

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 :

**ROUBAH NABIL**

---

---

**Thème : VALORISATION DES RECYCLATS DANS  
LES REMBLAIS DES OUVRAGES  
GEOTECHNIQUE**

---

---

Sous la direction de : Dr ; BENAMARA Fatima Zohra

---

**Juillet 2021**

---

# Remerciements

*Avant tout, je remercie DIEU tout puissant qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de courage pour achever mes études.*

*Je voudrais aussi présenter mes remerciements à mon encadreur « Benamara Fatima Zohra », d'avoir accepté de diriger ce travail et de m'avoir orienté par ses conseils judicieux et aussi pour son aide précieux dans le but de mener à bien ce travail.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce mémoire, de me faire part de leurs remarques pertinentes qui me permettront d'enrichir ce travail et m'ouvriront sans nul doute de nouvelles pistes*

*Je tiens à remercier aussi : Le corps d'enseignants et les étudiants du département de Génie civil et hydraulique de l'Université 8 mai 1945 Guelma. Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont soutenu et encouragé avec leur générosité naturelle mais combien précieuse tout au long de nos belles années universitaires et particulièrement durant la réalisation de ce mémoire. A toutes et à tous, je voudrais dire*  
*Merci.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à ma*

*Très chère Mère et mon très cher Père qui m'ont toujours encouragé pour que  
je réussisse dans mes études*

*A ceux que j'aime et que je respecte infiniment, A mes chères sœurs OUAFA,  
IBTISSAM, HANANE et mon frère ISSAM. A toute la famille ROUIBAH.*

*Je dédie également ce travail à tous mes amis sans exception.*

**Résumé**

La valorisation des recyclât dans le domaine de Génie civil est une des solutions pour réduire l'impact néfaste des déchets sur l'environnement d'un côté et la préservation des ressources naturelles d'un autre côté. Dans ce mémoire, on va étudier l'effet d'utilisation des recyclât issues des différents déchets inertes tels que les plastiques, le caoutchouc, le verre et les matériaux de dragage des barrages dans le renforcement des remblais utilisés dans les ouvrages géotechniques ou routiers. On a utilisé une étude numérique au moyen du code Plaxis 8.6 pour modéliser trois modèles de murs de soutènements à savoir: mur en modèle réduit, mur cantilever et mur poids renforcés avec des déchets d'origine plastique PET et des copeaux de pneu (TC) mélangés avec du sable. Ce mélange est utilisé comme un remblai derrière ces murs de soutènements, afin d'analyser la stabilité des ouvrages renforcés et affirmer les avantages de la valorisation des déchets dans le domaine de génie civil et travaux publics.

**Mots clés :** Matériaux recyclés (PET et TC), renforcement, murs de soutènements, remblais, stabilité, Plaxis 8.6

**Abstract**

The valorization of recycles in the field of civil engineering is one of the solutions to reduce the harmful impact of waste on the environment on the one hand and the preservation of natural resources on the other hand. In this thesis, we will study the effect of using recycled materials from different inert wastes such as plastics, rubber, glass and dredged materials from dams in the reinforcement of embankments used in geotechnical or road structures. We have used a numerical study using the Plaxis 8.6 code to model three retaining wall models namely: reduced model wall, cantilever wall and weight wall reinforced with PET plastic waste and tire chips (TC) mixed with sand. This mixture is used as a backfill behind these retaining walls, in order to analyze the stability of reinforced structures and to assert the advantages of waste recovery in the field of civil engineering and public works.

**Keywords:** Recycled materials (PET and TC), reinforcement, retaining walls, backfill, stability, Plaxis 8.6

تعد عملية إعادة تدوير المواد المستردة في مجال الهندسة المدنية هي أحد الحلول للحد من الأثر الضار للنفايات على البيئة من جهة والحفاظ على الموارد الطبيعية من جهة أخرى. في هذه المذكرة قمنا بدراسة جدوى تأثير نفايات الخاملة المعاد تدويرها من مختلف المواد مثل البلاستيك والمطاط والزجاج والمواد المجرفة من السدود في تقوية الردم المستخدمة في الحيو تقنيّة أو هياكل الطرق. حيث قمنا بدراسة رقمية باستخدام برنامج Plaxis 8.6 لثلاثة نماذج و هم جدار الاسناد لمجسم مصغر ، جدار الاسناد الكانتيليفر وجدار مدعم بنفايات البلاستيك PET والمطاط (TC) ممزوجة بالرمل. هذا المزيج مستعمل ك ردم خلف هذه الجدران، من أجل تحليل استقرار الهياكل المعززة والتأكيد على مزايا استعادة النفايات في مجال الهندسة المدنية والأشغال العمومية.

**كلمات مفتاحية:** مواد معادة التدوير (PET.TC) ، تدعيم، جدار الإسناد، الردم، الاستقرار، Plaxis 8.6

# SOMMAIRE

	<b>Page</b>
Remerciement	i
Dédicaces	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Sommaire	1
Liste des figures	5
Liste des tableaux	8
Liste des symboles	9
Introduction générale	10
<b>Chapitre I les différents types de renforcement des sols</b>	
I.1 Introduction	12
I. 2 Les types de renforcement	12
I. 2.1 Le renforcement par inclusion rigides	12
I.2.1.1 Les tirants d'ancrages	12
I.2.1.2 Le clouage des sols	13
I.2.1.3 Les micro-pieux	14
I.2.1.4 Les colonnes ballastées	14
I.2.1.5 Colonnes de Jet Grouting	15
I.2.1.6 Colonnes de SoilMixing	16
I.2.2 Le Renforcement des sols de remblaiement (matériaux allégés)	16
I.2.2.1 La Terre Armée	17
I.2.2.2 Le Renforcement par géosynthétique	18
I.2.2.2.1 Le Renforcement par Géotextile	19
I.2.2.2.2 Renforcements par géogrilles	19
I.2.2.3 La technique pneusol	21
I.2.3 Renforcement par des fibres	21
I.2.3.1 renforcement par des fibres naturelles	22
I.2.3.2 Renforcement par des fibres artificielles	23
I.3 Conclusion	24
Références bibliographiques du premier chapitre	25
<b>Chapitre II les types des remblais dans les ouvrages géotechniques</b>	
II.1 Introduction	27
II.2 Les différents types des matériaux utilisés dans le remblaiement	27
II.3 Les type de remblais	28
II.3.1 Les remblais de grande hauteur	28
II.3.2 Les remblais courants	29
II.3.3 Les remblais contigus aux ouvrages	29
II.3.4 Les remblais digue	30
II.3.5 Les merlons phonique	31

II.3.6 Les remblais ferroviaire	31
II.3.7 Les remblais dépôts	32
II.3.8 Les remblais renforcés	32
II.3.9 Les remblais spéciaux et allégés (pneusol, polystyrène, expansé au remblai, etc.)	33
II.3.10 Les remblais supports de fondation	34
II.4 Ouvrages concernés par les remblais contigus	34
II.5 Le remblai contigu à l'ouvrage	35
II.6 Utilisation de matériaux granulaires	36
II.6.1 Les caractéristiques recherchées des matériaux granulaires	36
II.6.1.1 Critères granulométriques et intrinsèques recommandés	36
II.6.1.2 Masse volumique du matériau mis en œuvre	36
II.6.1.3 Paramètres physico-chimiques	37
II.6.1.4 Autres matériaux granulaires acceptables	37
II.6.2 Influence du compactage sur l'indice des vides et sur l'angle de frottement interne	37
II.6.3 Conditions particulières de mise en œuvre	38
II.6.3.1 Compactage	38
II.6.4 Contrôles de remblais contigus en matériaux granulaires	39
II.6.5 Matériaux à exclure	40
II.7 Utilisation de matériaux traités	41
II.7.1 Etude des matériaux traités	41
II.7.1.1 Paramètres de dimensionnement	42
II.7.2 Mise en œuvre et contrôle des matériaux traités	42
II.7.2.1 Matériaux traités à la chaux	42
II.7.2.2 Matériaux traités aux liants hydrauliques	43
II.7.3 Dispositifs de drainage	43
II.8 Quelques techniques de remblais allégés	44
II.8.1 Remblais allégés en sous-produits industriels	44
II.9 Conclusion	45
Références Bibliographies de deuxième chapitre	46
<b>Chapitre III Valorisation des déchets inerte dans le domaine de génie civil</b>	
III.1 Introduction	47
III.2 Les déchets recyclés utilisés dans le domaine de génie civil	47
III.2.1 Les matériaux Inerte issus du BTP	47
III.2.1.1 Le Béton	48
III.2.1.2 La brique	48
III.2.1.3 La céramique	49
III.2.1.4 Les enrobés	50
III.2.1.5 Les gravats	51
III.2.1.6 Le verre	52
III.3 Déchets usuels	53
III.3.1 L'acier	53

III.3.2 Le déchet de caoutchouc	54
III.3.2.1 les pneus	55
III.3.3 Les plastique	58
III.4 Déchets divers	60
III.4.1 Les sédiments de dragage	60
III.4.2 Les laitiers sidérurgiques	61
III.4.3 Déchets de mines de charbon	62
III.5 Conclusion	62
Références bibliographiques du troisième chapitre	63
<b>Chapitre IV modèle expérimental d'un mur de soutènement</b>	
IV.1 Introduction	66
IV.2 Le programme d'essai	66
IV.3 Matériaux utilisés	67
IV. 3.1 Sable	68
IV.3.2 Mélanges sable-copeaux de pneus (STC)	68
IV.4 Construction du modèle et instrumentation	70
IV.5 Résultats et commentaires	71
IV.5.1 Les déplacements	72
IV.5.1.1 Sans surcharge	72
IV.5.1.2 Avec surcharge	72
IV.6 Pressions des terres latérales	74
IV.7 Conclusion	75
Références bibliographiques du quatrième chapitre	76
<b>Chapitre V Etude numérique du comportement des murs de soutènements rigides renforcés avec des remblais légers</b>	
V.1 Présentation du code plaxis	79
IV.1.2 Le programme d'entrée des données (input)	79
V.1.3 Le programme de calcul	82
V.1.3.1 Le Menu De Calcul	82
V.1.4 Le programme de résultats (output)	83
V.1.5 Le programme courbe (curves)	84
V.1.6 Les modèles du comportement du sol	85
V.6.1.1 Modèle élastique linéaire	85
V.1.6.2 Modèle de Mohr-Coulomb	85
V.2 Étude numérique du comportement des murs de soutènement rigides renforcé par des remblais légers (PET, TC).	85
V.2.1 Introduction	85
V.2.2 Paramètres des matériaux utilisés dans les modèles des murs de soutènements	86
V.2.3 Analyse numérique des murs de soutènements	89
V.2.3.1 Configuration du modèle numérique du mur de soutènement en modale réduit	89
V.2.3.2 Discussions des résultats obtenus de l'étude numérique du mur en modèle réduit	96
V.2.3.3 Configuration du modèle numérique pour le mur cantilever	96
V.2.3.3.1 La modélisation du mur cantilever avec le mélange sable-PET	97
V.2.3.3.2 La modélisation du mur cantilever	103

avec le mélange (STC)	
V.2.3.4 Configuration du modèle numérique pour le mur poids	105
V.2.3.4.1 La modélisation du mur poids renforcé avec un remblai (sable-PET)	106
V.2.3.4.2 La modélisation du mur poids renforcé avec un remblai (STC)	112
V.3 Discussions des résultats	116
V.4 Conclusions	117
Référence bibliographie du cinquième chapitre	118
Conclusion générale	119

## Liste des figures

		<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b>	composition d'un tirant d'ancrage	13
<b>Figure I.2</b>	Un versant stabilisé par clouage	13
<b>Figure I.3</b>	Renforcements par des micropieux	14
<b>Figure I.4</b>	Réalisation des colonnes ballastées (en voie humide et sèche)	15
<b>Figure I.5</b>	La technique de jet grouting	15
<b>Figure I.6</b>	Procédé de réalisation des colonnes de soil mixing	16
<b>Figure I.7</b>	Renforcement par de la terres armée	17
<b>Figure I.8</b>	Ouvrage en remblai renforcé par nappes de géotextile à parement incliné	19
<b>Figure. I.9</b>	Les types de géogridde	20
<b>Figure I.10</b>	Ouvrage en remblai renforcé par nappes de geogridde à parement incliné	20
<b>Figure .I.11</b>	Stabilisation d'un remblai par le pneusol	21
<b>Figure .I.12</b>	Les différents types de fibres naturelles	22
<b>Figure I.13</b>	Remblai en argile Dur-Kurigalzu	23
<b>Figure I.14</b>	Renforcement à l'aide d'un mélange d'argile et de tamarix (La Grande Muraille de Chine)	23
<b>Figure II.1</b>	Types des remblais (ferroviaire, routière)	27
<b>Figure II.2</b>	Remblai de grande hauteur	28
<b>Figure II.3</b>	Remblais pour terrassement routier	29
<b>Figure II.4</b>	Mise en œuvre d'un remblai contigu d'un ouvrage	30
<b>Figure II.5</b>	Construction d'un remblai digue	30
<b>Figure II.6</b>	Remblai qui permet de réduire la nuisance sonore provoquée par le passage des véhicules	31
<b>Figure II.7</b>	Amélioration d'un remblai de chemin de fer	32
<b>Figure II.8</b>	Stockage d'un matériau excédentaire a un dépôt	32
<b>Figure II.9</b>	Le renforcement d'un remblai	33
<b>Figure II.10</b>	Réalisation de la route avec la technique de remblais pneusol	33
<b>Figure II.11</b>	Remblai allégé polystyrène	34
<b>Figure II.12</b>	Remblai de grave sous fondation	34
<b>Figure II.13</b>	Définition des remblais contiguë, zone poids et zone de poussée	36
<b>Figure II.14</b>	Affaissements d'un remblai contigu marqué par la déformation des barrières de sécurité	38
<b>Figure II.15</b>	Zones d'exclusion aux compacteurs lourds	39
<b>Figure II.16</b>	Remblai contigu en cours d'exécution. Les épaisseurs maximales des couches ont été notées à la peinture verte sur les palplanches métallique	40
<b>Figure II.17</b>	Mise en œuvre d'un dispositif de drainage	44
<b>Figure III.1</b>	Le broyage du béton	48
<b>Figure III.2</b>	Démolition d'un bâtiment en brique	49
<b>Figure III.3</b>	Les déchets céramiques	50
<b>Figure III.4</b>	Déchet de revêtement routier	51
<b>Figure III.5</b>	Utilisation du gravât en fond de couche routière	52
<b>Figure III.6</b>	Verre récupéré d'un immeuble démolir	53

<b>Figure III.7</b>	Recyclage de l'acier	54
<b>Figure III.8</b>	L'utilisation des pneus usagés	55
<b>Figure III.9</b>	La technique pneusol	56
<b>Figure III.10</b>	Utilisation de copeaux de pneus en remblai routier	57
<b>Figure III.11</b>	Poudrettes de caoutchouc	57
<b>Figure III.12</b>	Les granulés de caoutchouc	58
<b>Figure III.13</b>	Type de plastique	59
<b>Figure III.14</b>	Paillette de bouteille en plastique	59
<b>Figure III.15</b>	Dragage des sédiments	61
<b>Figure III.16</b>	Bloc de laitier cristallisé	61
<b>Figure III.17</b>	Laitier de haut fourneau granulé (ou vérifié)	62
<b>Figure IV.1</b>	Les deux cas d'essais	67
<b>Figure IV.2</b>	Distribution granulométrique du sable	68
<b>Figure IV.3</b>	Copeaux de pneus typiques utilisés dans cette étude	69
<b>Figure IV.4</b>	Mélange .STC	69
<b>Figure IV.5</b>	Indice des vides des différents mélanges STC à l'état lâche et compactée	70
<b>Figure IV.6</b>	Le caisson du mur en modèle réduit	71
<b>Figure IV.7</b>	La Configuration du mur en modèle réduit	71
<b>Figure IV.8</b>	Effet du mélange, STC	72
<b>Figure IV.9</b>	Profil des déplacements de la paroi pour différentes surcharges	73
<b>Figure IV.10</b>	Déplacements maximums du mur en modèle réduit sous différentes surcharge	74
<b>Figure IV.11</b>	Pressions des terres latérales enregistrées	75
<b>Figure V.1</b>	exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique	80
<b>Figure V.2</b>	Le modèle du mur en modèle réduit (cas $q=0\text{kN/m}^2$ )	90
<b>Figure V.3</b>	Le modèle du mur en modèle réduit ( $q=3$ à $10\text{ kN/m}^2$ ).	90
<b>Figure V.4</b>	La génération du maillage	91
<b>Figure V.5</b>	Les phases de calculs.	91
<b>Figure V.6</b>	Le modèle déformé cas (STC 10%).	92
<b>Figure V.7</b>	Déplacement horizontale ( $U_x$ ) cas (STC 10%).	92
<b>Figure V.8</b>	Déplacement verticale ( $U_y$ ) cas (STC 10%).	93
<b>Figure V.9</b>	Contraintes horizontales ( $\sigma_{xx}$ ) cas (STC 10%)	93
<b>Figure V.10</b>	Les déplacements horizontaux en fonction de la surcharge appliquée pour différents % (TC)	95
<b>Figure V.11</b>	Les déplacements horizontaux en fonction des pourcentages (TC) pour différentes surcharges appliquées	95
<b>Figure V.12</b>	Les déplacements verticaux en fonction des pourcentages (TC) pour différentes surcharges appliquées	96
<b>Figure V.13</b>	Géométrie du mur de soutènement cantilever	97
<b>Figure V.14</b>	Modèle mur de soutènement cantilever.	97
<b>Figure V.15</b>	Les propriétés du mur de soutènement (cantilever).	98
<b>Figure V.16</b>	La génération du maillage.	98
<b>Figure V.17</b>	Contraintes initiales.	99
<b>Figure V.18</b>	Les phases de calculs	99
<b>Figure V.19</b>	Maillage déformé cas (12.5% Plastique PET).	100
<b>Figure V.20</b>	Déplacement vertical ( $U_y$ ) (12.5% Plastique PET)	100

<b>Figure V.21</b>	Déplacement horizontal ( $U_x$ ) (12.5% Plastique PET).	101
<b>Figure V.22</b>	Contraintes horizontales ( $\sigma_{xx}$ ) (12.5% Plastique PET).	101
<b>Figure V.23</b>	Les déplacements horizontaux en fonction du % PET pour le mur cantilever	102
<b>Figure V.24</b>	Les coefficients de sécurité du Mur cantilever en fonction du % PET	103
<b>Figure V.25</b>	Les déplacements horizontaux en fonction du % STC pour le mur cantilever	104
<b>Figure V.26</b>	Les coefficients de sécurité du Mur cantilever en fonction du % TC	104
<b>Figure V.27</b>	Les Déplacements Horizontaux et verticaux développés derrière le mur cantilever cas STC	105
<b>Figure V.28</b>	Géométrie du modèle	106
<b>Figure V.29</b>	Modèle du mur poids.	106
<b>Figure V.30</b>	Les propriétés du mur poids.	107
<b>Figure V.31</b>	La génération du maillage	107
<b>Figure V.32</b>	Contraintes initiales.	108
<b>Figure V.33</b>	Les phases de calculs	108
<b>Figure V.34</b>	Maillage déformé cas (22.5% Plastique PET).	109
<b>Figure V.35</b>	Déplacement vertical ( $U_y$ ) (22.5% Plastique PET).	109
<b>Figure V.36</b>	Déplacement horizontal ( $U_x$ ) (22.5% Plastique PET).	110
<b>Figure V.37</b>	Contraintes horizontales ( $\sigma_{xx}$ ) (22.5% Plastique PET).	110
<b>Figure V.38</b>	Les déplacements horizontaux en fonction du % PET pour le mur poids	111
<b>Figure V.39</b>	Les coefficients de sécurité du Mur poids en fonction du % PET	112
<b>Figure V.40</b>	Les déplacements horizontaux en fonction du % STC pour le cas mur poids	113
<b>Figure V.41</b>	Les coefficients de sécurité du Mur poids en fonction du %TC	114
<b>Figure V.42</b>	Comparaison entre les déplacements du mur cantilever et du mur poids renforcés par des copeaux de pneus (STC)	114
<b>Figure V.43</b>	Comparaison entre les coefficients de sécurités du mur cantilever et du mur poids renforcés par des copeaux de pneus (STC)	115
<b>Figure V.44</b>	Comparaison entre les déplacements horizontaux du mur cantilever et du mur poids renforcé par des PET en plastique)	115
<b>Figure V.45</b>	Comparaison entre les déplacements horizontaux et verticaux développés derrière le mur cantilever renforcé par de remblai STC	116

## Liste des tableaux

		<b>Page</b>
<b>Tableau II.1</b>	Ordre de grandeur de la pente d'un remblai en fonction de sa hauteur	29
<b>Tableau III.1</b>	Usage possible des granulats recyclés	52
<b>Tableau IV.1</b>	Les paramètres d'essai en modèle réduit d'un mur de soutènement	67
<b>Tableau IV.2</b>	Propriétés du sable	68
<b>Tableau IV.3</b>	Les propriétés des différents mélanges STC	70
<b>Tableau V.1</b>	Les propriétés des Murs de soutènements en BA	86
<b>Tableau V.2</b>	Les propriétés du sable.	86
<b>Tableau V.3</b>	Les propriétés des paillettes en plastique (PET).	87
<b>Tableau V.4</b>	Les propriétés du mélange sable-PET plastique.	88
<b>Tableau V.5</b>	Les propriétés du mélange sable copeaux de pneus	88
<b>Tableau V.6</b>	Les propriétés du sol in situ	89
<b>Tableau V.7</b>	Les propriétés des différents mélanges STC du mur en modèle réduit	89
<b>Tableau V.8</b>	Bilan des résultats pour différents pourcentages de (STC) et cas $q=0, 5, 7, 10 \text{ kN/m}^2$	94
<b>Tableau V.9</b>	Bilan des résultats de calcul pour le cas remblais (sable-PET) (Mur cantilever)	102
<b>Tableau V.10</b>	Bilan des résultats de calcul pour le cas remblais (STC) (Mur cantilever)	103
<b>Tableau V.11</b>	Bilan des résultats de calcul pour le cas mur poids renforcé par un remblai (sable-PET)	111
<b>Tableau V.12</b>	Bilan des résultats de calcul pour le cas remblais (STC) (mur poids)	113

**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

$\sigma_{xx}$ : Contraintes verticale

$F_s$ : Facteur de sécurité

**Abréviations**

PET : Déchets plastiques de polyéthylène téréphtalate.

STC: Sand, tiers, chips.

FEM : Méthode des éléments finis.

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

Certains sols en raison de leurs propriétés géotechniques médiocres sont considérés comme des sols instables qui ne présentent pas les performances nécessaires pour supporter des charges. Par conséquent, ces sols nécessitent une certaine amélioration pour augmenter leurs stabilités mécaniques et améliorer leurs performances.

Deux techniques majeures peuvent être utilisées pour accroître les caractéristiques mécaniques des sols soit par la modification de la structure interne du sol en place soit par le renforcement du sol par ajout d'inclusions. Les techniques d'amélioration des sols permettent d'accroître la compacité du sol en place en réduisant le volume des vides en imposant des vibrations dans le sol pour qu'il se densifie par réarrangement des grains.

Les techniques de renforcement des sols proprement dites font intervenir des éléments de renfort verticaux ou horizontaux dans le sol. L'objectif de toutes ces techniques est de permettre la construction d'un ouvrage sans qu'il n'y ait de déformations excessives en surface ou des défauts de stabilité.

Dans le domaine de génie civil la valorisation des déchets est un secteur important car plusieurs déchets ont trouvés leurs applications dans la mesure où les matériaux n'ont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux.

Dans ce mémoire, on a réalisé une étude numérique sur trois murs de soutènements a savoir mur en modèle réduit, mur cantilever et mur poids dont le remblai placé derrière les parois des murs est composé de deux types de mélange. Le premier est un mélange de «sable-paillettes en plastique PET» le deuxième est un mélange de «sable-copeaux de pneus STC» avec différents pourcentages, formant ainsi un composite utilisé comme matériaux de remblaiement pour les ouvrages de soutènement.

Une modélisation numérique a été faite au moyen du logiciel Plaxis 8.6 dans un but de valider le modèle du mur en modèle réduit renforcé par des STC d'un côté et généraliser ce mode de renforcement sur des murs de soutènement rigides en vraie grandeur réalisés dans des sols argileux d'un autre côté. L'objectif de ces modélisations est d'affirmer les avantages de la valorisation des déchets dans le domaine de génie civil et particulièrement dans les ouvrages Géotechniques.

Ce travail est constitué de cinq chapitres :

**Le premier chapitre** présente une synthèse bibliographique sur les différentes techniques de renforcement des sols.

**Le deuxième chapitre** est consacré à la présentation des différents remblais légers ainsi que les différents types de matériaux utilisés dans le remblaiement des ouvrages géotechniques et leur mode d'exécution.

**Le troisième chapitre** est consacré à la définition des principaux matériaux recyclés inertes et leur valorisation dans le domaine de génie civil.

**Le quatrième chapitre** est une synthèse sur un essai en modèle réduit d'un mur de soutènement remblayé par un mélange de sable et copeaux de pneus avec différents pourcentages de copeaux de pneus (TC).

**Le cinquième chapitre** est une étude numérique réalisée au moyen du logiciel Plaxis 8.6 sur trois types de murs de soutènement à savoir mur en modèle réduit, mur cantilever et mur poids renforcés par des remblais légers composés de deux types de mélanges, le premier est un mélange de sable-paille en plastique PET et le deuxième est un mélange de sable et copeaux de pneus (TC).

A la fin, nous avons présentés une conclusion générale sur le travail réalisé.

# CHAPITRE I

## I.1 Introduction

Le sol renforcé est un matériau de construction composite formé en combinant sol et armature. Ce matériau possède une résistance élevée à la compression et à la traction similaire, en principe, au béton de ciment armé. Il peut être obtenu soit en incorporant des inclusions de renfort continues (par exemple, bande, barre, nappe, filet) dans une masse de sol, ou en mélangeant des fibres au sol avant sa mise en place.

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.

L'incorporation dans le sol d'éléments de renforcements linéaires (armatures, clous métalliques,.....) ou bidimensionnels (nappes géotextiles, géogrilles,...) destinés à assurer ou à améliorer la stabilité d'ouvrages, se fait tout naturellement dans le cadre de l'approche calcul à la rupture. Depuis peu de temps, des fibres sont ajoutées dans le sol pour améliorer le comportement de la résistance des sols. Le renforcement des sols consiste, dans son principe, à associer un sol à des éléments résistants de manière à former un matériau composite, les sols renforcés sont fréquemment utilisés pour différentes structures tel les talus, les murs de soutènement et les fondations réalisées sur des sols de très faible portance.

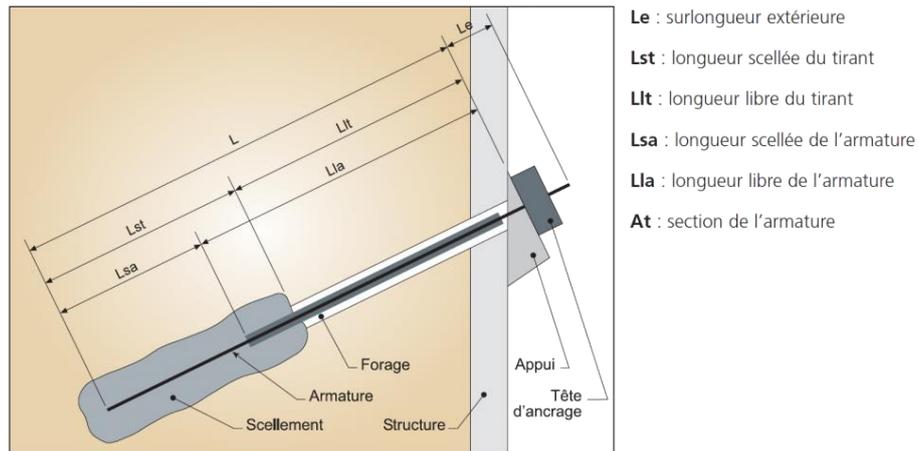
## I. 2 Les types de renforcement

Il existe une très grande variété d'éléments de renforcement utilisés dans la pratique et que l'on classe généralement suivant leur forme géométrique ; unidimensionnelle (linéaire), bidimensionnelle ou tridimensionnelle. En outre, un grand nombre de matériaux constitutifs sont possibles : acier, fibres de verre, géotextiles et produits apparentés (matières plastiques), La classification des principales techniques de renforcement des sols est fonction de la géométrie des renforcements et du type de sol. [8]

### I. 2.1 Le renforcement par inclusion rigides

#### I.2.1.1 Les tirants d'ancrages

Un tirant d'ancrage est un élément structurel capable de transmettre les forces de traction qui lui sont appliquées à une couche d'un sol résistant. Il permet de stabiliser un mur de soutènement en reportant les efforts induits par la poussée naturelle du terrain et les charges d'exploitation au-delà du cercle de glissement. Un tirant d'ancrage comprend la tête d'ancrage, la partie libre et la partie scellée au terrain (Fig. I.1). Le tirant est généralement précontraint afin de contrôler le déplacement de la paroi lors des différentes phases de construction [9].



**Figure I.1** composition d'un tirant d'ancrage [12].

### I.2.1.2 Le clouage des sols

Le clouage des sols est une technique de renforcement des sols in situ, en y installant dans le terrain à l'aide des inclusions (appelées aussi clous ou armatures), rigides et passives, éléments linéaires travaillant à la traction et au cisaillement, qui ont pour effet de limiter les déformations du sol. Ces éléments (barres, cornières, tubes, etc.) peuvent être soit mis en place par fonçage ou battage, soit mis en place dans des forages et scellés par un coulis.

Lorsque cette technique est utilisée pour des ouvrages de soutènement, les barres sont généralement horizontales et l'effort principal est la traction (Fig. I.2). [18]



**Figure I.2** Un versant stabilisé par clouage [19]

### I.2.1.3 Les micro-pieux

Les micro-pieux sont des éléments verticaux ou inclinés dont la longueur peut atteindre une vingtaine de mètres, disposé en groupes pour fonder ou consolider un ouvrage (diamètre : 20 à 25cm) (Fig. I.3) [16].

Les micro-pieux sont dotés d'une armature centrale, cette dernière est scellée dans du mortier ou du ciment. Leur utilisation est nécessaire lorsqu'une fondation superficielle s'avère insuffisante pour supporter la structure. Les micro-pieux est notamment pratique quand les travaux portent sur un sol meuble, tel que de l'argile, du sable, ou de la roche friable. Les dimensions des micro-pieux (longueur, diamètre) dépendent de plusieurs paramètres, incluant la nature du sol et le poids de charge à supporter. [17]



*Figure I. 3 Renforcements par des micro-pieux [17]*

### I.2.1.4 Les colonnes ballastées

Les Colonnes ballastées sont des Système de renforcement du sol consistant à mettre en place ponctuellement et selon un maillage donné des colonnes (diamètre faible par rapport à la profondeur) de matériau granulaire compacté à refus dans un terrain compressible (Fig. I.4).

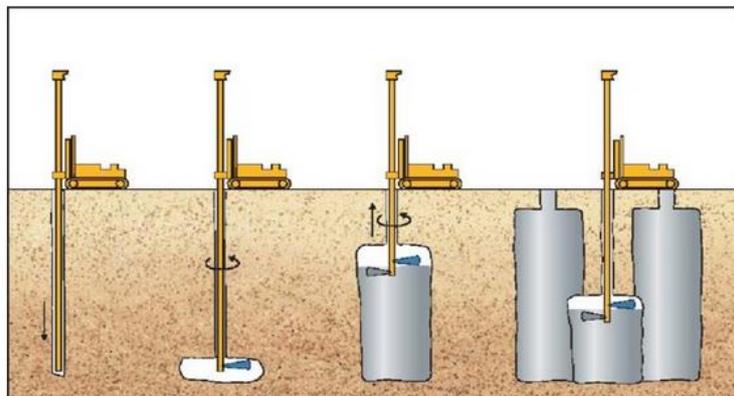
L'objectif d'un renforcement de sol par colonnes ballastées est d'améliorer les caractéristiques géotechniques d'un sol. Elles permettent, en substituant localement par un matériau granulaire frottant le sol existant peu résistant, de moindre raideur et compressible, en vue d'obtenir une amélioration mécanique globale de l'ensemble « sol/colonnes » notamment en termes de compressibilité. [7]



**Figure I.4** Réalisation des colonnes ballastées (en voie humide et sèche) [12]

### I.2.1.5 Colonnes de Jet Grouting

Les colonnes de Jet Grouting sont réalisées en déstructurant le sol en profondeur à l'aide d'un jet haute pression dans un forage et en mélangeant le sol érodé avec un coulis auto-durcissant pour former des colonnes dans le terrain. Le jet grouting permet un traitement « ciblé » et sélectif de certaines couches de sol et permet donc par exemple le « nettoyage » d'anomalies karstiques ou le traitement en profondeur de couches molles situées sous des couches épaisses et compactes. Dans certains cas particuliers, il permet également de traiter un terrain contre la liquéfaction (Fig. I.5). Enfin, la faible dimension des machines de forage utilisées permet de traiter à l'intérieur des bâtiments, en reprise d'ouvrages existants ou dans des zones difficilement accessibles. [3]



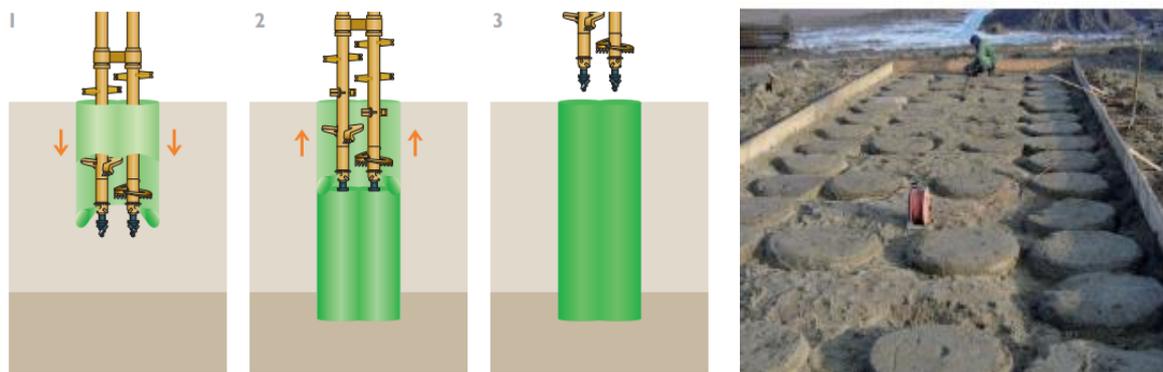
**Figure I.5** La technique de jet grouting

### I.2.1.6 Colonnes de Soil Mixing

Les colonnes de Soil Mixing sont réalisées par malaxage entre le sol en place et un liant (voie sèche) ou un coulis (voie humide) formant une colonne verticale cylindrique (Fig. I.6). On cherche soit à améliorer les paramètres mécaniques du sol, soit à réduire sa perméabilité. Les applications du soil mixing sont :

- L'amélioration de sol pour diminuer les tassements, augmenter la butée ou diminuer les poussées.
- La réalisation de parois étanchées.
- La réalisation de soutènements étanches. Dans ce cas, des profilés métalliques sont introduits dans les colonnes de soil mixing à intervalles réguliers.
- Stabilisation de talus
- Suppression du risque de liquéfaction
- Digue, barrages et parois étanches
- Confinement et stabilisation des polluants

Suivant les applications, les colonnes seront disposées en maillage de colonnes unitaires, en maillage de colonnes sécantes, en alignements de colonnes jointives ou sécantes [22]



*Figure I.6 Procédé de réalisation des colonnes de soil mixing*

### I.2.2 Le Renforcement des sols de remblaiement (matériaux allégés)

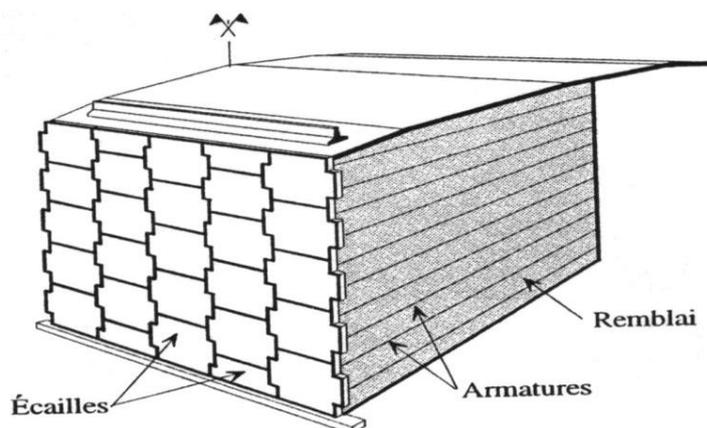
Les remblais renforcés sont de plus en plus utilisés comme solution de soutènement. Dans ces géostructures, des couches horizontales de renforcement sont installées au sein d'un matériau de remplissage (sable et gravier) afin de créer une masse de sol renforcée qui résistera aux forces de poussée des terres se développant derrière celle-ci. Les renforcements peuvent être

en acier (barres, filets, échelles...) ou en géosynthétique (géogrilles, géotextiles tissés et bandes polyester). A l'avant du remblai, la stabilité locale du matériau de remplissage est assurée en attachant les renforcements à des éléments de recouvrement (en polymère, bois, béton, gabions métalliques...) ce qui est très intéressant au niveau urbanistique ou esthétique. Il est aussi important de considérer les tendances internationales durables comme l'utilisation de matériaux de remplissage alternatif (à la place du sable et gravier) tels que les sols « pauvres » (sols remaniés et cohésifs, éventuellement traités), caoutchouc, sous-produits industriels, gravats, déchets, boues de dragage... [20]

### I.2.2.1 La Terre Armée

Cette technique consiste à renforcer des sols par l'association d'armatures métalliques et de remblai grenu, type sable, qui permet la formation d'un massif mécaniquement plus performant. Un massif en terre armée est constitué de deux composants : Un remblai granulaire compacté en couches peu épaisses et des armatures disposées en lit dans le remblai qui peuvent être de deux natures : Les métalliques qui sont jusqu'à maintenant les plus répandues et des armatures en géo synthétique qui ne présentent pas de problème de corrosion et qui tendent à remplacer les premières. [1]

Ce dispositif est complété par une « peau » qui n'est qu'un parement très léger destiné à protéger la surface de l'érosion. Cette peau est souvent constituée d'écailles préfabriquées en béton sur lesquelles les architectes apportent un effet décoratif (Fig. I.7)



**Figure I.7** Renforcement par de la terres armée [5]

### **I.2.2.2 Le Renforcement par géosynthétique**

La géosynthétique est un produit dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande, ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou d'autres matériaux, dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.[11]. Il existe un certain nombre de géosynthétiques, pour des raisons pratiques, il est amené à regrouper ces géosynthétiques en deux grandes familles et ce en se basant sur leur mode de fabrication et leur rôle dans un ouvrage. Ainsi, on retrouve :

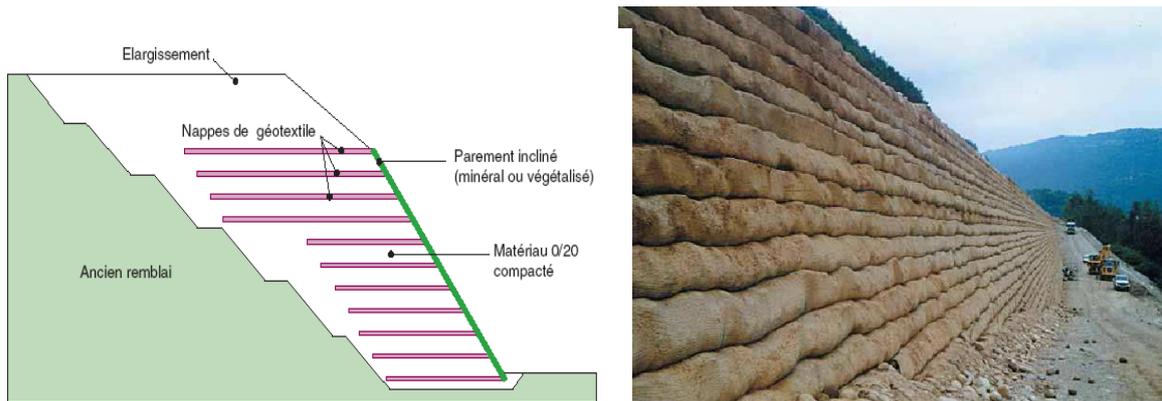
Les produits perméables qui ont pour caractéristique commune d'être perméables aux fluides ou dont l'étanchéité n'est pas la fonction principale telle que les géotextiles et les produits apparentés aux géotextiles qui sont principalement : les géogrilles, les géonets, les géofiles, les géoconteneurs.

Les produits imperméables dont la fonction principale est l'étanchéité aux fluides. On distingue dans cette catégorie, les géomembranes et les produits apparentés aux géomembranes (les géosynthétiques bentonitiques). L'association de ces deux familles de produits forme les géocomposites. Pour un géosynthétique, on distingue six fonctions principales suivantes : Drainage, Filtration, Séparation, Renforcement, Protection, Contrôle de l'érosion, Etanchéité. [19]

#### **I.2.2.2.1 Le Renforcement par Géotextile**

Les géotextiles sont des produits tissés, non tissés, ou tricotés, perméables, fabriqués à base de polymères (polypropylènes, polyesters, polyéthylènes) et utilisés dans les domaines de la géotechnique et du génie civil, La géotextiles de renforcement intervient comme élément de renfort

au sein d'une masse de sol ou en combinaison avec le sol pour produire un composite ayant des propriétés en déformation et une résistance améliorées par apport à un sol non renforcé (Fig. I.8). Les géotextiles et les géogrilles sont utilisés pour augmenter la résistance à la traction d'une masse de sol afin de créer des pentes verticales ou subverticales tels que les murs en sol renforcé. [9]



**Figure I.8** Ouvrage en remblai renforcé par nappes de géotextile à parement incliné [10]

### I.2.2.2 Renforcements par géogrilles

Une géogrille est une structure plane à base de polymère, constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entre lacement, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants et permettant le confinement du sol. La grandeur des mailles varie généralement de 1 et 10 cm pour permettre la pénétration des gros éléments du sol, et la création d'un effet d'imbrication de ces constituants dans la géogrille. Pour obtenir l'effet de renforcement il est nécessaire que les gros éléments s'imbriquent de la moitié de leur volume dans la maille. On distingue des géogrilles mono-axiales et bi-axiales (Fig. I.9) :

- ✓ **Mono-axiale** la résistance à la traction est plus importante dans un sens (longitudinal ou transversal) que dans l'autre.
- ✓ **Bi-axiale** la résistance à la traction est sensiblement équivalente dans le sens longitudinal et transversal [11]

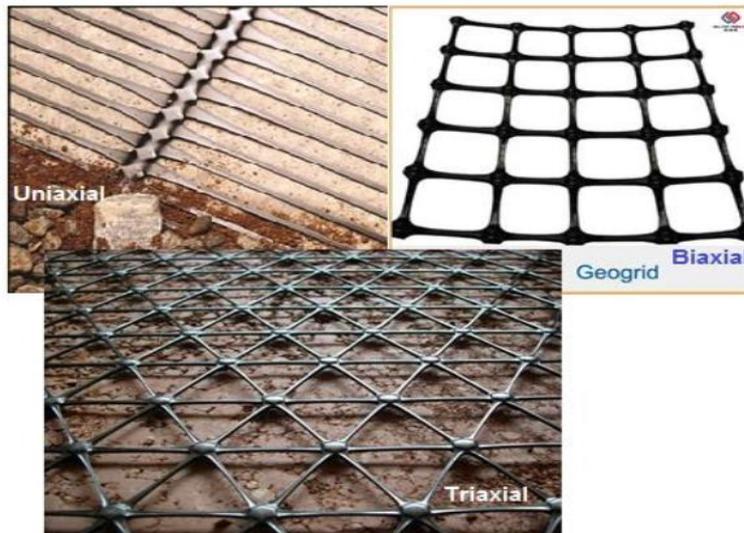


Figure I.9 Les types de géogrille [11]

Sur la Figure I.10, les géogrilles sont posées en couches successives, la géogrille qui sert à envelopper la couche de remblai inférieure est raccordée à la géogrille supérieure par un connecteur en PEHD pour assurer la continuité. Le parement est réalisé grâce à des panneaux de treillis métalliques préalablement cintrés en fonction de la pente souhaitée qui constituent un coffrage perdu et permettent.

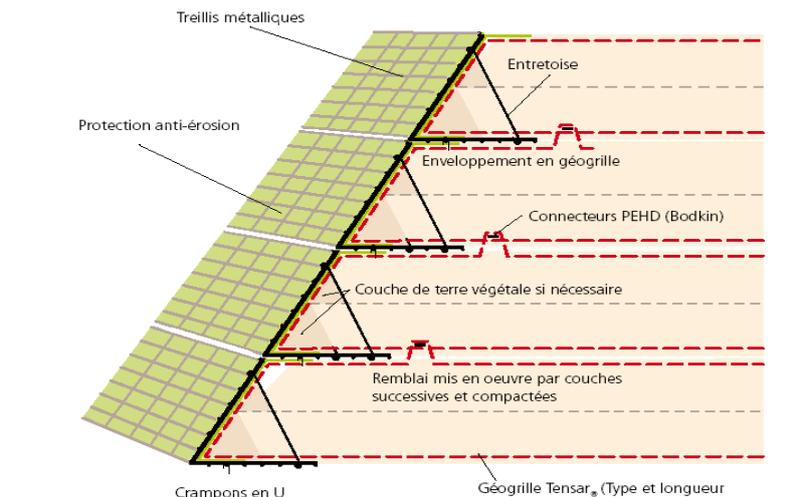


Figure I.10 Ouvrage en remblai renforcé par nappes de géogrilles à parement incliné [10]

### I.2.2.3 La technique pneusol

Le renforcement en pneumatique n'exige 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 renforcé avec les géotextiles ou pour la terre armée. Le pneusol présente l'avantage de pouvoir améliorer les propriétés mécanique du sol soit de manière anisotrope, c'est-à-dire uniquement dans la direction ou le matériau et le plus sollicité (nappe, bande linéaire,...), soit de manière isotrope dans toutes les directions (chaîne continue d'élément mélangée au sol de remblai).

Le pneusol est formé par l'association de pneus usagés (poids lourd ou tourisme) entiers, partiellement découpés (élément d'un flanc) , ou totalement découpés (deux flancs et une bande de roulement) et de sols pulvérulents, cohérents ou déchetts, les éléments de pneus sont utilisés comme renforts du massif de sol (Fig. I.11).

Les voies de valorisation du caoutchouc sont de plus en plus objets de projets diversifiés de recherche et développement, les pneumatique usagés peuvent êtres broyés en poudrette ou en granulés de caoutchouc, c'est produits sont utilisés en combinaison avec d'autre matériaux .[13]



*Figure I.11 Stabilisation d'un remblai par le pneusol*

### I.2.3 Renforcement par des fibres

Le terme "Fibre" se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu [4].

### I.2.3.1 renforcement par des fibres naturelles

Le principe de renforcement des sols par des matériaux naturels est une technique très ancienne dans le génie civil, qui existe depuis des milliers d'années, le renforcement s'effectuait à base de produits naturels existant dans les différentes régions.

Les fibres naturelles sont aussi bien des fibres organiques, d'origine végétale ou animale, que des fibres minérales telles que l'amiante ou le verre. Ces fibres naturelles peuvent être classées par origine (Fig. I.12).

L'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables.

Les fibres végétales comprennent :

- Les fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- Les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie),
- Les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco) ;
- Le chanvre et la jute peuvent être ajoutés dans les fibres végétales issues de tiges.

Des sarments de vigne, des branches de bambou, des papyrus, des tamarix, halfa, ediss, palmier et autres fibres furent utilisées pour renforcer des briques argileuses et des sols granulaires.

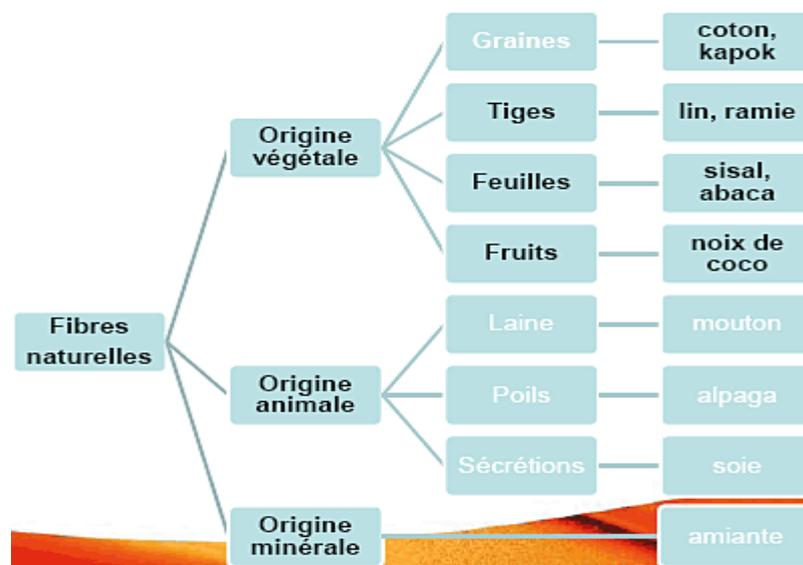
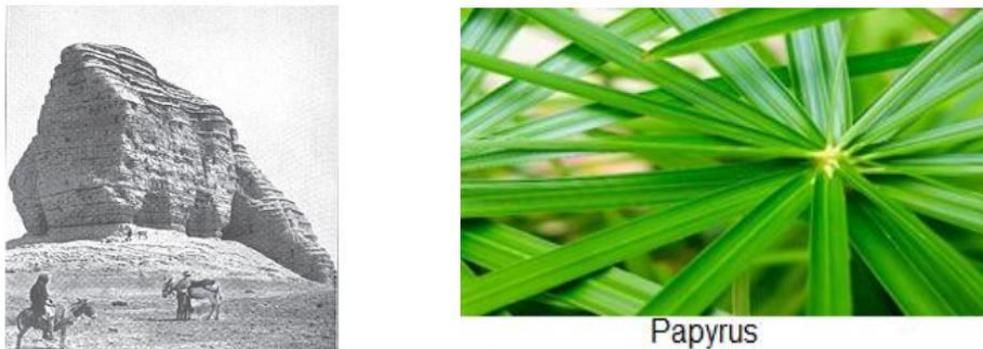


Figure I.12 Les différents types de fibres naturelles [15]

Au temps des pharaons cette méthode a été adaptée pour la stabilisation des chaussées ou des remblais d'argile par renforcement en papyrus (Fig. I.13) ou lors de la construction de la grande muraille de chine où on avait recours à cette méthode par un mélange d'argile et de tamarix. Des essais récents réalisés sur ces fibres végétales ont montrés qu'une augmentation de la teneur en fibres entraîne une réduction de la densité sèche, cela est dû à la réduction du poids unitaire moyen des solides dans le mélange de fibres du sol (Fig. I.14).



*Figure I.13 Remblai en argile Dur-Kurigalzu [2]*



*Figure. I.14 Renforcement à l'aide d'un mélange d'argile et de tamarix (La Grande Muraille de Chine) [2]*

### **I.2.3.2 Renforcement par des fibres artificielles**

Les fibres sont généralement disponibles en grandes quantités sous forme artificielles 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. [12]

L'utilisation d'inclusions de fibres de polypropylène est une méthode qui a récemment été largement appliquée dans le domaine de la géotechnique pour augmenter les propriétés mécaniques des sables de qualité médiocres. Les applications qui visent à augmenter la résistance du sol en mélangeant des fibres dans le sol sont les suivantes [6]:

- Stabilisation des pentes locales avec un mélange de fibres et de sol, construction de remblais avec des pentes plus raides,
- Minimisation des fissures de contraction dans les couches d'argile condensée [15]
- Stabilisation mécanique des routes flexibles et couches de base des chaussées de piste d'atterrissage.

De plus, la construction de sols renforcés de fibres est facilement réalisée en mélangeant simplement du sol avec des fibres, puis en compactant correctement le mélange.

### **I.3 Conclusion**

Nous avons exposé dans ce chapitre les différentes techniques de renforcement de sol permettant d'améliorer ces caractéristiques mécaniques. Le renforcement du sol vise à pallier les problèmes de tassement, de portance ou de liquéfaction sous un ouvrage. Ces techniques permettent d'améliorer les mauvais sols de façon à les rendre après renforcement aptes à supporter les différentes sollicitations appliquées au sol supportant un ouvrage de génie civil.

**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] Baker, W. H. (editor). (1982), *Grouting in Geotechnical Engineering, Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, February 10–12, 1982, New Orleans, LA, ASCE*

[4] Benali Redha, université Mohamed khider Biskra, 2010(*étude du comportement mécanique et rhéologique de la pâte du ciment, mortier et béton avec différentes fibres*) 2010

[5] Camille Maginot, *thèse doctorat de l'université de Toulouse le 8 juin 2010(contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco- matériau de construction à base d'agro- ressources).*

[6] Costas A. Anagnostopoulos, Theodosios T. Papaliangas, Dimitrios Konstantinidis & Christos Patronis *Shear Strength of Sands Reinforced with Polypropylene Fibers, Geotechnical and Geological Engineering volume 31, pages 401–423 (2013)*

[7] *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).*

[8] Laurent Briançon, Philippe Liausu, Claude Plumelle, Bruno Simon- *Amélioration et renforcement du sol -Collection Expertise technique (2018).*

[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, Serge Lambert, *Fondation et procédés d'amélioration des sols. Guide d'application*, édition Afnor, Eyrolles, France. (2013)

[13] Vidal, H, Schlosser F., *La terre armée. Bultin de liaison du Laboratoire Central des Ponts et chaussées*, Paris. (1969)

[14] Volume I. U. S. Department of Transportation Publication No. FHWA-NHI-10-024 *Federal Highway Administration FHWA GEC 011 – Volume I. November (2009).*

[15] Ziegler S, Leshchinky D, Ling HL, Perry EB (1998) *Effect of short polymeric fibers on crack development in clays. Soil Found 38(1):247–253*

[16] <https://www.soltechnic.com/techniques/75-micropieux.html>.

[17] <https://www.plus-que-pro.fr/P-1284-439-B1-un-micropieu-c-est-quoi.html>.

[18] [http://www.freyssinet.com/freyssinet/wfreyssinet\\_fr](http://www.freyssinet.com/freyssinet/wfreyssinet_fr).

[19] <https://moducal.nc/nos-prestations/clouage>.

[20] <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=projects&proj=1185>

[21] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/stabilite-des-sols-fondations-42219210/les-geosynthetiques-de-renforcement>.

[22] <https://www.keller-france.com/expertise/techniques/deep-soil-mixing-dsm-par-voie-humidec305>.

# CHAPITRE II

## II.1 Introduction

Le terme remblai couvre un large panel d'ouvrages en terre destinés à surélever durablement le niveau de sol support par un apport de matériaux dans le cadre de projet d'infrastructure, ou remblaiement de culées de ponts et aux murs de soutènement qui nous permettent de choisir le matériau à mettre en œuvre dans ces remblais particuliers afin de garantir les exigences de pérennité et de durabilité. [9]

Un remblai est un ouvrage en terre qui provient de la mise en place de matériaux. Il doit pouvoir supporter les sollicitations ultérieures (trafics routier ou ferroviaire, bâtiments, superstructures...) (Fig. II.1) sans déformation préjudiciable (tassements, glissements...).



*Figure II.1 Types des remblais (ferroviaire, routière)*

La qualité d'un remblai dépend de la nature des matériaux qui le compose et de leur mise en œuvre. Les matériaux, issus des déblais (Consiste à abaisser le niveau du terrain par enlèvement des terres du site ou d'un emprunt, doivent être mis en place à une teneur en eau correcte (pour assurer une portance suffisante) et compactés (pour garantir leur stabilité). [9]

## II.2 Les différents types des matériaux utilisés dans le remblaiement

On peut utiliser différents matériaux pour le remblaiement. Ce matériau est choisi en fonction de la configuration du terrain en question, mais aussi selon le type de sol rencontré. Il convient en effet de s'adapter à ce dernier afin de limiter tout risque de déformation, de glissement et de tassement.

Les matériaux les plus souvent utilisés sont :

- La terre de remblai, exceptions faites des terres argileuses, sableuses et humides.

- Le sable de remblai.
- Les roches siliceuses (grès), très résistantes mais toutefois fragmentables.
- Les roches argileuses (schistes), cependant friables.
- La craie, uniquement pour les sols très secs.
- Les gravats, soit les débris de matériaux issus de la construction (morceaux de parpaings, de briques ou de blocs de ciment) qui auront été préalablement débarrassés de leurs éléments dégradables, matières susceptibles de gonfler, et ferrailles.

Bien souvent, le remblai est réalisé avec la terre extraite du sol au moment du déblai. Un apport supplémentaire (de terre, sable, roches, etc.) peut toutefois être nécessaire [8].

### II.3 Les type de remblais

#### II.3.1 Les remblais de grande hauteur

Les grands remblais sont plus qu'un empilement de couches bien compactées, Leurs déformations peuvent être importantes et évoluer au cours du temps. Ils sont le plus souvent hétérogènes parfois constitués de matériaux évolutifs. Ils comportent des ouvrages transversaux et longitudinaux (Les réseaux d'assainissement des eaux). Les remblais de grande hauteur (fig. II.2) peuvent également être construits avec des matériaux de caractéristiques moins sécuritaires (sols fins argileux notamment).[9]



*Figure II. 2 Remblai de grande hauteur*

Les pentes de talus des remblais de hauteur moyenne à grande hauteur peuvent être fixées a priori en fonction de la hauteur du remblai et de la nature des matériaux conformément aux indications données dans le tableau ci-après :

**Tableau II.1** Ordre de grandeur de la pente d'un remblai en fonction de sa hauteur

Nature du matériau	Hauteur du remblai		
	$h \leq 5$ m	$5 \leq h \leq 10$ m	$h \geq 10$
Sols et matériaux cohérents sensibles à l'eau ou matériaux rocheux issus de roche altérée ou argileuse mais fragmentable	Pente $\leq 2/3$	Pente $\leq 1/2$	pas de règle générale : la pente doit résulter d'une étude de stabilité
matériaux granulaires insensibles à l'eau d'origine alluvionnaire ou matériaux rocheux issus de roche tendre non argileuse	Pente $\leq 1/1$	Pente $\leq 2/3$	pas de règle générale : la pente doit résulter d'une étude de stabilité
matériaux issus de roche dure non altérée	Pente $\leq 1/1$	Pente $\leq 1/1$	Pente $\leq 2/3$ avec risberme

### II.3.2 Les remblais courants

Les remblais courants ont pour fonction essentielle de garantir la géométrie des projets conformément aux exigences du projecteur routier et de supporter la structure de la chaussée. Leur évolution doit être limitée afin de garantir un niveau de service correct sur la voirie (Fig.II.3). La conception et la mise en œuvre de ces remblais se font suivant les recommandations du GTR [5] et du guide à la conception et à la réalisation des terrassements [9] qui garantissent théoriquement à l'ouvrage en terre une tenue à long terme.

**Figure II.3** Remblais pour terrassement routier

### II.3.3 Les remblais contigus aux ouvrages

Les remblais contigus, appelés aussi remblais techniques ou blocs techniques, sont une partie intégrante des ouvrages. Ils contribuent à la stabilité de l'ouvrage et assurent la transition entre les structures rigides, souvent en béton, et le déblai ou le remblai courant. Leurs rôles sont souvent sous-estimés, voire méconnus, alors qu'ils sont parfois le cœur, donc la clé de la réussite

de certains ouvrages.

Les remblais contigus aux ouvrages (Fig. II.4) ont pour fonction essentielle d'assurer la transition entre la section courante et les ouvrages d'art (rigide) et d'épauler l'ensemble des ouvrages inférieurs de franchissement (buse hydraulique, traversées pour faune, etc) [11].



**Figure II.4** Mise en œuvre d'un remblais contigus d'un ouvrage

### II.3.4 Les remblais digue

Les remblais digues ont pour fonction de maintenir en eau un ouvrage de type bassin, lac ou autre plan d'eau et de prévenir le risque d'inondation (crues, etc...) [12]. Pour cela, les remblais digue doivent être capables de résister à un contact prolongé avec l'eau (Fig. II.5). Ils peuvent avoir une fonction de remblais routier dans certain cas ;



**Figure II.5** Construction d'un remblai digue

### II.3.5 Les merlons phonique

Un merlon est un ouvrage consistant en une levée de terre destinée à servir d'écran phonique ou visuel et arrêter ou dévier les pierres et blocs rocheux provenant des falaises et versants. On parle alors de merlon pare-blocs [13].

Les merlons phonique ont pour fonction de constituer un atténuateur de bruit (Fig. II.6), ils possèdent souvent une pente de talus assez importante et un compactage médiocre, pouvant être la cause de désordre.



*Figure II.6 Remblai qui permet de réduire la nuisance sonore provoquée par le passage des véhicules*

### II.3.6 Les remblais ferroviaire

Les remblais ferroviaires ont pour fonction de supporter une voie ferrée (Fig. II.7). Ces remblais peuvent être construits à partir de règle de conception et de mise en œuvre proche de celle appliquée pour les remblais routiers, mais ils obéissent à des contraintes d'exploitation différentes [14].



*Figure II.7 Amélioration d'un remblai de chemin de fer*

### II.3.7 Les remblais dépôts

Les remblais dépôts ont pour fonction de stocker des matériaux excédentaires (Fig. II.8) ou impropres en l'état à une mise en remblai courant [15];



*Figure II.8 Stockage d'un matériau excédentaire à un dépôt*

### II.3.8 Les remblais renforcés

Les remblais renforcés ont pour fonction de réduire l'emprise au sol (cas courant en agglomération) et de renforcer la stabilité générale de l'ouvrage (Fig. II.9), ces remblais sont traités par les normes NF P94-270 et NF EN 14475 pour leur conception et leur exécution et dans le guide technique SETRA /LCPC de 2003 pour leur pathologie [6].



*Figure II.9 Le renforcement d'un remblai*

**II.3.9 Les remblais spéciaux et allégés (pneusol, polystyrène, expansé au remblai, etc.)** Les fonctions peuvent être diverses et répondent en général à des cas particuliers de chantier. Le polystyrène expansé en remblais est souvent utilisé pour alléger le remblai, limiter le tassement ou encore réduire les efforts de poussée sur le soutènement [16] (Fig. II.10). Les pneusols peuvent être utilisés sur des zones compressibles en allégement (Fig. II.9) [17], ou en protection de voûte d'ouvrage de franchissement hydraulique et comme remblais renforcés.



*Figure II.10 Réalisation de la route avec la technique de remblais pneusol*



*Figure II.11 Remblai allégé polystyrène*

### **II.3.10 Les remblais supports de fondation**

Ces remblais ont pour fonction de transmettre les charges apportées par la fondation au sol support (FigII.12), soit à la suite d'une purge, soit pour permettre une diffusion des contraintes, ou encore pour économiser du béton (culée perchée). Ces remblais sont traités par le document caractéristique des matériaux de remblai supports de fondation [18].



*Figure II.12 Remblai de grave sous fondation*

### **II.4 Ouvrages concernés par les remblais contigus**

Les remblais contigus aux ouvrages d'art et murs de soutènements sont ceux mis en œuvre à l'arrière des ouvrages suivants :

- Piédroit de Passage inférieur en cadre fermé,
- Passage Inférieur en Portique Ouvert,

- Portique Ouvert Double ;
- Mur de front, mur en retour ou en aile de culées de ponts ;
- Mur de soutènement poids, mur de type béton armé sur semelle ou mur constitué d'éléments empilés.

La modélisation courante de l'action du remblai à l'arrière d'un ouvrage différencie l'action stabilisatrice (action pondérale favorable) et l'action déstabilisatrice (action de poussée), Conformément aux principes généraux de justification des ouvrages de soutènement il convient de distinguer :

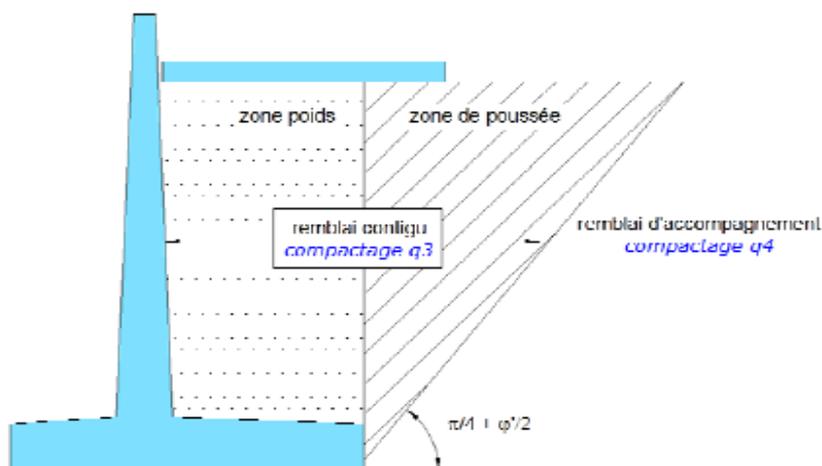
- une zone poids du remblai au droit du talon de la semelle (action stabilisatrice), absente dans le cas des murs poids ;
- une zone de poussée schématisée comme le coin de sol faisant un angle de  $(\pi/4 + \phi'/2)$ , compté à partir du talon de la semelle (action déstabilisatrice). Cette valeur de  $(\pi/4 + \phi'/2)$  n'est exacte que pour une surface de parement verticale et un angle de frottement nul entre le sol et le mur.

### II.5 Le remblai contigu à l'ouvrage

Il assure la transition entre le point dur représenté par l'ouvrage et le remblai courant ou le déblai (profil en long), et supporte la dalle de transition, Il fait l'objet de prescriptions plus restrictives que le remblai courant car il participe au bon fonctionnement mécanique de l'ouvrage, Il englobe les zones où :

- Ces caractéristiques mécaniques influent sur le dimensionnement et la pérennité de l'ouvrage (notamment son angle de frottement interne  $\phi'$ ) ;
- Sa mise en œuvre se fait dans un espace réduit et sensible ;
- Les matériaux ne doivent pas être agressifs pour l'ouvrage (agression chimique et électrochimique, agression mécanique) ;
- Les fonctions de drainage sont indispensables.

Le remblai contigu est donc défini par des critères prioritairement mécaniques à travers son influence sur les structures rigides qui le soutiennent (mur, culée d'ouvrage) (Fig. II.13), Cela signifie notamment que dans l'hypothèse où ce remblai serait réalisé avant le remblai courant, la partie du remblai (bloc technique) n'ayant pas d'influence mécanique sur l'ouvrage, il s'agit alors d'un remblai d'accompagnement pouvant satisfaire aux exigences de mise en œuvre du remblai courant [10].



**Figure II.13** Définition des remblais contiguë, zone poids et zone de poussée

## II.6 Utilisation de matériaux granulaires

Ce paragraphe comprend les recommandations d'utilisation des matériaux granulaires éprouvées. Bien qu'étant onéreux, leur utilisation est cependant adaptée compte tenu du fa

### II.6.1 Les caractéristiques recherchées des matériaux granulaires

Les matériaux granulaires recommandés, conformes à la norme NFP 11-300 [5], ou éventuellement aux classes de difficultés de compactage au sens de la norme NFP 98-231.2 [6], doivent être mis en œuvre conformément au Guide Technique Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) et au guide de remblayage des tranchées [6,7].

#### II.6.1.1 Critères granulométriques et intrinsèques recommandés

Le matériau choisi doit être non évolutif, non gonflant, insensible à l'eau, non érodable et présenter des paramètres physico-chimiques non agressifs vis à vis du béton et des armatures, En particulier, les coefficients Los Angelès [21] et micro-Deval humide [22] seront inférieurs à 45. On pourra également vérifier que la fragmentabilité [19] et la dégradabilité [20] restent inférieures à 7, le matériau granulaire doit être exempt d'éléments supérieurs à 50 mm ( $D_{\max} < 50 \text{ mm}$ ) et le passant à 80  $\mu\text{m}$  doit être inférieur à 12 %.

Lorsque le diamètre maximal des éléments est compris entre 31,5 et 50 mm ( $31,5 \text{ mm} < D_{\max} < 50 \text{ mm}$ ), il est nécessaire de mettre un dispositif de protection du drainage, qu'il s'agisse d'un matériau roulé ou concassé.

#### II.6.1.2 Masse volumique du matériau mis en œuvre

La masse volumique du matériau retenue lors du calcul de l'ouvrage doit être aussi proche que possible de la masse volumique du matériau mis en œuvre, une variation de 10% pouvant être

tolérée, bien qu'un poids volumique humide de  $20 \text{ kN/m}^3$  soit en général retenu dans les calculs, il est fréquent d'observer en réalité des masses volumiques mises en œuvres plus proches de 21 à  $22 \text{ kN/m}^3$ . Dans tous les cas, il y a nécessité de connaître la masse volumique sèche ( $\rho_d$ ) de mise en œuvre avec la réalisation d'un essai Proctor [25] ou d'une planche d'essai. Il est également rappelé que le drainage de l'eau est essentiel car la poussée hydrostatique sur une hauteur totale du mur conduit à augmenter considérablement la poussée totale.

### II.6.1.3 Paramètres physico-chimiques

D'une manière générale le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) fixe des exigences minimales auxquelles doit répondre le béton utilisé dans la construction d'un mur ou d'un pont, et notamment sa classe d'exposition [26].

Cela conduit généralement à retenir plusieurs formules de béton selon les parties d'ouvrage (comme les fondations, les semelles, les piles, les culées, tablier, etc.) bien avant le début de la construction. Les caractéristiques physico-chimiques des matériaux de remblai contigu peuvent avoir des conséquences sur la durabilité du béton à leur contact.

### II.6.1.4 Autres matériaux granulaires acceptables

Des matériaux granulaires conformes aux critères avec  $D_{\max}$  inférieur ou égal à 100 mm, présentant un passant à  $80 \mu\text{m}$  inférieur à 12 % et une VBS inférieure à 0,1 g bleu/100g sol sont acceptables sous réserve [27]:

- Moyens de compactage adapté aux épaisseurs de couches, en particulier dans la zone d'exclusion aux compacteurs lourds ;
- Protéger les dispositifs de drainage des dégradations lors de la mise en œuvre (couche intermédiaire de plus faible granulométrie, complexe géosynthétique...), il est à noter que les bétons concassés, de classe GTR F71 stricte, peuvent entrer dans ces classes sous réserve d'une granulométrie adaptée et de vérifier [2]:
- L'absence de sulfates et de plâtre en particulier ;
- L'absence d'éléments dégradables ou métalliques ;

### II.6.2 Influence du compactage sur l'indice des vides et sur l'angle de frottement interne

Le compactage des remblais granulaires a pour objet de limiter les tassements et d'assurer les diverses performances mécaniques recherchées pour le remblai ainsi que pour les couches de chaussées.

Le compactage a des effets opposants sur l'effort de poussée, d'une part il augmente la valeur de l'angle de frottement interne du matériau mis en œuvre ce qui diminue l'intensité de sa poussée sur les ouvrages, d'autre part le compactage réduit l'indice de vide du matériau ce qui augmente sa masse volumique donc l'effort de poussée, l'effet lié à l'augmentation de l'angle de frottement interne est généralement prépondérant [28]. Il convient également de noter qu'un compactage excessif peut générer des efforts de poussée très supérieurs à ceux pris en compte dans le calcul, en particulier sur des ouvrages bloqués en déplacement. Une intensité de compactage adaptée, supérieure à celle d'un remblai courant permet de garantir l'angle de frottement interne pris en compte dans le dimensionnement du mur, en cas d'humidification postérieure du matériau. Le respect de ces spécifications de compactage, autorise à prendre en compte un angle minimal de frottement interne  $\varphi'$  du matériau granulaire de  $35^\circ$ , la cohésion de calcul étant nulle.



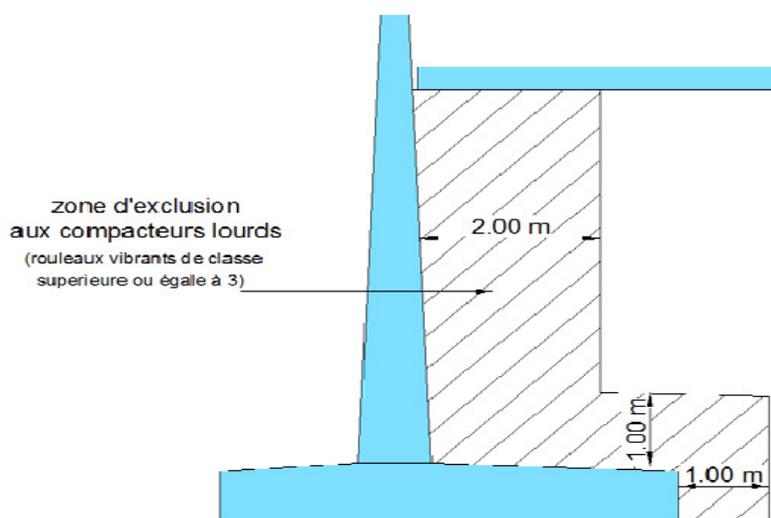
*Figure II. 14 Affaissements d'un remblai contigu marqué par la déformation des barrières de sécurité*

## II.6.3 Conditions particulières de mise en œuvre

### II.6.3.1 Compactage

Afin de minimiser les effets de vibrations, le compactage à proximité immédiate de l'ouvrage sera réalisé au moyen de compacteurs légers. On privilégiera l'utilisation de petits rouleaux vibrants, de plaques vibrantes ou de billonneuses dont l'emploi sera conforme aux modalités définies dans le Guide Remblayage des Tranchées [8]. Les rouleaux vibrants de classe supérieure ou égale à 3 doivent évoluer à une distance de garde de deux mètres du voile et 1

mètre du talon le cas échéant, qui définit la zone d'exclusion aux compacteurs lourds sous peine d'engendrer une poussée supplémentaire non prise en compte dans le calcul (Fig. II.15) L'utilisation de compacteurs légers entraîne une réduction de l'épaisseur des couches élémentaires [8]. Cette limitation de l'épaisseur induit également une limitation du diamètre maximal des gros éléments aux deux tiers de l'épaisseur de la couche. De plus, en cas de présence de parties d'ouvrages anciens en maçonnerie ou de bâtiments à proximité, des précautions supplémentaires devront être prises conformément à la note d'information « Prise en compte des nuisances vibratoires liées aux travaux »[19].



*Figure II. 15 Zones d'exclusion aux compacteurs lourds*

#### II.6.4 Contrôles de remblais contigus en matériaux granulaires

Le contrôle des remblais contigus comprend l'agrément des matériaux lors de la phase de préparation et le contrôle d'exécution lors de la mise en œuvre [20].

L'agrément du matériau s'attache à vérifier la compatibilité de ses caractéristiques géotechniques avec les hypothèses retenues dans les études d'exécution, compte tenu de l'importance de ces remblais, un contrôle d'exécution est indispensable afin de garantir la durabilité de la totalité de l'ouvrage :

- Les critères de granulométrie et d'argilosité (teneurs en fines,  $D_{max}$ ) ;
- La densité de référence (essai Proctor ou planche d'essai) ;
- Les paramètres physico-chimiques ;
- L'angle de frottement interne  $\phi'$ , etc.

Il convient de s'assurer de l'adéquation des procédures d'exécution des remblais contigus aux prescriptions requises. au démarrage du chantier, la teneur en eau du matériau de remblai doit être vérifiée afin d'adapter les prescriptions de compactage, il est aussi nécessaire de s'assurer de l'adéquation des moyens de compactage et des épaisseurs de mise en œuvre des couches de matériaux ainsi que du respect des zones d'exclusion aux compacteurs lourds, pour ce faire il ne faut pas hésiter à tracer, ou faire tracer (Fig. II. 16) , sur les piédroits de l'ouvrage ou du mur de soutènement, les épaisseurs maximales à respecter dans cette zone d'exclusion , ce qui permet une appropriation par tous de cette prescription ,de même, il est utile de matérialiser la zone d'exclusion aux compacteurs lourds lorsque cela est possible, comme sur les murs en retour.



*Figure. II.16 Remblai contigu en cours d'exécution. Les épaisseurs maximales des couches ont été notées à la peinture verte sur les palplanches métallique*

### II.6.5 Matériaux à exclure

Conformément aux règles usuelles de calcul, la justification des ouvrages en terre est menée en considérant une cohésion de calcul prise égale à zéro ( $c' = 0$  kPa). L'angle de frottement interne  $\varphi'$  et la masse volumique sont alors les paramètres dimensionnant des murs. De ce fait les argiles et limons sont à exclure sans traitement car :

- ils conduisent à un dimensionnement non économique des soutènements,
- ils sont sensibles à l'eau et peuvent mettre en péril la pérennité de l'ouvrage,
- ils sont difficiles à mettre en œuvre,
- ils peuvent se saturer d'eau.

De plus, en cas de pathologie, ces matériaux induisent des problèmes supplémentaires lors de la conception de confortements par ancrage. Les roches tendres évolutives de type argilites,

marnes, schistes, ou craie, non traitées, sont à exclure car elles créent des fines dans le temps, générant des vides et des affaissements.

Les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM) sont des matériaux alternatifs récents pour lesquels des soucis d'agressivité chimique pourraient conduire à la ruine de l'ouvrage par corrosion des armatures, sans étude particulière, le recul n'est actuellement pas suffisant sur ce type de matériau pour conseiller son utilisation en remblai contigu. Des pathologies en été constaté, suite à l'emploi de sables fins, non traités, conduisent à exclure ces matériaux car trop érodables ( $D_{0/2}$  mm, type sable de Fontainebleau), le matériau pouvant être entraîné dans le système de drainage et générer des vides et des affaissements.

## II.7 Utilisation de matériaux traités

Les matériaux fins traités sont utilisés en remblais contigus, depuis plusieurs années, un certain nombre de recherches, de suivis d'ouvrages et de retours d'expérience documentés sont encore à réaliser pour vérifier la pérennité du traitement et le maintien dans le temps des caractéristiques mécaniques minimales, au terme de la durée de vie de l'ouvrage (70 à 100 ans). On pourra donc admettre d'élargir les prescriptions des matériaux pour remblais contigus au cas des matériaux traités, il conviendra donc d'adopter pour les remblais contigus, les conditions particulières suivantes. Ces conditions ont été appliquées sur plusieurs chantiers, depuis une vingtaine d'années.

### II.7.1 Etude des matériaux traités

Pour envisager l'utilisation d'un sol traité en remblai contigu, il faut en premier lieu connaître avec une précision suffisante les caractéristiques géotechniques des gisements identifiés pour définir des zones géotechniques homogènes, chacune de ces zones homogènes fera l'objet d'une étude spécifique permettant de définir les seuils limites de variabilité ou de dispersion (granulométrie, plasticité ...). Les guides de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques [10] et de conception des terrassements pourront servir de base pour établir les modalités de réalisation des études de traitement des sols (échantillonnage, type d'essais, conservation...)[2].

Pour chacun des gisements identifiés, les études menées permettront d'évaluer à partir d'éprouvettes compactées à 95% de l'OPN :

- $R_c$  après 14 jours de cure et 14 jours d'immersion supérieure ou égale à 0,5 à 1 MPa ;
- $R_c$  à 2 jours supérieur ou égal à 0,1 MPa, pour assurer une cohésion minimale à court terme afin de limiter les efforts sur le voile béton ;
- Vérification de l'aptitude au traitement par l'essai d'aptitude [29] ;

- Le rapport CBRi /IPI dans le cas d'un traitement à la chaux seule supérieur ou égal à un ;
- Vérifier la cohésion et l'angle de frottement à long terme ( $c'$  et  $\phi'$ ) déterminés à l'essai triaxial drainé ou éventuellement à la boîte de Casagrande.

Les essais d'Indice Portant Immédiat (IPI) et d'indices CBR (Californian Bearing Ratio) à 4 jours d'immersion avec CBRi/IPI > 1 sont utilisés à ce jour pour vérifier le caractère de faible sensibilité à l'eau des couches de formes en cas de traitement à la chaux vive, à défaut de protocoles d'essais plus adaptés ils pourront servir de base de jugement pour l'utilisation des matériaux en remblai contigus.

### II.7.1.1 Paramètres de dimensionnement

Le principe général est de calculer les ouvrages avec  $c'=0$  kPa,  $\phi'=35^\circ$ , il s'agira donc pour des matériaux traités de pouvoir s'assurer que ses caractéristiques mécaniques à long terme soient toujours suffisantes pour conduire à un effort de poussée inférieur ou égal à celui engendré par un matériau présentant un angle de frottement à long terme  $\phi'$  de  $35^\circ$  et une cohésion nulle. Les poids volumiques observés sur les matériaux fins traités sont fréquemment inférieurs à  $20 \text{ kN/m}^3$ , pour le dimensionnement, il conviendra cependant de conserver une valeur de poids volumique humide de  $20 \text{ kN/m}^3$ .

### II.7.2 Mise en œuvre et contrôle des matériaux traités

Les conditions de mise en œuvre sont soumises aux mêmes spécifications que celles concernant les matériaux granulaires : zone d'exclusion aux compacteurs lourds, gestion des interfaces entre remblais. Pour l'ensemble des remblais contigus en matériaux traités (chaux ou liants), une qualité de compactage q3 est prescrite, sur toute la hauteur [4]. Le compactage ainsi réalisé favorise la prise hydraulique et réduit l'indice de vide du matériau, diminuant d'autant sa perméabilité, les risques de dégradations ultérieures à long terme du traitement par des circulations d'eau en sont diminués, l'introduction de cette exigence permet d'augmenter la sécurité globale de l'ouvrage.

L'utilisation de matériaux fins traités en remblais contigus nécessite d'imposer des conditions de réalisation plus sévères que dans le cas de remblais courants, on recherchera ainsi, après malaxage une mouture la plus fine possible, de type 0/20 mm, ce qui implique un pulvérisateur de sol et généralement un traitement en dehors de la zone de mise en œuvre.

#### II.7.2.1 Matériaux traités à la chaux

Les matériaux traités à la chaux de type A1, A2, B5 ou B6 sont acceptables. Pour ces matériaux,

la teneur minimale de traitement à la chaux est de 2 % en général [29], la teneur minimale pourra être inférieure et sera analysée au cas par cas. Avec les matériaux traités à la chaux seule, les essais de contrôle au pénétromètre sont possibles rapidement après la mise en œuvre.

### II.7.2.2 Matériaux traités aux liants hydrauliques

Les matériaux de classe GTR A1, A2, B2, B4, B5 et B6 traités aux liants hydrauliques sont acceptables. La teneur minimale de traitement aux liants hydrauliques est en général de 3 % quel que soit la granulométrie du matériau. La teneur minimale pourra être inférieure et sera analysée au cas par cas. Cette solution conduit à créer à terme un massif rigide, il convient alors de vérifier que le support de remblai est peu déformable. Il est à noter que les essais de contrôle au pénétromètre sont généralement impossibles dans ce cas, il convient alors de s'orienter par des moyens de contrôles en continu (Q/S 5 ou gamma-densimètre).

### II.7.3 Dispositifs de drainage

Les matériaux fins traités sont très peu perméables et il convient de leur associer un dispositif complet de drainage (Fig. II.17) (complexes drainants, couche granulaire drainante etc.). Suivant les configurations, il pourra alors s'avérer utile de disposer :

- Le complexe drainant au contact du parement de l'ouvrage ;
- Une base drainante en assise du remblai contigu. Cette base drainante présentera en outre l'avantage de constituer une assise efficace pour le compactage des premières couches.

Il est rappelé la nécessité dans tous les cas :

- D'un drain en pied ;
- D'un exutoire largement dimensionné et d'entretien aisé pour assurer sa pérennité.

Le rapport entre le volume de matériau compacté pendant un temps donné et la surface balayée par le compacteur sur ce volume pendant le même temps, ce rapport exprime aussi l'épaisseur théorique compactée en une application de la charge du compacteur [4].



*Figure. II.17 Mise en œuvre d'un dispositif de drainage*

## II.8 Quelques techniques de remblais allégés

Dans les années 75, une politique globale d'utilisation massive des sous-produits industriels en technique routière a été lancée.

Il est intéressant de noter que c'est autant par besoin de recyclage, que par nécessité de mettre au point de nouvelles techniques allégées, que ces études ont démarré. En effet, la Norvège procède à cette même époque à la mise au point de remblais en polystyrène expansé.

### II.8. 1. Remblais allégés en sous-produits industriels

Au moment où ces études sont lancées, un certain nombre de matériaux servent déjà à alléger le sol. Les cendres volantes ont déjà été utilisées, mais ce sont souvent des matériaux naturels (tourbes, écorces...) qui servent à "remblayer léger".

Les autres matériaux sont souvent plus chers (argile expansée), ou non disponibles en grandes quantités (déchets de béton cellulaire). Devant l'ampleur des sous-produits à écouler dans certaines régions, les divers essais de faisabilité menés pour valider l'utilisation en techniques routières ont surtout concerné :

- Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères dont le gisement semble inépuisable ( ces résidus représentent 30 % du tonnage des ordures brûlées).
- Les cendres volantes provenant du dépoussiérage des fumées de centrales thermiques au charbon.
- et enfin les phosphogypses, résidus de fabrication d'engrais agricoles phosphatés.

Ils résultent de la réaction chimique du gypse naturel avec l'acide sulfurique.

**II.9 Conclusion**

Dans ce chapitre on a rassemblé l'ensemble des règles de l'art relatives aux remblais de culées de ponts et aux murs de soutènement. Elle nous permet de choisir le matériau à mettre en œuvre dans ces remblais particuliers afin de garantir les exigences de pérennité et de durabilité. Dans un contexte de préservation des ressources minérales et de diminution de l'impact environnemental et du coût des transports de matériaux, le recours à des matériaux alternatifs peut être envisagé.

**Références Bibliographiques de deuxième chapitre**

- [1] *Conception et réalisation des terrassements. Guide technique - Fascicule 1 : études et exécution des travaux. Setra, mars 2007. Réf. 0702-1.*
- [2] *Conception et réalisation des terrassements. Guide technique - Fascicule 2 : études et exécution des travaux. Setra, mars 2008. Réf. 0702-2.*
- [3] *Conception et réalisation des terrassements. Guide technique - Fascicule 3 : méthodes d'essais. Setra, mars 2007. Réf. 0702-3.*
- [4] *Ouvrages de soutènement (les). Guide de conception générale. Guide technique. Sétra, décembre 1998. Réf. F9849*
- [5] *Réalisation des Remblais et des Couches de Forme (GTR). Guide technique - Fascicule I : Principes généraux - Fascicule I : Annexes techniques. Setra/LCPC, septembre 1992. Réf. D9233.*
- [6] *Réalisation des Remblais et des Couches de Forme (GTR). Guide technique - Fascicule II : Principes généraux - Fascicule II : Annexes techniques. Setra/LCPC, septembre 1992. Réf. D9344.*
- [7] *Remblayage des tranchées et réfection des chaussées. Guide technique. Sétra-LCPC, mai 1994. Réf. D9441.*
- [8] *Saoudi S. Analyse de la stabilité d'un versant naturel urbanisé application au cas du versant de Tizi N'Bechar wilaya de Sétif. Mémoire de fin d'étude de Master à l'université de M'sila (2011).*
- [9] *Soualef Mokhtar analyse de la stabilité d'un remblai (application au cas du remblai d'ain arnet-wilaya de setif), Mémoire fin d'étude de master a l'universiyé de M'sila (2018).*
- [10] *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS). Guide technique. Setra-LCPC, Janvier 2000, Réf. D 9924.*
- [11] [http://wiklimat.developpement-urable.gouv.fr/index.php/Wikigeotech:Remblais\\_contigus](http://wiklimat.developpement-urable.gouv.fr/index.php/Wikigeotech:Remblais_contigus)
- [12] [http://wikhydro.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Wikibardig:Digues\\_:\\_Les\\_composants\\_des\\_digues\\_en\\_remb lai](http://wikhydro.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Wikibardig:Digues_:_Les_composants_des_digues_en_remb lai)
- [13] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Merlon\\_\(g%C3%A9nie\\_civil\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Merlon_(g%C3%A9nie_civil))
- [14] <https://www.uretek.fr/references/ouvrages-divers/consolidation-d-un-remblai-ferroviaire>
- [15] [https://batiments.wallonie.be/files/live/sites/SMD\\_CCT/files/unzip/html\\_CCTB\\_01.04/Content/11-31-1a-Remblais-de-terres-mises-en-depot-sur-chantier.html](https://batiments.wallonie.be/files/live/sites/SMD_CCT/files/unzip/html_CCTB_01.04/Content/11-31-1a-Remblais-de-terres-mises-en-depot-sur-chantier.html)
- [16] <https://www.knauf.fr/solutions/isolation-macon-chapiste-carreleur/remblais-alleges-en-polystyrene-expanse>
- [17] <https://www.groupeeurec.com/pneusol-pneuresil-travaux-publics/>

[18] <https://www.apchq.com/documentation/technique/guides-techniques/fondations/remblai>

### **Références normatives**

[19] NF P 11-300. *Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières*

[20] NFP 98-231.2 (février 1992) : *essais relatifs aux chaussées – comportement en compactage des matériaux autres que traités aux liants hydrocarbonés – Partie 2 : essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire.*

[21] NF EN 1097-2 - *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : détermination de la résistance à la fragmentation.*

[22] NF EN 1097-1 - *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-DEVAL).*

[23] NF P94-066 - *Sols : reconnaissance et essais - Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux*

[24] NF P94-067 - *Sols : reconnaissance et essais - Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux*

[25] NF P94-093 (octobre 1999) : *Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié.*

[26] NF EN 206-1 Béton - *Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité. Annexes nationales : A1 (avril 2005) et A2 (octobre 2005). AFNOR, indice classement P18-325-1.*

[27] NF P 94-068 (octobre 1998) : *Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.*

[28] NF P 98-331. *Chaussées et dépendances. Tranchées : ouverture, remblayage, réfection.*

[29] NFP 94-100 (août 1999) - *Sols : Reconnaissance et Essais – Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement.*



# CHAPITRE III

### III.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. Les matériaux recyclables comprennent certains métaux, plastiques et cartons, le verre, les gravats, etc. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures qui sont la réduction du volume de déchets, donc de la pollution qu'ils causeraient et la préservation des ressources naturelles, puisque la matière recyclée est utilisée à la place de celle qu'on aurait dû extraire. Il représente une des activités économiques de la société de consommation.

### III.2 Les déchets recyclés utilisé dans le domaine de génie civil

Les déchets du bâtiment et des travaux publics proviennent de chantiers sous maîtrise d'ouvrage publique (État, collectivités locales) ou privée (entreprises, particuliers). Le contexte de leur gestion est différent entre la sphère du bâtiment et celle des travaux publics, du fait notamment du nombre d'acteurs par chantier, de la nature même des déchets produits, des lieux de production et des modes de traitement possibles.

#### III.2.1 Les matériaux Inerte issus du BTP

Il est judicieux de rappeler que les déchets issus du BTP sont composés à plus de 90% de déchets inertes, le reste étant composé de déchets non dangereux ou dangereux, voici la distinction faite entre les différents types de déchets :

- a) Déchet inerte : tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine.
- b) Déchet dangereux : tout déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangers.
- c) Déchet non dangereux : tout déchet qui ne présente aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux. [7]

### III.2.1.1 Le Béton

Le béton est un mélange d'eau, de granulats (sable et gravillons), de ciment (mélange en poudre de chaux et de calcaire argileux) et éventuellement complété par des adjuvants et des additions.

Le béton peut être recyclé lors des chantiers de démolition (Fig. III.1), il est alors concassé, la ferraille en étant extraite par aimantation. Il peut être utilisé essentiellement dans la confection de remblais. Les gravillons obtenus peuvent être aussi réincorporés dans du béton neuf dans des proportions variables (maximum de 5 % en France, tolérances plus élevées dans d'autres pays). Si cette proportion est trop importante, le béton résultant est moins solide [4]



*Figure. III.1 Le broyage du béton [34]*

### III.2.1.2 La brique

La brique est un élément de construction généralement en forme de parallélépipède rectangle constitué de terre argileuse crue, séchée au soleil - brique crue - ou cuite au four, employée principalement dans la construction de murs, Il est composé d'argile ou d'autres matières argileuses, avec ajout ou non de sable, combustible ou autre adjuvant, porté à une température suffisamment élevée pour former une liaison céramique [3]



*Figure. III.2* Démolition d'un bâtiment en brique [5]

Le recyclage de briques provenant de chantiers de démolition (Fig. III.2) est une réalité depuis plus de dix ans. Aujourd'hui, plus de 95% des déchets de démolition sont recyclés. Les briques sont transformées en granulats dans des installations de concassage ; ces granulats sont alors mis en œuvre dans des travaux de fondations. 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. Si la réutilisation de briques et tuiles reste marginale à l'heure actuelle, on peut s'attendre à une croissance dans le cadre de la démolition sélective des bâtiments. [12]

### III.2.1.3 La céramique

Depuis des siècles, les céramiques servent à fabriquer des poteries, des faïences et des porcelaines. Aujourd'hui, elles sont très présentes dans les matériaux du bâtiment comme le carrelage ou la porcelaine sanitaire par exemple (Fig. III.3).

Les plus grands volumes de déchets de céramique proviennent des chantiers de démolition ou des travaux publics. 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. Les céramiques sont d'abord concassées par des engins adaptés, le plus souvent installés directement sur les chantiers [3]. 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.

Trois principales 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 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 granulats 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 III.3 Les déchets céramiques [6]*

#### III.2.1.4 Les enrobés

L'enrobé est un mélange de graviers, de sable et de liant hydrocarboné type bitume appliqué en une ou plusieurs couches pour constituer la chaussée des routes, la piste des aéroports et d'autres zones de circulation. Un enrobé bitumineux est constitué de différents matériaux, Des granulats (graviers de diamètre supérieur à 63 micromètres) ; Des fines ou fillers (sables et poussières de section inférieure à 63 micromètres). Ces éléments présents naturellement en faible quantité dans les granulats, sont essentiels pour réaliser l'enrobage du liant (le bitume) avec les granulats, car ce sont les fines qui agrègent le bitume ; Du liant hydrocarboné, composé essentiellement de bitume. Il peut être fabriqué à chaud (aux alentours de 100 °C) et appliqué à chaud (aux alentours des 150 °C), ou appliqué à froid, par adjonction d'émulsion de bitume garantissant la malléabilité du matériau.

Les agrégats d'enrobés sont des matériaux granulaires provenant du fraisage ou du concassage/criblage d'enrobés bitumineux issus de la démolition de chaussées, ainsi que des surplus de centrales d'enrobage. Pas uniquement les Fraisât.

Les produits issus du recyclage est essentiellement des granulats (Fig. III.4). 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 [13].



*Figure. III.4 Déchet de revêtement routier [9]*

### III.2.1.5 Les gravats

Les gravats représentent une part importante, lors des démolitions ou des travaux de construction. Ils sont principalement constitués d'un mélange de béton, de pierres, de carrelage, de terre (non végétale) ou encore de matériaux bitumeux (sans goudron). Cependant, ils doivent faire l'objet d'une prise en charge spécifique par un professionnel pour pouvoir être valorisés et trouver une nouvelle utilisation (Fig. III.5).

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. Des tris manuels peuvent aussi avoir lieu selon la nature et la complexité du mélange des déchets. Les gravats inertes obtenus sont dirigés vers le centre de traitement. Concassés puis criblés, ils passent ensuite par une trémie de réception. 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...). [7]

Les granulats recyclés, dans la mesure où ils satisferont les mesures de conformité, ont des usages identiques aux granulats traditionnels. Ainsi, les granulats recyclés sont destinés en majeure à la voirie où ils sont utilisés : en remblais (graves de 0/32 à 0/80 $\mu$ m) ; en assise de chaussée (graves de 0/12 à 0/32mm) ; en couche de roulement (sable et gravillons en mélange avec des bitumes) dans la composition des enrobés bitumeux. Les granulats recyclés sont aussi utilisés en voirie ferroviaire sous forme de ballasts, autre débouché, les revêtements d'étanchéité des ouvrages d'art en asphalte (ponts, toits-terrasses, stationnement) ou des sables

et des gravillons mélangés avec du bitume sont utilisés. Le Tableau III.1 récapitule les utilisations possibles des granulats recyclés.

**Tableau III.1** Usage possible des granulats recyclés.

Granulat recyclés (mm)	Utilisation
0/4	- Mortier - Enduits
0/12 à 0/32	- Assise en chaussée - Couche de roulement dans la composition des enrobés bitumineux
0/32 à 0/80	- Remblais
6/14	- Béton hydraulique (parpaings, canalisation) - Béton prêt à l'emploi
40/70 à 60/120	- Ballast de voie
0/125	- Aménagements décoratifs



**Figure. III.5** Utilisation du gravât en fond de couche routière [17]

### III.2.1.6 Le verre

Le verre est une substance solide, transparente et cassante, obtenue par la fusion d'un sable siliceux avec du carbonate de sodium ou de potassium. Le verre existe dans la nature et l'homme l'exploite depuis des milliers d'années. Les utilisations du verre sont aujourd'hui très variées, notamment comme contenant pour les produits liquides ou alimentaires, mais aussi dans différentes industries. Le verre est majoritairement présent sous forme de vitre dans le secteur du bâtiment (Fig. III.6). La séparation du verre dans les chantiers de déconstruction et réhabilitation demande une main d'œuvre spécifique. Les verres sont les

pionniers des déchets valorisables, d'autant plus intéressant qu'il se recycle à l'infini et à 100 %. [6]



*Figure. III.6 Verre récupéré d'un immeuble démolir [10]*

Le verre possède plusieurs niches de valorisation, l'exutoire le plus courant est le recyclage au four vitrierie (vitrage, emballage,...).

Le verre broyé est utilisé comme agrégats pour diverse application dans la construction routière et le bâtiment. 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 léxiviation dans le sol et la capacité drainante constituent des éléments favorables, les propriétés de résistance et de compaction sont généralement insuffisante.

### **III.3 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.

#### **III.3.1 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 (Fig. III.7). 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. [33]



*Figure. III.7 Recyclage de l'acier [11]*

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 [11].

### **III.3.2 Le déchet de caoutchouc**

Les déchets de caoutchouc ont été 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 cout, 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 [15]. 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%).

### III.3.2.1 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** : 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 (génie civil et agraires) comme illustré à la ( Fig.III.8). Cette procédure de réhabilitation du site doit faire l'objet d'une surveillance scientifique sanitaire et environnementale. Sur la base de cette surveillance, il a été confirmé que l'utilisation des pneus en comblement de carrière est une application qui a toute sa place dans la valorisation des pneus usagés dès lors que cette technique est bien maîtrisée.



*Figure. III.8 L'utilisation des pneus usagés dans la réhabilitation des pneus [1]*

❖ **Les ouvrages de soutènement pneusol** : Le pneusol formé de l'association de sol et d'éléments de pneumatiques, ces derniers pouvant se présenter sous une forme linéaire (chaîne

d'éléments) ou en nappe, a été étudié. Ses bonnes caractéristiques ont permis la réalisation d'un mur de soutènement de 5 mètres de hauteur et de 10 mètres de longueur.

Les voies de valorisation des pneus usagés sont de plus en plus objets de projets diversifiés, de recherche et développement. Dans ce but, le déchetage en coupons de pneus (chips) et broyage en poudrettes ou en granulés de caoutchouc est nécessaire (Fig. III.9). [35]



*Figure III.9 La technique pneusol [7]*

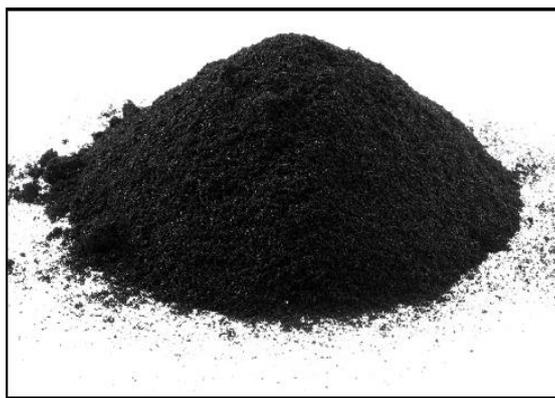
A titre d'exemples non exhaustifs on peut citer les axes suivants :

- ❖ **Les coupons de pneus (Chips) :** Les copeaux de pneus déchiquetés peuvent être employés en matériaux de remblai, seuls ou mélangés avec un sol. La principale difficulté dans l'emploi de ce type de produit en remblai routier (Fig. III.10) est la nécessité de les recouvrir d'un matériau dont l'épaisseur est suffisante pour gommer le comportement élastique apporté par les copeaux de pneus. Les matériaux de couverture doivent aussi pouvoir être densifiés en dépit d'un effet d'enclume limité. La plate-forme routière érigée sur ce chantier présente les mêmes qualités sur le remblai en pneus que sur le remblai classique avec les moyens d'investigation classique [16] cette expérience laisse des zones d'ombre, et notamment l'étude du comportement aux vibrations des massifs de copeaux de pneus (les pneus semblent réfléchir les ondes de choc). Il est possible que cette caractéristique ait une incidence sur le vieillissement des couches rigides situées à proximité des copeaux de pneu. [17]



*Figure. III.10 Utilisation de copeaux de pneus en remblai routier [23]*

❖ **La poudrette:** La poudrette de caoutchouc (Fig. III.11) est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables ou de déchets de rechapage. La poudrette est utilisée 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. Elle est également employée comme liant dans les bitumes. L'enrobé possède ainsi un pouvoir drainant important évitant le phénomène d'aquaplaning, le bruit de roulage s'en trouve réduit et le processus de vieillissement ralenti .



*Figure. III.11 Poudrettes de caoutchouc [19]*

❖ **Les granulés de caoutchouc :** Ils Sont d'une taille supérieure à celle des poudrettes (fig.III.12), 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...). L'incorporation de granulats en caoutchouc dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation. 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. [20]



*Figure. III.12 Les granulés de caoutchouc [18]*

### **III.3.3 Les plastique**

La matière plastique est une substance polymère d'origine organique ou semi-organique, contenant un grand nombre d'atomes (ou groupes) de carbone, oxygène, hydrogène ou azote. La matière plastique utilisée sous plusieurs nuances et noms (Fig. III.13). Elle est constituée principalement d'un polymère, un adjuvant et un additif. 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. Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. [24]



*Figure III.13 Type de plastique [30]*

Des déchets de bouteilles plastiques (PET-polyéthylène téréphtalate) et des citernes (PEBD - polyéthylène bas densité) (Fig. III.14) est employé dans le béton sans autre transformation que le broyage, afin de minimiser le coût du matériau final.



*Figure. III.14 Paillette de bouteille en plastique [21]*

Pour le procédé de valorisation et le traitement du plastique furent l'enfouissement et l'incinération. Toutefois, la croissance exponentielle de déchets d'emballages plastiques amène à prévoir d'autres filières de recyclage [31]. 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 [26]. 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] .

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] .

### **III.4 Déchets divers**

#### **III.4.1 Les sédiments de dragage**

Les sédiments sont des dépôts continentaux ou marins provenant de l'altération des matériaux du sol, alluviaux ou rocheux. Ces matières sont enlevées par l'érosion et transportées par l'eau, le vent, la glace et la gravité. La formation et l'accumulation des sédiments constituent le phénomène de sédimentation. Ce processus est en grande partie naturel. Ces éléments sont dits d'origine endogène quand la sédimentation concerne la production autochtone du milieu et exogène quand ils sont issus de l'érosion du bassin versant par des agents dynamiques externes [29]. Cette origine a une forte influence sur leur nature. Selon leur origine on peut distinguer :

- Les sédiments fluviaux : Les opérations d'entretien ces fluviaux sont nécessaires quand les sédiments peuvent provoquer des risques d'inondation, ou lors d'une diminution de la profondeur de navigation.
- Les sédiments marins : les opérations du dragage, constitue une activité vitale pour l'exploitation des ports. Les quantités draguées n'ont cessé d'augmenter ces dernières décennies, Face à plusieurs facteurs tels que, le coup des opérations de dragage, les quantités draguées et la pollution [26] . Les sédiments constituent un problème majeur pour l'environnement. Un grand travail sur leur gestion est nécessaire afin de minimiser les risques de contamination et d'assurer une gestion durable et économiquement viable.



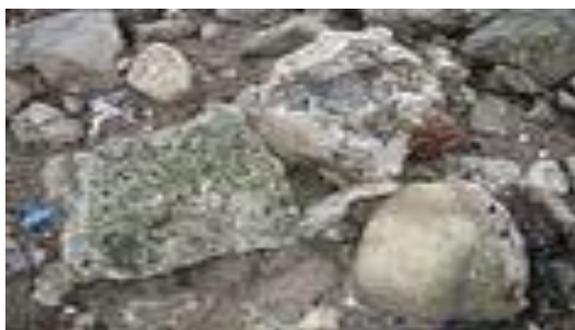
*Figure. III.15 Dragage des sédiments [20]*

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. [28]

#### **III.4.2 Les laitiers sidérurgiques**

Les laitiers de haut-fourneau (LHF) sont des sous-produits de la sidérurgie. Ils sont générés au cours de la production de l'acier, lors de l'étape de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. Le laitier correspond aux scories qui sont formées en cours de fusion ou d'élaboration du métal par voie liquide. Il s'agit d'un mélange composé essentiellement de silicates, d'aluminates et de chaux, avec divers oxydes métalliques, à l'exception des oxydes de fer. Ses rôles dans la métallurgie des métaux ferreux en fusion sont multiples. [35] Cette matière est un important coproduit des hauts fourneaux, appréciée comme remblai ou comme matière première dans la fabrication du ciment. Selon le processus de refroidissement du laitier en fusion, on distingue deux familles :

- Le laitier cristallisé, obtenu par un refroidissement lent qui le transforme en une roche dure artificielle et chimiquement stable (Fig.III.16)



*Figure. III.16 Bloc de laitier cristallisé [35]*

- Le laitier vitrifié, obtenu par un refroidissement brutal, généralement à l'eau, qui lui confère une structure vitreuse lui permettant de développer des propriétés analogues à celles du ciment. (Fig. III.17) [22].



*Figure. III.17 Laitier de haut fourneau granulé (ou vérifié) [27]*

### III.4.3 Déchets de mines de charbon

La notion de déchets miniers regroupe tous les types de déchets directement ou indirectement issus de l'exploitation minière, dans la mine elle-même (poussières notamment), ou hors de celle-ci. Ces déchets sont principalement les stériles qui sont des matériaux géologiques trop pauvres pour être exploités dans les conditions techniques et économiques du moment.

Les déchets de mines de charbon peuvent être source de problèmes sanitaires ou environnementaux, par exemple quand ils sont hyper-acides (pH négatif) en cas de drainage minier acide ou très polluants. On peut se servir comme de matériau de remblai pour les routes et peuvent aussi être utilisés comme granulats pour le béton léger [10].

### III.5 Conclusion

En gestion des déchets, La valorisation ou revalorisation des déchets est un ensemble de procédés par lesquels on transforme un déchet matériel en un autre produit, matériel ou énergétique. ... En gestion des déchets, la valorisation est généralement considérée comme une solution préférable à l'élimination. 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. 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 troisième 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 SchweigI, Raul Tadeu Lobato FerreiraI, 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] 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).*
- [11] 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).*
- [12] Ihcene Lamri, *Etude du comportement d'un sol cohérent sous chargement monotonique et cyclique. Mémoire de Magistère. Université 20 août 1955, Skikda. (2008).*
- [13] John Groover Luwalaga . *Analysing the Behaviour of Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Waste. Research Report, MEng, SUN, (2015).*
- [14] *Le recyclage des enrobés bitumineux, Butin technique N3, Techno-Bitume, Québec. (2010).*

- [15] 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).*
- [16] Meddah Abdelaziz, Merzoug Karima, *Caractérisation d'un sol sableux contenant des fibres caoutchouteuses. (2015).*
- [17] 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).*
- [18] *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).*
- [19] 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).*
- [20] 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).*
- [21] Hinislioglu, S., Agar, E., *Use of high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. Materials Letters 28, 267-271.(2004).*
- [22] Tran Ngoc T. *Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière thèse. Université d'Artois, (2009).*
- [23] Bastone, V., Rey, A. *Guide d'utilisation des déchets recyclés pour le BTP à la reunion. Rapport final. BRGM/RP-60807-FR.(2012).*
- [24] 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)*
- [25] 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).*
- [26] <https://www.servipac-salazie.com/recyclage-dechets/fibre-de-verre>
- [27] <https://www.servipac-salazie.com/recyclage-dechets/gravats>
- [28] <https://www.lemoniteur.fr/article/rehabilitation-et-cycle-de-vie-l-acier-indefiniment.1238619>
- [29] [https://www.rivaacier.com/fr/responsabilite\\_sociale/recyclage\\_de\\_lacier](https://www.rivaacier.com/fr/responsabilite_sociale/recyclage_de_lacier)
- [30] <https://www.alec27.fr/ouate-de-cellulose-bien-plus-papier-journal-recycle/>

[31] <https://www.escaleverte.ca/1-2-3-4-5-7-petite-introduction-aux-types-de-plastiques-recyclables/>

[32] <https://www.environnement-magazine.fr/recyclage/article/2019/10/15/126318/economie-circulaire-quand-les-sediments-collent>

[33] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Drague\\_\(navire\\_de\\_services\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Drague_(navire_de_services))

[34] <https://www.environnementmagazine.fr/recyclage/article/2019/10/15/126318/economie-circulaire-quand-les-sediments-collent>

[35] <https://www.ctpl.info/les-laitiers-siderurgiques/>

# CHAPITRE IV

## IV.1 Introduction

Les ouvrages de retenue des terres telles que les murs de soutènement, les culées de pont et les excavations contreventées sont utilisées dans de nombreux projets d'infrastructure sous différentes conditions de chargement. Les performances des murs de soutènement sous chargement statique et sismique dépendent du type de sol de remblai.

En général, les matériaux de remblai granulaires propres et sans cohésion sont les plus utilisés. Cependant, de nouveaux matériaux de remblai légers comme les copeaux de pneus déchiquetés, cendres volantes, bouteilles en plastique, etc. [1-5] sont aujourd'hui explorés comme matériaux de remblai alternatifs.

Les pneus usagés et sont des déchets indésirables et sont en augmentation chaque année. Pour résoudre ce problème, ils ont trouvé de nouvelles méthodes bénéfiques pour recycler et réutiliser les grands volumes de pneus usagés. Dans certaines situations, l'utilisation de matériaux dérivés des pneus est plus économique que les matériaux traditionnellement utilisés. Plusieurs chercheurs ont mené des études sur l'utilisation des matériaux dérivés de pneus usagés dans des applications de génie civil, comme matériau de remblai dans la construction des routes et de remblais [6-8] de remplissage léger dans les murs de soutènement sous chargement statique [8-11]. Également, plusieurs chercheurs [11-19] ont évalué les propriétés techniques des copeaux de pneus usagés et des mélanges sable-copeaux de pneus en effectuant des essais de perméabilité, de compressibilité, de cisaillement direct et des essais triaxiaux. La perméabilité et la résistance au cisaillement des mélanges sable-copeaux de pneus sont plus élevées que celles du sable utilisé seul [20] et le poids volumique des pneus est inférieur d'un tiers à celui du sable [22], ce qui le rend un matériau de remplissage léger.

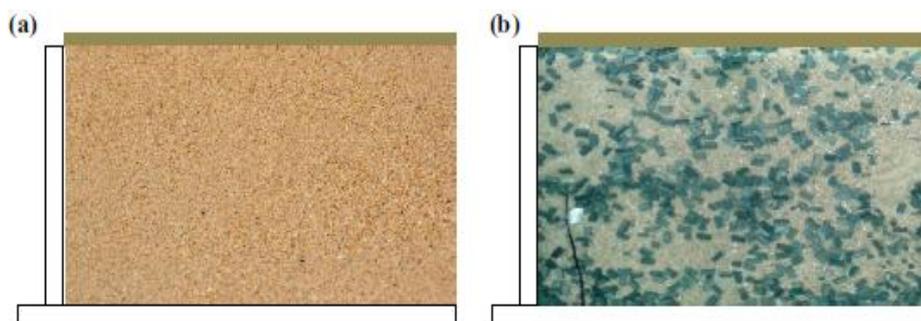
Cet étude expérimentale présente les conditions d'utilisation des copeaux de pneus recyclés mélangés à du sable comme matériau de remblai léger derrière les murs de soutènement à travers une série d'essais sur mur de soutènement en modèle réduit réalisé en laboratoire [15]. Le comportement des murs en modèles réduits avec différents mélanges de sable et copeaux de pneus (Sand-tire chip, STC), ont été évalués en termes de déplacements et de pressions latérales.

## IV.2 Le programme d'essai

Deux types d'essai ont été considérés, comme montré sur la figure IV.1 Le cas A présente un modèle réduit de mur de soutènement avec un remblai sableux (cas témoin) et le cas B présente le modèle réduit de mur avec différents mélanges STC (10, 20, 30, 40, et 50 % de copeaux de pneus) comme matériaux de remblai. Six essais sur modèle (T1-T6) ont été réalisés sur des

modèles de murs de soutènement avec du sable (STC0, cas témoin) et différents mélanges STC (STC10, STC20, STC30, STC40 et STC50) comme remblai.

Les mélanges STC ont été préparés en mélangeant du sable et des copeaux de pneus dans différentes poids, comme indiqué dans le tableau IV.1. Des charges statiques variant de 0 à 10 kPa, sous forme de cubes de béton, ont été appliquée à chaque type de modèle. Les paramètres d'essai pour les différents essais sont indiqués dans le tableau IV.1.



**Figure IV.1** Les deux cas d'essais :

a) Cas A : remblai sableux

b) Cas B : Différents mélanges de remblai (STC)

**Tableau IV.1** Les paramètres d'essai en modèle réduit d'un mur de soutènement

Essai	Mélange STC	%TC	%sable	q (kPa)
T1	STC0	0	100	0 - 10
T2	STC10	10	90	/
T3	STC20	20	80	/
T4	STC30	30	70	/
T5	STC40	40	60	/
T6	STC50	50	50	/

### IV.3 Matériaux utilisés

Dans la présente étude, le sable, les copeaux de pneus et leurs mélanges ont été utilisés comme matériaux de remblai dans les modèles réduits des murs de soutènements.

### IV. 3.1 Sable

Le Sable sec sans cohésion a été utilisé dans ces essais. La figure IV.2 présente la distribution granulométrique du sable utilisé dans cette étude. Le sable utilisé a un poids volumique sec maximal de 16,1 kN/m<sup>3</sup>.

Des essais de cisaillement direct ont été réalisés avec différentes contraintes normales afin de déterminer les paramètres de résistance au cisaillement.

### IV.3.2 Mélanges sable-copeaux de pneus (STC)

Des copeaux de pneus dérivés de pneus usagés (TC) d'une taille de (10 x 10) mm et d'une longueur d'environ 20 mm (Fig. IV.3) ont été utilisés dans cette étude. La densité et le poids volumique des copeaux de pneus ont été déterminés comme étant de 1,08 et 6,45 kN/m<sup>3</sup>, respectivement. Différents mélanges STC (10, 20, 30, 40, et 50 %) ont été mélangés manuellement (Fig. IV.4). La figure IV.6 présente la distribution granulométrique des mélanges STC.

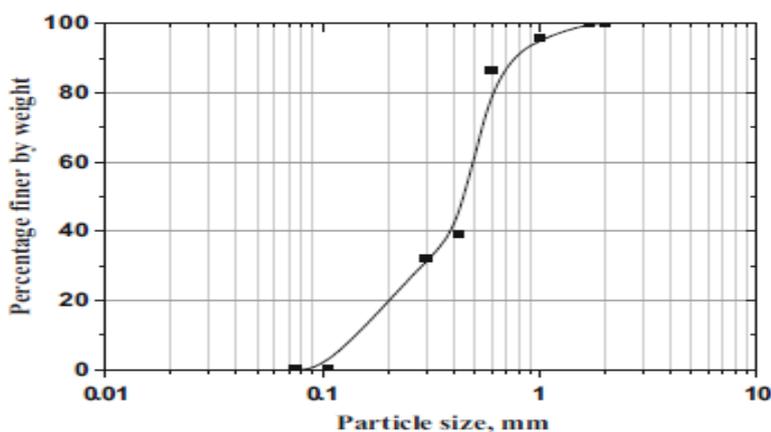


Figure IV.2 Distribution granulométrique du sable

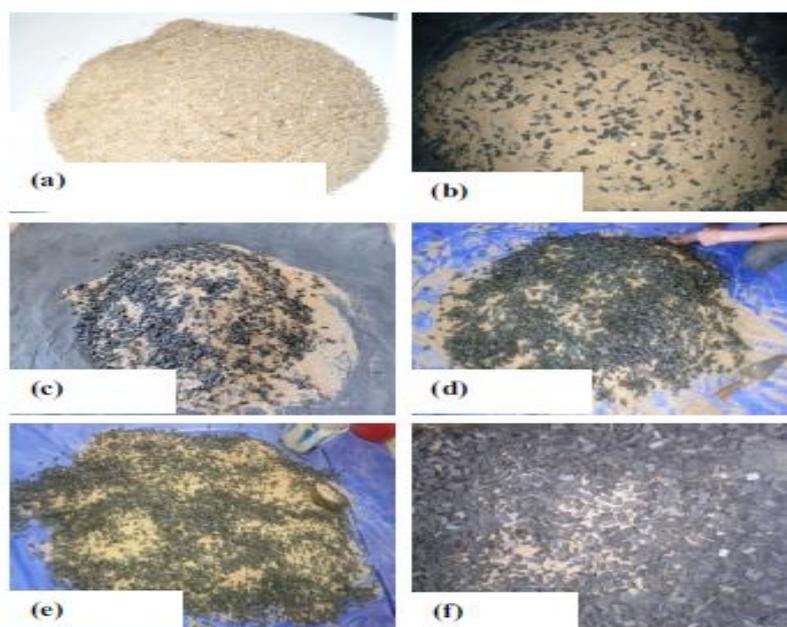
Tableau IV.2 Propriétés du sable

Paramètre	Valeur
Densité	2,62
$C_c$	1,02
$C_u$	1,82
$\phi$ (°)	48



**Figure IV.3** Copeaux de pneus typiques utilisés dans cette étude

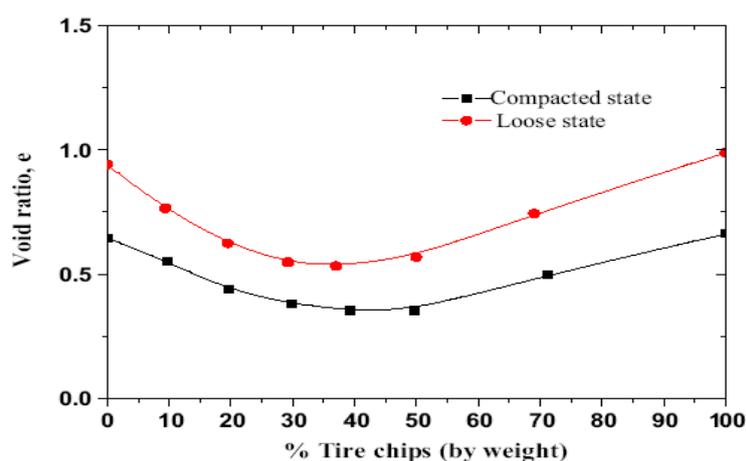
La caractérisation des différents mélanges STC [28] sont présentées dans le tableau IV.3. Des essais de cisaillement direct ont été effectués en utilisant trois contraintes normales de 25, 75 et 125 kPa afin de déterminer les angles de frottement des différents mélanges (Tableau IV.3). Il a été observé que l'angle de frottement interne le plus élevé est celui du mélange STC30 comparé aux mélanges STC20 et STC40.



**Figure IV.4** mélange STC A) STC0 (sable pure), B) STC 10 , C) STC 20 ,D) STC 30, E) STC40, F) STC 50

**Tableau IV.3** Les propriétés des différents mélanges STC

STC Mélange	Densité (G)	$\gamma_{sec}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)
STC10	2,25	14,62	51
STC20	1,94	14,12	52
STC30	1,82	13,17	56
STC40	1,71	12,29	51
STC50	1,53	10,42	44
Copeaux de pneus purs	1,08	6,45	28

**Figure IV.5** Indice des vides des différents mélanges STC à l'état lâche et compactée

#### IV.4 Construction du modèle et instrumentation

Le modèle réduit du mur de soutènement de 600 mm de hauteur a été construit dans un caisson de 1200 mm x 600 mm en plan et 1000 mm de hauteur (Fig. IV.6). Un caisson pour le remblai pour le sable ou de mélanges STC d'une largeur de 800 mm a été adopté pour les différents essais en modèle réduit. Le remblayage a été effectué par étapes selon la technique de la chute libre est compacté manuellement pour atteindre la densité voulue. Une plate-forme en bois solide a été placée sur la surface du remblai pour faciliter l'application de la surcharge en

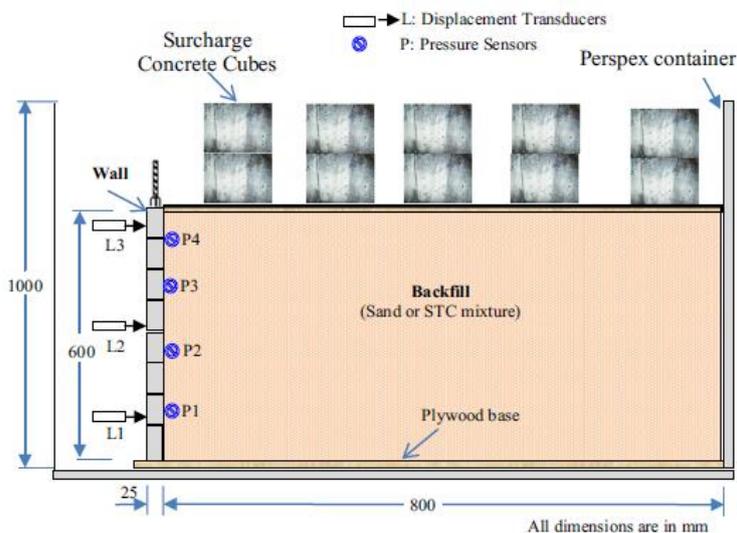
utilisant des cubes de béton (Fig. IV.7). Quatre capteurs de pression P1, P2, P3 et P4, sont placés à l'intérieur du mur, en contact avec le parement à des hauteurs de 487, 337, 187 et 37 mm depuis le sommet pour mesurer les pressions horizontales du sol derrière le parement.



**Figure IV.6** Le caisson du mur en modèle réduit

#### IV.5 Résultats et commentaires

Le mur en modèle réduit a été testé avec du sable seul et les mélanges STC (10, 20, 30, 40 et 50 %) comme matériau de remblai (Tableau IV.1). La réponse du mur de soutènement a été enregistrée après le retrait du support temporaire et après l'application des différentes surcharges. Les résultats obtenus sont discutés en termes de déplacements horizontaux et de pressions des terres latérales dans les sections suivantes.



**Figure. IV.7** La Configuration du mur en modèle réduit

## IV.5.1 Les déplacements

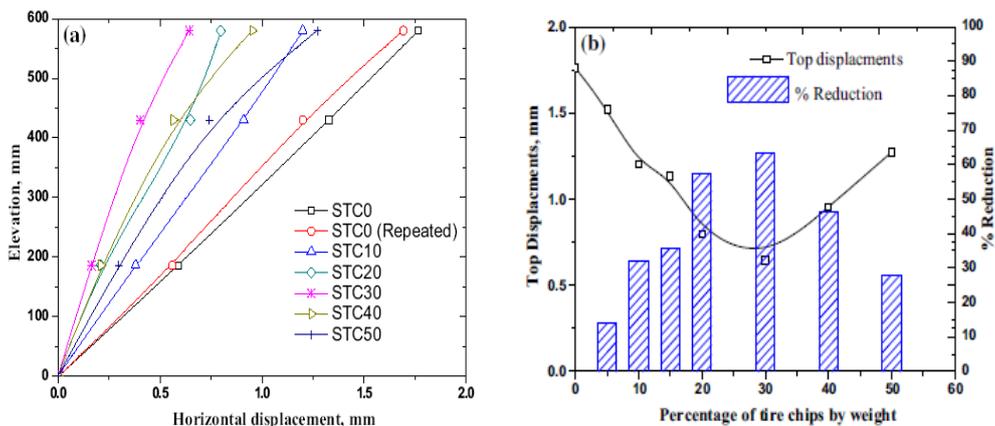
### IV.5.1.1 Sans surcharge

Le mur en modèle réduit a été construit avec du sable pur (cas témoin) et différents mélanges STC (10, 20, 30, 40 et 50 %) comme matériaux de remblai. Les déplacements horizontaux du mur le long de la hauteur ont été enregistrés à l'aide de trois capteurs de LVDT positionnés comme indiqué sur la figure IV.7. Les déplacements horizontaux du mur enregistrés après la pose du support (sans surcharge) sont présentés sur la Figure IV.8.

La figure IV.8 a présente la variation des déplacements horizontaux le long de la hauteur de la paroi du mur pour tous les essais. Pour l'essai de remblayage STC0, ils ont observé que le déplacement maximal de la paroi est environ 1,75 mm. L'essai T4 exécuté avec un remblai STC30 a donné les plus faibles déplacements au sommet du mur (0,65 mm). Le pourcentage de réduction des déplacements a été calculé en utilisant le déplacement maximal du cas témoin et les différents mélange STC. La variation du déplacement maximale et son pourcentage de réduction par rapport au cas témoin (essai T1) avec le pourcentage de copeaux de pneu est présenté sur la Figure. IV.8b. Ils ont observés une réduction de 60 à 65 % dans les déplacements maximales par rapport au cas témoin (sable pur).

### IV.5.1.2 Avec surcharge

Les surcharges ont été appliquées de 0 jusqu'à 10 kPa sur la surface du remblai pour les différents modèles réduit des murs en utilisant des cubes en béton comme montré sur la figure IV.7.



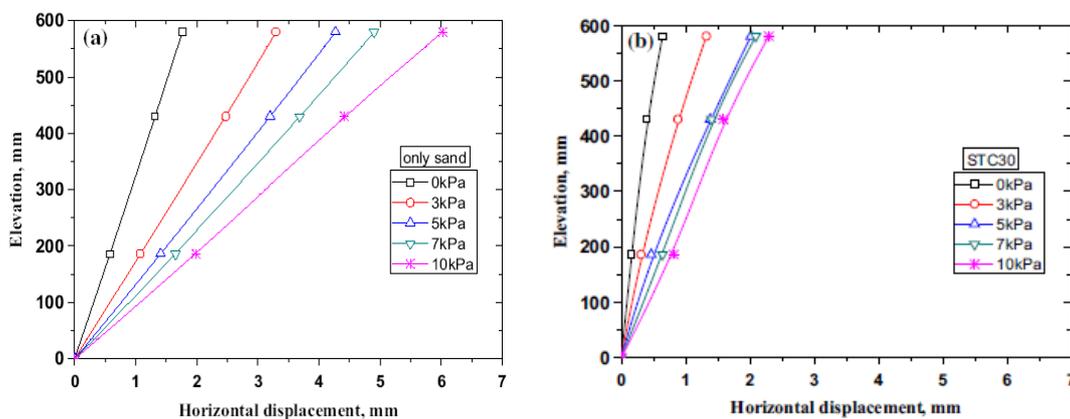
**Figure IV.8** Effet du mélange, STC : a) les profils déplacement b) Déplacement maximums en pourcentage de réduction

La figure IV.9 présente les déplacements enregistrés le long de la hauteur du mur en modèle pour différentes surcharges pour le cas témoin (sable Pure) et STC30. Il a été observé également que les déplacements ont augmentés le long de la hauteur du mur lorsque la surcharge augmente comme indiqué sur la figure. IV.10. Les déplacements maximums au sommet du mur pour la surcharge 10 kPa sont de l'ordre 6 mm et 2,4 mm pour les cas de remblai STC0 et STC30 respectivement.

Les déplacements maximums du mur sous différentes conditions de chargement et différents mélanges STC sont présentés sur la figure VI.9. On peut distinguer que les déplacements maximums augmentent avec l'augmentation des surcharges pour tous les mélanges STC. La figure présente également que, pour toutes les conditions de surcharge, les déplacements les plus faibles sont enregistrés pour le mélange STC30 et les plus élevés pour le cas témoin avec un remblai STC0. Les déplacements maximums diminuent en augmentant le pourcentage des copeaux de pneus jusqu'à STC30 mais au-delà de ce pourcentage, l'ajout supplémentaire de TC a entraîné une augmentation des déplacements latéraux maximaux. Le pourcentage de réduction des tassements est d'environ 60 % pour STC30.

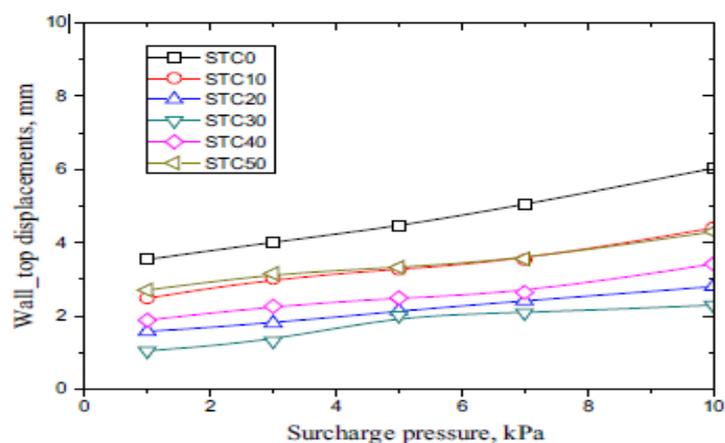
Par conséquent, on peut affirmer que les déplacements des murs sont réduits de manière significative (jusqu'à environ 60 %) par l'ajout de TC jusqu'à 30 % en poids. Cette réduction dans les déplacements est due à la réduction de la densité du mélange en remplaçant le sable par des coupons de pneus du fait que le TC a une densité inférieure à celle du sable et également à un indice des vides plus élevé que le sable.

En outre, on peut également observer sur le tableau IV.3 que l'ajout de copeaux de pneus (jusqu'à 30%) au sable a augmenté les propriétés de résistance au cisaillement telles que l'angle de frottement interne.



**Figure IV.9** Profiles des déplacements de la paroi pour différentes surcharges :

a) essai (sable seul) b) Pour l'essai T4 (30%)

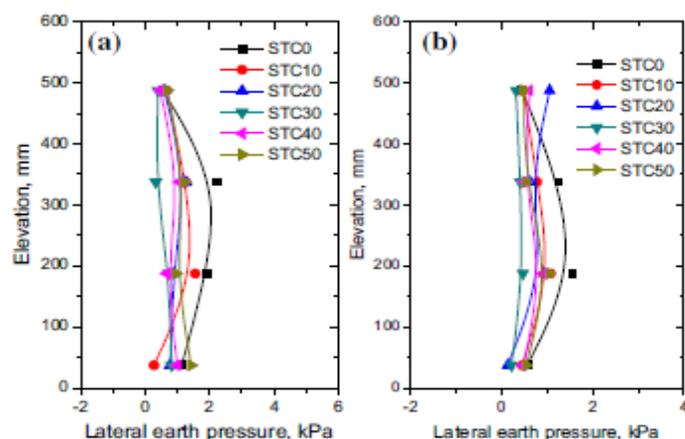


**Figure IV.10** Déplacements maximums du mu en modèle réduit sous différents surcharge

#### IV.6 Pressions des terres latérales

Les pressions des terres latérales ont été enregistrées dans les deux conditions (au repos et après le retrait du support). Quatre capteurs de pression des terres ont été placés à différentes hauteurs sur le mur de soutènement (Fig. IV.7). La figure IV.11 présente la réponse de la pression des terres dans les deux conditions pour tous les murs en modèles réduit avec différents mélanges STC, ainsi que les pressions des terres latérales le long de la hauteur du mur pour l'état au repos et après le retrait du support.

Les figures indiquent que les pressions des terres latérales se situent dans l'intervalle 0-2 kPa pour les deux conditions. Bien qu'il n'y ait pas de tendance cohérente dans les variations relatives des pressions pour les différents modèles de parois, il est observé que les pressions des terres après le retrait du support sont faibles par rapport à la condition au repos. En outre, on peut également constater que les pressions des terres ont été affectées par le mélange STC en donnant des pressions des terres plus faible pour le modèle STC30 (essai T4).



**Figure IV.11** Pressions des terres latérales enregistrées  
 a) Au repos b) Après retrait du support

#### IV.7 Conclusion

Cet étude présente des essais expérimentales sur murs en modèles les réponses en utilisant différents mélanges STC comme matériau de remblai. Les déplacements et les pressions des terres latérales le long de la hauteur du mur ont été enregistrés au cours des essais. Les résultats présentés ont montré une réduction significative dans les déplacements du mur et des pressions des terres pour les murs en modèles réduit utilisant des mélanges STC comme remblai. Il peut être conclu que l'utilisation des copeaux de pneus dans les remblais des murs de soutènement permet de réduire efficacement les déformations et les pressions des terres d'environ 50-60% et ainsi la réduction des dimensions du mur selon différentes conditions de chargement. Les mélanges STC s'avèrent être un matériau de remplissage léger et rentable et réduisent également la demande de matériaux traditionnels en les remplaçant par des copeaux de pneus recyclés. Les résultats obtenus dans la présente étude ne concernent que les tailles relatives des copeaux de pneus et le mur de soutènement en modèle réduit. Il est à noter que les résultats peuvent être influencés par la taille des copeaux de pneus. En outre des études sont nécessaires sur différentes tailles de pneus et avec des hauteurs de murs de soutènement différentes pour pouvoir évoluer les conclusions générales. Pour généraliser ces conclusions, on va étudier l'effet de l'utilisation des remblais légers derrière les murs de soutènement en vraie grandeur à travers la modélisation des cas de murs de soutènement en dimension réels en utilisant les outils informatique tel que le logiciel Plaxis 8.6. Et cela après validation du modèle expérimental. Une étude numérique des murs de soutènements rigides sera présentée dans le chapitre V.

**Références bibliographiques du quatrième chapitre**

- [1]. Anbazhagan P, Mamatha M, Soumyashree P, Sushyam N, Bharatha TP, Vivekan RW Laboratory characterization of tire crumbs soil mixture for developing low cost damping materials. *Int J Earth SciEng* 4(6):63–66(2011)
- [2]. Bosscher J, Edill TB, Kuraoka S Design of highway embankments using tire chips. *J Geotech GeoenvironEng* 123 (4):297–304(1997)
- [3]. Cecich V, Gonzales L, Hoisaeter A, Williams J, Reddy K Use of shredded tires as lightweight backfill material for retaining structures. *Waste Manag Res* 14:433–451(1996)
- [4]. Eldin NN, Senouci AB Use of scrap tires in road construction. *J ConstrEngManag (ASCE)* 118(3):561–576(1992)
- [5]. Foose GJ, Benson CH, Bosscher PJ Sand reinforced with shredded waste tires. *J GeotechEng* 122(9):760–767(1996)
- [6]. Humphrey DN, Sandford TC, Cribbs MM, Gharegrat H, Manion WP Tire chips as lightweight backfill for retaining walls— phase I. Dept. of Civil Engineering, University of Maine, Orono (1992)
- [7]. Ghazavi M, Sakhil MA Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand. *Int J Geomech (ASCE)* 5(1):58–65(2005)
- [8]. Gotteland P, Lambert S, Balachowski L Strength characteristics of tyre chips-sand Mixtures. *Studia geotechnical et mechanica.* 27(1–2):55–66(2005)
- [9]. Graettinger AJ, Johnson PW, Sunkari P, Duke MC, Effinger J Recycling of plastic bottles for use as a lightweight geotechnical material. *Manag Environ Qual* 16(6):658–669(2005)
- [10]. Lee HJ, Roh HS The use of recycled tire chips to minimize dynamic earth pressure during compaction of backfill. *Constr Build Mater J* 21(5):1016–1026(2006)

[11]. Marto A, Latifi N, Moradi R, Oghabi M, Zolfeghari S Shear properties of sand–tire chips mixtures. *Electron J GeotechEng* 18(B):325–334(2013)

[12]. 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).

[13]. Rao GV, Dutta RK Compressibility and strength behavior of sand–tire chips mixtures. *GeotechGeolEng* 24:711–724(2006)

[14]. Reddy KR, Stark T, Marella A Beneficial use of shredded tires as drainage material in cover systems for abandoned landfills *Pract Period Hazard. Toxic Radioact Waste Manag* 14 (1):47–60(2010)

[15]. Reddy SB, Kumar DP, Krishna AM Evaluation of optimum mixing ratio of sand–tire chips mixture for geo-engineering (2015).

[16]. Tweedie JJ, Humphrey DN, Sandford TC Tire shreds as retaining wall backfill, active conditions. *J Geotech Geoenviron Eng (ASCE)* 124(11):1061–1070(1998)

[17]. Vinot V, Singh B Shredded Tyre-Sand as fill material for embankment applications. *J. Environ. Res. Develop.* 7 (4A): 1622–1627(2013)

[18]. Wu WY, Benda CC, Cauley RF Triaxial determination of shear strength of tire chips. *J Geotech Geoenviron Eng (ASCE)* 123(5):479–482(1997)2121212112

[19]. Yang S, Lohnes RA, Kjartanson BH Mechanical Properties of Shredded Tires. *Geotech Test Journal (GTJODJ)* 25(1):44–52(2002)

[20]. Youwai S, Bergado DT Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire–sand mixtures. *Can GeotechJ* 40 (2):254–264(2003)

[21]. Zornberg JG, Viratjandr C, Cabral AR Behavior of tire shred–sand mixtures. *Can Geotech J* 41(2):227–241(2004)

[22]. Sheikh MN, Mashiri MS, Vinod JS, Tsang HH Shear and Compressibility behavior of sand–tire crumb mixtures. *J Mater CivEng* 25:1366–1374(2013)

# CHAPITRE V

## V.1 Présentation du code 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 sauver 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

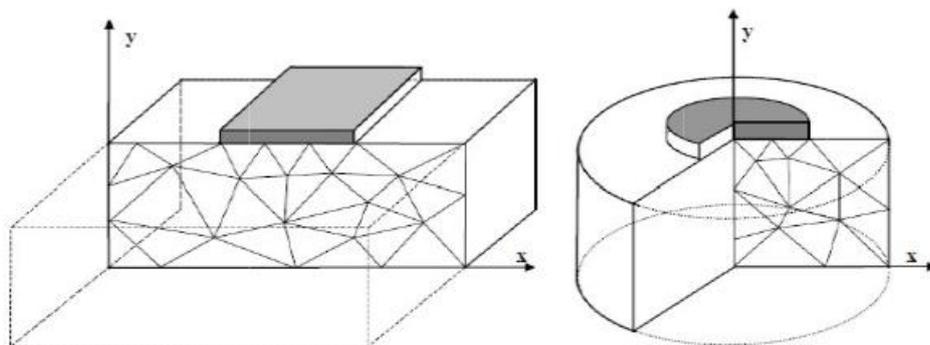
**menu Initial:** Le menu Initial permet d'accéder au menu des conditions initiales du programme Input.

a) Réglage généraux la fenêtre des réglages généraux (général setting) apparait lors de la création d'un nouveaux projet et peut ensuite être ouverte depuis le menu file.

Le type de modèle (model) : PLAXIS Version 8.6 peut être utilisé pour réaliser des analyses par élément fini en deux dimension ,Les model d'élément fini peuvent être soit plans (plan strain), soit axisymétriques(Axisymmetry).

Les modèles en déformation planes (Plan strain) sont utilisé pour les structures ayant une section (plus ou moins) Uniform, et avec un état de contrainte et un schéma de chargement uniformes sur une longueur suffisante perpendiculairement à la section (direction Z).

Les modèles axisymétriques(Axisymmetry) sont utilisé pour les structure circulaire ayant une section radiale (plus en moins) uniforme, et avec un schéma de chargement répartie au tour de l'axe central et des états de contrainte et des déformations identique selon des directions radiales. Pour un modèle d'élément finis a 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 V.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 volumes. 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 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 [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  $\varphi$ , 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 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).

#### V.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 [1].

**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.

##### V.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 réduction). 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 réduction) :** 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. Une 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.

#### V.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, Déformations, Stresses, Windows 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.

### V.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.

### V.1.6 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.

#### V.6.1.1 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  $\nu$ . 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 [1].

#### V.1.6.2 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  $\nu$ , la cohésion c, l'angle de frottement  $\phi$ , 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  $\psi = \phi - 30^\circ$ . Dans la plupart des cas, l'angle de dilatance est nul pour des valeurs de  $\phi$  inférieures à  $30^\circ$ . Une valeur négative faible pour  $\psi$  n'est réaliste que pour des sables extrêmement lâches [1].

## V.2 Étude numérique du comportement des murs de soutènement rigides renforcé par des remblais légers (PET, TC).

### V.2.1 Introduction

On se basant sur les travaux de Reddy Bali (2015) évoqué au chapitre IV présentant une étude expérimentale d'un mur de soutènement en modèle réduit réalisé dans le but de cerner l'effet

d'utilisation d'un remblai léger composé d'un mélange de sable et des copeaux de pneus sur le comportement mécanique en terme de déplacement et de pression des terres.

Dans ce chapitre on va premièrement modéliser le mur en modèle réduit au moyen du code plaxis 8.6 pour valider le modèle numériquement.

Dans un but de généraliser la méthode de renforcement par remblais légers, en va modéliser deux types de mur de soutènement rigides à savoir : un mur de soutènement cantilever et un mur poids réaliser dans un sol argileux, renforcés par deux types de déchet recyclés (les copeaux de pneus et les paillettes en plastique PET)

### V.2.2 Paramètres des matériaux utilisés dans les modèles des murs de soutènements

Les matériaux utilisés dans cette étude sont du sable, des paillettes en plastique PET et des copeaux de pneus ainsi que des murs de soutènement en béton armé ayant les propriétés suivantes :

- ✓ **La structure des murs de soutènement :** On a utilisé trois types de murs de soutènement à savoir : mur poids, mur cantilever en béton armé et mur en modèle réduit en acier dont leurs caractéristiques sont présentées sur les tableaux présentés ci-après :

*Tableau V.1 Les propriétés des Murs de soutènements en BA*

Modèle	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E(MPa)	$\nu$
Elastique	25	34180	0.200

- ✓ **Le sable**

Un sable fin à moyen a été utilisé, Les propriétés de l'échantillon de sable sont données dans le tableau V.2

*Tableau V.2 Les propriétés du sable.*

Paramètre	Valeur
Densité sèche Gs	2.66
Poids volumique (kN /m <sup>3</sup> )	17.4
Diamètre effectif D <sub>10</sub> (mm)	0.175
Coefficient d'uniformité (C <sub>u</sub> )	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 ( $\phi^\circ$ )	33.5
La cohésion (kPa)	9.3

#### ✓ Paillette en Plastique PET

Les paillettes en plastique (PET) utilisées ont les propriétés suivantes [3] :

*Tableau V.3 Les propriétés des paillettes en plastique (PET).*

Paramètre	Valeur
Poids volumique ( $kN/m^3$ )	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 hétérogène composé de deux phases homogènes (sable plus des paillette en plastique PET) : (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.

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. Le module d'élasticité effectif est donné pour le modèle de Voigt suivant l'expression suivante [3] :

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

Et le coefficient du poisson selon l'équation 2

$$\nu_c = \nu_m V_m + \nu_a V_a \quad (V.2)$$

$$\text{Avec : } V_a = 1 - V_m \quad (V.3)$$

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 plastique 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 V.4.

**Tableau V.4** Les propriétés du mélange sable-PET plastique. [3]

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

#### ✓ Mélange sable copeaux de pneus (STC)

Dans cette étude, Cinq mélanges de sable et de copeaux de pneus (STC) ont été considérés comme des matériaux de remblai légers derrière le mur de soutènement cantilever et le mur poids pour des différents pourcentages (STC0, STC10, STC30, STC50, STC70) [2].

**Tableau V.5** Les propriétés du mélange sable copeaux de pneus [2]

%	$\gamma$ ( $\text{kN} / \text{m}^3$ )	$\phi$ (°)	C (kPa)	E (kPa)	$\nu$
0%	18.15	41	0	47888	0.300
10%	16.30	37.2	1	32700	0.300
30%	16.11	38	13.98	45145	0.306
50%	14.89	35	31.21	42155	0.309
70%	11.41	27	22.11	36037	0.314

## ✓ Sol in situ

**Tableau V.6** Les propriétés du sol in situ

Modèle	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	C (kPa)	E (kPa)	$\nu$
MC	18.0	28	5	50000	0.300

**V.2.3 Analyse numérique des murs de soutènements**

Une analyse numérique en 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 et des copeaux de pneus (TC) sur le comportement des murs de soutènements (Mur en modèle réduit, mur cantilever et mur en poids).

**V.2.3.1 Configuration du modèle numérique du mur de soutènement en modale réduit**

Dans cette partie on va modéliser le mur de soutènement en modèle réduit présenté dans le chapitre I V [4] afin de valider le modèle est comparer les résultats expérimentales avec les résultats numérique présentées ci-après :

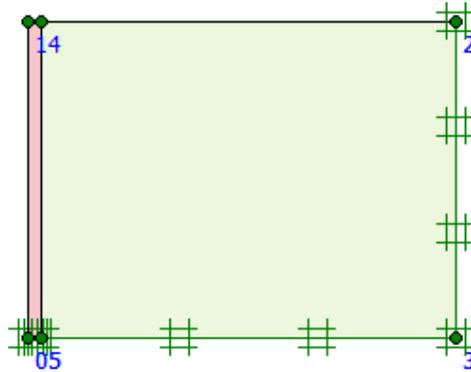
Le mur de soutènement en modèle réduit est en acier d'épaisseur 25 cm et de hauteur 60 cm de poids volumique égale à 70kN/m<sup>3</sup>, les caractéristiques de mur en modèle réduit ont été présentées dans le chapitre IV [4]. Les caractéristiques du sable et mélange sable sont présenté sur le tableau IV.7

**Tableau IV.7** Les propriétés des différents mélanges STC du mur en modèle réduit [4]

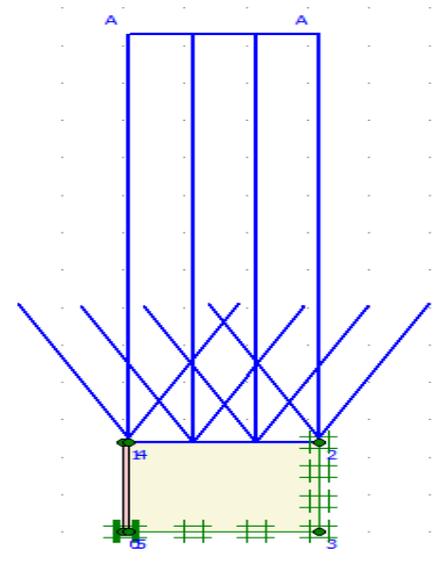
STC Mélange	$\gamma_{sec}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	E (kPa)	$\nu$
STC 0	16.1	48	50000	0.330
STC10	14,62	51	45101	0.325
STC20	14,12	52	40202	0.320
STC30	13,17	56	35303	0.315
STC40	12,29	51	30404	0.310
STC50	10,42	44	25505	0.305

Le mur est modélisé à l'aide du modèle de Mohr-Coulomb drainé [1]. Le modèle a été configuré avec des éléments triangulaires à 15 nœuds [1]. Les limites sont fixées latéralement

sur l'une des deux côtés et fixées horizontalement et verticalement à la limite inférieure, comme le montre (Fig. V.1). Le mur a été soumis à des charges allant de 0 à  $10\text{kN/m}^2$  sur la face supérieure du remblai (Fig. V.2).



*Figure V.2 Le modèle du mur en modèle réduit (cas  $q=0\text{kN/m}^2$ )*



*Figure V.3 Le modèle du mur en modèle réduit ( $q=3$  a  $10\text{ kN/m}^2$ ).*

#### ✓ Le Maillage

Le maillage du modèle est réalisé avec du maillage fin est la génération du maillage est lancé automatiquement (Fig. V.4).

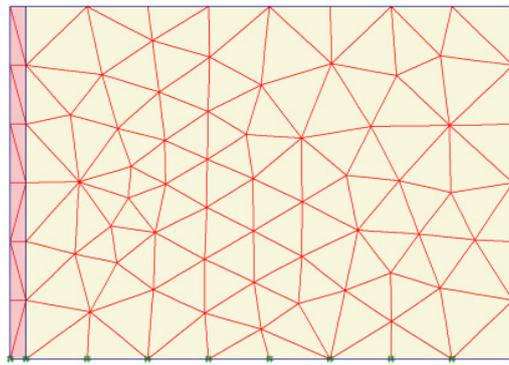


Figure V.4 La génération du maillage.

✓ Les phases de calcul

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	0
✓ déplacement 0	6	0	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	6	1
✓ déplacement 3	5	0	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	5	3
✓ déplacement 5	4	0	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	4	6
✓ déplacement 7	3	0	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	3	10
✓ déplacement 10	1	0	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	1	15
✓ stabilité	2	1	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	1	21

Figure V.5 Les phases de calculs.

✓ Présentation des résultats

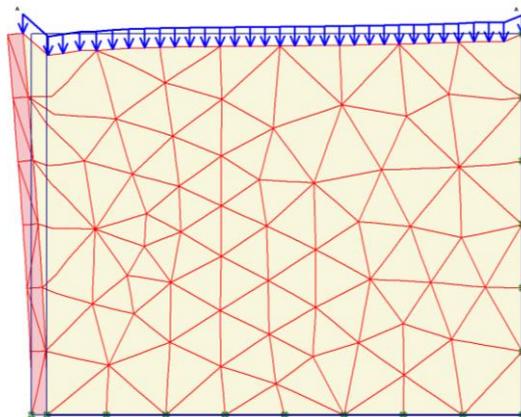


Figure V.6 Le modèle déformé cas (STC 10%).

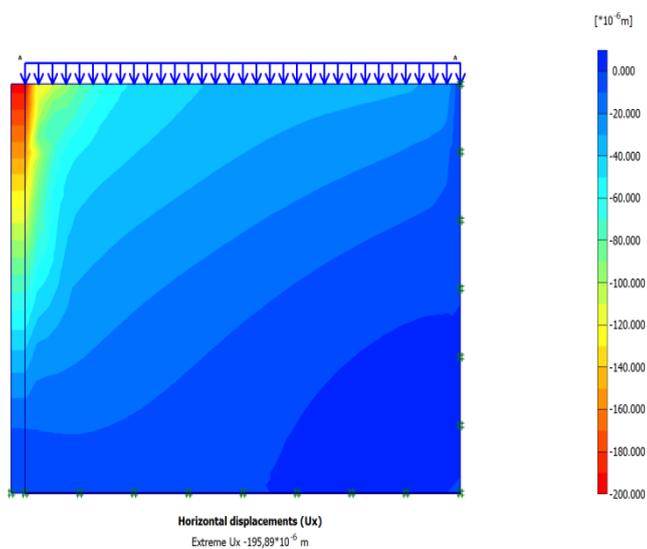


Figure V.7 Déplacement horizontale (U<sub>x</sub>) cas (STC 10%).

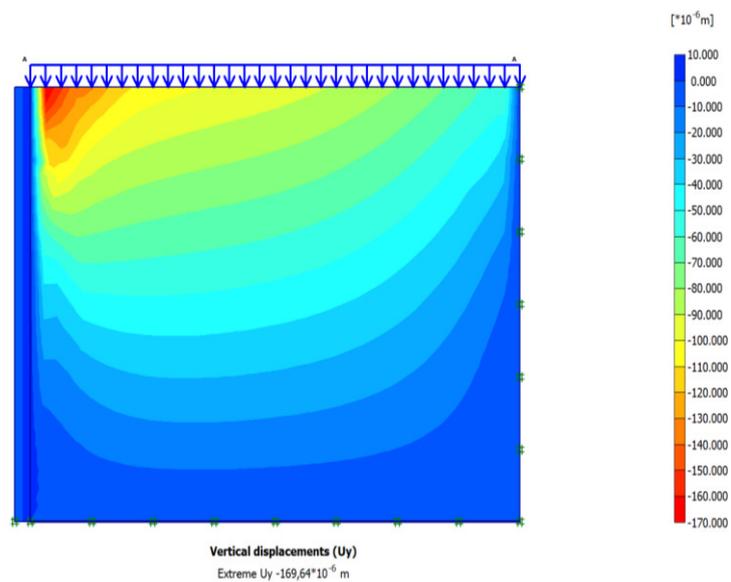


Figure V.8 Déplacement verticale ( $U_y$ ) cas (STC 10%).

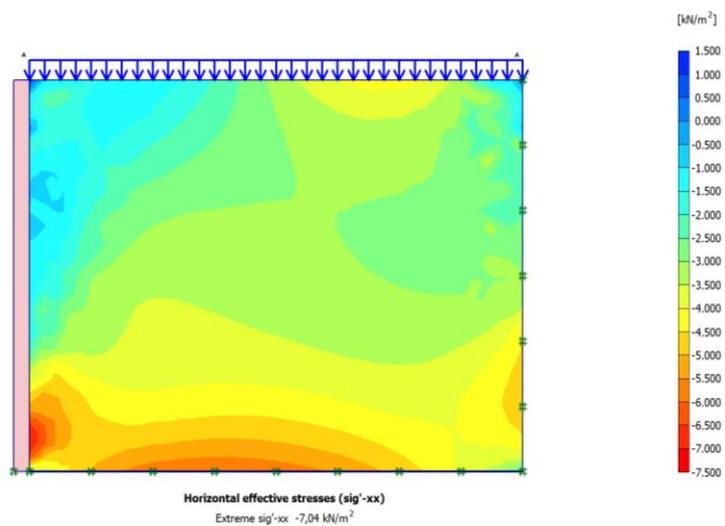


Figure V.9 Contraintes horizontales ( $\sigma_{xx}$ ) cas (STC10%)

**Tableau V. 8** Bilan des résultats pour différents pourcentages de (STC) et cas  $q= 0, 5, 7, 10 \text{ kN/m}^2$

Pourcentage (TC) %	q (kN/m <sup>2</sup> )	U <sub>x</sub> x10 <sup>-6</sup> (m)	U <sub>y</sub> x10 <sup>-6</sup> (m)	σ <sub>xx</sub> (kN/m <sup>2</sup> )
0%	0	97,94	75,00	4,00
	3	98,2	75,13	4,00
	5	134,03	107,81	5,11
	7	172,61	141,94	6,1
	10	229,71	193,11	7,91
10%	0	36,04	19,08	1,95
	3	83,74	63,81	3,25
	5	118,35	95,35	4,35
	7	152,86	126,75	5,39
	10	205,23	174,22	6,76
20%	0	25,23	12,79	1,78
	3	64,13	52,99	3,07
	5	91,87	80,88	4,1
	7	119,32	108,5	5,04
	10	161,64	150,77	2890
30%	0	19,17	27,45	1,32
	3	57,99	47,86	2,57
	5	86,55	75,8	3,35
	7	112,48	101,43	4,43
	10	154,58	142,63	5,75
40%	0	24,12	12,04	342,03
	3	67,98	32,38	719,72
	5	98,52	96,45	1140
	7	130	131,33	1510
	10	177,18	183,55	2860
50%	0	29,23	17,55	526,35
	3	81,59	89,02	744,81
	5	118,17	137,84	1330
	7	155,35	187,19	2620
	10	211,15	261,09	3510

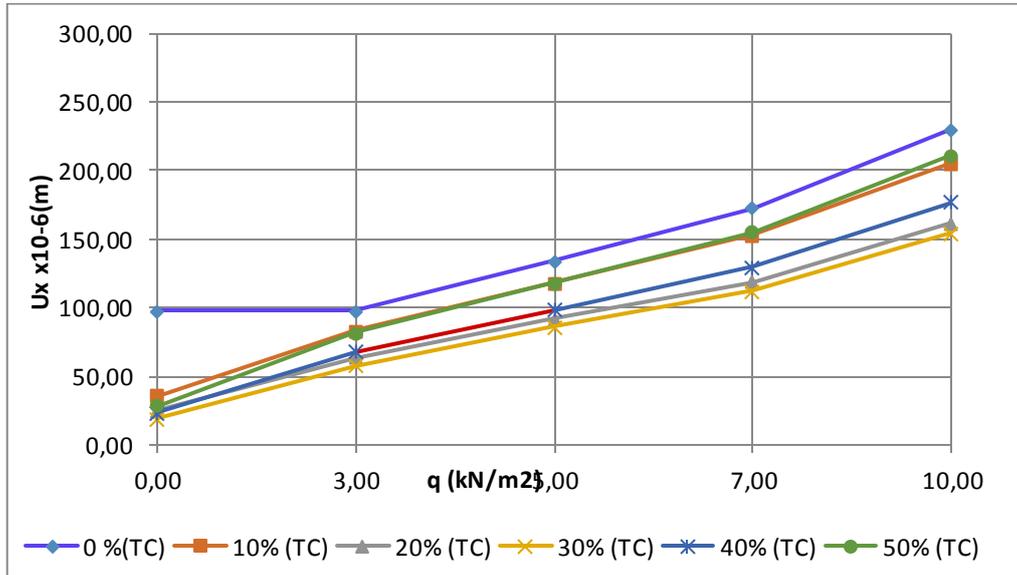


Figure V.10 Les déplacements horizontaux en fonction de la surcharge appliquée pour différents % (TC)

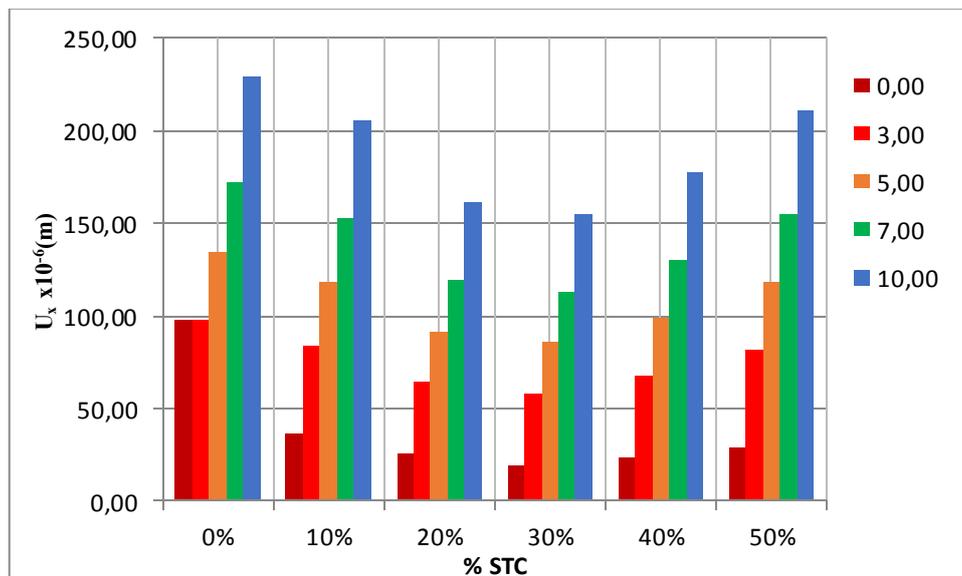
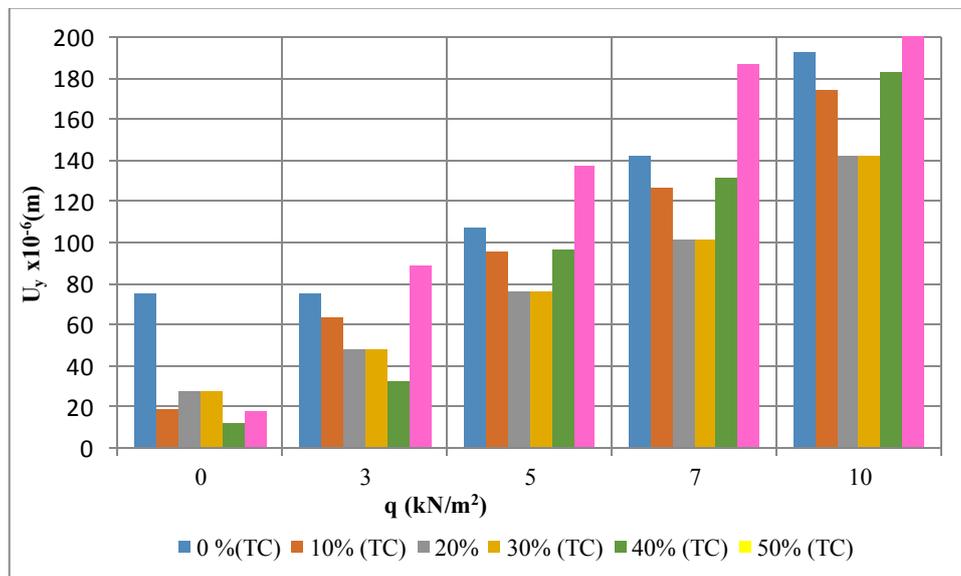


Figure V.11 Les déplacements horizontaux en fonction des pourcentages (TC) pour différents surcharges appliquées



**Figure V.12** Les déplacements verticaux en fonction des pourcentages (TC) pour différents surcharges appliquées

### V.2.3.2 Discussions des résultats obtenus de l'étude numérique du mur en modèle réduit

D'après les figures V.10 et V.11, on remarque que les déplacements Horizontaux diminuent avec l'augmentation des pourcentages des copeaux de pneus (TC) et les déplacements minimales sont enregistrés au niveau du pourcentage 30%. Cependant les déplacements horizontaux enregistrent une augmentation pour les pourcentages 40% et 50%.

On remarque également que les déplacements verticaux enregistrent une diminution pour le pourcentage 30%

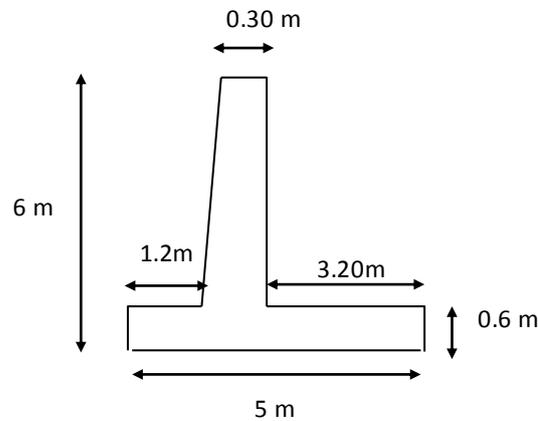
D'après la Figure V10, V.11 et V.12 on peut constater que les déplacements horizontaux et verticaux augmentent avec l'augmentation de la surcharge appliquée de 0 à 10 kN/m<sup>2</sup>

### V.2.3.3 Configuration du modèle numérique pour le mur cantilever

Le sol a été modélisé à l'aide du modèle de Mohr-Coulomb drainé [1]. 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 V.13.

Ce modèle consiste en une structure de soutènement en porte-à-faux placée dans un sol argileux et remblayé avec du sable pur, un mélange STC ou sable-PET en plastique selon le cas étudié. Les dimensions du modèle es sont : (80x15) m.

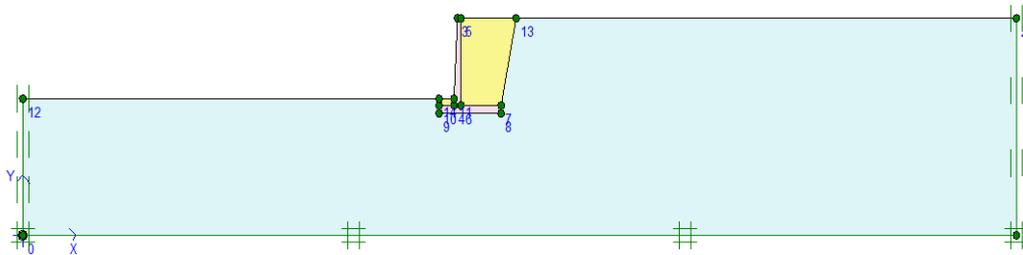
Le mur de soutènement utilisé dans cette analyse numérique est un mur de soutènement cantilever en béton armé de hauteur 6,50 m et dont la largeur de la semelle égale à 5m (Fig. V.13).



**Figure V.13** Géométrie du mur de soutènement cantilever

#### V.2.3.3.1 La modélisation du mur cantilever avec le mélange sable-PET

Le mur a été modélisé en utilisant les propriétés des matériaux, du sol in situ et de remblai constitué de sable et mélange (sable-PET) [3] présentés dans les tableaux V.2, V.3 et V.5



**Figure V.14** Modèle mur de soutènement cantilever.

Le mur de soutènement a été modélisé comme un élément rigide en béton armé réalisé dans un sol argileux (Fig. V.15).

Le remblai STC est placé derrière le mur de soutènement cantilever au-dessus de la semelle sur toute la hauteur du mur faisant un angle  $(\pi/4+\varphi/2)$  avec l'horizontal (Fig. V.14)

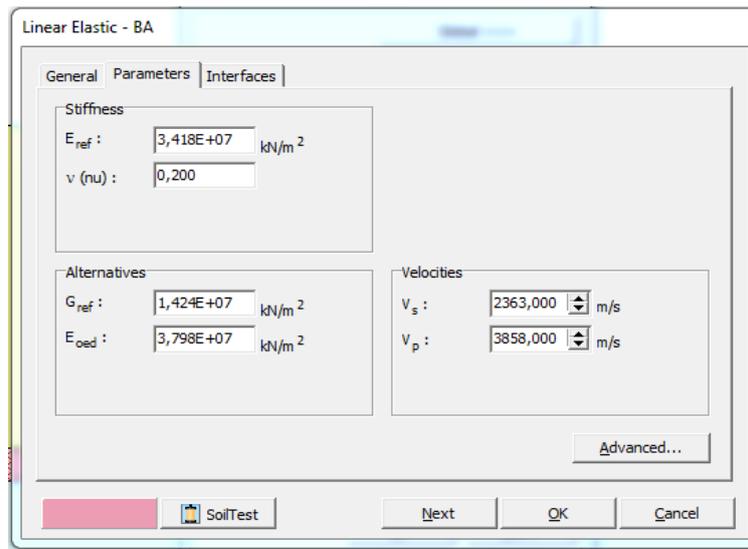


Figure V.15 Les propriétés du mur de soutènement (cantilever).

### ✓ Le Maillage

On peut générer le maillage après l'affectation des différents matériaux dans le modèle. (Fig. V.16).

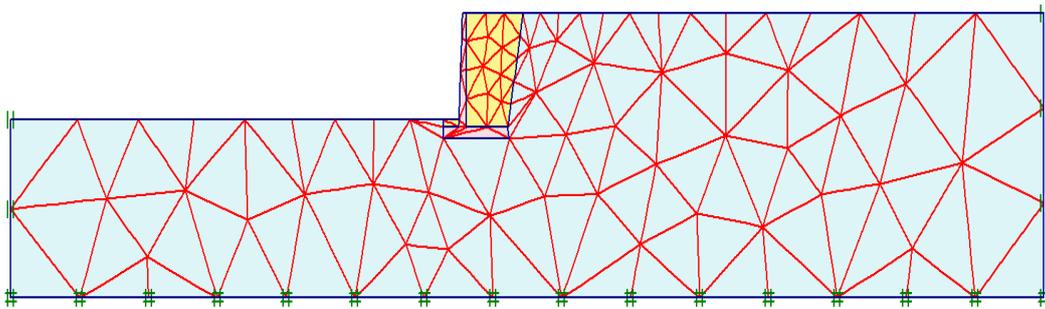
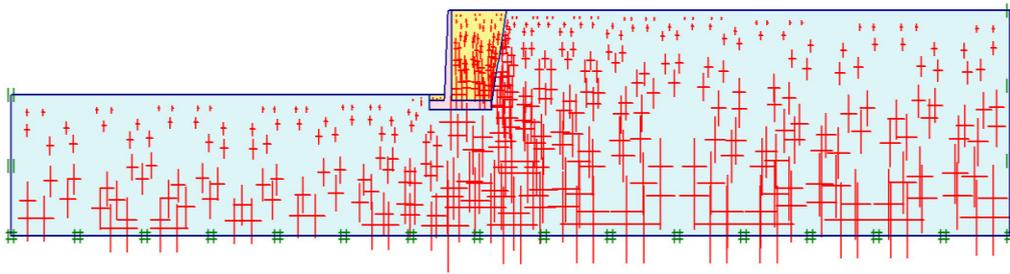


Figure V.16 La génération du maillage.

### ✓ Conditions initiales

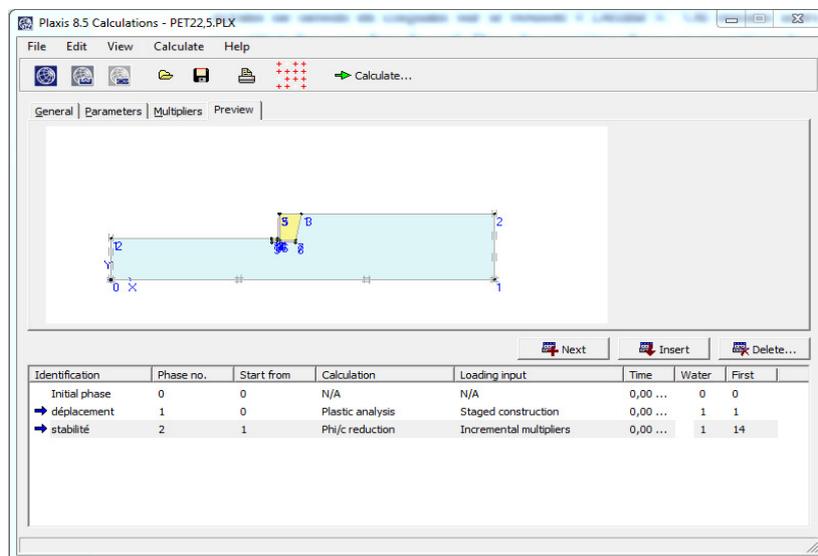
L'initialisation des contraintes de sol peut se faire en conditions  $K_0$ . Plaxis propose par défaut un  $K_0$  selon la formule de Jaky ( $K_0 = 1 - \sin\phi$ ) (Fig. V.17)



*Figure V.17 Contraintes initiales.*

### ✓ Les phases de calcul

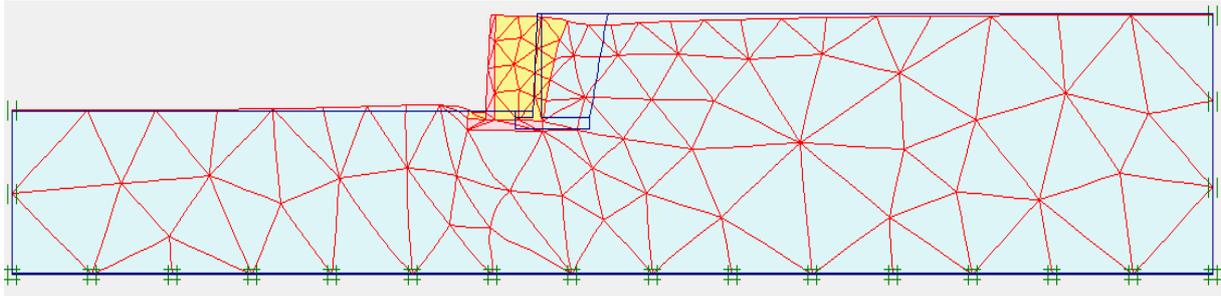
Après la définition du modèle, les calculs peuvent être effectués en choisissant le type plastique et la construction par étape (staged construction) qui va permettre de revenir sur les écrans de dessin en cliquant sur le bouton « Define ». On obtient alors une vue du modèle (Fig. V.18).



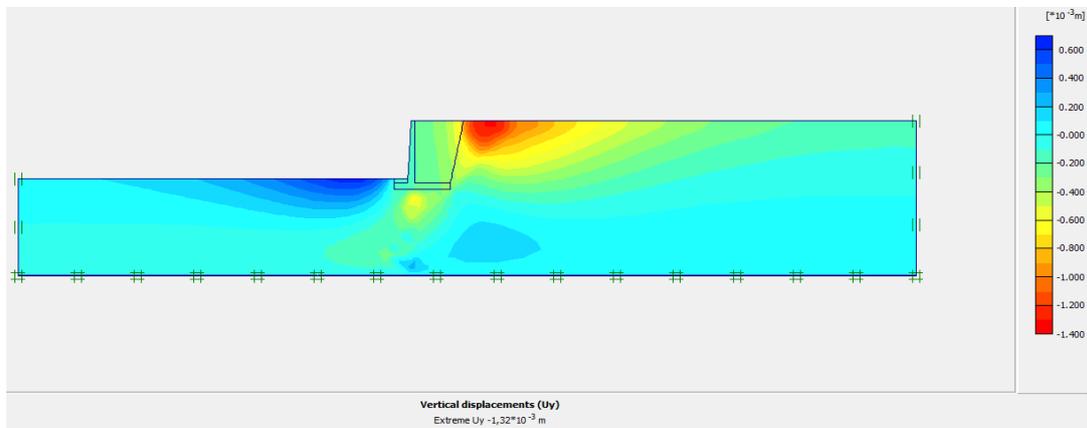
*Figure .18 Les phases de calculs.*

### ✓ Présentation des résultats du calcul

Les Figues. De V19 à V.22 présentent le maillage déformé du modèle, les déplacements verticaux et horizontaux, les contraintes et les déformations selon X et Y dans le cas d'un sol renforcé de 12.5% de paille en plastique.



**Figure V.19** Maillage déformé cas (12.5% Plastique PET).



**Figure V.20** Déplacement vertical ( $U_y$ ) (12.5% Plastique PET)

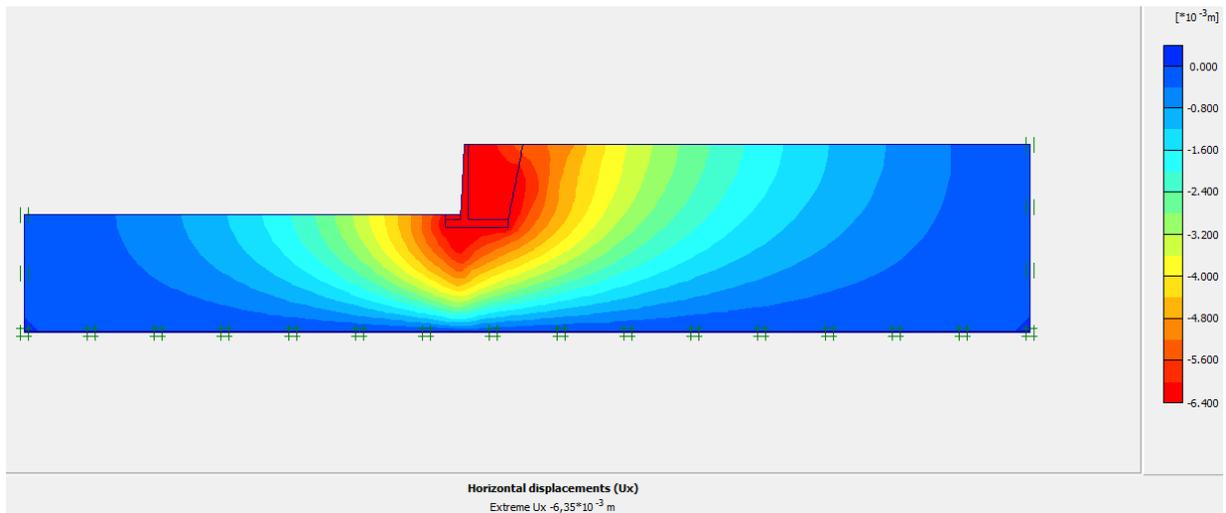


Figure V.21 Déplacement horizontal ( $U_x$ ) (12.5% Plastique PET).

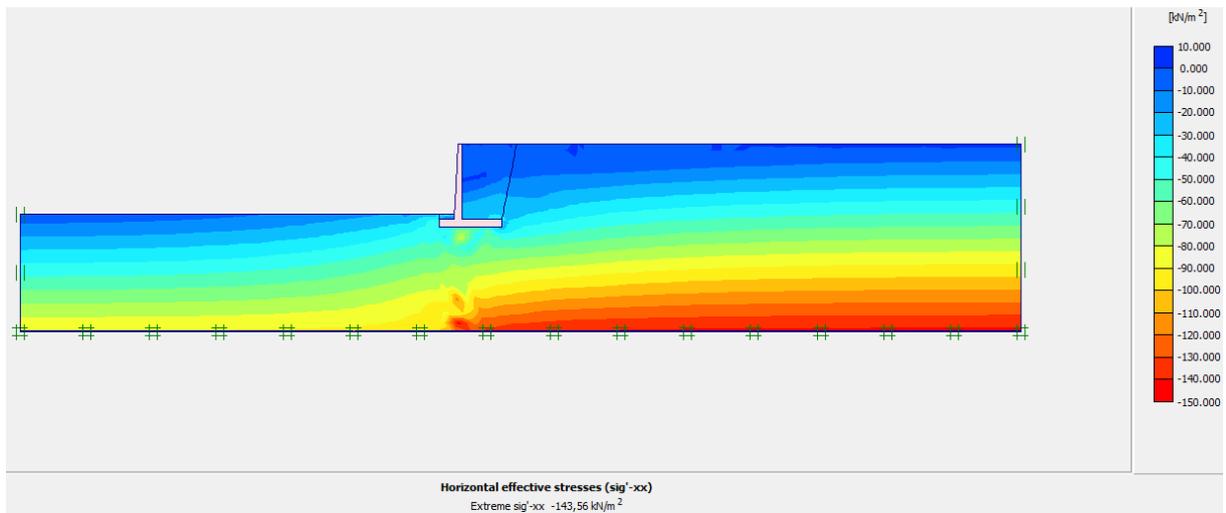
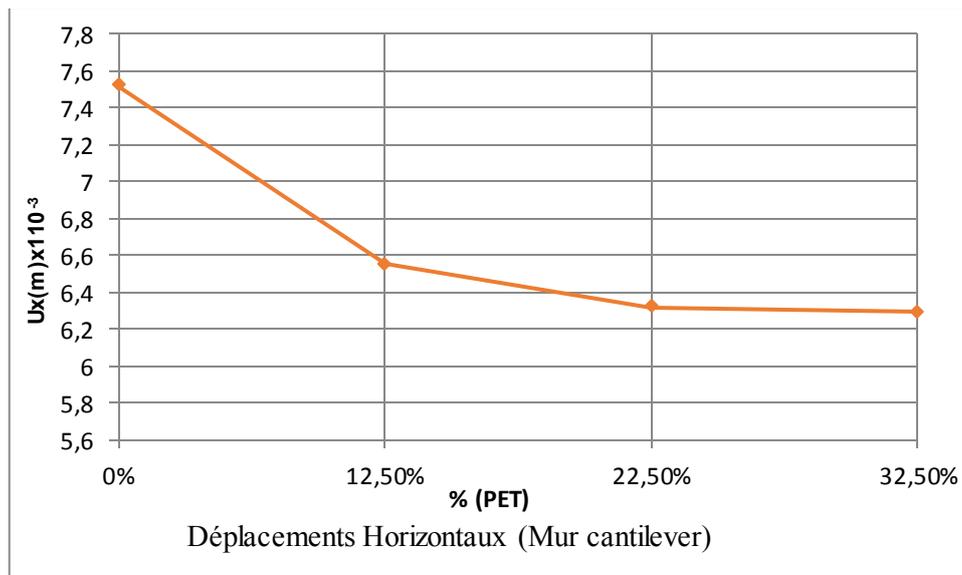


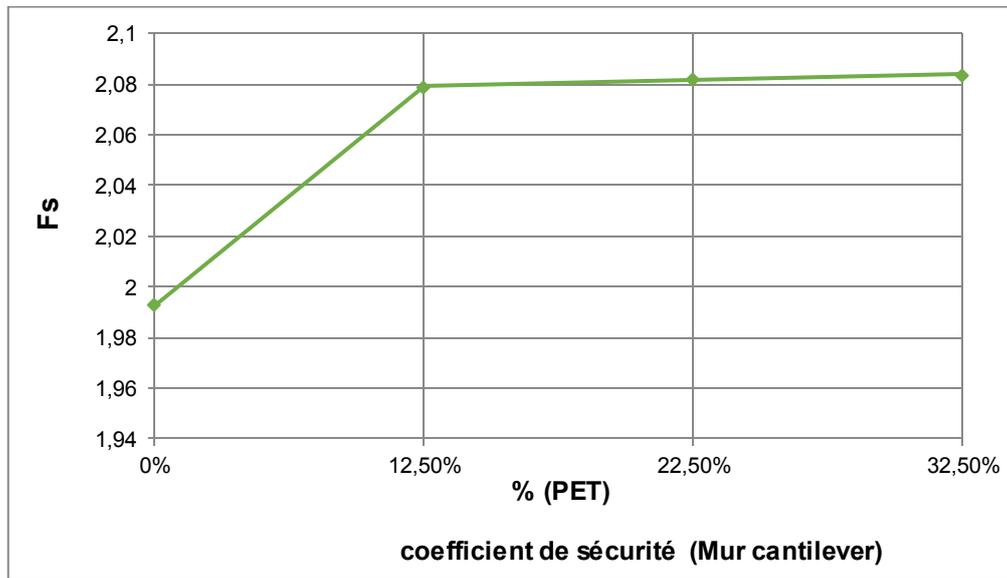
Figure V.22 Contraintes horizontales ( $\sigma_{xx}$ ) (12.5% Plastique PET).

**Tableau V.9** Bilan des résultats de calcul pour le cas remblais (sable-PET)  
(Mur cantilever)

PET plastique (%)	$U_{X(max)} (m) \times 10^{-3}$	$(U_Y) (m) \times 10^{-6}$	$\sigma_{xx}(kN/m^3)$	Fs
0 (%)	7.52	1.35	29.31	1.993
12.5 (%)	6.35	1.32	44.20	2.079
22.5 (%)	6.32	1.28	31.18	2.082
32.5 (%)	6.29	1.23	62.69	2.084



**Figure V. 23** Les déplacements horizontaux en fonction du % PET pour le mur cantilever



**Figure V.24** Les coefficients de sécurité du Mur cantilever en fonction du % PET

### V.2.3.3.2 La modélisation du mur cantilever avec le mélange (STC)

Le modèle du mur cantilever est le même que celui présenté dans la section précédente en remplaçant le remblai (sable-PET) par le remblai (STC) dont les propriétés sont présentées sur les tableaux V.5 et V.6.

Les résultats de la modélisation du mur cantilever renforcé par un remblai (STC) sont regroupés dans le tableau V.9

**Tableau V.10** Bilan des résultats de calcul pour le cas remblais (STC) (Mur cantilever)

Pourcentage (TC) %	$U_{x \max} (m) \times 10^{-3}$	$U_y (m) \times 10^{-3}$	$\sigma_{xx} (kN/m^2)$	Fs
0%	9.64	3.10	122.44	1.956
10%	9.50	2.59	82.95	1.955
30%	7.43	1.39	80.36	2.060
50%	7.50	1.29	80.41	2.082
70%	7.69	1.10	84.66	2.075

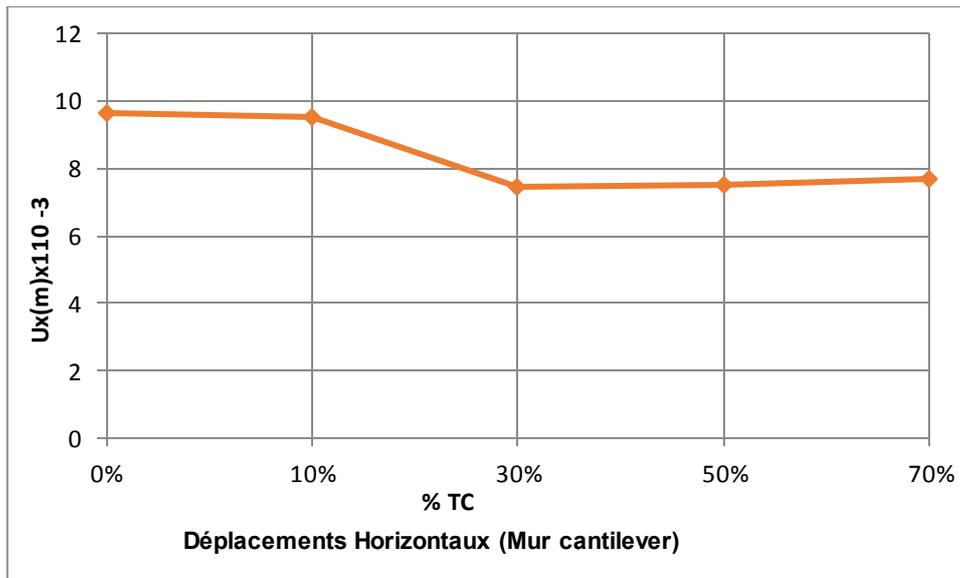


Figure V.25 Les déplacements horizontaux en fonction du % STC pour le mur cantilever

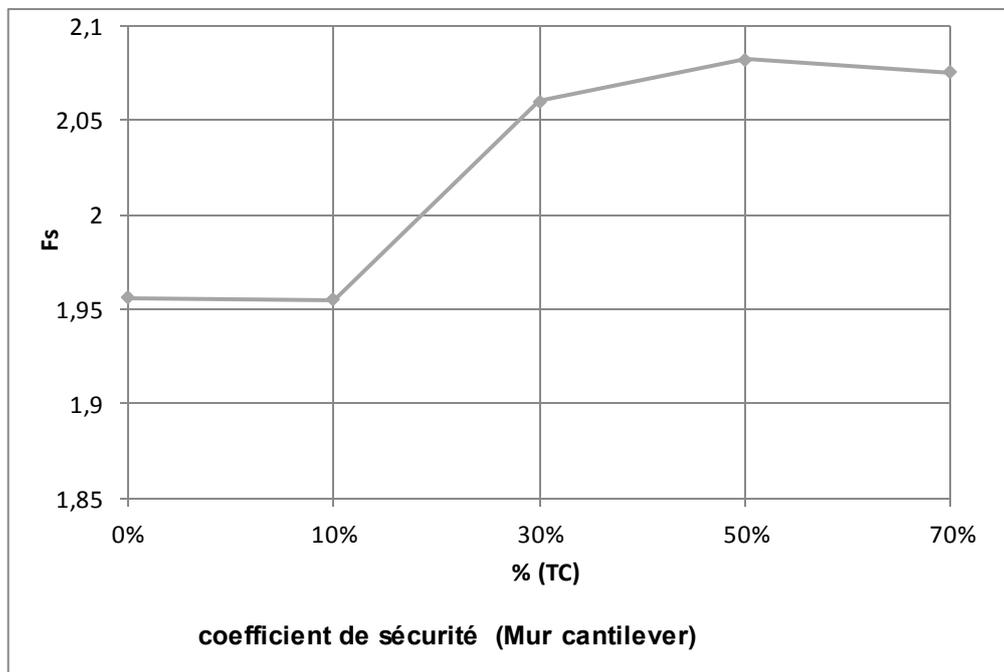
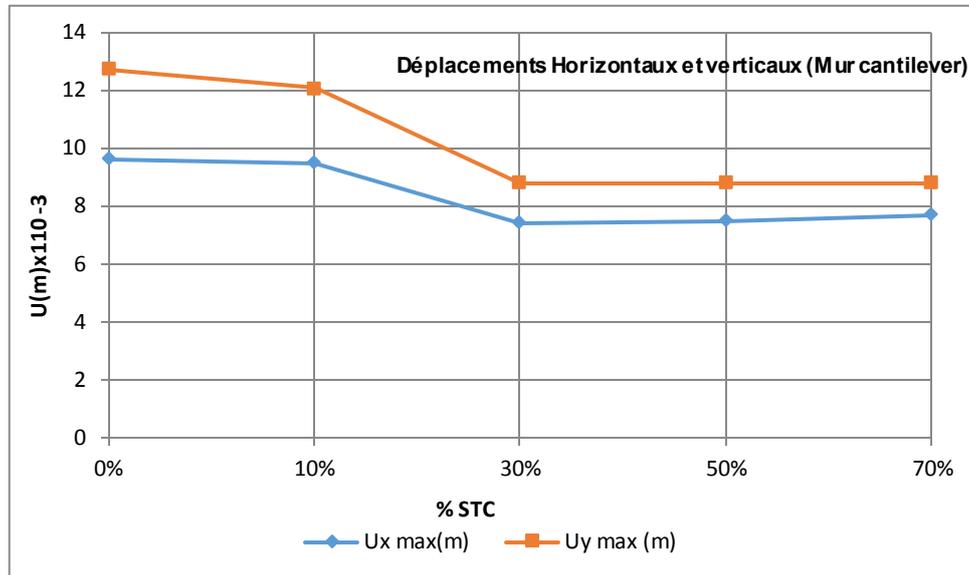


Figure V.26 Les coefficients de sécurité du Mur cantilever en fonction du % TC

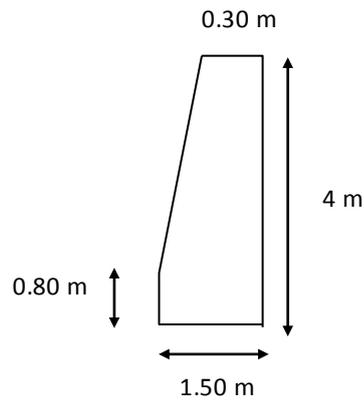


**Figure V.27** Les Déplacements Horizontaux et verticaux développés décrivent le mur cantilever cas STC

#### V.2.3.4 Configuration du modèle numérique pour le mur poids

Dans le but d'étudier l'effet des remblais légers sur la stabilité des murs rigides, on a proposé un deuxième type de mur de soutènement rigide, le mur poids, couramment utilisé dans la stabilisation des sols.

Le mur poids a été modélisée comme un élément rigide avec le même modèle élastique du mur cantilever présenté précédemment et dont la géométrie est présentée sur la Figure V.28 et avec le même type de sol in situ. Le mur est de hauteur 4m et de largeur 1.5m dont les propriétés mécaniques sont définies sur la Figure V.30.

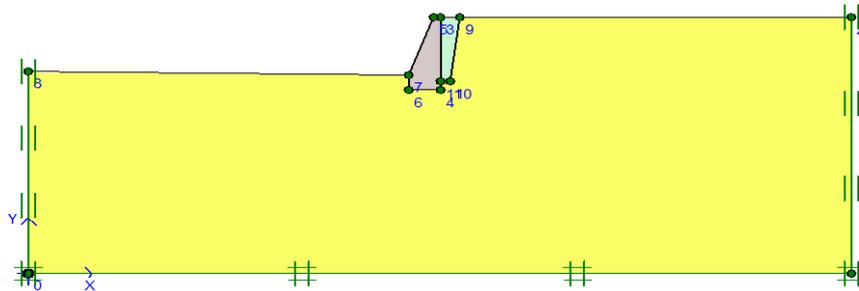


**Figure V.28** Géométrie du modèle

#### V.2.3.4.1 La modélisation du mur poids renforcé avec un remblai (sable-PET)

La modélisation est réalisée avec les mêmes propriétés des matériaux du modèle du mur cantilever défini dans la section précédente pour le cas remblais (sable-PET). Le remblai sable-PET est placé derrière le mur poids dont sa largeur égale à 0.50m (Fig. V.29) [3]

Le mur poids est modélisée selon le modèle représenté sur la figure V.29.



**Figure V.29** Modèle du mur poids.

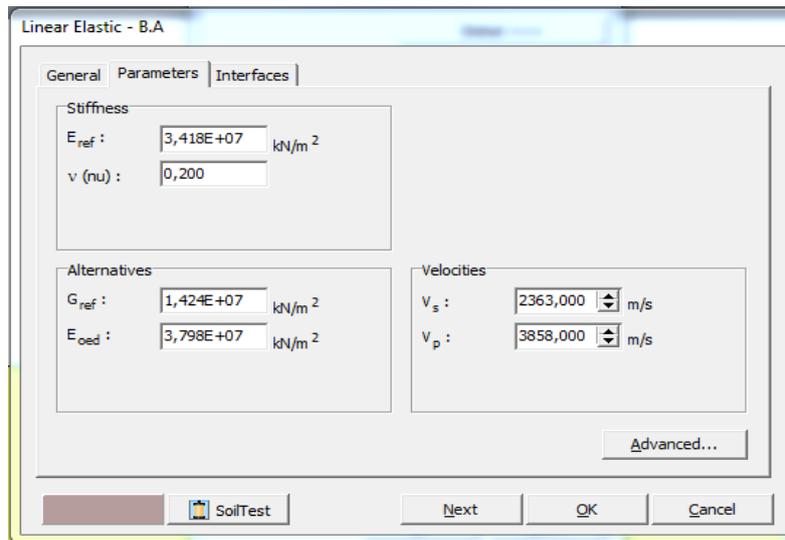


Figure V.30 Les propriétés du mur poids.

#### ✓ Le Maillage

On a choisi un maillage raffiné pour obtenir des résultats plus fiables. La génération du maillage est donnée par la Figure. V.31.

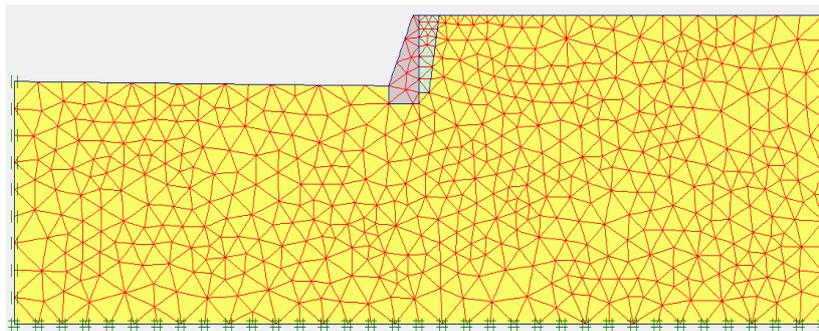
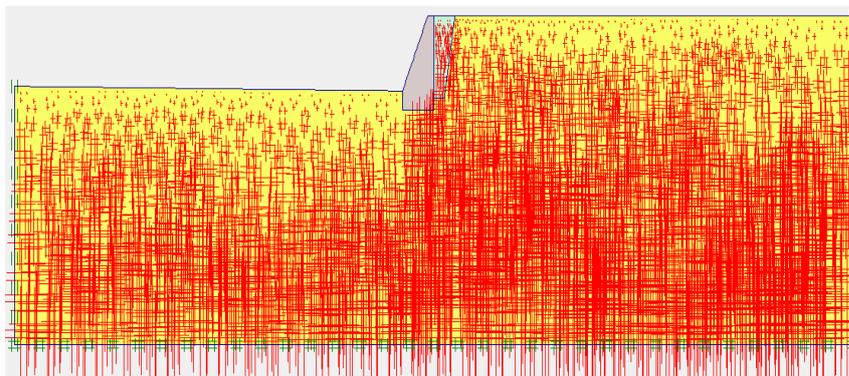
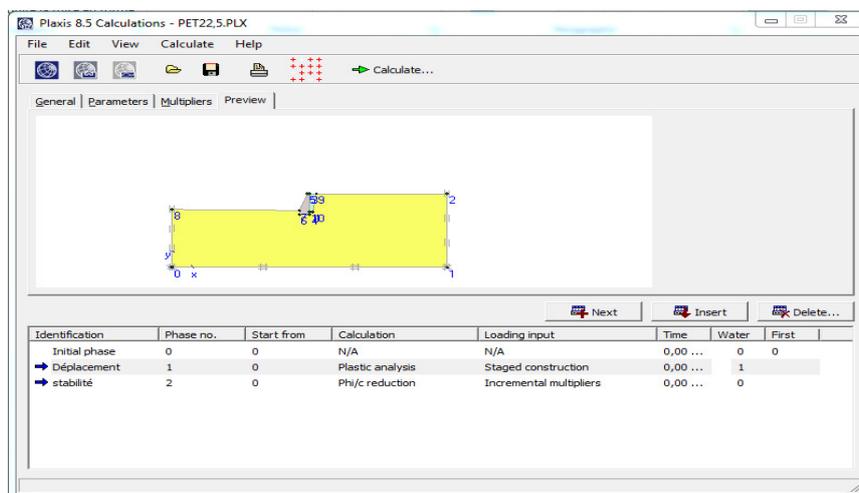


Figure V.31 La génération du maillage

## ✓ Conditions initiales

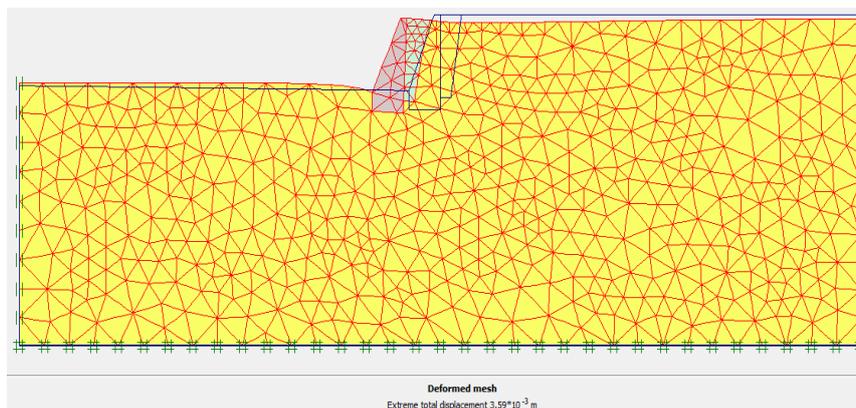
*Figure V.32 Contraintes initiales.*

## ✓ Les phases de calcul

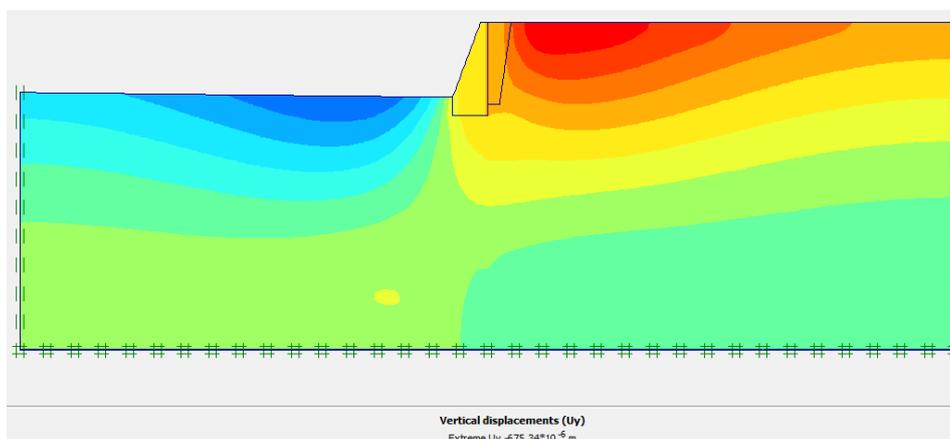
*Figure V.33 Les phases de calculs*

✓ **Présentation des résultats du calcul**

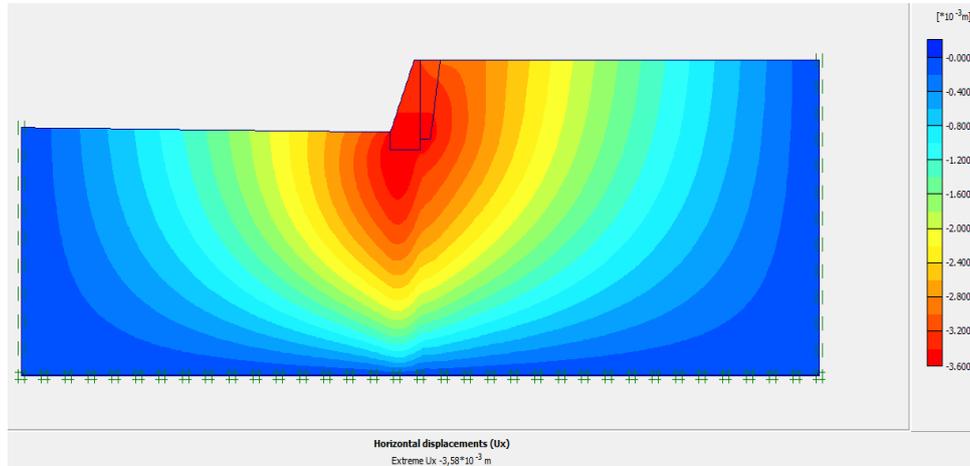
Les Figures V.34 à V.35 présentent le maillage déformé du modèle, les déplacements verticaux et horizontaux, les contraintes et les déformations selon X et Y



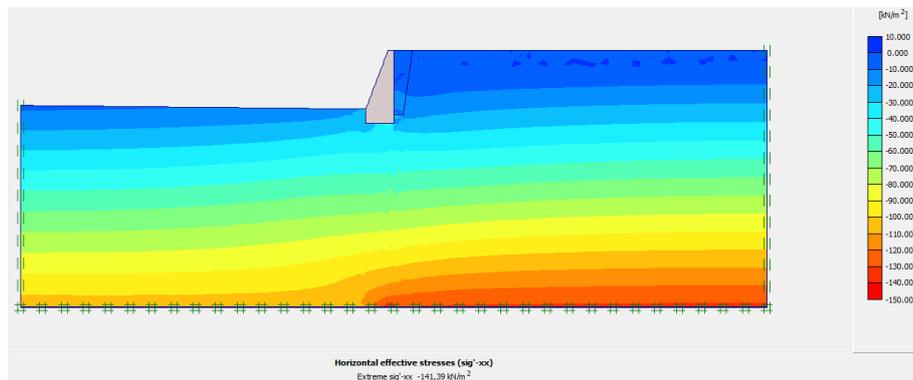
**Figure V.34** Maillage déformé cas (22.5% Plastique PET).



**Figure V.35** Déplacement vertical ( $U_y$ ) (22.5% Plastique PET).



**Figure V.36** Déplacement horizontal ( $U_x$ ) (22.5% Plastique PET).

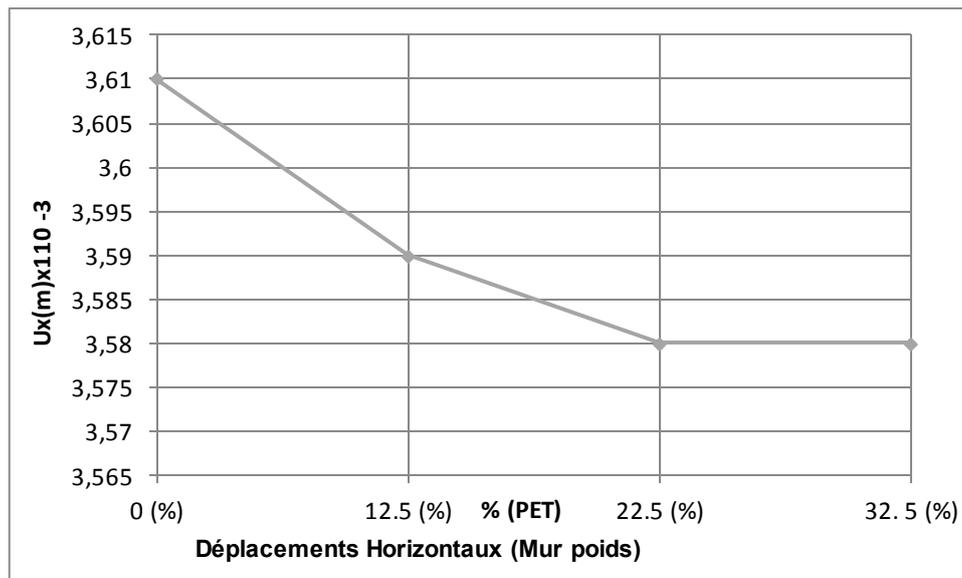


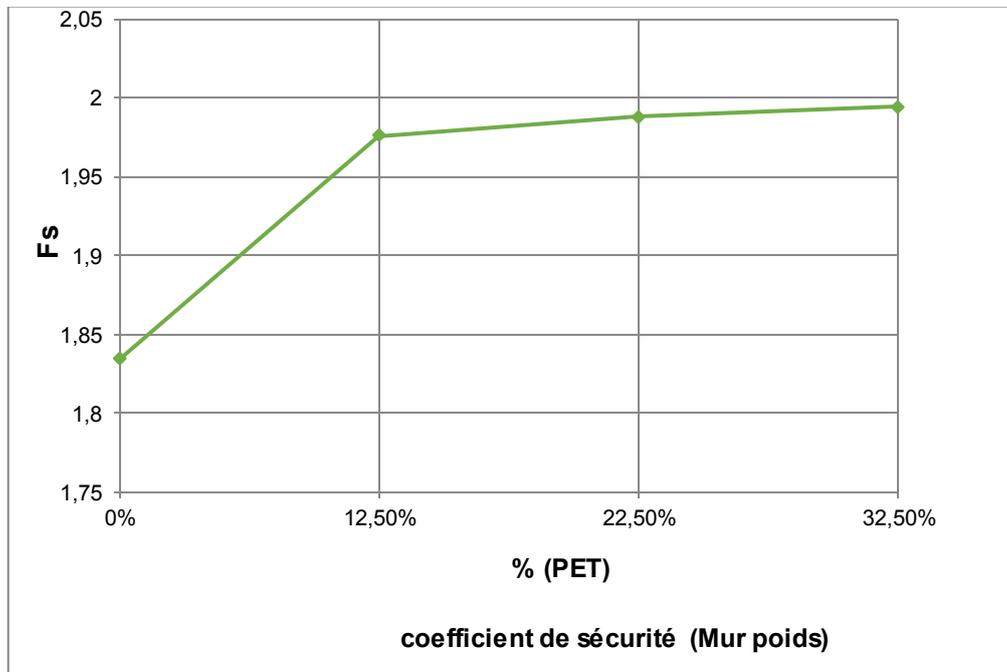
**Figure V.37** Contraintes horizontales ( $\sigma_{xx}$ ) (22.5% Plastique PET).

Les résultats de la modélisation du mur poids renforcé par un remblai (sable-PET) sont regroupés dans le tableau V.10

**Tableau V.11** Bilan des résultats de calcul pour le cas mur poids renforcé par un remblai (sable-PET)

PET plastique (%)	$U_{X(max)} (m) \times 10^{-3}$	$U_Y (m) \times 10^{-6}$	$\sigma_{xx} (kN/m^3)$	$F_s$
0 (%)	3.61	685.61	36.77	1.834
12.5 (%)	3.59	683.97	30.99	1.976
22.5 (%)	3.58	675.34	26.58	1.988
32.5 (%)	3.58	671.98	37.24	1.994

**Figure V.38** Les déplacements horizontaux en fonction du % PET pour le mur poids



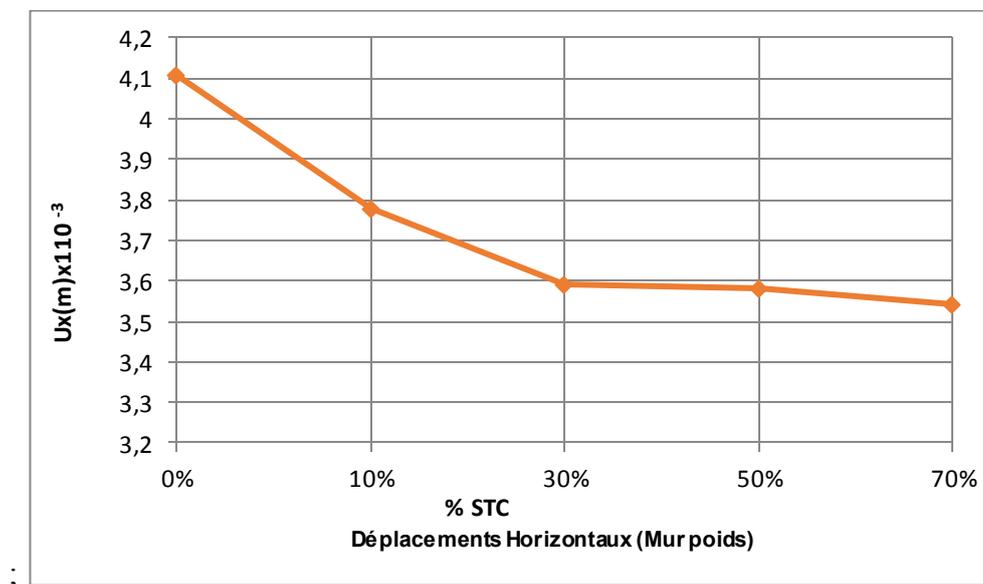
**Figure V.39** Les coefficients de sécurité du Mur poids en fonction du % PET

#### V.2.3.4.2 La modélisation du mur poids renforcé avec un remblai (STC)

Le modèle du mur poids renforcé par un remblai de mélange sable et copeaux de pneus et de même dimension et caractéristique mécanique que celui du cas mur poids renforcé avec un remblai (sable-PET) dont les propriétés sont présentées les tableaux V.5 et V.6. Les résultats de la modélisation du mur poids renforcé par un remblai (STC) sont regroupés dans le tableau V.12

**Tableau V.12** Bilan des résultats de calcul pour le cas remblais (STC) (mur poids)

Pourcentage (TC)	$U_{x(max)} (m) \times 10^{-3}$	$U_y(m) \times 10^{-6}$	$\sigma_{xx} (kN/m^2)$	Fs
(0%)	4.11	1.50	3282	1.356
STC10	3.78	888.57	2463	1.455
STC30	3.59	682.71	2811	2.670
STC50	3.58	672.59	1907	2.752
STC70	3.54	659.44	1702	2.545

**Figure V.40** Les déplacements horizontaux en fonction du % STC pour le cas mur poids

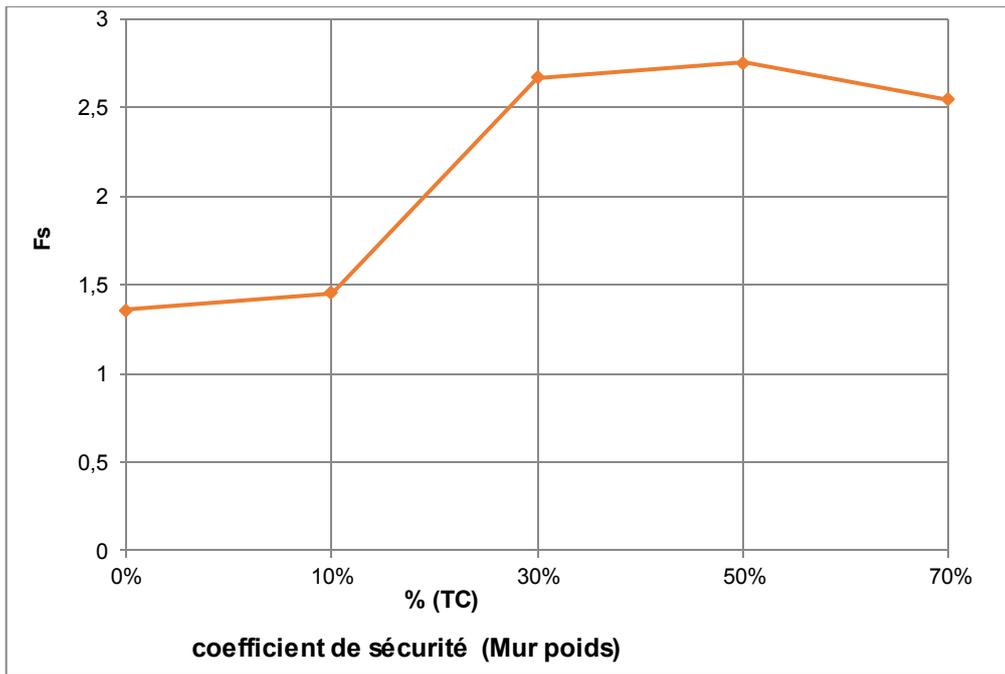


Figure V.41 Les coefficients de sécurité du Mur poids en fonction du %TC

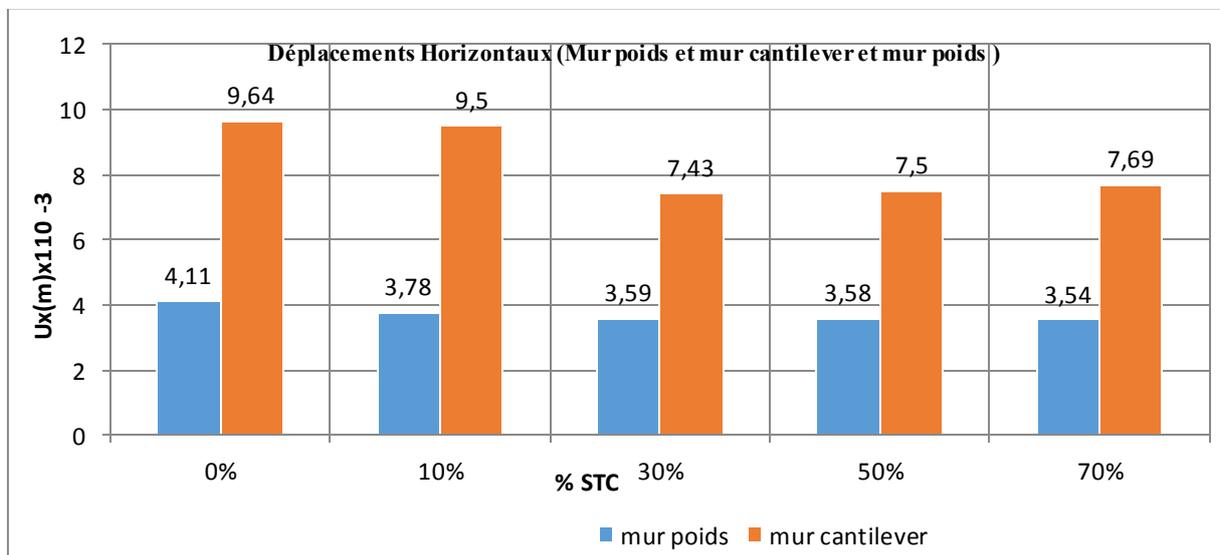


Figure V.42 Comparaison entre les déplacements du mur cantilever et du mur poids renforcés par des copeaux de pneus (STC)

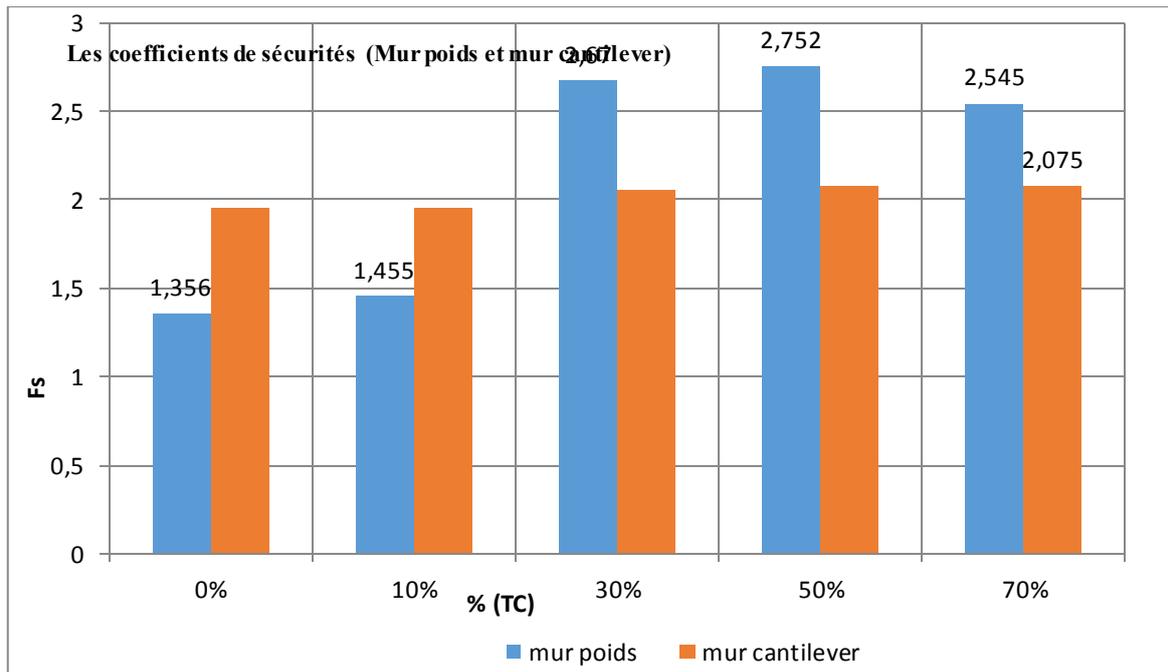


Figure V.43 Comparaison entre les coefficients de sécurité du mur cantilever et du mur poids renforcés par des copeaux de pneus (STC)

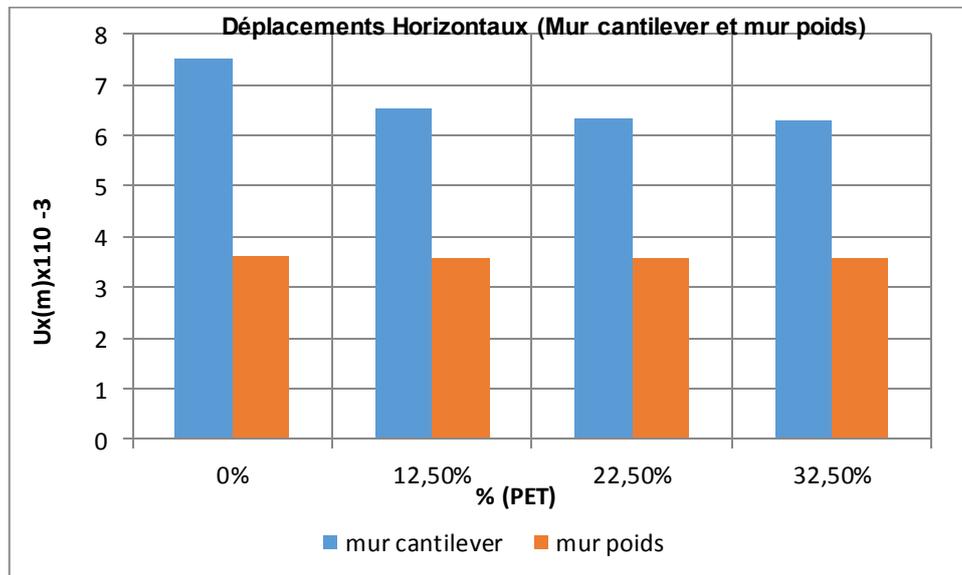
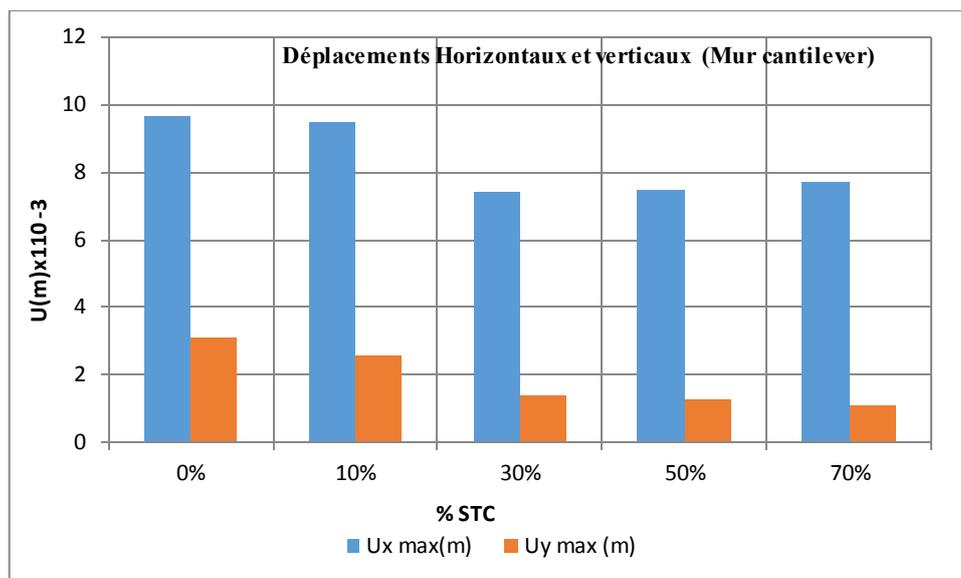


Figure V.44 Comparaison entre les déplacements horizontaux du mur cantilever et du mur poids renforcé par des PET en plastique)



**Figure V.45** Comparaison entre les déplacements horizontaux et verticaux développées derrière le mur cantilever renforcé par de remblai STC

### V.3 Discussions des résultats

D'après les figures V.23, V.25, V.38 et V.40, on remarque que les déplacements horizontaux diminuent avec l'augmentation des pourcentages des copeaux de pneus et les paillettes en plastique PET. Cette diminution est observée pour les deux types de murs de soutènements (mur cantilever et mur poids).

D'après la figure V.27, on note que les déplacements verticaux diminuent également avec l'augmentation des pourcentages des deux matériaux : paillettes en plastique PET et copeaux de pneus (TC).

D'après les figures V.24, V.26, V.39, et V.41, les coefficients de sécurité augmentent avec l'augmentation des pourcentages des matériaux mélangés au sable à savoir : paillette en plastique PET et STC.

D'après les tableaux V.8, V.9, V.10 et V.11, on remarque que les pressions des terres augmentent légèrement avec l'augmentation des pourcentages des déchets recyclés : paillettes en plastique PET et copeaux de pneus (TC) utilisés dans les remblais derrière les murs de soutènement rigides.

D'après les figures V.43 et V.44 les déplacements horizontaux et verticaux développés derrière le mur de soutènement cantilever sont plus élevés que ceux développés derrière le

mur poids.

D'après la figure V.45 les déplacements horizontaux sont plus importants que les déplacements verticaux développés derrière les murs de soutènement.

#### **V.4 Conclusions**

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation des déchets de plastique PET et les copeaux de pneus mélangé au sable destiné au remblaiement derrière les ouvrages de soutènement rigides contribuent efficacement à la diminution des déplacements horizontaux et verticaux et par conséquent améliore la stabilité des murs de soutènements quel que soit leur type (mur cantilever ou Mur poids).

Les résultats obtenues suggèrent l'utilisation des matériaux recyclés mélangés au sable avec des pourcentages bien définies généralement déterminés préalablement par des essais au laboratoire.

Les résultats obtenus à partir de l'étude numérique effectuée sur le mur en modèle réduit confirme que le pourcentage 30% de copeaux de pneus est le pourcentage idéal qui contribue à la diminution des déplacements horizontaux et verticaux et cela quel que soit la surcharge appliquée.

Les pourcentages des paillettes en plastique PET variant dans l'intervalle 22.5% et 32% améliorent la stabilité des murs de soutènements rigides et diminuent ainsi les déplacements horizontaux et verticaux affectant ces ouvrages. Pour les copeaux de pneus (TC) les pourcentages entre 30% et 50% contribuent favorablement à l'amélioration de la stabilité des deux types de murs de soutènement modélisé dans cette étude.

**Référence bibliographie du cinquième 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] Hachemi Djadouni, Habib Trouzine, António Gomes Correia & Tiago Filipe da Silva Miranda, *2D numerical analysis of a cantilever retaining wall backfilled with sand–tire chips mixtures. European Journal of Environmental and Civil Engineering (2019). DOI:10.1080/19648189.2019.1570870.*

[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] Reddy Bali S., Krishna Murali A., *Evaluation of optimum mixing ratio of sand–tire chips mixture for geo-engineering applications. Int. J. of Geosynth. and Ground Eng. (2015). DOI 10.1007/s40891-015-0036-0.*

# **Conclusion Générale**

## **Conclusions générales**

Dans les sols présentant des problèmes de tassements, de portance ou de liquéfaction pour un ouvrage, il était nécessaire d'apporter des améliorations et des renforcements à ces sols dans le but de préserver le mode de réalisation le plus économique et le plus simple à mettre en œuvre.

Il est possible d'apporter une stabilité à un massif de sol en améliorant ses caractéristiques mécaniques. Cette amélioration est obtenue, en général, par une incrustation dans le massif, d'éléments mécaniquement plus performants que le sol lui-même, donnant à celui-ci une meilleure résistance au cisaillement.

Nous avons présenté quelques procédés qui permettent de stabiliser un massif de sol, notamment le renforcement avec des armatures métalliques comme dans la terre armée ou les murs cloutés, les inclusions géosynthétiques sous toutes leurs formes, et les ouvrages de soutènement avec la construction de parois ou de murs ancrés ou non dans le massif conçus pour résister aux poussées des terres.

Le recyclage des déchets plastiques et des pneus usagés est un moyen de protection de l'environnement. Étant donné que ces deux déchets sont des dérivés du pétrole leurs réductions représentent un intérêt environnemental et économique.

Dans le domaine de géotechnique, plusieurs investigations expérimentales ont été réalisées en utilisant les déchets 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 leur emploi comme matériaux remplaçant les sols à problème in situ.

Dans ce travail, on a exposé un essai réalisé avec des copeaux de pneus (CT) mélangé à du sable formant un remblai léger placé derrière un mur en modèle réduit dans le but d'étudier la stabilité du mur de soutènement en modèle réduit. Les résultats de cet essai ont montrés que l'ajout des copeaux de pneus a diminué considérablement les déplacements horizontaux affectant le mur.

Afin de valider l'essai du mur en modèle réduit renforcé par un mélange de sable et des copeaux de pneus (STC), on a réalisé une étude numérique sur le comportement du mur en modèle réduit au moyen du logiciel PLAXIS 8.6.

Une deuxième étude numérique a été réalisée sur deux types de murs de soutènements rigides (mur cantilever et mur poids) dont le remblai placé en arrière de ces derniers est renforcés par deux types de mélanges. Le premier est un mélange composé du sable et des copeaux de pneus (STC), le deuxième est un mélange de sable et des paillettes en plastique PET. Les pourcentages du TC et des paillettes en plastique PET utilisés dans cette étude ont été tirés de la littérature

D'après les résultats obtenus de la première étude numérique sur le mur en modèle réduit, on a pu tirer les conclusions suivantes :

Les déplacements Horizontaux diminuent avec l'augmentation des pourcentages des copeaux de pneus (TC) et les déplacements minimales ont été enregistrés avec le pourcentage 30%. (TC) Cependant ces déplacements ont enregistré une augmentation pour les pourcentages 40% (TC) et 50% (TC). Même observation a été enregistrée au niveau des déplacements verticaux.

On a pu constater que les déplacements horizontaux et verticaux augmentent avec l'augmentation de la surcharge appliquée de 0 à 10 kN/m<sup>2</sup>

D'après les résultats obtenus de la deuxième étude numérique effectuée sur les deux murs rigides (mur cantilever et mur poids), on a pu tirer les conclusions suivantes :

Les déplacements horizontaux diminuent avec l'augmentation des pourcentages des copeaux de pneus et les paillettes en plastique PET. Cette diminution est observée pour les deux types de murs de soutènements (mur cantilever et mur poids). Même observation a été enregistrée au niveau des déplacements verticaux.

Les coefficients de sécurité augmentent avec l'augmentation des pourcentages des matériaux mélangés au sable à savoir : paillette en plastique PET et STC.

On a remarqué également que les pressions des terres ont augmentées légèrement avec l'augmentation des pourcentages des déchets recyclés: paillettes en plastique PET et copeaux de pneus (TC) utilisés dans les remblais derrière les murs de soutènement rigides.

Les déplacements horizontaux et verticaux développés derrière le mur de soutènement cantilever sont plus élevés que ceux développés derrière le mur poids.

A la fin, on peut conclure que l'utilisation des déchets de plastique PET et les copeaux de pneus mélangé au sable destiné au remblaiement derrière les ouvrages de soutènement rigides contribuent efficacement à la diminution des déplacements horizontaux et verticaux et par

conséquent améliore la stabilité des murs de soutènements quelque soit leur type (mur cantilever ou Mur poids).

Les résultats obtenues suggèrent l'utilisation des matériaux recyclés mélangés au sable avec des pourcentages bien définies généralement déterminés préalablement par des essais au laboratoire.