

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Présenté par :

OUMEDDOUR NOURHENE

---

---

**Thème : STABILISATION DES TERRAINS PAR DES  
MATERIAUX RECYCLES**

---

---

Sous la direction de : Dr ; BENAMARA Fatima Zohra

---

Septembre 2020

---

# Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*En seconde lieu je voudrais présenter mes remerciements à mon encadreur « Benamara Fatima Zohra ». Je voudrais également lui témoigner ma gratitude pour sa patience et son soutien qui m'a été précieux afin de mener mon travail à bon port.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Je remercie mes parents, mes frères pour leur réconfort et soutient durant tout mon parcours.*

*Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*À celui qui a toujours battu pour m'offrir le meilleur, Mon cher  
père*

*« Kamel »*

*À la Plus belle femme du monde, qui m'a donné l'amour, la  
patience, le soutien et le courage ... ma plus grande fierté, ma  
tendre mère*

*« Souaad »*

*À ma chère sœur et ma meilleure amie : Soundes*

*À mon cher frère : Seif*

*À toute ma famille et mes amis pour leur amour et soutien et  
leurs encouragements.*

*À tous les enseignants qui m'ont dirigé vers le chemin de la  
réussite.*

*Enfin à tous qui nous sont très chers.*

## **Résumé**

Dans le monde entier, la gestion des déchets reste un défi induit par l'urbanisation, augmentation de la population et croissance industrielle. Les méthodes conventionnelles d'élimination des déchets solides sont la mise en décharge, l'incinération et le recyclage. Cependant, les espaces de décharge diminuent, le processus d'incinération émet des gaz dangereux et le recyclage semble coûteux et laborieux. Le domaine génie civil peut être une issue pour la valorisation des déchets. Le sol est un matériau qui peut être renforcé avec des fibres ou des inclusions rigides confectionné à partir des déchets recyclés (plastique, caoutchoucs, verre, etc...) dans le but d'améliorer ces caractéristiques mécaniques (résistance, rigidité, perméabilité, compressibilité, etc.). Dans cette mémoire, on a réalisé deux études numériques en exploitant les résultats expérimentaux publiés par des géotechniciens dans ce domaine. La première, est une étude numérique du comportement d'une fondation superficielle sur un sol renforcé avec du plastique PET au moyen du code Plaxis 8.6. La deuxième, est l'étude de la stabilisation des pentes à l'aide des éléments en plastique recyclé "RPP" au moyen du logiciel Geostudio 2012. L'objectif de ces modélisations est la validation des résultats des essais et ainsi affirmer les avantages de la valorisation des déchets dans le domaine de génie civil et des travaux publics.

**Mots clés** : déchet plastique, renforcement, Pins, modélisation, fondation, Plaxis 8.6, Geostudio 2012.

## **Abstract**

Around the world, waste management remains a challenge induced by urbanization, population increase and industrial growth. Conventional solid waste disposal methods are landfill, incineration and recycling. However, landfill spaces are shrinking, the incineration process emits dangerous gases, and recycling seems expensive and laborious. The field of civil engineering can be an issue for the recovery of waste. Soil is a material that can be reinforced with fibers or rigid inclusions made from recycled waste (plastic, rubbers, glass, etc.) in order to improve these mechanical characteristics (resistance, rigidity, permeability, compressibility, etc.). In this memory, we carried out two numerical studies by exploiting the experimental results published by geotechnicians in this field. The first is a numerical study of the behavior of a shallow foundation on soil reinforced with PET plastic using Plaxis 8.6 software. The second is the study of slope stabilization using recycled plastic pins "RPP" using Geostudio 2012 software. The objective of these models is to validate the results of the tests and thus assert the advantages of waste recovery in the field of civil engineering and public works.

**Keywords:** plastic waste, reinforcement, Pins, modeling, foundation, Plaxis 8.6, Geostudio 2012.

في جميع أنحاء العالم ، لا تزال إدارة النفايات تمثل تحديًا ناجمًا عن التحضر وزيادة السكان والنمو الصناعي. فمن بين الطرق التقليدية للتخلص من النفايات الصلبة هي طمر النفايات والحرق وإعادة التدوير. ومع ذلك ، فإن أماكن دفن النفايات تقلصت ، وعملية الحرق تنبعث منها غازات خطيرة ، ويبدو أن إعادة التدوير باهظة الثمن وشاقة. لذا يمكن أن يكون مجال الهندسة المدنية مخرجًا لاستعادة النفايات. التربة هي مادة يمكن تقويتها بإضافة ألياف أو شوائب صلبة منتجة من النفايات المعاد تدويرها (البلاستيك ، المطاط ، الزجاج ، إلخ...) من أجل تحسين خصائصها الميكانيكية (المقاومة ، الصلابة ، النفاذية ، الانضغاط ، إلخ...). في هذه المذكرة ، أجرينا دراستين رقميتين من خلال استغلال النتائج التجريبية التي نشرها الجيوتقنيون في هذا المجال. الأولى هي دراسة عددية لسلوك الأساس السطحي على التربة المدعمة ببلاستيك PET باستخدام كود Plaxis 8.6 . والثانية دراسة تثبيت المنحدرات باستخدام العناصر البلاستيكية المعاد تدويرها "RPP" باستخدام برنامج Geostudio 2012 . والهدف من هذه النماذج هو التحقق من صحة نتائج الاختبارات وبالتالي تأكيد مزايا استعادة النفايات في مجال الهندسة المدنية والأشغال العمومية.

**كلمات مفتاحية :** النفايات البلاستيكية ، التسليح ، الدبائيس ، تصميم ، الأساس ، Plaxis 8.6 ، Geostudio 2012.

# Sommaire

	<b>Page</b>
Remerciement.....	i
Dédicaces.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
ملخص.....	v
Sommaire.....	1
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux.....	11
Liste des symboles.....	12
Introduction générale.....	13

## **Chapitre I : Les différents types de stabilisation des sols**

I.1 Introduction.....	15
I.2 Stabilisation chimique .....	15
I.2.1 Utilisation de la chaux.....	15
I.2.2 Utilisation du ciment .....	16
I.2.3 Utilisation des sels.....	17
I.3 Stabilisation mécanique par compactage.....	17
I.4 Stabilisation par renforcement des sols.....	18
I.4.1 Colonnes ballastées.....	18
I.4.2 La technique Pneusol.....	19
I.4.3 Le renforcement par inclusion rigides.....	20
I.4.3.1 Les micro-pieux.....	20
I.4.3.2 Le clouage des sols.....	20
I.4.3.3 Le renforcement par tirants d'ancrage.....	21
I.4.4 Le renforcement par la Terre Armée.....	22
I.4.5 Le renforcement Géosynthétique.....	23
I.4.5.1 Le renforcement par géotextiles.....	24
I.4.5.2 Le renforcement par géogrilles.....	25
I.5 Le renforcement des sols par des fibres.....	25

I.6 Conclusion.....	26
<b>Références bibliographiques du premier chapitre.....</b>	<b>27</b>
<b>Chapitre II : Valorisation des matériaux recyclés dans le domaine de Génie civil</b>	
II.1 Introduction.....	28
II.2 Procédés du recyclage.....	28
II.3 Les principaux recyclât utilisés dans le domaine de Génie civil.....	28
II.3.1 Les matériaux Inerte issus du BTP.....	29
II.3.1.1 Le Béton.....	29
II.3.1.2 La brique.....	29
II.3.1.3 La céramique.....	30
II.3.1.4 Les enrobés.....	31
II.3.1.5 Les gravats.....	33
II.3.1.6 Le verre.....	34
II.3.2 Déchets usuels.....	36
II.3.2.1 L'acier.....	36
II.3.2.2 Le caoutchouc.....	37
II.3.2.3 Le papier et carton.....	40
II.3.2.4 Les plastiques.....	43
II.3.2.5 Le textile.....	46
II.3.2.6 Sciure de bois.....	47
II.4 Déchets divers.....	48
II.4.1 Les sédiments de dragage.....	48
II.4.2 Les laitiers sidérurgiques.....	49
II.4.2.1 Laitier de haut-fourneau cristallisé.....	50
II.4.2.2 Laitier de haut-fourneau vitrifié (granulé ou bouleté).....	50
II.4.2.3 Laitier d'aciérie de conversion (LAC en français, BOF slag en anglais).....	51
II.4.3 Les scories.....	51
II.5 Les fibres.....	52
II.5.1 Les fibres minérales «Fibres de verre».....	52
II.5.2 Les fibres métalliques.....	54
II.5.3 Les fibres organiques.....	55
II.5.3.1 Les fibres synthétiques polypropylène.....	55
II.5.3.2 Les fibres naturelles «Fibres végétales».....	56
II.6 Déchets de mines de charbon.....	58
II.7 Impacts du recyclage sur l'environnement.....	58
II.8 Conclusion.....	58
<b>Références bibliographiques du deuxième chapitre.....</b>	<b>59</b>

## **Chapitre III : Synthèse sur trois essais réalisés avec des déchets recyclés**

III.1 Introduction.....	62
-------------------------	----

III.2 Analyse du comportement des sols renforcés avec des déchets plastiques de polyéthylène téréphtalate (PET).....	62
III.2.1 Objectifs de l'étude.....	62
III.2.2 Les matériaux utilisés.....	62
III.2.3 Essai de compactage .....	63
III.2.4 Essai à la boîte de cisaillement direct.....	63
III.2.5 Résultats et discussion des essais d'identifications.....	64
III.2.5.1 La distribution granulométriques.....	64
III.2.6 Résultats et discussion relatifs à l'essai de compactage du sol et du composite sol- plastique PET.....	65
III.2.7 Résultats et discussion relatifs à l'essai de cisaillement direct.....	67
III.2.8 Capacité portante du composite de déchets plastiques sable-PET.....	70
III.3 Évaluation expérimentale des murs de soutènement stabilisés mécaniquement avec des caoutchoucs recyclés.....	71
III.3.1 Objectif de l'essai.....	71
III.3.2 Matériaux utilisés.....	72
III.3.3 Programme d'essai.....	74
III.3.4 Résultats et discussion.....	75
III.3.4.1 L'effet de la configuration des plaques d'ancrages.....	75
III.3.4.2 Résultats PIV.....	77
III.4 Stabilisation d'un talus avec des éléments en plastique recyclé RPP.....	79
III.4.1 Fabrication des éléments en plastique recyclé.....	79
III.4.2 Les essais standard pour les éléments de plastique recyclé.....	80
III.4.3 Programme d'essais réalisé sur les éléments en plastique recyclé RPP.....	80
III.4.3.1 Essai de compression uniaxiale.....	81
III.4.3.2 Essais de flexion sur quatre points .....	81
III.4.4 Essai in situ sur le site I70-Emma.....	82
III.4.4.1 Caractéristiques du site.....	82
III.4.4.2 Les essais réalisés sur le site.....	83
III.4.4.3 Schémas de stabilisation des zones de glissement S1 et S2.....	84
III.4.4.4 Schéma de stabilisation de la zone de glissement S3.....	85
III.4.5 Equipement et Instrumentation sur site.....	86
III.4.6 Les résultats obtenus sur le site.....	87
III.4.6.1 Mesures d'inclinomètre.....	87
III.4.6.2 Renforts instrumentés.....	88
III.4.6.3 Mesures de la pression interstitielle.....	89
III.5 Conclusion.....	89
Références bibliographiques du troisième chapitre.....	90

## **Chapitre IV: Étude numérique du comportement d'une fondation superficielle sur sol renforcé avec de Pastique- PET au moyen du code Plaxis 8.6**

IV.1 Le cade PLAXIS.....	92
IV.1.2 Le programme d'entrée des données (input).....	92

IV.1.3 Le programme de calcul.....	95
IV.1.3.1 Le Menu De Calcul.....	95
IV.1.4 Le programme de résultats (output).....	96
IV.1.5 Le programme courbe (curves).....	96
IV.2 Les modèles du comportement du sol .....	97
IV.2 .1 Modèle élastique linéaire.....	97
IV.2 .2 Modèle de Mohr-Coulomb.....	97
IV.3 Étude numérique du comportement d'une fondation superficielle sur sol renforcé avec du Pastique- PET au moyen du code Plaxis 8.6.....	97
IV.3.1 Introduction.....	97
IV.3.2 Paramètres des matériaux.....	98
IV.3.3 Analyse numérique.....	99
IV.3.3.1 Configuration du modèle numérique.....	100
IV.3.3.2 Le Maillage.....	101
IV.3.3.3 Conditions initiales.....	101
IV.3.3.4 Les phases de calcul.....	102
IV.3.4 Présentation des résultats du calcul.....	102
IV. 3.5 Discussion des résultats.....	110
IV.3.6 Conclusions.....	111
<b>Références bibliographiques du quatrième chapitre.....</b>	<b>111</b>
<b>Chapitre V : Stabilisation d'un talus par des éléments en plastique recyclé RPP "Pins"</b>	
V.1 Introduction.....	112
V.2 Calcul de la stabilité des talus .....	112
V.3 Rappel sur les méthodes d'équilibre limite.....	112
V.3.1 Ruptures planes (glissements plans).....	112
V.3.2 Ruptures circulaires, méthode des tranches .....	113
V.3.2.1 La méthode de Fellenius.....	113
V.3.2.2 La méthode de Bishop simplifié (1955).....	114
V.3.2.3 Méthode de Janbu à surface générale (1965).....	114
V.4 Stabilité des pentes renforcées par des éléments en plastique recyclé RPP.....	114
V. 5 Calcul de la résistance latérale limite.....	116
V.5.1 Calcul de la résistance limite en fonction des modes de rupture du sol.....	116
V.5.2 Modes de rupture structurelle.....	118
V. 6 Objectif de l'étude.....	119
V.7 Présentation du logiciel Géostudio 2012.....	119
V.7.1 Le fonctionnement du logiciel.....	120
V.8 Présentation du projet.....	122
V.9 Modélisation numérique du talus au moyen de Geostudio.....	122
V.9.1 Construction du modèle.....	122
V.9.2 Calcul du coefficient de sécurité .....	123
V.9.2.1 Les phases de calcul.....	123

V.9.2.2 Calcul du coefficient de sécurité sous chargement gravitaire.....	124
V.9.2.3 Calcul du coefficient de sécurité sous chargement gravitaire+ nappe phréatique.....	125
V.9.3 Calcul sous chargement gravitaire+ nappe phréatique+ RPP (esp=1.8m)....	125
V.9.4 Etude paramétrique: Effet de l'espacement et de la profondeur des RPP.....	127
V. 10 Conclusion.....	128
<b>Références bibliographiques du cinquième chapitre.....</b>	<b>129</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>130</b>

## Liste des figures

		<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b>	Stabilisation des sols avec de la chaux ou du ciment.	16
<b>Figure I.2</b>	Compactage des sols.	17
<b>Figure I.3</b>	Techniques de compactage des sols.	18
<b>Figure I.4</b>	Principe de la réalisation de la colonne ballastée par voie sèche.	19
<b>Figure I.5</b>	Application des pneusol dans la stabilisation des talus.	19
<b>Figure I.6</b>	Renforcement par des micro-pieux.	20
<b>Figure I.7</b>	Le clouage des sols.	21
<b>Figure I.8</b>	Longueur libre et longueur scellée.	22
<b>Figure I.9</b>	Mur en terre armée.	23
<b>Figure I.10</b>	Éléments d'un mur en terre armée.	23
<b>Figure I.11</b>	Les types de géosynthétiques.	24
<b>Figure I.12</b>	Géotextiles de renforcement.(ouvrage de soutènement les murs en remblai renforcé par éléments géosynthétiques.	24
<b>Figure I.13</b>	Structures de géogrille.	25
<b>Figure I.14</b>	Stabilisation par geogrille.	25
<b>Figure I.15</b>	Un mur de soutènement soutenant un remblai de sol renforcé aléatoirement par des fibres.	26
<b>Figure II.1</b>	Logo universel des matériaux recyclables.	28
<b>Figure II.2</b>	Le broyage du béton.	29
<b>Figure II.3</b>	Le déchet de la brique.	30
<b>Figure II.4</b>	Les déchets céramique.	31
<b>Figure II.5</b>	Déchets de revêtements routiers.	31
<b>Figure II.6</b>	Synoptique de production des agrégats d'enrobés.	32
<b>Figure II.7</b>	Illustration d'un retraitement en place.	32
<b>Figure II.8</b>	Synoptique de production des gravats.	34
<b>Figure II.9</b>	Le verre de construction.	34
<b>Figure II.10</b>	Verre récupéré.	35
<b>Figure II.11</b>	Recyclage de l'acier.	36
<b>Figure II.12</b>	Le cycle de l'acier.	37
<b>Figure II.13</b>	Réhabilitation de carrière par l'utilisation de pneus usagés.	38
<b>Figure II.14</b>	La technique de Pneusol.	38
<b>Figure II.15</b>	Chips de pneus.	39
<b>Figure II.16</b>	Poudrettes de caoutchouc.	39
<b>Figure II.17</b>	Granulés de caoutchouc.	40
<b>Figure II.18</b>	Béton à base de granulats de caoutchouc	40
<b>Figure II.19</b>	Le recyclage du papier.	41
<b>Figure II.20</b>	Ouate de cellulose.	41
<b>Figure II.21</b>	Panneau compacté de ouate de cellulose papier.	42
<b>Figure II.22</b>	Maison construite avec des plaques de carton ondulé.	42
<b>Figure II.23</b>	L'opération de moulage.	42
<b>Figure II.24</b>	Types de plastiques.	43
<b>Figure II.25</b>	Paillette de bouteille en plastique.	44
<b>Figure II.26</b>	Les phases de la confection des Pavés de sol.	45
<b>Figure II.27</b>	Renforcement des talus par des épingles en plastique recyclé.	46

<b>Figure II.28</b>	Déchets de textile.	46
<b>Figure II.29</b>	Béton renforcé en textile utilisé comme façades de bâtiments.	46
<b>Figure II.30</b>	Briques en textile recyclés.	47
<b>Figure II.31</b>	Copeaux de bois après broyage.	47
<b>Figure II.32</b>	Dragage des sédiments.	48
<b>Figure II.33</b>	Type de Dragues.	49
<b>Figure II.34</b>	Laitier de Haut-Fourneau Cristallisé.	50
<b>Figure II.35</b>	Laitier de Haut- Fourneau Vitrifié (granulé ou bouleté).	50
<b>Figure II.36</b>	Laitier d’Aciérie de Conversion.	51
<b>Figure II.37</b>	Scorie déchet de fonderie.	52
<b>Figure II.38</b>	Fibre de verre.	52
<b>Figure II.39</b>	Synoptique de production de fibres de verre et fibres sèches.	53
<b>Figure II.40</b>	Synoptique de la valorisation mixte des composites fibres de verre.	54
<b>Figure II.41</b>	Les fibres métalliques.	54
<b>Figure II.42</b>	Les différents types des fibres organiques.	55
<b>Figure II.43</b>	Les fibres polypropylène.	56
<b>Figure II.44</b>	Prismes confectionnés avec des briques de fibres diss.	57
<b>Figure II.45</b>	Fibres de palmier dattier.	57
<b>Figure II.46</b>	Exemples de géotextiles végétaux.	58
<b>Figure III.1</b>	Paillettes de déchets en plastique PET.	63
<b>Figure III.2</b>	Composite de déchets plastiques compactés sable-PET.	63
<b>Figure III.3</b>	Appareil Digishear utilisé pendant l’essai.	64
<b>Figure III.4</b>	Principe de l’essai de cisaillement direct.	64
<b>Figure III.5</b>	La distribution granulométrique du sable et des paillettes du déchet en plastique PET.	65
<b>Figure III.6</b>	Relation entre densité sèche-teneur en eau du sable et des composites sable- plastique PET.	66
<b>Figure III.7</b>	Relation entre le MDD et les déchets plastiques PET.	67
<b>Figure III.8</b>	Relation entre la contrainte de cisaillement et la contrainte normale.	68
<b>Figure III.9</b>	Les résultats d’essai de cisaillement sur sable non renforcé.	68
<b>Figure III.9a</b>	Résultat de l’essai de cisaillement sur le composite de déchets plastique PET à 12,5%.	68
<b>Figure III.10</b>	Résultat de l’essai de cisaillement sur le composite de déchets plastique PET à 22,5%.	69
<b>Figure III.11</b>	Résultats de l’essai de cisaillement sur le composite sable-déchets plastiques PET à 32,5%.	69
<b>Figure III.22</b>	Relation entre l'angle de frottement ( $\varphi$ ) et la densité sèche maximale ( $\text{kg/m}^3$ ).	70
<b>Figure III.33</b>	Relation entre les déchets plastiques PET, l'angle de frottement et la largeur de la fondation.	71
<b>Figure III.14</b>	Les plaques d'ancrage.	73
<b>Figure III.15</b>	Configurations des barres.	74
<b>Figure III.16</b>	Échantillon de RCR tamisé.	74
<b>Figure III.17</b>	Schéma du mur de soutènement.	75
<b>Figure III.18</b>	Comparaisons de la capacité portante de la semelle et Comparaisons du déplacement horizontal du mur pour six armatures.	75
<b>Figure III.19</b>	La capacité portante de la semelle et les déplacements	76

	horizontaux du mur en fonction des pourcentages (RCR) dans le remblai.	
<b>Figure III.20</b>	Résultats PIV pour six renforts avec une configuration à 5 ancrages dans le sol d'origine (sans RCR).	77
<b>Figure III.21</b>	Résultats PIV pour le renforcement C2 intégré dans le sol d'origine avec trois configurations	78
<b>Figure III.22</b>	Résultats PIV pour le renforcement S2 avec la configuration losange dans cinq mélanges.	79
<b>Figure III.23</b>	Trois modes de rupture potentiels pour les éléments de plastique recyclé utilisés dans la stabilisation des pentes.	80
<b>Figure III.24</b>	Configuration des essais de compression uniaxiale.	81
<b>Figure III.25</b>	Courbe des contraintes-déformations typique présentant les modules sécants	81
<b>Figure III.26</b>	Photo de l'essai de flexion sur quatre points en cours.	82
<b>Figure III.27</b>	Photo aérienne de l'autoroute 70 près d'Emma Missouri présentant l'emplacement du site I70-Emma.	82
<b>Figure III.28</b>	Vue en plan du site I70-Emma présentant les zones S1, S2, S3 et S4	83
<b>Figure III.29</b>	Photographie du côté sud du remblai présentant les zones de glissement S1 (gauche), S2 (centre) et S3 (droite).	83
<b>Figure III.30</b>	Résumé des résultats des essais de cisaillement direct.	84
<b>Figure III.31</b>	Vue en plan des zones S1 et S2 sur le site I70-Emma présentant les éléments de renforcement	85
<b>Figure III.32</b>	Vue en plan des schémas de stabilisation sélectionnés pour la zone de glissement S3 sur le site d'essai I70-Emma.	85
<b>Figure III.33</b>	Coupe transversale du profil considéré pour l'analyse de la stabilité sur le site I70-Emma	86
<b>Figure III.34</b>	Vue en plan des zones S1 et S2 présentant les emplacements des instruments installés sur le site I70-Emma.	86
<b>Figure III.35</b>	Vue en plan de la zone S3 sur le site I70-Emma.	87
<b>Figure III.36</b>	Profil des déplacements latéraux dans la zone de glissement S1 sur le site I70-Emma.	87
<b>Figure III.37</b>	Déplacement en fonction de la profondeur pour l'inclinomètre I-7, section B, sur le site d'essai I70-Emma.	88
<b>Figure III.38</b>	Contrainte axiale incrémentale mesurée dans l'élément instrumenté IM-G dans la zone de glissement S1 sur le site.	88
<b>Figure III.39</b>	Moments de flexion mesurés dans l'élément instrumenté IM-H sur le site d'essai.	89
<b>Figure III.40</b>	Niveaux d'eau piézométriques mesurés sur le site d'essai I70-Emma.	89
<b>Figure IV.1</b>	Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique.	93
<b>Figure IV.2</b>	Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol.	93
<b>Figure IV.3</b>	Géométrie du modèle.	100
<b>Figure IV.4</b>	Modèle d'éléments finis présentant la charge et les conditions aux limites.	100
<b>Figure IV.5</b>	Les propriétés de la semelle.	101
<b>Figure IV.6</b>	La génération du maillage.	101
<b>Figure IV.7</b>	Contraintes initiales.	102

<b>Figure IV.8</b>	Les phases de calculs.	102
<b>Figure IV.9</b>	Maillage déformé cas (12.5% Plastique PET et $h_{sr}=0.5m$ ).	103
<b>Figure IV.10</b>	Déplacement vertical ( $U_y$ ) (12.5% Plastique PET et $h_{sr}=0.5m$ ).	103
<b>Figure IV.11</b>	Déplacement horizontal ( $U_x$ ) (12.5% Plastique PET et $h_{sr}=0.5m$ ).	104
<b>Figure IV.12</b>	Déformation horizontale ( $\epsilon_x$ ) (12.5% Plastique PET et $h_{sr}=0.5m$ ).	104
<b>Figure IV.13</b>	Contraintes verticales ( $\sigma_{yy}$ ) (12.5% Plastique PET et $h_{sr}=0.5m$ ).	105
<b>Figure IV.14</b>	Contraintes tangentielles ( $\tau_{xy}$ ) Plastique PET et $h_{sr}=0.5m$ ).	105
<b>Figure IV.15</b>	Effort axial dans la fondation Plastique PET et $h_{sr}=0.5m$ ).	105
<b>Figure IV.16</b>	Effort branchant dans la fondation Plastique PET et $h_{sr}=0.5m$ ).	106
<b>Figure IV.17</b>	Moment fléchissant dans la fondation.	106
<b>Figure IV.18</b>	Les tassements en fonction des contraintes sous la fondation pour différents épaisseurs de la couche renforcée Cas (22.5% PET).	108
<b>Figure IV.19</b>	Les tassements en fonction des contraintes sous la fondation pour différents pourcentages de PET Cas ( $h_{sr}=0.5m$ ).	109
<b>Figure IV.20</b>	Les tassements en fonction des contraintes verticales pour différents épaisseur de la couche Cas : (32% PET).	109
<b>Figure IV.21</b>	Les déplacement verticaux en fonction des déplacement horizontaux pour différents pourcentages PET cas $h_{sr}=0.50m$ .	110
<b>Figure V.1</b>	Ruptures planes.	113
<b>Figure V.2</b>	Méthode des tranches	113
<b>Figure V.3</b>	Adition de la force de renforcement ( $F_R$ ) sur une tranche individuelle selon la méthode des tranches.	115
<b>Figure V.4</b>	Distribution de la résistance limite pour plusieurs éléments dans une pente renforcée.	115
<b>Figure V.5</b>	Schéma du principe de renforcement des pentes renforcées avec RPP.	116
<b>Figure V.6</b>	Calcul de la force de résistance limite: (a) pression limite du sol et (b) force de résistance latérale équivalente.	117
<b>Figure V.7</b>	Mode de rupture 1 et Courbe de résistance limite pour le mode de rupture 1	117
<b>Figure V.8</b>	Mode de rupture 2 et Courbe de résistance limite pour le mode de rupture 2	118
<b>Figure V.9</b>	Le mode de rupture 3a et Courbe de résistance limite du mode de rupture 3a.	118
<b>Figure V.10</b>	Le mode de rupture 3b et Courbe de résistance limite du mode de rupture 3b.	119
<b>Figure V.11</b>	Présentation du logiciel Geostudio 2012.	120
<b>Figure V.12</b>	Entrer le type d'analyse.	120
<b>Figure V.13</b>	Insertion des caractéristiques mécaniques des différentes couches.	121
<b>Figure V.14</b>	Conditions complémentaires nécessaires pour le calcul.	121
<b>Figure V.15</b>	Explorateur des analyses.	122
<b>Figure V.16</b>	Modèle géométrique du profil du talus.	123
<b>Figure V.17</b>	Les phases de calcul.	123
<b>Figure V.18</b>	Cercle de rupture critique et valeur du $F_S$ sous chargement gravitaire seul.	124

<b>Figure V.19</b>	Cercle de rupture critique et la valeur du $F_S$ sous chargement gravitaire+nappe.	125
<b>Figure V.20</b>	Cercle de rupture critique et la valeur du $F_S$ sous chargement gravitaire+nappe nappe+ RPP (esp=1.8m et L=2.4m).	126
<b>Figure V.21</b>	Cercle de rupture critique et la valeur du $F_S$ sous chargement gravitaire+nappe nappe+ RPP (esp=3.6m et L=2.4m).	126
<b>Figure V.22</b>	Cercle de rupture critique et la valeur du $F_S$ sous chargement gravitaire+nappe nappe+ RPP (esp=3.6m et L=3.6m).	126
<b>Figure V.23</b>	$F_S$ en fonction du type de chargement et des longueurs RPP pour un esp=1.8 m.	127
<b>Figure V.24</b>	$F_S$ en fonction du type de chargement et des longueurs des RPP pour un esp=3.6m.	127

## Liste des tableaux

		<b>Page</b>
<b>Tableau II.1</b>	Principaux thermoplastiques.	43
<b>Tableau III.1</b>	Résultats de l'analyse granulométrique.	65
<b>Tableau III.2</b>	Résultats obtenus à partir d'essais de compactage.	65
<b>Tableau III.3</b>	Résultats des essais à la boîte de cisaillement direct.	67
<b>Tableau III.4</b>	Résumé des déchets plastiques PET, angle de frottement et largeur de fondation.	71
<b>Tableau III.5</b>	Propriétés physico-mécaniques du sol.	72
<b>Tableau III.6</b>	Matériaux équivalents pour simuler un revêtement en béton de 300 mm d'épaisseur.	73
<b>Tableau III.7</b>	Propriétés des tirants et plaques d'ancrage.	73
<b>Tableau III.8</b>	Définitions des essais effectués.	75
<b>Tableau III.9</b>	Résumé des essais réalisés sur les éléments en plastique recyclé.	80
<b>Tableau III.10</b>	Résumé des paramètres de résistance effective déterminés d'après les essais de cisaillement direct et triaxiale.	84
<b>Tableau IV.1</b>	Résumé des propriétés du sable.	98
<b>Tableau IV.2</b>	Résumé des propriétés des paillettes en plastique (PET).	98
<b>Tableau IV.3</b>	Résumé des propriétés du mélange sable-PET plastique.	99
<b>Tableau IV.4</b>	Les Déformations maximales dans le sol non renforcé et renforcé d'épaisseur $h_{sr}=0.5m$ .	106
<b>Tableau IV.5</b>	Les contraintes maximales dans le sol non renforcé et renforcé d'épaisseur $h_{sr}=0.5m$ .	106
<b>Tableau IV.6</b>	Les déformations verticales, les efforts et les moments dans la fondation dans le sol non renforcé et renforcé cas $h_{sr}=0.5m$ .	107
<b>Tableau IV.7</b>	Les Déformations maximales dans le sol renforcé d'épaisseur cas $h_{sr}=0.75m$ .	107
<b>Tableau IV.8</b>	Les contraintes maximales dans le sol renforcé d'épaisseur cas $h_{sr}=0.75m$ .	107
<b>Tableau IV.9</b>	Les déformations verticales, les efforts et les moments dans la fondation cas $h_{sr}=0.75m$ .	107
<b>Tableau IV.10</b>	Les Déformations maximales dans le sol renforcé d'épaisseur cas $h_{sr}=1m$ .	107
<b>Tableau IV.11</b>	Les contraintes maximales dans le sol renforcé d'épaisseur cas $h_{sr}=1m$ .	108
<b>Tableau IV.12</b>	Les déformations verticales, les efforts et les moments dans la fondation cas $h_{sr}=1m$ .	108
<b>Tableau V.1</b>	Les modes de rupture du sol et des éléments pour établir la résistance latérale limite des éléments de renforcement.	116
<b>Tableau V.2</b>	Caractéristiques des couches de sol.	122
<b>Tableau V.3</b>	Propriétés des éléments recyclés RPP.	122
<b>Tableau V.4</b>	Valeur du facteur de sécurité sous chargement gravitaire+ nappe.	125
<b>Tableau V.5</b>	Valeurs de FS obtenus par le logiciel Geostudio 2012.	127

## Liste des symboles

$C_u$ :	Coefficient d'uniformité
$C_c$ :	Coefficient de courbure
$\gamma$ :	Le poids volumique du sol
$E_m$ :	Module élastique de la fraction du sol
$c$ :	La cohésion effective du sol
$G_s$ :	Densité sèche
$E_s$ :	Module d'élasticité de la fraction des fibres
$\nu$ :	Coefficient de Poisson
$\phi$ :	Angle de frottement interne
$V_m$ :	La fraction volumique du sol
$V_a$ :	La fraction volumique des fibres
$U_x$ :	Déplacement horizontal
$U_y$ :	Déplacement vertical
$\varepsilon_x$ :	Déformation horizontale
$\sigma_{yy}$ :	Contraintes verticale
$\tau_{xy}$ :	Contrainte tangentielle
$h_{rs}$ :	Épaisseurs de la couche renforcée
$M_R$ :	Moment résistant
$M_O$ :	Moment moteur
$F_s$ :	Facteur de sécurité

## Abréviations

PET : Déchets plastiques de polyéthylène téréphtalate.

RCC: Caoutchoucs recyclés (Recycled crumb rubber).

PIV: Vélocimétrie d'image de particules (Particle image velocimetry).

PS : Polystyrène .

PP : Polypropylène.

LDPE : Polyéthylène de basse densité.

HDPE : Polyéthylène de haute densité.

FEM : Méthode des éléments finis.

RPP : L'élément de plastique recyclé.

# **Introduction**

# **Générale**

## **Introduction générale**

Un sol dont les caractéristiques géotechniques sont mauvaises est considéré comme dangereux pour la construction des ouvrages d'art. Des techniques de stabilisation des sols sont couramment utilisées pour répondre aux exigences du projet, en modifiant l'état naturel du sol, au lieu de changer la conception de l'ouvrage en réponse à la limitation naturelle du sol.

La technique de renforcement des sols est largement adoptée dans les routes, les chemins de fer, les ouvrages de soutènement et les applications de fondation en raison de leurs caractéristiques à savoir ; facilité de construction, performance, durabilité, esthétique, flexibilité de conception et gain de temps.

Partout dans le monde, de nouveaux matériaux et technologies sont proposés par les chercheurs pour répondre à diverses demandes d'infrastructure et pour obtenir des solutions durables.

Généralement, les ouvrages de génie civil transmettent leurs charges au sol d'assise et environnant à travers des fondations et des parois de soutènement. Ces ouvrages doivent être réalisés sur des sols de bonne résistance pour assurer leur bon fonctionnement.

Les propriétés mécaniques du sol peuvent être améliorées chimiquement ou physiquement en massant les particules du sol ensemble de telle sorte que leur résistance augmente en ajoutant des liants tel que la chaux, le ciment, etc.... Toutefois, dans le cas des constructions linéaires et les ouvrages de soutènement, ces méthodes ne semblent pas être des solutions économiques.

Le sol renforcé est une autre technique dans laquelle la résistance du sol est augmentée par l'addition des inclusions ou fibres sous forme linéaire, courtes et particules. Ces renforts sont généralement fabriqués à partir du matériau non dégradable pour assurer la stabilité des sols à long terme. Les déchets inertes tel que le plastique, le caoutchouc, les matériaux issus du BTP peuvent être transformés en matériaux de renforcement.

La valorisation des déchets dans le domaine de génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux.

Dans cette étude, on a présenté quelques travaux de recherches effectuées aux laboratoires sur des déchets d'origine plastique, (paillettes de bouteille, poudrette de pneus), mélangés à la masse du sol formant ainsi un composite utilisé comme remblai derrière des parois de soutènement ou encore comme couche d'assise des fondations.

Sur la base des résultats de ces travaux, deux études numériques ont été réalisées: la première étude est sur le comportement des fondations superficielles reposant sur sol renforcé avec de plastique PET au moyen du logiciel Plaxis 8.6 et la deuxième sur la stabilisation des talus avec des éléments en plastique recyclé.

La valorisation des déchets reste ouverte, à d'autres utilisations et possibilités, permettant ainsi d'élargir la gamme des matériaux de construction, de réduire les déchets à la source et de développer l'utilisation des matériaux recyclés dans les chantiers.

Ce travail est constitué de cinq chapitres :

**Le premier chapitre** est une recherche bibliographique sur les différents types de stabilisation des sols, leurs domaines d'application, leurs avantages ainsi que les différents types de matériaux utilisés.

**Le deuxième chapitre** est consacré à une présentation des différents matériaux recyclés et leur valorisation dans le domaine du génie civil et des travaux publics.

**Le troisième chapitre** est une synthèse sur trois essais réalisés avec des déchets recyclés, afin de définir leurs caractéristiques mécaniques et proposer des perspectives pour leur utilisation.

**Le quatrième chapitre** est consacré à l'étude numérique du comportement d'une fondation superficielle sur un sol renforcé avec du plastique PET au moyen du code Plaxis 8.6

**Le cinquième chapitre** est consacré aussi à l'étude de la stabilisation des pentes à l'aide des éléments en plastique recyclé "RPP" au moyen du logiciel Geostudio 2012.

Enfin, nous avons présentés une conclusion générale sur le travail réalisé.

# CHAPITRE I

## I.1 Introduction

La stabilisation des sols est un terme qui rassemble l'ensemble des techniques qui ont pour but d'améliorer la résistance des sols vis à vis du cisaillement et/ou de limiter les déformations sous des ouvrages existants. En géotechnique, plusieurs techniques ont été utilisées pour stabiliser les sols. Ces techniques sont basées parfois sur des approches chimiques, par l'addition des matériaux cimentaires (ciment, chaux, cendres volantes, laitier, etc.) ou sur des approches purement mécaniques par l'association d'éléments rigides au sol. Cependant, le choix entre ces méthodes dépend du type du sol et la nature du projet. Le traitement des sols est souvent exécuté pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité [11]. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs. Les techniques de stabilisation les plus utilisées sont :

- la stabilisation chimique;
- la stabilisation mécanique ;
- la stabilisation par renforcement des sols.

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

## I.2 Stabilisation chimique

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol tel que les réactions d'échange de base avec les particules d'argile (cation) et les réactions pouzzolaniques (cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (capacité portante) et de durabilité.

Pratiquement tous les sols peuvent être traités. La stabilisation peut être utilisée, avant compactage, in situ ou avec des sols excavés ou amenés d'ailleurs. Cependant une analyse préalable de leur nature est nécessaire avant chaque traitement. Elle détermine la technique et les moyens les plus appropriés à mettre en œuvre, en fonction des spécificités du terrain qui demande une attention particulière concernant l'épaisseur du sol à traiter, le type d'additifs à utiliser et les dosages des ajouts à respecter. Le traitement des sols en place ou rapportés par l'utilisation des additifs seuls ou combinés (ciment, chaux, pouzzolane naturelle, cendres volantes, fumée de silice...etc.) est actuellement très largement employé dans la plupart des pays du monde.

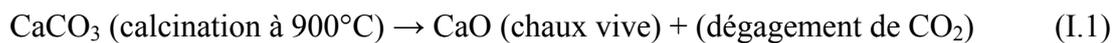
### I.2.1 Utilisation de la chaux

La chaux a été utilisée depuis longtemps comme stabilisateur des sols sensibles à l'eau (remblai, couches de formes...etc.) (Fig. I.1). De plus, la chaux est employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, la sidérurgie, la dépollution [4].



**Figure I.1** Stabilisation des sols avec de la chaux ou du ciment [4].

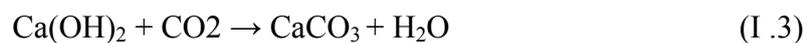
La chaux est généralement une poudre fine obtenue par la calcination de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), à une température supérieure à  $900^\circ\text{C}$ , qui donne lieu à la naissance d'un oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) ou la chaux vive munie d'un dégagement du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) (Eq. I.1).



Au contact de l'eau, la chaux vive obtenue par calcination, peut se transformer en chaux éteinte ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) accompagné par un fort dégagement de chaleur, (Eq. I.2).



La chaux vive  $\text{CaO}$  peut, après hydratation par l'humidité ambiante ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), se carbonater sous l'action du  $\text{CO}_2$  atmosphérique, (Eq. I.3).



Les caractéristiques des chaux aériennes vis-à-vis du traitement des sols dépendent de la forme sous laquelle elles sont utilisées, diverses formes de chaux étant utilisées dans le traitement des sols. Les formes les plus communes sont la chaux vive et la chaux éteinte. Elle exprime la rapidité d'action d'une chaux lors de son emploi et est essentiellement fonction de la surface de contact entre la chaux et le corps avec lequel elle réagit. Elle dépend donc de la surface spécifique et de la finesse de la chaux.

### **I.2.2 Utilisation du ciment**

Un ciment est un liant hydraulique composé de matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. D'ailleurs, pour les travaux de terrassement, la norme NF-P15-108 met en évidence des liants hydrauliques routiers destinés notamment, à la réalisation d'assises de chaussées, de couches de forme et de terrassements. La norme NF-EN197-1 subdivise les liants hydrauliques en cinq type en fonction de leur composition à savoir: le ciment Portland (CEM I), le ciment Portland composé (CEM II), le ciment de haut-fourneau (CEM III) et le ciment composé (CEM V) [9].

### I.2.3 Utilisation des sels

Plusieurs sels minéraux à différentes concentrations (Chlorure de potassium  $KCl$ , Chlorure de sodium  $NaCl$ , Chlorure de calcium  $CaCl_2$ , Sulfate d'ammonium  $(NH_4)_2SO_4$  sont utilisés dans la stabilisation chimique des sols surtout pour les sols gonflants dont il augmente la concentration ionique de l'eau libre [17].

### I.3 Stabilisation mécanique par compactage

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques (apport d'énergie mécanique), qui conduisent à accroître la densité d'un sol. En faisant, la texture du sol est resserrée ce qui réduit les déformations et les tassements et augmente la compacité du sol et améliore sa capacité portante. Les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les remblais routiers, les barrages en terre et les aérodrômes. La densification mécanique du sol peut entraîner :

- Modification de la granulométrie.
- Modification de la teneur en eau.
- Réduction ou élimination des risques de tassement.
- Augmentation de la résistance du sol et la stabilité du talus.
- Amélioration de la capacité portante.
- Limitation des variations de volume causées par gel, gonflement et retrait. [15]



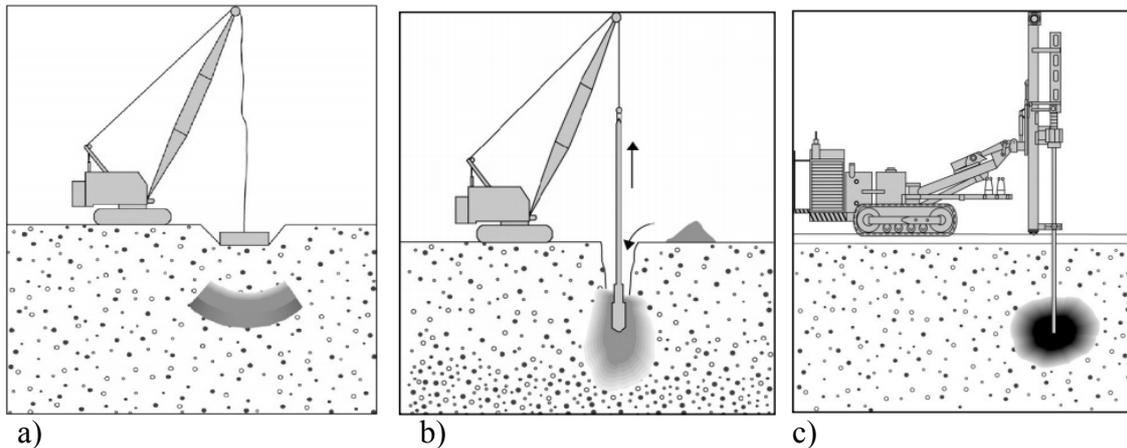
*Figure I.2* Compactage des sols [13].

Le compactage peut se faire par l'un des procédés suivants :

- Compactage dynamique profond réalisé dans les sols pulvérulent et perméable à une profondeur allant jusqu'à 12.5 m.
- Compactage par vibration connu sous le nom vibroflotation. La procédure utilise des vibrateurs down-hole (vibroflot) descendu dans le sol. Le procédé VC est plus efficace dans les sols granulaires à drainage libre.
- Technique de compactage par coulis qui densifie les sols par injection d'un coulis de mortier à faible mobilité et à faible affaissement. La boule à coulis se dilate au fur et à mesure que le coulis supplémentaire est injecté, compactant ainsi les sols environnants par compression. Outre l'amélioration des sols environnants, la masse du sol est renforcée par la colonne de coulis qui en résulte, réduisant encore le tassement et augmentant la résistance au cisaillement. La méthode est utilisée pour réduire les tassements de fondation,

réduire l'affaissement sismique et le potentiel de liquéfaction, permettre la construction sur des remblais granulaires lâches, réduire les tassements dans les terrains à sols mous, et stabiliser les gouffres existants dans les régions karstiques

Pour compacter les sols en profondeur par l'addition des matériaux qui améliore les caractéristiques du sol, il s'agit d'augmenter la résistance du sol ou diminuer son plasticité en ajoutant des agrégats ou des fibres.



**Figure I.3** Techniques de compactage des sols a) compactage dynamique profond b) compactage par vibration c) compactage par injection de coulis.

#### I.4 Stabilisation par renforcement des sols

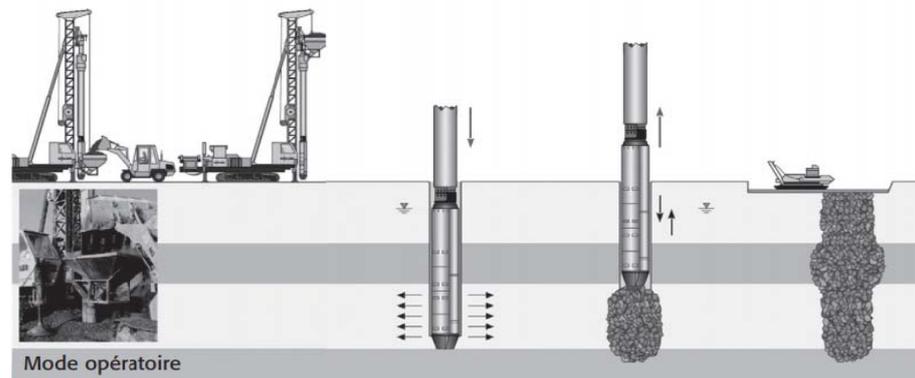
Le renforcement des sols est un domaine récent et particulier de l'amélioration des sols. Il recouvre des techniques qui consistent à placer des inclusions résistantes au sein du sol.

##### I.4.1 Colonnes ballastées

Cette technique est utilisée dans les sols mous; l'inclusion de renforcement est une colonne verticale en sable, gravier ou agrégats fortement compactés. En général, la mise en place de la colonne comporte deux phases principales:

1. Un tube ou un vibreur est enfoncé dans le sol jusqu'au niveau souhaité en refoulant le sol environnant;
2. Le système est ensuite remonté progressivement pendant que la cavité est comblée par un matériau granulaire fortement compacté statiquement ou par vibrations [4].

Le rôle principal de la colonne est d'augmenter la résistance et le module du sol de fondation, en outre la colonne agit comme un drain vertical. Cette inclusion est relativement souple et résiste principalement à la compression. Cependant, lorsque les colonnes ballastées sont utilisées pour améliorer la stabilité du sol de fondation vis-à-vis d'un glissement général, elles améliorent aussi, de façon significative, la résistance au cisaillement du sol.



**Figure I.4** Principe de la réalisation de la colonne ballastée par voie sèche. [12]

### I.4.2 La technique Pneusol

Les renforcements en pneumatique n'exigent avec le sol aucun critère granulométrique particulier, l'interaction du pneu et du sol ne reposant pas essentiellement sur le frottement comme pour les ouvrages renforcés avec les géotextiles ou pour la terre armée.

Le pneusol présente l'avantage de pouvoir améliorer les propriétés mécaniques du sol soit de manière anisotrope, c'est-à-dire uniquement dans des directions où le matériau est le plus sollicité (nappes, bandes linéaires...), soit de manière isotrope dans toutes les directions (chaîne continue d'éléments mélangée au sol de remblai).



**Figure I.5** Application des pneusol dans la stabilisation des talus. [14]

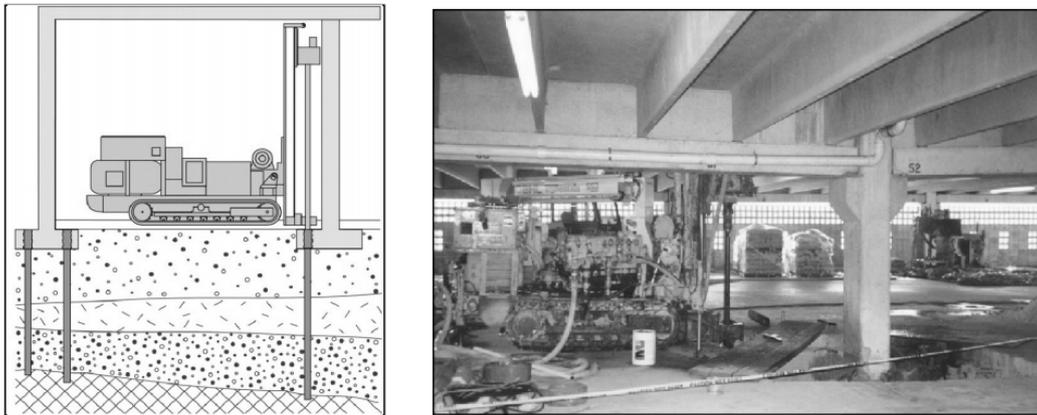
Le Pneusol est formé par l'association de pneus usagés (poids lourds ou tourisme) entiers, partiellement découpés (enlèvement d'un flanc), ou totalement découpés (deux flancs et une bande de roulement) et de sols pulvérulents, cohérents ou déchets. Les éléments de pneus, sont utilisés comme renforts du massif de sol. Les voies de valorisation du caoutchouc sont de plus en plus objets de projets diversifiés, de recherche et développement. Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux. Les principaux avantages confère le Pneusol aux ouvrages utilisant cette technique sont essentiellement :

- Une souplesse d'adaptation permettant de supporter des tassements différentiels important.
- Une meilleure répartition des efforts dans la masse du matériau et sur les fondations.
- Montage simple et économique (coût Pneusol=50% coût ouvrage traditionnel).
- Approvisionnement des constituants aisé : on trouve des pneus usagés partout dans le monde et se prête à une large gamme d'utilisation de remblais (seuls les matériaux argileux mous sont à proscrire).
- Mise en œuvre ne faisant pas appel à de gros moyens.

### I.4.3 Le renforcement par inclusion rigides

#### I.4.3.1 Les micro-pieux

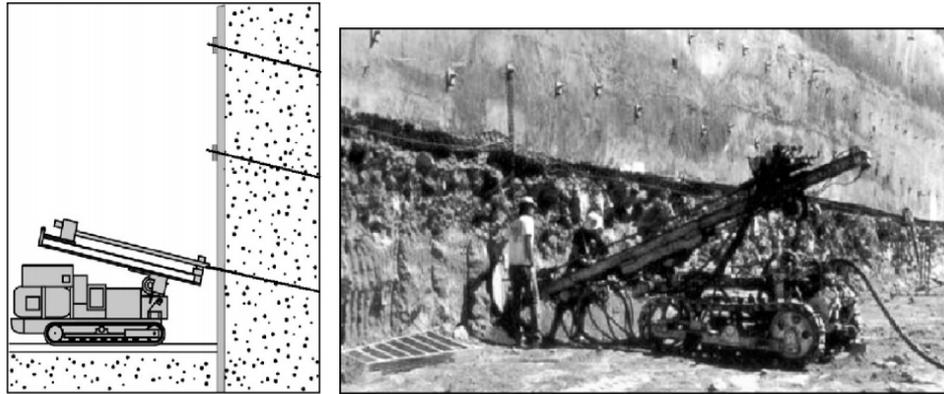
Cette technique consiste à mettre en place dans le sol de micro-pieux injectés. Chaque pieu est constitué d'une barre ou d'un tube de quelques centimètres de diamètre entouré de coulis sur toute sa longueur. Le diamètre total est d'environ 10 à 15 cm. Cette technique est utilisée depuis trente ans, principalement dans les sols de fondation, mais elle a aussi d'intéressantes applications pour la stabilisation des pentes, les ouvrages de soutènement et les reprises en sous-œuvre. Il s'agit d'inclusions plutôt rigides dans lesquelles les efforts mobilisés dépendent essentiellement de l'effet de structure du groupe de pieux. Les efforts principaux sont la traction et la compression [4].



*Figure I.6 Renforcement par des micro-pieux [12].*

#### I.4.3.2 Le clouage des sols

C'est une technique de renforcement des sols in situ en utilisant des barres passives, soit scellées dans des coulis de ciment, soit simplement battues dans le sol. Lorsque cette technique est utilisée pour des ouvrages de soutènement, les barres sont généralement horizontales et l'effort principal est la traction. Au contraire, quand cette technique est utilisée pour la stabilisation des pentes, les barres sont généralement verticales et les efforts principaux sont la flexion et le cisaillement [4].

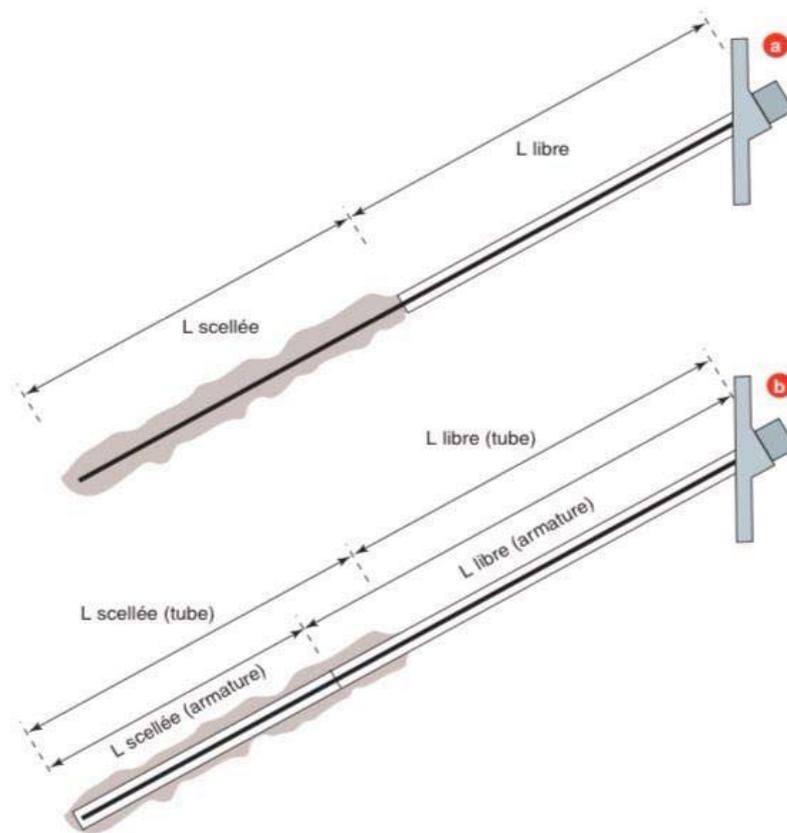


*Figure I.7 Le clouage des sols [12].*

### **I.4.3.3 Le renforcement par tirants d'ancrage**

Schématiquement, les tirants d'ancrage sont constitués d'une armature de précontrainte (barres, fils, torons, etc.) qui est introduite dans un forage et scellée au terrain dans sa partie inférieure, par injection d'un coulis de ciment ou d'un mortier, avant d'être mise en tension et bloquée par une tête d'ancrage contre la structure ou l'élément de structure à ancrer [12].

On distingue ainsi deux parties pour l'armature : la longueur libre proche du voile, qui prend naissance sous la tête d'ancrage, et la longueur de scellement, qui la prolonge jusqu'à son autre extrémité (Fig. 8a). C'est par sa longueur de scellement, généralement située dans des couches de sol profondes et résistantes, que l'armature transmet au terrain les efforts qui la sollicitent. Sur sa longueur libre, l'armature, non scellée au terrain, est protégée par une gaine ou par un tube, à l'intérieur duquel elle peut coulisser librement, sans transmettre d'effort au terrain environnant. Pour certains types de tirants, l'armature est scellée dans un tube qui est lui-même scellé au terrain, de telle sorte qu'armature et tube présentent chacun une longueur libre et une longueur de scellement qui ne se confondent pas nécessairement (Fig.8b) [9].



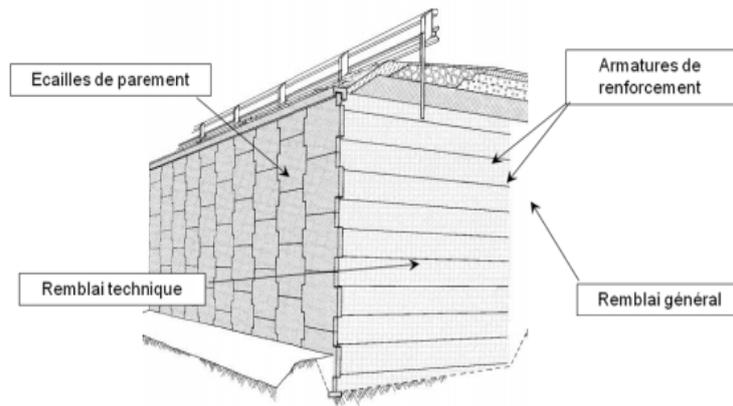
a. Armature directement scellée au terrain.

b. Armature scellée dans un tube à l'aide d'un coulis, le tube étant lui-même scellé au terrain.

**Figure I.8** Longueur libre et longueur scellée.

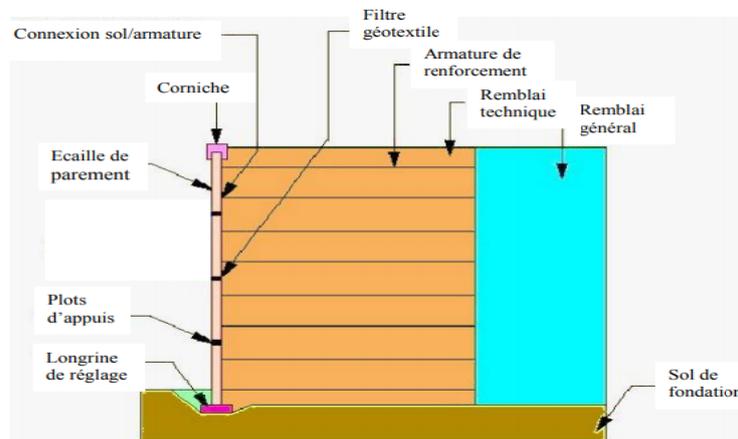
#### I.4.4 Le renforcement par la Terre Armée

La terre armée est une méthode de construction basée sur l'association des remblais compactés et d'armature (métallique et synthétique) lié à un parement (Fig. I.9). Ce procédé de construction a été développé à partir de 1960 par l'ingénieur et l'architecte Henri Vidal qui marque par cette invention une date très importante dans la conception des soutènements et plus généralement dans celle du renforcement des sols en faisant participer complètement le sol à la stabilité de l'ouvrage. L'alternance de couches de remblais pulvérulents et de bande d'armature bien repartie horizontalement conduit au développement des efforts d'interactions et donne naissance à un matériau composite à part entière apte à résister à son propre poids et aux actions qui lui sont appliquées au long de la durée de service de l'ouvrage. Les applications les plus courantes sont les murs de soutènement, les rampes d'accès à ouvrage d'art et les culées de ponts. [12]



**Figure I.9** Mur en terre armée.

Chacun des éléments d'une structure en terre armée (Fig. I.10) a une influence directe sur sa stabilité et ses performances.



**Figure I.10** Eléments d'un mur en terre armée [1].

#### I.4.5 Le renforcement Géosynthétique

Les géosynthétiques sont définis comme étant des produits synthétiques, utilisés en relation avec les sols et les roches dans les domaines suivants : géotechnique, génie civil (constructions lourdes et bâtiment), hydrogéologie, environnement [11]. Les géosynthétiques sont produits sous différentes formes à partir de matières synthétiques sur la base de divers polymères provenant de l'industrie chimique [6]. Les centaines de produits géosynthétiques existant actuellement sur le marché peuvent être classés en 6 groupes (Fig. I.11), d'après les matières premières utilisées, les modes de fabrication et les domaines d'utilisation [2]:

- Les géotextiles,
- Les géogrilles,
- Les géofilets,
- Les géomembranes,
- Les géocomposites,
- Les "géodivers" .



Figure I.11 Les types de géosynthétiques [8].

#### I.4.5.1 Le renforcement par géotextiles

Les géotextiles sont des textiles au sens propre du mot, constitués surtout de fibres synthétiques, plutôt que de fibres naturelles comme le coton ou la jute. Les fibres synthétiques sont transformées en un tissu flexible et poreux, par tissage, par tricotage et par liaison de voile ou de nappes de fibres [2].

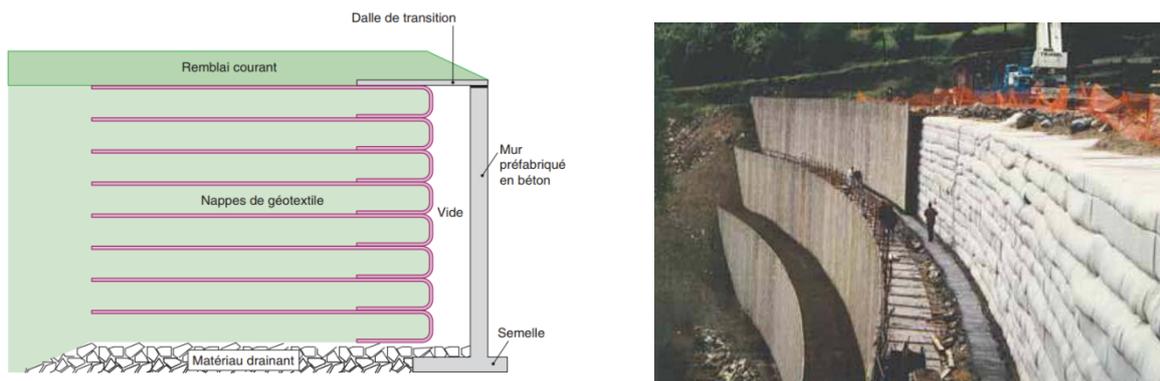


Figure I.12 Géotextiles de renforcement.(ouvrage de soutènement les murs en remblai renforcé par éléments géosynthétiques [9].

L'utilisation de la technique de renforcement des sols par géotextiles s'est développée pour une large variété d'applications dans les domaines hydraulique et mécanique. L'inclusion de géotextiles dans les sols permet, selon le domaine ou la fonction de l'ouvrage, d'améliorer les propriétés de ces sols.

La principale différence entre l'acier ou les plastiques rigides et les géotextiles réside dans leur déformabilité qui a une influence significative sur les déplacements latéraux des structures. Bien qu'il y ait eu quelques tentatives d'utilisation des géotextiles dans des ouvrages de soutènement à parement vertical, ceux-ci sont plutôt utilisés pour renforcer des pentes de talus et des sols de fondation. Les grillages métalliques ou en plastique rigide sont utilisés avec efficacité pour limiter les déformations latérales des remblais (Fig. I.12). [5]

#### I.4.5.2 Le renforcement par géogrilles

Une géogrille est une structure plane constituée par un réseau ouvert d'éléments résistant à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier. Elle est fabriquée à partir de bandes de polymères de haut module, selon le processus présenté sur la figure 1.13.

La bande de polymère est généralement portée à haute température et ensuite étirée. L'étirage peut être réalisé dans une seule direction (géogrille uniaxiale) ou dans deux directions (géogrille biaxiale). Au cours de l'étirage, une orientation des macromolécules se produit, ce qui entraîne une grande résistance à la traction dans le sens de l'étirage. Les géogrilles sont aussi fabriquées par soudure de lanières de polymères ou par liaison thermique de fibres extradées. [10]

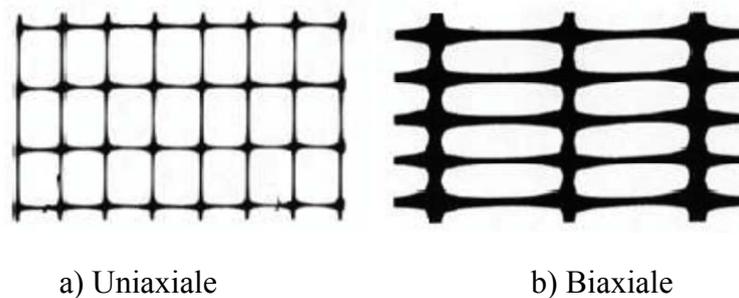


Figure I.13 Structures de géogrille.

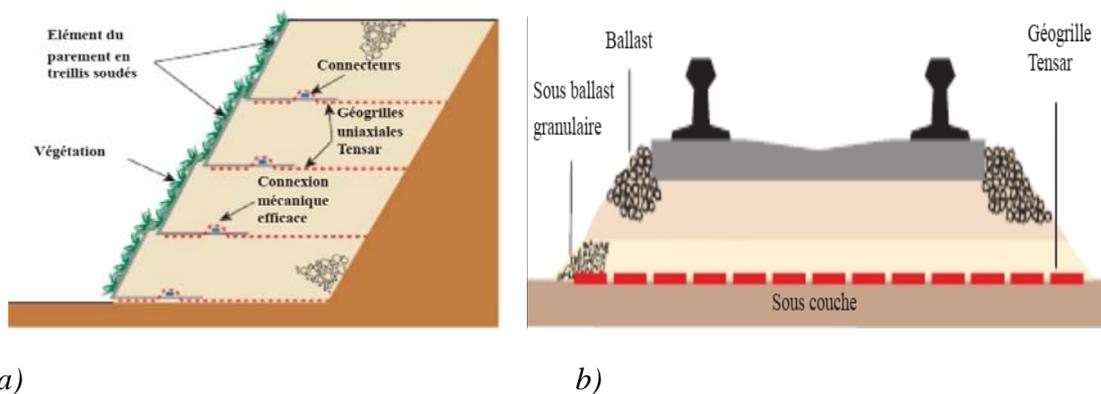
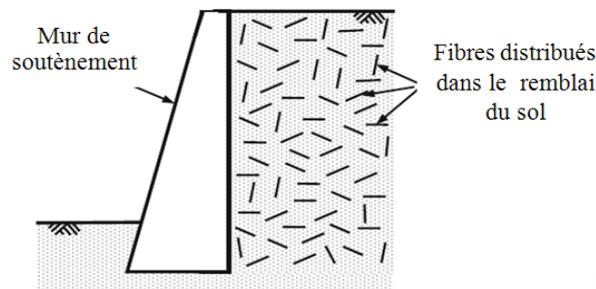


Figure I.14 Stabilisation par géogrille a) renforcement de talus par géogrille b) Stabilisation de la sous couche par géogrille. [10]

#### I.5 Le renforcement des sols par des fibres

Renforcer le sol avec des fibres souples et discrètes n'est pas une nouvelle technique utilisée en Gén civil / géotechnique. Cependant, comme les inclusions de fibres apportent plusieurs

avantages techniques, économiques et environnementaux, ces dernières années dans le monde entier, un intérêt a été apporté sur les applications potentielles des fibres dans les sols et autres matériaux similaires, tels que les cendres de charbon et les résidus miniers. Les fibres sont Généralement disponibles en grandes quantités sous forme naturelle et de déchets. Dans beaucoup de pays, les fibres de déchets (fibres de déchets plastiques, fibres de vieux pneus, etc.) créent des déchets et des problèmes environnementaux. L'utilisation de ces fibres dans les constructions peut résoudre les problèmes d'élimination d'une manière rentable et respectueuse de l'environnement .des études ont indiquées qu'un sol renforcé par des fibres présente une plus grande extensibilité et une moindre perte de post-pic force comparé au sol seul, le sol renforcé de fibres est plus ductile. La figure I.15 illustre un exemple de sol renforcé de manière aléatoire par des fibres. Le remblai renforcé de fibres aide également à réduire les pressions des terres latérales de manière significative, diminuant ainsi l'épaisseur de la paroi et ainsi les travaux de remblayage des sols renforcés [11].



**Figure I.15** Un mur de soutènement soutenant un remblai de sol renforcé aléatoirement par des fibres.

## I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté plusieurs types de stabilisation. Le choix du type de stabilisation dépend du type du sol et la nature du projet. La stabilisation des sols est une technique qui s'avère judicieuse à chaque fois que l'on doit modifier les caractéristiques des sols pour les préparer en vue d'un traitement ultérieur. C'est le procédé idéal pour obtenir des sols portants de qualité, et les préparer pour les chantiers de construction routière. Cela assure une bonne répartition des charges sur le support, et permet de faire des économies pour qu'elle soit une méthode rentable respectueuse des ressources.

## Références bibliographiques du premier chapitre

- [1] Abdelkader Abdelouhab, *Comportement des murs en terre armée. Modélisation physique, analytique et numérique des renforcements extensibles. Thèse de doctorat. Laboratoire de Génie Civil et de l'Ingénierie Environnementale (LGCIE) de l'INSA de Lyon.* (2010).
- [2] Amidou Sere, *Ouvrages renforcés par géotextiles chargés en tête : comportement et dimensionnement. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.*(1995).
- [3] B.R. Christopher, S.A. Gill, J.P. Giroud, J.K. Mitchell, F. Schlosser, and J. Dunncliff, *Reinforced Soil Structures - Volume I, Design and Construction Guidelines - Volume II, Summary of Research and Systems Information, 89-043* (1990).
- [4] *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I. U. S. Department of Transportation Publication No. FHWA-NHI-10-024 Federal Highway Administration FHWA GEC 011 – Volume I. November* (2009).
- [5] *Federal Highway Administration (FHWA), Performance Tests for Geosynthetic-Reinforced Soil Including Effects of Preloading, FHWA-RD-01-018, June* (2001).
- [6] Haeri, S.M., Nourzad, R., Oskrouch, A.M., *Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand. Geotextiles and Geomembranes* 18 (6), 385-402.(2000).
- [7] Holtz, R. D., *Geosynthetic For Soil Reinforcement, The Ninth Spencer J. Buchanan Lecture, College Station, University Drive.* (2001).
- [8] Jones, C.J.F.P. *Earth reinforcement and soil structures. 1st Publication. Butterworth and Compagny.* (1985).
- [9] McGown, A ,Pain., N., Dubois, D.D, Andrawes, K.Z.an.A..*The use of geogrid properties in design. Proc. Symp. On Polymer Grid Reinforcement in civil Engineering, London.* (1984).
- [10] R.R. Berg, *Guidelines for Design, Specification, and Contracting of Geosynthetic Mechanically Stabilized Earth Slopes on Firm Foundations, January* (1993).
- [11] Sanjay Kumar Shukla, *Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering, Developments in Geotechnical Engineering, Series editors. Braja M. Das, Henderson, USA, Nagaratnam Sivakugan, Townsville, Australia.* (2017)
- [12] Victor davidovici, Sierge Lambert, *Fondation et procédés d'amélioration des sols. Guide d'application, édition Afnor, Eyrolles, France .*(2013)
- [13] Vidal, H , Schlosser F., *La terre armee. Bultin de liaison du Laboratoire Central des Ponts et chaussees, Paris.* (1969).
- [14] [file:///C:/Users/2016/Downloads/Chap%20IV%20-%20Stabilisation%20Chimiques%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/2016/Downloads/Chap%20IV%20-%20Stabilisation%20Chimiques%20(1).pdf)
- [15] [https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user\\_upload/editions/lcpc/ERLPC/ERLPC-GT-LCPC-GT07.pdf](https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/ERLPC/ERLPC-GT-LCPC-GT07.pdf)
- [16] <http://www.univ-setif.dz/facultes/ft/externe/departements/gc/cours/cours-MDS2T-CGC-2016-chap3.pdf>
- [17] <http://doc.lerm.fr/traitement-sols-en-place-chaux/>

### Normes

**NF EN 197-1** (2012-04-01) *Indice de classement : P15-101-1 Titre : Ciment – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.*

**NF P15-108** (2000-12-01) *Indice de classement : P15-108 Titre : Liants hydrauliques – Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité*

# CHAPITRE II

## II.1 Introduction

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets (industriels ou ménagers) de produits arrivés en fin de vie, qui permet de réintroduire certains de leurs matériaux dans la production de nouveaux produits. Un déchet est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.

Les matériaux recyclables sont repérables grâce au célèbre ruban de Möbius, logo universel de ces matériaux depuis 1970 (Fig. II.1). Les matériaux recyclables comprennent certains métaux, plastiques et cartons, le verre, les gravats, .....Etc.



*Figure II.1* Logo universel des matériaux recyclables [39].

## II.2 Procédés du recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage: chimique, mécanique et organique. Le recyclage dit «chimique» utilise une réaction chimique pour traiter les déchets. Le recyclage dit «mécanique» est la transformation des déchets à l'aide d'une machine (concassage, broyage). Le recyclage dit «organique» consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

On distingue trois grands principes du recyclage qui sont :

1. *Réduire* : regroupe les actions au niveau de la production pour réduire les tonnages d'objets (par exemple les emballages) susceptibles de finir en déchet.
2. *Réutiliser* : regroupe les actions permettant de réemployer un produit usagé pour lui donner une deuxième vie, pour un usage identique ou différent.
3. *Recycler*: désigne l'ensemble des opérations de collecte et traitement des déchets permettant de réintroduire dans un cycle de fabrication les matériaux qui constituaient le déchet.

Il existe des matériaux inerte qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante". C'est-à-dire que les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

## II.3 Les principaux recyclât utilisés dans le domaine de Génie civil

Les domaines d'emploi des recyclât sont diversifiés dont la confection de nouveaux bétons de bâtiment, les travaux de routes, la fabrication de ciment, stabilisation des sols etc. Cette application se fait tout en respectant certaines normes. Pour confectionner de nouveaux composites.

## II.3.1 Les matériaux Inerte issus du BTP

### II.3.1.1 Le Béton

Le béton est un matériau composite c'est-à-dire qu'il est Multi-matériaux. En effet, il est formé par un mélange d'eau, de granulats (sable et gravier), de ciment et éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Il existe plusieurs types de béton utilisé dans le secteur du BTP, le béton armé, le béton fibré, et le béton préfabriqué.

Le béton peut-être recyclé ou valorisé en étant transformé en granulat de différentes tailles (gravillons, sable, etc.) (Fig. II.2). Les gravillons peuvent être utilisés comme matériaux de couches et de sous-couches des routes dans les travaux publics.

Une étude finlandaise a prouvé que l'utilisation de béton recyclé, d'une certaine qualité et composition, permettait de réduire l'épaisseur des couches et des sous-couches des routes en raison des bonnes propriétés de roulement que confère la matière. En effet, les granulats recyclés, composés de matériaux cimentèrent non liés, possèdent une meilleure résistance que les granulats naturels pour cette application.



*Figure II.2 Le broyage du béton [35].*

Les sables obtenus, mélangés à de la chaux, peuvent être réutilisés comme mortier. Cependant, l'utilisation de sables de bétons recyclés peut directement affecter le contenu du mortier et donc sa maniabilité, et peut provoquer un rétrécissement dû à l'absorption d'eau élevée.

### II.3.1.2 La brique

La brique est un matériau fait d'argile ou d'autres matière argileuse, avec ajout ou non de sable, combustible ou autre adjuvant, porté à une température suffisamment élevée pour former une liaison céramique. La brique est à la fois un isolant, un régulateur thermique et un matériau résistant.



**Figure II.3** Le déchet de la brique [40].

Le recyclage de briques provenant de chantiers de démolition est une réalité depuis plus de dix ans. Aujourd'hui, plus de 95% des déchets de démolition sont recyclés (Fig. II.3). Les briques sont transformées en granulats dans des installations de concassage; ces granulats sont alors mis en œuvre dans des travaux de fondations. Une autre application originale du recyclage de briques est la terre battue utilisée pour le revêtement des terrains de tennis.

A petite échelle, certaines entreprises de démolition récupèrent les briques en les nettoyant du mortier. Elles peuvent alors être réutilisées pour des travaux de restauration ou pour des nouvelles constructions auxquelles elles donnent un certain cachet. [40]

### II.3.1.3 La céramique

Les plus grands volumes de déchets de céramique proviennent des chantiers de démolition ou des travaux publics (Fig. II.4). Les céramiques présentes dans le BTP sont les terres cuites utilisées afin d'obtenir des briques, des tuiles de toiture, des conduits de fumée, des tuyaux de drainage, des revêtements de sol et mur.

Considérées comme inertes, les céramiques ne se décomposent pas, ne polluent pas les eaux de ruissellement et ne posent pas de problème pour la santé. Cependant, elles représentent des quantités importantes et nécessitent d'être traitées. Le recyclage de la céramique commence une fois triée et isolée des autres déchets.

Les céramiques sont d'abord concassées par des engins adaptés, le plus souvent installés directement sur les chantiers. Ensuite, on les passe au crible pour améliorer la pureté du produit fini. Un contrôle final permet de valider sa qualité et exclure tout risque de pollution.

On peut distinguer trois grandes manières de recycler les déchets de céramique :

- Le remblai : il représente la principale façon de réutiliser les céramiques. Il peut être réemployé directement in situ selon le type de chantier ou alors être vendu à des particuliers ou des professionnels pour renforcer et terrasser certains sols. Les granulats peuvent se révéler comme substitut pour le remplissage des tranchées de tuyau.
- Les routes : les granulats obtenus après broyage servent généralement au secteur du BTP pour le terrassement ou comme sous-couche pour la création de nouvelles routes.

- Le béton : si le granulat de céramique est d'excellente qualité et conforme à un cahier des charges précis (dureté, propreté, granulométrie...), il peut être utilisé dans la composition du béton.



*Figure II.4 Les déchets céramique [40].*

#### II.3.1.4 Les enrobés

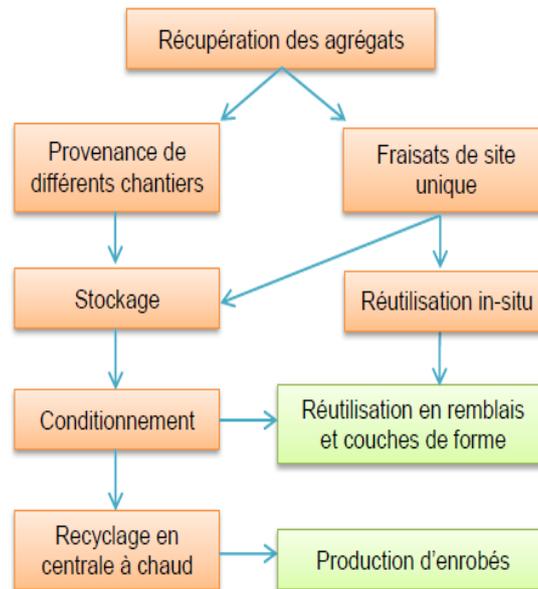
L'enrobé, aussi appelé asphalte, est un matériau composite. Il est composé de graviers de diamètre supérieur à 63  $\mu\text{m}$ , de fillers (sable et poussière de section inférieur à 63  $\mu\text{m}$ ) et d'un liant hydrocarbure (composé essentiellement de bitume) qui assure le lien entre les granulats). Il faut bien distinguer les enrobés à base de liant bitumineux (issue de pétrole) et des enrobés à base de liant de goudron (issue de la houille), car ceux à base de goudron n'entrent pas dans la catégorie des déchets inertes.

L'enrobé est utilisé pour la construction et l'entretien des infrastructures routières, plus précisément pour le revêtement autoroutier, routier, de voirie urbaine, portuaire, aéroportuaire, etc. Il existe plusieurs types d'enrobés: les bétons bitumineux, les enduits superficiels d'usure et les enrobés à liant végétal.

Les produits issus du recyclage sont essentiellement des granulats (Fig. II.5). Ils sont soit directement réintroduits dans des mélanges d'enrobés non traités, soit dans des mélanges d'enrobés traités à chaud ou à froid où ils subissent les mêmes traitements thermiques (Fig. II.6).

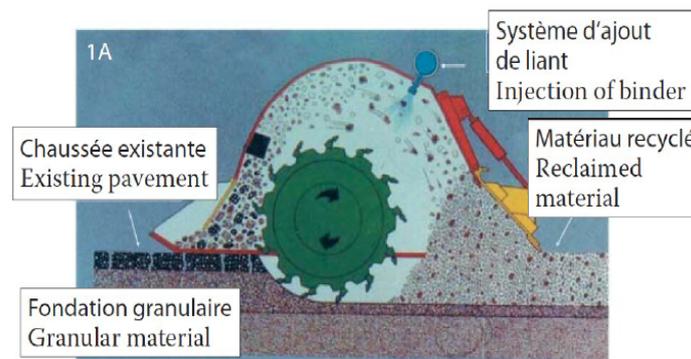


*Figure II.5 Déchets de revêtements routiers.*



**Figure II.6** Synoptique de production des agrégats d'enrobés [33].

La technique privilégiée permettant d'intervenir jusqu'à la fondation tout en y introduisant des granulats bitumineux est le retraitement en place qui consiste à fragmenter et récupérer l'enrobé bitumineux sur toute son épaisseur en le mélangeant à une partie de la fondation granulaire afin d'obtenir un nouveau matériau qui servira de nouvelle fondation (Fig. II.7).



**Figure II.7** Illustration d'un retraitement en place [4].

Les enrobés à froid sont réutilisés principalement pour la réhabilitation de chaussée. C'est-à-dire pour combler les trous et les nids-de-poule, réparer les fissures et les tranchées et réparer les dégâts dus au gel. Enfin, les enrobés à chaud sont utilisés dans les couches de roulement, l'entretien de chaussées, les constructions neuves (autoroutes, voies express, routes nationales, etc.).

Sur le plan environnemental, le recyclage des enrobés se traduit par:

- Une économie des ressources naturelles. Il y a une diminution de l'utilisation de nouveaux matériaux tels que les granulats et le bitume.
- Une diminution de la quantité de déchets.
- Que ce soit par procédé à froid ou à chaud, le recyclage des enrobés diminue la quantité de gaz à effet de serre émise.

- Une meilleure rentabilité énergétique. Lorsque le cycle de vie complet des enrobés est considéré, le recyclage à chaud a une meilleure rentabilité énergétique que la fabrication et la mise en œuvre à partir de matériaux neufs. [17]

### II.3.1.5 Les gravats

Les gravats représentent une part importante des déchets inertes, lors des démolitions ou des travaux de construction. Les gravats sont principalement constitués d'un mélange de béton, de pierres, de carrelage, de terre (non végétale) ou encore de matériaux bitumeux (sans goudron). La valorisation des gravats débute par la séparation d'éventuels métaux à l'aide d'électro-aimants et l'élimination de plastiques avec des souffleurs d'air.

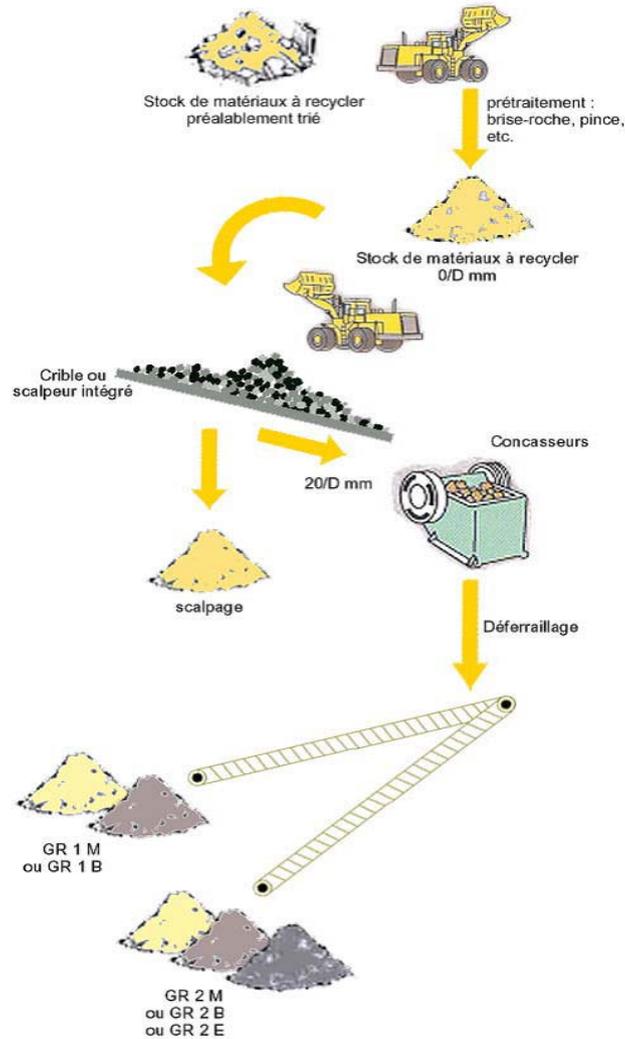
Les matériaux inertes, qui représentent le volume le plus important de ces gravats, sont ensuite isolés [41].

Les gravats inertes obtenus sont dirigés vers le centre de traitement. Concassés puis criblés, ils passent ensuite par une trémie de réception. Une grille retient les gravats jugés encore trop volumineux (Fig. II.8).

Selon les équipements et les techniques utilisées par les professionnels, les matériaux peuvent subir un dernier tri pour séparer encore mieux les composants (béton, pierre, brique...).

Une ultime étape permet d'affiner les granulats pour les adapter à leur future utilisation :

- Composition du béton.
- Remblai ou terrassement.
- Sous-couche routière.
- Gravier d'assainissement.



**Figure II.8** Synoptique de production des gravats [41].

### II.3.1.6 Le verre

Par définition, le verre est une substance solide, transparente et cassandre, obtenue par la fusion des sables siliceux avec du carbonate de sodium ou de potassium. Le verre est majoritairement présent sous forme de vitre dans le secteur du bâtiment [41]. La séparation du verre dans les chantiers de déconstruction et réhabilitation demande une main d'œuvre spécifique (Fig. II.9).



**Figure II.9** Le verre de construction [26].

Le verre a des vertus qui lui permettent d'être utilisé dans des applications autres que celles de la fabrication du même produit dont il est issu. En effet, il peut également entrer dans la composition de matériaux de construction et d'isolation, dans les peintures, ainsi que dans de nombreux autres domaines.

Le calcin est du verre récupéré après broyage qui peut être incorporé dans la fabrication du ciment de verre (Fig. II.10). Pour sa fabrication il suffit de mélanger 80 % de verre broyé très finement à 20 % d'additifs. La présence d'impuretés (infusibles, papier, plastique, métaux, etc.) n'est pas gênante tant que la proportion dans le verre n'excède pas 50 %.

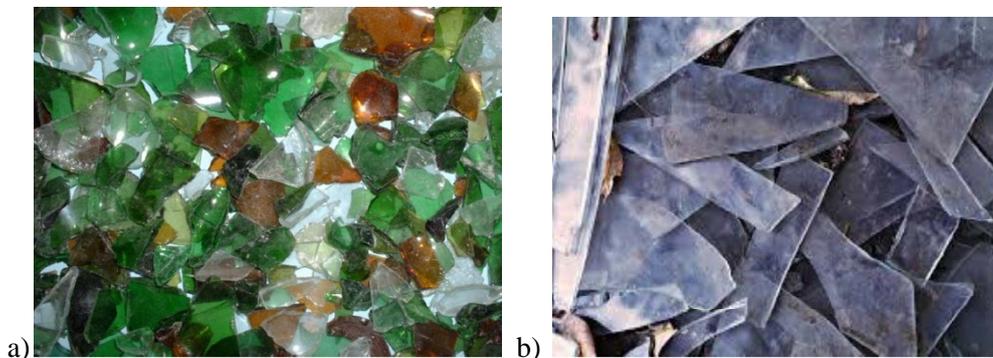
Actuellement, ce ciment est utilisé principalement dans :

- la stabilisation des sols.
- la rénovation d'allées du château de Versailles.
- les pistes cyclables, des boulo-dromes, des pistes équestres, des terrains de sport, des allées de jardin, etc.

De plus, de nombreux résidus verriers (fines de verre, refus de centre de tri, calcin ménager, etc.) peuvent être utilisés comme additifs en remblais routiers. Ils peuvent servir à la stabilisation des sols et améliorent les propriétés des sous couches routières [16].

Ils peuvent également être intégrés à des matrices béton destinées à la production de blocs de construction. Ces blocs de bétons présentent de meilleures qualités d'isolation phonique et thermique comparé à un même bloc dépourvu de calcin.

Cependant, le calcin broyé utilisé comme substitut du sable dans différentes applications de génie civil rencontre un certain nombre de difficultés. En effet bien que les propriétés de lixiviation dans le sol et la capacité drainante constituent les éléments favorables, les propriétés de résistance et de compaction sont généralement insuffisantes. Une seconde difficulté réside dans la réaction alcalisilice conduisant au gonflement et la fissuration du béton.



**Figure II.10** Verre récupéré a) calcin b) vitre [16].

Les résidus de verre sont également utilisés pour fabriquer de la laine de verre ainsi que des carreaux décoratifs de piscine, que l'on peut aussi incorporer dans les éléments de construction.

La poudre de verre peut encore trouver un usage comme charge pour les matières plastiques, comme ajout dans certaines peintures (peintures réfléchissantes pour les routes), dans des tuiles ou des briques (pour obtenir un aspect de surface spécifique).

### II.3.2 Déchets usuels

Les déchets usuels sont produits par les ménages et les industries. Ils forment la part la plus large des déchets recyclables. Ils sont souvent simples à collecter et à transformer. Ils sont peu dangereux. En revanche, ils représentent des volumes importants à transporter et à stocker.

#### II.3.2.1 L'acier

Le secteur de la construction au sens large, emploie un acier standardisé et normalisé pour la réalisation d'ouvrages architecturaux et d'ouvrages d'art. Il est un élément essentiel qui sert pour former le squelette des bâtiments, armer le béton, renforcer les fondations. Il est utilisé pour la tuyauterie, il habille les façades et les toitures. La popularité de l'acier dans la construction résulte de sa polyvalence, sa résistance, sa durabilité, son potentiel esthétique, sa capacité à bien se travailler avec d'autres matériaux et l'application de techniques industrielles dans la construction.

Aucune des propriétés d'origine de l'acier ne disparaît au cours des opérations de recyclage, en particulier ses qualités mécaniques (Fig. II.11). N'importe quel type d'ouvrage peut indifféremment être fabriqué à partir d'acier recyclé ou d'acier provenant de minerai de fer, quelles qu'en soient les caractéristiques. [42]



*Figure II.11* Recyclage de l'acier.

L'acier est le matériau le plus recyclé au monde. Lorsque l'acier a rempli son rôle après quelques décennies, il devient un déchet et donc une matière première de haute qualité qui peut être recyclée complètement et indéfiniment sans aucune perte de qualité et peut être complètement réinjecté dans le cycle économique. Ses vertus magnétiques permettent sa séparation et sa récupération parmi les déchets [43].



Figure II.12 Le cycle de l'acier [44].

### II.3.2.2 Le caoutchouc

Le terme «caoutchouc» vient du mot indien caoutchouc (bois qui pleure) et rappelle ainsi l'origine du caoutchouc naturel. Le caoutchouc à l'état naturel, se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex secrétée par les plantes à caoutchouc. Les caoutchoucs, appelés aussi de manière plus scientifique les élastomères, appartiennent à la famille des polymères. Dans le langage courant, le terme caoutchouc recouvre à la fois le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques. [14]

Les déchets du caoutchouc ont quatre origines principales :

- déchets de caoutchouc industriel (8%).
- déchets de fabrication de pneumatiques (3,5%).
- pneumatiques usagés (86,5%).
- déchets du recyclage : poudrettes, copeaux (2%).

#### ✚ Les Pneus

Constamment renouvelés, les gisements de pneus usagés constituent un problème majeur dans le cadre de l'assainissement des dépôts sauvages.

Le caoutchouc représente environ 48% du poids des pneus. En plus du latex, matière de base du caoutchouc naturel, les caoutchoucs synthétiques, dérivés de pétrole, ont permis d'améliorer les caractéristiques des pneumatiques.

Les pneumatiques sont également renforcés d'armatures métalliques (15% de poids) afin d'augmenter le niveau de leur performance, mais aussi de fibres textiles (5% de poids) afin d'alléger leur poids tout en conservant leurs propriétés d'endurance. [1]

Les voies de valorisation des pneus usagés sont de plus en plus objets de projets diversifiés, de recherche et développement. A titre d'exemples non exhaustifs on peut citer les axes suivants :

#### ◆ Réhabilitation de carrière

L'utilisation des pneus en comblement de carrière. La méthode de comblement qui fait l'objet d'un agrément pour les carrières en fin d'exploitation, consiste à alterner des couches de terre et des couches de pneus usagés de grande taille comme illustré à la Figure II.13.



**Figure II.13** Réhabilitation de carrière par l'utilisation de pneus usagés- Pyrénées Atlantiques 2008.

♦ **Les ouvrages de soutènement « Le Pneusol »** : c'est une technique qui consiste à utiliser des pneus usagés entiers, dans des applications géotechniques. dans différents domaines du génie civil (remblais légers, murs de soutènement, protection de pentes et de berges, etc.). Le Pneusol est formé par l'association de pneus usagés non rechapables (poids lourds) entiers, partiellement découpés (enlèvement d'un flanc), ou totalement découpés (deux flancs et une bande de roulement) et de sols pulvérulents, cohérents ou déchets. Les éléments de pneus, sont utilisés comme renforts du massif de sol (Fig. II.14) [7]



**Figure II.14** La technique de Pneusol.

Les voies de valorisation des pneus usagés sont de plus en plus objets de projets diversifiés, de recherche et développement. Dans ce but, le déchiquetage en copeaux de pneus (chips) et broyage en poudrettes ou en granulés de caoutchouc est nécessaire. A titre d'exemples non exhaustifs on peut citer les axes suivants :

✚ **Les copeaux de pneus (Chips)** : Les résultats de divers tests effectués sur de sols renforcés de copeaux de pneus ont montré une augmentation de la résistance au cisaillement du au déplacement et cela en fonction du contenu et de la taille du déchiquetage (Fig. II.15). Il a été constaté également une augmentation de la capacité portante du sol renforcé avec des copeaux de pneu. [28]

L'analyse numérique des murs de soutènement remblayés avec des copeaux de pneus et du sable réalisés par Huggins et Ravichandran et Huggins a montré que les moments de flexion, les forces de cisaillement et les déplacements des murs remblayés avec les copeaux de pneus ont été considérablement réduits par rapport à ceux des murs remblayés avec du sable. [27]



*Figure II.15 Chips de pneus [13].*

✚ **La poudrette** : Particules de caoutchouc déferrées et défibrées issues de l'opération de broyage et de granulation des pneumatiques (Fig. II.16). Leur taille varie entre 10 microns et 1mm sont utilisés dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes anti-fissures à usage routier ou de membranes anti-vibrations destinées aux plates-formes ferroviaires, de roulettes.

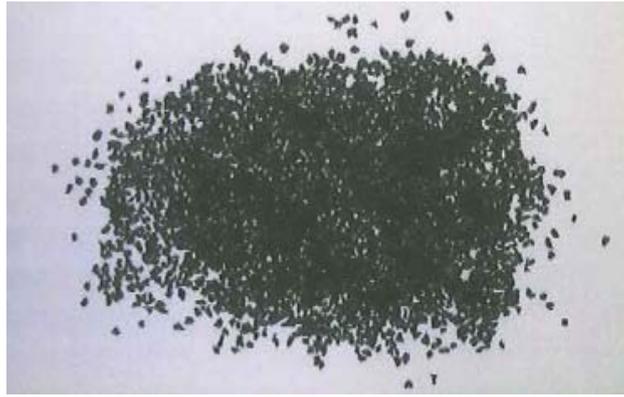
L'addition du caoutchouc granulaire aux liants bitumineux ou même dans les structures des chaussées, a des avantages appréciables :

- Plus grande durabilité
- Résilience de la surface
- Entretien réduit
- Plus grande résistance à la déformation et à la fissuration
- Plus grande résistance à la fissuration a basses températures
- Plus grande viscosité et rigidité.
- Contribue à la réduction des bruits de roulement.



*Figure II.16 Poudrettes de caoutchouc [34].*

✚ **Les granulés de caoutchouc** : sont d'une taille supérieure à celle des poudrettes (Fig. II.17). Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques. Comme exemple d'utilisation, on a les aires de jeux, les pavés antidérapants, les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores...).



**Figure II.17** Granulés de caoutchouc [34].

L'incorporation de granulats en caoutchouc dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macrofissure (Fig. II.18). Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait malgré une amplitude plus élevée de ses variations dimensionnelles de retrait.

Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité.



**Figure II.18** Béton à base de granulats de caoutchouc [24].

Les déchets de caoutchouc sont utilisés avec succès dans plusieurs applications du Génie Civil, dans le béton et le mortier sous forme de granulats, en géotechnique pour les remblais légers et également dans les mélanges d'asphaltes.

Les études rapportées dans la littérature ont montré que le recyclage des caoutchoucs dans le domaine de Génie Civil, permet non seulement de réduire le coût, mais également d'améliorer certaines caractéristiques physico-mécaniques du béton et du sol en bénéficiant de leur déformabilité, étanchéité et de leur capacité d'absorption de chocs. [20]

### **II.3.2.3 Le papier et carton**

Le papier, défini comme une "matière à base de cellulose, faite de fibres végétales naturelles ou transformées, réduites en une pâte homogène que l'on étend et sèche pour former une feuille mince, est utilisé depuis longtemps dans le génie civil, et est souvent associé au bois (Fig. II.19).

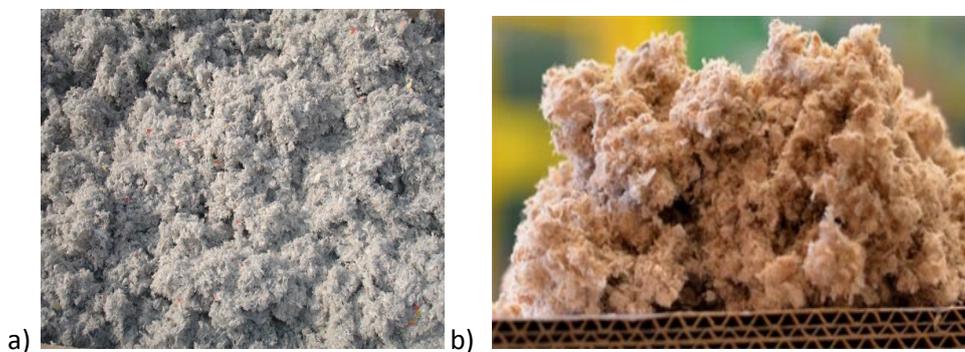


**Figure II.19** Le recyclage du papier.

La ouate de cellulose est fabriquée à partir de papiers recyclés : journaux, magazines, chutes et gâches industrielles. Préalablement décompacté et trié, le papier est aéré mécaniquement, passe dans un premier broyeur puis sous un aimant afin d'éliminer les éventuels résidus métalliques. La ouate résultante est ensuite filtrée, dépoussiérée puis compactée sous vide et/ou ensachée.

La ouate de cellulose est un matériau aéré et léger, peu conducteur de chaleur et peu énergivore pour sa production. C'est l'un des meilleurs isolants actuellement présents sur le marché, en termes de rapport qualité-prix.

Les papiers et cartons recyclés pourraient servir d'isolants au même titre que la ouate de cellulose (Fig. II.20). D'autant, qu'en ces temps de transition énergétique, les consommateurs s'intéressent de plus en plus aux solutions écologiques susceptibles de réduire leur empreinte carbone.



**Figure II.20** Ouate de cellulose a) Papier b) Carton [45].

L'isolation est garantie sous forme de panneaux compactés semi-rigides de 45 à 140 mm, la ouate de cellulose du papier est essentiellement utilisée dans les murs, rampants et planchers pour les combles (Fig. II.21).



**Figure II.21** *Panneau compacté de ouate de cellulose papier [46].*

La Wikkelhuse est construite à partir de modules de carton assemblés les uns aux autres. Les murs de chaque module sont composés de 24 rames de carton recyclé liées entre elles par une colle écologique, le tout recouvert d'un enduit imperméable et de lambris (Fig. II.22).



**Figure II.22** *Maison construite avec des plaques de carton ondulé [45].*

La confection des blocs d'adobe à base de sol-ciment renforcé de fibres de cellulose issues du recyclage du papier Kraft (Fig. II.23).



**Figure II.23** *L'opération de moulage [6].*

### II.3.2.4 Les plastiques

Les plastiques ou polymères forment une famille de matières provenant du raffinage du pétrole. On distingue trois grandes familles de produits: les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

*Les thermoplastiques* (Tableau II.1) sont des plastiques malléables qui peuvent être chauffés et refroidis pour leur donner une forme, puis chauffés à nouveau pour obtenir une autre forme. Cette caractéristique les rend aptes à être recyclés.

*Les thermodurcissables* caractérisent les plastiques qui se rigidifient dès la première transformation; ils ne supportent pas d'autres transformations et sont très difficiles à recycler (ex. polyuréthanes, silicones).

*Les élastomères* caractérisent les plastiques qui se déforment et sont recyclables (caoutchouc).

**Tableau II.1** Principaux thermoplastiques [26].

Types	Propriétés	Applications
PE (polyéthylène)	Transparence, souplesse	Films, sacs, bouteilles
PEHD (polyéthylène à haute densité)	Opacité, rigidité	Bidons, conteneurs, poubelles, seaux, jouets, bouteilles de lait
PVC (polychlorure de vinyle)	Transparence, rigidité	Mobilier (bancs, ...), fenêtres, barrières, jouets, revêtements de sol
PET (polyéthylène téréphtalique)	Transparence, tenue à la pression interne	Bouteilles de boissons gazeuses, lainages, rembourrages
PP (polypropylène)	Rigidité, résistance aux chocs	Boîtes, bacs, conteneurs, pare-chocs, tubes
PS (polystyrène)	Multiples	Bouteilles, pots de yaourt, emballages
PA (polyamide)	Multiples	Tissus

Depuis ces vingt dernières années, les déchets en matières plastiques représentent une part importante des déchets solides municipaux. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie et parce que ce sont des déchets voyants (Fig. II.24). Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. [31]



**Figure II.24** Types de plastiques [47].

Les premiers procédés mis en place pour les traiter furent l'enfouissement et l'incinération. Toutefois, la croissance exponentielle de déchets d'emballages plastiques amène à prévoir d'autres filières de recyclage. [8]

Les matériaux de construction peuvent représenter un débouché intéressant. En effet, des études ont montré qu'il était possible d'utiliser les déchets plastiques dans les bétons et mortiers. [37]

Notamment le polyéthylène téréphtalate (PET) recyclé, issu des emballages a été utilisé comme liant pour la production d'un matériau composite à hautes performances : *le béton de polymère*. Le plastique est transformé en présence de glycols, en résine polyester insaturée qui est ensuite mélangée avec du sable et des gravillons [9]. Le béton de polymère obtenu est très résistant en compression et en flexion par rapport au béton de ciment Portland conventionnel. [33]

Des déchets de bouteilles plastiques (PET-polyéthylène téréphtalate) et des citernes (PEBD - polyéthylène bas densité) est employé dans le béton sans autre transformation que le broyage, afin de minimiser le coût du matériau final (Fig. II.25).



*Figure II.25 Paillette de bouteille en plastique [14].*

Compte tenu de la variabilité de type de plastique existant, on se contentera d'utiliser ce produit sous forme de grains de dimension assez proche à celle des grains de sable et graviers.

- ✚ **Béton et mortier** : L'utilisation des matériaux plastiques dans le mortier et le béton a fait l'objet de nombreuses recherches. Dans le passé, les plastiques étaient principalement utilisés dans le béton sous deux formes: (1) les granulats plastiques, qui remplaçaient les granulats naturels et (2) les fibres plastiques, utilisés dans le béton fibré.
- ✚ **Confection de pavé à base de sachet de plastique**: Un autre procédé de valorisation du plastique nommé CERVALD est la confection de pavé de sol ou de voiries [11]. Le principe de fabrication est simple. Il s'apparente à celui d'un béton de sable (mélange de sable et de ciment). Du plastique en fusion sert de liant à la place du ciment. Il est mélangé avec du sable de granulométrie choisie, dans des proportions précises, selon l'utilisation recherchée pour le produit fini (pavé piétonnier ou pavé de voirie) (Fig. II.26).



**Figure II.26** Les phases de la confection des Pavés de sol [11].

✚ **Le renforcement du sol :** Les déchets plastiques broyés sous forme de paillettes sont additionnées au sol améliore légèrement les caractéristiques à l'optimum des mélanges. Ces mélanges présentent une meilleure aptitude au compactage développant les densités sèches. Cette amélioration en densité, peut être due au renforcement de la structure globale du matériau naturel par les grains de plastique. Au cours du compactage les grains de plastique épousent facilement la forme des vides existants entre les granulats naturels et diminuent de ce fait leur proportion dans le sol, ce qui fait augmenter par conséquent sa densité et donc peut être utilisé comme matériaux très intéressants pour les corps de chaussées, particulièrement en couches de forme. [3]

Selon l'étude effectuée par John G. Luwalaga [15], le renforcement du sol avec 22.5% de paillettes de déchets en plastique PET peut améliorer sa capacité portante, ce qui se traduit par la réduction la largeur de la fondation d'environ 3%. Cela réduit le coût du projet par rapport au sable non renforcé.

✚ **Béton bitumineux:** L'emploi des déchets des plastiques récupérer comme un polymère pour améliorer les performances de la chaussée dans les mélanges bitumineux à chaud, est une approche pour protéger l'environnement et fournir des routes à faible coût. L'ajout de polymères au liant contribue à augmenter la cohésion de la liaison inter faciale entre l'agrégat et le liant qui peut améliorer de nombreuses propriétés des revêtements en béton bitumineux.

✚ **Renfort en plastique recyclé :** Les éléments en plastique recyclé (RPP) stabilisent les pentes avec des procédures comparables à celles du clouage des sols et des pieux conventionnels (Fig. II.27).

Les RPP sont des membres composites légers en plastique, et autres déchets qui peuvent être produits en différentes tailles et sont facilement personnalisables avec des équipements de construction conventionnels.



**Figure II.27** Renforcement des talus par des épingles en plastique recyclé [18].

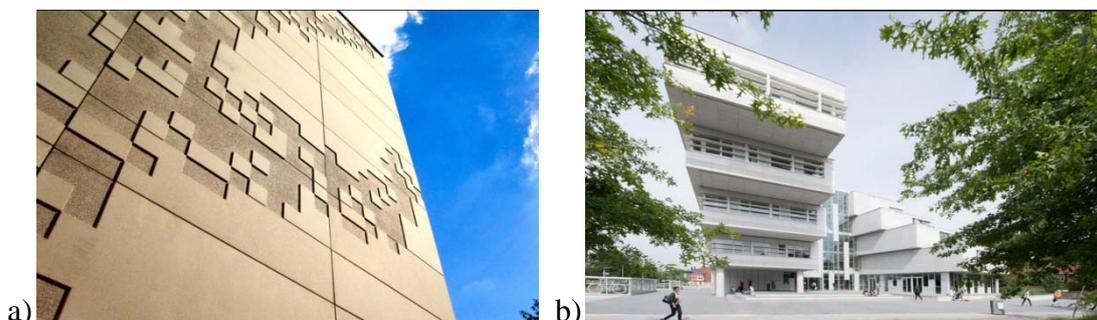
### II.3.2.5 Le textile

Derrière le bois, le verre, le béton et l'acier, le textile est désormais à la 5ème place des matériaux utilisés pour la construction (Fig. II.28). Présents depuis toujours dans l'habitat et plus récemment dans les ouvrages d'art, les textiles s'introduisent dans le bâtiment et la construction comme des matériaux techniques ; seuls ou en composites, ils peuvent rivaliser avec les matériaux traditionnels (bois, béton, acier) par leurs performances, leur légèreté et leur durabilité.



**Figure II.28** Déchets de textile [48].

Réaliser des façades en béton architectural à des conditions de rentabilité acceptables et des façades rideaux ventilées en éléments de béton renforcé de textile sont particulièrement bien adaptées à la rénovation énergétique de façades de bâtiments anciens (Fig. II.29), voire de bâtiments protégés comme monuments historiques et conviennent aussi à de nouvelles constructions.



a) Façades architectural b) façade suspendue

**Figure II.29** Béton renforcé en textile utilisé comme façades de bâtiments [49].

Les couches de renforcement en béton armé en textile sont minces, résistantes à la corrosion, durables et au prix modéré. On peut atteindre des augmentations en capacité portante de plus que 80 % tout en améliorant sensiblement la ductilité.

Grâce à l'absence de corrosion et à une situation de mise en œuvre ciblée, le béton renforcé en textile peut être utilisé d'une façon beaucoup rentable que le béton armé. Cette rentabilité se manifeste en particulier par des économies de poids et de ressources. L'épaisseur d'enrobage d'usage de 30 à 50mm cesse d'être nécessaire. C'est pourquoi l'épaisseur des éléments peut être réduite à seulement 20 à 40 mm même si les dimensions des éléments préfabriqués vont jusqu'à 2400 x 1200 mm.

Dans le domaine de l'habitat, le textile confectionné sous forme de briques peut intervenir à différents niveaux de fonctions techniques : il peut jouer un rôle mécanique, notamment en renforcement de matériaux, un rôle thermique, acoustique ou d'étanchéité, un rôle de protection contre le rayonnement solaire ou électromagnétique, contre le feu (Fig. II.30).



*Figure II.30 Briques en textile recyclés.*

### II.3.2.6 Sciure de bois

La sciure de bois désigne l'ensemble des petites particules et fins copeaux issus du sciage de bois (Fig. II.31). La sciure est aussi utilisée comme source de biomasse énergie, par exemple sous forme de bûchette reconstituée ou de charbon de bois reconstitué.



*Figure II.31 Copeaux de bois après broyage [26].*

Le béton à base de sciure de bois est très peu utilisé à cause de sa faible résistance. Le béton contenant beaucoup de sciure de bois est inflammable. La sciure provenant du chêne rouge, du sapin de Douglas, du bouleau ou du cèdre rouge donne des bétons à faible résistance alors que la sciure d'épinette ou de pin rouge donne des bétons dont les propriétés sont acceptables.

Valorisation des déchets de copeaux de bois dans le plâtre a pour but de profiter de certaines de leurs caractéristiques physico-thermiques (allègement, isolation thermique).

La combinaison du béton et des fibres de bois qui proviennent des déchets de l'industrie de bois permet d'obtenir un béton bois léger (BBL) par la substitution des pourcentage qui varie entre 10% et 20% des classes de granulats (0/3, 3/8 et 8/15) par les déchets de bois non traité qui donnent un béton bois léger.[23]

Les déchets de bois ont augmenté les propriétés isolantes du béton en diminuant la vitesse de propagation des impulsions, due à la structure cellulaire du déchet de bois, qui emprisonne de l'air sous forme de petits volumes et l'air représente un isolant pour le son.

## II.4 Déchets divers

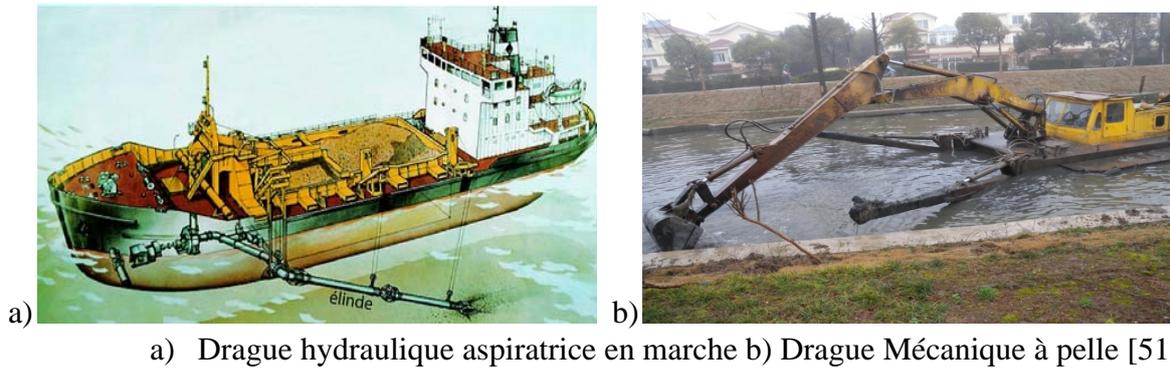
### II.4.1 Les sédiments de dragage

Un sédiment est un ensemble de particules en suspension dans l'eau, l'atmosphère ou la glace et qui finit par se déposer par gravité, souvent en couches ou strates successives. L'accumulation de particules sédimentaires au fond et sur les bords de cours d'eaux et de voies de navigation ainsi que dans les ports maritimes conduit à les encombrer et les obstruer. Pour les cours d'eau navigables (Fig. II.32), cela ralentit l'écoulement et empêche les activités de transport qui s'y pratiquent. Pour les cours d'eau non navigables, cette accumulation augmente le risque de crues. Afin de maintenir et de restituer ces accès, il est nécessaire de draguer ou de curer régulièrement. [52]



*Figure II.32 Dragage des sédiments [50].*

Les travaux de dragage sont réalisés par des navires et engins spécialisés dont les caractéristiques dépendent de la nature des travaux et de l'environnement dans lequel ils doivent être effectués : drags hydrauliques ou dragues mécaniques, navires capables de manœuvrer ou simples pontons (Fig. II.33).



**Figure II.33** Type de Dragues.

Les sédiments excavés sont faiblement à fortement mêlés avec de l'eau, et sont, principalement, gérés à l'état de boue. La forte teneur en eau initiale des sédiments, allant généralement de 150 à 200%, pose un sérieux problème dans le processus de valorisation. Il est, alors, important d'exploiter la phase de stockage pour diminuer la teneur en eau, et de l'associer, éventuellement, à des traitements spécifiques [6].

La valorisation des sédiments prend une place importante et fait l'objet de plusieurs études et recherches, dans un souci de recherche de nouveaux matériaux pour préserver les ressources naturelles. Les sédiments peuvent être utilisés dans :

- l'élaboration de sable à partir des sédiments pas ou peu pollués et ayant une granulométrie à dominance sableuse.
- la fabrication des briques à partir des sédiments présentant une importante fraction argileuse, après un éventuel traitement selon le degré de contamination.
- La fabrication des matériaux de construction (ciment), ou les sédiments de curage peuvent être utilisés en substitution d'une partie d'argile qui rentre dans sa fabrication.
- La valorisation de la majorité de ses sédiments dragués dans le réaménagement de carrières
- Réalisation des matelas en gabions et des poutres de couronnement en béton sédimenté pour le maintien des berges.
- Stabiliser les plages et littoraux dans une logique d'économie circulaire locale.
- La valorisation des sédiments de dragage en tant que substitut au sable ou au filler pour la fabrication d'asphalte d'étanchéité des ouvrages d'arts et des trottoirs ou de mastics destinés aux enrochements [33].

#### II.4.2 Les laitiers sidérurgiques

Les laitiers sidérurgiques sont des matières minérales artificielles, qui sont produites à raison de plusieurs millions de tonnes par l'industrie du fer et de l'acier. Ces matériaux sont générés en même temps que la fonte sidérurgique (pour les laitiers de haut-fourneau) ou que l'acier (laitiers d'aciérie), sous forme liquide à une température proche de 1500°C: ce sont des « co-produits » de la sidérurgie. Si leur génération est nécessaire à la production des aciers, ils ne sont pas destinés à l'abandon : au contraire, ils sont transformés, le plus souvent directement sur le site sidérurgique, en divers produits finis qui sont utilisés pour la plupart dans l'industrie du bâtiment ou en travaux publics.

#### II.4.2.1 Laitier de haut-fourneau cristallisé

Le laitier de haut-fourneau sort du haut-fourneau sous forme liquide à 1 500°C. Lorsqu'il est refroidi lentement, à l'air libre, on obtient du laitier de haut fourneau cristallisé (Fig. II.34). Ses usages sont généralement les mêmes que ceux des roches naturelles de mêmes caractéristiques physico-chimiques : granulats pour bétons, pour enrobés bitumineux, pour graves traitées au liant hydraulique, ballast, etc.. De plus, ce matériau présente à la fois une résistance mécanique élevée et une conductivité thermique faible [53].



*Figure II.34 Laitier de Haut-Fourneau Cristallisé [53].*

#### II.4.2.2 Laitier de haut-fourneau vitrifié (granulé ou bouleté)

Le laitier peut, alternativement, subir un refroidissement rapide (une « trempe ») à l'eau sous pression, dans un granulateur. On obtient alors du laitier de haut fourneau vitrifié, également nommé « granulé » (Fig. II.35).

Le laitier vitrifié est largement utilisé dans l'industrie du verre comme source d'alumine et de silice. Néanmoins, c'est surtout ses caractéristiques hydrauliques qui sont recherchées et qui permettent sa valorisation. Ainsi, on le retrouve dans :

- La fabrication de béton, en tant qu'addition sous forme moulue, en remplacement partiel du ciment,
- La fabrication de graves hydrauliques pour les routes,
- La production de ciment, en remplacement du clinker, dans les catégories CEM II et CEM III (jusqu'à 95%) destinées, en particulier, à la réalisation de bétons en milieux agressifs. Typiquement, en milieu alcalin ou maritime, la présence de laitier dans le béton favorise la résistance à l'alcali-réaction et protège les armatures. En outre, au plan environnemental, le remplacement du clinker par du laitier vitrifié réduit les émissions de gaz à effet de serre.
- La production de liant hydraulique routier.



*Figure II.35 Laitier de Haut-Fourneau Vitrifié (granulé ou bouleté).*

### II.4.2.3 Laitier d'aciérie de conversion (LAC en français, BOF slag en anglais)

Une fois l'acier écoulé en partie basse du convertisseur, le laitier d'aciérie de conversion liquide, qui surnage sur le dessus, est déversé dans un cuvier. Après un refroidissement lent et progressif à l'air puis à l'eau, on obtient une roche artificielle qui peut être concassée et criblée pour produire des granulats 5 (Fig. II.36).

En travaux publics, le laitier d'aciérie de conversion est utilisé principalement pour les travaux de terrassement (remblais, merlons de protection phonique, ...), pour la fabrication de graves non traitées pour la réalisation de couches de forme, ou comme matériau de confortement d'ouvrages hydrauliques (protection de digues, rives, etc.) où sa densité élevée permet de résister au phénomène d'affouillement.

Ce laitier est aussi utilisé depuis de nombreuses années dans le domaine agricole comme fertilisant mixte, et plus récemment, comme constituant principal de liant hydraulique routier.



*Figure II.36 Laitier d'Acierie de Conversion (LAC en français, BOF slag en anglais).*

### II.4.3 Les scories

Les scories de zinc ou de plomb sont produites lors de l'élaboration du métal de première ou de seconde fusion. Ces poussières contiennent des teneurs importantes en zinc, peuvent également contenir du fer, du nickel et du chrome (Fig. II.37).

La construction routière est également utilisatrice de scories résultant de l'affinage de la fonte, des aciers inoxydables, des métaux non ferreux ainsi que de la gangue formée lors de la fusion en four électrique. Ces produits sont utilisés dans les couches de fondation non stabilisées, les remblais et les mélanges bitumineux.

Les scories issues de la métallurgie des non-ferreux peuvent poser un problème environnemental en raison de la libération potentielle par lixiviation de composés toxiques, tels que le plomb, le cuivre et le zinc.

Dans le même ordre d'idées, les centrales électriques utilisant le charbon pulvérisé comme combustible produisent des cendres volantes qui ont des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques intéressantes. Celles-ci sont extraites des gaz de combustion par précipitation électrostatique sous forme d'une fine poudre grise. On utilise ces cendres volantes en mélange avec du ciment comme couche de fondation stabilisée. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers. [26]



*Figure II.37 Scorie déchet de fonderie [54].*

## II.5 Les fibres

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications, leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension (macro ou micro-fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite.

On distingue trois grandes familles de fibres.

- ✓ **Les fibres métalliques:** acier, inox, fonte (amorphe).
- ✓ **Les fibres organiques :** polypropylène, polyamide, acrylique, mélange polypropylène/polyéthylène, kevlar, aramide, carbone.
- ✓ **Les fibres minérales :** verre, basalte, mica.

### II.5.1 Les fibres minérales «Fibres de verre»

Inventée par un Français en 1836, la fibre de verre est longtemps restée dans les cartons. Brevetée en 1930, son utilisation s'est largement développée pour devenir aujourd'hui un matériau composite incontournable. Ce filament de verre reconnu pour ses nombreuses qualités (durable, léger, imperméable, isolant,...) s'emploie majoritairement pour renforcer certains bétons ou polymères.

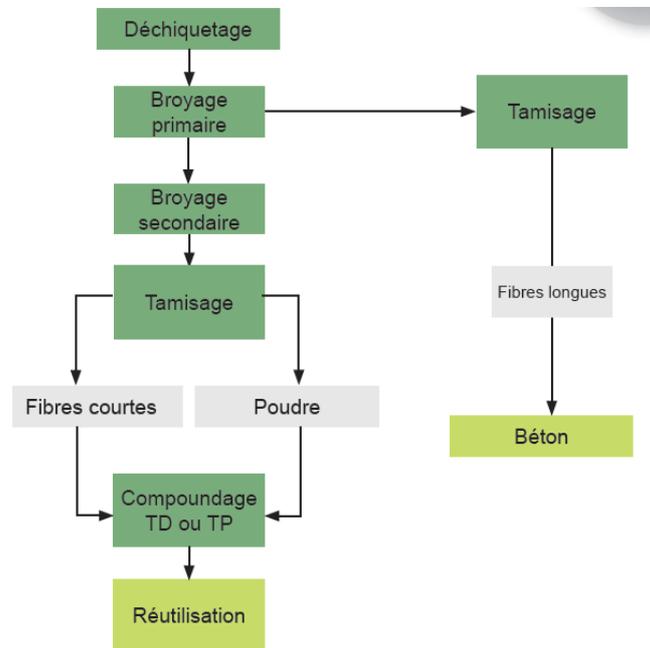
La fibre de verre est présente dans de multiples secteurs comme les transports, le BTP, l'électricité, les équipements industriels... Elle se retrouve dans des fuselages d'avions, dans des coques de bateaux ou dans les maisons (Fig. II.38).



*Figure II. 38 Fibre de verre [55].*

Trois grands circuits de valorisation de la fibre de verre restent prédominants à savoir:

✚ **La réutilisation** : dans un premier temps, le déchet composite est déchiqueté pour réduire sa taille. Ensuite, le produit obtenu passe par deux phases de broyage pour accentuer la réduction. A l'aide d'un tamis, une poudre et des fibres courtes sont récupérées. Ils pourront alors être recyclés en un nouveau matériau (Fig. II. 39) [40].



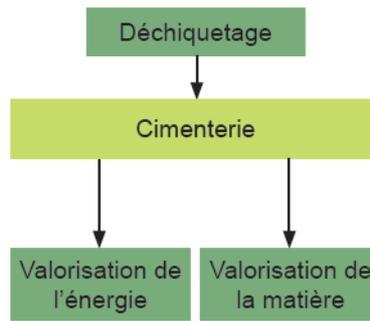
**Figure II. 39** Synoptique de production de fibres de verre et fibres sèches [38].

✚ **La fabrication du béton** : de la même manière que pour la réutilisation, les déchets subissent un déchiquetage puis un seul broyage avant de passer dans un tamis. Les fibres longues obtenues entreront dans la composition de certains bétons et le renforcera pour fabriquer des matériaux composites. Cette fibre ajoutée au béton remplace le treillis soudé dans la construction de radiers. Le temps n'altère en rien aux caractéristiques du composite et il reste flexible et résistant.

✚ **Composite fibre de verre** : La valorisation mixte de la composite fibre de verre est traitée par introduction dans un four de cimenterie après déchiquetage et éventuellement broyage. Selon le bénéfice recherché, on peut commencer le traitement du déchet à différentes étapes de la fabrication du ciment. Cette voie de traitement apporte une valorisation mixte : La partie organique (résine) apporte du pouvoir calorifique qui permet d'alimenter le four. La partie minérale entre dans la composition du ciment (Fig. II.40):

- Fibres pour anti-fissuration

- Charges pour apport matière première de substitution. [38]



**Figure II.40** Synoptique de la valorisation mixte des composites fibres de verre [57].

La stabilisation par renforcement avec des fibres est très employée en construction en terre. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terreaille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé.

### II.5.2 Les fibres métalliques

Les fibres métalliques à base d'acier au carbone offrent des propriétés de résistance à la traction plus élevées, un meilleur indice de fragilité à froid et une plus faible ténacité et ductilité. Les fibres métalliques en acier inoxydable sont fabriquées en différents alliages, longueurs et diamètres (Fig. II.41).



**Figure II.41** Les fibres métalliques.

Elles peuvent être ajoutées à n'importe quel réfractaire monolithique, des isolants aux ultra-basse teneur en ciment, aux pièces préfabriquées, aux mélanges pour gunitage, etc. Les fibres métalliques en acier au carbone sont spécialement conçues pour le renforcement des réfractaires pour l'isolation et la protection des coffrets de sécurité [58].

Les bétons de fibres métalliques ont une bonne résistance à la traction et à la flexion. Ils sont utilisés dans les dallages et les sols industriels (sur sol ou sur pieux), pour la fabrication de voussoirs de tunnels, de coques ou la confection de pieux ou pour réaliser des bétons projetés (pour la construction ou la réparation de revêtements de tunnels et de galeries et le confortement de parois de soutènement en béton), pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués ainsi que pour la confection de mortier de réparation ou de scellement.

Les fibres métalliques se substituent partiellement aux armatures traditionnelles. Elles sont, en particulier, utilisées pour réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, améliorer la résistance en traction et au choc. Elles confèrent au béton une certaine ductilité et une plus grande résistance à la rupture [59].

### II.5.3 Les fibres organiques

Les fibres organiques sont à base de carbone et d'hydrogène. Elles peuvent être soit naturelles (cellulose, soie, lin), soit artificielles (dérivées de la cellulose: viscose, acétate de cellulose...), soit synthétiques (dérivées de produits pétrochimiques: polyester, polyéthylène...) (Fig. II.42). On va présenter deux types de fibres organique à savoir les fibres polypropylène et les fibres végétales.

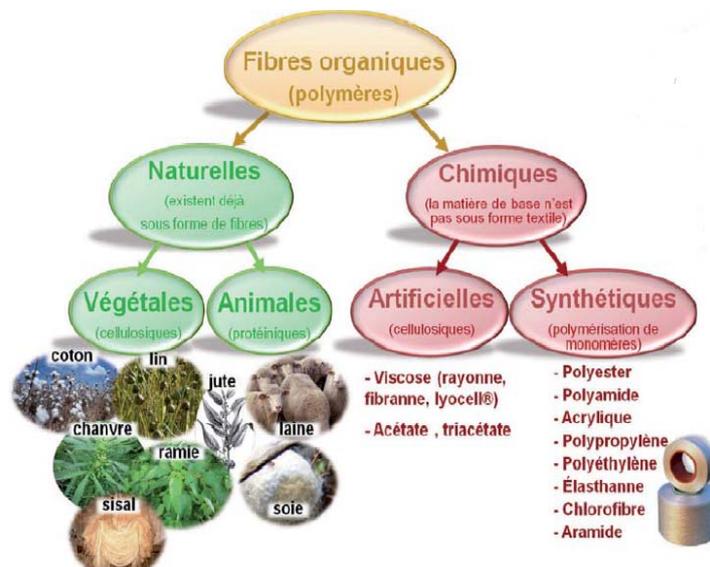


Figure II.42 Les différents types des fibres organiques.

#### II.5.3.1 Les fibres synthétiques polypropylène

Le polypropylène est une matière plastique. On trouve de nombreuses pièces moulées en polypropylène pour la construction automobile, notamment les pare-chocs, les tableaux de bord, l'habillage de l'habitacle et les réservoirs d'essence et de liquide de frein.

Le polypropylène est souvent utilisé pour les emballages alimentaires et son aspect brillant. Il est également utilisé pour la fabrication de vêtements professionnels jetables (combinaisons de peinture, charlottes, masques chirurgicaux, etc.), de géotextiles et de géomembranes.

En longueur nominale de 6 à 18 mm, la fibre de polypropylène est l'une des types des fibres synthétiques (Fig. II.43). C'est un adjuvant idéal au béton pour diminuer le retrait plastique, les fissurations et les lézardes, et augmenter les propriétés de surface. Les fibres ne remplacent pas le renforcement structurel traditionnel en acier ou les procédés habituels de bonne prise du ciment, mais il est très souvent possible de remplacer les treillis par ces fibres. Plusieurs pays ont émis des billets de banque en polypropylène, dont le Canada, Singapour, l'Australie, le Mexique et Israël [60].



*Figure II.43 Les fibres polypropylène [61].*

Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait », ainsi que leur résistance aux chocs. De ces propriétés découlent les applications privilégiées des bétons de fibres de polypropylène : dallages et aménagements urbains, produits préfabriqués (parements), mortiers projetés, enduits et sculptures.

Les propriétés des fibres polypropylène sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (meilleur comportement du béton frais) et les éléments préfabriqués (meilleure résistance mécanique précision des angles, des tranches ou des arêtes des pièces moulées. Elles permettent de réaliser des parements esthétiques, avec des motifs très précis, et sont utilisées aussi pour la formulation des bétons projetés ou des mortiers de réparation.

### **II.5.3.2 Les fibres naturelles «Fibres végétales»**

Les fibres végétales sont des fibres naturelles issues de la biomasse, elles peuvent être extraites du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante. Les plus utilisées sont les fibres de coton, lin et chanvre, ou encore de sisal, jute, kénaf ou coco. Il existe également de nombreuses espèces végétales dont il est possible d'extraire des fibres soit des tiges telles que les fibres de (chanvre, ramie, kenaf, bambou, etc...), soit des feuilles (sisal, abaca, agave, etc...) ou, soit des graines (kapok, etc...) [9].

Pour améliorer les propriétés mécaniques des briques de terre, ces dernières ont été renforcées par des matériaux d'origine minérale ou végétale et parfois animale. L'utilisation des tiges de diss comme élément de renfort est une technique ancienne, elle a été utilisée par nos ancêtres pour le renforcement des murs en argile naturelle, et ces constructions résistent encore malgré les aléas de la nature.

Les anciens habitants utilisaient la paille pour renforcer la terre pour leur disponibilité et leurs performances mécaniques et thermiques (Fig. II.44).

L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des ciments est relativement récente. En effet, beaucoup de recherches sont en cours dans le but d'arriver à substituer les fibres d'amiante par les fibres végétales. Actuellement, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les dalles et la production des tuiles et des dallages de parking ainsi que le renforcement du plâtre [21].



**Figure II.44** Prismes confectionnés avec des briques de fibres diss [30].

Les déchets à base des fibres naturelles « d'ALFA » sont utilisés comme ajout dans la région de « Cheliff » afin d'améliorer certaines caractéristiques mécaniques de couche de forme. La résistance au cisaillement, les paramètres de cohésion et l'angle de frottement ont augmenté dans le cas de sol renforcé par rapport au sol non renforcé [2].

Marandi et al. ont réalisé des essais de résistance à la compression non confiné, l'indice de portance californien et de compactage sur des échantillons de sol renforcés et non renforcés par des fibres de palmier (Fig. II.45). Ils ont constaté qu'avec la même longueur de fibre et avec l'augmentation de la teneur en fibres, les résistances maximums et résiduelles ont augmenté. Une tendance similaire a été observée avec l'augmentation de la longueur de la fibre de palmier (de 20 mm à 40 mm) pour une teneur en fibres constante [19].



**Figure II.45** Fibres de palmier dattier.

Ghavami et al. se sont intéressés à l'étude d'un sol, sans fibres et stabilisé parfois avec des fibres de sisal et d'autres fois avec de noix de coco. Ils ont constaté que la rupture du sol non fibré est très rapide et presque sans avertissement. En revanche, dans le cas du sol avec fibres, ils ont remarqué qu'après que la charge de rupture a été atteinte, les échantillons se déforment encore. Ceci est dû à la répartition des forces internes de la matrice du sol vers les fibres de renforcement [12].

Récemment, de nouveaux géotextiles à base de fibres végétales ont été développés, qui pourraient être utilisés comme renforts du sol pour les applications de génie civil [29] (Fig. II.46). En revanche, l'utilisation de ces fibres végétales reste limitée dans le domaine du génie civil car elle nécessite des recherches très avancées afin de réduire leur caractère biodégradable une fois mises en contact avec le sol.



**Figure II.46** Exemples de géotextiles végétaux [5].

## II.6 Déchets de mines de charbon

Dans les opérations d'extraction du charbon, environ la moitié du matériau est rejetée sous forme de déchets. Ceux-ci servent principalement de matériau de remblai pour les routes et peuvent aussi être utilisés comme granulats pour le béton léger [11].

La température de chauffe de ces déchets susceptible de produire le gonflement ou la dilatation doit être contrôlée pour que les gaz s'échappant de l'argile ou de tout autre matériau soient bien emprisonnés dans les granules ramollies. Tous les déchets ne vont pas nécessairement gonfler. Il est donc important de faire des essais préliminaires pour évaluer la capacité de gonflement des types particuliers de déchets.

## II.7 Impacts du recyclage sur l'environnement

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières [25]. Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

- l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
- chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
- le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
- chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois[35] ;
- chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 l'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15g de bois. [11]

## II.8 Conclusion

La valorisation ou revalorisation des déchets est un ensemble de procédés par lesquels on transforme un déchet matériel en un autre produit matériel, sans évacuation de ce dernier. En gestion des déchets, la valorisation est généralement considérée comme une solution préférable à l'élimination. La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des

critères de qualité trop rigoureux. Cette application se fait tout en respectant certaines normes. Pour confectionner de nouveaux composites.

Le recyclage, la réutilisation, ou la valorisation sont des comportements qui visent à minimiser l'énergie utilisée, à tirer un parti maximum des matériaux, à réduire les risques de pollution au moment de la fabrication, de l'utilisation ou de l'élimination de ces matériaux et le plus important c'est d'utiliser ces matériaux pour stabiliser les sols.

### Références bibliographiques du deuxième chapitre

- [1] Adhikari, B., Maiti, S.D., *Reclamation and recycling of waste rubber. Progress in Polymer Science, Vol.25, PP. 909-948 (2000).*
- [2] Behar, N., Chouli, C., *Valorisation des fibres naturelles dans le renforcement des chaussées « A Ouled Fares-Chelif ». Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master. Université Djilali Bounaama Khemis Miliana (2018).*
- [3] Benimam, S., Debieb, F., Bentchikou, M., et Guendouz, M. *Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton .MATEC Web of Conferences 11.01033 (2014)*
- [4] Bergeron, G. *Retraitement en place des chaussées, Guides et manuels techniques, Direction du laboratoire des chaussées. Ministère des Transports du Québec. (1996).*
- [5] Chaiyaput, S., Bergado, D. T., Artidteang, S. *Measured and simulated results of a Kenaf Limited life Geosynthetics (LLGs) reinforced test embankment on soft clay. Geotextiles and geomembranes, Vol 42, pp 39-47.(2014).*
- [6] Eddaou, M., Liichi, A, *Etat de l'art dans la valorisation des sédiments fluviaux : Etude Bibliographique. Ecole des Mines de Douai, (2012).*
- [7] Elise Oliveira Schweig<sup>1</sup>, Raul Tadeu Lobato Ferreira<sup>1</sup>, Greyce Bernardes de Mello Rezende *Adobe Soil-Cement Bricks Reinforced with Recycled Kraft Paper Fibers. International Journal of Materials Engineering, 8(5): 101-108 (2018).*
- [8] Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimbre, R.. *Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. Cem Con Comp 32 (8):421-426 (2010).*
- [9] Debieb, F., Kenai, S.. *The use of fine and coarse crushed bricks as aggregates in concrete. Constr Build Mater 22(5):886–93 (2008).*
- [10] *Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2010).*
- [11] Gilles Doublier, Ousmane Sorgho, *valorisation des déchets de sachets plastiques utilisation comme liant dans la fabrication de matériaux composites : application dans les villes subsahariennes, conférence internationale sur la valorisation des déchets et de la biomasse résiduelle dans les pays en développement, Burkina Fasso. (2009).*
- [12] Ghavami K, Filho RDT, Barbosa NP. *Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. Cem Concr Compos; 21(1):39–48, (1999).*
- [13] Huggins, E, Ravichandran, N. *Numerical study on the dynamic behavior of retaining walls backfilled with shredded tires. In: ASCE proceedings of GeoRisk 2011, June 26–28, 2011, Atlanta, Georgia (2011).*
- [14] Ihcene Lamri, *Etude du comportement d'un sol cohérent sous chargement monotonique et cyclique. Mémoire de Magistère. Université 20 aout 1955, Skikda. (2008).*
- [15] John Groover Luwalaga . *Analysing the Behaviour of Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Waste. Research Report, MEng, SUN, (2015).*
- [16] Jonathan Decottignies. *La collecte, le tri et le recyclage du verre des déchets menagers et assimilés. Cercle National du Recyclage. (2008).*

- [17] *Le recyclage des enrobés bitumineux*, Butin technique N3, Techno-Bitume, Québec.(2010).
- [18] Loehr, J.E., Bowders, J.J., *Slope Stabilization using Recycled Plastic Pins – Phase III. Final Report: RI98-007D*, Missouri Department of Transportation, Jefferson City, Missouri. (2007).
- [19] Marandi M, Bagheripour H, Rahgozar R, Zare H. *Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils*. *Am J Appl Sci*; 5:209–20, (2008).
- [20] Meddah Abdelaziz, Merzoug Karima, *Caractérisation d'un sol sableux contenant des fibres caoutchouteuses*. (2015).
- [21] M. M. Khenfer., *Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques*”. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Juin (1990).
- [22] Mlle Saadani Sabrina,. *Comportement des bétons à base de granulats recyclés*. Université Mentouri Constantine.
- [23] Moulaï Abdellah Bouabdallah . *valorisation des déchets de bois.1er Colloque Euromaghrébin sur les Bois Méditerranéens Caractérisation et valorisation technologique des bois résineux méditerranéens*. Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, Algérie.(2008).
- [24] Oikonomou N, Stefanidou M, Mavridou S, *Improvement of the bonding between rubber tire particles and cement paste in cement products*, in *15th Conference of the Technical Chamber of Greece,Alexandroupoli, Greece, 25–27 October (in Greek)*, pp. 234–242.(2006).
- [25] Omar Boudali, Leticia Ouali , *Valorisation d'un mélange de marne et de déchets plastiques dans la construction routière*. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*. Champs-sur-Marne. (2018).
- [26] *Quelles solutions pour le recyclage des déchets du bâtiment ? Des questions et des réponses. Projets – études. Les Dossiers du CSTC – Cahier n° 3 – 3e trimestre* (2005).
- [27] Ravichandran N, Huggins L, *Applicability of shredded tire chips as a lightweight retaining wall backfill in seismic regions*. In: *Proceedings of geo-congress (GSP 234)*, ASCE, Atlanta.(2014).
- [28] Reddy, S.B., Krishna, A.M. *Recycled Tire Chips Mixed with Sand as Lightweight Backfill Material in Retaining Wall Applications: An Experimental Investigation*. *Int. J. of Geosynth. And Ground Eng.* 1, 31 (2015).
- [29] Saha, P., Roy, D., Manna, S., Adhikari, B., Sen, R., Roy, S. *Durability of transesterified jute geotextiles*. *Geotextiles and Geomembranes* 35 69-75. (2012).
- [30] Sellami Asma, *Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss) : Caractérisation, Durabilité et Application au cas de la maçonnerie*. Thèse de Doctorat 3ème Cycle, Université Badji Mokhtar, Annaba. (2015).
- [31] Hınıslioglu, S., Agar, E., *Use of high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix*. *Materials Letters* 28, 267-271.(2004).
- [32] Sam, T. D., Tam, M. N., *Polymer concrete based on recycled polyethylene terephthalate (PET)*. *NOCMAT/3.Vietnam International Conference on Non-Conventional Material and Technologies*, 226-228. (2002).
- [33] Tran Ngoc T. *Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière thèse*. Université d'Artois, (2009).
- [34] Bastone, V., Rey, A. *Guide d'utilisation des déchets recyclés pour le BTP à la reunion*. *Rapport final*. BRGM/RP-60807-FR.(2012).
- [35] Vincent Chenais François Des jamonières, Sandrine Delcroix, Élodie Delhom, Frédéric Droues Er. *Utilisation en technique routière des graves recyclées issues de la déconstruction*. *Manuel Régional*. Pays- de-loire. Décembre (2019)

- [37] Breslin, V. T., Senturk, U., Berndt, C. C. Long-term engineering properties of recycled plastic lumber in pier construction. *Resources, Conservation and Recycling* 23, 243-258.(1998).
- [38] Valérie Frerejean. *guide du recyclage des composites*. CReCoF (2017).
- [39] [www.valorplast.com](http://www.valorplast.com)
- [40] <https://www.servipac-salazie.com/recyclage-dechets/fibre-de-verre>
- [41] <https://www.servipac-salazie.com/recyclage-dechets/gravats>
- [42] <https://www.lemoniteur.fr/article/rehabilitation-et-cycle-de-vie-l-acier-indefiniment.1238619>
- [43] [https://www.rivaacier.com/fr/responsabilite\\_sociale/recyclage\\_de\\_lacier](https://www.rivaacier.com/fr/responsabilite_sociale/recyclage_de_lacier)
- [44] <http://www.cd2e.com/node/299>
- [45] <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2016/papier-recycle-isolation-batiment.htm>
- [46] <https://www.alec27.fr/ouate-de-cellulose-bien-plus-papier-journal-recycle/>
- [47] <https://www.escaleverte.ca/1-2-3-4-5-7-petite-introduction-aux-types-de-plastiques-recyclables/>
- [48] [https://www.pressafrik.com/Italie-11-tonnes-de-dechets-textiles-a-destination-du-Senegal-saisies\\_a216844.html](https://www.pressafrik.com/Italie-11-tonnes-de-dechets-textiles-a-destination-du-Senegal-saisies_a216844.html)
- [49] <https://www.heringinternational.com/fr/produits-prestations/beton-architectural/surfaces/surfaces-les-plus-differents/>
- [50] <https://www.environnement-magazine.fr/recyclage/article/2019/10/15/126318/economie-circulaire-quand-les-sediments-collent>
- [51] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Drague\\_\(navire\\_de\\_services\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Drague_(navire_de_services))
- [52] <https://www.environnement-magazine.fr/recyclage/article/2019/10/15/126318/economie-circulaire-quand-les-sediments-collent>
- [53] <https://www.ctpl.info/les-laitiers-siderurgiques/>
- [54] <http://minera.over-blog.com/2013/12/laitiers-et-scoories.html>
- [55] <https://matieresetbeton.com/p/fibre-de-verre-ar-v12-pour-dalle-beton-sol/>
- [56] <https://www.servipac-salazie.com/recyclage-dechets/fibre-de-verre>
- [57] <http://chmp.bernard.pagesperso-orange.fr/recyclage%20des%20fibres.htm>
- [58] <https://www.azaros.eu/fr/produit/fibres-metalliques/>
- [59] <http://www.blog.guidenr.fr/betons-fibres.php>
- [60] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Polypropyl%C3%A8ne>
- [61] <https://www.indiamart.com/proddetail/polypropylene-construction-fibres-4088039088.html>

# CHAPITRE III

### III.1 Introduction

Les défis sociaux, économiques et environnementaux ont incité les chercheurs à trouver des techniques pour améliorer la qualité des matériaux géotechniques. Des études ont montré que le renforcement des sols de mauvaise qualité avec des matériaux fibreux comme les déchets de plastique a amélioré considérablement leur performance et durabilité.

Afin de rendre ces matériaux utilisables dans les différents travaux de construction, plusieurs études ont été réalisées aux laboratoires pour examiner les propriétés mécaniques des déchets. Plusieurs essais ont été réalisés également sur les matériaux composite à base des déchets telle que le plastique, le caoutchouc, le verre, la céramique....etc. Afin de définir leurs caractéristiques mécaniques et proposer des perspectives pour leur utilisation futur dans la réalisation des ouvrages d'arts et routier. Dans ce chapitre, on a présenté trois essais réalisés par des géotechniciens en utilisant des déchets bien spécifique: le plastique et le caoutchouc dans un objectif d'exploiter leurs résultats obtenues, dans des études numériques sur le comportement des ouvrages géotechniques réalisés sur des terrains stabilisés par ces derniers.

### III.2 Analyse du comportement des sols renforcés avec des déchets plastiques de polyéthylène téréphtalate (PET).

#### III.2.1 Objectifs de l'étude

Comme mentionné précédemment, le thème du renforcement des sols avec des déchets plastiques PET a été abordé par un certain nombre de chercheurs. Divers théoriques et approches expérimentales ont été développées pour acquérir une compréhension du sujet. Cependant, selon la littérature publiée, le déficit de connaissances est encore large en ce qui concerne le renforcement des sols avec les déchets plastiques PET. Cela a donc fourni une base solide pour mener cette étude [12].

#### III.2.2 Les matériaux utilisés

##### a) Sol

Le matériau utilisé est du sable moyennement dense, du sable de quartz propre, de particules rondes comprises entre 0,075 mm et 1,18 mm. Les essais effectués sur le sol d'essais sont : l'analyse granulométrique, le compactage et la boîte de cisaillement direct.

##### b) Paillettes de déchets en plastique PET

Des paillettes de déchets en plastique du type polyéthylène téréphtalate (PET) ont été utilisées comme matériau de renforcement (Fig. III.1). Ceux-ci ont été obtenus auprès de l'usine Kaytech située à Atlantis, en Afrique du Sud. Les paillettes de déchets en plastique PET sont colorés et leurs tailles variaient entre moins de 10 mm et plus de 1,18 mm.



*Figure III.1 Paillettes de déchets en plastique PET.*

### III.2.3 Essai de compactage

Les tailles des particules de sol et de déchet en plastique PET utilisé dans cette recherche sont inférieures à 20 mm, il n'était donc pas nécessaire de passer les échantillons à travers un tamis de 20 mm. Trois échantillons de 20 kg chacun ont été pesés séparément, ainsi que leurs inclusions respectives de fibres de déchets plastiques PET de 12,5%, 22,5% et 32,5% en poids de sol sec. La figure III.2 présente le composite de déchets plastique sable-PET compacté.



*Figure III.2 Composite de déchets plastiques compactés sable-PET.*

### III.2.4 Essai à la boîte de cisaillement direct

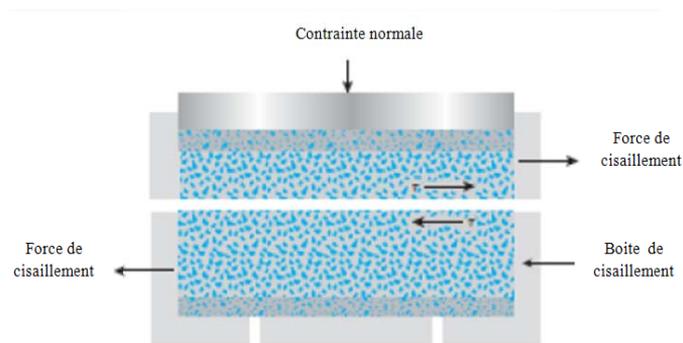
Le dispositif de cisaillement direct ou l'appareil de cisaillement direct a été utilisé pour effectuer des essais sur des échantillons composites de sol et de déchets en plastique PET de 100 mm carrés et 30 mm de haut divisés horizontalement en deux moitiés, comme le montre la figure III.3.

Le poids du composite de déchets plastiques sol-PET mesuré 150 g par échantillon. L'échantillon a été bien mélangé de manière homogène avec la teneur en eau optimale correspondante de l'échantillon qui a été obtenue pendant l'essai de compactage. À l'aide de l'entonnoir, le composite de déchets de plastique PET-sol a été placé dans la boîte de cisaillement en trois (3) couches et chaque couche a été compacté avec 15 coups à l'aide d'un pilon à main.



**Figure III.3** Appareil Digishear utilisé pendant l'essai.

Après compactage, le composite de déchets de plastique PET-sol dans la boîte de cisaillement a été recouvert de plaques perforées et poreuses. La boîte de cisaillement contenant l'échantillon à tester a été placée dans la machine comme le montre la figure III.4. De plus, les essais ont été menés à trois (3) contraintes normales de 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa. Afin de déterminer la cohésion et l'angle de frottement, un graphique de la contrainte totale (kPa) par rapport à la contrainte normale (kPa) a été tracé. La contrainte normale étant connu, les valeurs de la contrainte totale ont été obtenues en divisant la résistante de cisaillement à la zone correspondante de l'échantillon.



**Figure III.4** Principe de l'essai de cisaillement direct [8].

### III.2.5 Résultats et discussion des essais d'identifications

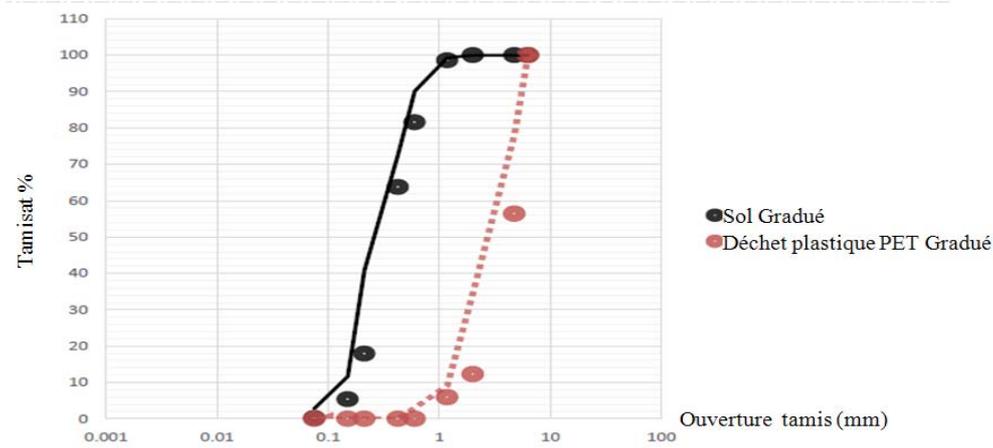
Cette étude a été menée en utilisant des matériaux tels que : un sol sableux, l'eau et des déchets plastiques PET. Les essais d'identification comme le poids spécifique, l'analyse granulométriques et les limites d'Atterberg sont utilisés pour classer le sol. La distribution granulométrique a été effectuée sur des sols sableux et des paillettes de déchets plastiques PET. Une valeur de la densité spécifique de 2,66 pour le spécimen de sol sableux a été adoptée d'après des recherches sur les sols sableux similaires dans la région du Cap occidental [13].

#### III.2.5.1 La distribution granulométriques

La figure III.5 présente la distribution granulométrique des échantillons du sol et des paillettes du déchet plastique PET comme le montre le tableau III.1 [6]

**Tableau III.1** Résultats de l'analyse granulométrique. [12]

	Propriété	Sol	Déchet plastique PET
1	Gravité spécifique	2.66	1.38
2	Limites de cohérence		
a)	Limite de liquide (%)	0	
b)	Limite plastique (%)	0	
c)	Indice de plasticité (%)	0	
3	Analyse de la taille des particules		
f)	Granulométrie moyenne $D_{50}$	0.354	
g)	$D_{60}$ (mm)	0.405	
h)	$D_{30}$ (mm)	0.265	
i)	$D_{10}$ (mm)	0.175	
j)	Coefficient d'uniformité, $C_u$	2.314	
k)	Coefficient de courbure, $C_c$	0.99	

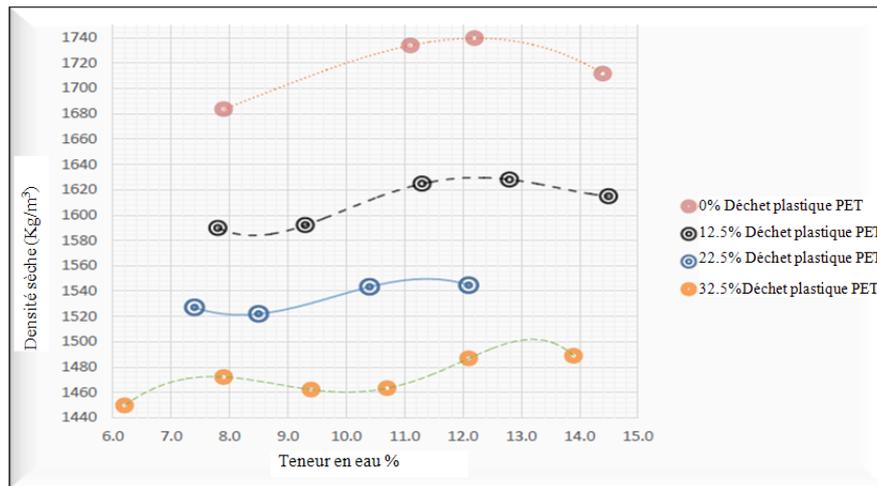
**Figure III.5** La distribution granulométrique du sable et des paillettes du déchet en plastique PET.

### III.2.6 Résultats et discussion relatifs à l'essai de compactage du sol et du composite sol- plastique PET.

Pour l'essai de compactage, la relation entre la densité sèche et la teneur en eau est présenté sur la figure III.6. Les résultats des essais de compactage effectués sur le composite plastique sable-PET est présenté dans le tableau III.2. [12]

**Tableau III.2** Résultats obtenus à partir d'essais de compactage.

	Déchets plastiques PET (%)	OMC (%)	MDD ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )
1	0	12.2	1740
2	12.5	12.2	1630
3	22.5	11.2	1547
4	32.5	13.2	1490



**Figure III.6** Relation entre densité sèche-teneur en eau du sable et des composites sable-plastique PET [12].

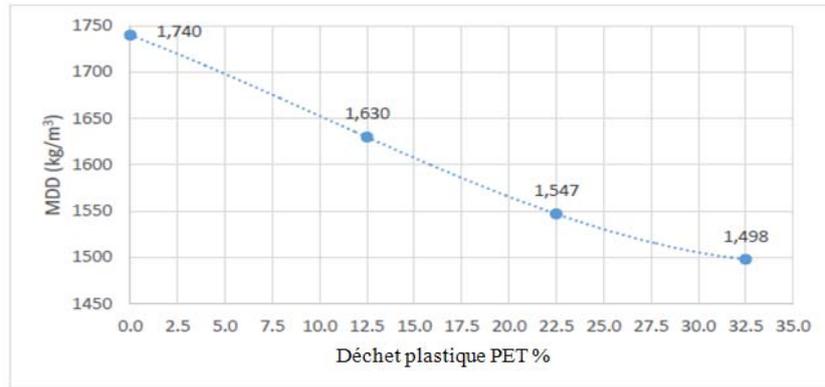
D'après la figure III.6, le sable compact non renforcé a donné une teneur en eau optimale (OMC) de 12,2% et une densité sèche maximale (MDD) de 1740 kg/m<sup>3</sup>.

Le composite sable-PET compacté a donné 12,2% de l'optimum proctor (MOC) et 1630 kg/m<sup>3</sup> (MDD). On peut remarquer qu'il n'y a pas de différence dans le (MOC) du sable non renforcé et le composite sable-PET renforcés avec 12,5% de déchets plastiques PET. En outre, il y a eu une diminution de 6,75% des valeurs de la masse volumique sèche du sable non renforcé. Cela montre que bien que la quantité d'eau utilisée pour atteindre l'optimum proctor (MDD) soit restée constante, cependant le composite de déchets de plastique PET à 12,5% est devenu plus léger [12].

De plus, d'après la figure III.6, le composite sable- déchet plastique PET 22,5% a donné 11,2% d'optimum proctor (OMC) et 1547 kg/m<sup>3</sup> de la masse volumique sèche (MDD). On remarque qu'il y a eu une réduction de 8,9% de l'optimum proctor (MOC) et une réduction de 12,5% de la masse volumique (MDD). Lorsque le composite de sable et de déchets de plastique PET à 22,5% est comparé au composite de déchets de plastique PET à 12,5% , il y a une réduction de 8,9% de la (MOC) et une réduction de 6,75% du (MDD) [12].

Cela implique que l'ajout de 22,5% de déchets plastiques PET a allégé le composite de sable - déchets plastiques PET. Cela est bénéfique à la fois au domaine du génie civil et à la gestion des déchets, car 22,5% des déchets de plastique PET qui ne peuvent pas être recyclés sont retirés de l'environnement et utilisés dans des structures de génie civil où des structures plus légères sont recherchés [12].

Enfin, d'après la figure III.6, lorsque le sable est renforcé avec 32,5% de déchets plastiques PET, le composite sable-déchets plastiques PET à 32,5% a donné 13,2% (OMC) et 1490 kg/m<sup>3</sup> (MDD). En comparant le sable non renforcé avec celui renforcé avec des déchets plastiques PET 32,5% qu'il y a une augmentation de 7,6% de la (MOC) et une diminution de 16,8% du (MDD).



**Figure III.7** Relation entre le MDD et les déchets plastiques PET [12].

La figure III.7 montre la relation entre le (MDD) et les déchets plastiques PET, généralement une augmentation du pourcentage d'inclusion de déchets plastiques PET dans le sable, réduit le (MDD) du composite plastique sable-PET. Ceci est attribué au fait que les particules de sable sont plus denses que le plastique PET. Comme plus de déchets de plastique PET sont ajoutés dans le composite sable-déchets de plastique PET, le composite devient plus léger et un tel composite peut être utilisé dans des projets qui nécessitent une (MDD) inférieure.

### III.2.7 Résultats et discussion relatifs à l'essai de cisaillement direct

Cette section développe les résultats des contraintes de cisaillement obtenues à partir des essais de cisaillement direct réalisés sur le sable et les composites sable-Plastique PET enregistrés et tracés en fonction des contraintes normales appliquées respectivement pour déterminer les angles de frottement ( $\phi$ ) et les valeurs de cohésion ( $c$ ).

Les résultats présentés dans le tableau III.3 et la figure III.8 ont été obtenues à partir des essais réalisées sur des échantillons de sable non renforcés et des échantillons composites sable-déchets de plastique PET.

**Tableau III.3** Résultats des essais à la boîte de cisaillement direct [12].

Déchets plastiques PET (%)	Contrainte de cisaillement, $\tau$ (kN/m <sup>2</sup> ou kPa)	Contrainte normal, $\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> ou kPa)
0	88	100
0	171	200
0	246	300
12.5	133	100
12.5	222	200
12.5	303	300
22.5	129	100
22.5	226	200
22.5	324	300
32.5	125	100
32.5	238	200
32.5	300	300

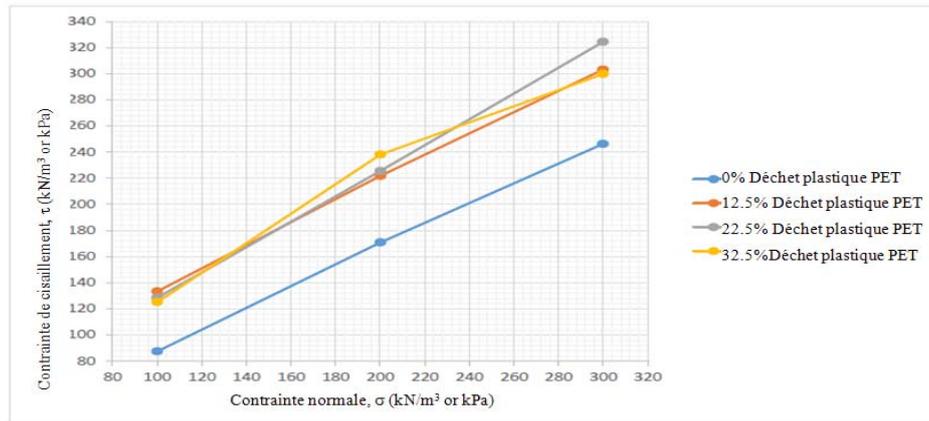


Figure III.8 Relation entre la contrainte de cisaillement et la contrainte normale. [12]

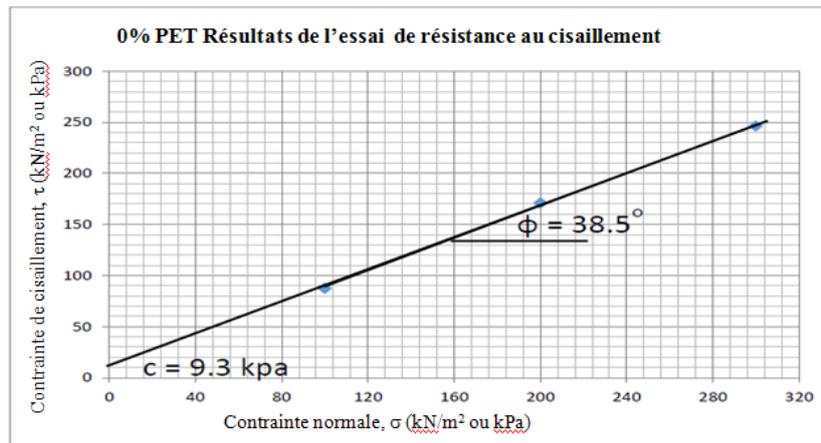


Figure III.9 Les résultats d'essai de cisaillement sur sable non renforcé. [12]

La figure III.9 présente les résultats de l'essai de cisaillement direct du sable non renforcé. Les résultats montrent que la résistance au cisaillement est proportionnelle à la charge normale. L'angle de frottement déterminé est  $38,5^\circ$ , ce résultat est conforme aux résultats obtenus par Kalumba et Chebet [13] qui ont classé ce type de sable comme un sable de quartz gris clair moyen et dense avec des particules de forme ronde qui prédomine dans la région du Cap occidental, en Afrique du Sud. La cohésion du sable est  $9,3 \text{ kPa}$  [12].

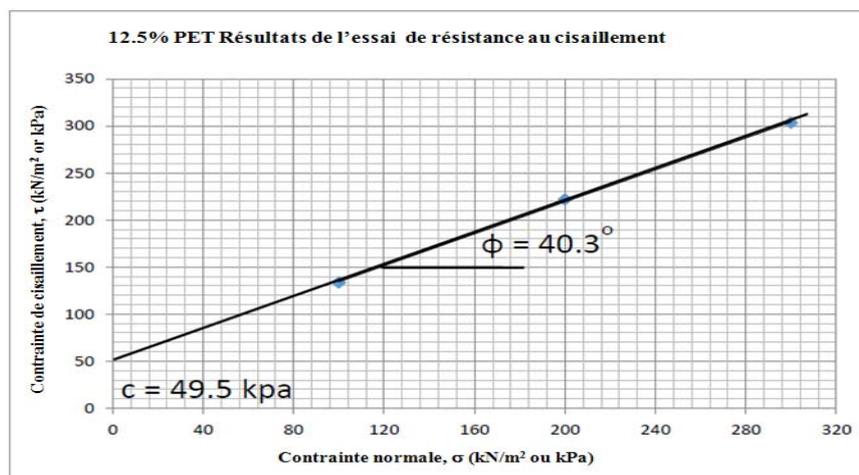
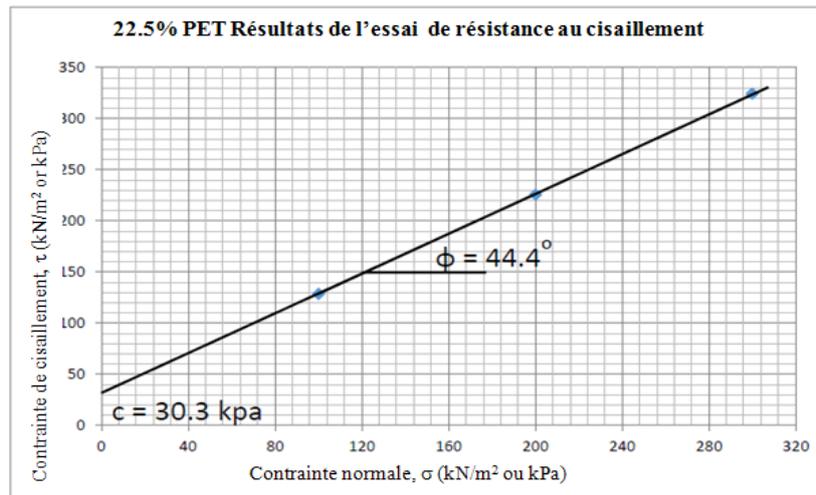


Figure III.9a Résultat de l'essai de cisaillement sur le composite de déchets plastique PET à 12,5% [12].

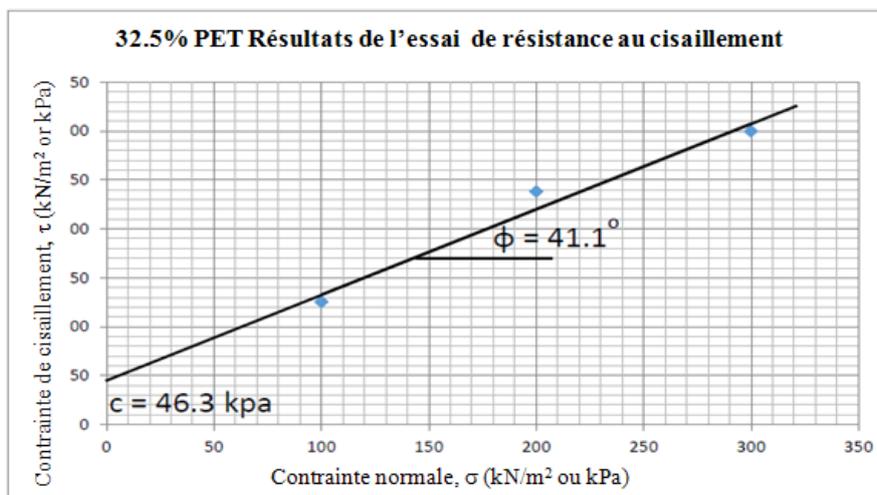


**Figure III.10** Résultat de l'essai de cisaillement sur le composite de déchets plastique PET à 22,5% [12].

La figure III.10 présente les résultats des essais de résistance au cisaillement du sable renforcé avec 22,5% de déchets plastiques PET (en poids de sable sec). La résistance au cisaillement est proportionnelle à la contrainte normale. Le composite de déchets plastiques sable -PET à 22,5% a un angle de frottement de 44,4° et une valeur de cohésion de 30,3kPa. En conséquence il y a une augmentation de 13,3% de l'angle de frottement. L'augmentation de la résistance indique que 22,5% ou plus de déchets plastiques PET pourraient être le pourcentage optimal nécessaire pour renforcer le sable. L'augmentation de la résistance au cisaillement est due à l'augmentation de la rugosité.

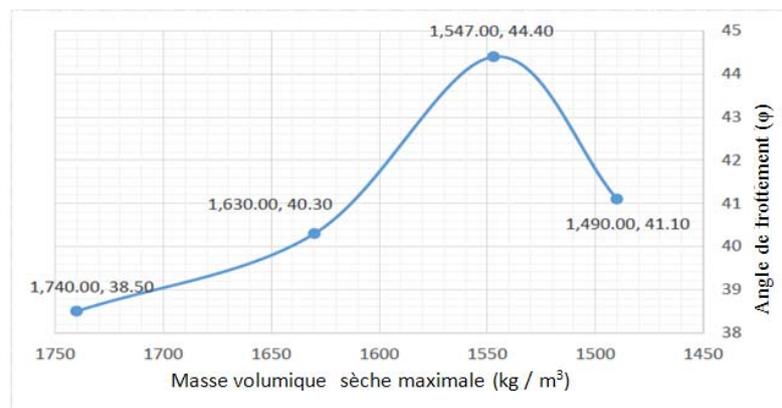
De plus, en comparant les angles de frottement des composites sable - déchets plastiques PET à 12,5% (40,3°) et 22,5% (44,4°), on remarque une augmentation de 9,2% due à la texture de surface plus rugueuse entre le sol et les particules de déchets plastiques PET.

La cohésion de 30,3 kPa indique qu'en raison de la bonne liaison physique, il y a des forces internes qui maintient les particules du composites sable- déchets plastiques PET à 22,5% ensemble dans une masse solide.



**Figure III.11** Résultats de l'essai de cisaillement sur le composite sable-déchets plastiques PET à 32,5% [12].

La figure III.11 présente la résistance au cisaillement du sable renforcé avec 32,5% de déchets plastiques PET. Le composite de déchets plastiques sable-PET à 32,5% a un angle de frottement de  $41,1^\circ$  et une valeur de cohésion de 46,3 kPa. En comparant l'angle de frottement du sable uniquement ( $38,5^\circ$ ) et du composite sable -déchets plastiques PET à 32,5% ( $41,1^\circ$ ), il y a une augmentation de 6,3% de l'angle de frottement. Cette augmentation est dû à une meilleure imbrication des particules du composites sable - déchets plastiques PET à 32,5% . Cependant, il convient de noter qu'il y a eu une diminution de 7,4% entre le sable - déchets plastiques PET à 22,5% de ( $44,4^\circ$ ) et le sable-déchets plastiques PET à 32,5% ( $41,1^\circ$ ). La diminution est due à la présence plus élevée de déchets plastiques PET dans le sable au-delà de l'optimal ce qui a réduit les propriétés de liaison du composite. Une autre raison est la surface lisse des paillettes de déchets en plastique PET qui a réduit l'interaction avec les particules de sable pendant le compactage. On peut également déduire que, comme le sol sableux et les particules de plastique PET sont uniformément classés, il manque des particules plus fines pour combler les vides qui existent dans le composite sable - déchets de plastique PET à 32,5% [12].



**Figure III.12** Relation entre l'angle de frottement ( $\phi$ ) et la densité sèche maximale ( $\text{kg/m}^3$ ).

La figure III.12 montre la relation entre l'angle de frottement et la densité sèche maximale. Dans ce cas, l'angle de frottement maximal ( $44,4^\circ$ ) est atteint lorsque la masse volumique sèche maximale est de  $1547 \text{ kg/m}^3$  [12].

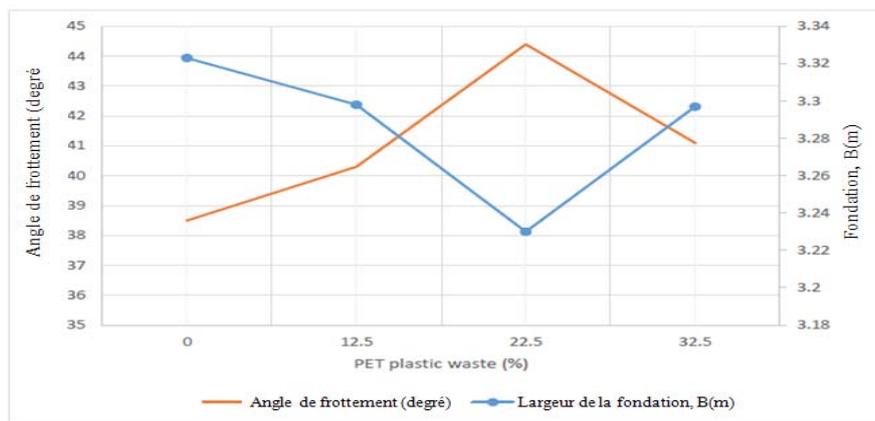
### III.2.8 Capacité portante du composite de déchets plastiques sable-PET

Les concepteurs géotechniques doivent déterminer la capacité portante du sol de telle sorte que la résistance des couches porteuses de la fondation (pour le cas de cette étude «composite sable - déchets de plastique PET) soit connue avant d'imposer des charges structurales

Cette recherche a démontré l'application des résultats des essais à la boîte de cisaillement direct et de compactage dans la détermination de la capacité portante du sable non renforcé et des composites de déchets plastique sable-PET. Ces valeurs ont ensuite été utilisées pour calculer la largeur de la fondation à l'état limite. La relation entre les déchets plastiques PET, la largeur de la fondation et l'angle de frottement est résumé dans le tableau III.4 et la figure III.13.

**Tableau III.4** Résumé des déchets plastiques PET, angle de frottement et largeur de fondation

Déchets plastiques PET (%)	Largeur de fondation, B (m)	Angle de friction (degré)
0	3.323	38.5
12.5	3.298	40.3
22.5	3.230	44.4
32.5	3.297	41.1

**Figure III.13** Relation entre les déchets plastiques PET, l'angle de frottement et la largeur de la fondation.

La figure III.13 présente la relation entre les déchets plastiques PET, l'angle de frottement et la largeur de la fondation. Lorsque le pourcentage d'inclusion des paillettes de déchets en plastique PET augmente, la valeur de l'angle de frottement augmente et la largeur de la fondation diminue. Cela indique que la présence de déchets de plastique PET dans l'échantillon de sable augmente la résistance au cisaillement du composite, ce qui entraîne une augmentation de la capacité portante des couches, ce qui diminue finalement la largeur de la fondation, ce qui la rend économique. Pour cette étude, la tendance se poursuit jusqu'à l'inclusion de 22,5% de paillettes de plastique PET dans le composite. Cela conduit à un angle de frottement maximal de 44,4° et à une largeur de fondation minimale B de 3,23 m, qui est considérée dans ce cas comme la largeur de fondation optimale.

### III.3 Évaluation expérimentale des murs de soutènement stabilisés mécaniquement avec des caoutchoucs recyclés [15]

#### III.3.1 Objectif de l'essai

Les pneus usagés sont utilisés pour diverses applications, ils peuvent fournir des matériaux homogènes avec différentes caractéristiques physiques, telles que la forme, la taille, les fibres amovibles et fils [10]. En 1996 Foose et al. ont effectué plusieurs essais de cisaillement sur un mélange de sable et dérivé de pneus de différentes tailles et ont observés une augmentation de l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) pouvant atteindre 65°[9]. De nombreuses études ont été menées pour évaluer l'effet de l'utilisation de caoutchouc recyclé sur le remblai des murs de soutènement, les tranchées, les talus, les plates-formes et même les chaussées (asphalte) sous des charges statiques et dynamique. En 1998 Tweedie et al. ont évalué la stabilité d'un mur de

soutènement d'une hauteur de 4,88 m en ajoutant des coupons de pneus au remblai. Ils ont observé que les contraintes horizontales du remblai renforcé avec des pneus déchiquetés sont environ 35% inférieures aux contraintes actives pour un remblai granulaire classique. L'inclinaison du plan de glissement par rapport à l'horizontal est estimée à 60°- 70° pour les trois types de coupons pneumatiques [11]. L'utilisation des ancrages à plaque comme renfort de mur de soutènement et des pneus recyclés comme matériau de remplissage léger peut être une méthode convenablement combinée en termes d'aspects économiques, environnemental et de sécurité de la stabilité du mur sous des charges statiques et dynamiques [1].

La présente recherche a étudié l'effet de l'ajout de différents pourcentages (5% , 10% , 15% et 20%) en poids de poudrette de caoutchouc recyclée (recycled crumb rubber: RCR) au remblai d'un mur de soutènement et l'effet de la géométrie des plaques d'ancrages, dimensions et configurations du renforcement sur la stabilité globale des murs MSE. Pour observer la surface de glissement critique au cours de chaque expérience, la technique de vélocimétrie par image des particules (particle image velocimetry PIV) a été utilisée pour détecter le déplacement des particules du sol dans un environnement de laboratoire [19].

### III.3.2 Matériaux utilisés

Une série d'essais à échelle réduite a été menée pour étudier le comportement des murs MSE soumis à des charges statiques. Les tailles des murs modèles ont été conçues à un rapport d'échelle de 1:10, qui est similaire aux murs typiques sur terrain. Ainsi, un mur de soutènement d'une taille de 3000 mm × 3000 mm (longueur × hauteur) a été réduit à celui de dimensions 300 mm × 300 mm. Les dimensions internes de la chambre faite de tôles sur trois côtés, est de 1000 mm × 300 mm × 600 mm (longueur × largeur × hauteur). Une rangée de bandes métalliques a été soudée à mi-hauteur des faces externes de la chambre pour assurer sa rigidité. La paroi en plexiglas de la chambre d'essai a permis l'observation et la photogrammétrie d'un côté des murs de soutènement pour tracer les particules du sol et identifier les modes de rupture, qui ont été effectués en utilisant la technique PIV. Pour minimiser les effets secondaires dus au frottement des parois latérales métalliques de la chambre, une feuille de plastique polyéthylène de 1,5 mm d'épaisseur a été fixée à l'intérieur de la paroi latérale. Le remblai utilisé dans tous les essais est un sol sablonneux recueilli à Sufiyān dans la province de l'Azerbaïdjan oriental, en Iran [15].

**Tableau III.5** Propriétés physico-mécaniques du sol.

Coefficient d'uniformité $C_u$	Coefficient de courbure, $C_c$	$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	$e_{max}$	$e_{min}$	$G_s$	$\gamma_{sec}$ (kN / m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)
1.36	0.87	0.22	0.24	0.28	0.3	0.82	0.54	2.64	16.76	28

Le revêtement de mur de soutènement utilisé dans les expériences menées dans le présent travail est une plaque d'aluminium de 0,9 mm d'épaisseur. La longueur et le diamètre des barres sont respectivement 300 mm et 4 mm, qui ont été calculés en appliquant un rapport d'échelle de 1:10 dans une barre de longueur et de diamètre de 3000 mm et 40 mm respectivement.

Le coin de rupture a été évalué sur la base de la théorie de Rankin. Les résultats ont montré que la longueur minimale nécessaire pour que les plaques d'ancrage soient placées à l'extérieur du coin de rupture est de 200 mm [2].

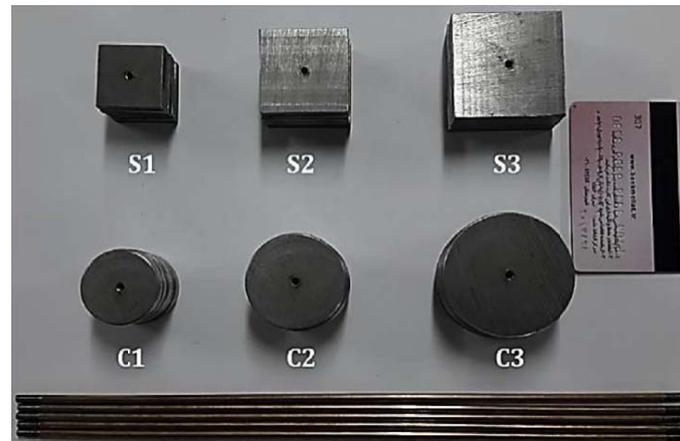
**Tableau III.6** Matériaux équivalents pour simuler un revêtement en béton de 300 mm d'épaisseur [19].

Matériau de revêtement	Module élastique, $E_m$ (GPa)	Épaisseur, $t_m$ (mm)
Acier	210	0.64
Aluminium	70	0.9
Micro-béton	10	1.75
Polypropylène	0.9	3.9

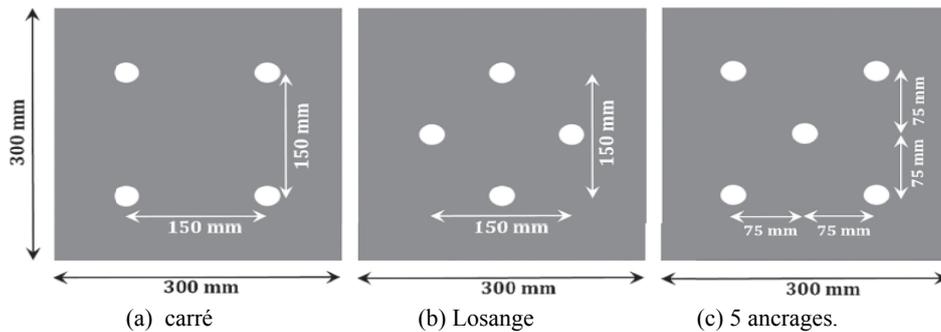
Dans cette étude, des plaques carrées de trois dimensions communes de 300 mm, 400 mm et 500 mm ont été sélectionnées pour les conditions réelles. Selon le rapport d'échelle de 1:10, des plaques modèles réduites de 30 mm  $\times$  30 mm, 40 mm  $\times$  40 mm et 50 mm  $\times$  50 mm ont été obtenues pour simuler les conditions de laboratoire.

La figure III.14 illustre les plaques d'ancrage et les tirants, et le tableau III.7 présente les propriétés des tirants. Dans cette étude, les distances horizontales et verticales ont été fixées à 1500 mm et aucune post-tension n'est appliquée dans ces ancrages. En appliquant le facteur d'échelle de 1:10, une distance d'entraxe de 150 mm a été obtenue pour les renforts. En conséquence, trois configurations de renfort ont été appliquées, les configurations à 5 ancrages, losange et carré, comme indiqué sur la figure III.15.

Pour créer une condition de déformation plane parfaite et pour éviter tout frottement entre la semelle et les côtés latéraux de la boîte d'essai, la longueur de la semelle a été fixée à 1 mm de moins que la largeur de 300 mm de la chambre d'essai. Ainsi, la longueur, la largeur et l'épaisseur de la semelle étaient respectivement de 299 mm, 70 mm et 30 mm [15].

**Figure III.14** Les plaques d'ancrage [15].**Tableau III.7** Propriétés des tirants et plaques d'ancrage.

Plaques d'ancrage	Plaques			Tirants	
	Côté longueur/ diamètre (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Épaisseur (mm)	Longueur (mm)	Diamètre (mm)
Petit carré S1	30	900	3	300	4
Carré moyen S2	40	1600	3	300	4
Grand carré S3	50	2500	3	300	4
Petite circulaire C1	33.8	900	3	300	4
Circulaire moyen C2	45.1	1600	3	300	4
Grande circulaire C3	56.4	2500	3	300	4



**Figure III.15** Configurations des barres [15].

Selon ASTM D6270-08, les morceaux de pneus utilisés dans cette recherche sont classés comme caoutchouc granulé. Tous les RCR ont été tamisés et ceux passant à travers le tamis n° 4 (4,75 mm) et restant sur le tamis n° 6 (3,35 mm) ont été ajoutés au mélange de terre [3]. La figure III.16 illustre un échantillon du RCR tamisé. Cette taille de RCR a été sélectionnée conformément aux travaux précédents qui indiquaient une taille de 50 mm ou moins pour faire face à un compactage non autorisé. De plus, le RCR grossier (204,75 mm) a donné des résultats plus satisfaisants que la fin (0,075 e 2 mm) [17]. Tous les RCR préparés pour les expériences ont été lavés et débarrassés des fils d'acier. Le poids unitaire moyen et les valeurs du poids spécifique des RCR sont respectivement  $12 \text{ kN/m}^3$  et 1,21.



**Figure III.16** Échantillon de RCR tamisé.

### III.3.3 Programme d'essai

La conception de l'essai pour tous les modèles dans le présent travail a été appliquée en appliquant les mêmes étapes: installer le revêtement, verser les mélanges d'une hauteur fixe, encastrer les renforts à chaque élévation et les connecter au revêtement. Grâce à ce plan, le remplissage pour chaque couche a commencé à partir du bas de la boîte jusqu'aux niveaux de revêtement. Finalement, un remblayage supplémentaire jusqu'à la couronne du mur (Fig. III.17). Un compactage uniforme a été appliqué sur toute la surface de chaque couche de mélange pour atteindre une hauteur de 50 mm et un poids unitaire uniforme de  $16 \text{ kN/m}^3$ .

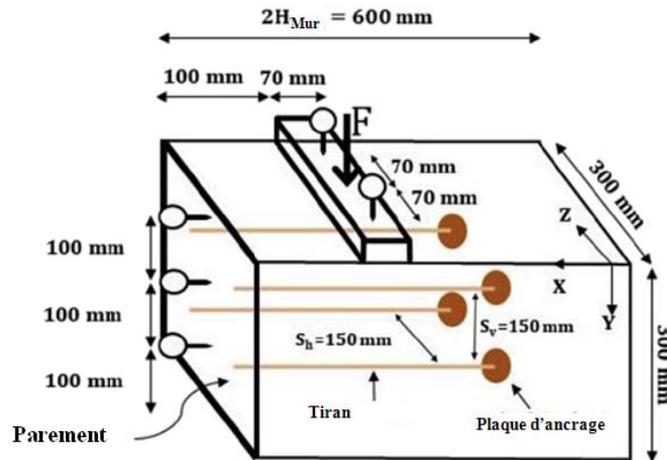


Figure III.17 Schéma du mur de soutènement [15].

Le tableau III.8 présente l'ensemble des essais ainsi que les paramètres constants et variables de chaque essai.

Tableau III.8 Définitions des essais effectués.

Ancrages à plaques	Configurations de renfort	Remblai (% en poids RCR)
C1	Losange, carré, 5 ancrages	Intacts, 5%, 10%, 15% et 20%
C2	Losange, carré, 5 ancrages	Intacts, 5%, 10%, 15% et 20%
C3	Losange, carré, 5 ancrages	Intacts, 5%, 10%, 15% et 20%
S1	Losange, carré, 5 ancrages	Intacts, 5%, 10%, 15% et 20%
S2	Losange, carré, 5 ancrages	Intacts, 5%, 10%, 15% et 20%
S3	Losange, carré, 5 ancrages	Intacts, 5%, 10%, 15% et 20%

### III.3.4 Résultats et discussion

#### III.3.4.1 L'effet de la configuration des plaques d'ancrages

Les résultats des essais effectués sur le sol sans RCR avec des plaques d'ancrage et des configurations de renforcement sont résumés sur la Figures III.18 .

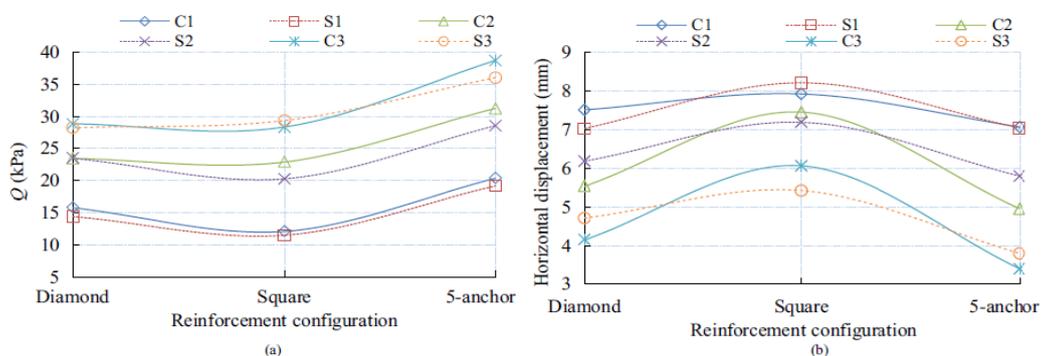


Figure III.18 (a) Comparaisons de la capacité portante de la semelle et (b) Comparaisons du déplacement horizontal du mur pour six armatures [15].

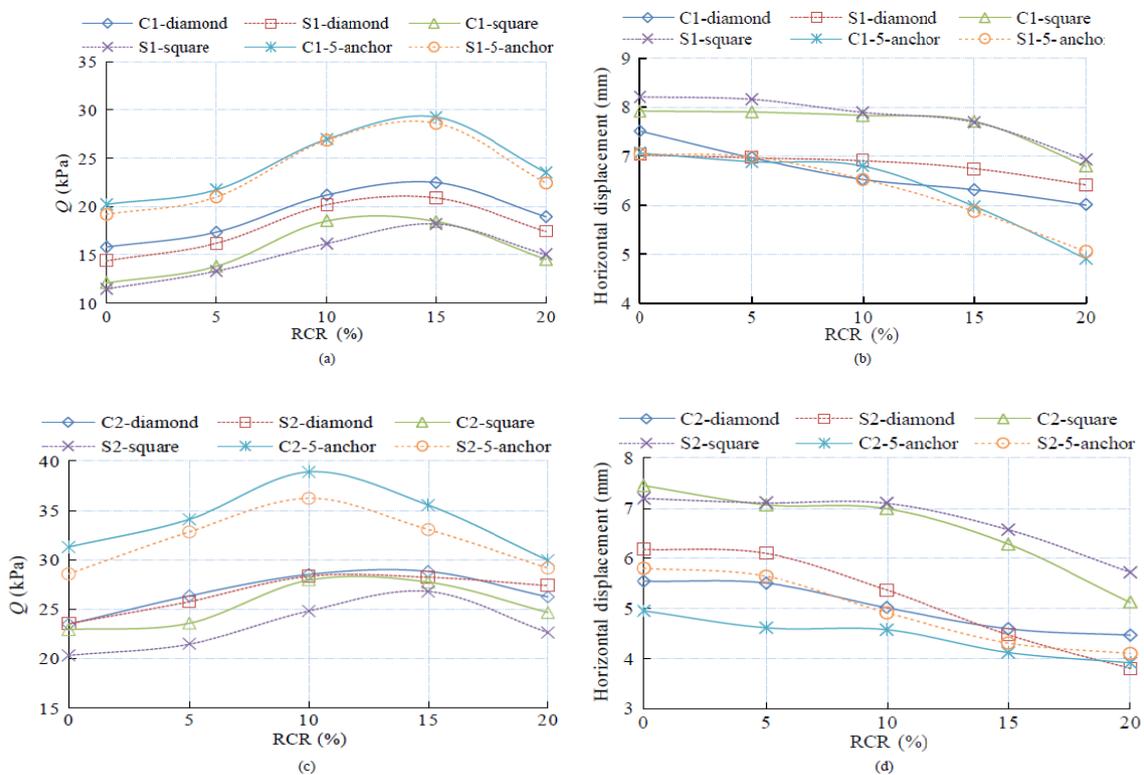
En fonction des types d'ancrages, les résultats des essais effectués sur un sol sans RCR sont résumés à la Fig.III.18. La capacité portante maximale a été trouvée pour les murs construits à l'aide des grandes, moyennes et petites plaques d'ancrage dans l'ordre de leur apparence.

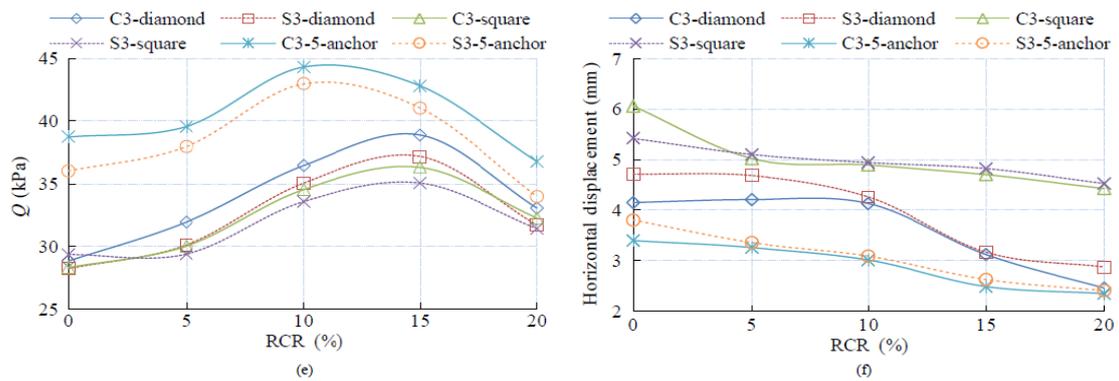
Les points remarquables ici sont l'amélioration significative de la capacité portante avec le changement de la dimension des plaques de petite à moyenne ainsi avec le changement des dimensions des plaques de moyenne à grande. Les petites plaques ont une résistance limitée contre la pression latérale du sol.

La comparaison des courbes des déplacements horizontaux des murs ont indiqué que les petites plaques donnent des déplacements horizontaux maximaux. La réduction des déplacements des parois changent avec les dimensions des plaques de petites à moyennes, moyennes à grandes et petites à grandes (pour les formes carrées et circulaires).

Dans 77% des expériences, les plaques circulaires ont provoqué une plus grande capacité portante dans la semelle que les plaques carrées. Dans 55% des expériences, les déplacements horizontaux des murs de soutènement dans ces plaques sont inférieurs à celui des plaques carrées [15].

Les résultats de la capacité portante de la semelle et des déplacements horizontaux du mur pour les différents pourcentages en RCR sont illustrés à la Figure. III.19.

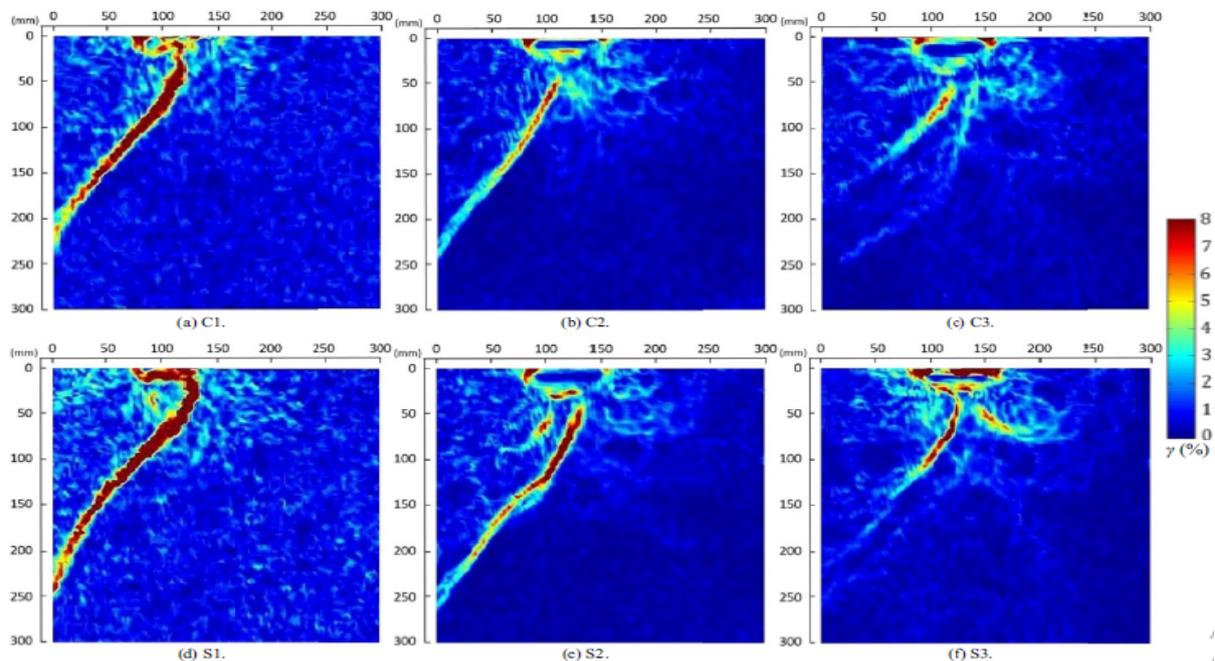




**Figure III.19** La capacité portante de la semelle et les déplacements horizontaux du mur en fonction des pourcentages (RCR) dans le remblai [15].

La comparaison entre les essais pour différents pourcentages en RCR a montré une augmentation de 8,5% de la capacité portante du mélange de sable avec 5% en poids de RCR par rapport au sable sans RCR, une augmentation de 17% du mélange de sable avec 10% en poids RCR par rapport au mélange de sable avec 5% en poids de RCR, une augmentation de 2,3% du mélange de sable avec 15% en poids de RCR par rapport au mélange avec 10% en poids de RCR, et une diminution de 14,5% du mélange de sable avec 20% en poids de RCR par rapport au mélange avec 15%.

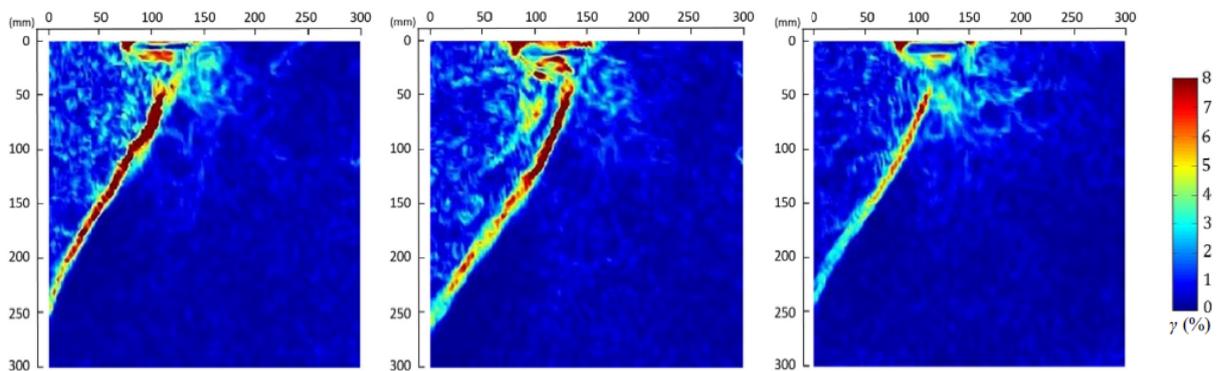
### III.3.4.2 Résultats PIV



**Figure III.20** Résultats PIV pour six renforts avec une configuration à 5 ancrages dans le sol d'origine (sans RCR) [15].

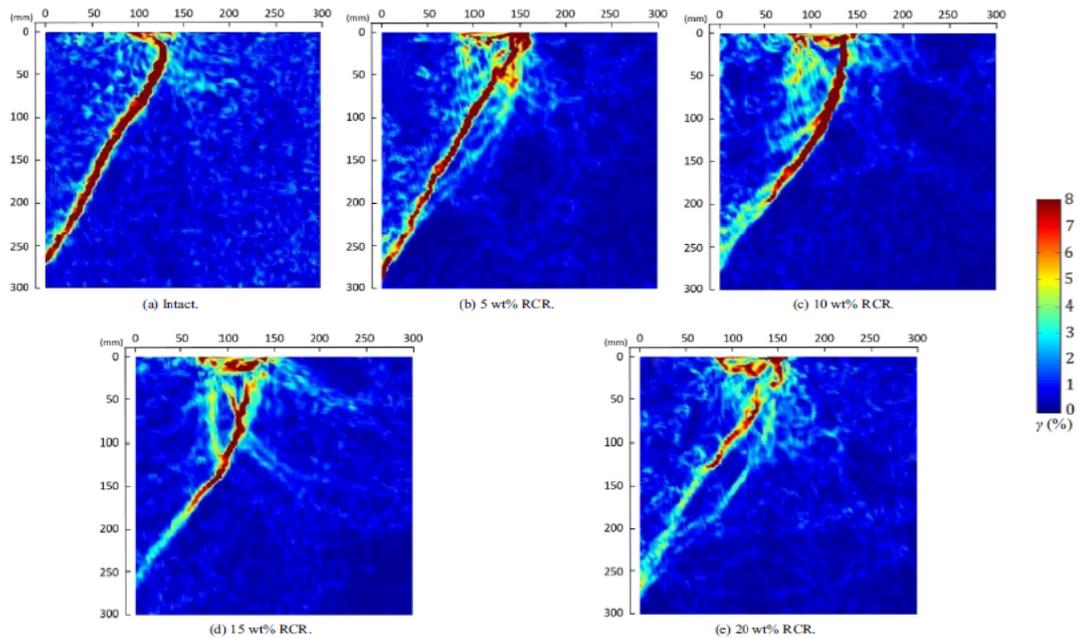
Les résultats PIV ont été comparés en termes d'effets de la forme et des dimensions des plaques ancrages, de la configuration des ancrages et des pourcentages en RCR sur le développement de la surface de glissement critique. La figure III.20 illustre cette comparaison pour six ancrages avec la configuration à 5 ancrages intégrés dans le remblai sans RCR.

Le côté droit de cette figure illustre la plage de la déformation des particules. La rupture du coin est entièrement formée dans les petites plaques carrées et circulaires, qui ont également la plus forte contrainte sur leurs surfaces de glissement. Dans les plaques d'ancrage carrées et circulaires de taille moyenne, le coin de rupture n'est pas complètement formé et les surfaces de glissement s'estompent à des profondeurs du remblai et à une courte distance du revêtement. Les déformations sur la surface de rupture des murs stabilisés avec de tels renforts sont limitées et de petites déformations se produisent à mi-hauteur du mur [15]. Pour les plaques d'ancrage carrées et circulaires de grandes dimensions, le coin de rupture n'est pratiquement pas formé et seules de petites surfaces de glissement sont formées dans la profondeur du remplissage, qui s'estompe en se déplaçant sur une courte distance de la semelle. Des déformations plus petites se produisent sur les surfaces de glissement des plaques circulaires par rapport aux plaques carrées, ce qui prouve leur meilleure performance en termes de stabilité des parois [15].



**Figure III.21** Résultats PIV pour le renforcement C2 intégré dans le sol d'origine avec trois configurations [15]

Les analyses PIV du renforcement C2 encastree dans le sol d'origine avec les trois configurations sont présentées sur la Figure.III.21. En accord avec les déplacements horizontaux, les surfaces de glissement pour les configurations carrées et losange sont entièrement développées. Néanmoins, les valeurs des déformations sur la surface de glissement de la configuration losange sont sensiblement inférieures à celles de la configuration carrée. Ce résultat peut prouver que les déplacements sont plus faibles que celles de la configuration carrée. Un coin de rupture incomplet s'est développe dans le sol renforcé avec la configuration à 5 ancrages et les déformations sur la surface de glissement critique atteignent leur valeur la plus faible dans la profondeur du remblai.



**Figure III.22** Résultats PIV pour le renforcement S2 avec la configuration losange dans cinq mélanges.

Pour évaluer l'effet du RCR sur le coin de rupture, des analyses PIV ont été effectuées pour l'ancrage S2 avec une configuration losange intégrée dans cinq différents pourcentages en RCR (Fig. III.22). Une comparaison entre ces conceptions montre qu'une augmentation de la teneur en RCR du remblai réduit la formation et l'expansion de la surface de rupture critique sur le mur. Par conséquent, pour les remplissages avec 15% du poids et 20% du poids de RCR, le coin de rupture n'est pas formé et la surface de glissement s'estompe avec la profondeur.

La déformation des particules sur la surface de glissement critique diminue considérablement avec une augmentation de la teneur en RCR. La diminution de la déformation des particules du sol sur la surface de rupture critique et la réduction de l'expansion de la surface de rupture dans les remblais avec 15% et 20% en poids de RCR démontrent l'effet positif du RCR sur la réduction de la pression latérale appliquée sur le mur et l'absence de la formation de coins de rupture [15].

### III.4 Stabilisation d'un talus avec des éléments en plastique recyclé RPP

#### III.4.1 Fabrication des éléments en plastique recyclé

Les produits des éléments en plastique recyclé sont fabriqués à partir des déchets industriels ou post-consommation constitués principalement de matériaux polymères (généralement du polyéthylène haute ou basse densité). En règle générale, les éléments en plastique recyclé sont composées des résines suivantes [15]:

- Polyéthylène de haute densité (HDPE) - 55 à 70 %,
- Polyéthylène de basse densité (LDPE) - 5 à 10 %,
- Polystyrène (PS) - 2 à 10 %,
- Polypropylène (PP) - 2 à 7 %,
- Polyéthylène-téréphtalate (PET) - 1 à 5%, et
- Quantités variables d'additifs (sciure, cendres volantes et autres déchets) - 0 à 5 %.

Les fabricants utilisent également différents procédés pour produire leur produit [5]. Le principal processus couramment utilisés est le moulage par compression. Dans le moulage par compression, les flux de déchets constitutifs sont pulvérisés, mélangés ensemble, chauffés jusqu'à ce qu'ils soient partiellement fondus, puis formés par compression dans des moules. Dans ce processus, la matière première est comprimée dans les formes et dimensions souhaitées et ensuite durcie par la chaleur et la pression.

Les poids unitaires varient de  $7 \text{ kN/m}^3$  à  $9,5 \text{ kN/m}^3$ . La résistance à la compression varie de  $11,7 \text{ MPa}$  à  $26,2 \text{ MPa}$ . Il est constaté que l'utilisation d'un seul polymère (HDPE) a donné un module d'élasticité significativement plus élevé pour les éléments en plastique [4].

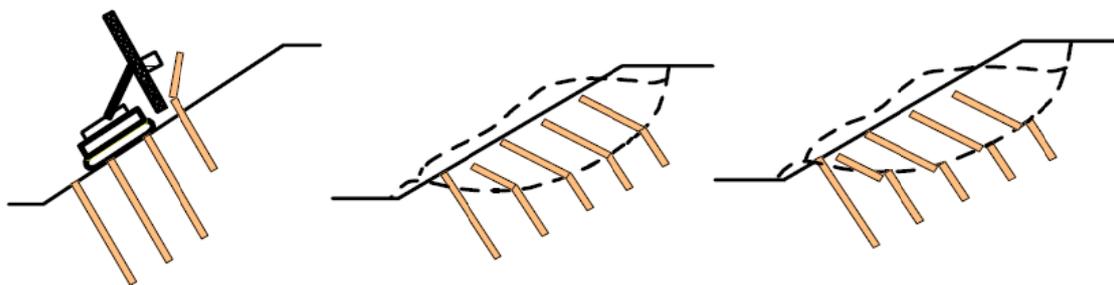
### III.4.2 Les essais standard pour les éléments de plastique recyclé

Les fabricants des produits en plastique recyclé définissent généralement les propriétés de leurs produits tels que : la résistance, l'absorption d'eau, le retrait, la densité et d'autres propriétés. Pour les applications de stabilisation des pentes, les principales propriétés intéressantes sont la résistance et la rigidité (à la fois axiales et en flexion) et la résistance au cisaillement comme illustré à la figure III.23.

Durabilité d'installation

Rupture par flexion et fluage

Rupture par cisaillement



**Figure III.23** Trois modes de rupture potentiels pour les éléments de plastique recyclé utilisés dans la stabilisation des pentes [14].

### III.4.3 Programme d'essais réalisé sur les éléments en plastique recyclé RPP

Une série d'essais au laboratoire a été réalisée pour évaluer les propriétés mécaniques des éléments en plastique recyclé de trois fabricants différents. Les essais effectués comprenaient des essais à la compression uniaxiale, des essais de flexion. Les essais ont été effectués sur des spécimens de trois fabricants différents, désignés par les fabricants A, B et C, comme le résume le tableau III.9. Tous les éléments mesuraient (90mm x90 mm) de section transversale par 2,4 m de longueur [14].

**Tableau III.9** Résumé des essais réalisés sur les éléments en plastique recyclé.

Lot d'échantillons	Constituant principal	Condition	Profondeur (in)	Largeur (in)	Longueur (in)	Poids unitaire (lb/ft <sup>3</sup> )
A1	LDPE	vierge	3.6	3.6	7.0	61.2
A2	LDPE	vierge	3.5	3.5	6.9	63.4
A3	LDPE	vierge	3.6	3.6	7.1	64.5
A4	LDPE	vierge	3.6	3.4	7.0	64.6
A5	LDPE	vierge	3.4	3.4	7.1	58.9

### III.4.3.1 Essai de compression uniaxiale

Des essais de compression uniaxiale ont été effectués sur des échantillons découpés à partir d'éléments en plastique recyclé. La section transversale de l'élément est de forme carrée avec des dimensions latérales de (90 mm) et une longueur nominale de (180 mm). Les essais ont été réalisés à l'aide d'une presse de compression à contrainte contrôlée. Comme le montre la figure III.24, Un comparateur a été placé pour mesurer les déplacements pendant l'essai [14].



Figure III.24 Configuration des essais de compression uniaxiale[14] .

La déformation axiale a été calculée en divisant le déplacement incrémentiel de la tête de chargement par la hauteur initiale de chaque échantillon. Les modules sécants ont été établis à un et cinq pour cent des déformations comme le montre la figure III.25 à partir de la pente de la ligne droite reliant zéro pour cent des déformations aux contraintes correspondantes.

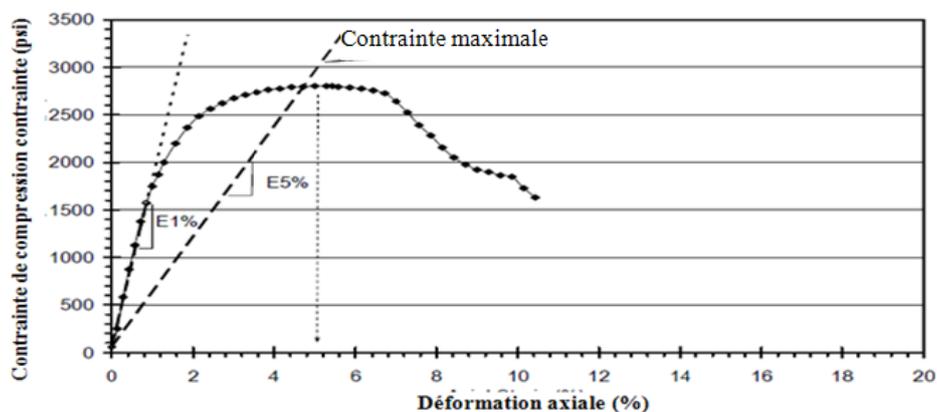


Figure III.25 Courbe des contraintes-déformations typique présentant les modules sécants [14].

### III.4.3.2 Essais de flexion sur quatre points

Des essais de flexion sur quatre points ont été réalisés pour déterminer la résistance à la flexion et la rigidité des différents éléments examinés. Les échantillons ont été coupés à des longueurs d'environ (2 m). Une photo de l'installation dans le laboratoire est montrée dans la figure III.26. La portée de support (L) variait de (1,2 m à 1,5 m) avec une portée de charge (L / 3) de (0,4 m à 0,5 m) [14].



**Figure III.26** Photo de l'essai de flexion sur quatre points en cours [14].

### III.4.4 Essai in situ sur le site I70-Emma

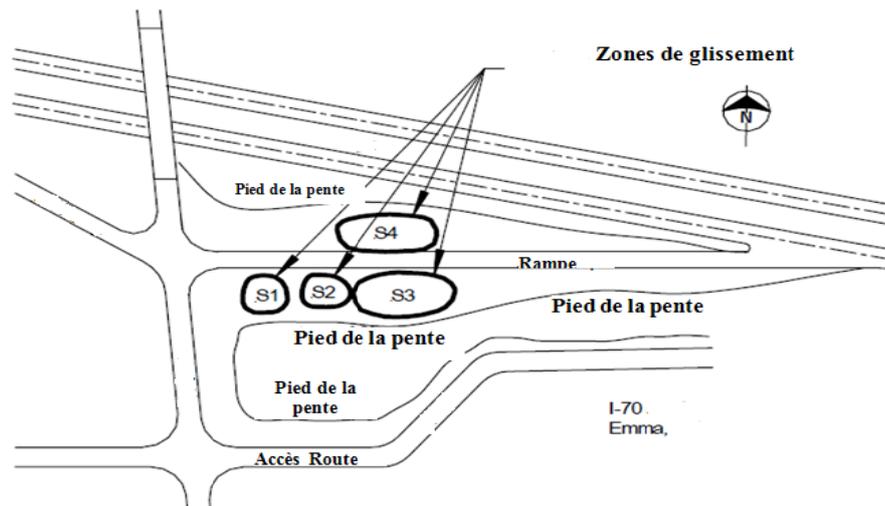
#### III.4.4.1 Caractéristiques du site

Le site I70-Emma est situé sur l'autoroute 70 à environ 105 km à l'ouest de Columbia Missouri et à environ 1 mile au nord de la ville d'Emma Missouri.

La figure III.27 présente une photo aérienne de la zone indiquant l'emplacement du site. Le talus est un remblai qui forme la rampe d'entrée en direction est de l'autoroute 70. Le remblai a une hauteur d'environ 6,7 m avec des pentes latérales variant de 2,5H:1V à 2,2H:1V. Le sol du site est composé d'un mélange d'argiles, des graviers, des galets et des gravats de construction (béton et asphalte). La figure III.28 présente une vue en plan du site indiquant les emplacements des quatre zones notées S1, S2, S3 et S4. La figure III.29 présente une photographie du côté sud du remblai suite aux glissements survenus avant la stabilisation du site [14].



**Figure III.27** Photo aérienne de l'autoroute 70 près d'Emma Missouri présentant l'emplacement du site I70-Emma [14].



**Figure III.28** Vue en plan du site I70-Emma présentant les zones S1, S2, S3 et S4 [14]



**Figure III.29** Photographie du côté sud du remblai présentant les zones de glissement S1 (gauche), S2 (centre) et S3 (droite). [14]

#### III.4.4.2 Les essais réalisés sur le site

Onze sondages ont été effectués sur le site à des profondeurs allant de (3 à 10 m). Dans chaque forage, des échantillons continus avec des tubes Shelby de (7,6 cm) de diamètre ont été prélevés sur le terrain pour réaliser des essais au laboratoire de génie géotechnique de l'Université du Missouri [14].

Les paramètres de résistance effective au cisaillement ont été déterminés à partir d'essais de compression triaxiale et de cisaillement direct. Un résumé des paramètres de résistance sont donnés dans le tableau III.10.

Ces essais indiquent que la cohésion effective  $c$ , pour les sols superficiels est égale à environ (4,5 kPa) et l'angle de frottement effectif,  $\phi$  est égal à  $15^\circ$  ; la moyenne des angles ( $16^\circ$  et  $14^\circ$ ) tandis que pour les sols plus profonds  $c$  varie de (8,1 à 17,5 kPa) et  $\phi$  est d'environ 22 degrés [14].

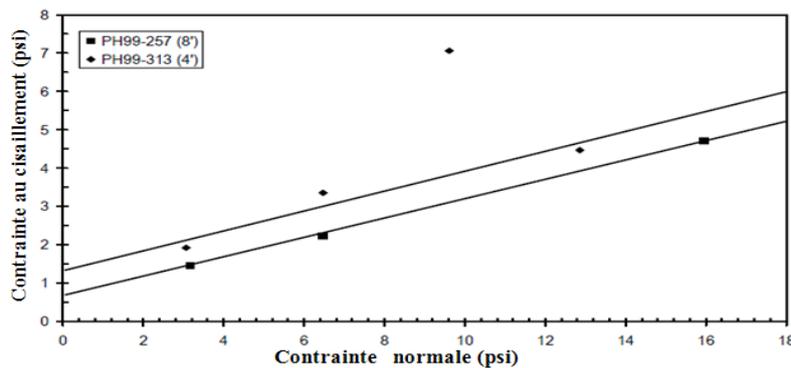
**Tableau III.10** Résumé des paramètres de résistance effective déterminés d'après les essais de cisaillement direct et triaxiale.

Strate	Profondeurs	Numéros d'échantillons	borne supérieure		borne inférieure		cisaillement direct	
			c (psf)	$\phi$ (°)	c (psf)	$\phi$ (°)	c (psf)	$\phi$ (°)
Argile superficielle	< 4.0-ft	274 313	96	16	--	--	202	14
Argile plus profonde	> 4.0-ft	277, 278 286, 287 284, 289	364	25	170	25	101	14

1 pied (1ft) = 0.3048m

11lb/ft<sup>3</sup> = 0.1572 kN/m<sup>3</sup>1ksi = 6.9MPa 1psf = 0.04788 kN/m<sup>2</sup>

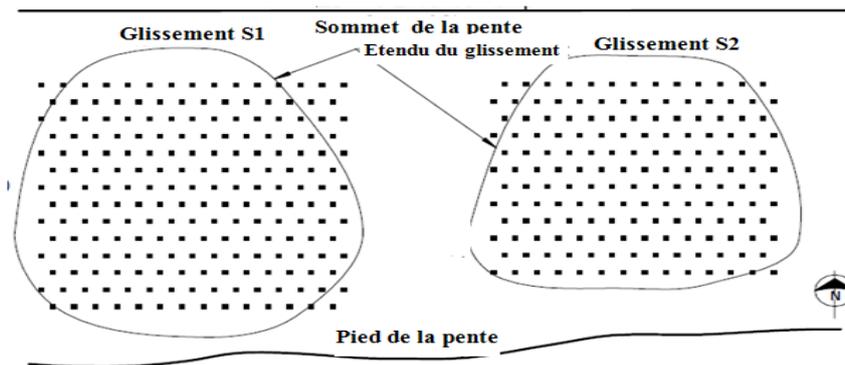
La figure III.30 présente les résultats des essais de cisaillement direct drainés effectués sur deux échantillons avec les courbes enveloppe de résistance au cisaillement maximal correspondant. Les paramètres de résistance effective sont indiqués dans le tableau III.10. Ces valeurs indiquent que les deux échantillons ont un  $\phi$  de 14 degrés, une valeur qui est inférieure à  $\phi$  obtenu à partir des résultats des essais triaxiaux. Les valeurs de c varient entre (4,5 à 9,6 kPa).

**Figure III.30** Résumé des résultats des essais de cisaillement direct [14]

#### III.4.4.3 Schémas de stabilisation des zones de glissement S1 et S2

Les schémas utilisés pour stabiliser les zones de glissement S1 et S2 ont été déterminés, on supposant que la pente était essentiellement homogène et que le sol avait une cohésion négligeable ( $c = 0$ ) dans des conditions entièrement drainées.

Les configurations de renforcement sélectionnées pour la stabilisation des zones de glissement S1 et S2 sont illustrées à la figure III.31. Les deux schémas sélectionnés comprennent des éléments placés sur une grille de (0,9 m sur 0,9 m).

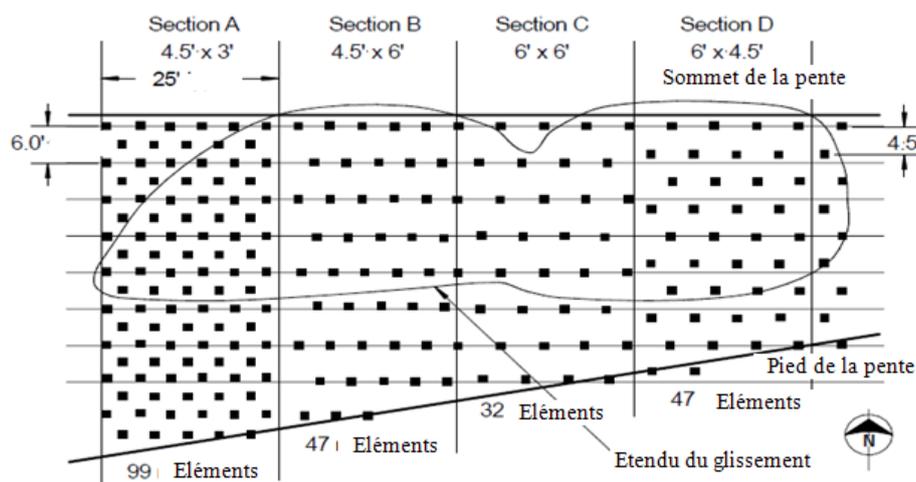


**Figure III.31** Vue en plan des zones S1 et S2 sur le site I70-Emma présentant les éléments de renforcement [14].

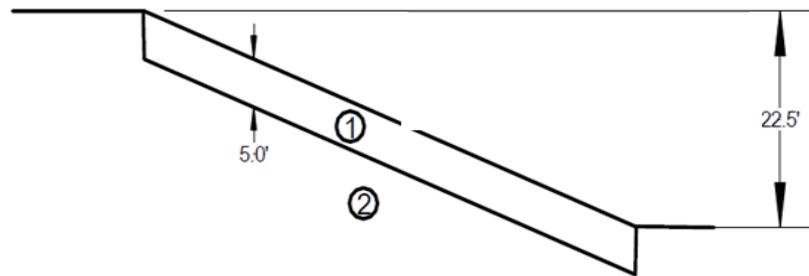
#### III.4.4.4 Schéma de stabilisation de la zone de glissement S3

Une stabilisation supplémentaire a été entreprise sur la zone de glissement S3 afin d'évaluer le potentiel de stabilisation en utilisant des modèles de renforcement plus espacés. La figure III.32 présente les configurations finales sélectionnées. La zone de glissement a été divisée en quatre sections, désignées de A à D, avec différents schémas de renforcement utilisés dans chaque section. Dans la section A, les éléments ont été placés sur une grille de (1,4 m sur 0,9 m) longitudinale par transversal. Une grille de (1,4 m sur 1,8 m) a été utilisée dans la section B, une grille de (1,8 m sur 1,8 m) a été utilisée dans la section C, et une grille de (1,8 m sur 1,4 m) a été utilisée dans la section D. La zone de glissement S4 a été reclassée à sa pente d'origine pour servir de section de contrôle [14].

Pour l'étude de la stabilité, il a été considéré le profil à deux couches représenté sur la figure III.33. Pour ces analyses, il est supposé que la couche supérieure ( $c = 4,5$  kPa) et  $\phi = 15$  degrés tandis que la couche inférieure avait ( $c = 15$  kPa) et  $\phi = 22$  degrés [14].



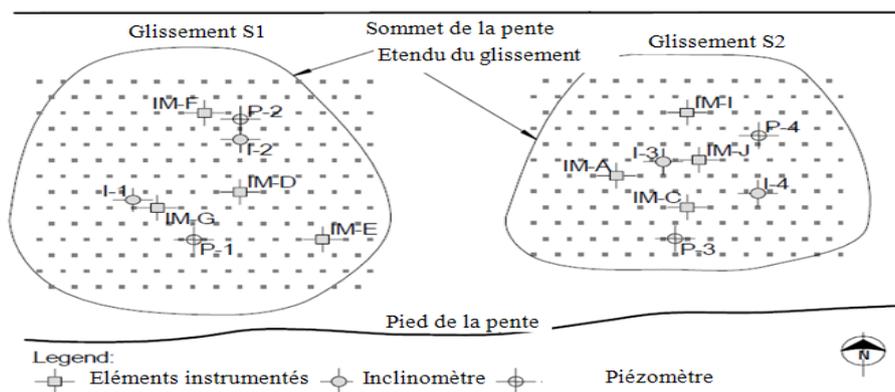
**Figure III.32** Vue en plan des schémas de stabilisation sélectionnés pour la zone de glissement S3 sur le site d'essai I70-Emma.



**Figure III.33** Coupe transversale du profil considéré pour l'analyse de la stabilité sur le site I70-Emma [14].

### III.4.5 Equipement et Instrumentation sur site

Plusieurs types d'instrumentation ont été installés sur le site d'essai I70-Emma au cours de cette étude. L'instrumentation installée dans les zones S1 et S2 comprend des éléments de renforcement instrumentés pour surveiller les chargements dans les éléments de renforcement, des inclinomètres pour surveiller les déformations latérales dans le talus, des piézomètres pour surveiller les éventuelles pressions interstitielles positives. La figure III.34 illustre les emplacements des différents types d'instrumentation utilisés [14].



**Figure III.34** Vue en plan des zones S1 et S2 présentant les emplacements des instruments installés sur le site I70-Emma [14].

Dix éléments en plastique recyclé installés sur site ont été instrumentés avec des jauges de contrainte électrique de 120 ohms. La figure III.34, présente quatre éléments instrumentés, désignés par IM-D, IM-E, IM-F et IM-G, ont été installés dans la zone de glissement S1 et les membres instrumentés IM-A, IM-C, IM-I et IM-J ont également été installés dans la zone de glissement S2.

Cinq inclinomètres ont également été installés sur le site pour surveiller les déformations dans les zones stabilisées (S1 et S2) et la section de contrôle S3.

La figure III.35 présente une vue en plan de la zone de glissement S3 indiquant les emplacements approximatifs de l'instrumentation installée dans la zone. Les membres instrumentés IM-19 et IM-22 ont été installés dans la section A et la section D, respectivement, tandis que deux membres instrumentés (IM-17 et IM-24) et C (IM-18 et IM-23) ont été installés dans les sections B [14].

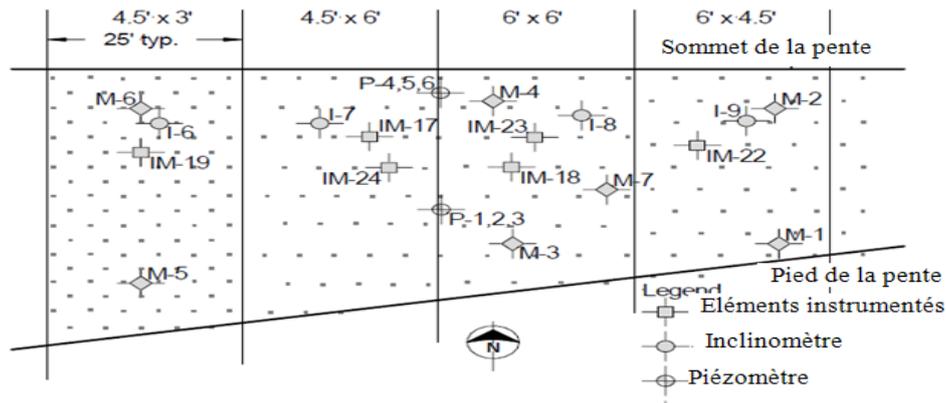


Figure III.35 Vue en plan de la zone S3 sur le site I70-Emma.

### III.4.6 Les résultats obtenus sur le site

#### III.4.6.1 Mesures d'inclinomètre

La figure III.36 présente le profil des déplacements latéraux déterminés à partir de l'inclinomètre I-2 dans la zone de glissement S1. Comme montré sur la figure, les mouvements ont généralement été plus importants près de la surface du sol avec des mouvements décroissants avec la profondeur [14].

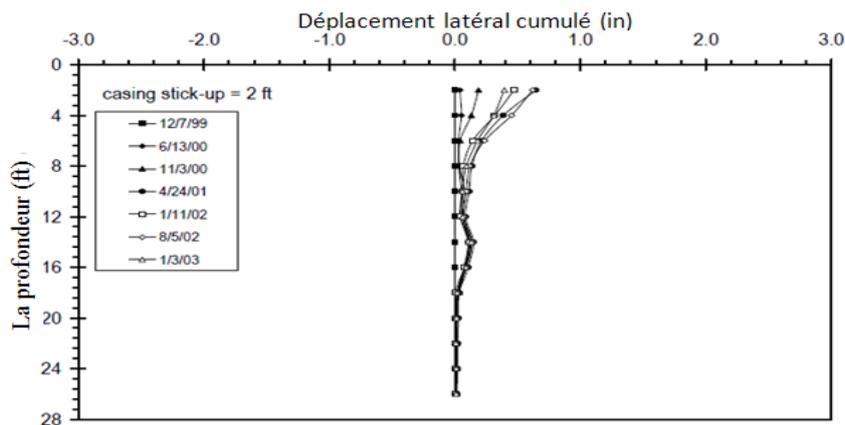
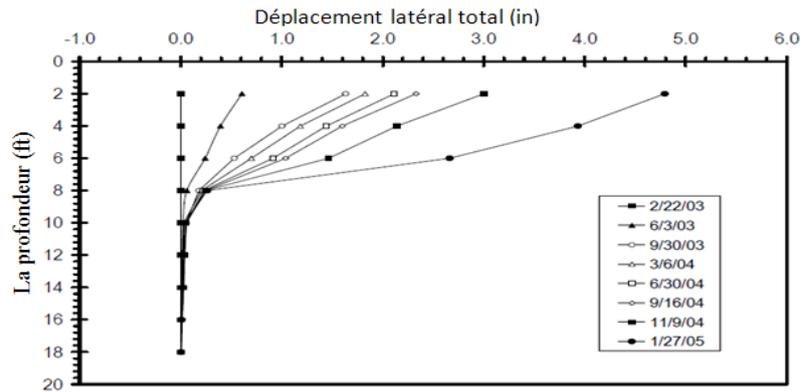


Figure III.36 Profil des déplacements latéraux dans la zone de glissement S1 sur le site I70-Emma [14].

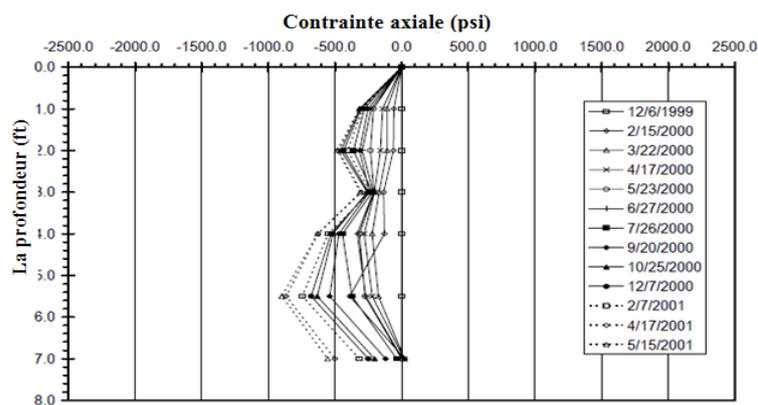
La figure III.37 présente les mesures des déplacements latéraux en fonction de la profondeur pour l'inclinomètre I-7, ce qui est typique de la réponse générale observée pour tous les inclinomètres dans la zone de glissement S3.



**Figure III.37** Déplacement en fonction de la profondeur pour l'inclinomètre I-7, section B, sur le site d'essai I70-Emma [14].

### III.4.6.2 Renforts instrumentés

Des lectures des éléments de renfort instrumentés ont été prises régulièrement. Ces lectures ont été traitées et interprétées pour établir les amplitudes des contraintes axiales et des moments de flexion mobilisés dans les éléments RPP [14].



**Figure III.38** Contrainte axiale incrémentale mesurée dans l'élément instrumenté IM-G dans la zone de glissement S1 sur le site [14].

La figure III.38 présente la répartition des contraintes axiales déterminées pour l'élément instrumenté IM-G. La distribution observée est généralement parabolique avec des contraintes négligeables à proximité des deux extrémités de l'élément et la contrainte axiale maximale à proximité du centre de l'élément. Les membres IM-C et IM-H ont des distributions similaires pour les contraintes axiales bien que les amplitudes des contraintes diffèrent.

La figure III.39 présente la distribution des moments de flexion déterminés pour l'élément instrumenté IM-H. La distribution est généralement parabolique avec des moments négligeables près des extrémités de l'élément et le moment maximum se produit près du centre de l'élément. Les moments sont généralement positifs sur toute la longueur du membre [14].

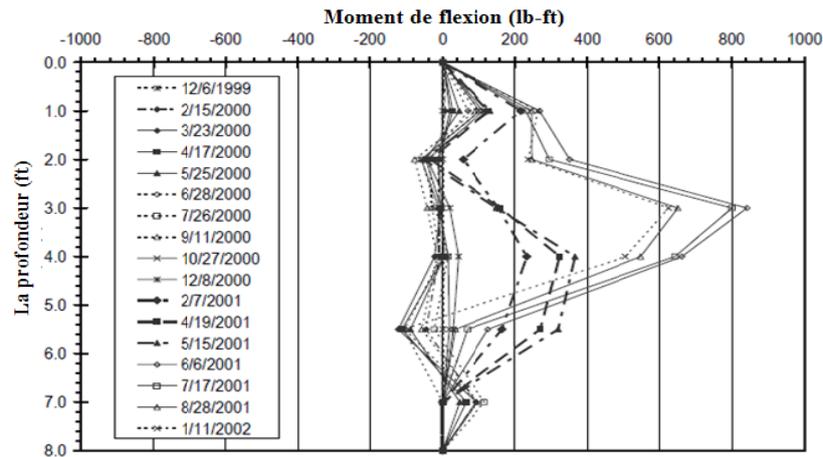


Figure III.39 Moments de flexion mesurés dans l'élément instrumenté IM-H sur le site d'essai.

### III.4.6.3 Mesures de la pression interstitielle

Les niveaux piézométriques mesurés sur le site I70-Emma entre janvier 2003 et janvier 2005 sont représentés sur la figure III.40. Les lectures des piézomètres indiquent systématiquement une condition d'eau suspendue dans la pente, comme en témoignent les niveaux piézométriques constamment plus élevés pour les piézomètres supérieurs que ceux observés pour les piézomètres plus profonds.

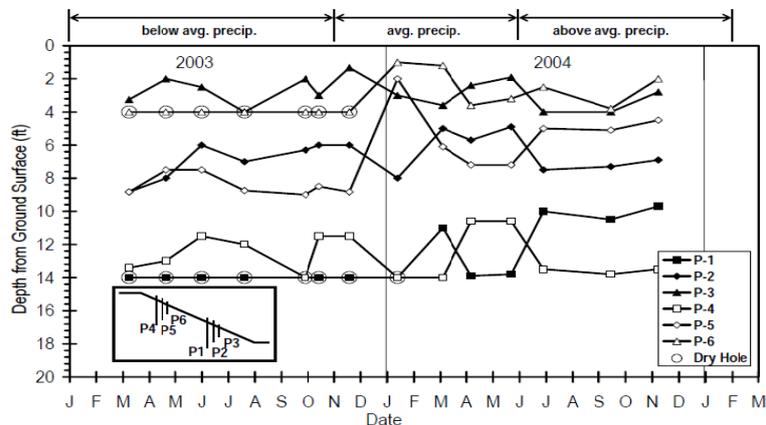


Figure III.40 Niveaux d'eau piézométriques mesurés sur le site d'essai I70-Emma.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté des essais effectués sur des matériaux composites à base de sol et matériaux recyclés. Parmi ces essais, deux essais ont été réalisés au laboratoire et le troisième in situ. Dans le premier essai, le chercheur a voulu améliorer les sols avec des déchets plastiques PET, les résultats ont indiqués que le composite sable- plastique PET peut être appliqué dans le domaine du génie civil et routier par l'amélioration de la capacité portante du sol en tant que couche de fondation pour les édifices et couche de forme pour les routes.

Dans le deuxième essai, un mélange de pouzzolane et sable a été utilisé comme remblai dans un modèle réduit d'un mur de soutènement renforcé avec des tirants d'ancrages horizontales fixés à leurs limites avec des plaques de différentes formes et configuration. La capacité

portante et les déplacements horizontaux des murs de soutènement ont été surveillés en exerçant une charge statique pour étudier les effets de l'ajout de différents pourcentages de poudrettes de caoutchouc. Pour visualiser la surface de glissement critique de la paroi, la technique de vélocimétrie d'image de particules (PIV) a été utilisée. Les résultats ont montré que les plaques d'ancrage circulaires garantissent une capacité portante et une stabilité de paroi supérieures à celles des plaques carrées. De plus, l'ajout de 15% en poids de RCR a fourni une capacité portante maximale du mur. L'augmentation du pourcentage en poids de RCR à 20% en poids a entraîné une réduction significative du déplacement horizontal du mur. Par conséquent, une augmentation de la teneur en RCR a diminué la formation du coin de rupture dans les mélanges de sable avec 15% en poids et 20% en poids de RCR.

L'approche de conception générale développée dans le troisième essai est la conception d'un schéma de stabilisation utilisant des éléments plastique recyclé RPP. Les propriétés des matériaux des éléments varient selon le procédé de fabrication et les constituants utilisés dans le mélange. L'objectif de cet essai est la stabilisation des glissements de surface survenues sur le site I70-Emma avec des éléments en plastique recyclé RPP. Les performances observées sur site peuvent être résumées en trois phases. Dans la première phase, il a été observé des mouvements minimes au niveau des zones stabilisées avec des RPP due à une contribution primaires des éléments en plastique recyclé au renforcement des pentes. À la phase 2, il a été constaté une augmentation des mouvements en réponse à l'augmentation des pressions interstitielles dans la pente en même temps que l'augmentation des charges repris par les éléments en plastique recyclé. Ces mouvements sont simplement des mouvements nécessaires pour mobiliser la résistance des éléments de recyclage en plastique. Enfin, la phase 3 se caractérise par un mouvement décroissant qui s'accompagne simultanément d'une stabilisation des efforts dans les RPP. Cette étape résulte de l'équilibre de la pente et des éléments en plastique recyclé.

### Références bibliographiques du troisième chapitre

- [1] Ahmed I. *Laboratory study on properties of rubber-soils. Final report FHWA/IN/ JHRP-93/4. Purdue University (1993).*
- [2] *ASTM D3080-04. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, USA: ASTM International (2004).*
- [3] *ASTM D6270-08. Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications. West Conshohocken, USA: ASTM International (2012).*
- [4] Breslin, V.T., U. Senturk, and C.C. Berndt , "Long-term Engineering Properties of Recycled Plastic Lumber Used in Pier Construction," *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 23, pp. 243-258.(1998).
- [5] Bruce, A.H., G.R. Brenniman, and W.H. Hallenbeck , *Mixed Plastics Recycling Technology*, Noyes Data Corporation, Park Ridge.(1992)
- [6] *BS1377, Methods of testing for soils for civil engineering purposes, London: British Standards Institution. (1990).*
- [7] Cecich V, Gonzales L, Holsaeter A, Williams J, Reddy K. *Use of shredded tires as lightweight backfill material for retaining structures. Waste Management & Research 14(5):433e51.(1996).*
- [8] Das, B., *Principles of Geotechnical Engineering*, Cengage Learning. (2009).

- [9] Edil T, Bosscher P. *Engineering properties of tire chips and soil mixtures. Geotechnical Testing Journal*;17(4) (1994).
- [10] Edinçliler A, Baykal G, Saygılı A. *Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction. WasteM anagement*;30(6) (2010).
- [11] Foose GJ, Benson CH, Bosscher PJ. *Sand reinforced with shredded waste tires. Journal of Geotechnical Engineering*;122(9) (1996).
- [12] John G. Luwalaga, John J. Bowders . *Analysing the Behaviour of Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Waste. A Research Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Engineering (M Eng.) in the Faculty of Engineering at Stellenbosch University.*(2016).
- [13] Kalumba, D. & Chebet, F.C., *Utilisation of polyethylene (plastic) shopping bags waste for soil improvement in sandy soils. Proc.18th ICSMGE.* (2013).
- [14] Loehr, J. E., and Bowders, J. J.. *Slope Stabilization using Recycled Plastic Pins – Phase III, Final Report: RI98-007D, Missouri Department of Transportation, Jefferson City, Missouri.* (2007)
- [15] Matin Jalali Moghadam, Amirali Zad, Nima Mehrannia, Nader Dastaran. *Experimental evaluation of mechanically stabilized earth walls with recycled crumb rubbers. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 947-957(2018).
- [16] McLaren, M.G., *Recycled Plastic Lumber and Shapes: Design and Specifications, Proceedings of the 13th Structures Congress, Vol. 1, ASCE, pp. 819-833.*(1995).
- [17] Srivastava A, Pandey S, Rana J. *Use of shredded tyre waste in improving the geotechnical properties of expansive black cotton soil. Geomechanics and Geoengineering* 14;9(4):303e11.
- [18] TMH1, *Standard methods of testing road construction materials Second., Pretoria, South Africa.* (1986).
- [19] Tweedie J, Humphrey D, Sandford T. *Tire shreds as lightweight retaining wall backfill: active conditions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*;124(11):1061e70.1998.
- [20] Wood DM. *Geotechnical modelling. CRC Press;* (2004).

# CHAPITRE IV

## IV.1 Le cade PLAXIS

PLAXIS est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. 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. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows. L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves).

### IV.1.2 Le programme d'entrée des données (input)

Ce programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

Le menu principal du programme d'entrée des données contient des menus déroulant relatifs à la plupart des options pour manipuler des fichiers, transférer des données, afficher des graphiques, créer un modèle géométrique, générer des maillages d'éléments finis et entrer des données en général. Une distinction peut être faite entre le menu du mode de création de la géométrie et le menu des conditions initiales. Le premier est composé des menus File, Edit, View, Geometry, Loads, Materials, Mesh, Initial et Help [1].

Le second est composé des menus File, Edit, View, Geometry, Generate et Help.

**Le menu File:** Permet de créer un nouveau projet, d'ouvrir un projet existant, de sauvegarder le projet en cours sous le nom existant, d'imprimer le modèle géométrique sur une imprimante choisie et permet de quitter le programme Input....

**Le menu Edit:** Permet de restaurer l'état précédent du modèle géométrique et Permet de copier le modèle géométrique dans le presse-papiers de Windows.

**Le menu View:** Permet de zoomer sur une zone rectangulaire (Le programme agrandira la surface sélectionnée), de restaurer la vue précédant l'agrandissement le plus récent, de voir le tableau des coordonnées x et y de tous les points de la géométrie et Permet de montrer ou cacher les flèches indiquant les axes x et y.

**Le menu Geometry:** Le menu Geometry contient les options de base permettant de fabriquer un modèle géométrique.

**Le menu Loads:** Le menu Loads contient les options qui permettent d'ajouter des charges et des conditions aux limites au modèle géométrique.

**Le menu Materials:** Le menu Materials est utilisé pour activer la base de données de création et de modification des propriétés des matériaux pour les sols et les interfaces, les plaques, les géo grilles et les ancrages.

**Le menu Mesh:** Le menu Mesh contient les options permettant de définir le type d'éléments (6 ou 15 noeuds), générer un maillage d'éléments finis ou appliquer un raffinement local ou global du maillage.

**Le menu Initial:** Le menu Initial permet d'accéder au menu des conditions initiales du programme Input.

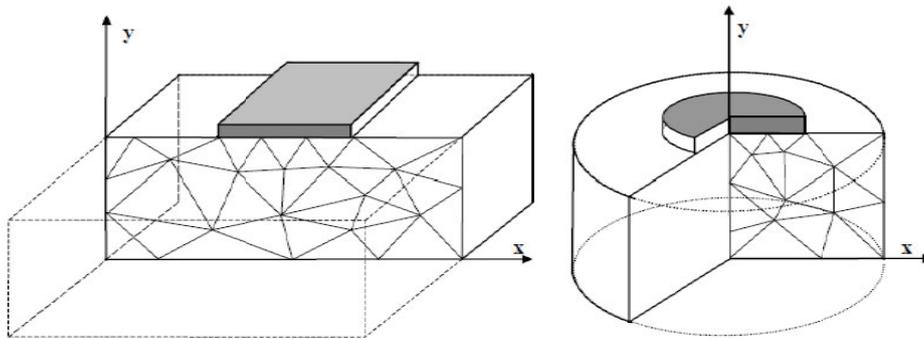
### a) Réglages généraux

La fenêtre des réglages généraux (General settings) apparaît lors de la création d'un nouveau projet et peut ensuite être ouverte depuis le menu File.

**Le type de modèle (Model) :** PLAXIS Version 8 peut être utilisé pour réaliser des analyses par éléments finis en deux dimensions. Les modèles d'éléments finis peuvent être soit plans (Plane strain), soit axisymétriques (Axisymmetry).

Les modèles en déformations planes (Plane strain) sont utilisés pour des structures ayant une section (plus ou moins) uniforme, et avec un état de contraintes et un schéma de chargement uniformes sur une longueur suffisante perpendiculairement à la section (direction z).

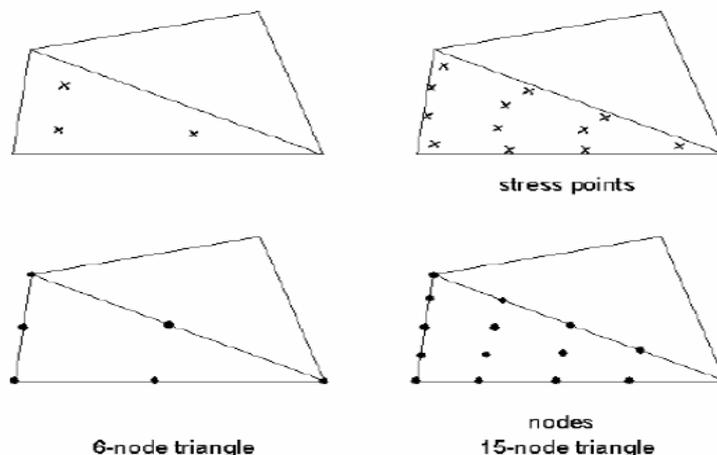
Les modèles axisymétriques (Axisymmetry) sont utilisés pour des structures circulaires ayant une section radiale (plus ou moins) uniforme, avec un schéma de chargement réparti autour de l'axe central et des états de contrainte et de déformation identiques selon les directions radiales. Pour un modèle d'éléments finis à deux dimensions, le choix de Plane strain ou de Axisymmetry a pour conséquence de ne laisser que deux degrés de liberté en translation par nœud dans les directions x et y [1].



*Figure IV.1 Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique.*

**Les éléments :** L'utilisateur doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume. Le triangle à 15 nœuds est un élément très précis qui a produit des résultats en contraintes de haute qualité sur différents problèmes, comme par exemple le calcul de la rupture de sols incompressibles.

Le triangle à 6 nœuds est un élément relativement précis donnant de bons résultats pour les analyses standards en déformations, à condition d'utiliser un nombre suffisant d'éléments.



*Figure IV.2 Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol [1].*

**Les unités :** Les unités de longueur, force et temps à utiliser dans l'analyse sont définies lorsque les données d'entrées sont spécifiées. Ces unités fondamentales sont à définir dans l'onglet Dimensions de la fenêtre de réglages généraux (General settings).

**Les dimensions:** l'utilisateur doit spécifier les dimensions de la planche à dessin.

### **b) Blocages**

Les blocages sont des déplacements imposés nuls. Ces conditions peuvent être appliquées sur des lignes géométriques comme sur des points. Les blocages peuvent être sélectionnés à partir du menu Loads. Dans le modèle géométrique, une distinction peut être faite entre les blocages horizontaux (Horizontal fixity) ( $u_x = 0$ ) et les blocages verticaux (Vertical fixity) ( $u_y = 0$ ). On peut également choisir un blocage total (Total fixity) qui est la combinaison des deux précédents ( $u_x = u_y = 0$ ).

### **c) Propriétés des matériaux**

Dans PLAXIS, les propriétés du sol et les propriétés des matériaux des structures sont toutes stockées dans une base de données. Il y a quatre types différents de matériaux :

Sols et interfaces (Soil & Interfaces), plaques (Plates), géogrilles (Geogrids) et ancrages (Anchors). A partir de la base de données, ces paramètres peuvent être assignés à des Couches de sol, ou aux éléments de structure dans le modèle géométrique.

### **d) Modélisation du comportement d'un sol**

Le modèle bien connu de Mohr Coulomb peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel du sol. Ce modèle, élastique parfaitement plastique, nécessite cinq paramètres fondamentaux qui sont : le module d'Young  $E$ , le coefficient de Poisson  $\nu$ , la cohésion  $c$ , l'angle de frottement  $\phi$ , et l'angle de dilatance  $\psi$ . PLAXIS contient également des modèles de sols plus avancés.

### **e) Génération du maillage**

Lorsqu'un modèle géométrique est entièrement défini et que les propriétés des matériaux sont assignées à toutes les couches et à tous les éléments de structure, la géométrie doit être divisée en éléments finis afin de réaliser le calcul par éléments finis. Une composition d'éléments finis s'appelle un maillage d'éléments finis. PLAXIS permet une génération automatique des maillages d'éléments finis.

### **f) Conditions initiales**

Une fois le modèle géométrique créé et le maillage d'éléments finis généré, l'état de contraintes initiales et la configuration initiale doivent être spécifiés. Cela se fait dans la partie traitant des conditions initiales du programme d'entrée des données. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (mode des conditions hydrauliques) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique).

## g) Calculs

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués. Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type des calculs à réaliser ainsi que les cas de chargement ou les étapes de construction qui seront à appliquer. On opère grâce au programme de calcul (Calculation).

### IV.1.3 Le programme de calcul

Après la sélection (automatique) d'un projet, la fenêtre principale du programme de calcul apparaît ; elle comporte les points suivants :

**Le menu de calcul:** Le menu de calcul permet l'accès à toutes les options du programme de calcul. La plupart des options sont également accessibles par des icônes situées dans la barre d'outils.

**La barre d'outils:** La barre d'outils contient les icônes qui peuvent être utilisées comme raccourci pour les options du menu.

**Les onglets (partie supérieure de la fenêtre):** Les onglets permettent de définir et pré visualiser une phase de calcul.

**Liste des phases de calcul (partie inférieure de la fenêtre):** Cette liste donne une vue d'ensemble de toutes les phases de calcul d'un projet. Chaque ligne correspond à une phase particulière.

#### IV.1.3.1 Le Menu De Calcul

La fenêtre du programme de calcul contient des menus déroulants relatifs à l'ensemble des options de manipulation de fichiers, de définition des phases de calcul et d'exécution des calculs. Le menu de calcul est composé des sous-menus File, Edit, View, Calculate and Help.

**a) Types de calculs** Il y a trois types de types de calcul fondamentaux distincts : un calcul plastique (Plastic), une analyse de consolidation (Consolidation) et un calcul de coefficient de sécurité (Phi-c reduction). Un calcul dynamique (Dynamic) est disponible en option dans le menu déroulant, mais il requiert le module PLAXIS Dynamics, qui est une extension de la Version 8 [1].

**Calcul de coefficient de sécurité (Phi-c reduction):** Un calcul de coefficient de sécurité dans PLAXIS peut être effectué en réduisant les paramètres de résistance du sol. Ce processus est appelé Phi-c réduction et constitue un type de calcul à part entière. Le calcul de coefficient de sécurité (Phi-c réduction) doit être sélectionné lorsque l'utilisateur souhaite calculer un coefficient de sécurité global pour une situation donnée. Un analyse de sécurité peut être réalisée après chaque phase de calcul individuelle et donc pour chaque étape de construction. Cependant, notons qu'une phase Phi-c réduction ne peut être utilisée comme condition de départ pour une autre phase de calcul car elle se termine sur une situation de rupture. Il est donc conseillé de définir toutes les analyses de sécurité à la fin de la liste des phases de calcul et d'utiliser le paramètre (Start from phase) pour définir la phase de référence de chaque phase d'analyse de coefficient de sécurité.

Lors d'un calcul de coefficient de sécurité, aucune charge ne peut être augmentée. En fait, le calcul Phi-c réduction est un type particulier de calcul plastique. La saisie d'un incrément de temps n'a en général pas de signification dans ce cas.

#### IV.1.4 Le programme de résultats (output)

Le programme de résultats (Output) contient tous les éléments qui permettent de visualiser les résultats des calculs aux éléments finis. Le menu programme Output contient des menus déroulants qui couvrent la plupart des options pour manipuler des fichiers, transférer des données, et voir des graphiques et des tableaux. Les principaux types de résultats d'un calcul aux éléments finis sont les contraintes et les déformations. Par conséquent, ces deux aspects constituent la majeure partie du menu des résultats.

Lorsqu'un modèle géométrique complet est affiché, le menu principal est constitué de différents menus: File, Edit, View, Geometry, Deformations, Stresses, Window et Help.

**Le menu File :** Permet d'ouvrir le projet dont les résultats vont être affichés, Permet de fermer la fenêtre de résultats active, définir le répertoire où les fichiers de projet de PLAXIS seront stockés par défaut et Permet de quitter le programme....

**Le menu Edit :** Permet de copier les résultats en cours dans le presse-papiers de Windows, Permet de modifier l'échelle de la valeur présentée et Permet de modifier les intervalles choisis pour représenter le résultat avec des contours ou des dégradés iso valeurs.

**Le menu View :** Permet de zoomer sur une partie rectangulaire pour avoir une vue plus détaillée, Permet de restaurer la représentation d'origine, Permet de voir un tableau de valeurs numériques pour le résultat affiché et Permet de voir les informations de calcul relatives au pas de calcul présenté....

**Le menu Géométrie :** Permet d'afficher tous les éléments de structure dans le Modèle, afficher les couleurs des matériaux dans le modèle et Permet d'afficher les éléments de sol dans le modèle.

**Le menu Déformations :** contient diverses options qui permettent de visualiser les déplacements et les déformations du modèle aux éléments finis

**Le menu Stresses :** Le menu Stresses contient diverses options qui permettent de visualiser l'état de contraintes du modèle aux éléments finis.

#### IV.1.5 Le programme courbe (curves)

Ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes charge déplacement, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

Après la sélection d'un projet existant, le graphique correspondant apparaît dans la fenêtre principale. La fenêtre principale du programme Curves contient les éléments suivants :

**Le menu des courbes :** Le menu des courbes contient toutes les options et les outils du programme Curves. Certaines options sont aussi accessibles par des boutons placés dans la barre d'outils.

**Les fenêtres des graphiques :** Ce sont les fenêtres dans lesquelles les graphiques sont affichés. Plusieurs fenêtres de graphiques peuvent être ouvertes simultanément et chaque graphique peut contenir jusqu'à un maximum de dix courbes.

**La barre d'outils :** Cette barre contient des boutons qui peuvent être utilisés comme raccourci des options du menu.

**Génération des courbes :** Une nouvelle courbe peut être générée en lançant le programme Curves ou en sélectionnant l'option New depuis le menu File. Le gestionnaire de fichiers apparaît alors et le projet pour lequel la courbe doit être générée doit être sélectionné.

Deux boîtes semblables avec différents éléments sont affichées, l'une pour l'axe x et l'autre pour l'axe y. En général, l'axe x correspond à l'axe horizontal et l'axe y à l'axe vertical.

## IV.2 Les modèles du comportement du sol

Le comportement du sol est représenté par une loi qui l'assimile à un milieu continu. Cette loi souvent appelée «loi de comportement » décrit la relation entre les contraintes et les déformations provoquées par ces contraintes. Elle traduit, lorsqu'on passe d'un matériau à un autre, les différences de comportement constatées expérimentalement sous l'effet d'actions extérieures. PLAXIS 8.6 propose différents modèles, qui permettent de simuler le comportement d'un sol. Un commentaire rapide sur les modèles qu'on va utiliser dans cette étude.

### IV.2 .1 Modèle élastique linéaire

Ce modèle représente la loi de *Hooke* pour l'élasticité linéaire et isotrope. Il comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'*Young E*, et le coefficient de *Poisson v*. Le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol [3].

### IV.2 .2 Modèle de Mohr-Coulomb

Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Il comporte cinq paramètres: le module d'*Young E*, le coefficient de *Poisson v*, la cohésion *c*, l'angle de frottement  $\varphi$ , et l'angle de dilatance  $\psi$ .

La dilatance d'un sable dépend de sa densité et de son angle de frottement. Pour des sables siliceux, un ordre de grandeur est  $\psi = \varphi - 30^\circ$ . Dans la plupart des cas, l'angle de dilatance est nul pour des valeurs de  $\varphi$  inférieures à  $30^\circ$ . Une valeur négative faible pour  $\psi$  n'est réaliste que pour des sables extrêmement lâches [1].

## IV. 3 Étude numérique du comportement d'une fondation superficielle sur sol renforcé avec du Pastique- PET au moyen du code Plaxis 8.6

### IV.3.1 Introduction

Le rôle d'une fondation est le transfert des charges en toute sécurité de la superstructure au sol sous adjacent sans compromettre la stabilité de l'ensemble sol-structure. Cependant, la construction des ouvrages sur un sol de caractéristiques médiocre peut engendrer des tassements excessifs dus à une faible capacité portante. Ceci peut entraîner également des dommages structurels, une réduction de la durabilité ou détérioration du niveau des performances. L'une des solutions est d'utiliser un sol renforcé pour améliorer la capacité portante de la semelle et offrir ainsi une meilleure répartition des contraintes sous la fondation.

L'augmentation des produits en plastique a entraîné une augmentation des déchets plastiques, ce qui constitue un défi pour les autorités chargées de la gestion des déchets. Dans le chapitre III, on a présenté une étude dans laquelle, le chercheur a réalisé plusieurs essais à savoir des essais : d'identification des différents matériaux utilisés, de compactage et des essais de cisaillement sur différents mélanges de sable- PET Plastique dans le but de décerner les

améliorations apporté au différentes propriétés du sol après l'ajout du PET en plastique à des pourcentages 12.5%, 22.5% et 32.5% [3].

Dans cette étude, on vas essayé de valider les résultats obtenues par les essais en élaborant un modèle numérique en élément finis constitué d'une seule couche de mélange sable-PET Plastique d'épaisseur environ 0,5 fois la largeur de la semelle pour obtenir l'amélioration maximale de la capacité portante du lit de fondation [5].

### IV.3.2 Paramètres des matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude sont du sable, des paillettes en plastique et une semelle ayant les propriétés suivantes :

#### ✓ Semelle

La semelle est en béton armé de largeur 1m est une hauteur 0.20m dont ces caractéristiques sont :  $E= 32160 \text{ MPa}$ ,  $\nu=0.2$ ,  $\gamma= 25\text{kN/m}^3$ .  $P=50\text{kN/m}^2$

#### ✓ Le sable

Un sable fin à moyen a été utilisé. Les propriétés de l'échantillon de sable sont données dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1** Résumé des propriétés du sable.

Paramètre	Valeur
Densité sèche $G_s$	2.66
Poids volumique ( $\text{kN/m}^3$ )	17.4
Diamètre effectif $D_{10}$ (mm)	0.175
Coefficient d'uniformité ( $C_u$ )	2.314
Coefficient de courbure ( $C_c$ )	0.99
Module d'élasticité $E_s$ (Mpa)	58
Coefficient de Poisson $\nu$	0.3
Angle de friction interne ( $\phi$ )	33.5°
La cohésion (kPa)	9.3

#### ✓ Paillette en Plastique PET

Le plastique (PET) utilisé les propriétés suivantes.

**Tableau IV.2** Résumé des propriétés des paillettes en plastique (PET).

Paramètre	Valeur
Poids volumique ( $\text{kN/m}^3$ )	13.8
$E_p$ (GPa)	2.75
Coefficient de Poisson $\nu_p$	0.37

### ✓ Mélange sable-PET Plastique

Le sable-PET plastique est un matériau composite (sable +paillette en plastique PET) hétérogène composé de deux phases homogènes: les fibres (inclusion ; phase a) de fraction volumique  $V_a$ , noyé dans le sol (matrice, phase m). Chacune de ces deux phases présente un comportement élastique linéaire, homogène et isotrope. Les deux phases sont supposées parfaitement collées entre elles (liaison matrice/inclusion, est supposée une adhérence parfaite).

La détermination des propriétés effectives consiste alors dans ce cas, à définir le comportement homogène équivalent sol-fibres à partir des caractéristiques de sol et des fibres de Plastique PET.

Les paillettes en plastique PET sont distribuées de façon homogène dans la matrice de sol. La description multi phase des matériaux composites constitués d'une matrice élastique. Le module d'élasticité effectif est donné pour le modèle de Voigt suivant l'expression suivante [2] :

$$E_c = E_m V_m + E_a V_a \quad (IV.1)$$

Et le coefficient du poisson selon l'équation 2

$$v_c = v_m V_m + v_a V_a \quad (IV.2)$$

Avec :  $V_a = 1 - V_m \quad (IV.3)$

Où  $E_m$  est le module d'élasticité de la matrice du sol,  $E_a$  est le module d'élasticité de la phase des fibres,  $E_c$  est le module d'élasticité de sol-fibres,  $V_m$  est la fraction volumique du sol comme matrice et  $V_a$  est la fraction volumique des fibres de caoutchouc de la phase de renfort. Les paillettes en plastique ont été utilisées en pourcentage de 12.5%, 22.5% et 32.5% du poids sec de sable. Les propriétés du mélange sable-PET plastique sont présentées dans le tableau IV.3.

**Tableau IV.3** Résumé des propriétés du mélange sable-PET plastique.

Paramètre	Mélange sable-PET plastique		
	12.5%	22.5%	32.5%
Poids volumique (kN/m <sup>3</sup> )	16.3	15.47	14.98
Module d'élasticité $E_{p-s}$ (MPa)	394.5	663.7	932.9
Coefficient de Poisson $v_{p-s}$	0.31	0.32	0.33
Angle de friction interne $\varphi(^{\circ})$	40.3	44.4	41.1
Cohésion c (kPa)	49.5	30.3	46.3

#### IV.3.3 Analyse numérique

Une analyse numérique à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM) a été réalisée à l'aide du logiciel (PLAXIS 8.6) pour étudier l'effet de l'utilisation des mélanges de sable-plastique

PET sur le comportement de la semelle chargée ponctuellement par une charge ponctuelle appliquée au centre.

### IV.3.3.1 Configuration du modèle numérique

Le sol a été modélisé à l'aide du modèle de Mohr-Coulomb drainé dont les dimensions sont (10x10) m. Une semelle continue de largeur 1 m a été placée sur la surface du sol exactement au centre du modèle comme montré sur la figure IV.3 [4]. Le modèle a été configuré avec des éléments triangulaires à 15 nœuds [1]. Les limites sont fixées latéralement des deux côtés et fixées horizontalement et verticalement à la limite inférieure, comme le montre la figure IV.4.

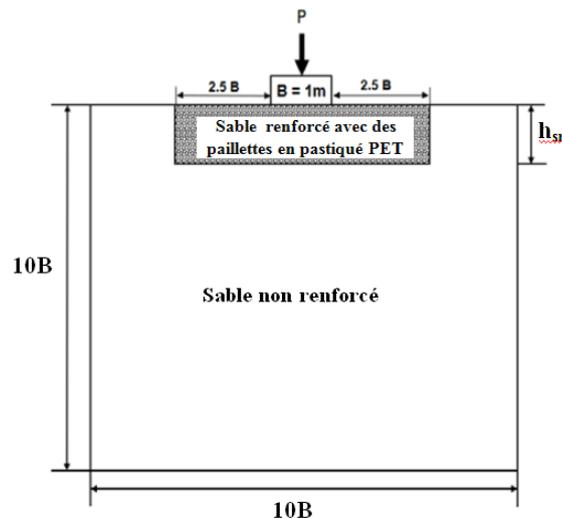


Figure IV.3 Géométrie du modèle.

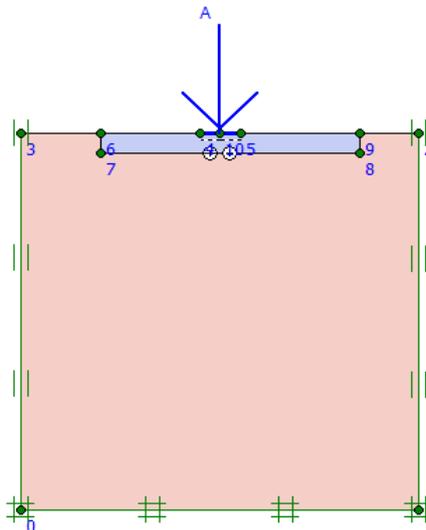
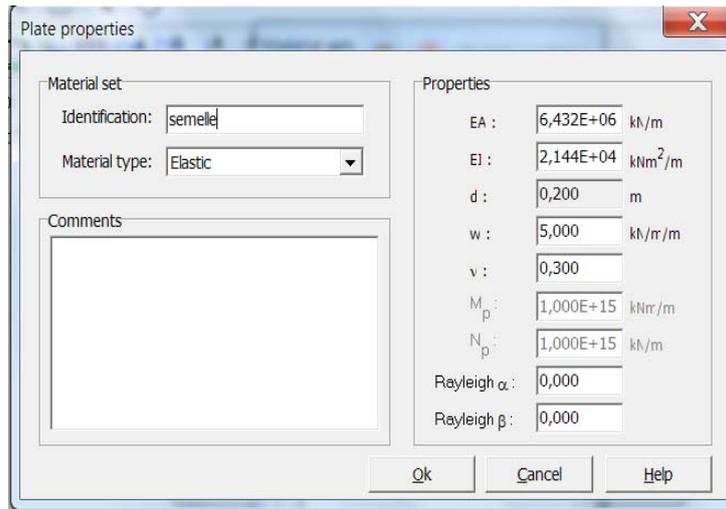


Figure IV.4 Modèle d'éléments finis présentant la charge et les conditions aux limites.

La semelle a été modélisée comme un élément de plaque rigide (Footing) avec le modèle élastique dont ces caractéristiques sont présentes sur la figure IV.5.

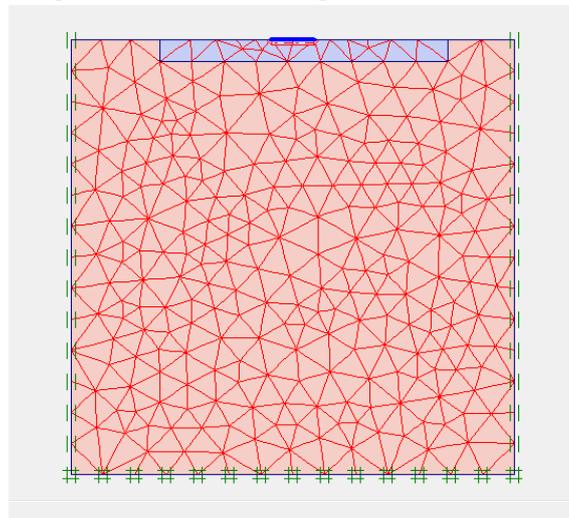


**Figure IV.5** Les propriétés de la semelle.

Des épaisseurs variées de la couche de sol renforcé avec des paillettes en plastique PET ( $h_{sr}/B$ ) = (0,5, 0,75, 1) m ont été utilisées pour étudier l'effet de l'épaisseur du mélange sol-plastique PET sur la capacité portante et le tassement de la semelle.

#### IV.3.3.2 Le Maillage

On peut générer le maillage après l'affectation des différents matériaux dans le modèle. On a choisie un maillage fine. La génération du maillage est lancé automatiquement (Fig. IV.6).



**Figure IV.6** La génération du maillage.

#### IV.3.3.3 Conditions initiales

L'initialisation des contraintes de ce sol peut se faire en conditions  $K_0$ . Plaxis propose par défaut un  $K_0$  selon la formule de Jaky ( $K_0 = 1 - \sin\phi$ ). Dans cette phase d'initialisation des contraintes (Fig. IV.7).

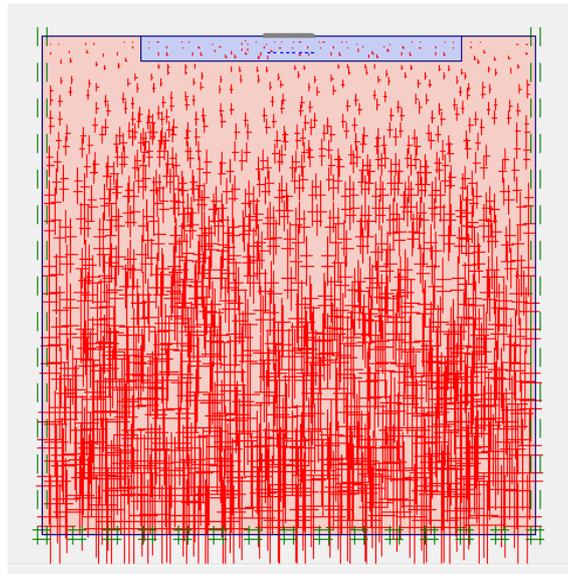


Figure IV.7 Contraintes initiales.

#### IV.3.3.4 Les phases de calcul

Après la définition du modèle, les calculs peuvent être effectués en choisissant le type plastique et la construction par étape (staged construction) qui va permettre de revenir sur les écrans de dessin en cliquant sur le bouton « Define ». On obtient alors une vue du modèle constitué des couches de sol. Dans la première phase on va activer la semelle et l'interface. La semelle est maintenant mise en place. On procède ensuite à la validation de la charge appliquée sur la semelle (la charge A vertical de 50kN/m<sup>2</sup>). A la dernière phase, on choisit de multiplier le chargement (Total Multipliers) (on multipliant  $\Sigma$ -Mload par 10)(Fig. IV.8).

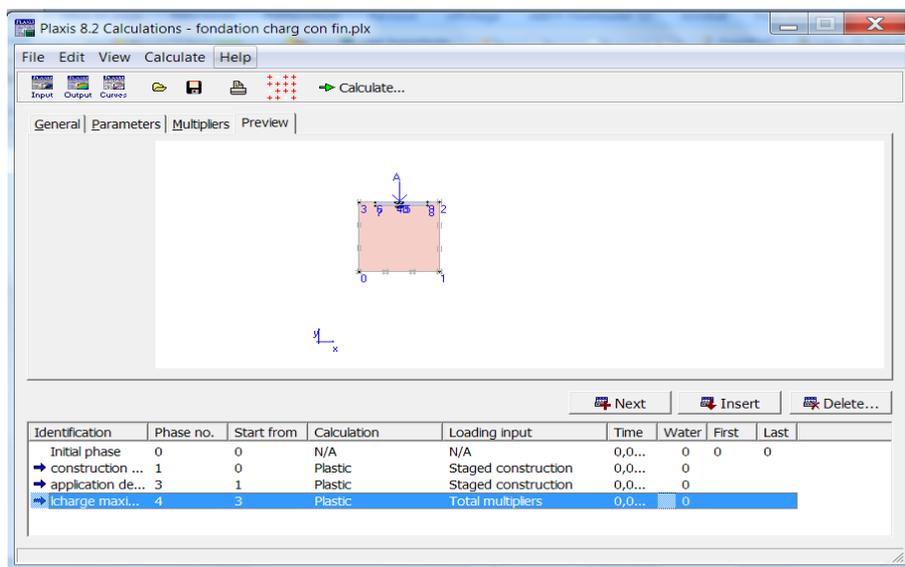
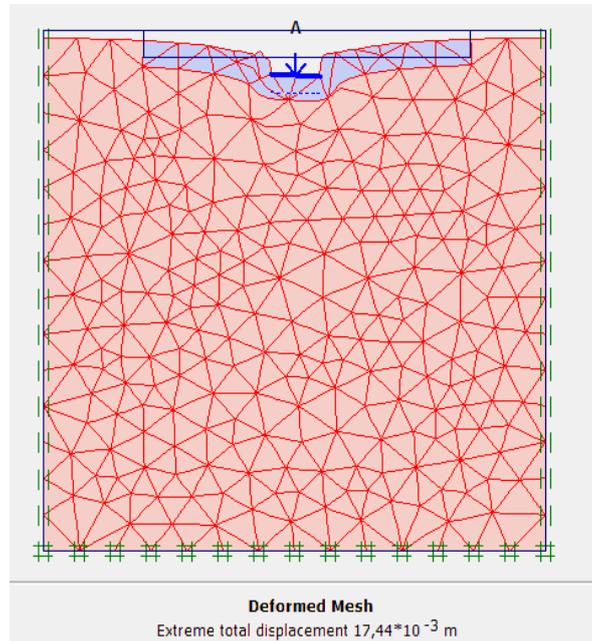


Figure IV.8 Les phases de calculs.

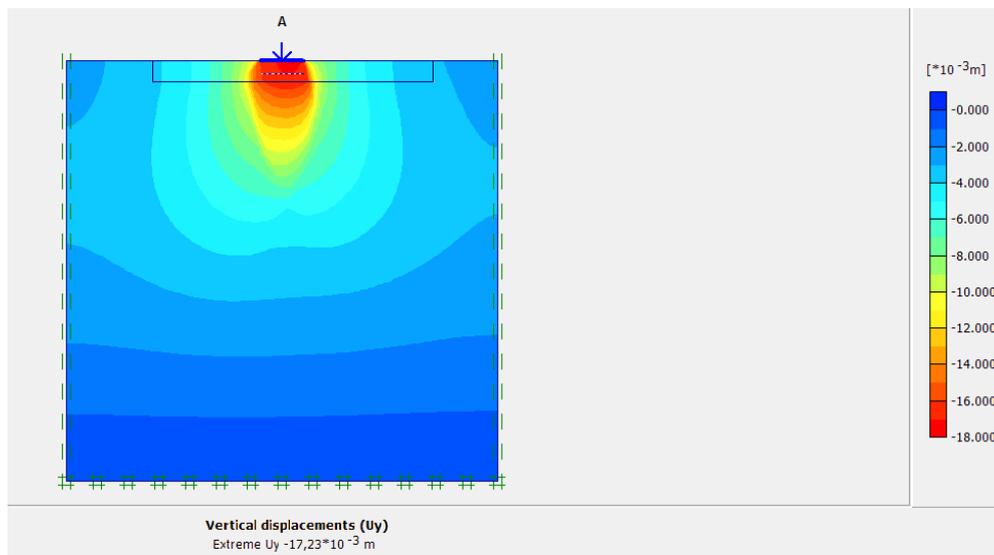
#### IV.3.4 Présentation des résultats du calcul

Figures. IV.9 à IV.17 présentent le maillage déformé du modèle, les déplacements verticaux et horizontaux, les contraintes et les déformations selon X et Y les après application de la

charge de la semelle dans le cas d'un sol renforcé de 12.5% de paillette en plastique PET d'épaisseur égale à une 0.5 fois la largeur de la semelle ( $h_{rs} / B = 0.5$ ).



**Figure IV.9** Maillage déformé cas (12.5% Plastique PET et  $h_{sr}=0.5m$ ).



**Figure IV.10** Déplacement vertical ( $U_y$ ) (12.5% Plastique PET et  $h_{sr}=0.5m$ ).

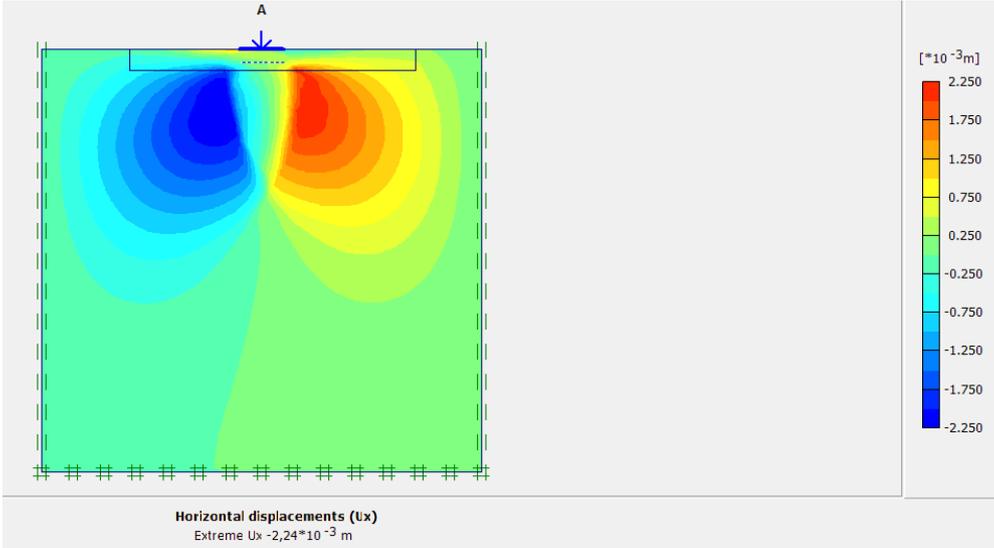


Figure IV.11 Déplacement horizontale ( $U_x$ ) (12.5% Plastique PET et  $h_{sr}=0.5m$ ).

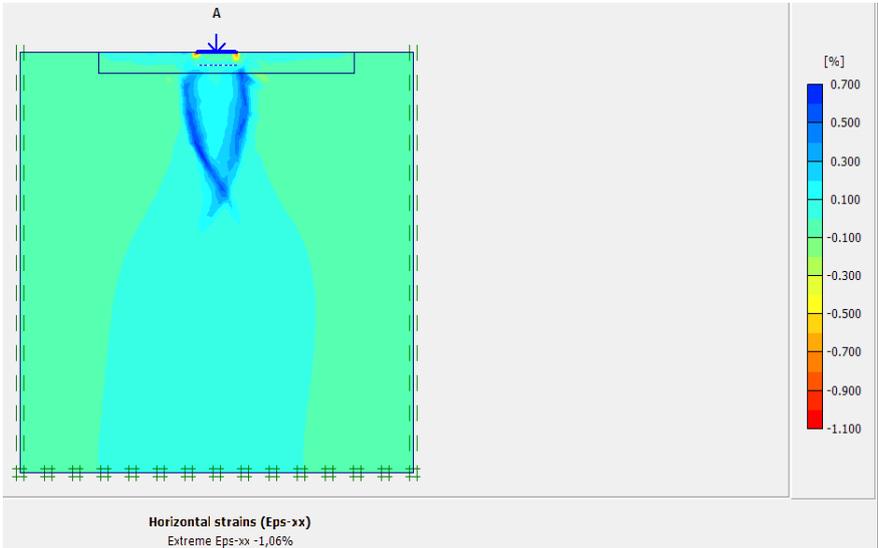


Figure IV.12 Déformation horizontale ( $\epsilon_x$ ) (12.5% Plastique PET et  $h_{sr}=0.5m$ ).

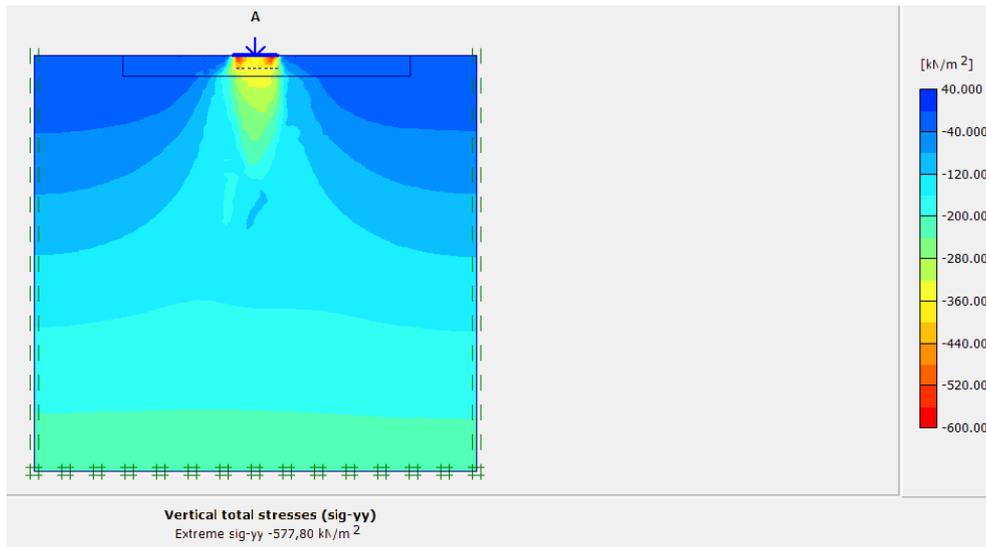


Figure IV.13 Contraintes verticales ( $\sigma_{yy}$ ) (12.5% Plastique PET et  $h_{sr}=0.5\text{m}$ ).

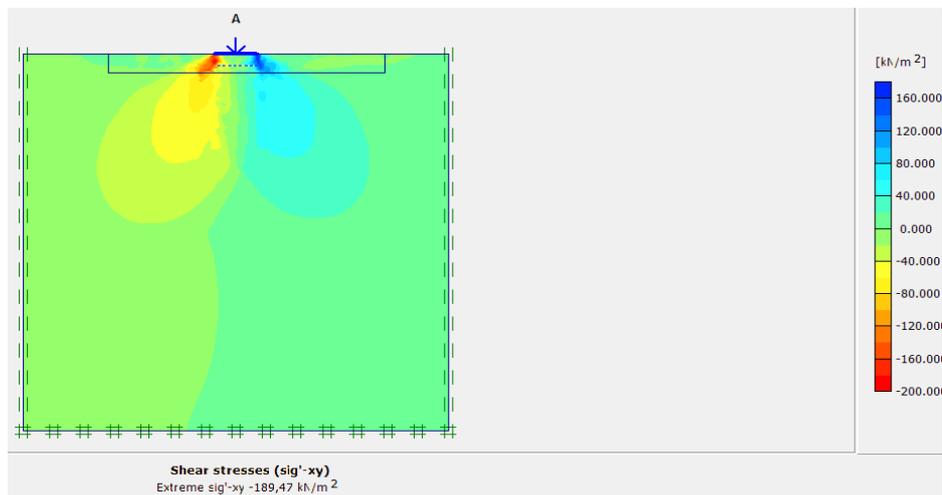


Figure IV.14 Contraintes tangentielles ( $\tau_{xy}$ ) Plastique PET et  $h_{sr}=0.5\text{m}$ ).

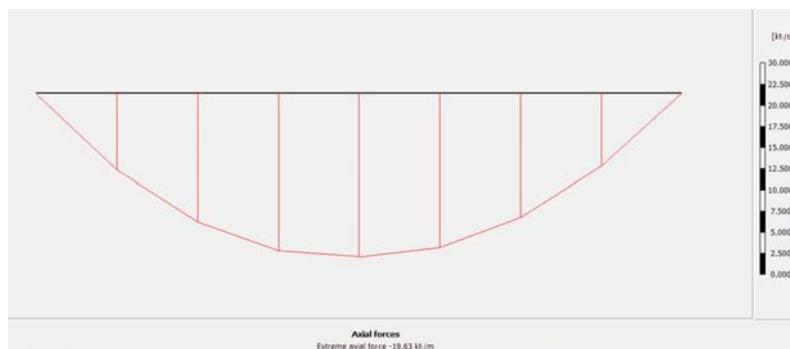


Figure IV.15 Effort axial dans la fondation Plastique PET et  $h_{sr}=0.5\text{m}$ ).

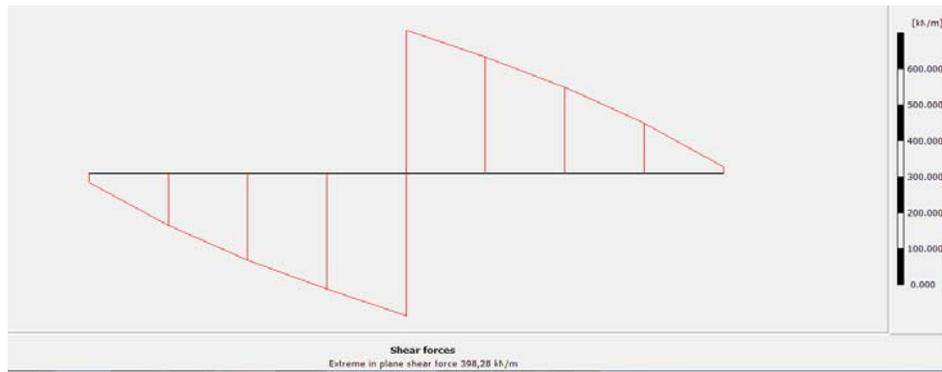


Figure IV.16 Effort branchant dans la fondation Plastique PET et  $h_{sr}=0.5m$ ).

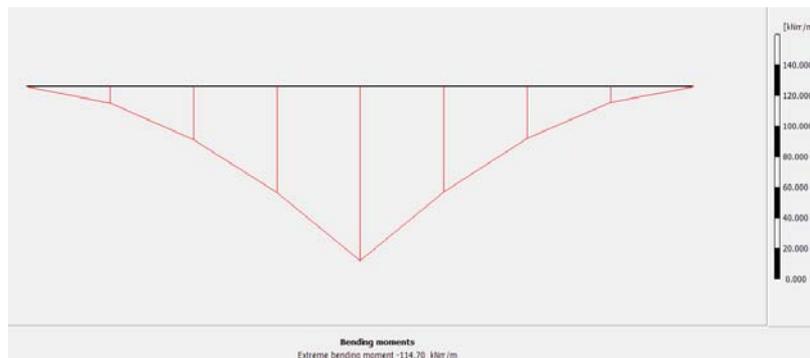


Figure IV.17 Moment fléchissant dans la fondation.

Les différents résultats pour sol non renforcé et sol renforcé avec différents pourcentages de paillettes en plastique PET sont regroupés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau IV.4 Les Déformations maximales dans le sol non renforcé et renforcé d'épaisseur  $h_{sr}=0.5m$ .

Déformation sols	$U_x$ (m)	$U_y$ (m)	$\epsilon_{xx}$ (%)	$\epsilon_{yy}$ (%)	$\gamma_{xy}$ (%)
Sable 0%	$-3.57 \cdot 10^{-3}$	$-24.86 \cdot 10^{-3}$	$504.10 \cdot 10^{-3}$	$739.33 \cdot 10^{-3}$	$82.53 \cdot 10^{-3}$
SR 12.5% $h_{sr}=0.5m$	$-2.24 \cdot 10^{-3}$	$-17.23 \cdot 10^{-3}$	-1.06	6.31	-6.14
SR 22.5% $h_{sr}=0.5m$	$503.67 \cdot 10^{-6}$	$4.01 \cdot 10^{-3}$	$-146.94 \cdot 10^{-3}$	$197.21 \cdot 10^{-3}$	$-279.38 \cdot 10^{-3}$
SR 32.5% $h_{sr}=0.5m$	$2.18 \cdot 10^{-6}$	$16.98 \cdot 10^{-3}$	$-1.29 \cdot 10^{-3}$	$10.43 \cdot 10^{-3}$	$-6.40 \cdot 10^{-3}$

Tableau IV.5 Les contraintes maximales dans le sol non renforcé et renforcé d'épaisseur  $h_{sr}=0.5m$ .

Contraintes sols	$\sigma_{xx}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{yy}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{xy}$ (kN/m <sup>2</sup> )
Sable 0% $h_{sr}=0.5m$	$1.21 \cdot 10^{-3}$	-986.60	-500.52
SR 12.5% $h_{sr}=0.5m$	-612.13	-577.80	-189.47
SR 22.5% $h_{sr}=0.5m$	-377.78	-274.62	148.33
SR 32.5% $h_{sr}=0.5m$	-660.63	-573.83	-201.52

**Tableau IV.6** Les déformations verticales, les efforts et les moments dans la fondation ducas sol non renforcé et renforcé cas  $h_{sr}=0.5m$ .

Déf-Force-moment sols	$U_y$ (m)	Force axiale (kN/m)	Effort tranchant (kN/m)	Moment (kNm/m)
Sable 0% $h_{sr}=0.5m$	$-24.69*10^{-3}$	-42.65	-401.65	-144.
SR 12.5% $h_{sr}=0.5m$	$-17.44*10^{-3}$	-19.40	247.42	-74.26
SR 22.5% $h_{sr}=0.5m$	$-4.01*10^{-3}$	-23.49	78.61	-26.19
SR 32.5% $h_{sr}=0.5m$	$-16.91*10^{-3}$	-25.19	246.57	-74.54

**Tableau IV.7** Les Déformations maximales dans le sol renforcé d'épaisseur cas  $h_{sr}=0.75m$ .

Déformation sols	$U_x$ (m)	$U_y$ (m)	$\epsilon_{xx}$ (%)	$\epsilon_{yy}$ (%)	$\gamma_{xy}$ (%)
SR 12.5%	$-2.29*10^{-3}$	$-14.69*10^{-3}$	$-587.31*10^{-3}$	3.52	3.17
SR 22.5%	$-2.25*10^{-3}$	$-14.95*10^{-3}$	$-749.63*10^{-3}$	4.87	4.18
SR 32.5%	$-2.31*10^{-3}$	$-14.22*10^{-3}$	$-689.49*10^{-3}$	3.98	3.57

**Tableau IV.8** Les contraintes maximales dans le sol renforcé d'épaisseur cas  $h_{sr}=0.75m$ .

Contraintes sols	$\sigma_{xx}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{yy}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{xy}$ (kN/m <sup>2</sup> )
SR 12.5%	-718.35	-581.88	-221.13
SR 22.5%	-682.71	-589.63	-213.52
SR 32.5%	-757.40	-574.39	-216.13

**Tableau IV.9** Les déformations verticaux, les efforts et les moments dans la fondation cas  $h_{sr}=0.75m$ .

Déf-Force-moment sols	$U_y$ (m)	Force axiale (kN/m)	Effort tranchant (kN/m)	Moment (kNm/m)
SR 12.5%	$-14.86*10^{-3}$	-22.08	-247.88	-73.47
SR 22.5%	$-15.06*10^{-3}$	-20.54	-248.98	-70.30
SR 32.5%	$-14.29*10^{-3}$	-26.40	-248.03	-71.13

**Tableau IV.10** Les Déformations maximales dans le sol renforcé d'épaisseur cas  $h_{sr}=1m$ .

Déformation sols	$U_x$ (m)	$U_y$ (m)	$\epsilon_{xx}$ (%)	$\epsilon_{yy}$ (%)	$\gamma_{xy}$ (%)
SR 12.5%	$-2.27*10^{-3}$	$-13.06*10^{-3}$	$-669.41*10^{-3}$	1.9	2.17
SR 22.5%	$-2.25*10^{-3}$	$-13.35*10^{-3}$	$-952.24*10^{-3}$	3.20	3.28
SR 32.5%	$-2.27*10^{-3}$	$-12.52*10^{-3}$	$-721.86*10^{-3}$	2.50	2.86

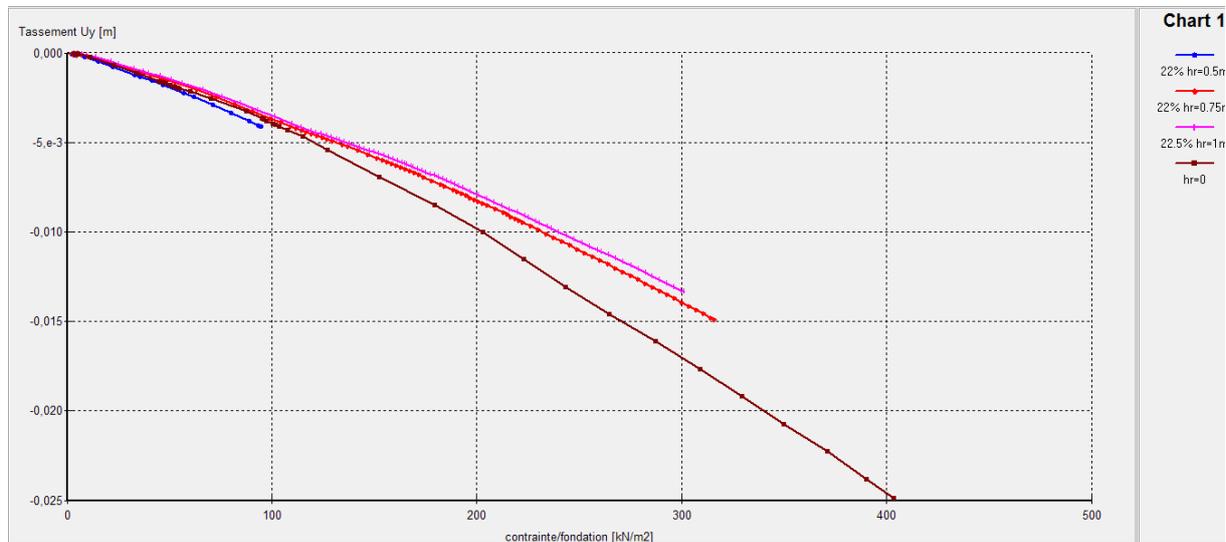
**Tableau IV.11** Les contraintes maximales dans le sol renforcé d'épaisseur cas  $h_{sr}=1m$ .

Contraintes sols	$\sigma_{xx}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{yy}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{xy}$ (kN/m <sup>2</sup> )
SR 12.5%	-817.18	-555.67	-249.54
SR 22.5%	-794.35	-567.50	-238.86
SR 32.5%	-850.64	-560.94	-251.90

**Tableau IV.12** Les déformations verticaux, les efforts et les moments dans la fondation cas  $h_{sr}=1m$ .

Déf-Force-moment sols	$U_y$ (m)	Force axiale (kN/m)	Effort tranchant (kN/m)	Moment (kNm/m)
SR 12.5%	$-13.23 \cdot 10^{-3}$	-21.73	248.14	-72.50
SR 22.5%	$-13.46 \cdot 10^{-3}$	-19.85	249.15	-69.18
SR 32.5%	$-12.60 \cdot 10^{-3}$	-25.64	248.19	-70.41

Sur la base des résultats et au moyen du programme curves intégrés dans Plaxis, on a pu tracer les courbes de tassement en fonction des contraintes développées sous la semelle présenté sur la figure IV.18 pour différents épaisseurs de la couche renforcée : Cas (22.5% PET) et pour différents pourcentages de plastique PET Cas : ( $h_{sr}=0.5m$ ) (Fig. IV.19).

**Figure IV.18** Les tassements en fonction des contraintes sous la fondation pour différents épaisseurs de la couche renforcée Cas (22.5% PET).

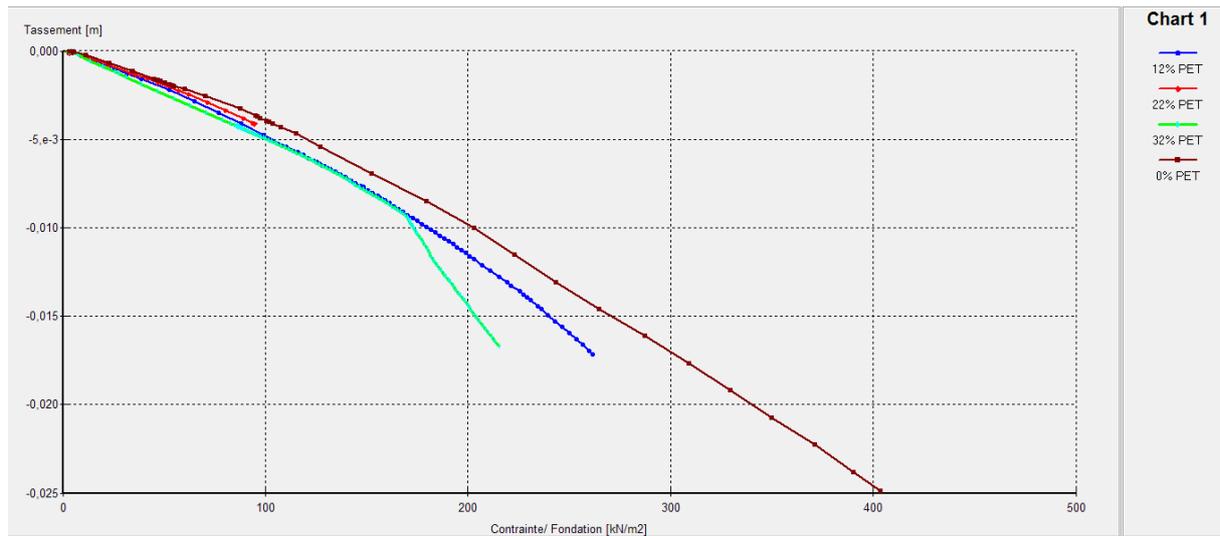


Figure IV.19 Les tassements en fonction des contraintes sous la fondation pour différents pourcentages de PET Cas ( $h_{sr}=0.5m$ ).

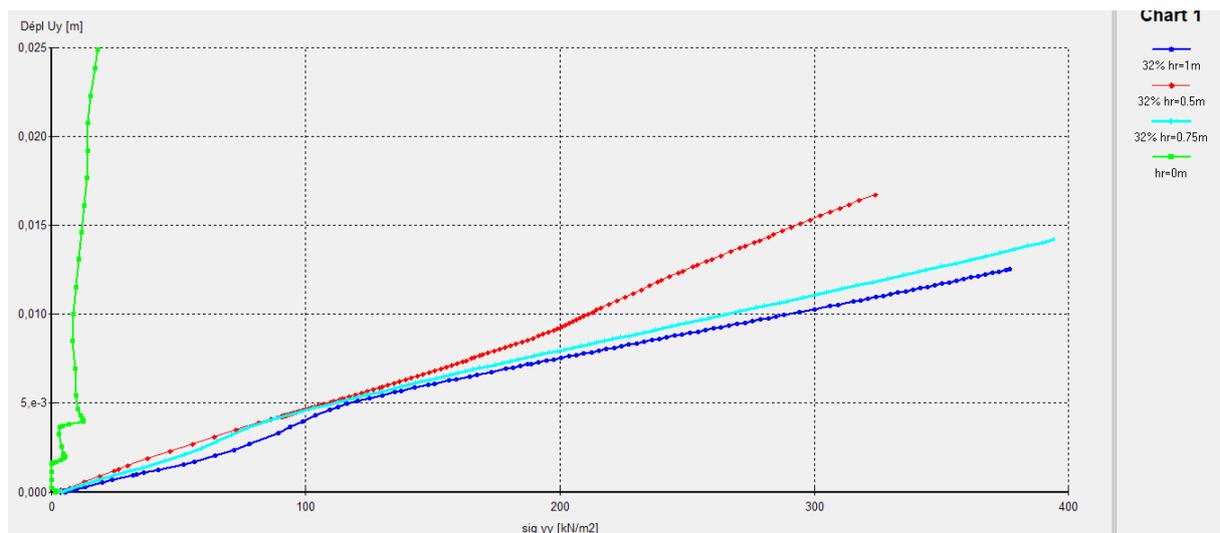
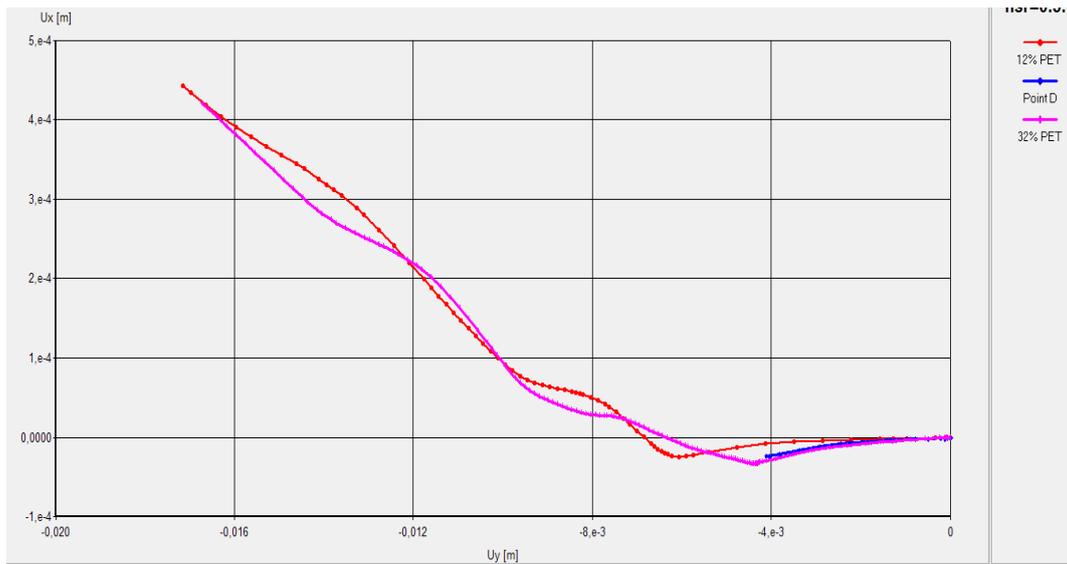


Figure IV.20 Les tassements en fonction des contraintes verticales pour différents épaisseurs de la couche Cas : (32% PET).



**Figure IV.21** Les déplacements verticaux en fonction des déplacements horizontaux pour différents pourcentages PET cas  $h_{sr}=0.50m$ .

### IV. 3.5 Discussion des résultats

Les résultats ont été présentés comme la relation entre les contraintes sous la semelle en ( $kN / m^2$ ) par rapport à son tassement associé.

- La figure IV.18 montre la relation entre la capacité portante sous la semelle et le tassement dans le cas d'un sol non renforcé et d'un sol renforcé avec des paillettes en plastique PET avec des épaisseurs allant de 0.5m, 0.75m et 1m fois la largeur de la semelle B. on peut observer que la couche de sol renforcée améliore la capacité portante de la semelle.
- L'augmentation de la capacité portante peut être attribuée au confinement interne fourni par les couches de sol-plastique PET dans la zone active sous la semelle, ce qui limite les déplacements latéraux de la couche de sol comme le montrent la Figure (IV.21) et, par conséquent, tend à augmenter la capacité portante. Il a été observé que lorsque l'épaisseur de la couche de sol renforcée de plastique atteint environ 1.0 fois la largeur de la semelle, l'efficacité de renforcement du mélange diminue considérablement.
- Le pourcentage idéal pour le renforcement du sol avec des paillettes en plastique PET est 22.5% car il a enregistré les tassements minimaux pour les différentes épaisseurs de la couche renforcée.
- D'après les tableaux IV.9 et IV.12 les déplacements verticaux, les efforts tranchants et les moments fléchissant dans la semelle ont diminué considérablement avec l'augmentation des pourcentages du plastique PET est particulièrement pour le pourcentage 22.5 %, ce qui signifie une réduction de la quantité du ferrailage mise en œuvre.
- D'après la Figure IV.20 l'utilisation du pourcentage 22.5% PET diminue considérablement les déplacements horizontaux et verticaux par rapport aux deux pourcentages 12.5% et 32.5%.

### IV.3.6 Conclusions

Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes sont tirées:

Les résultats affirment l'utilité du recyclage des déchets de plastique par leur utilisation dans des aspects géotechniques, d'où des effets bénéfiques sur les considérations environnementales.

Les résultats suggèrent fortement la réutilisation des déchets de plastique PET sous forme de paillette mélangé au sol sous la semelle. L'amélioration de la capacité portante ultime atteint une augmentation maximale en cas d'utilisation d'une couche de sol renforcé de plastique PET d'épaisseur égale à 0.75 fois la largeur de la semelle B.

D'après les résultats, il a été conclu que la capacité portante de la semelle augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de sol renforcé de plastique PET jusqu'à une valeur optimale d'environ 0.75 fois la largeur de la semelle avec un pourcentage de 22.5% du poids du sol ce qui affirme les résultats de l'essai N°1 présenté dans le chapitre III..

Il a été noté que l'augmentation de la capacité portante est associée à une diminution du tassement pour la même valeur de contrainte. On peut conclure que l'utilisation de mélanges sol-pastique PET comme couche de renforcement dans le lit de fondation sous la semelle est très prometteur.

### Référence bibliographiques du quatrième chapitre

- [1] Brinkgreve, R. B. J., Manuel de Référence de PLAXIS Version 8.6 : Delft University of Technology, Delft, Netherlands, and PLAXIS BV, Pays-Bas, Netherlands, (2003).
- [2] Chebbi E., Jarraya, A., Dammak, F., DHIAB, A. Prédiction des propriétés élastiques d'un thermoplastique renforcé par des fibres de verre, 5ème Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM'2013, Djerba 25-27 Mars 2013, Tunisie (2013).
- [3] John G. Luwalaga, John J. Bowders . Analysing the Behaviour of Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Waste. A Research Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Engineering (M Eng.) in the Faculty of Engineering at Stellenbosch University. (2016).
- [4] Khaled, M., Bahloul, M. Numerical Study of Foundation Behavior on Reinforced Soil with Waste Tire Shreds" *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 24(01), pp 159-167 (2019).
- [5] Moghaddas Tafreshi, S.N., Norouzi, A.H. Bearing capacity of a square model footing on sand reinforced with shredded tire—An experimental investigation, *Construction and Building Materials*, 35, 547–556. (2012).

# CHAPITRE V

## V.1 Introduction

Les ruptures des pentes et les glissements de terrain constituent des dangers importants pour les infrastructures publiques et privées. Le Coûts d'entretien des pentes le longs des autoroutes, routes, digues et voies ferrées est très important. Pour régler les problèmes d'instabilité des terrains et diminuer le cout d'entretient, le gouvernement américain a développé des éléments de renforcement en plastique recyclé RPP. Ces éléments sont installés dans les pentes pour intercepter les surfaces de glissement potentielles et fournir la résistance nécessaire pour maintenir à long terme la stabilité des pentes [1].

## V.2 Calcul de la stabilité des talus

Le calcul de la stabilité des talus a pour but de chercher la valeur minimale du coefficient de sécurité ( $F_S$ ), et de définir la surface de rupture la plus probable correspondante à cette valeur. Les méthodes de calcul de la stabilité des terrains sont basées sur la constatation suivante : Durant un glissement de terrain, le facteur de sécurité ( $F_S$ ) minimal à adopter dépend de la nature de l'ouvrage, de son utilisation et des conséquences que pourrait entraîner sa rupture en termes de risque humain et de dommages matériels. On considère que :

Théoriquement, le talus est dit stable si  $F_S > 1$ , l'état d'équilibre limite (rupture) est obtenu lorsque  $F_S = 1$ , mais dans la pratique, le coefficient  $F_S$  est compris entre 1,15 et 1,30 [3].

## V.3 Rappel sur les méthodes d'équilibre limite

La définition du cercle de glissement, les contraintes au niveau de la surface de rupture, et le coefficient de sécurité se base sur le critère d'élasto-plasticité de Mohr-Coulomb. La mise en équation du problème de l'équilibre d'une masse de sol peut se faire de deux manières :

- Étude de l'équilibre de l'ensemble de la zone de glissement. La ligne de rupture est la plupart du temps supposée circulaire, c'est la méthode globale (méthode de Taylor, de Caquot, de Biarez...).
- Décomposition du talus en tranches dont on étudie d'abord l'équilibre individuel, avant de globaliser le résultat en faisant intervenir certaines hypothèses simplificatrices, « C'est la méthode des tranches » (méthode de Fellenius, Bishop...).

Selon le mode de rupture, Nous citons certaines méthodes d'Équilibre Limite [2].

### V.3.1 Ruptures planes (glissements plans)

Ce type de rupture est rencontré lorsque le massif est constitué de plusieurs couches de caractéristiques physico-chimiques et mécaniques très différentes, ou lorsque la longueur de la surface de glissement potentielle est très grande par rapport à l'épaisseur du terrain (Fig. V.1). le coefficient de sécurité est calculé en étudiant l'équilibre des forces agissant sur le plan de rupture. Le coefficient de sécurité est donné par l'équation V.1.

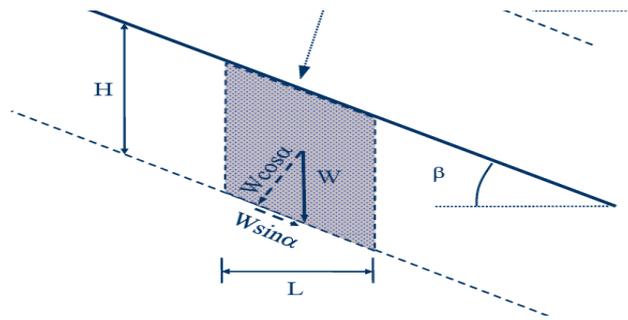


Figure V.1 Ruptures planes [3].

$$F_s = \frac{C}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \tag{V.1}$$

### V.3.2 Ruptures circulaires, méthode des tranches

Ce type de rupture est rencontré lorsque le massif est homogène. Deux méthodes de calcul permettent de traiter ce problème basées sur la méthode des tranches. Le principe de la méthode consiste à découper le massif situé au dessus de la ligne de rupture en tranches.

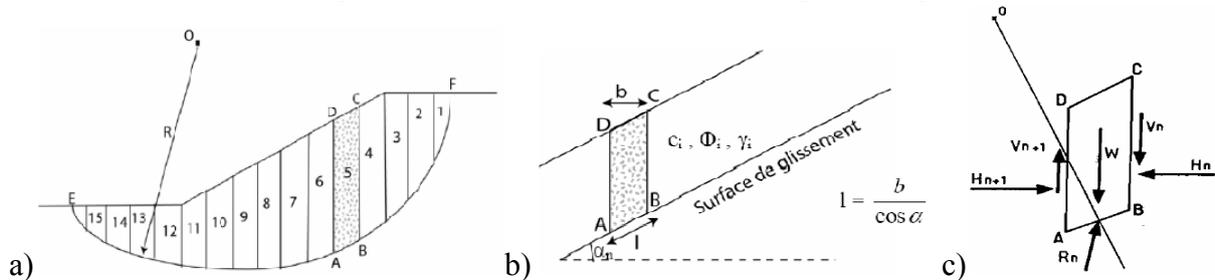


Figure V.2 Méthode des tranches [3].

Soit un cercle quelconque de centre O et de rayon R pour lequel on vérifie la sécurité vis-à-vis du risque de glissement. La méthode des tranches consiste à découper le volume de sol (compris dans l'arc EF) en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux (Fig. V.2a) [2]. En l'absence d'eau, une tranche (n) est soumise à :

- Son poids  $W = \gamma_n \cdot h_n \cdot b_n$
- Les efforts inter-tranches décomposés en efforts horizontaux  $H_n$  et  $H_{n+1}$  et en efforts verticaux  $V_n$  et  $V_{n+1}$ .
- La réaction  $R_n$  du milieu sous-jacent sur l'arc AB (résistance de cisaillement). Elle se décompose en une composante normale et tangentielle (Fig. V.2c).

#### V.3.2.1 La méthode de Fellenius

Cette méthode consiste à considérer les forces qui tendent à retenir un certain volume de terrain, délimité par les forces libres du talus et une surface de rupture potentielle, et celles qui tendent à la mettre en mouvement, dans laquelle on admet que les forces externes inter-tranches sont égales. D'où l'expression suivante du coefficient de sécurité [2]:

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^m c_i \frac{b_n}{\cos \alpha_n} + W_n \cos \alpha_n \operatorname{tg} \phi_n}{\sum_{n=1}^m W_n \sin \alpha_n} \tag{V.2}$$

Les paramètres intervenant dans le calcul de  $F_s$  sont donc :

- $b_n$ , la largeur des tranches ;
- $\alpha_n$ , l'angle orienté que fait le rayon du cercle passant par le milieu de la base de la tranche avec la verticale ;
- $h_n$ , la hauteur de la tranche pour le calcul du poids  $W$ .

### V.3.2.2 La méthode de Bishop simplifiée (1955)

Dans cette méthode, on admet que seules les composantes horizontales des forces externes inter-tranches s'équilibrent ; dans cette méthode la résultante verticale des forces inter-tranches est nulle, d'où :  $H_n = H_{n+1}$  mais  $V_n \neq V_{n+1}$ . D'où l'expression suivante du coefficient de sécurité :

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^m c_i b_i + W_n \operatorname{tg} \varphi_n}{m_\alpha \sum_{n=1}^m W_n \sin \alpha_n} \quad (\text{V.3})$$

$$m_\alpha = \cos \alpha_i \left[ 1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i}{F_s} \right] \quad (\text{V.4})$$

### V.3.2.3 Méthode de Janbu à surface générale (1965)

Méthode des tranches permettant de traiter une ligne de rupture de forme quelconque. La méthode utilise un coefficient correcteur  $f_0$  pour tenir compte des forces entre les tranches [3]. On calcule d'abord un facteur de sécurité non corrigé  $F_{s0}$  qui est déterminé comme suit :

$$F_{s0} = \frac{\sum (c' \cos \alpha + (P - ul) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum P \sin \alpha} \quad (\text{V.5})$$

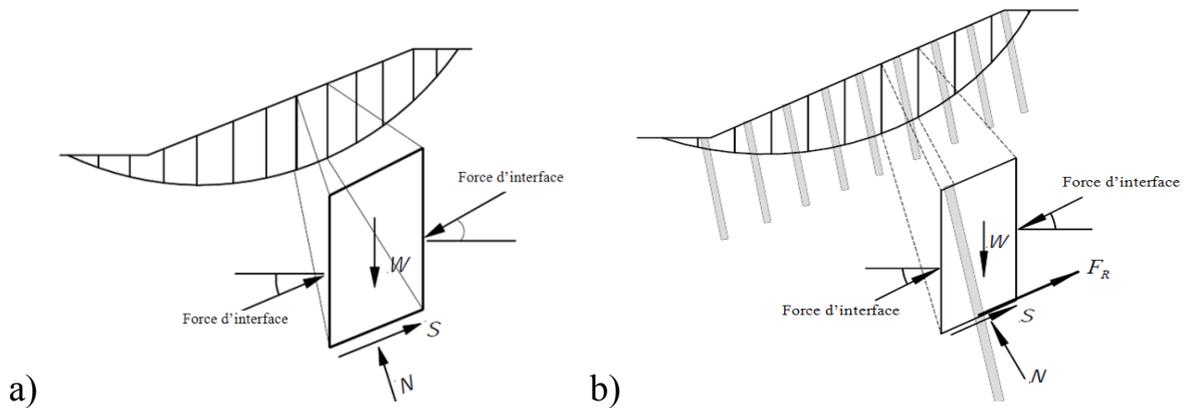
$$\text{Avec} \quad P = [W - c' l \sin \alpha / F_s + u l \tan \phi' \sin \alpha / F_s] / m_\alpha \quad (\text{V.6})$$

Le coefficient de sécurité corrigé est :

$$F_s = f_0 F_{s0} \quad (\text{V.7})$$

## V.4 Stabilité des pentes renforcées par des éléments en plastique recyclé RPP

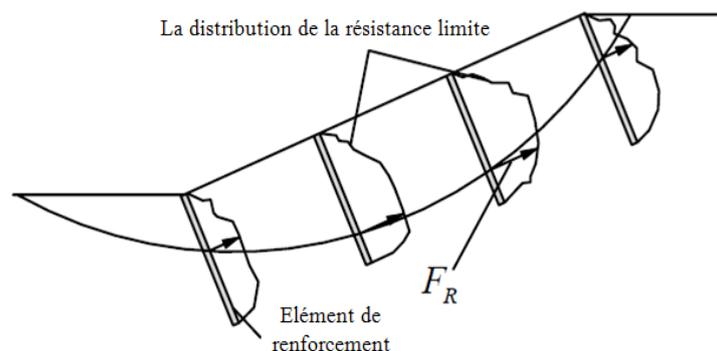
Une approche similaire est adoptée pour les pentes renforcées sauf qu'une force due à l'élément de renforcement,  $F_R$ , est ajoutée aux autres forces sur les tranches qui sont coupées par des éléments de renforcement, comme illustré à la figure V.3. Cette force est incluse dans le développement des équations d'équilibre qui sont utilisées pour résoudre le facteur de sécurité global pour la pente. Il est important de souligner que la force de renforcement ( $F_R$ ) peut avoir des composantes à la fois perpendiculaires et parallèles à l'élément de renforcement et que  $F_R$  est considérée comme une quantité connue et doit être fournie pour l'analyse de stabilité [5].



**Figure V.3** Addition de la force de renforcement ( $F_R$ ) sur une tranche individuelle selon la méthode des tranches [5].

La force de renfort modifie le facteur de sécurité de plusieurs manières. Premièrement, la force de renforcement fournit une résistance directe au glissement et qui aura toujours tendance à augmenter le facteur de sécurité par rapport à celui de la pente non renforcée (Fig. V.3a) [5].

La distribution de la force de renforcement est décrite par une «courbe de résistance limite» (Fig. V.4). Chaque élément de renforcement sur une pente fournira une force de résistance basée sur l'emplacement de l'intersection de la surface de glissement et de l'élément de renforcement.



**Figure V.4** Distribution de la résistance limite pour plusieurs éléments dans une pente renforcée.

La définition du facteur de sécurité d'une pente est le rapport du moment résistant ( $M_R$ ) au moment Moteur ( $M_O$ ), comme présenté dans l'équation V.8. Le RPP installé à la pente fournit un moment résistant supplémentaire ( $\Delta M_R$ ) le long de la surface de glissement ce qui augmente la résistance et le facteur de sécurité, comme présenté dans l'équation V.9 [4].

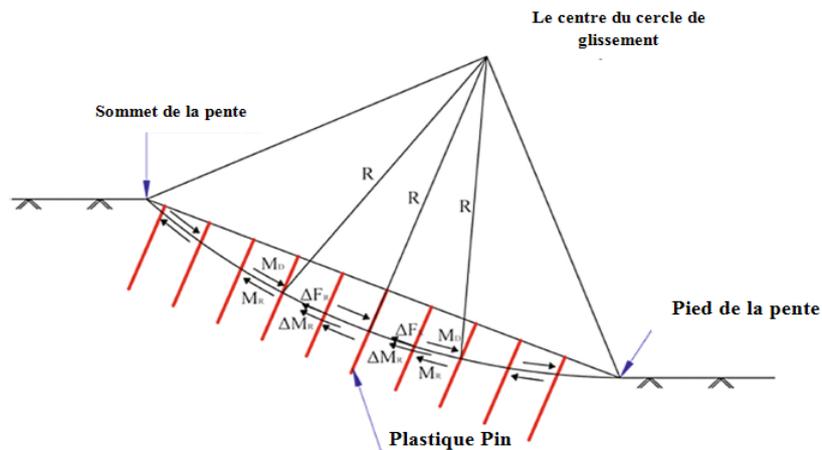
$$F_S = \frac{M_R}{M_O} \quad (\text{V.8})$$

$$F_S = \frac{M_R + \Delta M_R}{M_O} \quad (\text{V.9})$$

Où,  $M_R$  = Moment de résistance le long de la surface de glissement.

$M_O$  = Moment moteur le long de la surface de glissement.

$\Delta M_R$  = Moment de résistance supplémentaire due à l'élément de plastique recyclé RPP.



**Figure V.5** Schéma du principe de renforcement des pentes renforcées avec RPP [4].

### V. 5 Calcul de la résistance latérale limite

La méthode générale utilisée pour estimer la résistance limite est de considérer deux mécanismes généraux de rupture pour déterminer la répartition de la résistance latérale limite le long des armatures: rupture du sol autour ou entre les armatures et rupture structurelle de l'armature due aux forces mobilisées par le sol environnant [5]. La méthode considère uniquement la résistance latérale fournie par les éléments de renforcement; Quatre modes de rupture sont considérés pour déterminer la distribution de la résistance limite le long de l'élément de renforcement, comme résumé dans le tableau V.1.

**Tableau V.1** Les modes de rupture du sol et des éléments pour établir la résistance latérale limite des éléments de renforcement.

Mode de rupture	La description
<b>Mode 1</b>	Rupture du sol au-dessus de la surface de glissement autour ou entre les éléments de renforcement
<b>Mode 2</b>	rupture du sol sous la surface de glissement en raison d'une longueur d'ancrage insuffisante
<b>Mode 3</b>	Rupture structurelle de l'élément en flexion
<b>Mode 4</b>	Rupture structurelle de l'élément en cisaillement

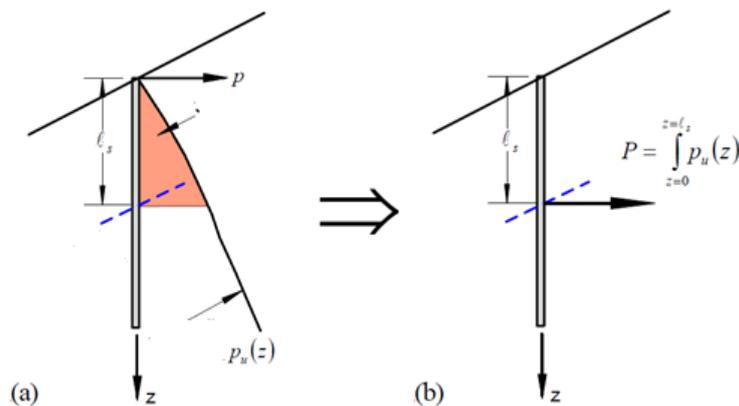
#### V.5.1 Calcul de la résistance limite en fonction des modes de rupture du sol

La pression latérale limite du sol est la pression latérale maximale que le sol adjacent à l'élément de renforcement peut supporter avant la rupture, soit en s'écoulant autour ou entre les éléments de renforcement. Les deux modes de rupture du sol considérés dans la méthode sont appelés mode de rupture 1 et mode de rupture 2 [5].

En mode de rupture 1, le sol au-dessus de la surface de glissement est considéré rompu en s'écoulant entre ou autour des éléments de renforcement. Dans le mode de rupture 2, le sol sous la surface de glissement adjacente à l'élément de renforcement est supposé décollé, ce qui entraîne le passage de l'élément de renforcement à travers le sol. La résistance limite

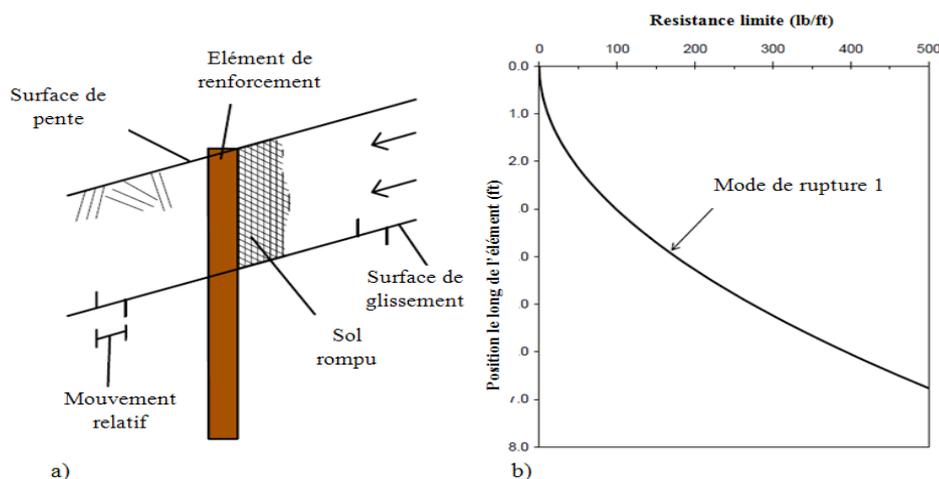
correspondant à chacun de ces modes de rupture est calculée à partir de la pression limite du sol [5].

La pression limite du sol (une contrainte) et la résistance latérale limite (une force) agissant sur un élément de renforcement pour un éventuel glissement profond est illustrée sur la figure V.6. La résistance limite est calculée en intégrant la pression limite du sol sur la longueur de l'élément de renforcement au-dessus de la ligne de glissement. La force de résistance limite est supposée agir perpendiculairement à l'élément de renforcement au niveau de la surface de glissement.



**Figure V.6** Calcul de la force de résistance limite: (a) pression limite du sol et (b) force de résistance latérale équivalente [5].

Dans le mode de rupture 1, l'élément de renforcement est supposé suffisamment ancré dans un sol stable sous la surface de glissement (Fig. V.7a). Une courbe de résistance limite décrivant l'amplitude de la résistance latérale limite en fonction de la position le long de l'élément de renforcement pour le mode de rupture 1 est illustrée à la figure V.7b.



**Figure V.7** a) Mode de rupture 1. b) Courbe de résistance limite pour le mode de rupture 1.

Un processus similaire est utilisé pour calculer la résistance pour le mode de rupture 2, sauf que le sol sous la surface de glissement adjacente à l'élément de renforcement s'est rompu alors que l'élément est suffisamment ancré dans le sol en mouvement au-dessus de la surface de glissement (Fig. V.8a). Ce calcul est répété pour différentes surfaces de glissement pour

développer une courbe décrivant l'amplitude de la résistance limite le long de la longueur de l'élément de renforcement pour le mode de rupture 2, comme (Fig. V.8b) [5].

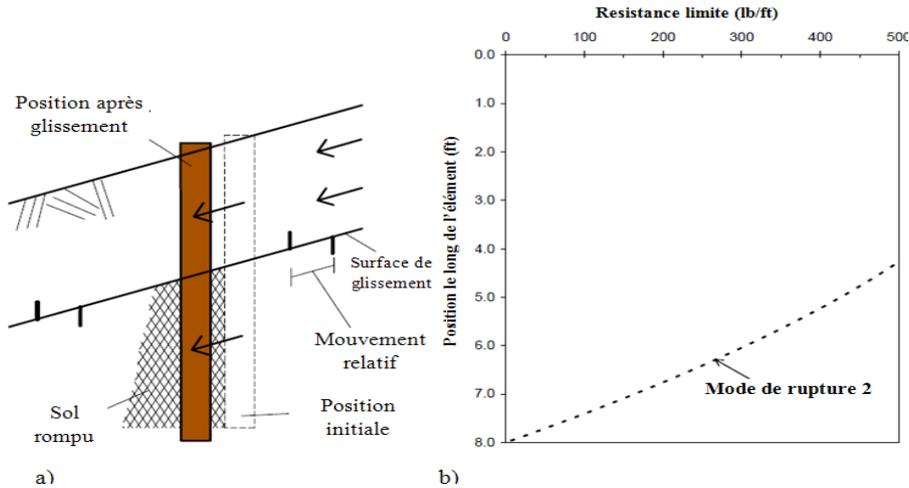


Figure V.8 a) Mode de rupture 2. b) Courbe de résistance limite pour le mode de rupture 2 [5].

### V.5.2 Modes de rupture structurelle

Dans certaines conditions, la pression limite du sol peut être suffisamment grande pour que l'élément de renforcement échoue structurellement avant la mobilisation complète de la résistance du sol. Deux modes de rupture structurelle existent: rupture de la barre en flexion (Mode de rupture 3) et rupture de la barre en cisaillement (Mode de rupture 4). Le mode de rupture 3 peut être divisé en deux sous-catégories: rupture due à des moments excessifs de la pression du sol appliquée au-dessus de la surface de glissement (mode de rupture 3a) (Fig. V.9) et la rupture due à des moments excessifs de la pression du sol sous la surface de glissement (mode de rupture 3b) (Fig. V.10) [5].

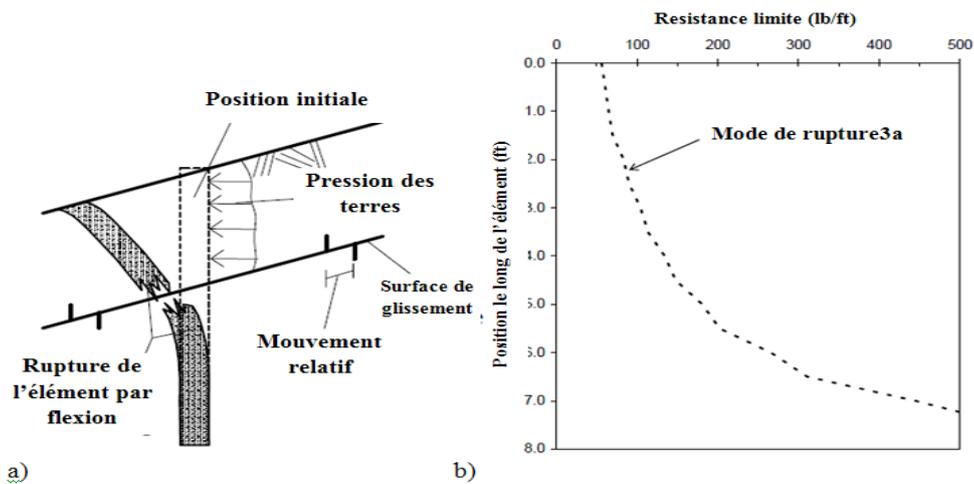
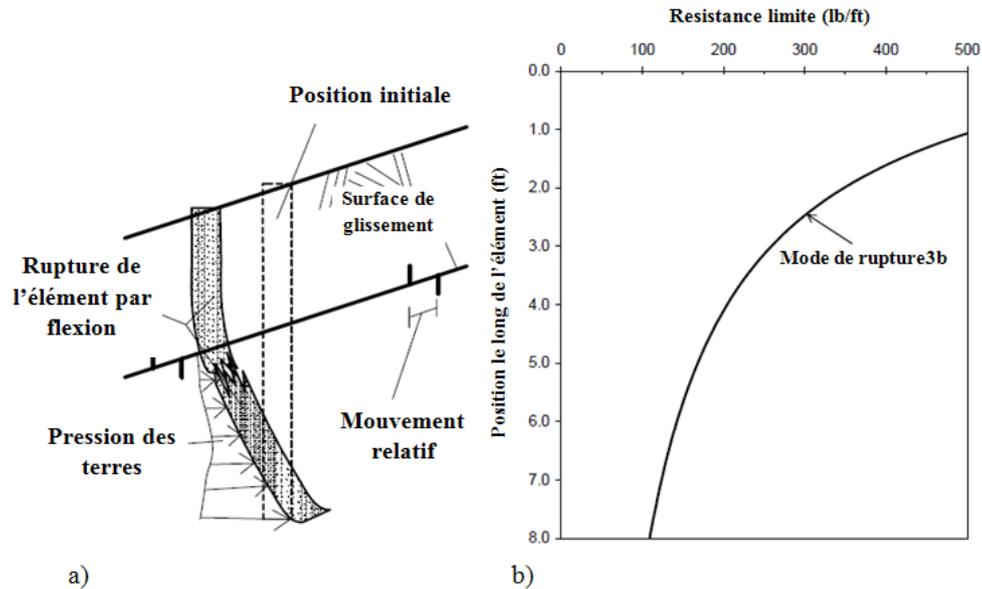


Figure V.9 a) Le mode de rupture 3a b) Courbe de résistance limite du mode de rupture 3a.



**Figure V.10** a) Le mode de rupture 3b b) Courbe de résistance limite du mode de rupture 3b [5].

## V. 6 Objectif de l'étude

Les pentes concernés par la stabilisation sont des pentes et remblais raides (2,5H:1V) de hauteur 6.6 m. Le sol du site est argileux expansifs susceptibles de glissement de terrain peu profond lors d'événements pluvieux intenses et prolongés. Les éléments en plastique recyclé RPP ont été utilisés pour la stabilisation de la pente comme mesure préventif de la rupture des talus.

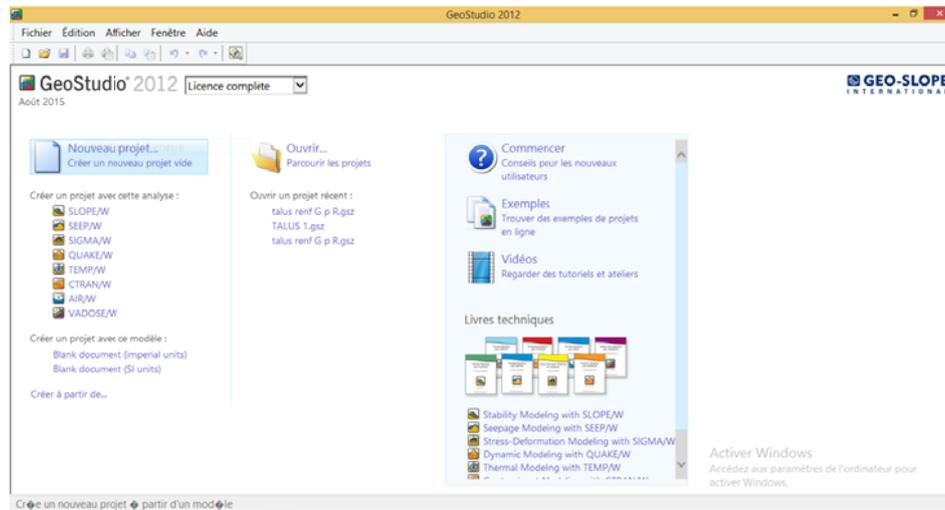
Les ruptures peu profondes causent souvent des dommages importants aux garde-corps, aux accotements, à une partie des routes et, si elles ne sont pas correctement entretenues, elles nécessitent des réparations plus importantes et plus coûteuses [4]. Les éléments en plastique recyclé (RPP) ont été utilisés dans l'État du Missouri et de l'Iowa comme solution rentable pour la stabilisation de la rupture de pente peu profonde [6].

L'objectif de la présente étude est d'étudier l'effet de l'espacement et la longueur du RPP sur le facteur de sécurité en utilisant le logiciel Geoslope qui est un programme d'analyse de la stabilité des pentes, basée sur la théorie d'équilibre limite.

## V.7 Présentation du logiciel Géostudio 2012

Géostudio est un logiciel de calcul géotechnique qui permet de traiter les différents problèmes du sol comme les glissements des terrains, le tassement, la consolidation, les infiltrations des eaux dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique. Les méthodes de calcul du facteur de sécurité intégrées dans Geoslope sont : la méthode de Fellenius, de Morgenstern-Price, de Jumbo et celle de Bishop simplifiée (Fig. V.11).

Le modèle géométrique est subdivisé en tranches verticales en 2D. Il exécute plusieurs méthodes de recherches automatiques du centre de rotation de la surface de glissement potentiel jusqu'à atteindre le plus faible coefficient de sécurité.



**Figure V.11** Présentation du logiciel Geostudio 2012.

Plusieurs programmes sont intégrés dans la fenêtre générale du logiciel :

**SEEP/W** : Permet de calculer les infiltrations des eaux (Par la méthode des éléments finis).

**SIGMA/W** : Permet d'analyser les problèmes de la relation contraintes–déformations (Par la méthode des éléments finis).

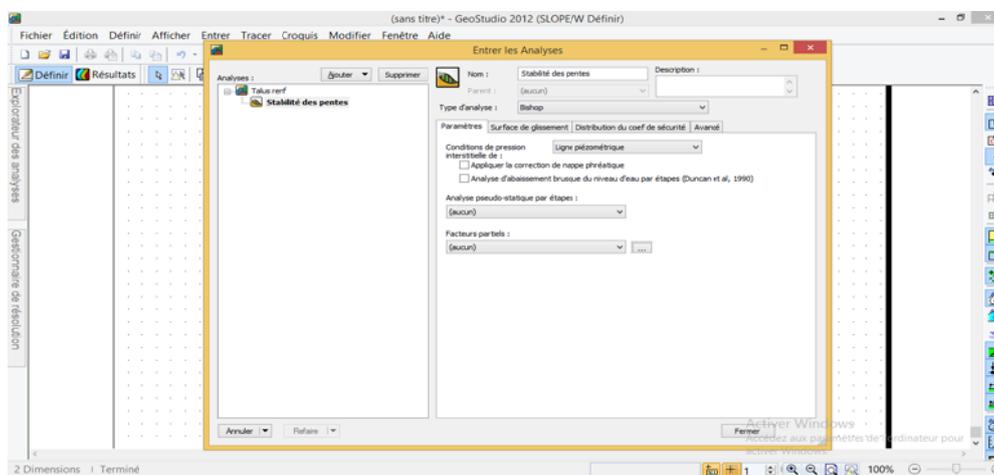
**QUAKE/W** : Permet de définir le comportement d'un terrain sous l'effet d'un séisme (Par la méthode des éléments finis).

**TEMP/W** : Permet d'analyser les problèmes géotechniques du sol (Par la méthode des éléments finis).

**SLOPE/W** : Permet de calculer le coefficient de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyses classiques, et c'est le programme qui nous intéresse dans la présente étude.

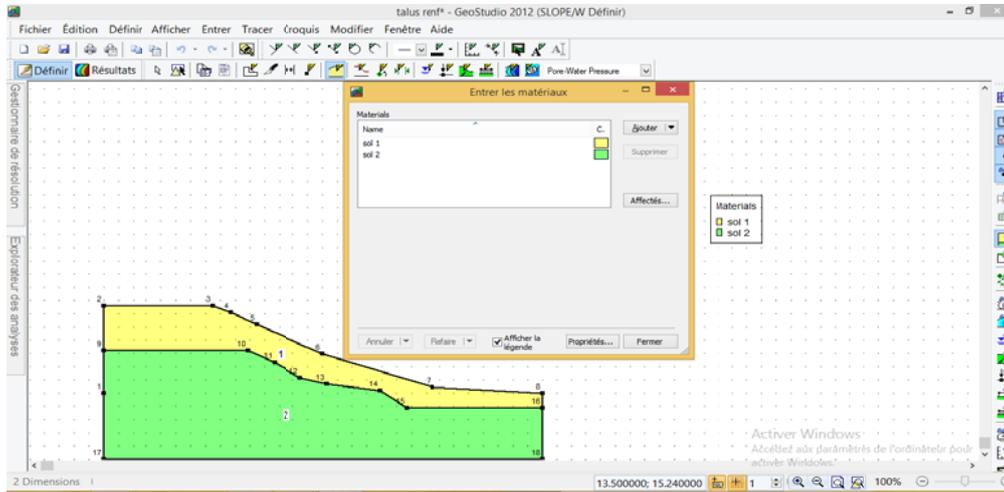
### V.7.1 Le fonctionnement du logiciel

Le présent logiciel comme tous les autres programmes de calcul servent à fournir des résultats issus d'un nombre défini des paramètres, donc il est nécessaire de suivre les étapes suivantes pour l'achèvement de l'opération de calcul :



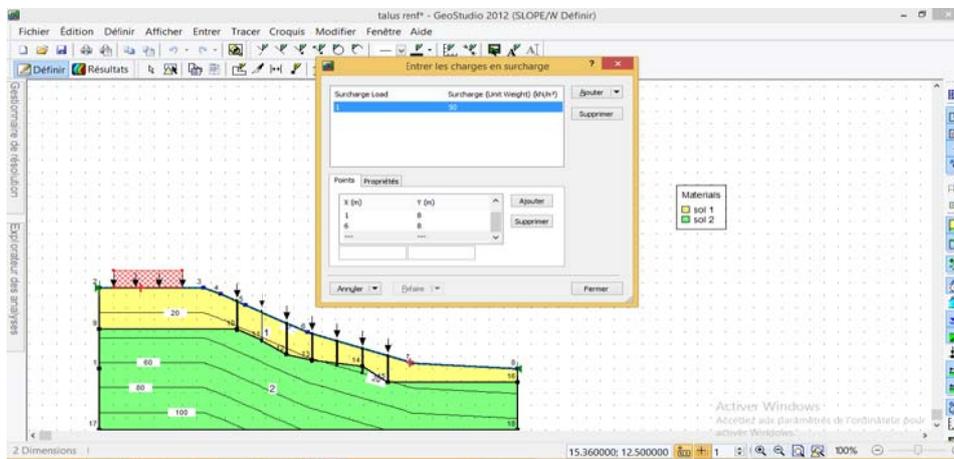
**Figure V.12** Entrer le type d'analyse.

**Entrer** : Permet d'introduire automatiquement à l'aide des tableaux les paramètres géométriques de la pente (coordonnées et couches), les caractéristiques mécaniques des différentes couches constituant le talus, des conditions complémentaires nécessaires pour le calcul, le niveau de la nappe, les surcharges, l'effort sismique et confortements (Fig. V.13).



**Figure V.13** Insertion des caractéristiques mécaniques des différentes couches.

**Tracer**: permet d'introduire manuellement les paramètres géométriques de la pente (coordonnées et couches), des conditions complémentaires nécessaires pour le calcul, le niveau de la nappe, les surcharges et les confortements.



**Figure V.14** Conditions complémentaires nécessaires pour le calcul.

**Modifier**: cette instruction permet aux utilisateurs de rajouter, éliminer, supprimer et modifier des objets dans le problème.

**Fenêtre** : à l'aide de cette icône permet l'affichage des données et l'explorateur des analyses.

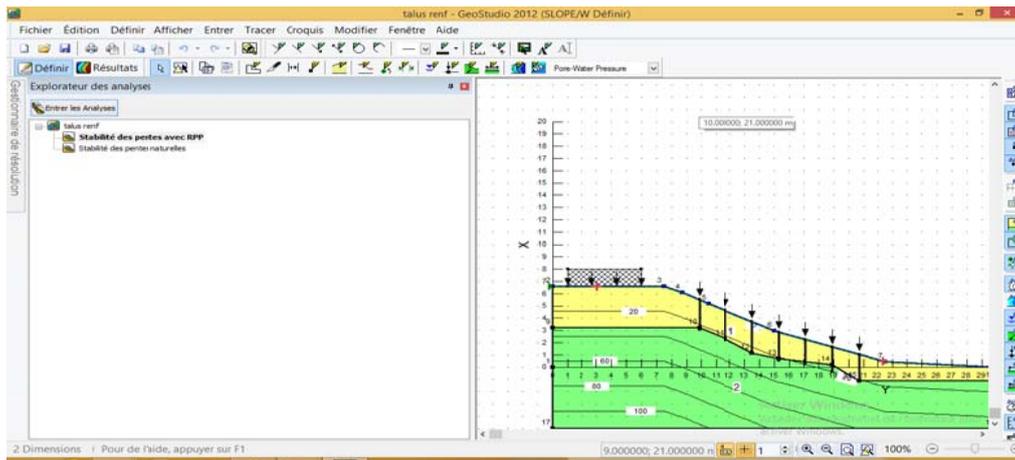


Figure V.15 Explorateur des analyses.

## V.8 Présentation du projet

La pente est située près de l'autoroute US 287, près du passage supérieur de St. Paul à Midlothian, au Texas. Le talus concerné par cette étude est la zone S3 située sur le site I70-Emma caractérisé par une pente de (2.5H: 1V) dont la hauteur est égale à 6.6 m. Le projet est définie en détail dans l'essai N° 3 du Chapitre III.

## V.9 Modélisation numérique du talus au moyen de Geostudio

### V.9.1 Construction du modèle

La géométrie du talus est décrite dans un repère cartésien oxy, l'axe ox étant orienté horizontalement dans la direction amont-aval et l'axe oy dirigé verticalement vers le haut. Le profil est décrit par des segments reliant un ensemble de points (Fig. V.16).

Le profil du talus est constitué de deux couches de sol, une couche d'argile superficielle reposant sur une couche d'argile profonde dont les caractéristiques moyennes de cisaillement sont regroupées dans le tableau V.2.

Tableau V. 2 Caractéristiques des couches de sol.

couche de sol	Angle de frottement $\phi(^{\circ})$	$\nu$	Cohésion $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	Poids volumique $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	15	0.3	4.5	17.6
2	22	0.3	15	19.8

Tableau V.3 Propriétés des éléments recyclés RPP.

Paramètres	Unité	Valeur
E	MPa	655
$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	9.7
Section	m <sup>2</sup>	(0.09x0.09)

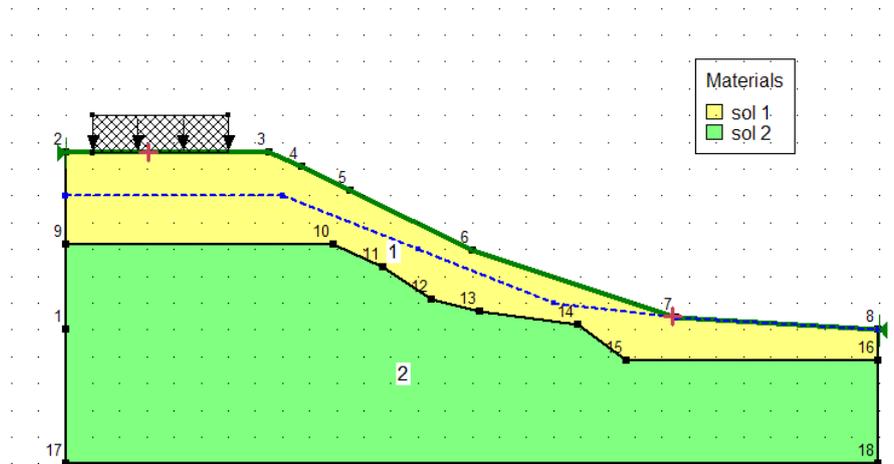


Figure V.16 Modèle géométrique du profil du talus.

## V.9.2 Calcul du coefficient de sécurité

### V.9.2.1 Les phases de calcul

Nous avons examiné plusieurs types de calcul de la stabilité du versant à savoir (Fig. V.17):

- Talus naturel (chargement gravitaire seul).
- Talus naturel + Nappe phréatique.
- Talus naturel + Nappe phréatique + renforcement avec des éléments en plastique recyclés RPP (esp=1.8m, L=2.4m).
- Talus naturel + Nappe phréatique + renforcement avec des éléments en plastique recyclés RPP (esp=1.8m, L=3m).
- Talus naturel + Nappe phréatique + renforcement avec des éléments en plastique recyclés RPP (esp=1.8m, L=3.6m).
- Talus naturel + Nappe phréatique + renforcement avec des éléments en plastique recyclés RPP (esp=3.6m, L=2.4m).
- Talus naturel + Nappe phréatique + renforcement avec des éléments en plastique recyclés RPP (esp=3.6m, L=3m).
- Talus naturel + Nappe phréatique + renforcement avec des éléments en plastique recyclés RPP (esp=3.6m, L=3m).

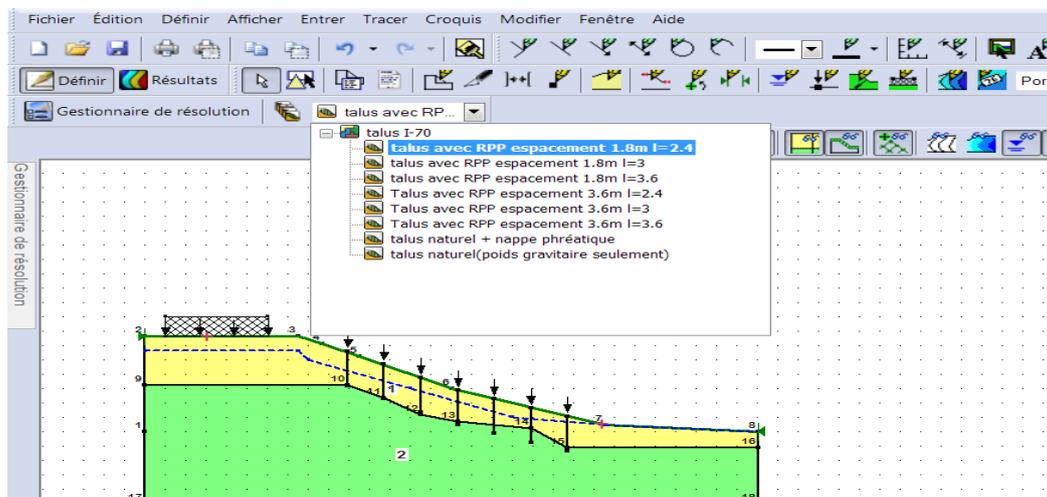
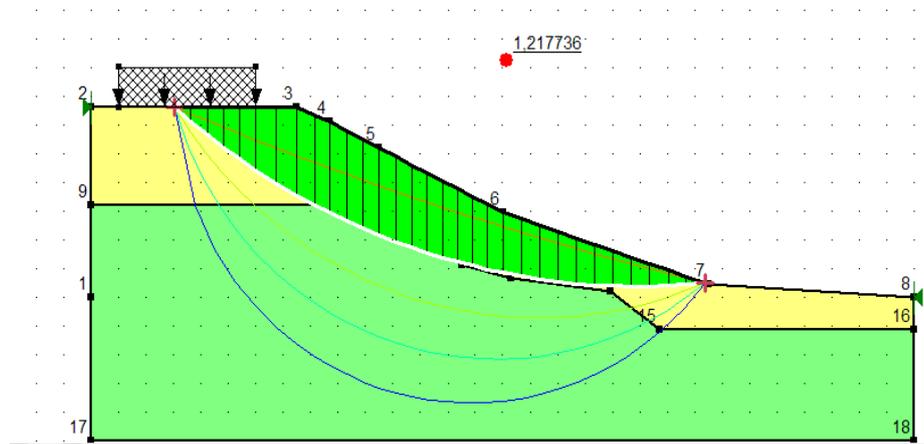


Figure V.17 Les phases de calcul.

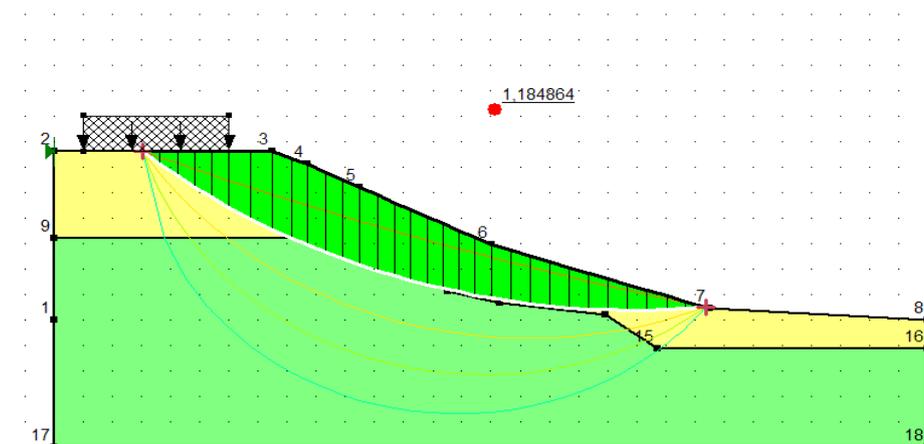
### V.9.2.2 Calcul du coefficient de sécurité sous chargement gravitaire

Une seule phase de calcul étant définie, après introduction de la géométrie, les matériaux, la surface de glissement, le calcul est lancé en choisissant une méthode de calcul à l'équilibre limite tel que Bishop, Ordinaire (Fellenius), Janbu.

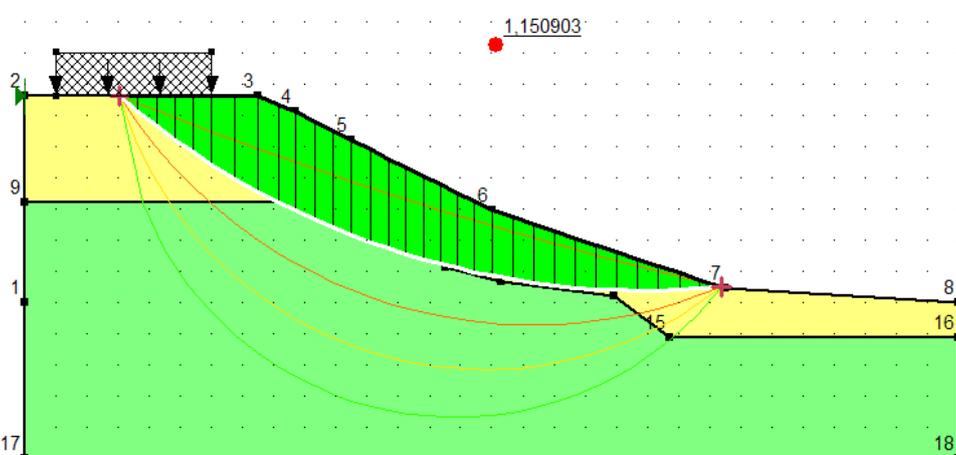
La position du cercle de rupture critique et la valeur du facteur de sécurité par les trois méthodes sont affichés sur la figure V.18 ci-dessous.



a-Selon la méthode de BISHOP.



b-Selon la méthode de FELLENIUS.



c-selon la méthode de JANBU.

**Figure V.18** Cercle de rupture critique et valeur du  $F_s$  sous chargement gravitaire seul.

### V.9.2.3 Calcul du coefficient de sécurité sous chargement gravitaire+ nappe phréatique

En présence de la nappe phréatique située plus bas que la surface du sol, le calcul se fait en une seule phase, la position du cercle de rupture critique et la valeur du facteur de sécurité par la méthode de Bishop est affichée sur la figure V.19. Les valeurs du facteur de sécurité en présence de la nappe sont présentées dans le tableau V.4

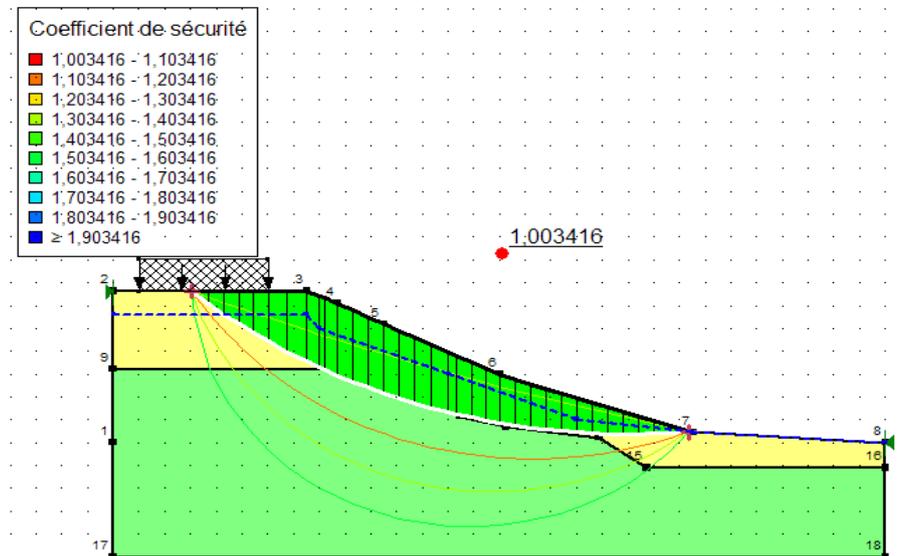


Figure V.19 Cercle de rupture critique et la valeur du  $F_s$  sous chargement gravitaire+nappe phréatique.

Tableau V.4 Valeurs du facteur de sécurité sous chargement gravitaire + nappe.

Méthode	Bishop	Fellenius	Janbu
$F_s$ (chargement gravitaire +nappe)	1.003	0.999	0.951

### V.9.3 Calcul sous chargement gravitaire+ nappe phréatique+ RPP (esp=1.8m)

Pour stabiliser le talus, nous avons utilisés les éléments en plastique recyclés RPP introduit dans le talus selon différents longueurs et espacement. L'élément en plastique recyclé RPP agit comme un pieu latéral avec une résistance au cisaillement égale à 70kN/m pour tous les modèles. Les figures V.20, V.21 et V.22 présentent des exemples de l'analyse des talus renforcés avec plusieurs configurations de l'emplacement des éléments en plastique recyclés RPP.

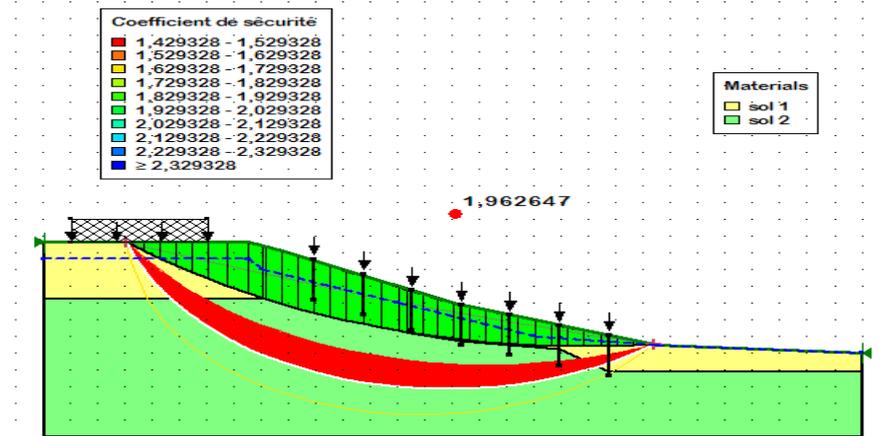


Figure V.20 Cercle de rupture critique et la valeur du  $F_S$  sous chargement gravitaire+nappe nappe+ RPP (esp=1.8m et L=2.4m).

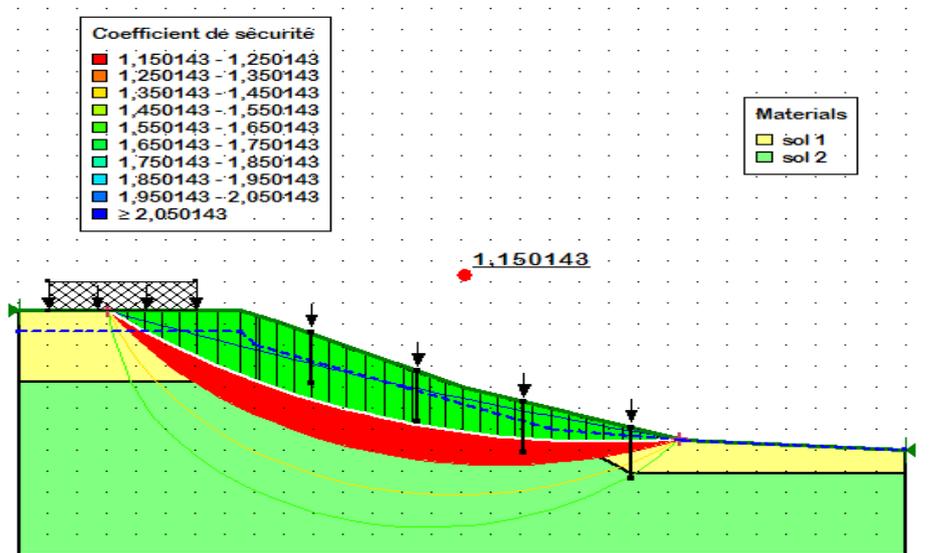


Figure V.21 Cercle de rupture critique et la valeur du  $F_S$  sous chargement gravitaire+nappe nappe+ RPP (esp=3.6m et L=2.4m).

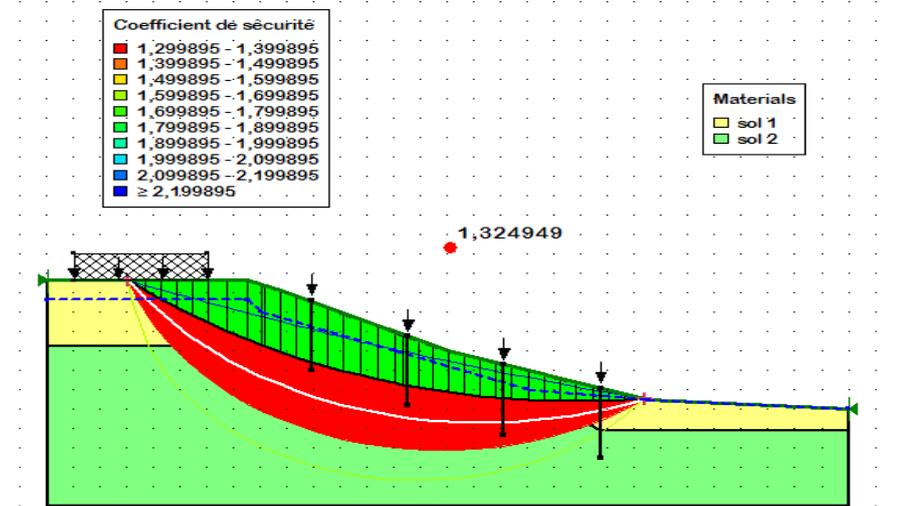


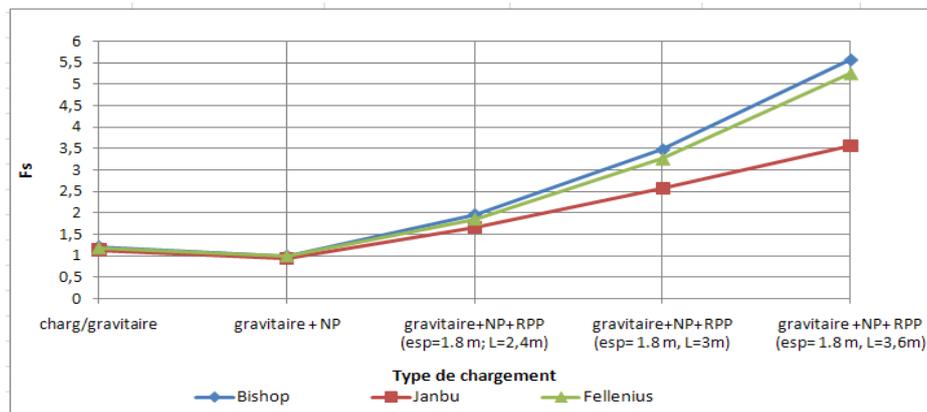
Figure V.22 Cercle de rupture critique et la valeur du  $F_S$  sous chargement gravitaire+nappe nappe+ RPP (esp=3.6m et L=3.6m).

**V.9.4 Etude paramétrique: Effet de l'espacement et de la profondeur des RPP**

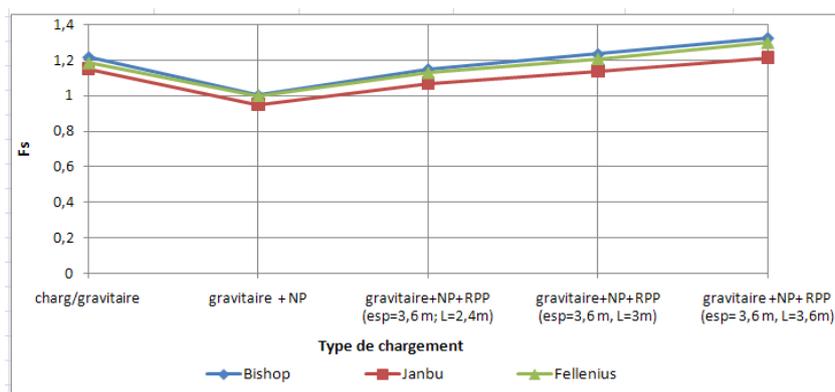
L'étude de la stabilité du talus a été effectuée en faisant varier les espacements des éléments en plastique recyclés RPP. L'étude paramétrique a pris en compte les espacements suivants : 1.8m et 3.6m en appliquant les méthodes de Bishop, Fellenius et Janbu. Le bilan des résultats sont présentés dans le tableau V.5.

*Tableau V.5 Valeurs de  $F_s$  obtenus par le logiciel Geostudio 2012.*

Type de talus $F_s$	Talus naturel (poids gravitaire seul)	Talus naturel + nappe phréatique	Talus avec RPP espacement 1.8 m			Talus avec RPP espacement 3.6 m		
			L=2.4 m	L=3.0 m	L=3.6 m	L=2.4 m	L=3.0 m	L=3.6 m
<b>Bishop</b>	1.217	1.003	1.962	3.47	5.560	1.150	1.234	1.324
<b>Janbu</b>	1.150	0.951	1.667	2.577	3.563	1.071	1.139	1.215
<b>Fellenius</b>	1.184	0.999	1.859	3.266	5.254	1.129	1.208	1.299



*Figure V.23  $F_s$  en fonction du type de chargement et des longueurs RPP pour un esp=1.8 m.*



*Figure V.24  $F_s$  en fonction du type de chargement et des longueurs des RPP pour un esp=3.6m.*

Les résultats de la variation du facteur de sécurité avec différentes longueurs et espacements des RPP sont présentés dans le tableau V.5, d'après les figures V.23 et V.24, on peut déduire les résultats suivants :

- Le renforcement du talus avec des éléments en plastique recyclés RPP a amélioré les coefficients de sécurité en utilisant les méthodes d'analyse limite (Bishop, Fellenius, Janbu).
- L'analyse de la stabilité du talus renforcé par des RPP a fournis une résistance au plan de rupture de la pente peu profonde. Les facteurs de sécurité de la pente renforcée variaient pour un espacement de 1.8m entre 1,962 pour les RPP de longueur 2.44m à 5.56 pour les RPP de longueur 3,6 m.
- À un espacement des RPP supérieur à 1,8 m, le facteur de sécurité s'améliore avec l'augmentation des longueurs des RPP, cependant le taux d'augmentation est moins important pour l'espacement égal à 3.6m.
- Une diminution dans les facteurs de sécurité est observée pour les RPP de 3 m et 3.6 de long par rapport au RPP de 2.4 m de long.
- L'analyse de la stabilité du talus par les méthodes d'équilibre limite implantés dans le logiciel Geoslope a montré que la méthode de " Fellenius" sous estime les valeurs du facteur de sécurité par rapport à ceux calculés par les méthodes de "Bishop et Janbu"

## V. 10 Conclusion

Une pente d'autoroute 2.5H: 1V située dans le site I-70 Emma a été renforcée avec des éléments en plastique recyclé RPP et sélectionnée comme pente de référence. L'étude actuelle a été menée pour observer l'effet du renforcement des talus avec des éléments en plastique recyclé RPP, ainsi que l'effet de la variation des longueurs et des espacements sur le facteur de sécurité. La pente a été analysée par les méthodes d'équilibre limite "Bishop, Fellenius et Janbu" implantés dans le programme Slope intégré sous Geostudio 2012.

L'étude paramétrique a été menée avec des longueurs RPP de 3,6 m, 3m et 2,4, et des espacements variant entre 1,8 m et 3.6m. L'augmentation dans l'espacement des RPP a engendré une diminution des facteurs de sécurité.

Les facteurs de sécurité enregistrés avec des espacements des RPP inférieurs ou égales à 1.8m assurent la stabilité du talus sous chargement gravitaire en présence de nappe phréatique et surcharge sur le sommet du talus.

Selon l'analyse de la stabilité effectuée, les éléments en plastique recyclés RPP peuvent être installés avec un espacement plus ou moins grand avec des longueurs spécifiques est très rentable d'un coté économique, car l'équipement d'installation investie est plus légers par rapport aux autres méthodes ce qui induit des frais de transport réduits.

L'utilisation du plastique recyclé dans la fabrication des éléments en plastique recyclés RPP a également des avantages environnementaux et politiques car il réduit le volume de déchets entrant dans les décharges.

---

**Références bibliographiques du cinquième chapitre**

- [1] Bowders, J. J., Loehr, J. E., Salim, H., and Chen C. W. *Engineering Properties of Recycled Plastic Pins for Slope Stabilization*, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, No. 03-3974, TRB, National Research Council, 1-8.(2013).
- [2] Costet J., Sanglerat, G. *Cours pratique de mécanique des sols, tome 2*. Edition Eyrolles. , Paris. (1983).
- [3] Durville, J.L., Seve, G. *Stabilité des pentes : Glissements en terrain meubles*. *Techniques de l'ingénieur*, C254.
- [4] Loehr, J. E., Bowders, J. J., Owen, J. W., Sommers, L., and Liew, W. "Stabilization of Slopes Using Recycled Plastic Pins", *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, National Academy Press, No. 1714, Paper No. 00-1435, 1-8. (2000).
- [5] Loehr, J. E., and Bowders, J. J. *Slope Stabilization using Recycled Plastic Pins – Phase III, Final Report: RI98-007D*, Missouri Department of Transportation, Jefferson City, Missouri. (2007).
- [6] Loehr, J. E., and Bowders, J. J.. *Slope Stabilization using Recycled Plastic Pins – Phase III, Final Report: RI98-007D*, Missouri Department of Transportation, Jefferson City, Missouri. (2007).

# **Conclusion Générale**

## **Conclusion générale**

En raison de l'urbanisation et la modernisation, la nécessité de réaliser des ouvrages de génie civil tel que : les routes, voies ferrées, barrages, les murs de soutènement, tunnels et bâtiments a connue une augmentation en revanche, plusieurs sites ont épuisé leurs terrains de bonne qualité.

L'importation des sols de bonne qualité sur de longues distances s'avèrent très coûteux et prend du temps. Pour remédier à ce problème, plusieurs techniques de stabilisation des sols sont utilisées. Cependant, le choix entre ces méthodes dépend du type du sol et de la nature du projet.

Généralement, les méthodes de stabilisation des sols utilisent dans la plus part du temps du matériel difficile à transporter et des matériaux trop onéreux. Dans ce contexte, des nouvelles méthodes de stabilisation des sols sont proposés basés sur la valorisation des déchets issues des différents secteurs industriels tel que : le plastique, le caoutchouc le verre, etc.

Dans le domaine le domaine de génie civil, et particulièrement en géotechnique plusieurs essais ont été réalisés en utilisant les déchets inertes sous forme de fibres, granulat, ou poudrette. Ces derniers, mélangés au sol forment un matériau composite (sol renforcé) présentant des caractéristiques mécaniques à déterminer avant son utilisation sur les projets et les chantiers.

Dans ce travail, on a exposé trois essais réalisés avec des déchets recyclés, le premier essai a montré que l'ajout des déchets plastiques PET avec du sable a amélioré la capacité portante du sol. Le deuxième essai est réalisé dans le but d'étudier la stabilité des murs de soutènement ancrés dont le sol est renforcés avec de la poudrette de caoutchouc en pourcentage du poids du sol. Les résultats de cet essai ont montrés que l'ajout de la poudrette a diminué considérablement la propagation des surfaces de glissement. Le troisième essai, réalisé en vraie grandeur sur le site I70-Emma, a montré l'efficacité d'utilisation des éléments en plastique recyclés RPP dans la stabilisation des glissements de terrain peut profonds.

Afin de valider les essais présentés en utilisant des déchets inertes recyclés, on a réalisé deux études numériques. La première, est une étude numérique sur le comportement des fondations reposant sur une couche de sol renforcée avec des paillettes en plastique PET au moyen du logiciel PLAXIS 8.6. La deuxième, est une étude numérique sur la stabilisation des talus avec des éléments en plastique RPP au moyen du logiciel Geostudio 2012.

D'après les résultats obtenus, on a pu tirer les conclusions suivantes :

La capacité portante de la semelle s'est améliorée considérablement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de sol renforcé en plastique PET sous la semelle jusqu'à une valeur optimale d'environ 0.75 fois la largeur de la semelle avec un pourcentage de 22.5% du poids du sol ce qui affirme les résultats expérimentales

L'augmentation de la capacité portante peut être attribuée au confinement interne fourni par les couches de sol-plastique PET dans la zone active sous la semelle, ce qui limite les déplacements latéraux de la couche de sol.

Les déplacements verticaux, les efforts tranchants et les moments fléchissant dans la semelle ont diminué considérablement avec l'augmentation des pourcentages du plastique PET est particulièrement pour le pourcentage 22.5 %, ce qui entraîne une réduction de la quantité du ferrailage mise en œuvre.

Selon l'analyse de la stabilité effectuée, Le renforcement du talus avec des éléments en plastique recyclés RPP a amélioré les coefficients de sécurité calculés en utilisant les méthodes d'analyse limite (Bishop, Fellenius, Junbu).

Les espacements des RPP inférieurs ou égales à 1.8m assurent la stabilité du talus sous chargement gravitaire en présence de nappe phréatique et surcharge sur le sommet du talus.

Les résultats affirment l'utilité du recyclage des déchets de plastique par leur utilisation dans des aspects géotechniques, d'où des effets bénéfiques sur les considérations environnementales.