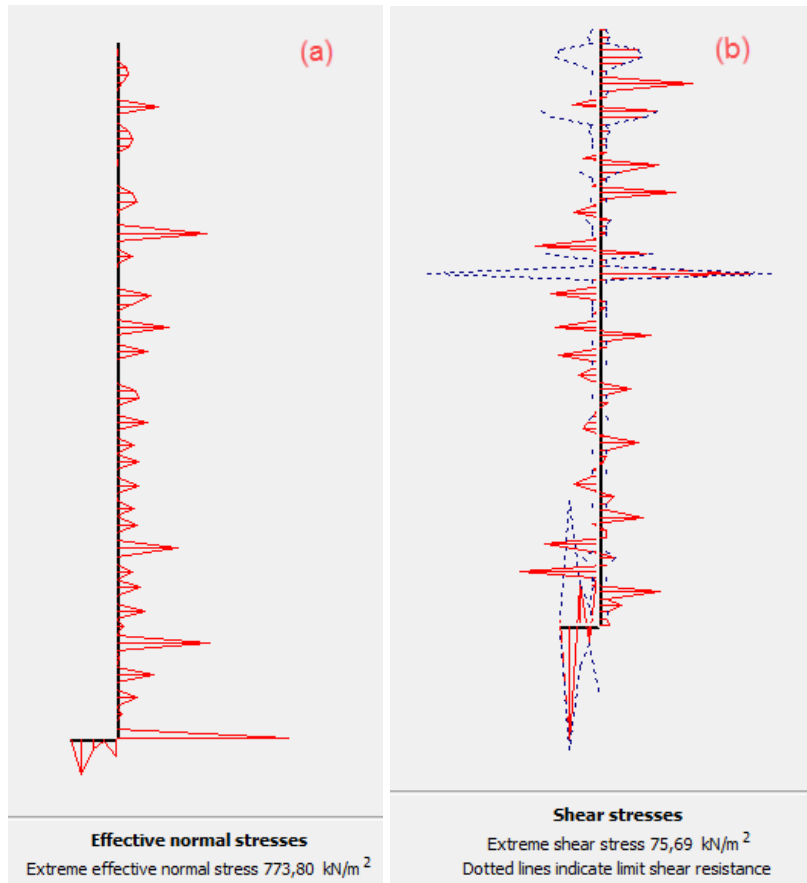


Figure III.16 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (PRF).

▪ **Les pieux à noyau en acier composite (SRP) :**

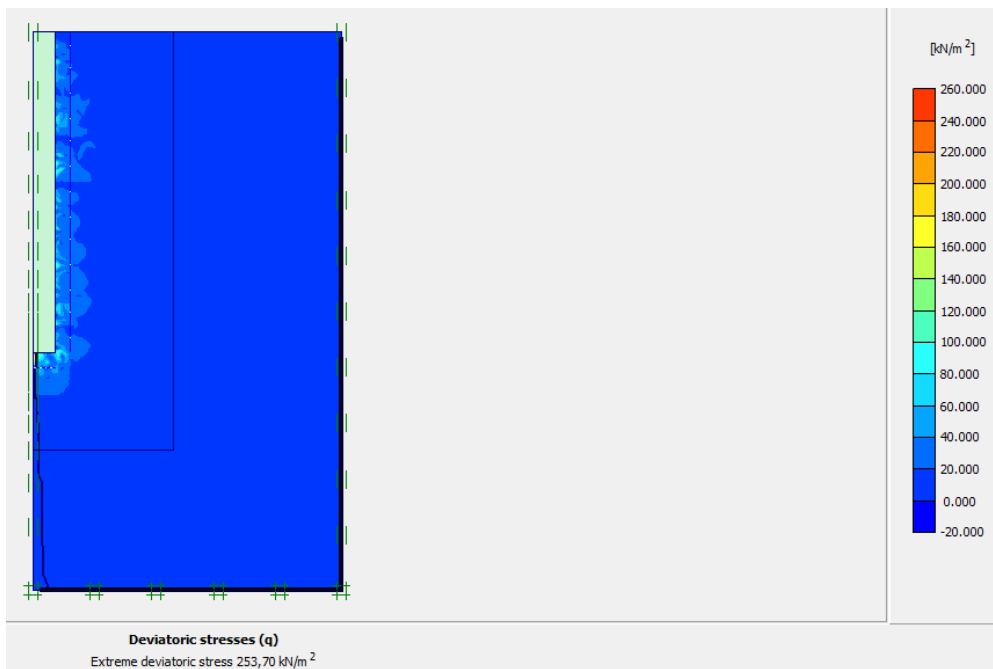


Figure III.17 : La contrainte déviatorique « q » du pieu SRP sous une charge de rupture.

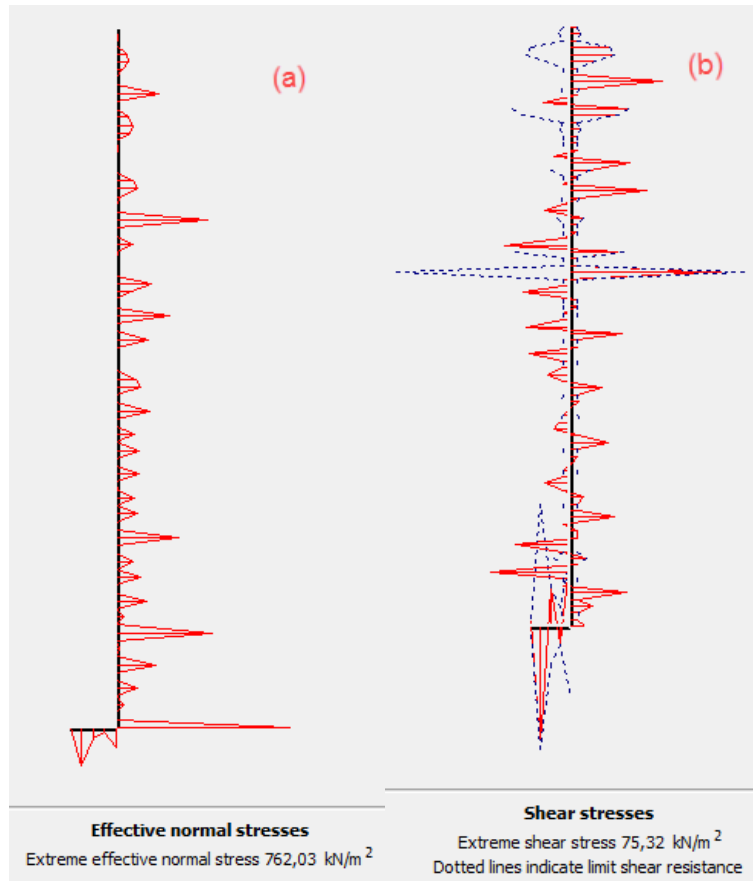


Figure III.18 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (SRP).

▪ **Les pieux à matrice plastique renforcée (RPF):**

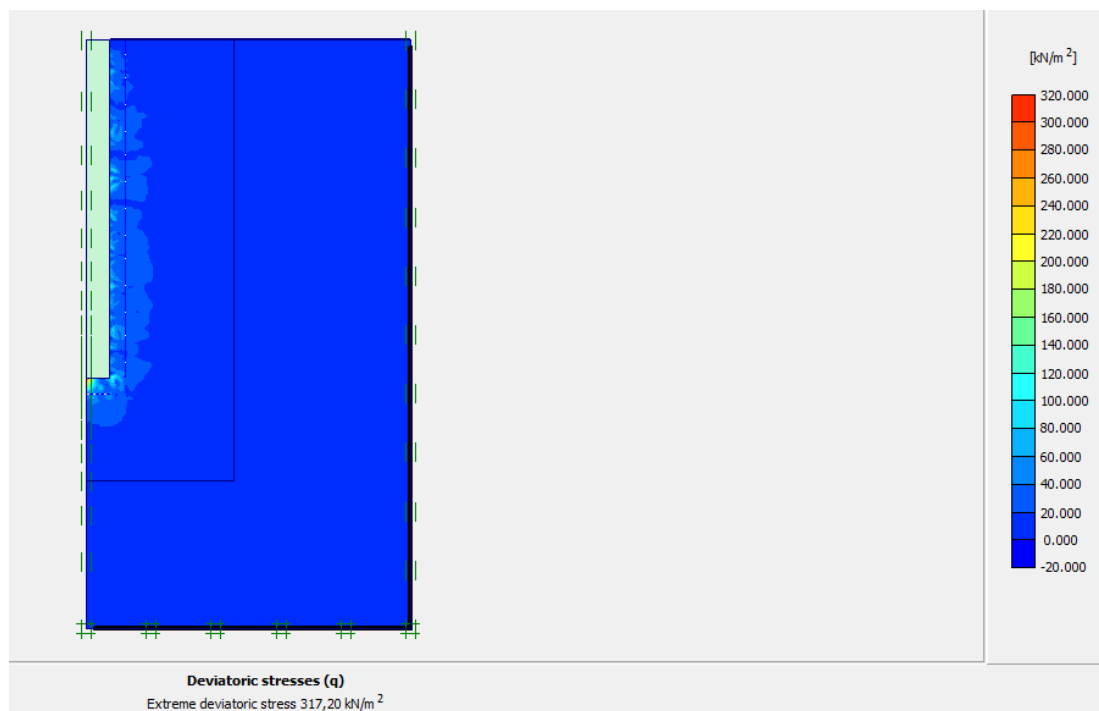


Figure III.19 : La contrainte déviatorique « q » du pieu RPF sous une charge de rupture.

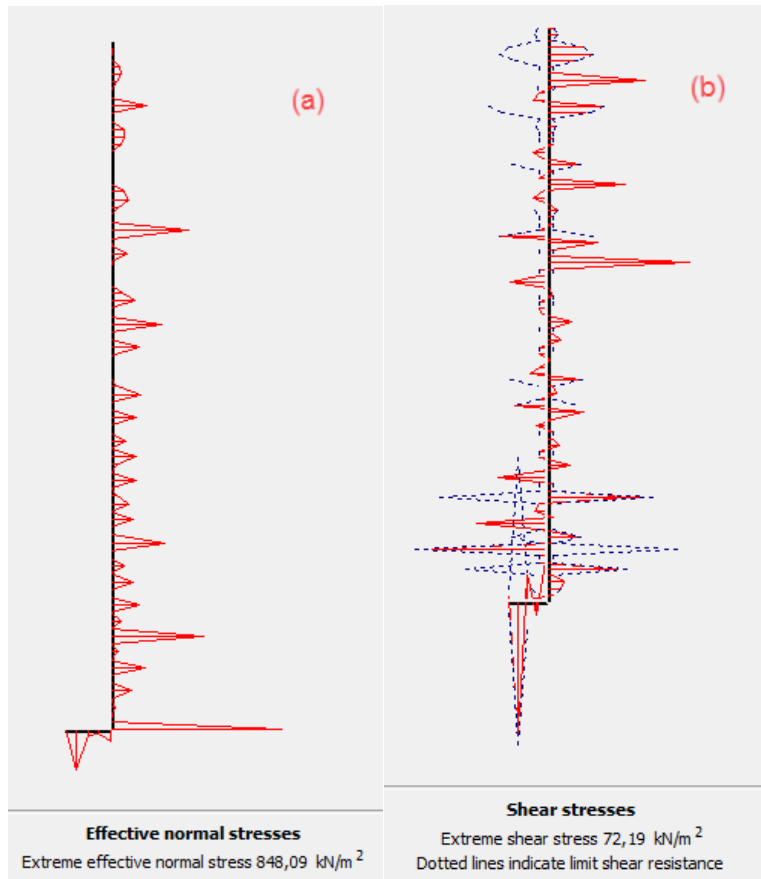


Figure III.20 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (RPF).

▪ **Les pieux pultrudés en fibre de verre (PGF) :**

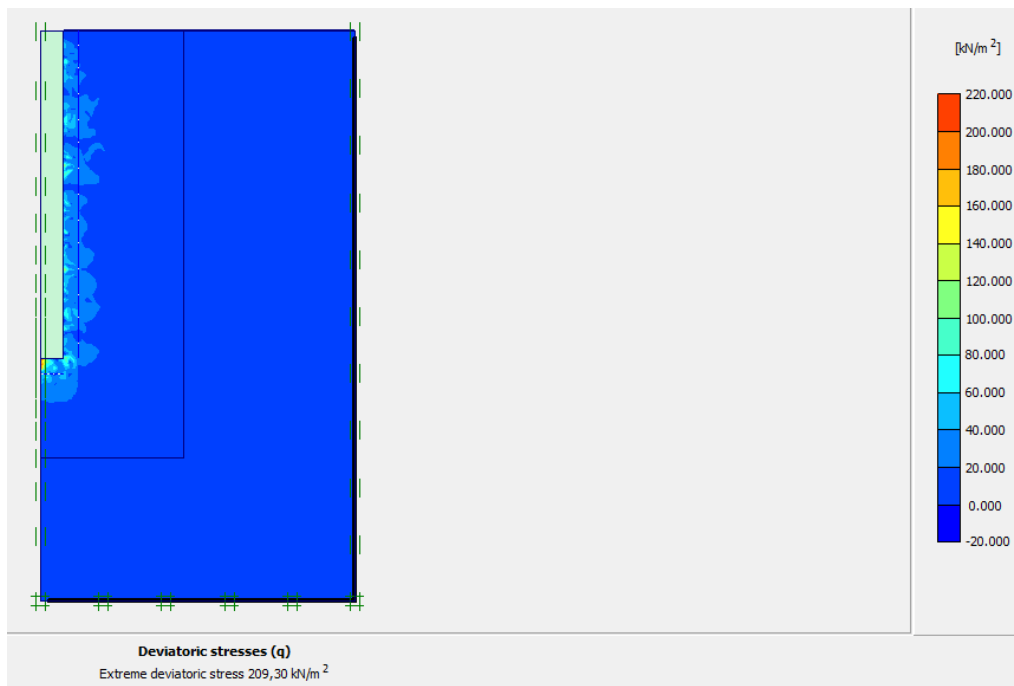


Figure III.21 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PGF sous une charge de rupture.

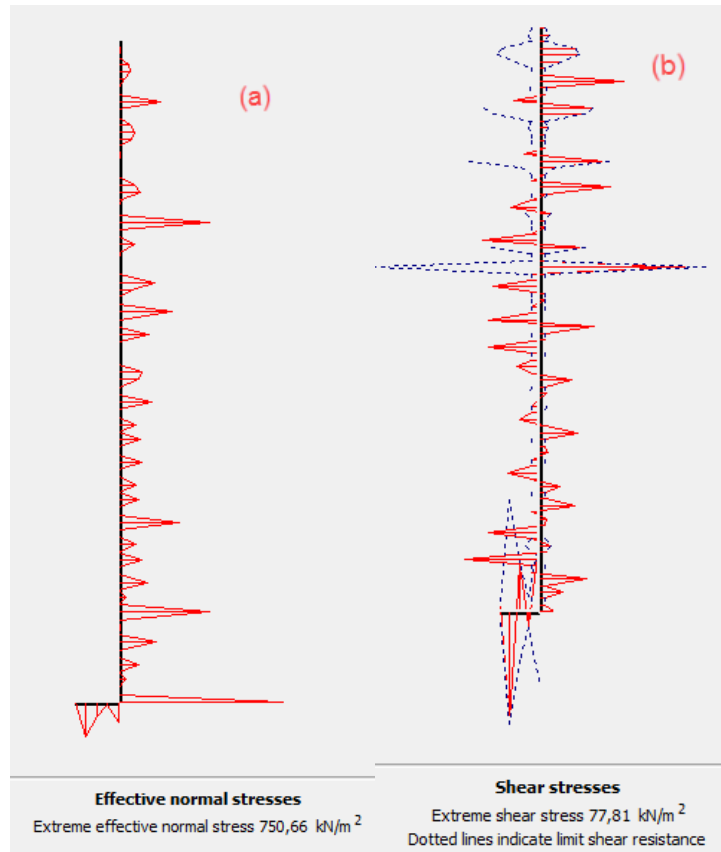


Figure III.22 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (PGF).

▪ **Les pieux en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF) :**

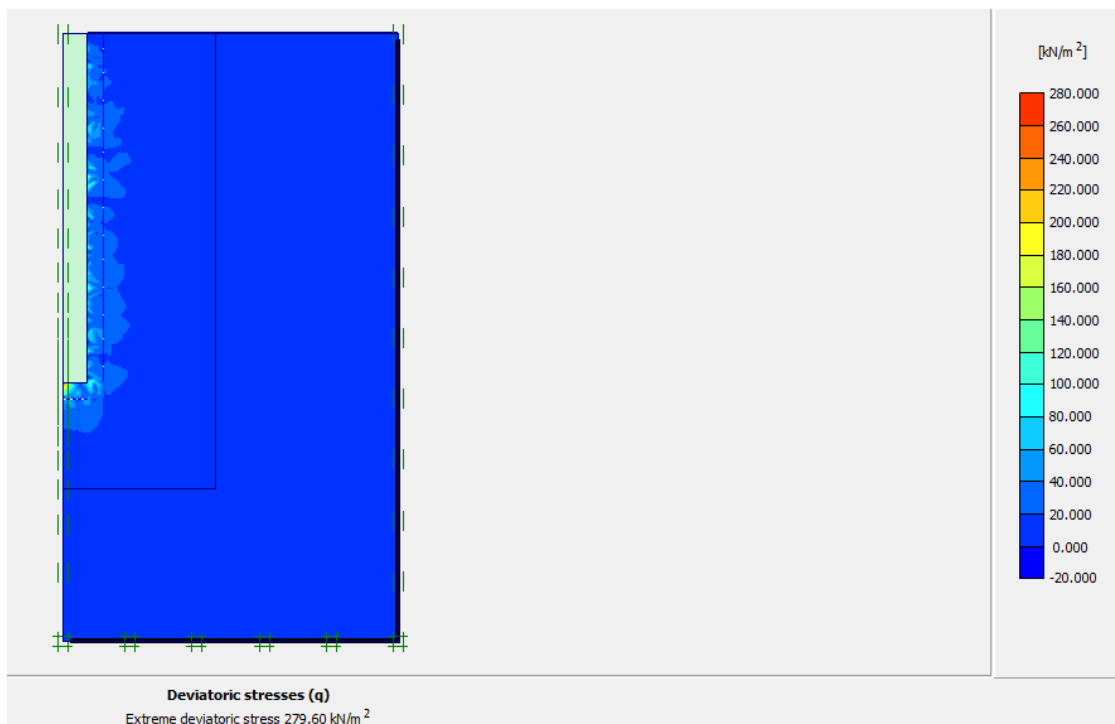


Figure III.23 : La contrainte déviatorique « q » du pieu GPRF sous une charge de rupture.

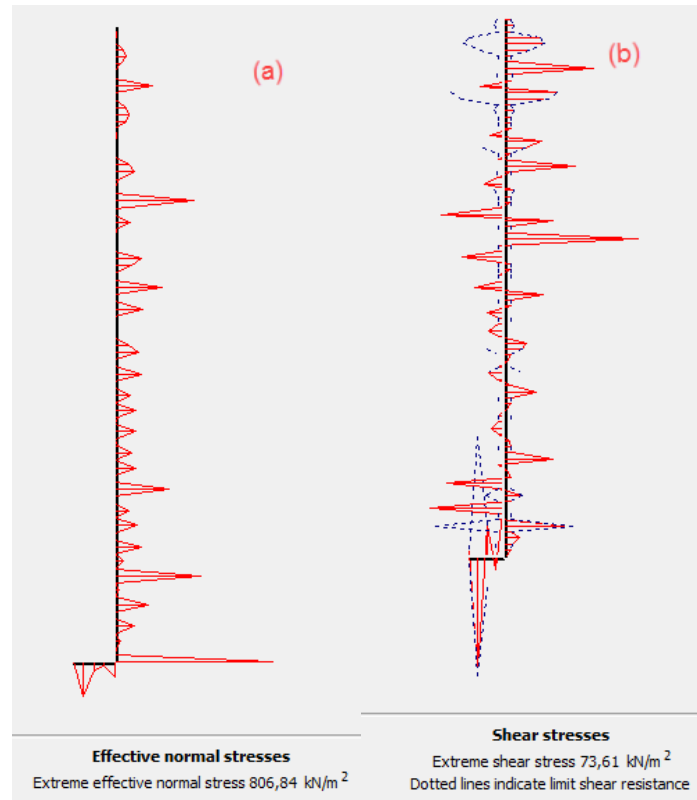


Figure III.24 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (GPRF).

▪ **Les pieux creux en FRP :**

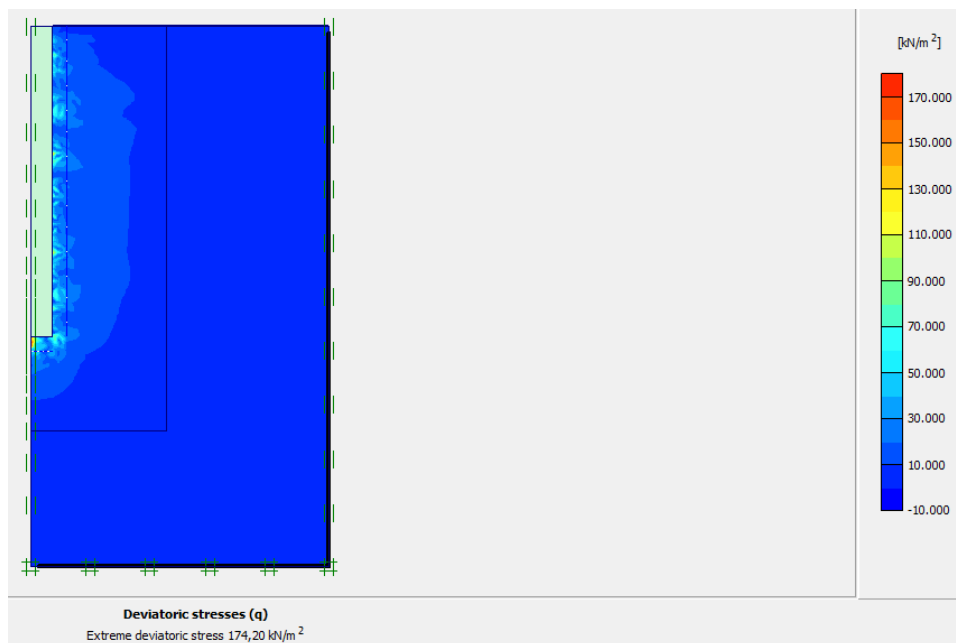


Figure III.25 : La contrainte déviatorique « q » du pieu creux en FRP sous une charge de rupture.

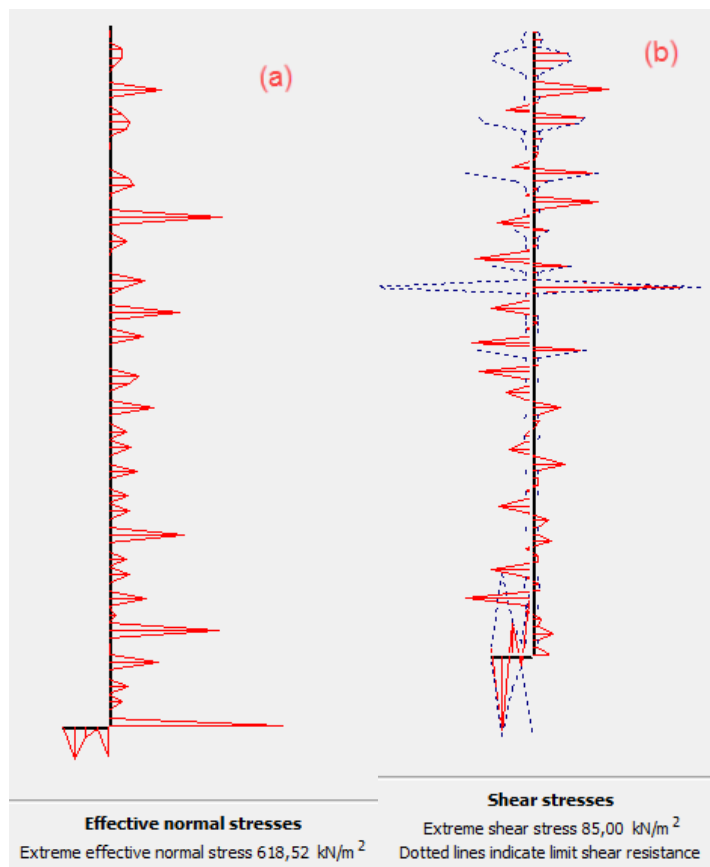


Figure III.26 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (creux en FRP).

Le tableau suivant résume les différents résultats trouvés des figures III. Jusqu'à la figure III.28.

Tableau III.4 : Les différentes contraintes des pieux composites en charge latérale.

	Contrainte déviatorique « q » (Kpa)	Contrainte normal (Kpa)	Contrainte de cisaillement (Kpa)
PRF	250.50	773.80	75.65
SRP	253.70	762.03	75.32
RPF	317.20	848.04	72.19
PGF	209.30	750.66	77.81
GPRF	279.60	806.84	73.61
Creux en FRP	174.20	618.52	85.00

Selon ce tableau (tableau III.4) les contraintes de cisaillement sont presque les mêmes pour les différents types des pieux composites par contre la différence réside dans les contraintes normales et les contraintes déviatoriques « q », on observe que le pieu composite de type RPF a une contrainte déviatorique et normale plus élevées que les autres types ; de plus les pieux de types « RPF et SRP » ont presque les mêmes contraintes.

La figure III.29 montre des courbes semi-logarithmiques de la force horizontale en fonction des déplacements au point « $x = 0$ m et $y = 8.5$ m », d'après cette figure le pieu de type PGF à une force horizontale plus élevée pour assurer un déplacement de 300 mm.

Donc on peut dire que :

- Le comportement du pieu RPF est le mieux par rapport aux autres pieux composites ;
- Par contre, à la pointe des pieux et plus exactement au point $x = 0$ m et $y = 8.5$ m, le pieu composite du type PGF a un comportement mieux que les autres types des pieux composites.

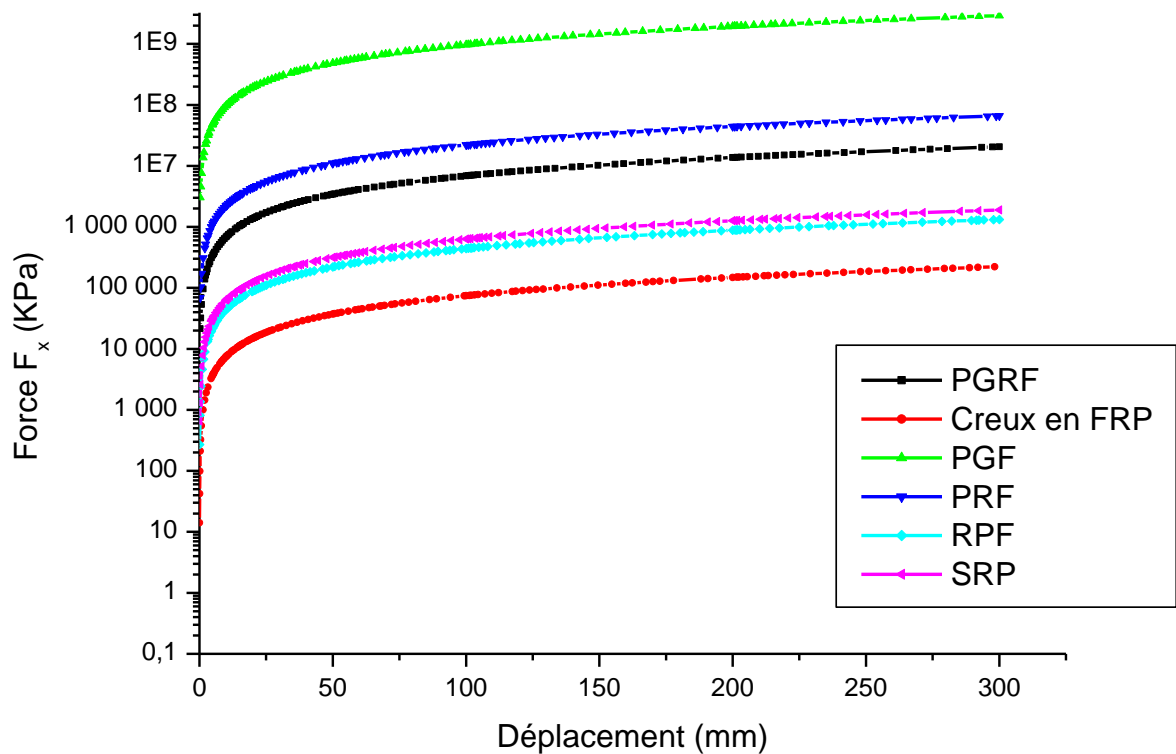


Figure III.27 : La Charge horizontale en fonction de déplacement pour les différents types des pieux composites.

III.4.2 Cas de deux couches de sol

On utilise le modèle géométrique de la figure III.30.a et les différentes caractéristiques des pieux du tableau III.2, ces pieux sont ancrés dans deux couches (sable et argile) (Tableau III.1)

pour voir leurs comportements dans ce type de sol et sous deux types de chargement (charge axiale ou latérale).

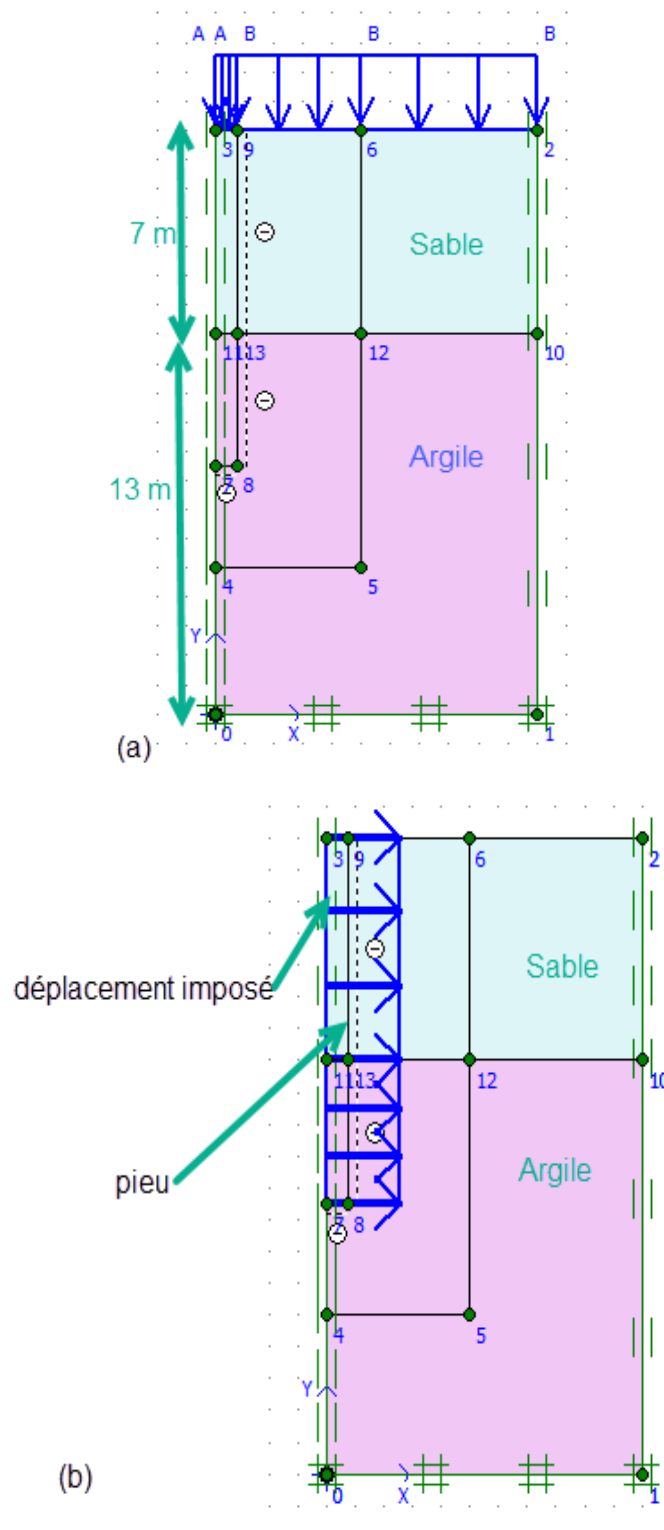


Figure III.28 : Modèle géométrique des pieux ancrés en deux couches de sol (a) chargement axial (b) chargement latéral.

III-4.2.1 Chargement axial

Les figures suivantes de III.31 à III.40 présentent respectivement la déformation et la contrainte déviatorique « q » des différents pieux étudiés sous une charge axiale de rupture.

▪ Les pieux composites en (PRF) :

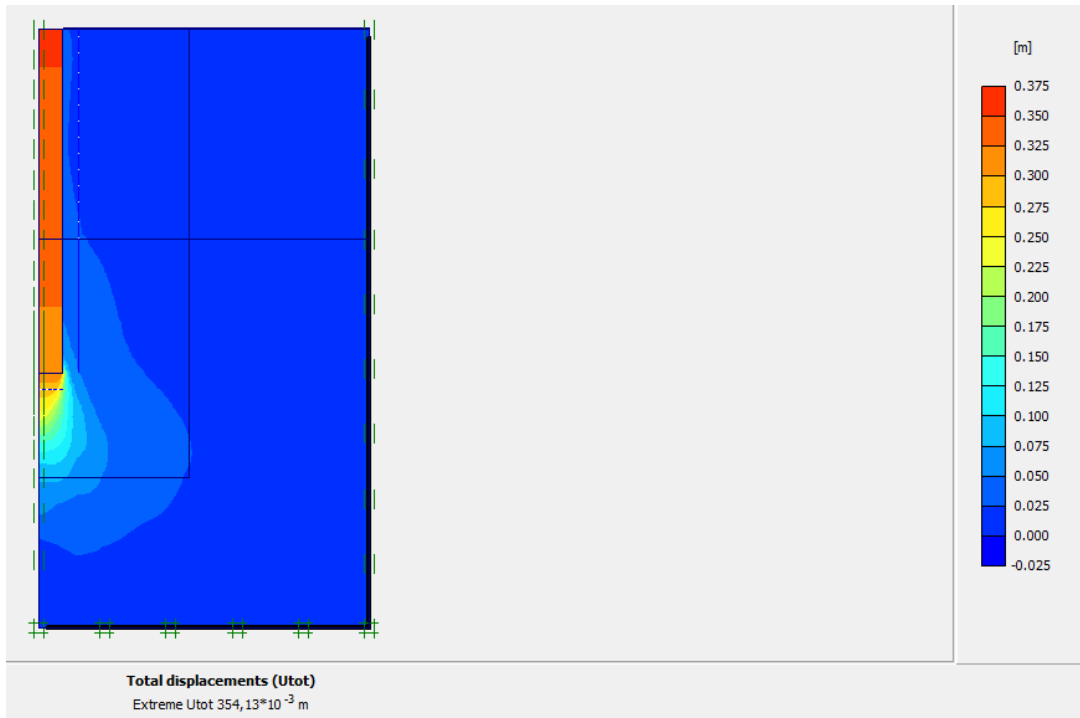


Figure III.29 : La déformation du pieu PRF sous une charge de rupture (deux couches).

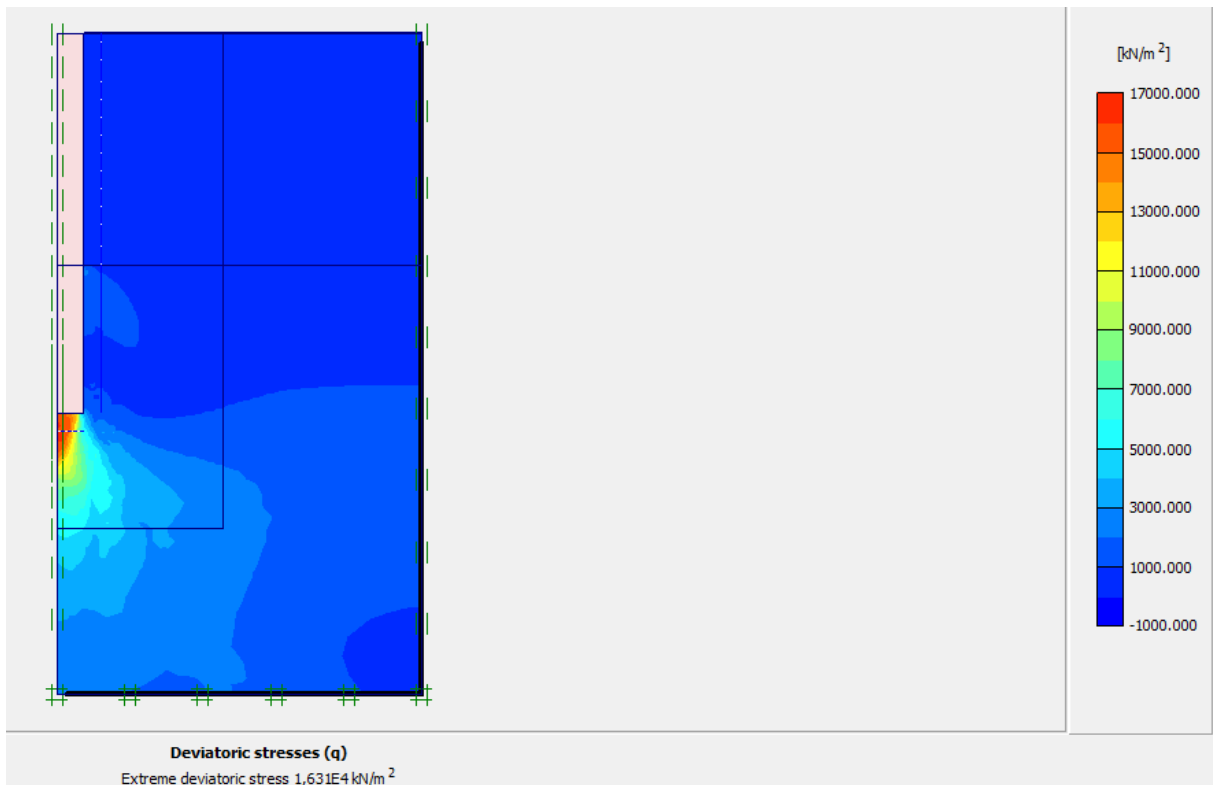


Figure III.30 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PRF sous une charge de rupture (deux couches).

▪ **Les pieux à noyau en acier composite (SRP) :**

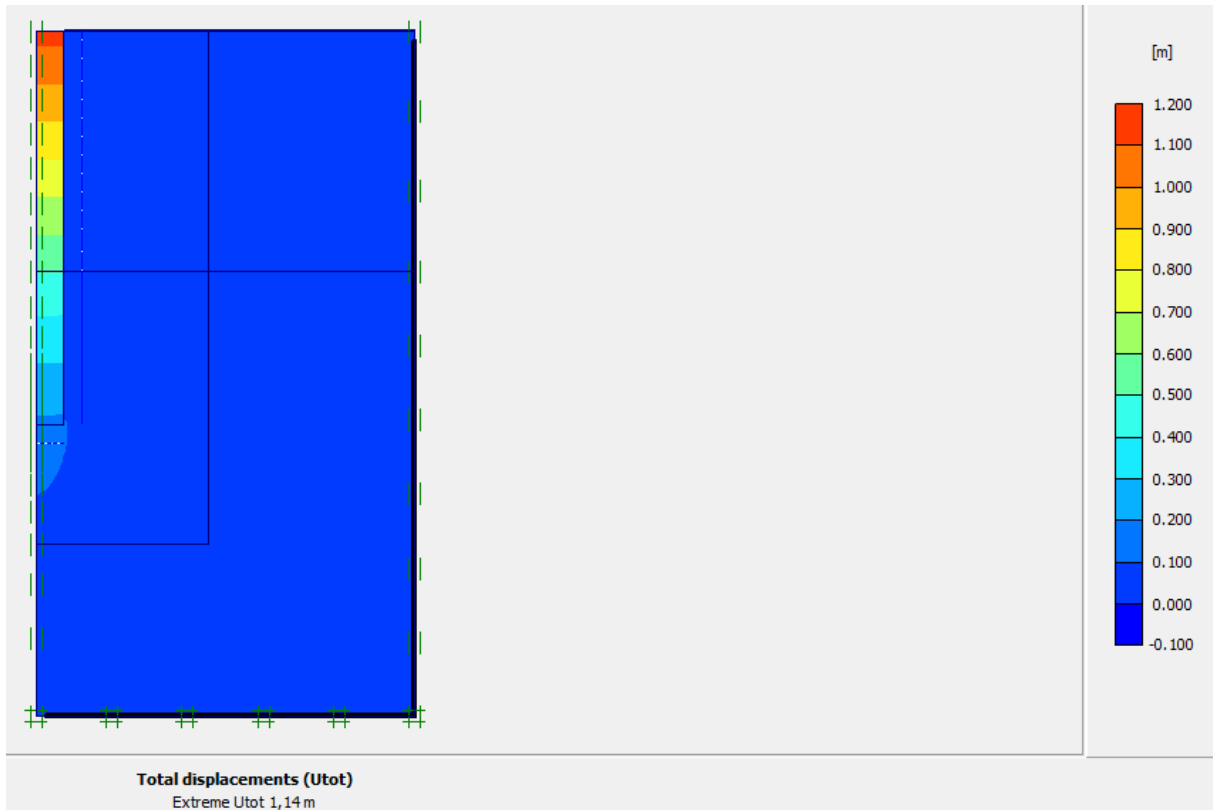


Figure III.31 : La déformation du pieu SRP sous une charge de rupture (deux couches).

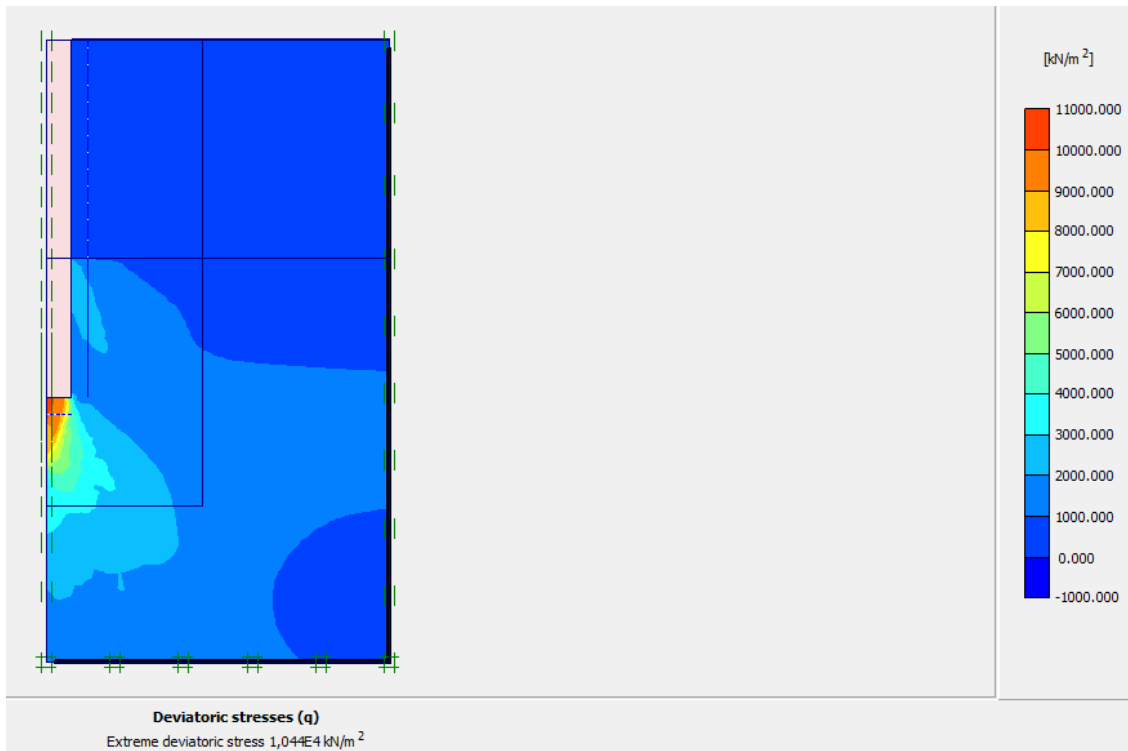


Figure III.32 : La contrainte déviatorique « q » du pieu SRP sous une charge de rupture (deux couches).

▪ Les pieux à matrice plastique renforcée (RPF) :

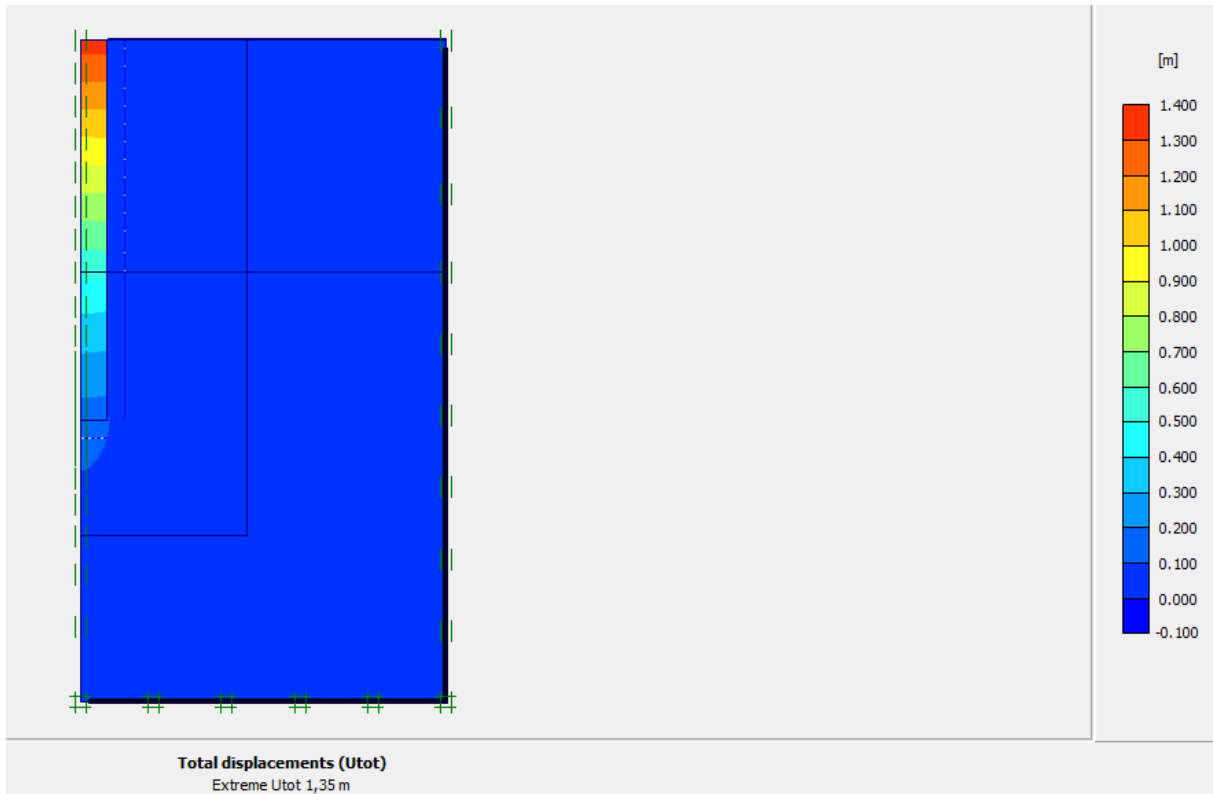


Figure III.33 : La déformation du pieu RPF sous une charge de rupture (deux couches).

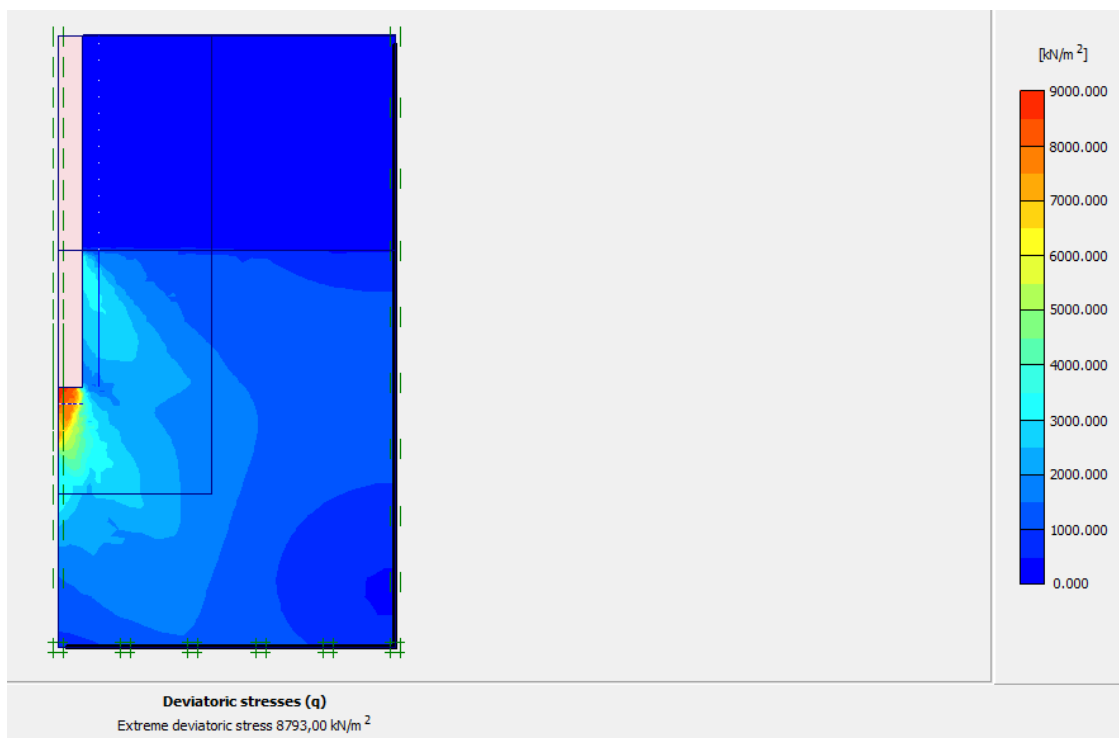


Figure III.34 : La contrainte déviatorique « q » du pieu RPF sous une charge de rupture (deux couches).

▪ Les pieux pultrudés en fibre de verre (PGF) :

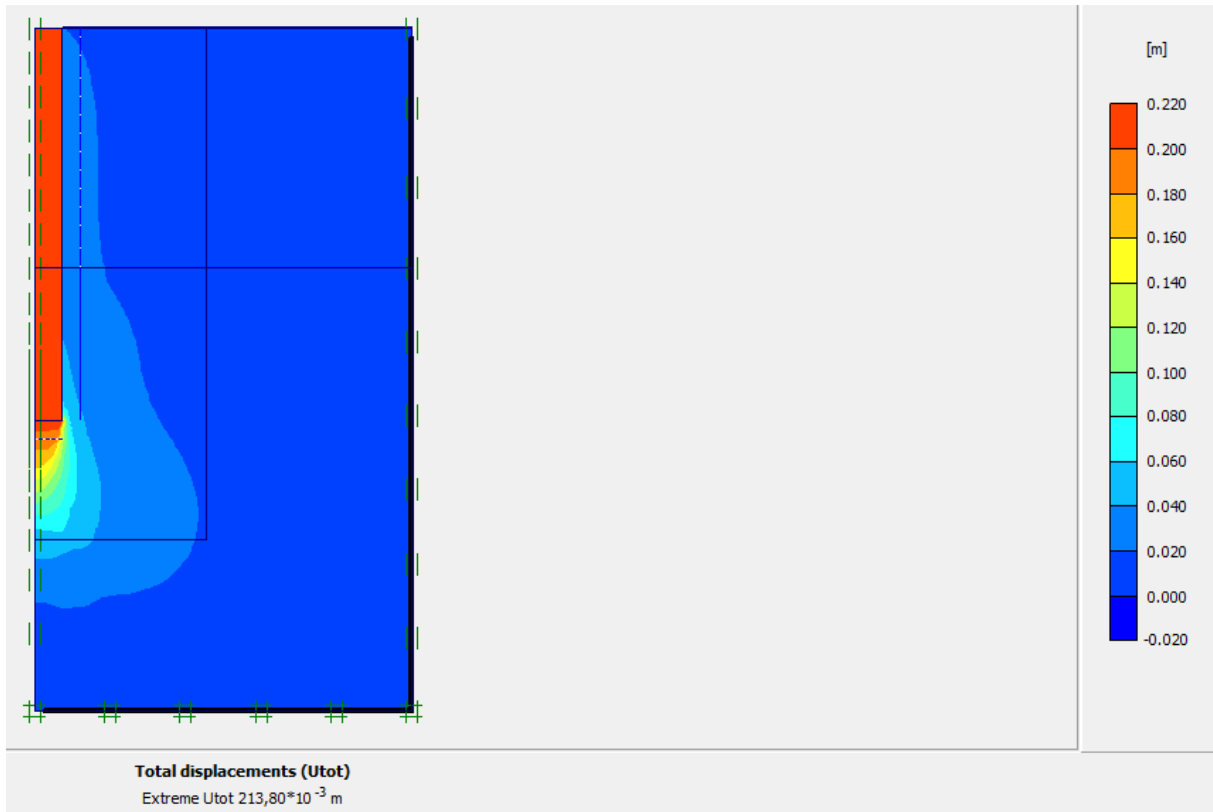


Figure III.35 : La déformation du pieu PGF sous une charge de rupture (deux couches).

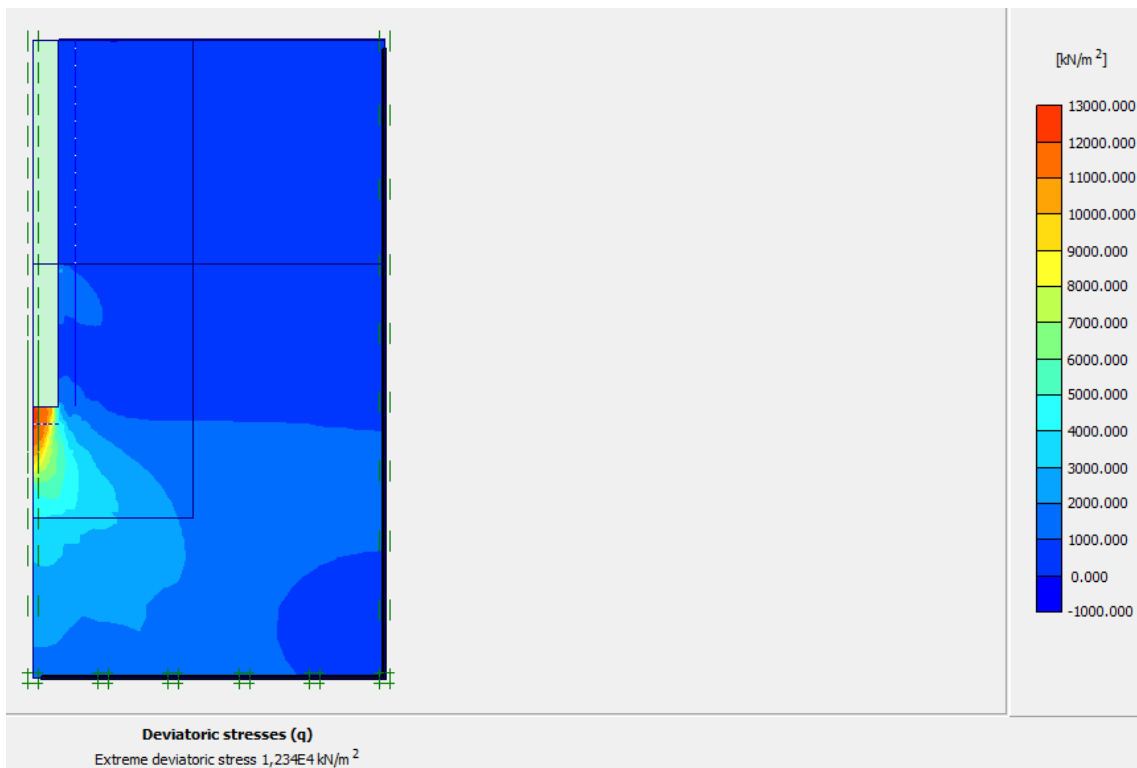


Figure III.36 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PGF sous une charge de rupture (deux couches).

▪ Les pieux en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF) :

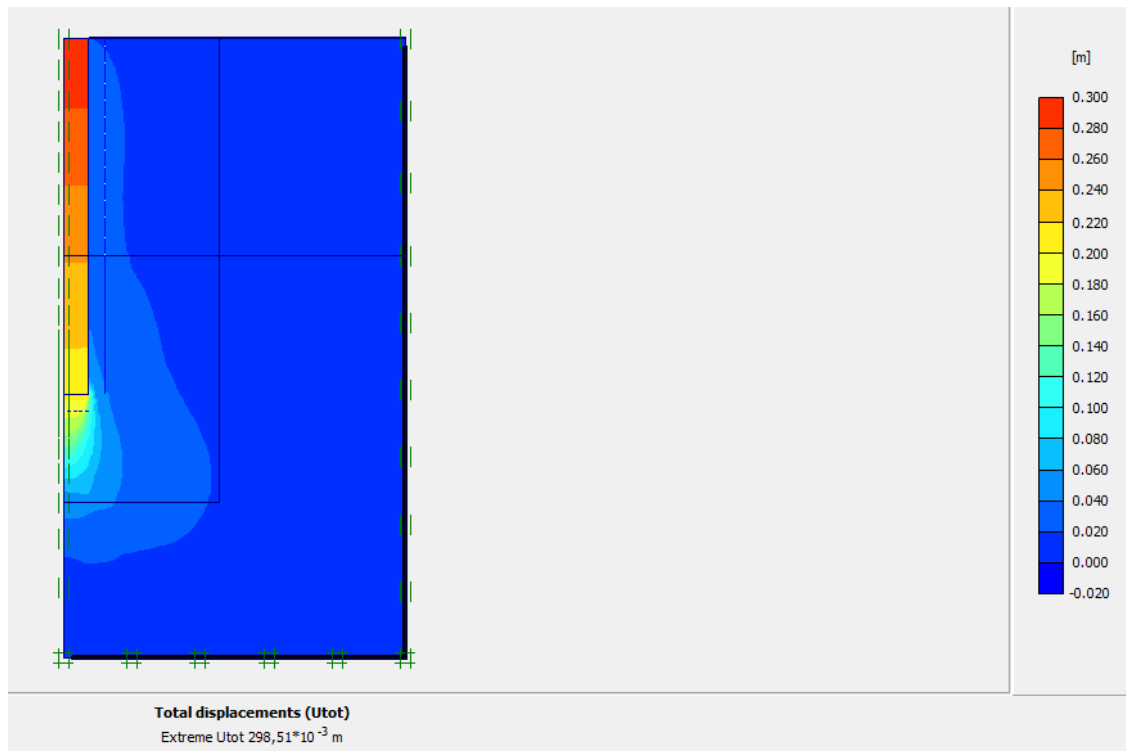


Figure III.37 : La déformation du pieu GPRF sous une charge de rupture (deux couches).

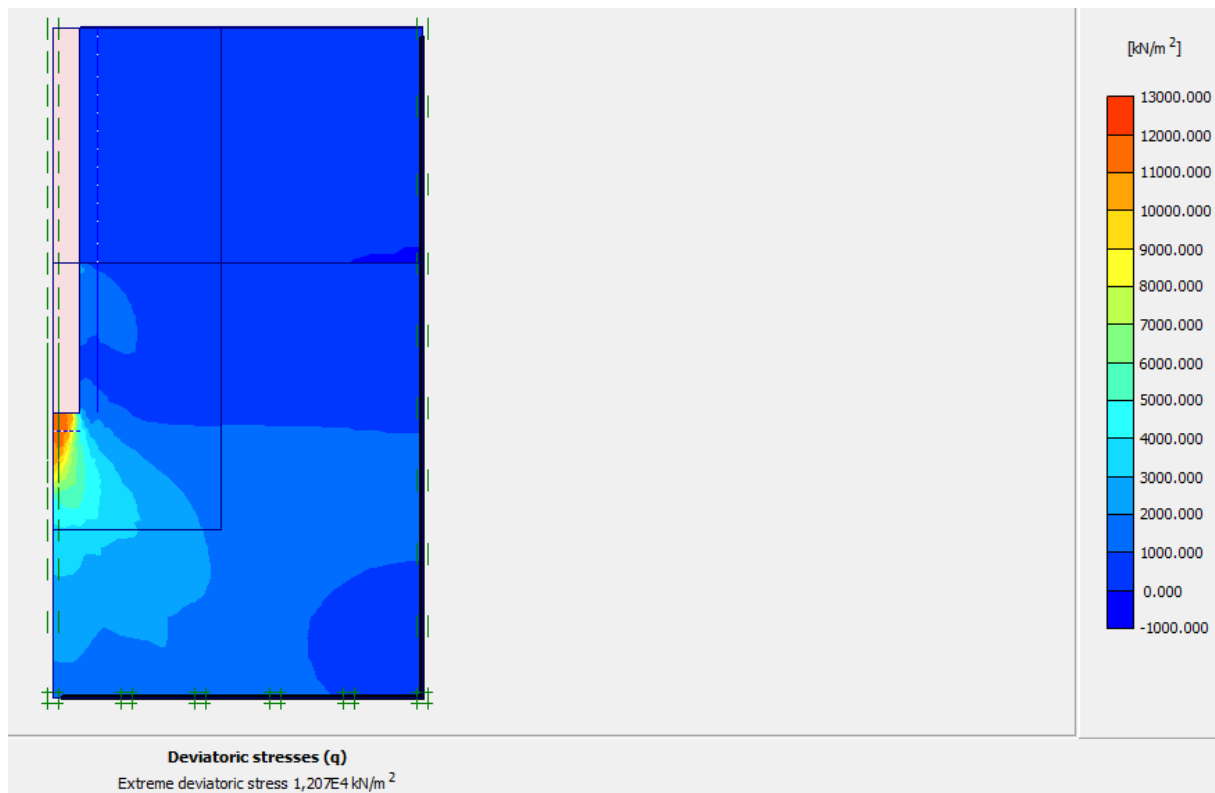


Figure III.38 : La contrainte déviatorique « q » du pieu GPRF sous une charge de rupture (deux couches).

▪ **Les pieux creux en FRP :**

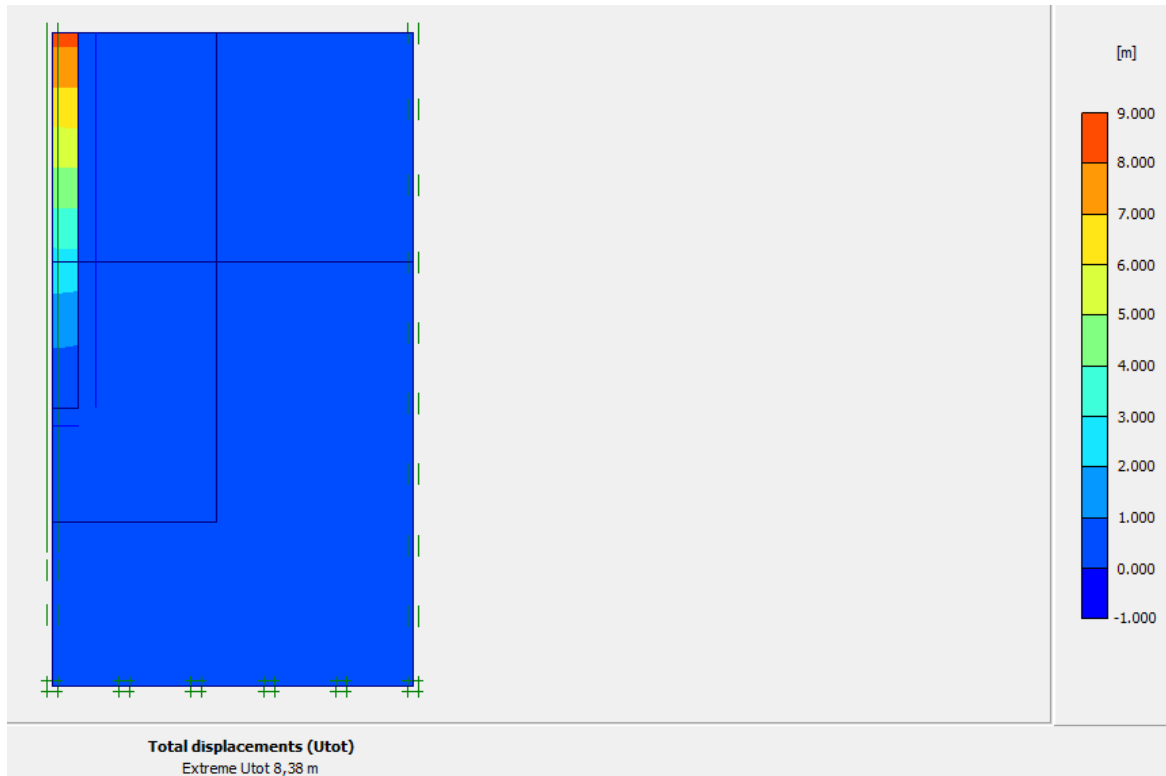


Figure III.39 : La déformation du pieu creux en FRP sous une charge de rupture (deux couches).

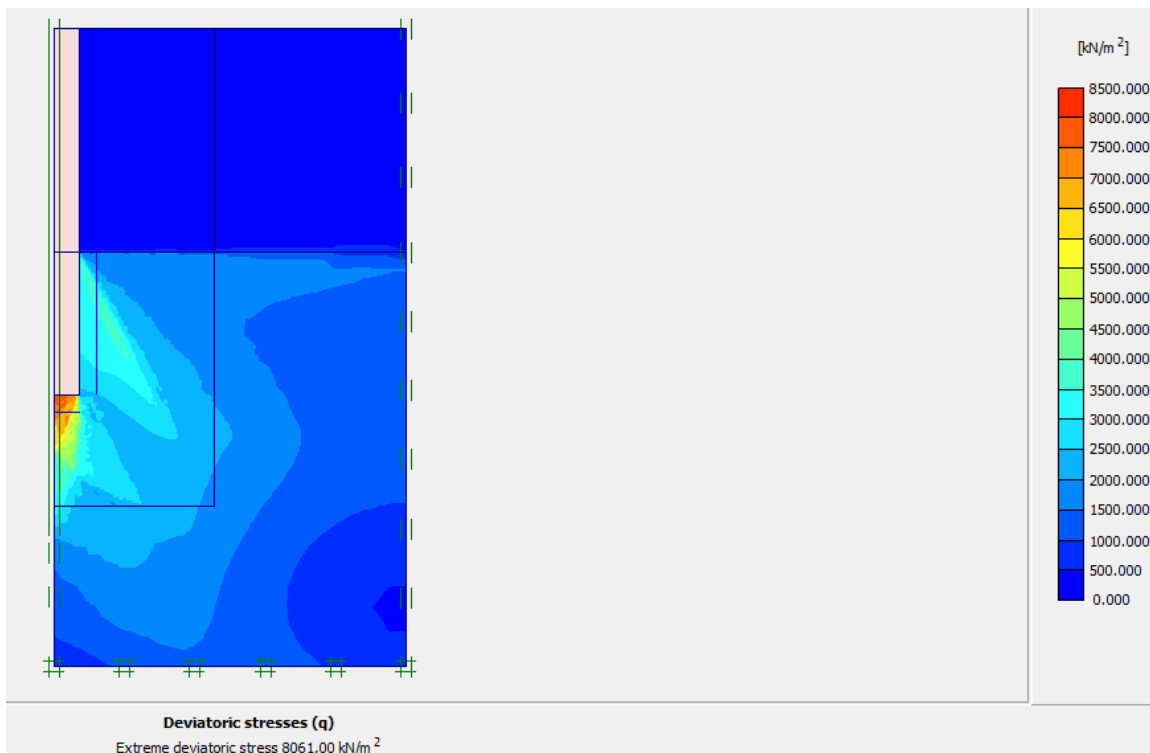


Figure III.40 : La contrainte déviatorique « q » du pieu creux en FRP sous une charge de rupture (deux couches).

Le tableau III.5 résume les résultats des figures III.29 jusqu'à III.40

Tableau III.5 : Les déplacements et les contraintes déviatoriques « q » des différents pieux composites (deux couches).

	PRF	SRP	RPF	PGF	GPRF	Creux en FRP
Déplacement (mm)	354.13	1140.00	1350.00	213.80	298.51	8380.00
q (Kpa)	16310	10400	8793	12340	12070	8061

Selon les résultats obtenus on observe le même résultat obtenu sous chargement axial : le pieu pultrudés en fibre de verre (PGF) résiste mieux que les autres pieux composites étudiés est cela peut être dû au module d'élasticité élevé.

La courbe ci-dessous montre le chargement en fonction de déplacement au point (x= 0.19m et y = 8.5 m). Dans cet endroit (pointe du pieu), le pieu de type PRF a un comportement mieux que les autres types des pieux composites ; de plus, le pieu pultrudés en fibre de verre (PGF) et le pieu en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF) ont presque le même comportement à la pointe (voir figure III.41).

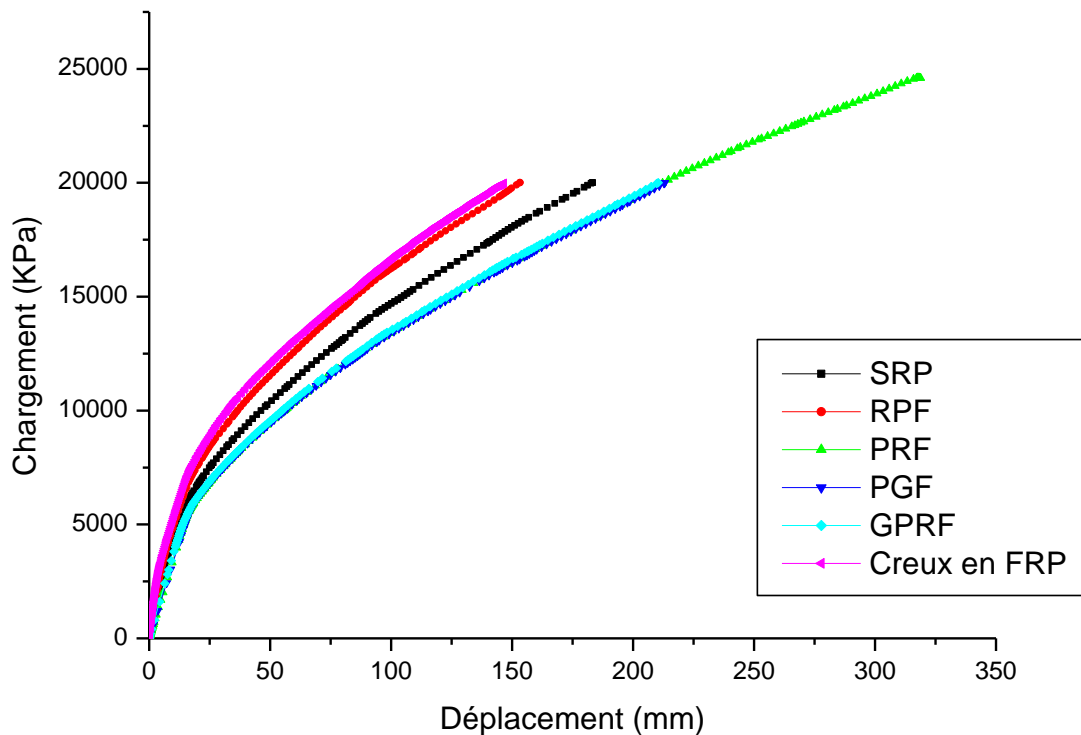


Figure III.41 : Comparaison entre les différents pieux composites étudiés (cas de deux couches).

III-4.2.2 Chargement latéral

On fait la modélisation numérique des différents pieux et en se basant sur le modèle géométrique de la figure III.30.b, pour les étapes du calcul on augmente le déplacement imposé jusqu'à 20% du diamètre de pieu.

Les figures suivantes de figure III.44 au figure III.55 présentent respectivement la contrainte déviatorique « q », la contrainte normale et la contrainte de cisaillement des différents pieux étudiés sous une charge latérale de rupture.

- **Les pieux composites en (PRF) :**

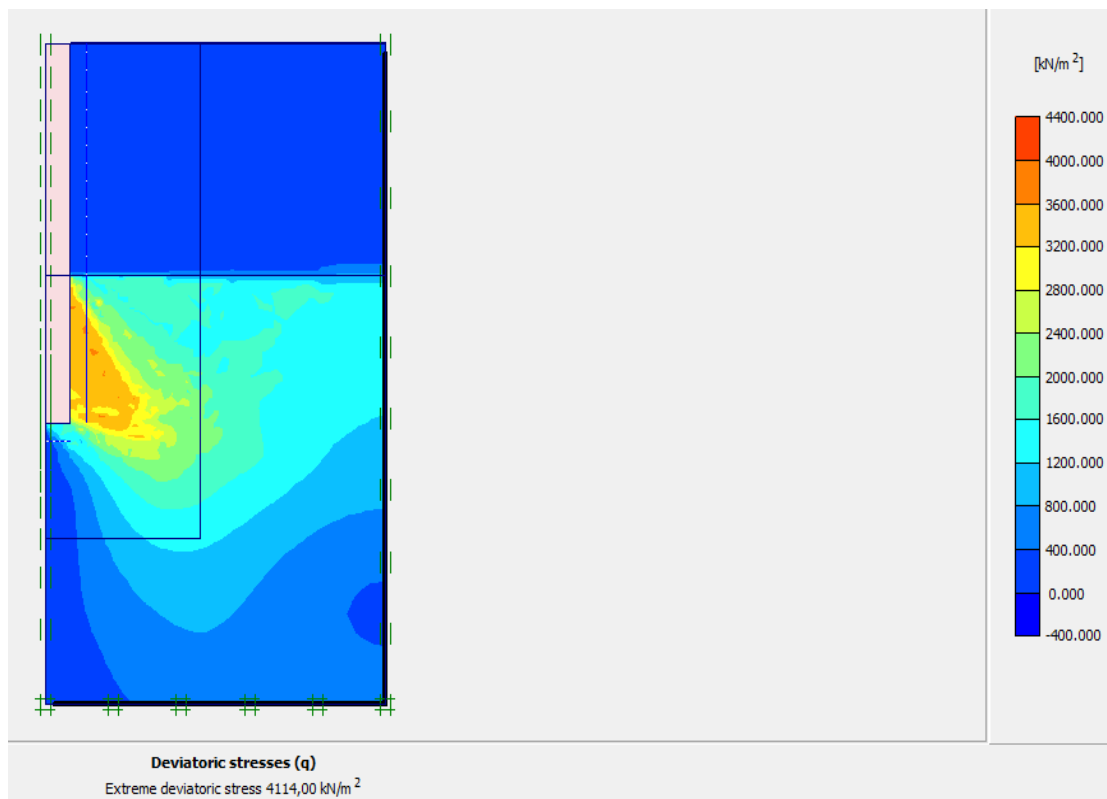


Figure III.42 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PRF sous une charge de rupture

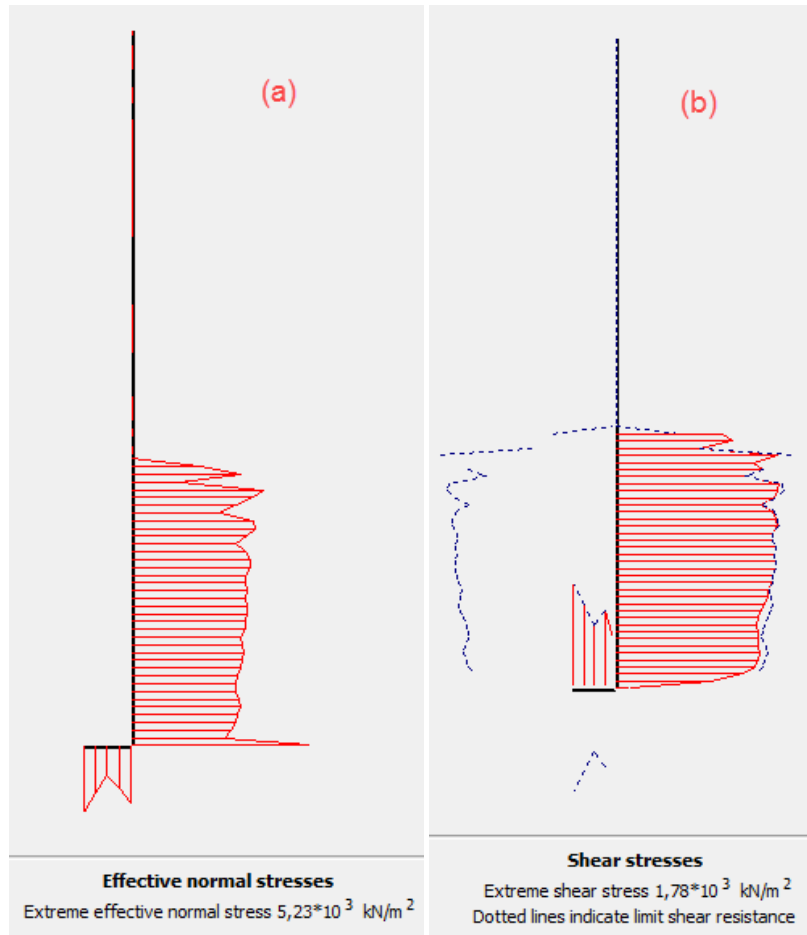


Figure III.43 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (PRF).

▪ **Les pieux à noyau en acier composite (SRP) :**

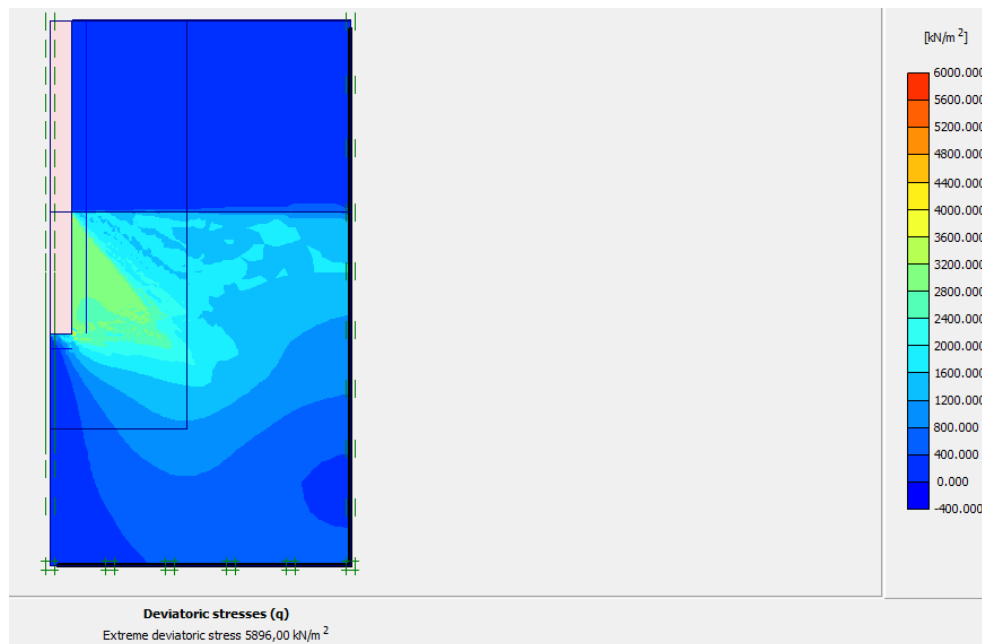


Figure III.44 : La contrainte déviatorique « q » du pieu SRP sous une charge de rupture

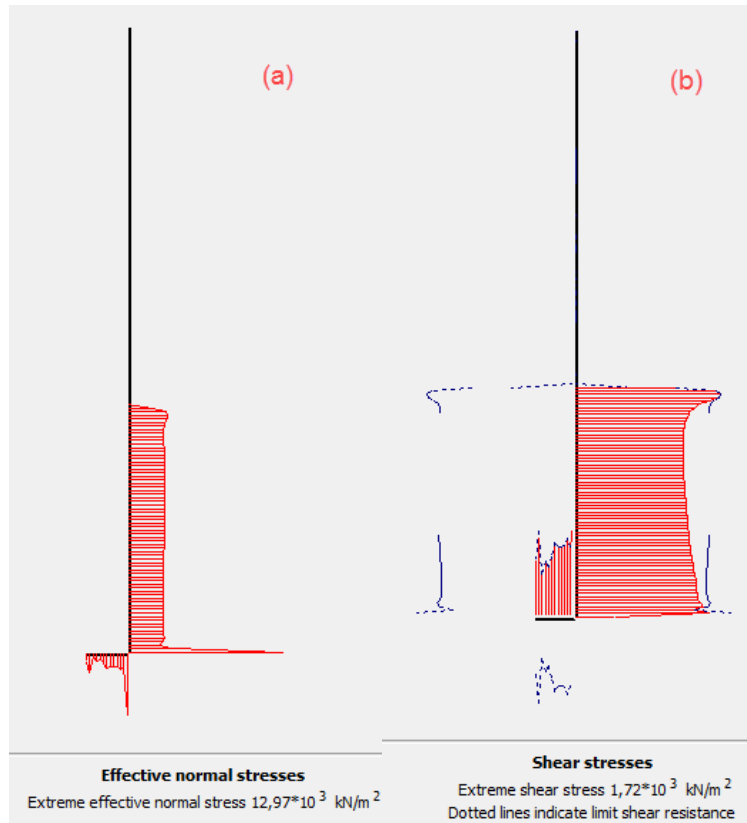


Figure III.45 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (SRP).

▪ **Les pieux à matrice plastique renforcée (RPF) :**

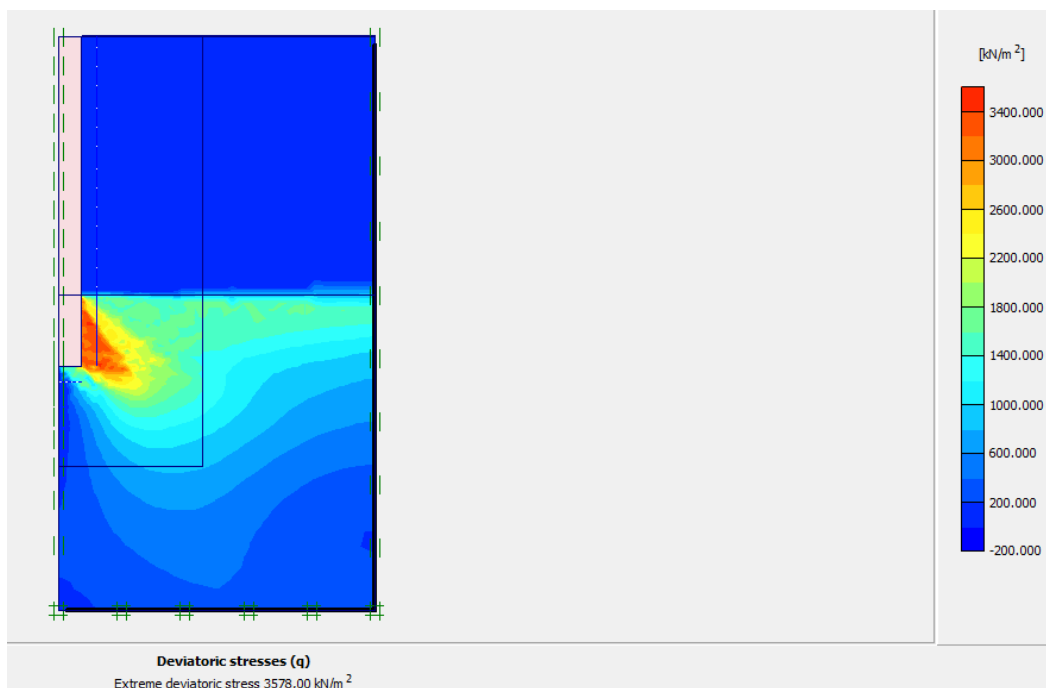


Figure III.46 : La contrainte déviatorique « q » du pieu RPF sous une charge de rupture

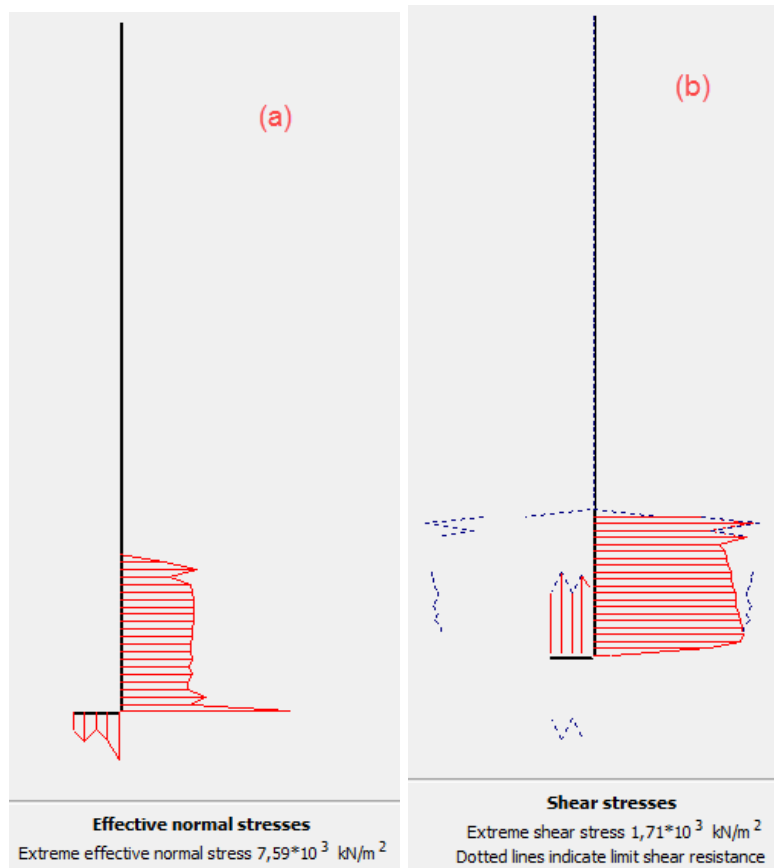


Figure III.47 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (RPF).

Les pieux pultrudés en fibre de verre (PGF) :

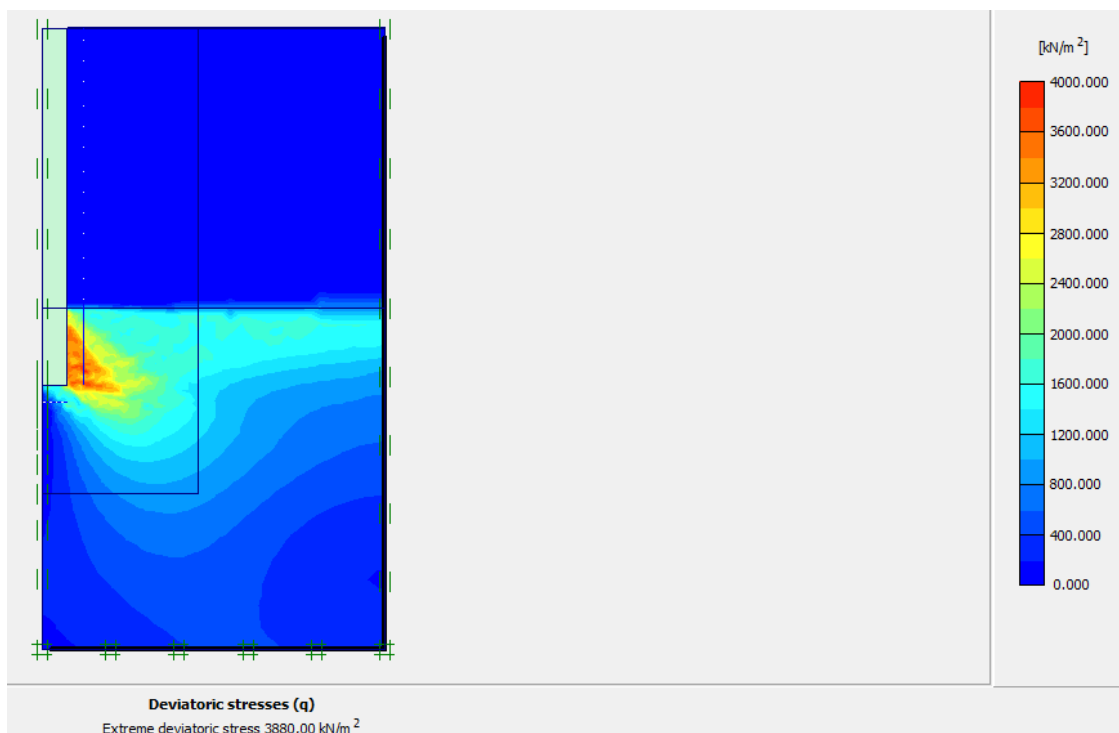


Figure III.48 : La contrainte déviatorique « q » du pieu PGF sous une charge de rupture

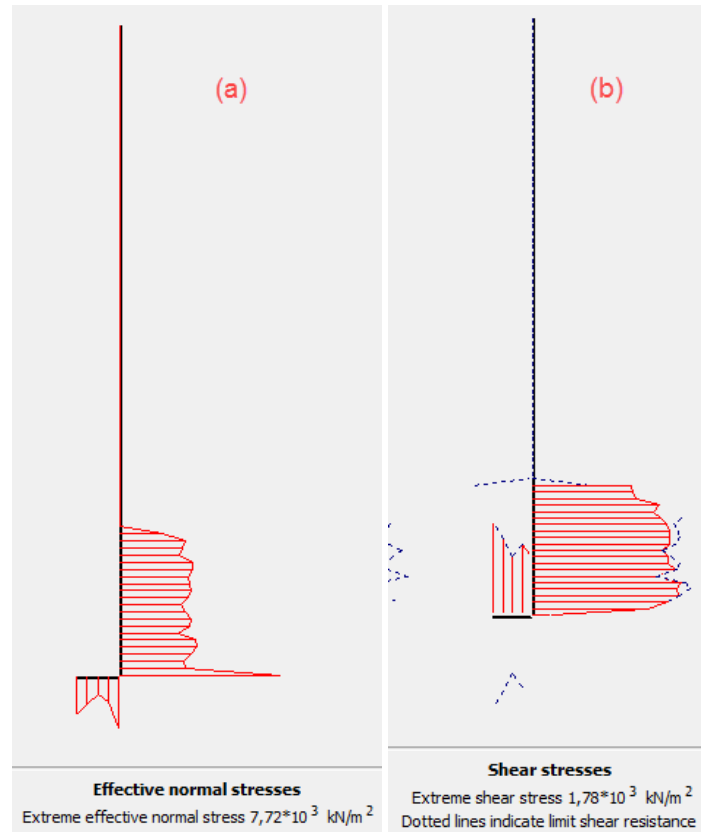


Figure III.49 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (PGF).

▪ **Les pieux en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF) :**

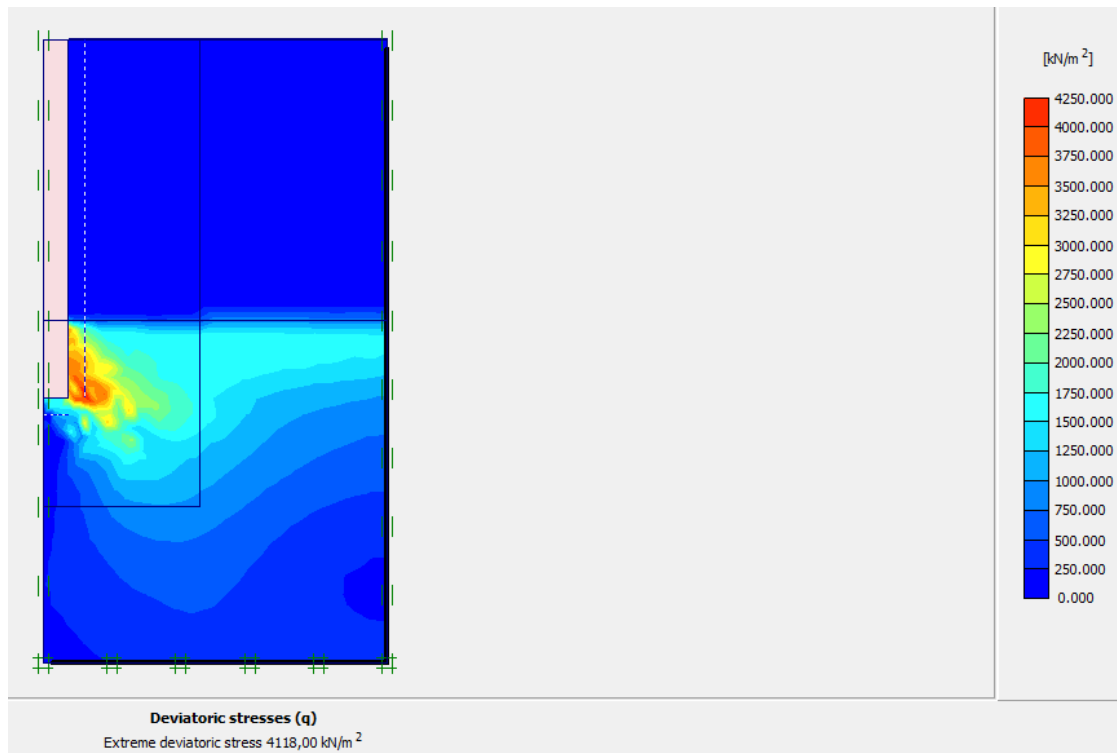


Figure III.50 : La contrainte déviatorique « q » du pieu creux en GPRF sous une charge de rupture

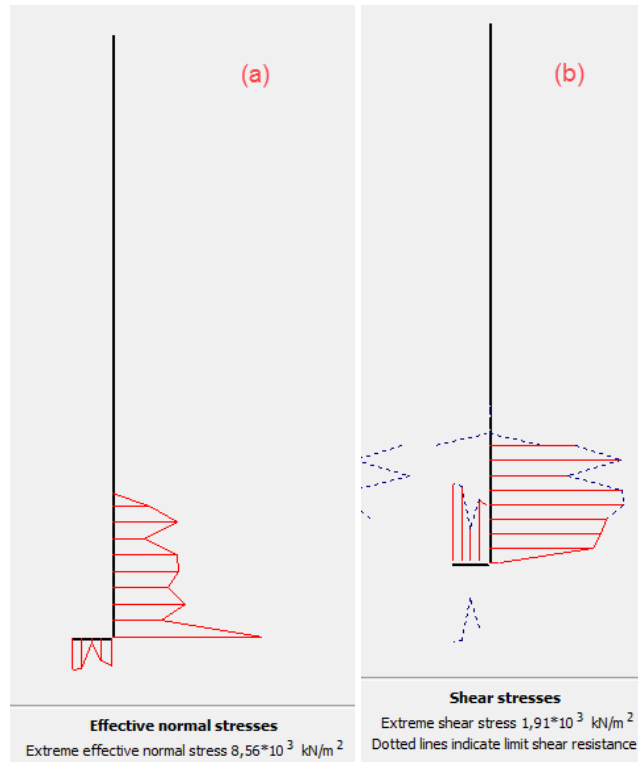


Figure III.51 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (GPRF).

▪ **Les pieux creux en FRP :**

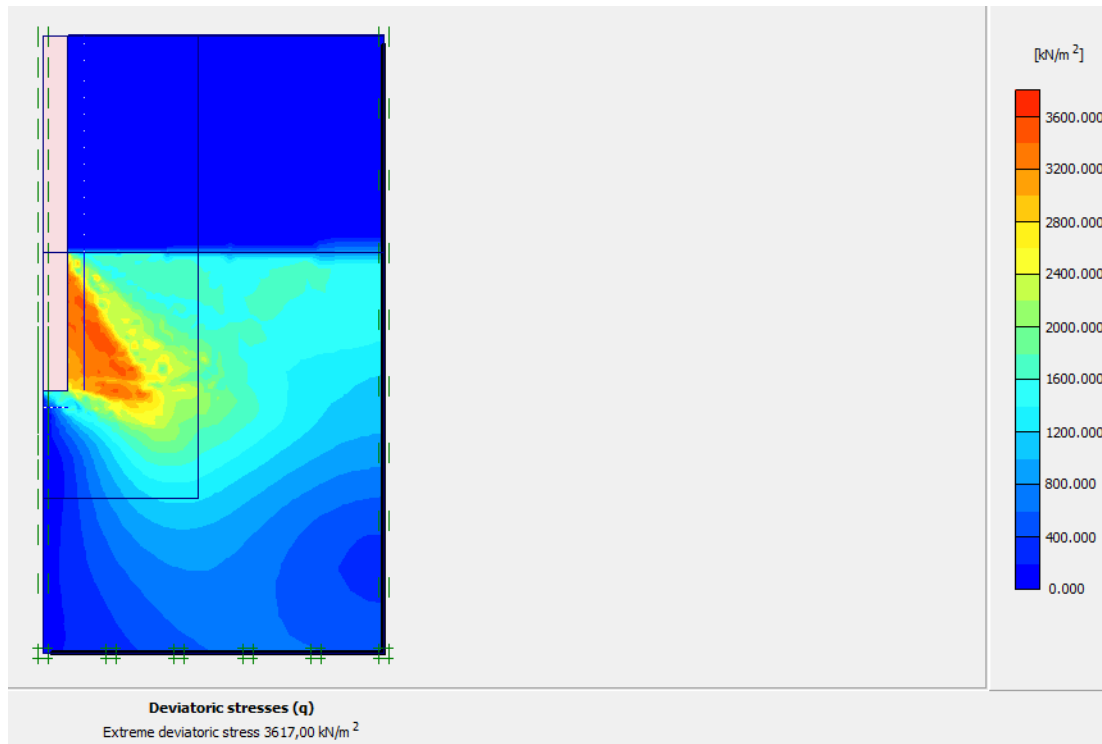


Figure III.52 : La contrainte déviatorique « q » du pieu creux en FRP sous une charge de rupture

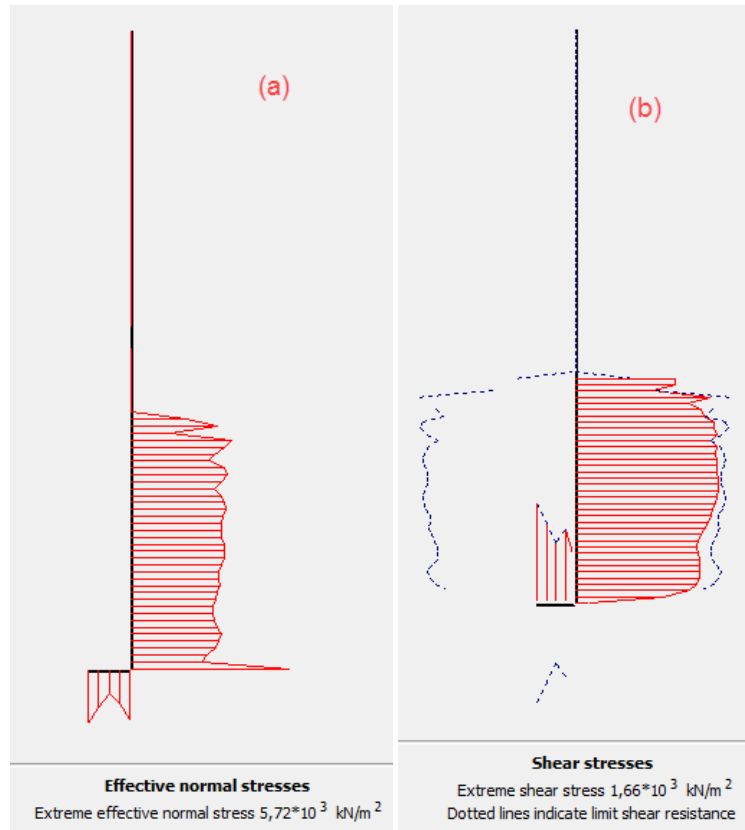


Figure III.53 : (a) La contrainte normale (b) la contrainte de cisaillement à l'interface du pieu (creux en FRP).

Le tableau suivant résume les différents résultats trouvés des figures III.42 Jusqu'à la figure III.53.

Tableau III.6 : Les différentes contraintes des pieux composites en charge latérale.

	Contrainte déviatorique « q » (Kpa)	Contrainte normal (Kpa)	Contrainte de cisaillement (Kpa)
PRF	4114	$5,23 \cdot 10^3$	$1,78 \cdot 10^3$
SRP	5896	$12,97 \cdot 10^3$	$1,72 \cdot 10^3$
RPF	3578	$7,59 \cdot 10^3$	$1,71 \cdot 10^3$
PGF	3880	$7,72 \cdot 10^3$	$1,78 \cdot 10^3$
GPRF	4118	$8,56 \cdot 10^3$	$1,91 \cdot 10^3$
Creux en FRP	3617	$5,72 \cdot 10^3$	$1,66 \cdot 10^3$

Selon les figures III.44 jusqu'à figure III.59 la localisation des contraintes maximales se trouvent à l'interface pieu composite /sol au niveau du point $x= 0,75$ et $y = 8,4 \text{ m}$; d'après le tableau III.6, les contraintes de cisaillement sont presque les mêmes pour les différents types des pieux composites par contre la différence réside dans les contraintes normales et les contraintes déviatoriques « q », on observe que le pieu composite de type SRP a une contrainte

déviatorique et normale plus élevées que les autres types ; de plus les pieux de types « RPF, PGF et creux en FRP » ont presque les mêmes contraintes.

La figure III.60 montre des courbes de la force horizontale en fonction des déplacements au point « $x = 0 \text{ m}$ et $y = 8.5 \text{ m}$ » (milieu de la pointe du pieu composite), d'après cette figure le pieu de type SRP, creux en FRP et PRF ont une force horizontale plus élevée que les autres pieux pour assurer un déplacement de 300 mm, les autres pieux à cette endroit ont presque la même force latérale.

Donc on peut dire que :

- Le pieu composite de type SRP a un comportement mieux que les autres types des pieux et la localisation des contraintes maximales est en générale au deuxième couche au point $x = 0.75 \text{ m}$ et $y = 8.4 \text{ m}$.
- A la pointe des pieux et plus exactement au point ($x = 0 \text{ m}$ et $y = 8.5 \text{ m}$) le comportement des pieux de type SRP, creux en FRP et PRF ont presque le même comportement.

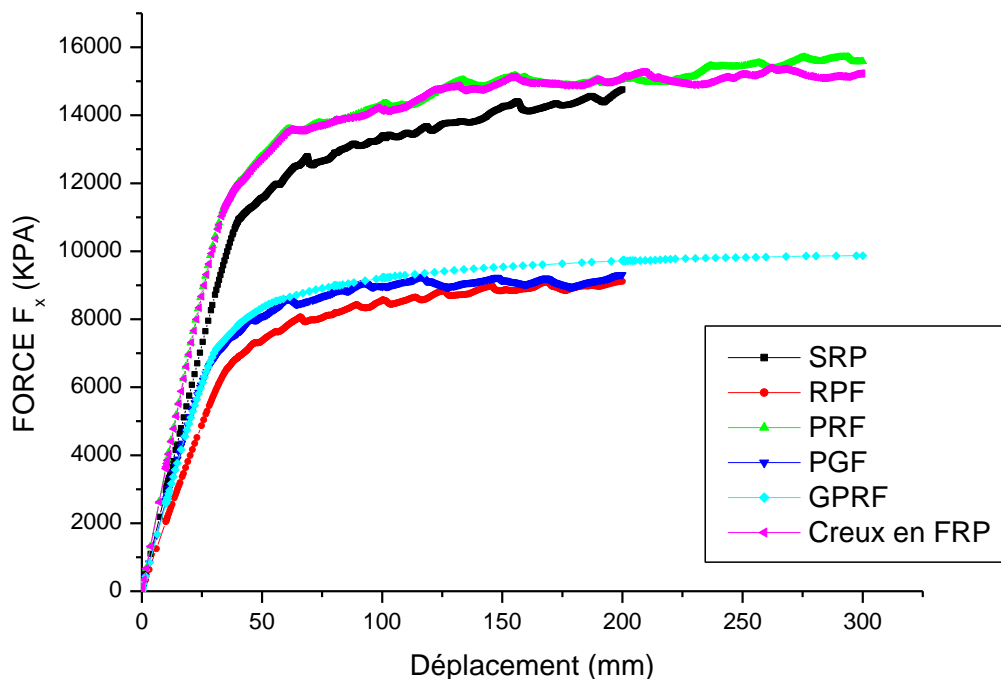


Figure III.54 : La force horizontale en fonction de déplacement pour les différents types des pieux composites (deux couches).

III.4.3 Etude paramétrique

III.4.3.1 Variation d'angle du frottement

Dans cette partie d'étude nous avons varié l'angle de frottement du sable de 3° jusqu' 48° par un pas de 5° et dans les deux cas de chargement latéral et axial, les tableaux suivants montrent les résultats obtenus dans chaque modélisation.

▪ Charge axiale :

Tableau III.7 : Variations de la charge ultime axiale et les déplacements des pieux composites en fonction d'angle du frottement.

phi	SRP		PRF		RPF		PGF		GPRF		Creux en FRP	
	déplacement (m)	Q _{ult} (KPa)	déplacement (m)	Q _{ult} (KPa)	déplacement (m)	Q _{ult} (KPa)	déplacement (m)	Q _{ult} (KPa)	déplacement (m)	Q _{ult} (KPa)	déplacement (m)	Q _{ult} (KPa)
48	0.017	637.63	0.026	751.42	0.021	668.57	0.02163	671.397	0.018	635.74	0.02	767.45
43	0.018	602.95	0.018	609.46	0.028	665.52	0.032	690.96	0.165	1857.000	0.025	747.29
38	0.14	1474.52	0.151	1563.78	0.082	1200.14	0.117	1367.68	0.13	1231.98	0.169	1839.000
33	0.087	820.86	0.093	1457.69	0.04	616.8	0.084	789.93	0.084	792.93	0.048	717.38
28	0.062	652.61	0.063	666.76	0.05898	600.257	0.077	668.52	0.08	671.33	0.079	752.36
23	0.051	450.44	0.048	462.33	0.06294	462.334	0.067	474.72	0.067	474.72	0.054	497.33
18	0.20336	260.852	0.045	293.64	0.091	419.46	0.083	417.3	0.091	419.45	0.043	410.9
13	0.117	271.55	0.125	272.17	0.125	271.67	0.124	271.64	0.108	271.18	0.105	273.15
8	0.463	237.03	0.476	237.06	0.466	237.03	0.502	237.06	0.519	237.08	1.034	238.07
3	0.481	208.15	1.15	209.99	0.963	209.91	0.846	209.88	0.627	209.78	0.058	209.31

La figure III.55 montre la variation de la charge ultime axiale (Q_{ult}) en fonction d'angle du frottement et pour les différents pieux étudiés.

Selon cette figure, la variation d'angle du frottement influence directement sur la charge ultime axiale, on observe que la charge ultime axiale augmente avec l'angle du frottement jusqu'à :

- 38° pour les pieux composites de type: SRP, RPF, PRF, PGF et creux en FRP ;
- 43° pour le pieu composite de type GPRF.

Puis elle diminue, donc on peut dire que l'angle de frottement augmente la charge ultime axiale des pieux composites jusqu'à un pic, qu'il est le même pour les différents pieux composites étudiés sauf le pieu composite de type GPRF.

De plus, on remarque que la charge ultime axiale pour les différents pieux composites étudiés est presque la même pour les angles de frottement moins de 13°.

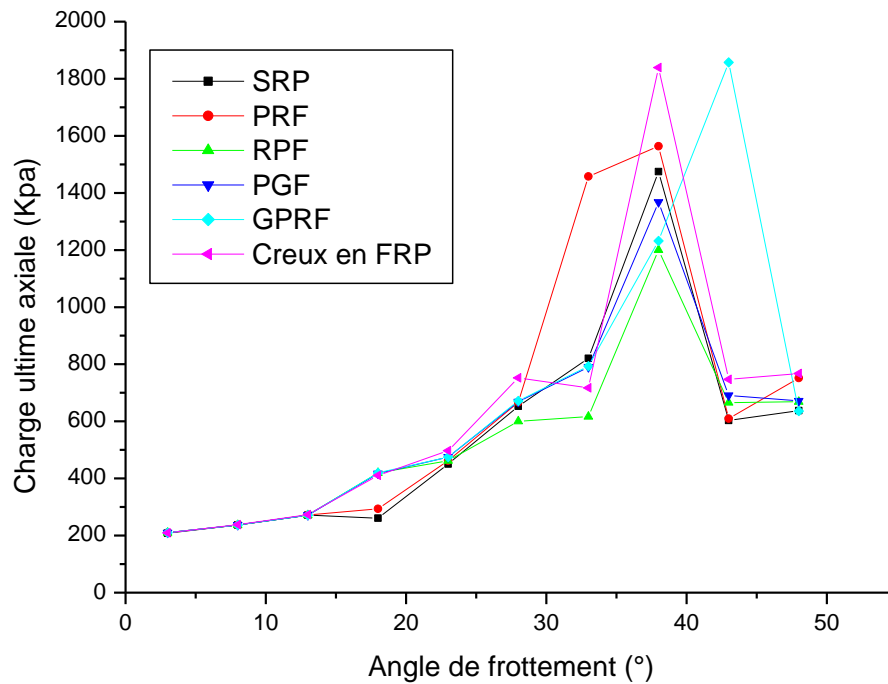


Figure III.55 : Variation de la charge ultime axiale en fonction d'angle du frottement pour les différents types des pieux composites.

▪ **Charge latérale :**

Tableau III.8 : Variations de la charge ultime latérale des pieux composites en fonction d'angle du frottement (KN)

Phi (°)	SRP	RPF	PRF	PGF	GPRF	Creux en FRP
48	1891597.52	1325096.92	66198685.22	82218909.76	20569824.71	220249.43
43	1891553.91	1325065.51	66198653.80	82218878.35	20569761.88	223045.44
38	1891515.37	1325034.09	66198622.38	82218846.93	20569730.46	223014.03
33	1891482.28	1324971.26	66198559.55	82218784.10	20569667.63	222951.19
28	1891455.87	1324908.43	66198496.72	82218721.27	20569604.80	222888.36
23	1891437.58	1324877.01	66198465.30	82218689.85	20569573.38	222856.95
18	1891424.25	1324851.88	66198418.18	82218655.29	20569529.40	222819.25
13	1891414.62	1324804.75	66198371.06	82218623.88	20569497.98	222787.83
8	1891407.75	1324741.92	66198339.64	82218576.75	20569466.57	222756.42
3	1891402.38	1324710.51	66198308.22	82218545.34	20569435.15	222740.71

La figure III.62 montre la variation de la charge ultime latérale (F_{ult}) en fonction d'angle du frottement et pour les différents pieux étudiés.

On remarque que la variation d'angle de frottement n'influe pas sur la charge ultime latérale (variation négligé) pour tous les types des pieux composites étudiés.

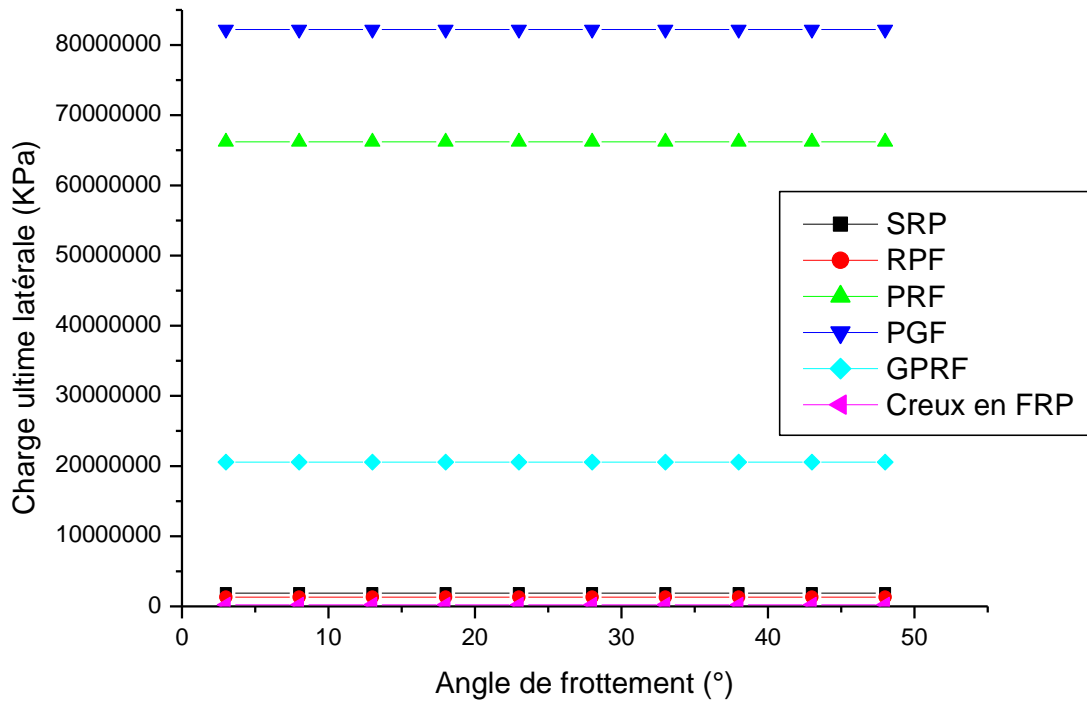


Figure III.56 : Variation de la charge ultime latérale en fonction d'angle du frottement pour les différents types des pieux composites.

III.4.3.2 Variation de sol d'ancrage

Dans ce titre, nous avons varié le sol d'ancrage du pieu au lieu du sable, on va ancrer ces pieux dans l'argile (Tableau III.1) dans les deux cas de chargement latéral et axial, les tableaux suivants montrent les résultats obtenus dans chaque modélisation.

- **Charge axiale :**

Tableau III.9 : les contraintes déviatoriques et les déplacements des pieux composites ancrés dans l'argile (charge axiale).

	PRF	SRP	RPF	PGF	GPRF	Creux en FRP
Déplacement (mm)	150,82	178,78	54,59	154,50	159,91	188,04
q (Kpa)	34,55	35,12	35,63	34,59	34,71	34,36

Le tableau III.9 montre la variation des contraintes déviatoriques et les déplacements des pieux composites étudiés ancrés dans l'argile et soumise à une charge axiale, dans ce cas, on observe que les contraintes déviatoriques sont presque les mêmes dans tous les types des pieux composites. De plus, pour les déplacements le type du pieu composite RPF se déplace moins que les autres types, pour les types des pieux : PRF, PGF et GPRF on a presque les mêmes déplacements.

La figure III.57 présente la variation de chargement axiale en fonction de déplacement pour chaque pieu étudié, et au niveau de la pointe du pieu (au point $x = 0$ m et $y = 8.5$ m) ; on remarque dans cet endroit les pieux composites étudiés ont la même charge axiale ultime, par contre dans le sable cette charge de rupture est différente d'un pieu à l'autre (voir Figure III.16).

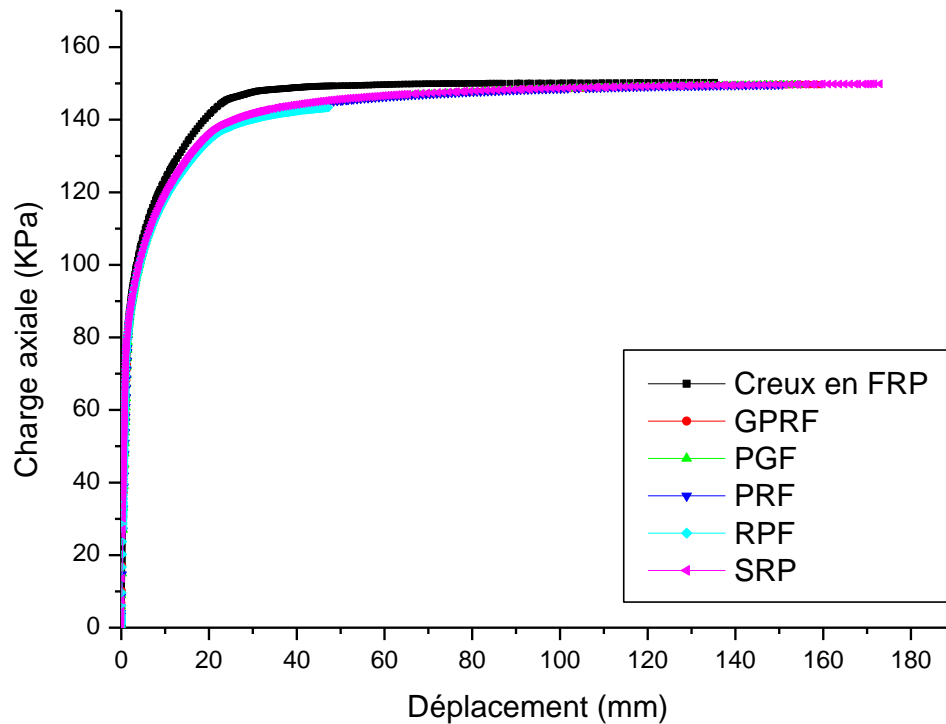


Figure III.57 : Comparaison entre les différents pieux composites ancrés dans l'argile (charge axiale).

▪ **Charge latérale :**

Tableau III.10 : les contraintes déviatoriques et les déplacements des pieux composites ancrés dans l'argile (charge latérale).

	PRF	SRP	RPF	PGF	GPRF	Creux en PRF
Déplacement (mm)	471.32	471.56	298.16 (rupture)	471.38	471.31	469.29
q (Kpa)	15.35	15.34	16.11	15.36	15.36	15.13

Le tableau III.10 montre la variation des contraintes déviatoriques et les déplacements des pieux composites étudiés ancrés dans l'argile et soumise à une charge latérale, dans ce cas, on observe que les contraintes déviatoriques et les déplacements sont presque les mêmes dans tous les types des pieux composites sauf le pieu de type RPF.

La figure III.64 présente la variation de chargement latérale ultime en fonction de déplacement pour chaque pieu étudié, et au niveau de la pointe du pieu (au point $x = 0$ m et y

= 8.5 m) ; on remarque dans cet endroit les pieux composites étudiés ont la même charge latérale ultime, par contre dans le sable cette charge ultime est différente d'un pieu à l'autre (voir Figure III.29).

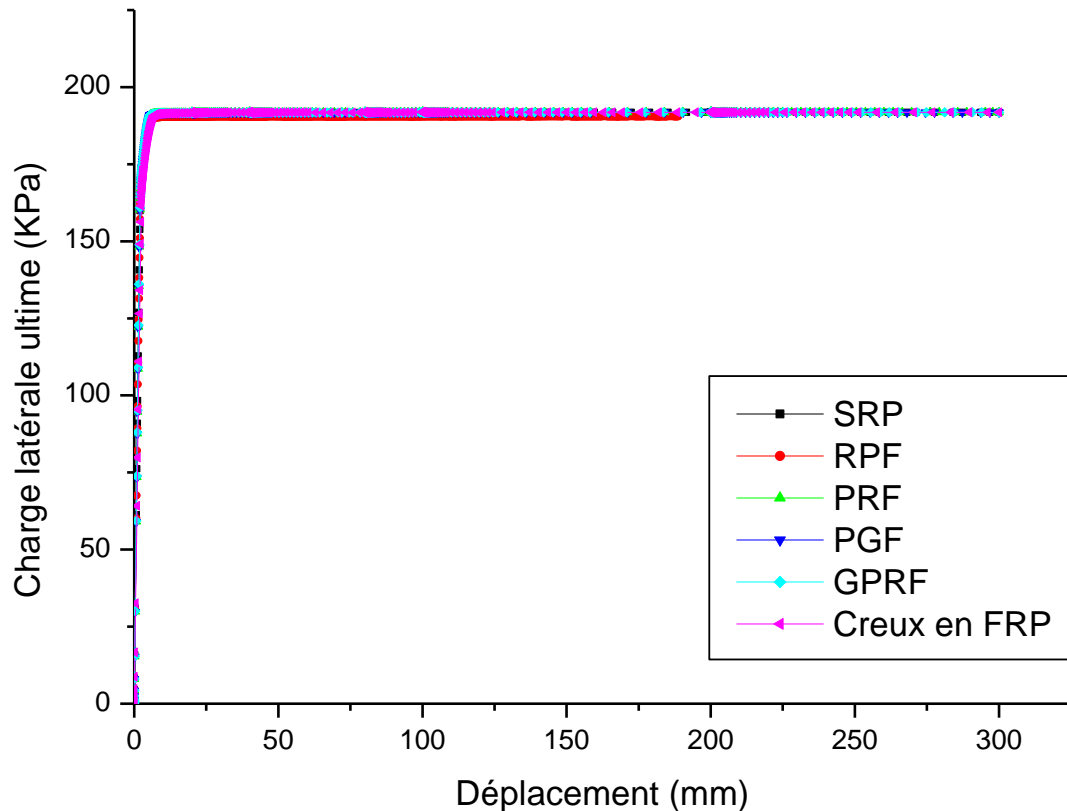


Figure III.58 : Comparaison entre les différents pieux composites ancrés dans l'argile (charge latérale).

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

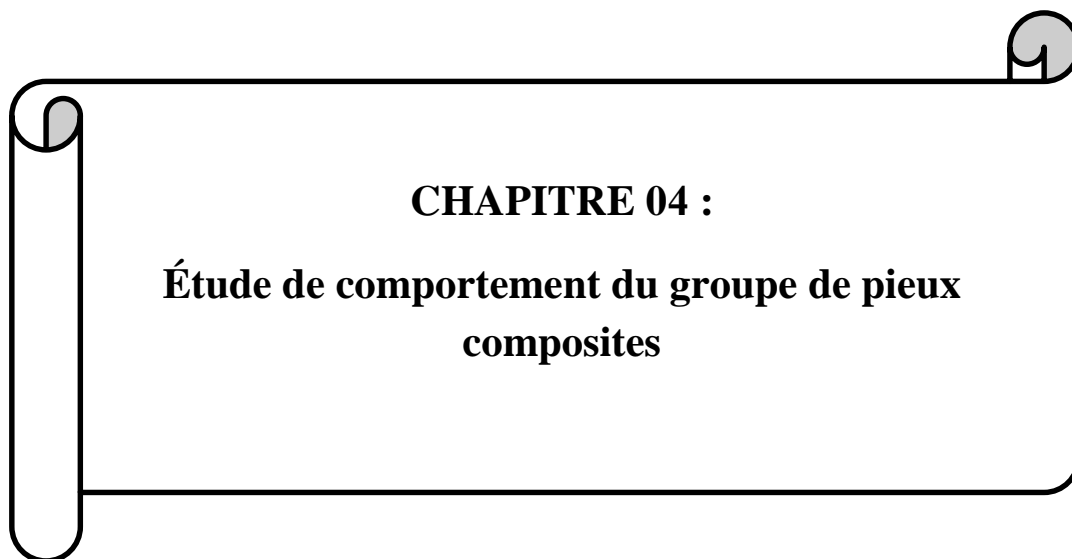
- Dans le cas d'une seule couche (sable): lorsque les pieux composites sont soumis à une charge axiale, on peut noter que : le pieu pultrudé en fibre de verre (PGF) résiste mieux que les autres pieux composites étudiés. Cela peut être dû au module d'élasticité élevé ; mais au niveau de la pointe du pieu ($x=0.19\text{m}$ et $y=8.5\text{m}$), on trouve que le comportement du pieu en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF) et à matrice plastique renforcée (RPF) est presque le même. Par contre lorsque la charge appliquée est latérale, on remarque que : le pieu composite à matrice plastique renforcée (RPF) a un comportement mieux par rapport aux autres pieux composites ; de plus à la

pointe du pieu ($x = 0$ m et $y = 8.5$), le pieu composite pultrudés en fibre de verre (PGF) se comporte mieux que les autres types des pieux composites.

- Dans le cas des deux couches (sable + argile): lorsque les pieux composites soumissent à une charge axiale, le pieu pultrudés en fibre de verre (PGF) résiste mieux que les autres pieux composites étudiés (même résultat du 1^{er} cas); mais à la pointe du pieu ($x = 0.19$ m et $y = 8.5$ m) le pieu de type PRF se comporte mieux que les autres types des pieux composites. Par contre dans le chargement axial, Le pieu composite à noyau en acier composite (SRP) est mieux, mais à la pointe les pieux de type SRP, creux en FRP et PRF ont presque le même comportement.

Dans le cas d'étude paramétrique on conclue que :

- L'angle de frottement augmente la charge ultime axiale des pieux composites jusqu'à un pic, qu'il est le même pour les différents pieux composites étudiés sauf le pieu composite de type GPRF.
- La charge ultime axiale pour les différents pieux composites étudiés est presque la même pour les angles de frottement moins de 13° .
- La variation d'angle de frottement n'influe pas sur la charge ultime latérale (variation négligé) pour tous les types des pieux composites étudiés.
- Lorsque les pieux ancrés dans l'argile : les pieux composites étudiés ont la même charge ultime (soit charge axiale ou latérale ultime), par contre dans le sable cette charge ultime est différente d'un pieu à l'autre.



CHAPITRE 04 :
**Étude de comportement du groupe de pieux
composites**

IV. 1 Introduction

Ce chapitre discute le comportement des différents types du groupe de pieux composites, en se basant sur le modèle de Yeou-Fong Li et al. 2021 [68] ; Ce modèle est basé sur un cas réel au Taiwan.

IV. 2 Présentation de la procédure de modélisation

IV. 2.1 L'objectif d'étude

Dans les chapitres précédents nous avons présenté l'intérêt des pieux composites surtout dans la construction maritime, et dans le chapitre III nous avons discuté le comportement d'un seul pieu composite ancré en différents cas du sol et sous un différent chargement.

Dans ce chapitre nous avons concentré sur le comportement du groupe de pieux composites placés dans un site réel et sous un chargement naturel, pour mieux comprendre le comportement de ces différents types des pieux composites ; et de répondre à la question : « quel est le meilleur choix utilisé dans le cas du groupe de pieux ? ».

IV. 2.2 Modèle géométrique

La figure IV.1 présente le modèle géométrique et le site d'étude d'après Yeou-Fong Li et al. 2021 [68]. Le site d'étude au ruisseau Nan-Zi-Gou dans le bassin versant du réservoir Shihmen dans le nord de Taïwan pour protéger une section de la berge effondrée. Les coordonnées du site sont 24°49' 31.1"N, 121°18' 22.5"E. Le réservoir Shihmen est le troisième plus grand et un réservoir vital à Taiwan. Son bassin versant couvre une superficie d'environ 760 km² et est principalement protégé par un couvert forestier naturel et des activités anthropiques.

Le mur de palplanches utilisé dans ce projet est le groupe de pieux composites de type GPRF. La section de ce type est bien définie par Yeou-Fong Li et al. 2021 [68] (voir figure IV.2) ; dans notre mémoire nous avons varié le type du matériau de pieu composite (on utilise les mêmes types des pieux composites du chapitre III) et nous avons gardé la même section du pieu.

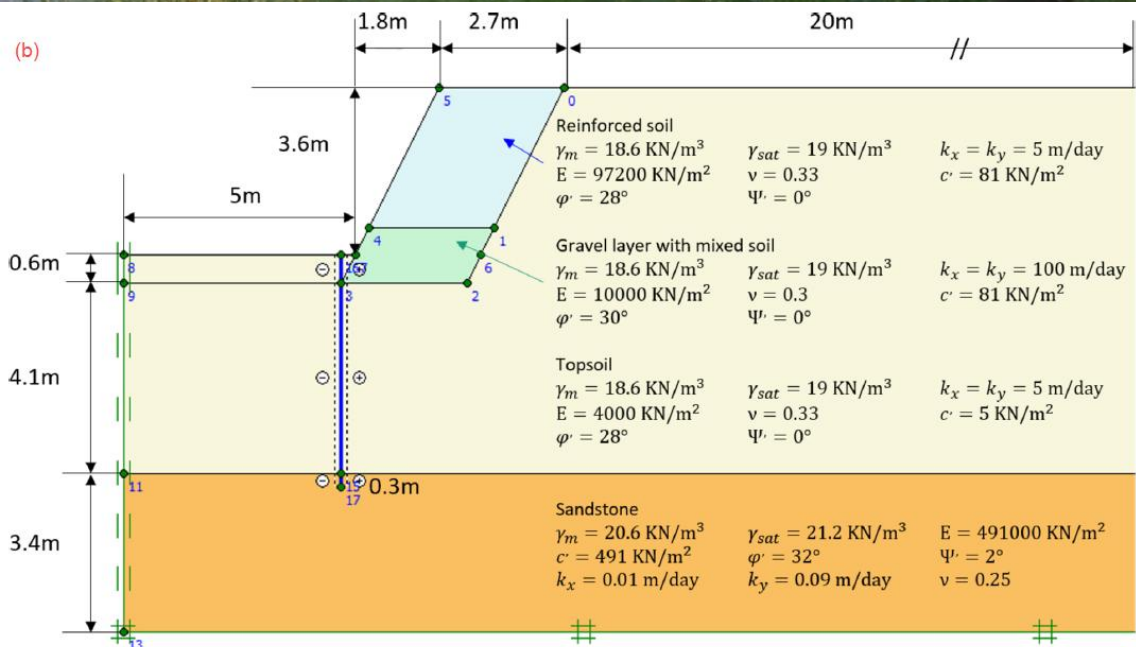


Figure IV.1 : (a) Le site réel d'étude, (b) le modèle géométrique étudié.

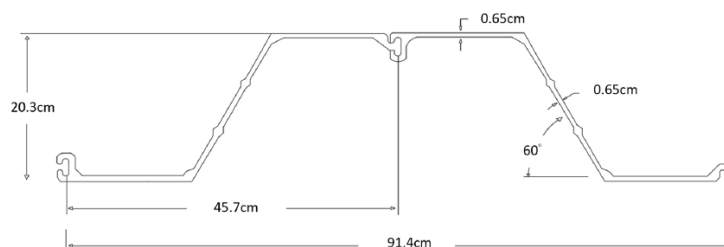


Figure IV.2 : La section du pieu composite étudié d'après Yeou-Fong Li et al. 2021 [68].

IV. 2.3 Les paramètres géotechniques de modélisation

Logiciel PLAXIS nécessite des paramètres d'entrée, pour permettre le calcul et faire une étude complète et suffisante, afin de donner des résultats plus proches à la réalité et raisonnables.

Le revêtement original des talus du ruisseau consistait en une couche de sol renforcé par un géotextile au-dessus d'une couche de gravier avec un sol mélangé. La pente est de (1/2) et le reste des dimensions est illustré à la figure IV.1.b. Des essais in situ et en laboratoire ont été effectués par l'auteur. Leurs propriétés physiques et mécaniques sont également indiquées sur la figure IV.1.b.

Dans le logiciel PLAXIS, on utilise l'élément poutre pour modéliser le groupe de pieux composites. Le tableau ci-dessous résume les différentes caractéristiques des pieux composites utilisés dans cette modélisation.

Tableau IV.1 : Caractéristiques mécaniques des différents pieux composites utilisés.

	PRF	SRP	RPF	PGF	GPRF	Creux en FRP
EA (KN/m)	53007.50	1514.50	1060.15	2309612.50	16583.78	174.17
EI (KN/m)	3595.38	102.73	71.91	156655.93	1124.84	11.81
γ (KN/m³)	19.5	78.49	14	19	18.75	19.27
ν	0.3	0.3	0.4	0.28	0.33	0.25

IV. 3 Modélisation numérique

IV.3.1 Présentation de la modélisation numérique

Pour analyser la stabilité du talus, une analyse par éléments finis élasto-plastique (critère de Mohr-Coulomb) a été réalisée à l'aide du programme PLAXIS pour simuler les différentes étapes de la construction et l'éventuelle érosion du lit du cours d'eau. Nous avons d'abord créé un modèle géométrique dans PLAXIS basé sur la figure IV.1.b. Pour obtenir une grande précision, nous avons utilisé un maillage très fin (Figure IV.3) et placé la limite horizontale du modèle à une distance beaucoup plus grande qu'auparavant. Lors de la génération du maillage, des éléments à 15 nœuds ont été utilisés. Notez que le pieu dans le modèle géométrique PLAXIS (Figure IV.3) peut être activé ou désactivé selon les besoins dans le calcul par éléments finis.

Nous nous sommes également assurés de créer des éléments d'interface de part et d'autre du pieu. Le facteur d'épaisseur virtuelle a été fixé à 0,1 et le facteur de réduction de résistance a été fixé à 0,5 entre le pieu et la couche de sol. Comme indiqué précédemment sur la Figure IV.1.b, le signe plus (+) et le signe moins (-) sont utilisés pour indiquer les éléments d'interface des deux côtés de la palplanche. Hormis le marquage des éléments d'interface, les signes n'ont pas de signification particulière ni d'importance particulière.

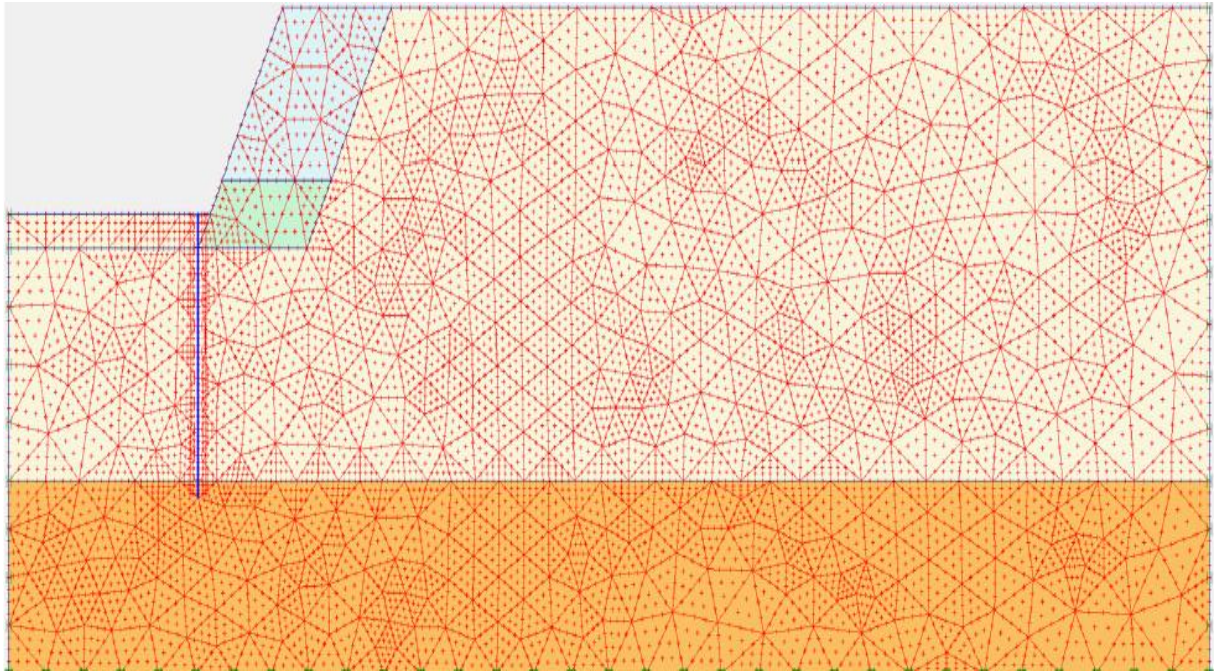


Figure IV.3 : Maillage raffiné du modèle utilisé.

Pour l'analyse de la stabilité des talus, nous avons supposé une fixité totale à la limite inférieure du modèle (lignes hachurées) et des supports de rouleaux le long des bordures verticales sur les côtés gauche et droit du modèle. Nous avons également utilisé un écoulement d'eau souterraine en régime permanent comme condition initiale de l'eau souterraine dans la modélisation plutôt que la pression hydrostatique (Figure IV. 4). Enfin, le terrain du talus n'étant pas de niveau, nous n'avons pas utilisé la procédure K_0 pour générer les contraintes effectives initiales. Suite à la recommandation du manuel PLAXIS, nous avons utilisé l'option "chargement par gravité" pour générer le champ de contrainte initial à la place. Nous avons également utilisé uniquement les paramètres de résistance drainés et ignoré le comportement non drainé.

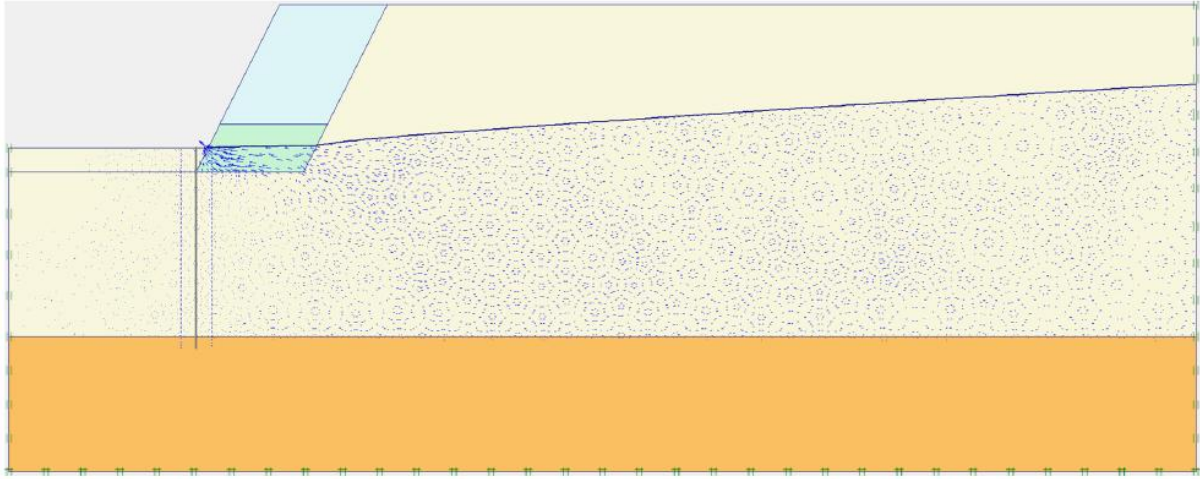


Figure IV.4 : Les eaux souterraines à l'état d'équilibre constituent la condition initiale des eaux souterraines.

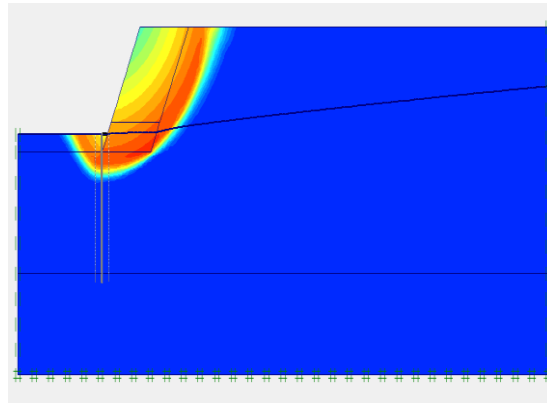
Le calcul de PLAXIS est généralement divisé en plusieurs phases pour simuler différentes étapes de construction. Nous avons utilisé les paramètres du sol indiqués à la figure IV.1.b et les propriétés mécaniques des pieux composites indiqués dans le tableau IV.1 pour déterminer la stabilité du talus. Quatre types de scénarios ont été évalués :

- Talus d'origine ;
- Talus d'origine après éventuelle érosion du lit de la rivière (affouillement sédimentaire le long du fond du canal) ;
- Talus protégé en groupe de pieux composites ;
- Talus protégé en groupe de pieux composites après une possible érosion du lit de la rivière.

IV.3.2 Résultats de la modélisation numérique

IV.3.2.1 Résultats du talus d'origine

La figure IV.5 montre le cercle de glissement du talus d'origine (rayon de glissement = 4.22×10^3 m) et avec un coefficient de sécurité de : $F_s = 1.581$, c'est le même résultat obtenu par Yeou-Fong Li et al. 2021 [68] ; donc notre modèle est valide, c'est-à-dire, nous pouvons modifier certains paramètres et faire une étude comparative pour ce cas.



Calculation information			
Multipliers		Step Info	
Step Info		Step	105 of 105
Plastic STEP		Extrapolation factor	2,000
		Relative stiffness	0,000
Multipliers		Total multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp: 0,000	Σ-Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA: 0,000	Σ-MloadA:	1,000
Load system B	MloadB: 0,000	Σ-MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight: 0,000	Σ-Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel: 0,000	Σ-Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf: 0,000	Σ-Msf:	1,581
Time	Increment: 0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment: 0,000	End time:	0,000

Figure IV.5 : Cercle de glissement et coefficient de sécurité du talus d'origine.

IV.3.2.2 Résultats du talus d'origine après éventuelle érosion du lit de la rivière

La figure IV.6 montre la partie d'érosion du lit de la rivière, on modélise ce phénomène par la désactivation de cette zone en PLAXIS.

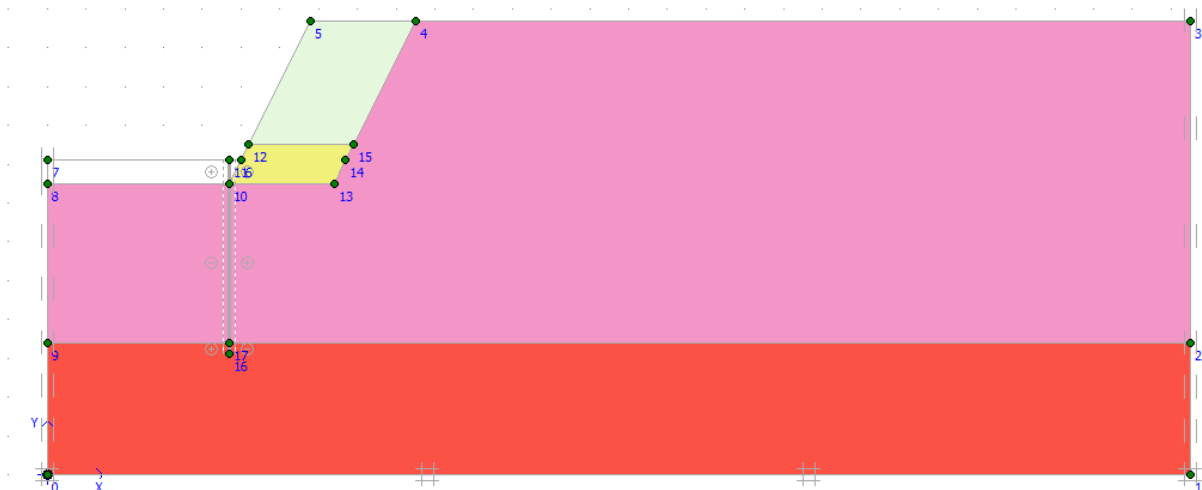


Figure IV.6 : La zone d'érosion du lit de la rivière (zone désactivée en PLAXIS) .

La figure IV.7 montre le cercle de glissement du talus d'origine après éventuelle érosion du lit de la rivière (rayon de glissement = 677.06) et avec un coefficient de sécurité de : $F_s =$

1.345, c'est le même résultat obtenu par Yeou-Fong Li et al. 2021 [68] ; donc notre modèle est valide, c'est-à-dire, nous pouvons modifier certains paramètres et faire une étude comparative pour ce cas.

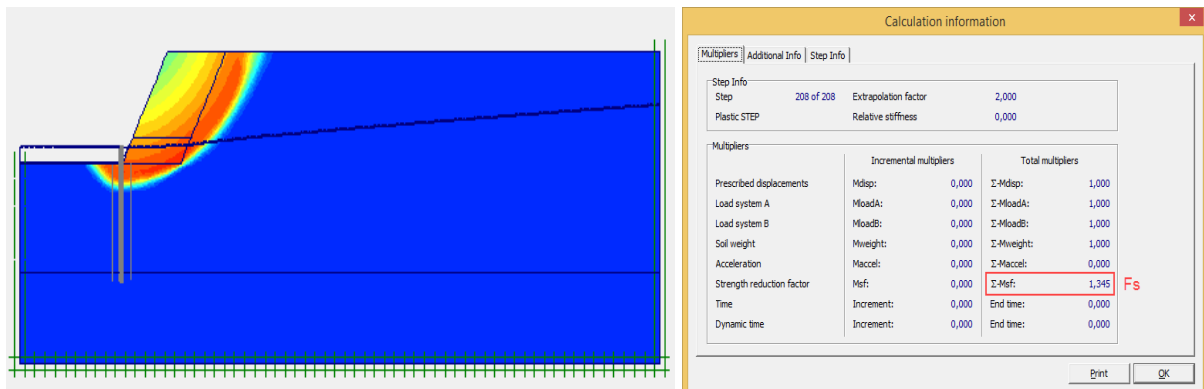


Figure IV.7 : Cercle de glissement et coefficient de sécurité du talus d'origine après éventuelle érosion du lit de la rivière.

IV.3.2.3 Résultats du talus protégé en groupe de pieux composites

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus du talus protégé en différents types de groupe de pieux composites, les figures des cercles de glissement de chaque type vous les trouvez en annexe.

Tableau IV.2 : Résultats obtenus du talus protégé en groupe de pieux composites.

	PRF	SRP	RPF	PGF	GPRF	Creux en FRP
Rayon de glissement (m)	0.824	42.51	0.731	0.820	0.730	0.590
Fs	1.872	0.464	1.675	1.871	1.843	1.581
Déplacement (mm)	25.44	3950 (rupture)	28.66	26.21	25.73	36.90
N (KN)	-78.36	-2380	-11.66	-94.30	-56.18	-4.49
T (KN)	-49.16	-67.41	-1.73	-97.52	-21.14	0.590
M (KN.m)	12.45	-6.30	-499.91	23.90	-5.77	-0.100

L'histogramme suivant (Figure IV.8) montre que les pieux composites de types : PRF, PGF et GPRF sont les mieux pour atteindre un coefficient de sécurité supérieur à ceux de talus d'origine ; autre chose, on remarque que le pieu composite du type SPR a un coefficient de sécurité inférieur à 1, donc le talus devient instable et atteint l'état de rupture, cela peut être dû au poids propre du pieu (très élevé) et ses caractéristiques mécaniques.

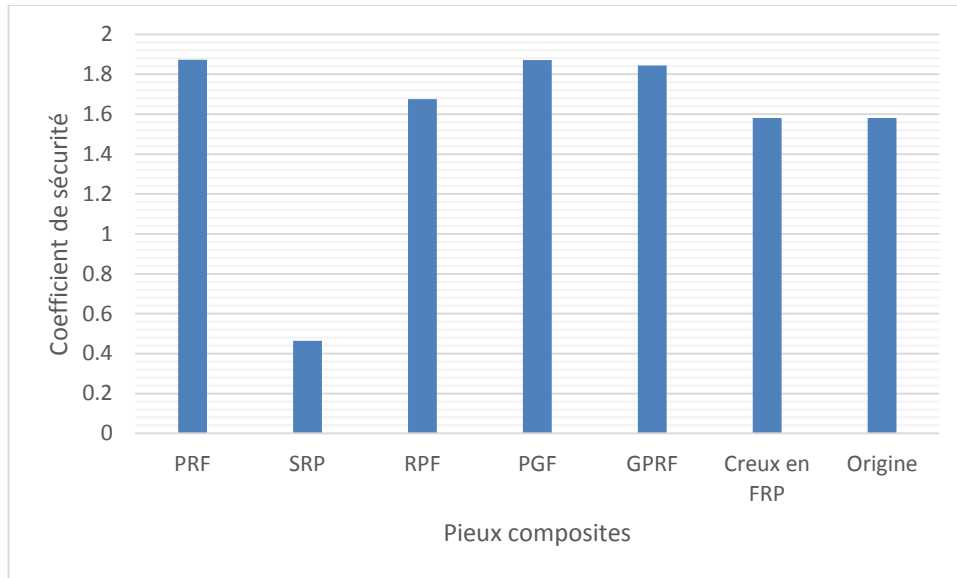


Figure IV.8 : Histogramme du coefficient de sécurité en cas du talus protégés en différents types du groupe de pieux composites

IV.3.2.4 Résultats du talus protégé en groupe de pieux composites après une possible érosion du lit de la rivière

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus du talus protégé en différents types du groupe de pieux composites après une possible érosion du lit de la rivière, les figures des cercles 1...0de glissement de chaque type vous les trouvez en annexe.

Tableau IV.3 : Résultats obtenus du talus protégé en groupe de pieux composites après une possible érosion du lit de la rivière.

	PRF	SRP	RPF	PGF	GPRF	Creux en FRP
Rayon de glissement2 (m)	0.780	41.69	1.64	1.11	0.821	0.710
F_s; 2	1.602	0.463	1.438	1.609	1.592	1.317
Déplacement (mm)	32.66	3930 (rupture)	51.70	31.44	35.36	121.80
N (KN)	-80,52	-2370	-14.79	-93.16	-64.72	-11.56
T (KN)	-54.27	-58.67	2.46	-108.85	-24.29	-0.939
M (KN.m)	13.69	-5.77	-0.602	-27.11	6.58	0.123

L'historgramme suivant (Figure IV.9) montre le coefficient de sécurité des différents pieux composites étudiés dans le cas érosion du lit de la rivière, on a obtenu les mêmes résultats obtenus au cas du talus d'origine protégé (les pieux composites de type : PRF, PGF et GPRF sont les mieux adaptés pour ce site, et il y a une rupture pour le cas du pieu composite SPR).

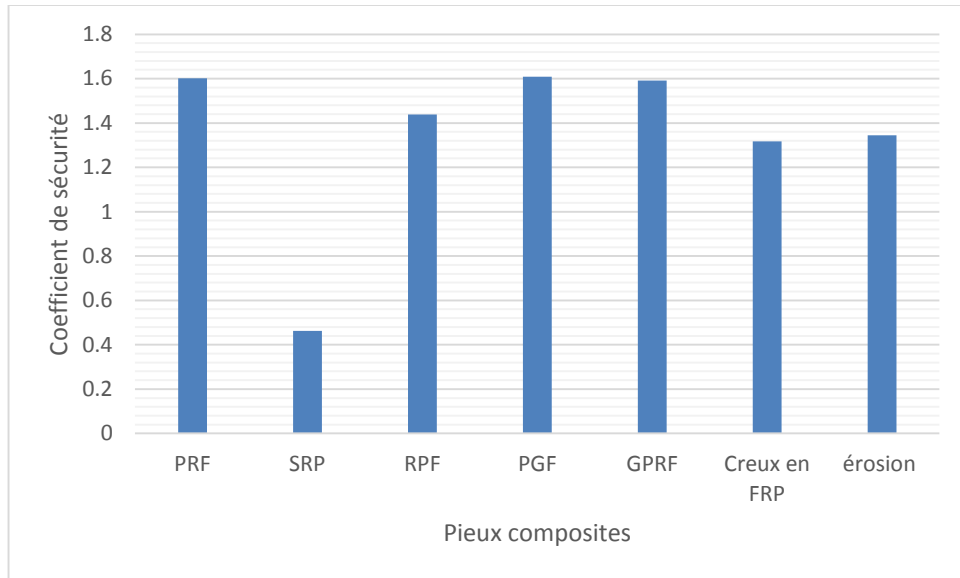
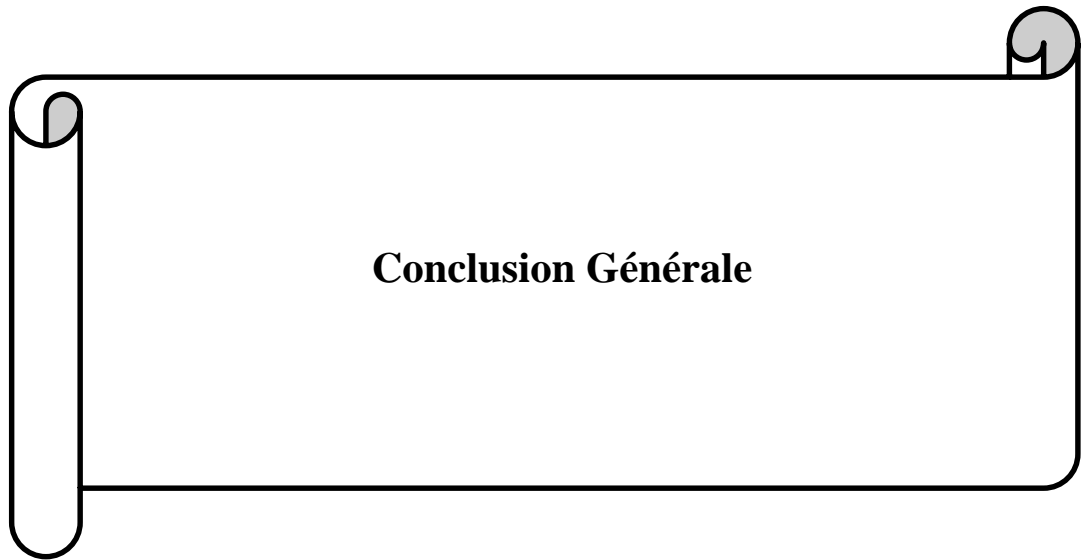


Figure IV.9 : Histogramme du coefficient de sécurité en cas du talus protégé en différents types du groupe de pieux composites après une possible érosion du lit de la rivière

IV .4 conclusion

On peut conclure :

- Dans le cas des groupes de pieux composites, les solutions adaptées sont différentes par rapport au comportement d'un seul pieu composite, donc il faut étudier le cas en détail avant prendre la décision (choix du meilleur pieu composite).
- Dans les deux cas du talus protégé (avec ou sans érosion du lit de rivière), les pieux composites de type : PRF, PGF et GPRF sont les mieux adaptés.



CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre général de l'étude du comportement numérique d'un pieu composite isolé et du groupe de pieux composites (pour cinq types de matériaux de pieux composites) sous différentes charges. Le terme « pieux composites » fait référence à des fondations sur pieux alternatives composées de plastiques recyclés ou de matériaux hybrides qui sont placés dans le sol pour supporter des charges axiales et/ou latérales.

Cette étude nous a permis de combler nos connaissances concernant, l'étude de renforcement de sol, ainsi en ce qui concerne les problèmes des caractéristiques techniques liés à leur nature et d'avoir une idée sur les différents types d'amélioration du sol, leurs domaines d'utilisation, leurs avantages et inconvénients.

Les outils numériques de modélisation sont suffisamment développés pour faire des simulations adéquates ; certains logiciels, sont fournis des plusieurs éléments structurels (renforcements, des éléments d'interface) et des lois de comportement (elasto-plastique et autres) comme le cas de PLAXIS.

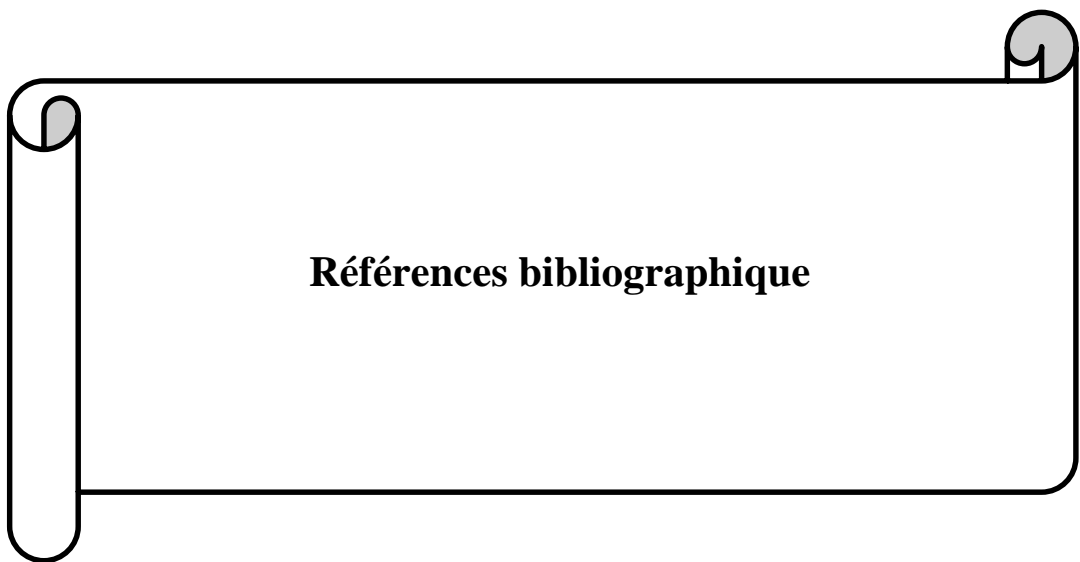
Selon les résultats obtenus par la présence étude. On peut tirer les conclusions suivantes :

- Dans le cas d'une seule couche (sable) : lorsque les pieux composites soumissent à une charge axiale, on peut noter que : le pieu pultrudés en fibre de verre (PGF) résiste mieux que les autres pieux composites étudiés est cela peut être dû au module d'élasticité élevé ; mais au niveau de la pointe du pieu ($x = 0.19\text{m}$ et $y = 8.5\text{ m}$), on trouve que le comportement du pieu en plastique renforcé par des fibres de verre (GPRF) et à matrice plastique renforcée (RPF) est presque le même. Par contre lorsque la charge appliquée est latérale, on remarque que : le pieu composite à matrice plastique renforcée (RPF) a un comportement mieux par rapport aux autres pieux composites ; de plus à la pointe du pieu ($x = 0\text{ m}$ et $y = 8.5$), le pieu composite pultrudés en fibre de verre (PGF) se comporte mieux que les autres types des pieux composites.

- Dans le cas des deux couches (sable + argile): lorsque les pieux composites soumissent à une charge axiale, le pieu pultrudés en fibre de verre (PGF) résiste mieux que les autres pieux composites étudiés (même résultat du 1^{er} cas); mais à la pointe du pieu ($x= 0.19\text{m}$ et $y = 8.5 \text{ m}$) le pieu de type PRF se comporte mieux que les autres types des pieux composites. Par contre dans le chargement axial, Le pieu composite à noyau en acier composite (SRP) est mieux, mais à la pointe les pieux de type SRP, creux en FRP et PRF ont presque le même comportement.
- Dans le cas d'étude paramétrique :
 - L'angle de frottement augmente la charge ultime axiale des pieux composites jusqu'à un pic, qu'il est le même pour les différents pieux composites étudiés sauf le pieu composite de type GPRF.
 - La charge ultime axiale pour les différents pieux composites étudiés est presque la même pour les angles de frottement moins de 13°.
 - La variation d'angle de frottement n'influe pas sur la charge ultime latérale (variation négligé) pour tous les types des pieux composites étudiés.
 - Lorsque les pieux ancrés dans l'argile : les pieux composites étudiés ont la même charge ultime (soit charge axiale ou latérale ultime), par contre dans le sable cette charge ultime est différente d'un pieu à l'autre.
- Dans le cas des groupes de pieux composites: les solutions adaptées sont différentes par rapport au comportement d'un seul pieu composite, donc il faut étudier le cas en détail avant prendre la décision (choix du meilleur pieu composite). Dans notre cas d'étude (talus protégé avec ou sans érosion du lit de rivière): les pieux composites de type : PRF, PGF et GPRF sont les mieux adaptés.

*L*es perspectives et les suites à ce travail sont nombreuses :

- Étude numérique des autres types de pieux composites ;
- Effectuer des autres modèles (varier le sol d'ancrage, type de charge dynamique par exemple) ;
- Étudier le comportement numérique avec autres codes (FLAC, ABAQUSetc.).



Références bibliographique

- [1] Goudjil, K., & Arabet, L. (2021). Assessment of deflection of pile implanted on slope by artificial neural network. *Neural Computing and Applications*, 33(4), 1091-1101.
- [2] Zaima, Y., Boubezari, I., & Arabet, L. E. (2019). *Etude du comportement statique et dynamique d'un massif en sol renforcé* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [3] Hariech, K., Ykhelfoune, A., Goudjil, K. E., & Arabet, L. E. (2019). *Prédiction du comportement d'un pieu implanté à la proximité d'un talus par RNA* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [4] Benessam, N., Seghier, R., & Arabet, L. E. (2020). *Etude et traitement d'un glissement de terrain dans une zone urbaine* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [5] Labreche, L., Megouas, R., & Arabet, L. E. (2019). *Modélisation d'un glissement de terrain et méthodes de confortement* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [6] Ernesto Guades, Thiru Aravinthan †, Mainul Islam, Allan Manalo A review on the driving performance of FRP composite piles *Composite Structures* 94 (2012) 1932–1942
- [7] Heinz, R. (1993). Plastic piling. *Civil Engineering*, 63(4), 63.
- [8] Horeczko, G. (1995). Marine application of recycled plastics. In *Restructuring: America and Beyond* (pp. 834-837). ASCE.
- [9] Iskander, M. G., Hanna, S., & Stachula, A. (2001). Driveability of FRP composite piling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(2), 169-176.
- [10] Hoy, D. (1995). *Study on Recycled Plastic Fender Piles*. Naval Facilities Engineering Service Center.
- [11] Tech, T. (1999). Plastic Pier Piling Evaluation Report, Reprt Prepared for Navy Region Southwest, Navy Environmental Leadership Program, Tetra Tech EM, Inc., 591 Camino De La Reina,# 640, San Diego, CA 92108. *Contract*, (62474).
- [12] Pando, M. A., Ealy, C. D., Filz, G. M., Lesko, J. J., & Hoppe, E. J. (2006). *A laboratory and field study of composite piles for bridge substructures* (No. FHWA-HRT-04-043). United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development.

- [13] Stapleman, J. (1997). Pile on the abuse. *Composite Technology*, 3, 30.
- [14] Giraldo Velez, J. D. (2013). *Experimental study of Hollow Fibre Reinforced Polymer Piles in soft clay* (Doctoral dissertation, Carleton University).
- [15] Fam, A. Z., & Rizkalla, S. H. (2001). Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes. *Structural Journal*, 98(4), 451-461.
- [16] Mirmiran, A., Shahawy, M., El Khoury, C., & Naguib, W. (2000). Large beam-column tests on concrete-filled composite tubes. *Structural Journal*, 97(2), 268-276.
- [17] Fam, A. Z., & Rizkalla, S. H. (2002). Flexural behavior of concrete-filled fiber-reinforced polymer circular tubes. *Journal of composites for construction*, 6(2), 123-132.
- [18] Jayatilake, I., Karunasena, K., & Lokuge, W. (2013, August). Effect of skin-core debonding on the dynamic behaviour of GFRP composite beams. In *Fourth International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering* (Vol. 8793, pp. 358-371). SPIE.
- [19] Tsinker, G. (2014). *Handbook of port and harbor engineering: geotechnical and structural aspects*. Springer.
- [20] Davison, B., & Owens, G. W. (Eds.). (2012). *Steel designers' manual*. John Wiley & Sons.
- [21] Dismuke, T. D., Coburn, S. K., & Hirsch, C. M. (1981). Handbook of corrosion protection for steel pile structures in marine environments. *American iron and steel institute*, 245.
- [22] Zyka, K., & Mohajerani, A. (2016). Composite piles: A review. *Construction and Building Materials*, 107, 394-410.
- [23] Lampo, R., Nosker, T., Bamo, D., Busel, J., & Maher, A. (1998). *Development and Demonstration of FRP Composite Fender Loadbearing, and Sheet Piling Systems*. CONSTRUCTION ENGINEERING RESEARCH LAB (ARMY) CHAMPAIGN IL.
- [24] McCaffrey, B. (2012). More on cathodic protection of steel pipe piles. *MATERIALS PERFORMANCE*, 51(11), 13-13.
- [25] Guades, E., Aravinthan, T., Islam, M., & Manalo, A. (2012). A review on the driving performance of FRP composite piles. *Composite Structures*, 94(6), 1932-1942.

- [26] Juran, I., & Komornik, U. (2006). *Behavior of fiber-reinforced polymer composite piles under vertical loads* (No. FHWA-HRT-04-107). United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development.
- [27] Lindsay, K. (1996). Composite piling market heats up. *Composite Design and Application (CDA), Summer Issue, SPA Composites Inst., New York, NY*, 12-13.
- [28] Iskander, M. G., & Hassan, M. (1998). State of the practice review in FRP composite piling. *Journal of Composites for Construction*, 2(3), 116-120.
- [29] Sirmanna, C. S. (2011). Behaviour of fibre composite piles for timber rehabilitation. *University of Southern Queensland*.
- [30] Heinz, R. (1993). Plastic piling. *Civil Engineering*, 63(4), 63.
- [31] O'Keefe, A. (2011). Behaviour of polymer concrete for infilling fibre composite tubes.
- [32] Soudki, K. A., & Green, M. F. (1997). Freeze-thaw response of CFRP wrapped concrete. *Concrete International*, 19(8), 64-67.
- [33] Toutanji, H., & Deng, Y. (2001). Performance of concrete columns strengthened with fiber reinforced polymer composite sheets. *Advanced Composite Materials*, 10(2-3), 159-168.
- [34] Karbhari, V. M. (2002). Response of fiber-reinforced polymer confined concrete exposed to freeze and freeze-thaw regimes. *Journal of composites for construction*, 6(1), 35-40.
- [35] Kong, A., Fam, A., & Green, M. F. (2005, November). Freeze-thaw behavior of FRP-confined concrete under sustained load. In *ACI SP-230: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures* (pp. 705-722).
- [36] Fam, A., & Mandal, S. (2006). Prestressed concrete-filled fiber-reinforced polymer circular tubes tested in flexure. *PCI journal*, 51(4), 42.
- [37] Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design* (Vol. 397). New York: Wiley.
- [38] Randolph, M. F., & Murphy, B. S. (1985, May). Shaft capacity of driven piles in clay. In *Offshore technology conference*. One Petro.
- [39] Tomlinson, M., & Woodward, J. (2007). *Pile design and construction practice*. CRC press.

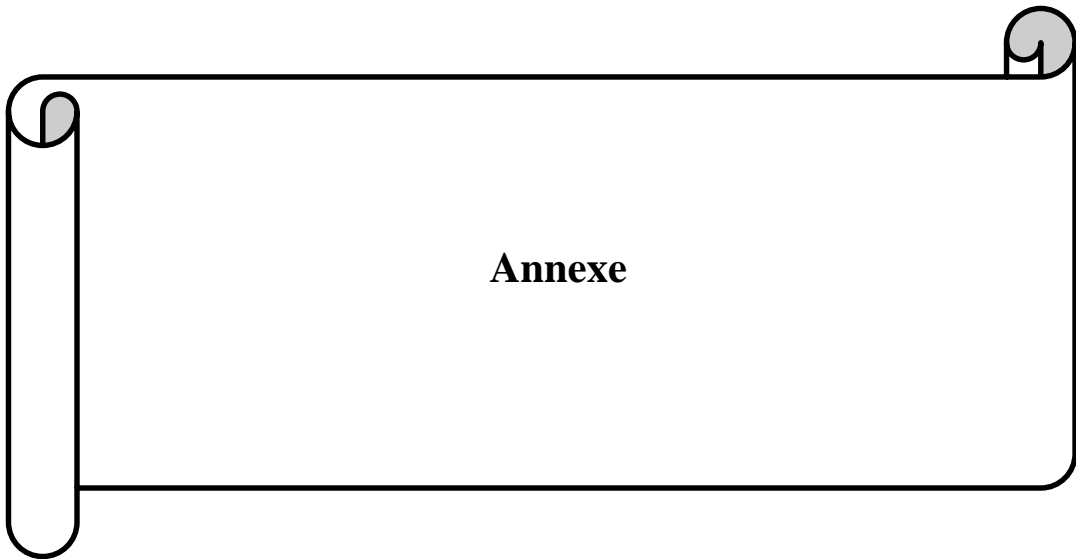
- [40] Zureick, A. H., & Kim, Y. S. (2004). *Flexural and shear stiffness coefficients of the SEATIMBER*. Georgia Institute of Technology.
- [41] Bowles, J. E. (1987). Elastic foundation settlements on sand deposits. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(8), 846-860.
- [42] Budhu, M. (2020). *Soil mechanics and foundations* (No. 1, pp. 1-xvi). Wiley.
- [43] Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). *Principles of foundation engineering*. Cengage learning.
- [44] Han, J., Frost, J. D., & Brown, V. L. (2003). Design of fiber-reinforced polymer composite piles under vertical and lateral loads. *Transportation research record*, 1849(1), 71-80.
- [45] Hussein, M. H., Woerner, II, W. A., Sharp, M., & Hwang, C. (2006). Pile driveability and bearing capacity in high-rebound soils. In *GeoCongress 2006: Geotechnical engineering in the information technology age* (pp. 1-4).
- [46] Han, J. (1997). *An experimental and analytical study of the behavior of fiber-reinforced polymer piles and pile-sand interactions*. Georgia Institute of Technology.
- [47] Sen, R., & Mullins, G. (2007). Application of FRP composites for underwater piles repair. *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6), 751-758.
- [48] Purushotham Reddy, B., Alagusundaramoorthy, P., & Sundaravadivelu, R. (2009). Retrofitting of RC piles using GFRP composites. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 13(1), 39-47.
- [49] Entremont, F. P., Poitras, G. J., & La Plante, G. (2012). Composite reinforcement of L-spliced woodpiles. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(6), 713-718.
- [50] Acer, M. H. (2002). Viscoelastic behaviour of composite piles used in the construction of quays. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26(5), 419-428.
- [51] Guades, E. J. (2013). *Behaviour of glass FRP composite tubes under repeated impact for piling application* (Doctoral dissertation, University of Southern Queensland).
- [52] Courier E, et al. Adaptive design of Flynn's beach seawall Port Macquarie. NSW, Australia: Port Macquarie Council; 2013.
- [53] CSI. Evaluating the condition of seawalls/bulkheads. USA: Coastal Systems International, Inc; 2001.

- [54] Tan H, Jiao Z, Chen J. Field-testing and numerical analysis on performance of anchored sheet pile quay wall with separate pile-supported platform. *Mar struck* 2018; 58:382–98.
- [55] Zhu X, Linham MM, Nicholls RJ. Technologies for climate change adaptation –coastal erosion and flooding. Technical University of Denmark (TNA Guidebook Series); 2010.
- [56] Ashpiz ES, Egorov AO, Ushakov AE. Application of composite materials for the protection of seashores and engineering structures against the impact of waves. *WIT Trans Ecol Environ* 2010; 130:231–8.
- [57] West I, Talbot K. The geology of Lepe beach and Stone point, Hampshire. UK: Southampton University; 2017.
- [58] Acotec. Port of Naha – Okinawa – Japan; 2008.
- [59] Ferdous W, Manalo A. Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies – review of current practice. *Eng. Fail Anal* 2014; 44:17–35.
- [60] Ferdous W, et al. Properties of epoxy polymer concrete matrix: effect of resin-to filler ratio and determination of optimal mix for composite railway sleepers. *Constar Build Mater* 2016; 124:287–300.
- [61] Ferdous W, Manalo A, Aravinthan T. Effect of beam orientation on the static behavior of phenolic core sandwich composites with different shear span-to-depth ratios. *Compos Struct* 2017; 168:292–304.
- [62] Manalo A, et al. State-of-the-art review on FRP sandwich systems for lightweight civil infrastructure. *J Compos Constr* 2016; 21(1):1–16.
- [63] Arashpour M, et al. Optimization modeling of multi [HYPHEN] skilled resources in prefabrication: Theorizing cost analysis of process integration in off-site construction. *Autom Constr* 2018; 95:1–9.
- [64] Ahmed H. Ali, Ahmed Gouda, Hamdy M. Mohamed, Mohamed H. Rabie, Brahim Benmokrane. Nonlinear finite elements modeling and experiments of FRP-reinforced concrete piles under shear loads. *Structures* 28 (2020) 106–119
- [65] Kujtim Zyka, Abbas Mohajerani Composite piles: A review *Construction and Building Materials* 107 (2016) 394–410

[66] Miguel A. Pando, Carl D. Ealy, George M. Filz, J.J. Lesko, and E.J. Hoppe A Laboratory and Field Study of Composite Piles for Bridge Substructures Office of Infrastructure R&D Federal Highway Administration 6300 Georgetown Pike McLean, VA 22101-2296

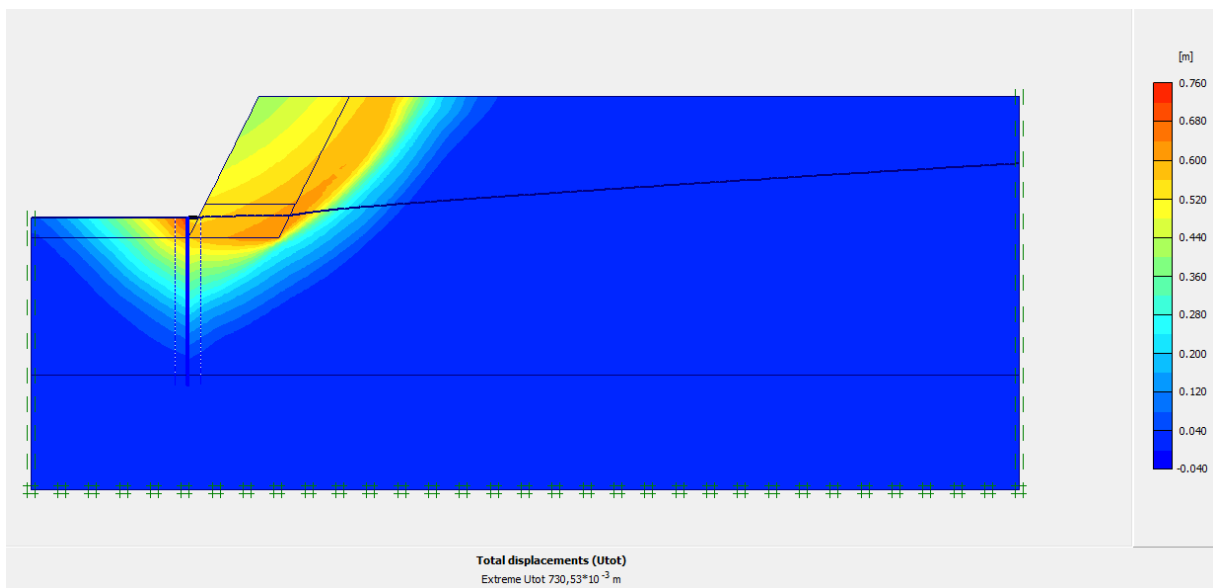
[67] Yeou-Fong Li, Ching-Kai Chen, Walter Chen Case study of GFRP as a sheet-pile wall for stream bank protection in Taiwan Case Studies in Construction Materials 15 (2021) e00602

[68] Li, Y. F., Chen, C. K., & Chen, W. (2021). Case study of GFRP as a sheet-pile wall for stream bank protection in Taiwan. Case Studies in Construction Matériels, 15, e00602.



1. Résultats du talus protégé en groupe de pieux composites

1.1 Groupe de pieux composite de type GPRF



Calculation information

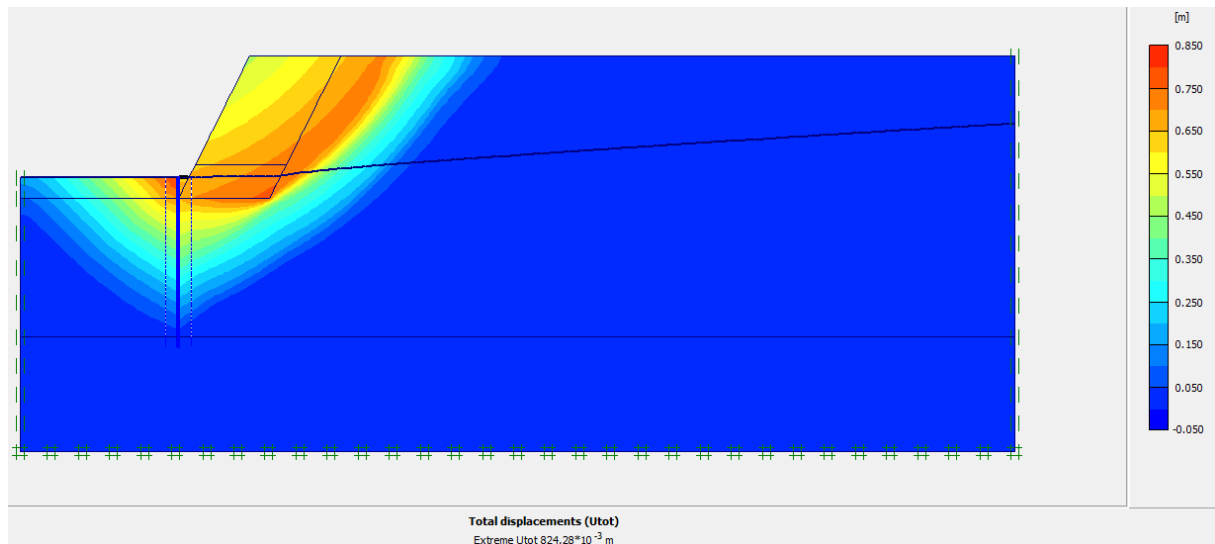
Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	313 of 329	Extrapolation factor	1,000
Plastic STEP		Relative stiffness	0,001

Multipliers	Incremental multipliers		Total multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,002	Σ-Msf:	1,843
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK

1.2 Groupe de pieux composite de type PRF



Calculation information

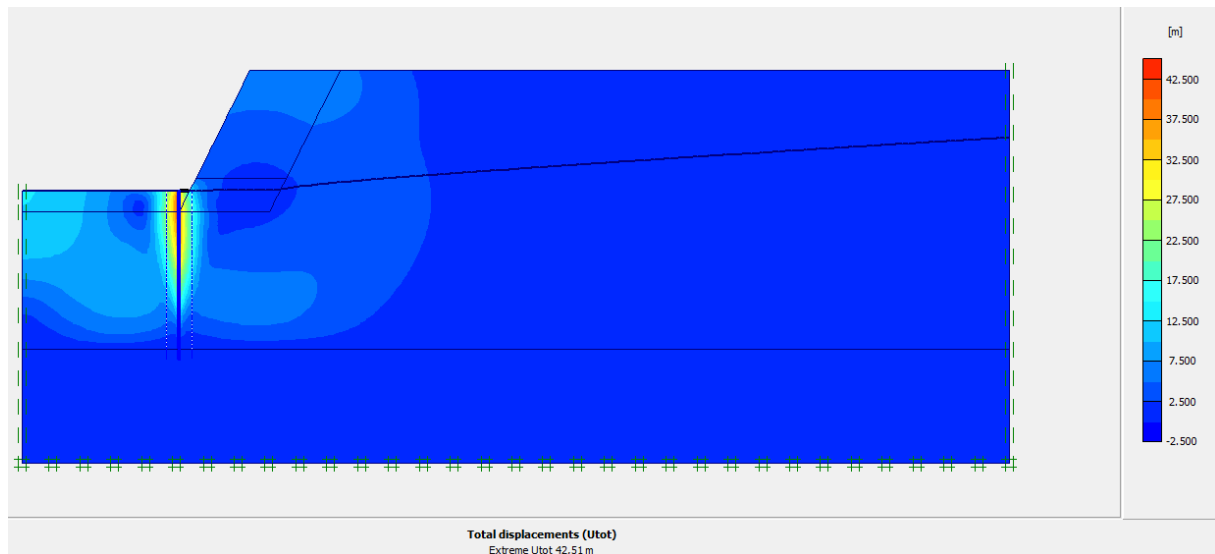
Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	105 of 212	Extrapolation factor	1,000
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000

	Incremental multipliers		Total multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,000	Σ-Msf:	1,872
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK

1.3 Groupe de pieux composite de type SRP



Calculation information

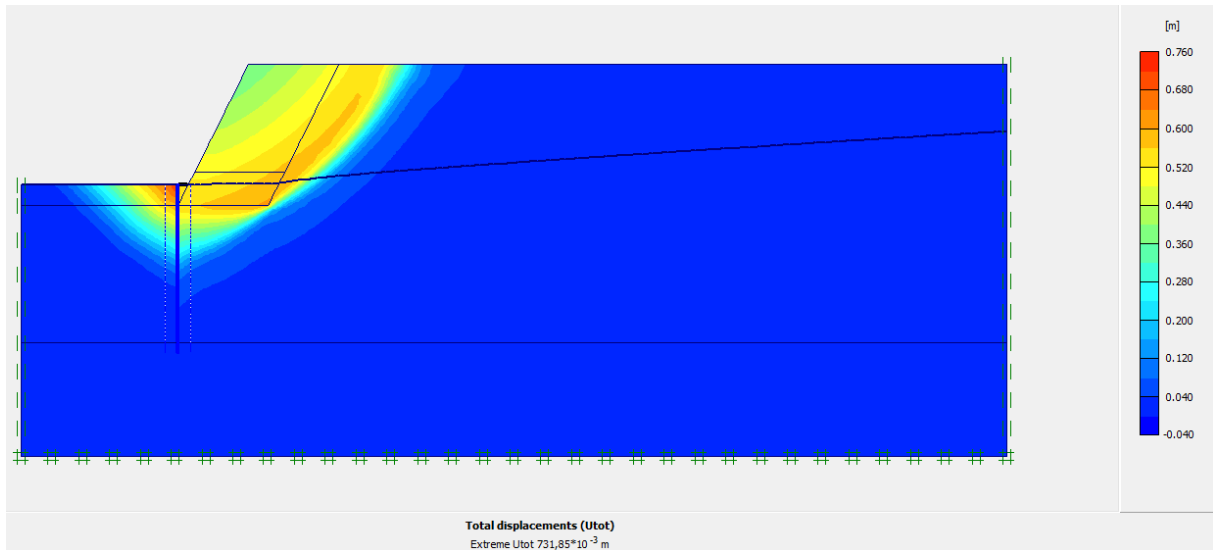
Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info		Step Info	
Step	350 of 700	Extrapolation factor	1,000
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000

Multipliers	Incremental multipliers		Total multipliers	
	Parameter	Value	Parameter	Value
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf:	0,464
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK

1.4 Groupe de pieux composite de type RPF



Calculation information

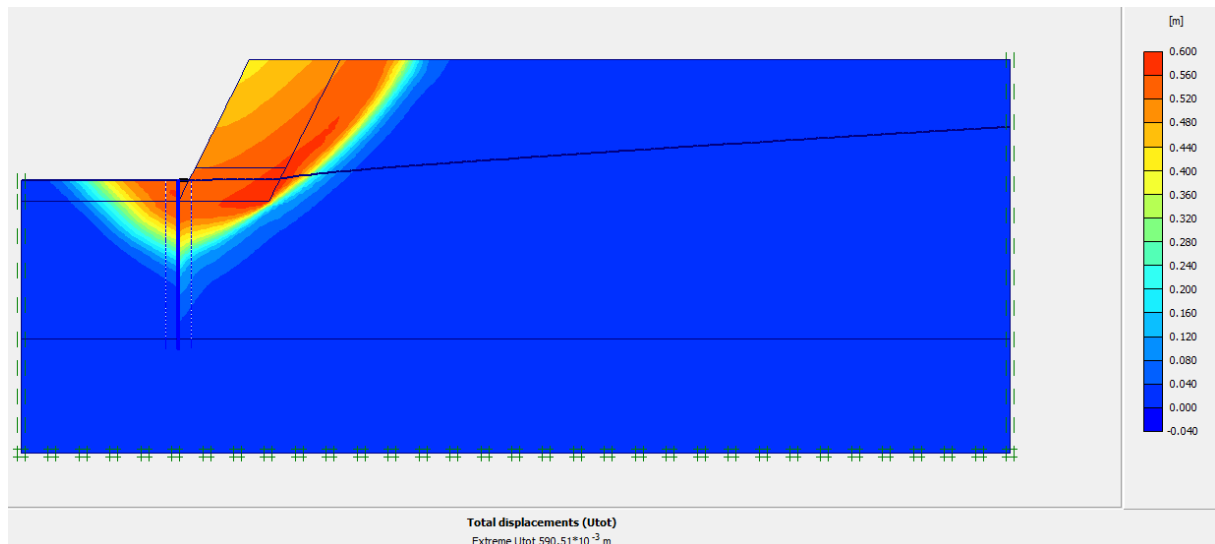
Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	108 of 381	Extrapolation factor	0,500
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000

Multipliers	Incremental multipliers		Total multipliers	
	Parameter	Value	Parameter	Value
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	-0,002	Σ-Msf:	1,657
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK

1.5 Groupe de pieux composite de type creux en FRP



Calculation information

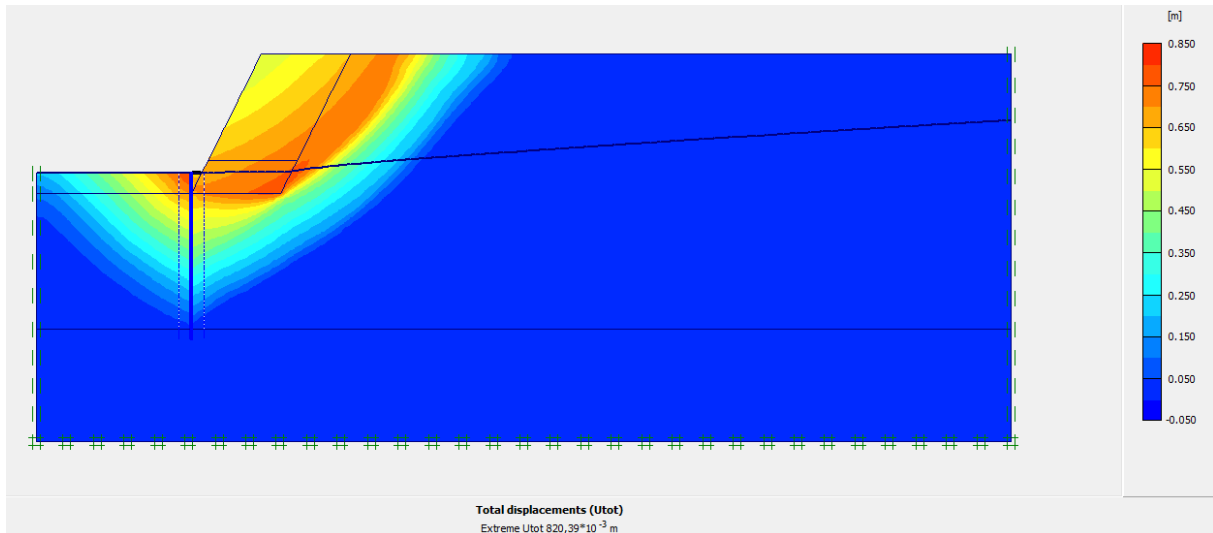
Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	122 of 260	Extrapolation factor	0,500
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000

	Incremental multipliers		Total multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,000	Σ-Msf:	1,581
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK

1.6 Groupe de pieux composite de type PGF

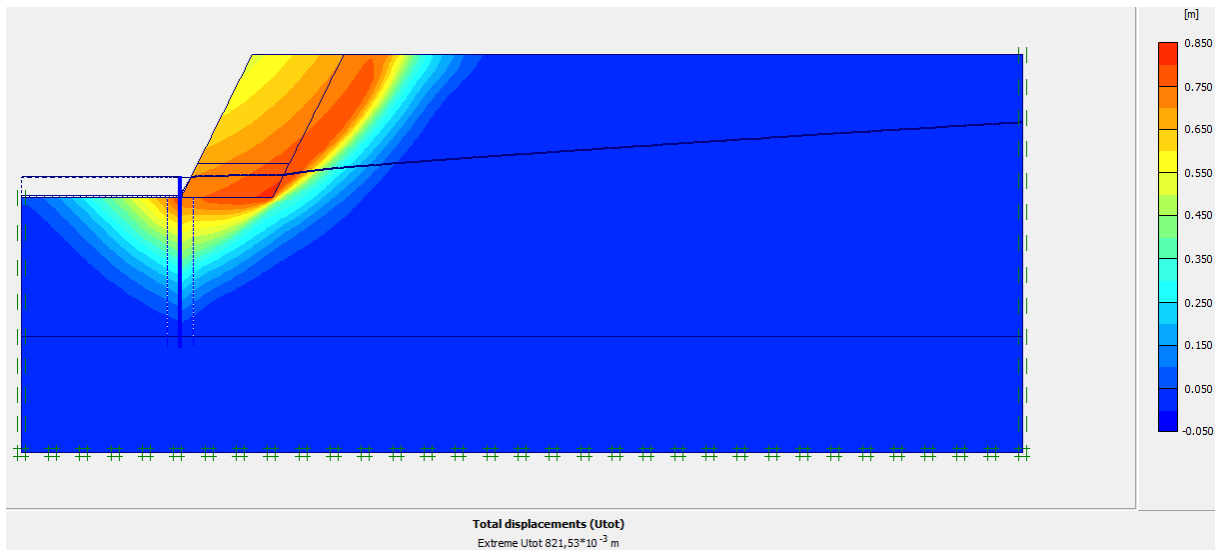


Calculation information					
Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info					
Step	106 of 214	Extrapolation factor	0,500		
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000		
Multipliers					
	Incremental multipliers		Total multipliers		
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp:	1,000	
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA:	1,000	
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB:	1,000	
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight:	1,000	
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel:	0,000	
Strength reduction factor	Msf:	-0,001	Σ-Msf:	1,871	
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000	
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000	

Print OK

2. Résultats du talus protégé en groupe de pieux composites

2.1. Groupe de pieux composite de type GPRF après une possible érosion du lit de la rivière.



Calculation information

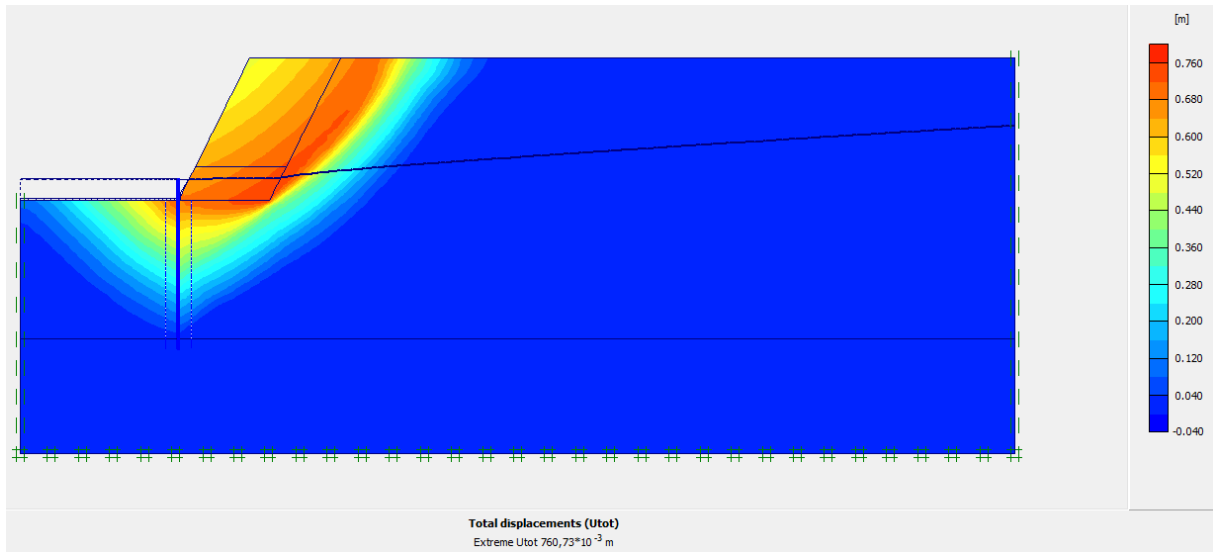
Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	423 of 423	Extrapolation factor	2,000
Plastic STEP		Relative stiffness	0,001

	Incremental multipliers		Total multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,001	Σ-Msf:	1,592
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK

2.2. Groupe de pieux composite de type PRF après une possible érosion du lit de la rivière.



Calculation information

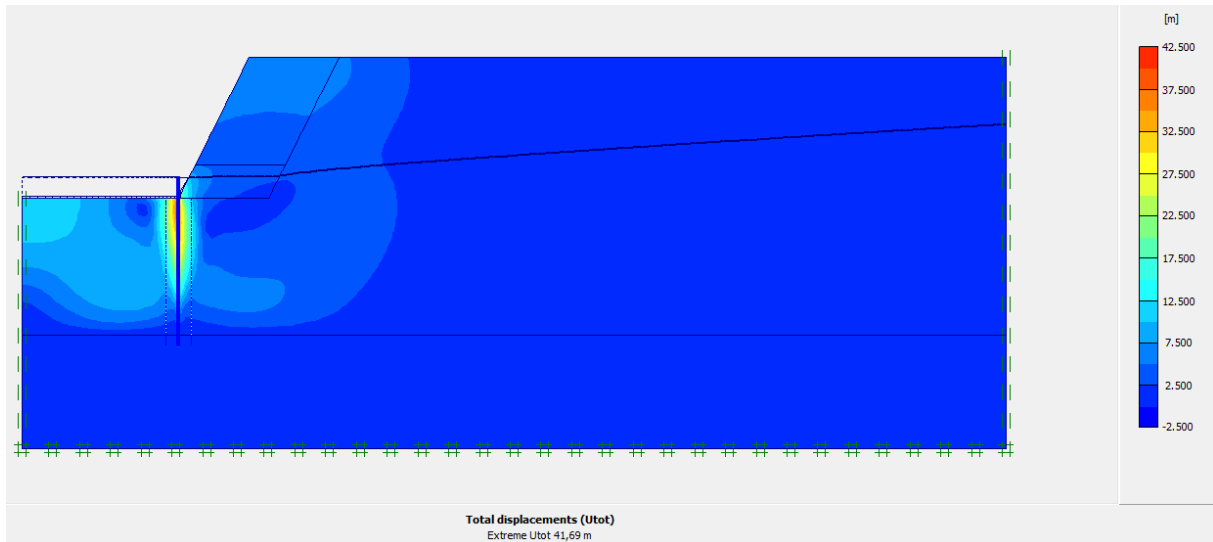
Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	212 of 212	Extrapolation factor	1,000
Plastic STEP		Relative stiffness	0,001

Multipliers	Incremental multipliers		Total multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,001	Σ-Msf:	1,602
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print | OK

2.3. Groupe de pieux composite de type SRP après une possible érosion du lit de la rivière.



Calculation information

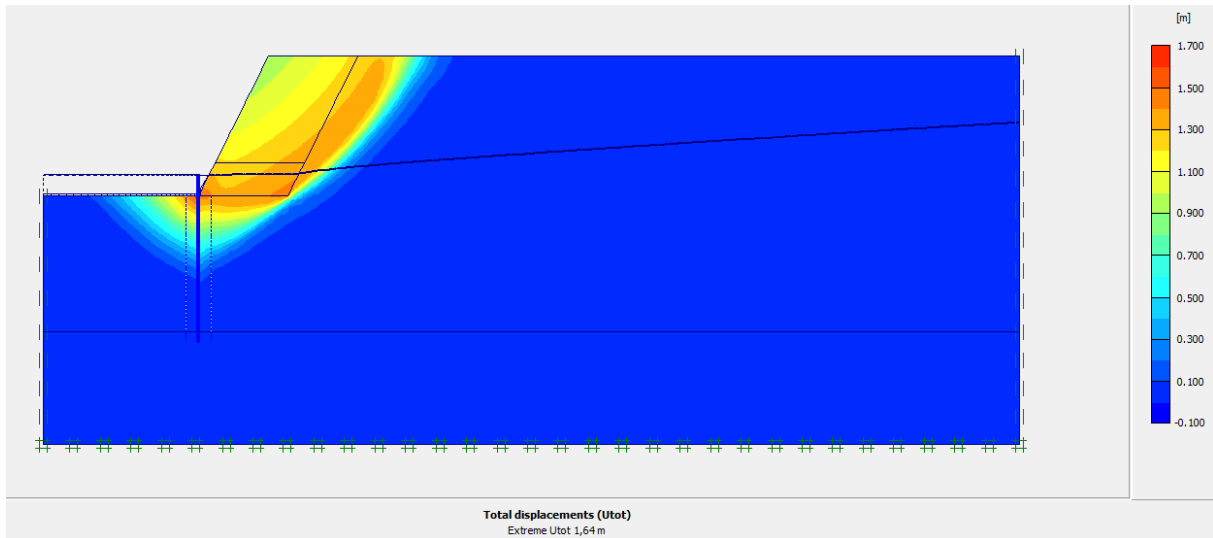
Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	700 of 700	Extrapolation factor	2,000
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000

	Incremental multipliers		Total multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,000	Σ -Msf:	0,463
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK

2.4. Groupe de pieux composite de type RPF après une possible érosion du lit de la rivière.



Calculation information

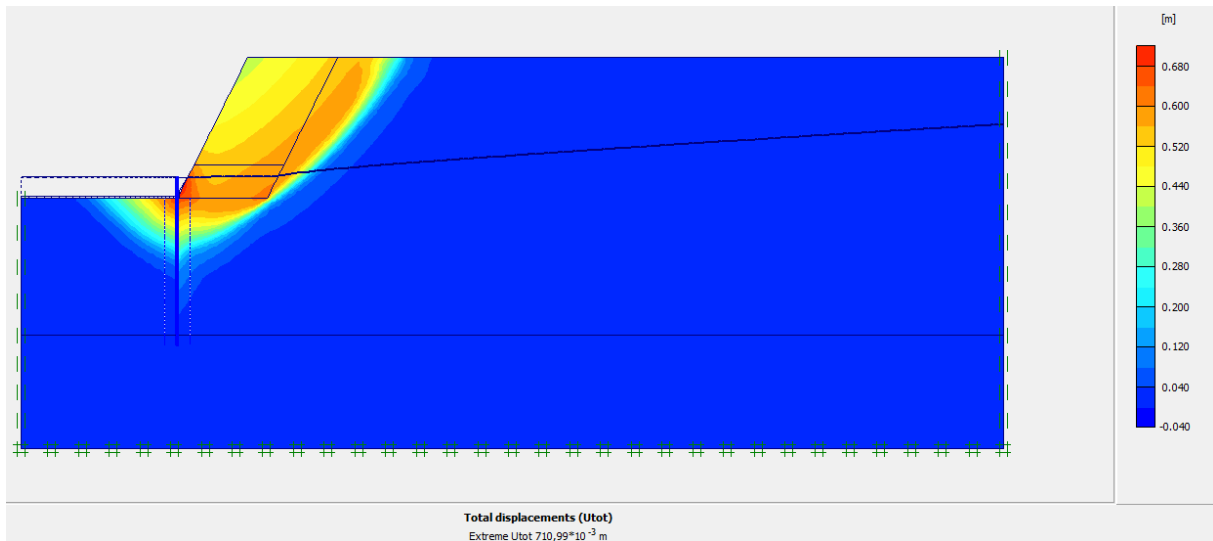
Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	381 of 381	Extrapolation factor	2,000
Plastic STEP		Relative stiffness	0,002

	Incremental multipliers		Total multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,002	Σ -Msf:	1,438
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK

2.5. Groupe de pieux composite de type creux en FRP après une possible érosion du lit de la rivière.



Calculation information

Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info

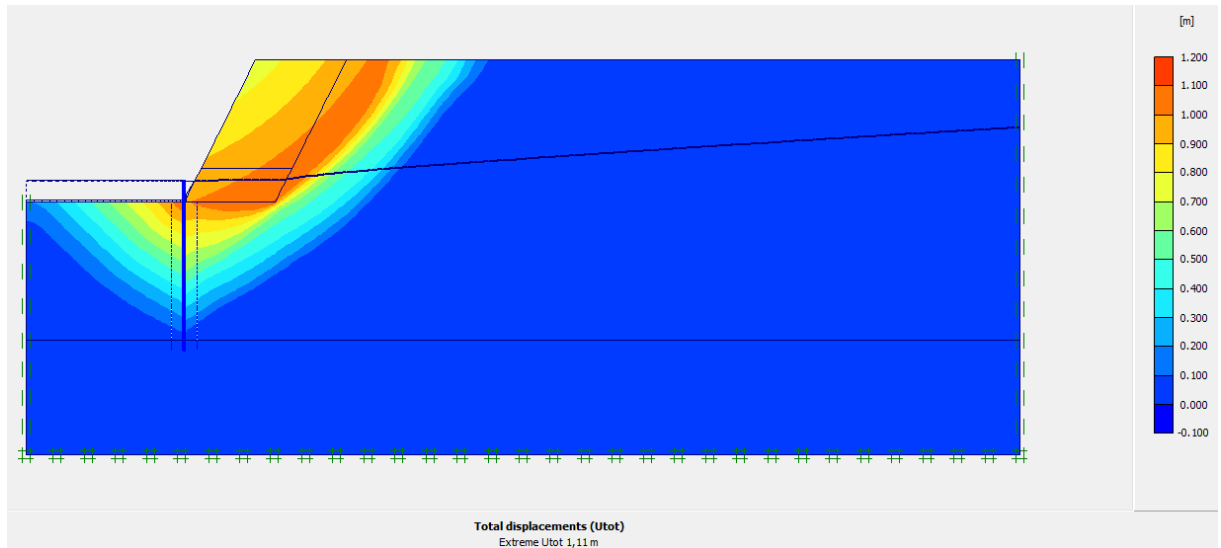
Step	260 of 260	Extrapolation factor	0,500
Plastic STEP		Relative stiffness	0,001

Multipliers

	Incremental multipliers		Total multipliers	
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,001	Σ-Msf:	1,317
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK

2.6. Groupe de pieux composite de type PGF après une possible érosion du lit de la rivière.



Calculation information

Multipliers | Additional Info | Step Info

Step Info			
Step	214 of 214	Extrapolation factor	2,000
Plastic STEP		Relative stiffness	0,001

Multipliers	Incremental multipliers		Total multipliers	
	Parameter	Value	Parameter	Value
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ -Mdisp:	1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ -MloadA:	1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ -MloadB:	1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ -Mweight:	1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ -Maccel:	0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,002	Σ -Msf:	1,609
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000

Print OK