

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Supérieure des
Travaux Publics



DIRECTION POST-GRADUATION ET RECHERCHE

Mémoire présenté par :

ABDELHAFIDI AICHA

Ingénieur d'état en Travaux Publics

Pour l'obtention du titre de :

Magister en Génie Civil

THEME

ETUDE EXPERIMENTALE SUR
LE PNEUSOL
REDUCTEUR DE POUSSEE

Soutenu publiquement
devant le jury composé de :

ZERZOUR Aii

TAKI Mohamed

ZITOUNI Zine el Abidine

BELABDELOUAHAB Farid

DJIDJELI Zahir

MC /ENSTP

MC /ENSTP

MC/U BLIDA

MC/ENSTP

DIR/ RECHERCHE MTP

PRESIDENT

EXAMINATEUR

EXAMINATEUR

DIRECTEUR DE MEMOIRE

INVITE

RESUME

Utiliser des inclusions résistantes à la traction pour améliorer les caractéristiques mécaniques d'un sol, coûte souvent très chère. Une solution très économique consiste à utiliser le Pneusol, qui est constitué de l'association de sol avec des pneumatiques usagés, l'utilisation d'un tel déchet permet de résoudre d'un côté un problème lié à l'environnement qui est un enjeu très important, et sa préservation est une responsabilité commune, et d'autre côté devant les besoins sans cesse croissant des ressources en matériaux et dans le but de résoudre un problème en génie civil. Les applications possibles du pneusol sont multiples et variées : ouvrages de soutènement, raidissement de pentes, pistes avec matériaux non cohérents de faible stabilité, absorbeur d'énergie, remblai léger sur terrain compressibles, ainsi que d'autres applications.

Le mémoire traite directement le cas des ouvrages de soutènement avec un renforcement par des inclusions en nappes de pneumatiques usagés. L'étude expérimentale porte sur des essais ayant pour but de caractériser ce matériau, afin d'étudier l'influence un certain nombre de paramètres tant du point de vue qualitatif que du point de vue quantitatif, sur l'évolution des efforts mobilisés en poussée tridimensionnelle, et en essayant de mettre en évidence une principale qualité : Son pouvoir d'améliorer les caractéristiques d'un sol et afin de réduire la poussée derrière un mur de soutènement.

Mots clé : Pneusol, déchet, inclusion, renforcement, sol, pneu, soutènement

ملخص

استخدام قوة مقاومة لتحسين الخصائص الميكانيكية للتربة يتضمن تكاليف مكلفة جداً في كثير من الأحيان. حل فعال جداً من حيث التكلفة هو استخدام Pneusol الذي يتكون من رابطة التربة مع الإطارات المستعملة، استخدام مثل هذه النفايات يمكنها حل مشكلة البيئة، مسألة مهمة جداً من جانب و صيانتها مسؤولية مشتركة، و من جانب آخر حل مشكلة في الهندسة المدنية والمواد. التطبيقات الممكنة له متعددة ومتنوعة : منحدرات، المسارات مع مواد الاحتفاظ، امتصاص الطاقة، جسور خفيفة الوزن على الأرض قابلة للضغط والتشنج وكذلك تطبيقات أخرى. المذكورة تتمحور حول جدار الاستناد المدعم بالإطارات المستعملة، قمنا بدراسة تجريبية بهدف متابعة حالة تطور هذا الأخير بعد التدعيم مع مراقبة بعض من العناصر التي نضن أنها تأثر فيه، بغرض إثبات قدرة الإطارات المستعملة على إنقاص بشكل كبير القوة الدافعة خلف جدار الاستناد. **كلمات مفتاح**: إطار، مخلفات، تدعيم، تربة، جدار استناد.

ABSTRACT

Use resistant strength to improve mechanical properties of a soil-includes costs often very expensive. A very cost-effective solution is to use the Pneusol, consisting of the association of soil with used tyres, the use of such waste can resolve a problem with the environment is a very important issue of a side and its maintenance is a shared responsibility, and on the other side before the ever-increasing resources to resolve an issue in civil engineering and materials needs. Possible applications of the sound Pneusol multiple and varied: slopes, tracks with materials not consistent low stability, energy absorber lightweight embankment on ground compressible, stiffening retaining, works as well as other applications.

The memory directly deal with the case of retaining with enhanced by inclusions in webs of used tyres works. The experimental study deals with the aim of characterised this material tests, in order to study the influence a number of settings so many qualitative and quantitative view, on the evolution of the mobilised efforts in three-dimensional thrust and trying to highlight main quality: his power to improve the characteristics of a floor and reduce the thrust behind a retaining wall.

Keywords: Pneusol, waste, inclusion, reinforcement, ground, tire, supporting

REMERCIEMENTS



Je remercie Monsieur BELABDELOUAHAB Farid, Docteur à l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics d'Alger pour avoir assuré la direction et le suivi de ce mémoire. Son expérience et son aide scientifique m'ont été essentielles. Sa disponibilité ainsi que l'attention qu'il a portée à ce travail ont été un atout précieux dans l'avancement de cette étude.

Je tiens à remercier très vivement et respectueusement Monsieur ZERZOUR Ali, Maître de Conférences, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, qui m'a fait l'honneur de présider le jury d'évaluation de mon mémoire.

Je présente également mes remerciements les plus chaleureux à Monsieur TAKI Mohamed, Maître de Conférences à l'ENSTP et Monsieur ZITOUNI Zine el abidine, Maître de conférences à l'université de Blida, qui ont accepté d'examiner ce mémoire, ainsi Monsieur DJIDJELI Zahir, Directeur de Recherche au Ministère des Travaux Publics qui a accepté d'être parmi mon jury.

Mes remerciements sincères s'adressent à mes collègues du travail et mes collègues de l'école, qui m'ont fait bénéficier de leurs connaissances et de leurs expériences dans le domaine des Travaux Publics

Je souhaite que Melle Bahloul Wassila, trouve ici le témoignage amical de mon estime et de mes remerciements pour son soutien constant, pour ses qualités humaines et pour tous les correctifs qu'elle a souvent apporté à mes résultats.

Je remercie très vivement, mes parents ainsi mes frères et sœurs pour leurs aide et qui ont porté un grand intérêt à mes travaux. Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien moral de plusieurs personnes, ma famille, mes copines de la résidence universitaire, mes chères amies auxquelles je souhaite également exprimer toute ma gratitude.

DEDICACE



Je dédie ce travail :

- *A la mémoire de ma grande mère*
- *A tous ceux qui m'aime et qui m'estime*



Introduction générale 1

1^{ère} Partie: Recherche bibliographique

Chapitre I

Environnement & Pneumatiques usagés

I.1. Introduction.....	6
I.2. Etat des lieux.....	6
I.3. L'Environnement	7
I.4. Les pneumatiques usagés	8
I.5. Conclusion	14

Chapitre II

Valorisation des pneumatiques usagés

II.1. Introduction.....	15
II.2. Valorisation du pneumatique usage.....	15
II.3. Caractéristiques des pneumatiques.....	22
II.4. Critères de durée de service.....	26
II.5. Comportement des pneus dans l'eau.....	27
II.6. Conclusion.....	28

Chapitre III

Le Pneusol

III.1. Introduction.....	29
III.2. Historique des recherches.....	29
III.3. Avantages du Pneusol.....	30
III.4. Domaines d'utilisation du Pneusol.....	31
III.5. Comportement du Pneusol.....	43
III.6. Adhérence Terre-Pneumatiques.....	45
III.7. Principe d'exécution.....	46
III.8. Formes d'assemblage.....	47
III.9. Attaches des pneumatiques.....	47
III.10. Réalisations en Pneusol.....	49
III.11. Conclusion.....	54

2^{ème} Partie: Etude Expérimentale

Chapitre IV

Expérimentation sur modèle réduit

IV.1. Introduction.....	55
IV.2. Classification des modèles réduits.....	55
IV.3. Fonctions principales d'un modèle réduit.....	57
IV.4. Avantages et inconvénients.....	58
IV.5. Conditions de similitude du phénomène dans l'étude sur modèle réduit.....	58
IV.6. Effet d'échelle.....	63
IV.7. Les effets de bord.....	64
IV.8. Conclusion.....	67

Chapitre V

Le modèle de la campagne d'expérimentation

V.1. Introduction.....	68
V.2. Le modèle réduit 'ENTP' et les matériaux utilisés.....	68
V.3. Essais particuliers.....	74
V.4. Programme d'essais.....	80
V.5. Conclusion.....	82

Chapitre VI

Principe des murs de soutènement "Interaction Sol – Inclusion "

VI.1. Introduction.....	83
VI.2. Différents types d'ouvrages de soutènement.....	83
VI.3. Dimensionnement des ouvrages de soutènement.....	84
VI.4. Renforcement des sols par inclusions.....	85
VI.5. Méthodes de calcul des écrans de soutènements.....	88
VI.6. Conclusion.....	91

3^{ème} Partie: Résultats Expérimentaux

Chapitre VII

Interprétation et exploitation des résultats expérimentaux

VII.1.Introduction.....	92
VII.2. Programme d'essai.....	93
VII.3 Essais sur sable seul.....	94
VII.4. Essais avec des inclusions de renforcement.....	97
VII.5 Essais particuliers	108
VII.6.taux de l'effet de réduction de la poussée.....	122
VII.7.Conclusion	124

Chapitre VIII

Méthode d'homogénéisation

VIII.1.Introduction.....	126
VIII.2.Méthode d'homogénéisation numérique.....	127
VIII.3. .Méthode d'homogénéisation analytique	128
VIII.4. .Méthode d'homogénéisation appliquée aux sols renforcés.....	129
VIII.5.Présentation géométrique du domaine de résistance dans l'espace des contraintes.....	138
VIII.6.Conclusion	140
VIII.7. Calcul et étude de la stabilité d'un talus 'cas de Bousmail' « Utilisation de la méthode d'homogénéisation ».....	141

VIII.8. Calcul des caractéristiques mécaniques du remblai renforcé 147

VIII.9. Observation et comportement 151

VIII.10. Conclusion..... 153

Conclusion générale 154

Bibliographie 158



Tableau.II.1.Dimensions des différents types de pneumatiques.....	24
Tableau.III.1.Réalisations par la technique Pneusol en Algérie.....	49
Tableau.III.2.Réalisations en Pneusol en France.....	50
Tableau.III.3.Réalisation en Pneusol à travers le monde 1984-2005.....	52
Tableau.V.1.Caractéristiques du matériau utilisé.....	70
Tableau.V.1.Programme d'essais.....	80
Tableau.VI.1.Classification des ouvrages de soutènement d'après.....	82
le mode de reprise de la poussée	
Tableau.VI.2.Classification des techniques de renforcement suivant	85
les éléments de renforcement utilisés	
Tableau.VI.3.Efforts majeurs dans les inclusions pour différentes techniques.....	86
de renforcement des sols	
Tableau.VII.1.Programme d'essais.....	92
Tableau.VII.2.Relation déplacement du mur en fonction de la hauteur de remblai....	104
Tableau.VII.3.Tableau comparatif du point d'application de la force de poussée.....	105
Tableau.VII.4.Tableau comparatif du point d'application selon plusieurs auteurs.....	106
Tableau.VII.5.Valeurs de "a" en fonction de l'espacement et l'état du massif.....	110
Tableau.VII.36.Taux de réduction de la poussée en fonction de l'espacement "e"	120

Photo.III.9.Utilisation en gabion des pneus entier.....	37
Photo.III.10.Stabilité d'un talus – Cas de BOUSMAIL.....	38
Photo.III.11.Stabilité d'un talus – Cas de Mostaganem.....	38
Photo.III.12.Mise en place d'un massif en Pneusol au sur l'accotement..... d'une chaussée classique	39
Photo.III.13.Section d'une route en technique Pneusol.....	39
Photo.III.14.Autre technique 'l'asphalt caoutchouté'.....	40
Photo.III.15.Autre technique 'mur anti-bruit'.....	41
Photo.III.17.Protection contre les glissements de terrain en grande masse.....	41
Photo.III.18.Séparateurs en béton et en pneusol.....	42
Photo.III.19.Essai de choc frontal sur un séparateur de trafic en pneusol.....	42
Photo.III.20.Support pour Panneau de signalisation Boufarik'.....	43
Figure.III.1.Comportement mécanique du pneusol.....	43
Photo.III.21.Pneus avec flancs	45
Photo.III.22.Pneus sans flancs.....	47
Photo.III.23.Système d'attaches en lanière.....	47
Photo.III.24.Crochets en plaque d'acier	47
Photo.III.25.Attaches en crochets métalliques.....	48
Photo.III.26.Exemple d'attaches en cordelette de nylon- cas de Mostaganem.....	48
Figure.IV.1.Schéma d'étude d'un phénomène de comportement.....	56
Figure.IV.2.Relation contrainte déformations des matériaux	59
Photo.IV.1.Centrifugeuse du LCPC	61
Figure.IV.3.Comparaison de k_p en fonction..... de H quelques modèles caractéristiques	62

Figure.IV.4.Décroissance de l'effort de poussée avec le rapport L / H	63
d'après LAZEBNIK ET CHERNYSHEVA (1968)	
Figure.IV.5.Hauteur de rupture en fonction de L dans un massif de terre armé	64
d'après LAREAL et BACOT (1973).	
Figure.IV.6.Influence de rapport H / L sur K_{ay} d'après BRANSBY	65
et SMITH (1975)	
Photos.V.1.Modèle Réduit E.N.T.P d'expérimentation du Pneusol.....	67
Figure.V.1.Vue d'ensemble du modèle (ENTP).....	68
Figure.V.2.Ecran central de mesure.....	69
Figure.V.3.Chaîne de mesure.....	70
Photos.V.2.Dispositif de mesure.....	70
Figure.V.4.Couronne de pneu à l'échelle 1/20.....	71
Photos.V.3.Disposition orthorhombique.....	71
Photos.V.4.Disposition en file (normale).....	72
Figure.V.5.Disposition orthorhombique.....	72
Figure.V.6.Disposition en file	72
Figure.V.7.Mode opératoire et Mise en place d'inclusion de renforcement.....	72
Photos.V.5.Vu d'ensemble des nappes utilisées – cas des murs à redans.....	73
Figure.V.8.Principe de mesure pour l'essai de traction des couronnes.....	74
Photos.V.6.Dispositif pour l'essai de traction des couronnes.....	74
Figure.V.9.Variation du déplacement en fonction de l'effort.....	75
Photos.V.6.Dispositif pour l'évaluation du modèle de Young de l'écran en bois.....	75
Figure.V.10.Dispositif pour l'évaluation du modèle de Young de l'écran en bois.....	76
Figure.V.11.Variation de DL en fonction de F	77
Figure.V.12.Essai d'arrachement des inclusions de renforcement.....	78

Photo.V.11.Dispositif d'arrachement du bâti	78
Photo.V.12.Développement de surface de rupture.....	78
Figure.VI.1.Modes de rupture des ouvrages de soutènement.....	83
Figure.VI.2.Sollicitations exercées sur un mur de soutènement.....	87
Figure.VI.3.Cinématique d'un écran de soutènement rigide et..... du terrain environnant	88
Figure.VII.1.Courbe de référence : déplacement en pied de l'écran $DP=f(H)$	93
Figure.VII.2.Courbe de référence : déplacement en tête de l'écran $DT=f(H)$	93
Figure.VII.3.Courbe de référence : effort en tête de l'écran	94
Photo.VII.1.Renversement 'Ruine du mur'	94
Figure.VII.4.Schéma de calcul de la hauteur de renversement.....	95
Figure.VII.5.Hauteur en fonction du déplacement pour le cas du sable seul..... (Résultats I.N.S.A Lyon)	96
Figure.VII.6.Courbes comparatives : déplacement en pied de l'écran	97
Figure.VII.7.Courbes comparatives : déplacement en tête de l'écran	97
Figure .VII.8.Courbes comparatives : effort en tête de l'écran.....	98
Figure .VII.9.Disposition en file	99
Figur.VII.10.Disposition orthorhombique.....	99
Figure.VII.11.Courbe comparative : mode en disposition en file..... et orthorhombique	100
Figure.VII.12.Courbe comparative : mode en disposition en file..... et orthorhombique	100
Figure.VII.13.Courbe comparative : mode en disposition normale..... et orthorhombique	101
Figure.VII.14.Variation des déplacements de l'écran en fonction	102
de la hauteur du remblai	
Figure.VII.15.Variation des déplacements de l'écran en fonction.....	102
de la hauteur du remblai	
Figure.VII.16.Variation des déplacements de l'écran en fonction	103
de la hauteur du remblai	

Figure.VII.17.Variation de la hauteur en fonction de l'espacement pour un déplacement fixe.	104
Figure.VII.18.Courbe comparative du point d'application de la force de poussée.....	106
Figure .VII.19.Courbe de relation effort-allongement d'une couronne.....	107
Figure.VII.20.Traction des nappes dans le remblai H=5cm.....	108
Figure.VII.21.Développement du prisme de rupture.....	109
Figure.VII.22.Valeurs expérimentales $a=f(e)$ du développement..... du prisme de rupture à la surface du massif	110
Figure.VII.23.Développement en surface des prismes de rupture.....	111
Figure.VII.24.Valeurs expérimentales $a=f(e)$ du développement du prisme de rupture à la surface du massif	111
Figure.VII.25.Ligne de glissement observée à la surface d'un massif de sable lâche sur modèle réduit (BOURDEAU 1977)	112
Figure.VII.26.Observation par rayon X (ROSCOE 1963).....	113
Figure.VII.27.Résultats stéréophotogrammétriques obtenus sur rideau de palplanches (F. MASROURI 1986)	113
Figure.VII.28.Détermination des lignes de glissement avec des colonnes..... de sable coloré.	114
Photo.VII.2.Observation du prisme de rupture au sein du massif sans inclusions de pneus.	115
Photo.VII.3.Observation du prisme de rupture au sein du massif avec..... inclusions de pneus (Cas des inclusions en nappes sans attaches)	115
Photo.VII.4.Observation du prisme de rupture au sein du massif avec inclusions de pneus.	116
Figure.VII.29.Vue en plan du relevé et des coupes effectuées au sein du massif.....	116
Figure.VII.30.Evolution du cône de rupture à la surface du massif.....	117
Figure.VII.31.Evolution du cône de rupture au sein du massif.....	117
Figure.VII.32.Ligne de rupture observée par TCHENG (1975).....	118
Figure.VII.33.Lignes de rupture observées par JAMES et LORD (1972).....	118
Figure.VII.34.Comparaison de la ligne de rupture observée avec la position des points de rupture des armatures.	119
Figure.VII.36.Taux de réduction de la poussée en fonction de l'espacement..... entre nappes des couronnes	121

***INTRODUCTION
GENERALE***

Devant les besoins sans cesse croissant des ressources en matériaux et aux exigences et conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous produits industriels notamment dans le domaine des travaux publics.

Cette démarche consiste évidemment à développer et appuyer l'utilisation de ce déchet industriel dans les divers travaux de génie civil ce qui contribuera d'une part, à la préservation de l'environnement, et d'autre part, à la réduction des coûts induits par l'utilisation des matériaux de plus en plus rares notamment dans certaines régions du pays.

En effet, les pneumatiques usagés constituent à eux seuls la presque totalité des déchets de caoutchouc (Stockage et Protection de la couche d'ozone), leur récupération et leur valorisation constituent pour notre pays un impératif économique.

Par l'intermédiaire de la technique Pneusol (pneu+sol), l'ingénieur est appelé à réutiliser ces déchets techniquement et économiquement intéressant dans un certain nombre de domaines du génie civil (renforcement des sols, absorbeur d'énergie, répartiteur de contraintes, remblai léger, protecteur des berges et des fond des canaux....etc.)

En effet, le Pneusol est une technique développée par le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France) avec laquelle l'ingénieur est appelé à réutiliser ces déchets techniquement et économiquement intéressant dans un certain nombre de domaines du génie civil (renforcement des sols, absorbeur d'énergie, répartiteur de contraintes, remblai léger, protecteur des berges et des fond des canaux....etc.)

Le développement actuel de ce matériau avec plus de 280 ouvrages réalisés à travers le monde dont 17 ouvrages en Algérie, nous permet d'envisager son avenir pour plusieurs raisons :

- ◆ Il est économique et donc extrêmement compétitif vis-à-vis des matériaux traditionnels ;
- ◆ Il est facile à mettre en œuvre et ne demande pas des compétences particulières ;
- ◆ Les pneus usagés sont des déchets encombrant et facile à les trouver.

A l'heure actuelle, aucune méthode de calcul satisfaisante ne permet de dimensionner ce type d'ouvrage renforcé par des inclusions en pneumatiques usagés, ces insuffisances nous ont incités à effectuer une campagne expérimentale sur modèle réduit.

Les essais réalisés ont donc essentiellement pour but de caractériser ce matériau, afin d'étudier l'influence d'un certain nombre de paramètres sur l'évolution des efforts mobilisés en poussée tridimensionnelle, et en essayant de mettre en évidence une principale qualité : Son pouvoir d'améliorer les caractéristiques d'un sol afin de réduire la poussée derrière un mur de soutènement.

Nous tentons dans cette étude d'apporter une contribution principalement dans l'étude d'un mur de soutènement dans le but de réduire principalement la poussée qui se développe au sein du massif derrière le mur et en vue de la valorisation des pneumatiques usagés. Ces derniers sont à faible coûts, il serait souhaitable de créer un système de collecte d'une manière à faciliter son tri et surtout son exploitation pour intégrer ce matériau d'une façon rationnelle dans le domaine des travaux publics

Le travail réalisé est rapporté dans ce mémoire dans trois volets :

Dans la 1^{ère} partie, organisé en trois chapitres, on présente une recherche bibliographique relative aux différents aspects du thème adressé.

Le chapitre I retrace l'impact des pneumatiques usagés non rechapable [PNUR] sur l'environnement et leurs principales caractéristiques (mécanique, chimique et géotechnique).

On traite dans le chapitre II, la question de valorisation des pneumatiques usagés. Et on expose dans le chapitre III, le Pneusol avec son avantage, ses domaines d'utilisations, son comportement ainsi que les réalisations qui ont été conçu à travers le monde.

Dans la 2^{ème} partie, qui comporte ainsi trois chapitres, on rapporte les détails de l'expérimentation sur modèle réduit, les essais effectués au niveau du laboratoire de l'ENSTP et un bref aperçu sur le principe de fonctionnement des murs de soutènements.

Tout d'abord on expose dans le chapitre IV, les modèles réduits d'une manière globale et générale : leurs fonctions principales, leurs avantages et inconvénients ainsi qu'un aperçu sur la loi de similitude et l'effet d'échelle.

Par la suite, on présente dans le chapitre V, notre modèle réduit utilisé dans la campagne expérimentale ainsi que les techniques et les dispositifs utilisés pour cette étude, et on présente aussi l'identification les matériaux utilisés et les protocoles d'essais qu'il faut en justifiant les critères de choix adoptés.

On entame dans le chapitre VI, les murs de soutènements tout en essayant de donner quelques notions relatives à ces ouvrages.

Dans la 3^{ème} partie, une interprétation est entamée sur les résultats obtenus à partir d'un programme d'essai très riche.

Dans le chapitre VII, on traite directement les résultats obtenus tout en faisant une interprétation très détaillée entre principalement l'utilisation d'un remblai normal et un remblai renforcé par des inclusions par des nappes en pneumatiques usagés afin d'apprécier la réduction importante de la poussée.

En dernier dans un chapitre particulier (chapitre VIII), nous donnons les bases et quelques aspects fondamentaux de la théorie d'homogénéisation, en phase élastique linéaire, basant sur le calcul à la rupture. Comme cette théorie demande une étude très approfondie appliquée au cas d'un mur de soutènement (qui serait souhaitable de le faire comme une autre recherche à la suite de ce travail de magister), nous traitons à titre d'application un cas réel d'un talus renforcé par des inclusions en pneumatiques usagés placées en nappes afin d'illustrer et de voir l'importance de cette théorie.

Enfin une conclusion générale est donnée à la fin de ce mémoire.

Les bons résultats des recherches, une mise en œuvre facile, un comportement excellent dans le temps, font du Pneusol un bon matériau de génie civil.

L'idée de la valorisation des pneumatiques usagés constitue actuellement la priorité principale. En effet le pneu usagé est un déchet encombrant, mais qui peut devenir très utiles, en effet le génie civil offre de nombreuses possibilités d'utilisation des pneus usagés, en les valorisant en matériau de construction aux propriétés originales et très utiles.

Malgré qu'actuellement la connaissance parfaite du comportement de ce matériau ne soit pas atteinte, il reste cependant un matériau d'avenir, et ce pour plusieurs raisons:

- ✓ L'intérêt écologique, vu qu'il débarrasse la nature d'un déchet encombrant, polluant et non biodégradable.
- ✓ L'amélioration des propriétés mécaniques du sol.
- ✓ La mise en œuvre facile et rapide et ne nécessitant ni main d'œuvre ni machinerie spécialisées.
- ✓ Le coût très compétitif par rapport à celui des autres techniques de renforcement.



1^{ère} Partie

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION

La question des déchets ne se réduit pas à un problème logistique (Effectivement, comment éliminer la masse de déchets produits ?). En effet elle traduit nos choix de développement et illustre la non-durabilité du modèle économique actuel. Une véritable réduction à la source des déchets ménagers induit de nouveaux modes de production, de distribution et de consommation.

L'objectif fondamental est la prévention ainsi que la réduction de la production des déchets ménagers de plus elle est assimilé avec pour corollaire la responsabilisation de chacun et la maîtrise des coûts.

Vu l'importance sur la protection et la conservation de l'environnement, nous traitons dans ce chapitre quelques aspects des dangers et déséquilibre dû aux déchets et en particulier les pneumatiques usagés. Avant d'introduire la notion des pneumatiques usagés et leurs valorisations, nous donnons un aperçu qui nous paraient très important sur l'environnement dans ce contexte, car actuellement le monde a pris conscience sur la protection de notre environnement surtout les derniers accords de kioto et de lisbonne.

I.2. ÉTAT DES LIEUX

La production des déchets ménagers est rapide et constante : nous produisons plus d'un kilogramme de déchets par personne et par jour. D'une production organique (déchets alimentaires), nous sommes passés à une production complexe (produits en fin de vie et emballages). Les matériaux sont de plus en plus complexes (plastiques, matériaux composites) et leurs éliminations incluent des risques pour la santé et l'environnement.

Les déchets peuvent être fermentescibles (alimentaires, déchets verts), recyclables (verre, certains plastiques...), combustibles produisant de l'énergie (bois...), voir même dangereux (en eux-mêmes ou par leurs éliminations).

L'impact environnemental de ces déchets augmente avec la quantité produite et leurs complexités et toxicités. Cela concerne surtout :

- ⊗ La logistique de transports et ses impacts ;
- ⊗ L'enfouissement (impact sur les eaux souterraines) ;
- ⊗ L'incinération (rejets toxiques).

La protection et la conservation de l'environnement, nous guide vers les différents aspects des dangers et déséquilibre du aux déchets et en particulier les pneumatiques usagés.

On notera que l'utilisation des pneumatiques usagés dans le domaine du génie civil permet de faire une résorption importante de ces déchets tant encombrants et en même temps résoudre des problèmes de stabilité ou de portance et même de protection de certains ouvrages.

I.3. L'ENVIRONNEMENT

Cette modeste présentation a été exposée vue l'importance donner à l'environnement actuellement avec une prise de conscience un peu tardive qu'on essaye de réparer à travers pratiquement toutes la planète.

I.3.1. Les aspects du danger menaçant l'environnement

Le climat de notre planète a beaucoup changé dans ce XX^{ème} siècle, comme jamais au paravent, et si on ajoute à cela les rapports alarmants établies chaque année sur l'état de la couche d'ozone, le réchauffement de la terre, et, comme celui élaborer par la National Climate Data Centre (Etats-Unis), qui ont découvert au cours des vingt-cinq dernières années un réchauffement qui a pu atteindre un record de deux degrés Celsius par siècle qui peut conduire à des dégâts non prévus et même difficiles à résoudre.

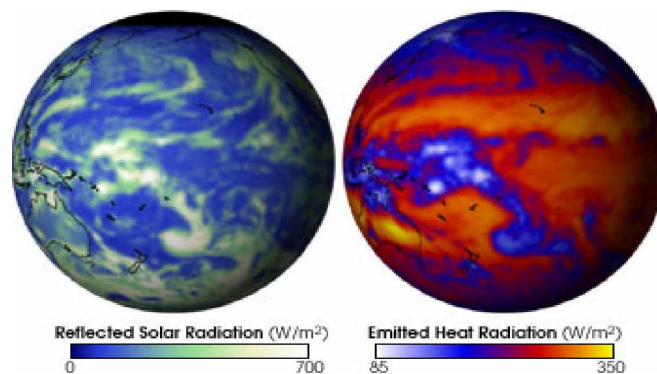


Photo.I.1.Radiation solaire réfléchi et chaleur émise par la terre

A titre d'exemple et d'information, nous avons sur la photo précédente, les mesures du système "Clouds and the Earth's Radiant Energy System" (CERES) montrent la radiation solaire réfléchi (à gauche) et la chaleur émise par la Terre (à droite) le 1^{er} janvier 2002. Sur les deux images, les zones les plus claires représentent les gros nuages qui bloquent la radiation solaire et la chaleur sous forme d'infrarouges émis par la Terre.

I.3.2. L'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel connu qui régule la température de la terre. L'atmosphère capte la chaleur du soleil. Sans effet de serre, la température moyenne à la surface de la terre serait de -18°C, au lieu des 15 °c actuellement. Ces gaz maintiennent dans l'atmosphère la radiation infrarouge de la Terre et participent à l'élévation de la température. C'est le principe de l'effet de serre.

Les gaz à effet de serre ont augmenté dans l'atmosphère parce qu'ils ont été émis par l'homme: on parle d'émissions anthropiques.

Le CO₂ engendre 55% de l'effet de serre anthropique (ESA) et provient pour l'essentiel de la combustion des énergies fossiles, et de certaines industries et de la déforestation en zone tropicale. [Un rapport du 26/10/04 de l'Agence Internationale de l'Énergie prévoit une augmentation des rejets de CO₂ de 39% d'ici 2010 ; 2002 : 24,1% - 2005: 25,58% - 2010: 28,4% - 2012: 29,38% - 2032 : 43,65%]

Le CH₄ engendre 15% de l'effet de serre anthropique. Le méthane est un gaz qui se forme dès qu'un composé chimique (animal, végétal) se décompose. Les réserves de gaz naturel se sont formées par décomposition, il y a très longtemps. Mais l'homme y ajoute sa part : élevage des animaux, culture du riz, décharges d'ordures ménagères, exploitations pétrolières et gazières.

Les halos carbures (exemple CFC) engendrent 15% de l'effet de serre anthropique: utilisés comme gaz réfrigérants (climatisation, chaîne du froid) et dans certains procédés industriels (fabrication de mousses plastiques et de composants électroniques).

Le protoxyde d'azote, NO₂, engendre 5% de l'ESA : utilisation d'engrais et procédés chimiques. L'ozone, O₃, engendre 15% de l'ESA: dans la couche la plus basse de l'atmosphère, c'est l'un des composants de la pollution locale (conséquence du transport)

Cela ne doit en aucun cas nous rendre fataliste car nous pouvons encore atténuer l'impact du réchauffement futur en réduisant dès maintenant nos émissions de gaz à effet de serre en minimisant tout produit alimentant ce phénomène en commençant bien sûr par les déchets.

Les évolutions réglementaires en matière de déchets devraient avoir un impact sur l'ensemble des technologies de la chaîne de collecte et de traitement des déchets. L'une des premières concerne nos futurs rejets de gaz à effet de serre; de cette quantité maîtrisée ou non, résultera le climat de demain.

En espérant une prise de conscience et une prise en charge du phénomène du traitement des déchets et la protection de l'environnement. Nous traitons de notre côté et dans notre domaine une manière de récupérer un déchet qu'est le pneumatique usagé.

I.4. LES PNEUMATIQUES USAGES

Les Pneumatiques Usagés ' PU ' ne sont pas des déchets dangereux. Mais leur stockage aérien non contrôlé peut constituer une source de nuisances (esthétique, développement de larves, de moustiques, de rongeurs...) et présente des risques potentiels d'incendie et donc de pollution et de sécurité. S'ils sont déposés en vrac, leur densité étant faible, leur volume est important. D'autre part, leur transport est coûteux et leur mise en décharge est consommatrice d'espace très important, en effet à titre d'exemple certaines entreprises Algériennes n'ont plus d'espaces dans leurs parcs à cause du stockage important de pneus usagés.



Photo.I.2.Exemple de décharge sauvage à El Harrach

I.4.1. Déchet pneumatique

La préoccupation de l'homme pour la protection de son environnement devant l'agressivité de l'effet de serre est un engagement important pour les générations futures puisque il est considéré comme une source importante d'alimentation des différents aspects de pollution.

Leurs décharge non respectée dans des endroits non autorisés, exposé en air, abandonné dans la nature permettant d'entraîner une démolition de la beauté de la nature mais aussi la création d'un terrain fertile pour les moustiques et la vermine (réservoir de différent parasite) à cause de mauvaise circulation d'eau ; leurs déchargement sur le sol provoquent une instabilité et changement des caractéristiques physiques et mécaniques.

Ces derniers une fois brûlés ; dégagent des fumées hautement dangereuses, par leur teneur en gaz toxique, causant ainsi chaque année des maladies et des allergies.



Photo.I.3.Fumée toxique qui se dégage en brûlant des pneus

Les épaisses fumées se répandant dans l'atmosphère en cas d'incendie peuvent causer beaucoup de maladie respiratoire.

Malgré tous les inconvénients que les pneus usés possèdent, ils ne sont pas catégorisés comme déchets toxiques ou dangereux, car ils ne sont pas biodégradables, mais sont nuisibles pour l'environnement.

Selon les derniers sondages, environ 20.000 tonnes de déchets confondus sont stockées sur la décharge de Oued Smar en une semaine, ce qui revient à presque un million de tonnes par année, seulement 15% de ces déchets sont brûlés, et le reste est incinérés sur place, ce dernier est inflammable par sa teneur en eau, et si on admet que un Kg donne un m³ de gaz de combustion, cela revient à admettre que chaque années 150.000.000 de m³ de gaz de combustion est libéré dans l'air. Et sachant que la décharge de Oued Smar est située à 13Km d'Alger, on comprend bien l'intérêt de réduire ces déchets et de les recycler.

D'une manière globale et selon une étude statistique estimative du gisement des pneumatiques usagés en Algérie, le tableau suivant donne un aperçu sur les quantités de pneus usés générés par an.

Tableau.I.1. Quantités de pneus usagés générés par an en Algérie [Trouzine, 2008]

Types de pneus		Pneus/an	Tonne/an	Pneu/personne/an
Véhicule Léger	VL	1 107 410	7 966.97	-
Poids Lourds	PL	332 104	17 951.53	-
Total		1 439 514	25 918.50	0.0413

Notons que 1 tonne PUNR = 139 pneus type VL = 18.5 pneus types PL = 2m³ pneus broyés.

- ◆ 385 000 pneus usagés pour l'année 1990
- ◆ 546 000 pneus usages pour l'année 1995
- ◆ 656 000 pneus usagés pour l'an 2000
- ◆ 1 million de pneus usagés pour l'an 2002
- ◆ 1.5 million de pneus usagés pour l'an 2004



Un autre paramètre important est à signaler; le nombre de véhicule a augmenté considérablement ces trois dernières années. Le nombre par famille passe de 1 à 2 véhicules, ce qui va augmenter ainsi considérablement le nombre de pneus usagés.

Il est aussi à noter, comme cité au paravent que beaucoup d'entreprises, de sociétés ou collectivités trouvent des problèmes énormes pour se débarrasser de ces pneus usagés, faisant ainsi de leurs parcs des zones de stockage et de décharge.

◆ Europe : jette chaque année 2.5 millions de tonnes de pneus usagés par an.

◆ France : jette 450 000 tonnes de pneus usagés/an (6.8% par an)



Actuellement, on se base sur les principes suivants :

- ① Il est interdit d'abandonner ou de brûler des pneus dans la nature.
- ① La valorisation est préférée à la destruction.
- ① Tout pneu neuf vendu de quelque façon que ce soit, doit être valorisé.
- ① Dans la limite des tonnages de leurs ventes de l'année écoulée, les producteurs doivent collecter puis traiter à leurs frais, les pneus usagés qui sont détenus par les distributeurs ou présents dans les entreprises et collectivités locales détentrices.
- ① Les producteurs peuvent se regrouper pour assumer collectivement leurs obligations.

I.4.2. L'analyse du cycle de vie d'un pneu

L'analyse du cycle de vie d'un produit facilite ainsi l'identification des impacts sur l'environnement et la responsabilité des différents acteurs impliqués, à toutes les étapes de la vie de ce produit. A titre d'exemple, c'est à partir d'une telle analyse que certains producteurs (comme Michelin) de pneumatiques, ont pu définir les priorités suivantes:

- pour préserver l'environnement dans la production ou l'extraction des matières premières
- pour innover et créer des produits toujours plus respectueux de l'environnement.
- pour renforcer la sécurité et la protection de l'environnement sur ses sites de production.
- pour mieux gérer et valoriser les pneus en fin de vie.

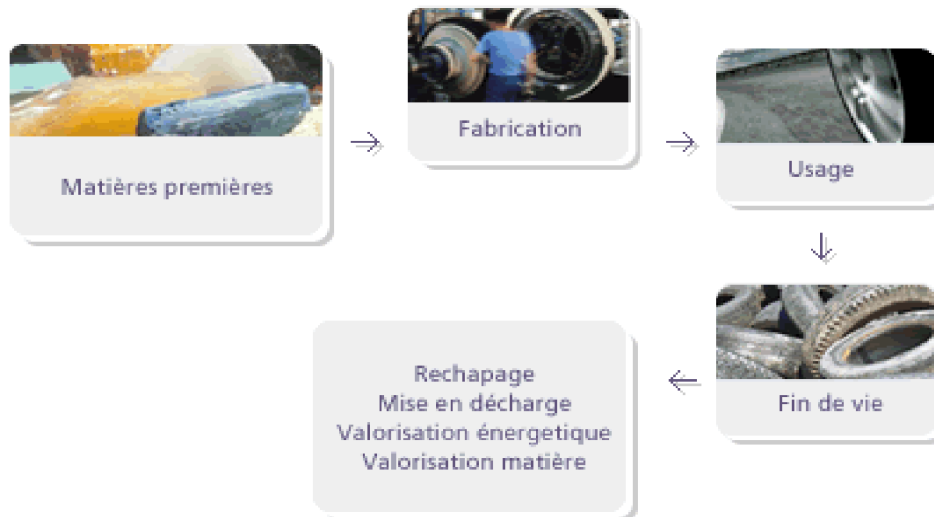


Photo.I.4. Cycle de vie du pneumatique

- Production et extraction de matières Premières:
Diversifier les composants et préserver les ressources naturelles.
- Fabrication du pneu :
Réduire les impacts environnementaux en optimisant la consommation d'énergie, en diminuant les rejets polluants et autres nuisances générées.
- Usage du pneu:
Développer la recherche et proposer des solutions technologiques innovantes permettant d'optimiser l'usage du pneumatique.
- Recyclage et valorisation:
Valoriser les pneumatiques usagés et promouvoir de nouvelles perspectives d'utilisation.

Le critère de durée de service et de vie sera traité dans le chapitre suivant, tout simplement on peut dire qu'un pneu enterré a une durée de vie indéterminée selon les spécialistes de la matière.

I.4.3. Valorisation des pneumatiques usagés

La valorisation des pneumatiques usagés peut se présenter sous plusieurs formes. Actuellement, les nombreuses possibilités de transformation ou d'élimination offertes par le pneu usagé non réutilisable en font un matériau à fort potentiel.

Les chercheurs et les industriels découvrent ses nombreuses qualités : la résistance de sa structure lorsqu'il est conservé en entier, sa souplesse lorsqu'il est transformé en granulat, ou son pouvoir calorifique lorsqu'il est utilisé comme combustible.

A cet effet, vu l'importance de cette valorisation, le chapitre 2 lui est consacré. Nous traitons ainsi les différentes applications possibles.



Photo.I.5. Le stockage et la valorisation.

I.5. CONCLUSION

La préoccupation de l'homme pour la protection de son environnement devant l'agressivité de son appareil industriel, ainsi que l'orientation de ses idées vers l'optimisation des coûts et délais de réalisation de ses projets ont poussé les chercheurs dans le lancement de plusieurs travaux visant à proposer de nouvelles technologies de réalisations.

Effectivement, ce premier chapitre a traité plus particulièrement la partie environnement et les pneumatiques usagés. C'est par l'état de l'art et de la recherche, que plusieurs ingénieurs et chercheurs tentent de trouver des solutions à chaque obstacle qu'ils rencontrent, et ceci dans tous les domaines possibles.

L'idée de la valorisation des pneumatiques usagés constitue actuellement la priorité principale. En effet le pneu usagé est un déchet encombrant, mais qui peut devenir très utiles, en effet le génie civil offre de nombreuses possibilités d'utilisation des pneus usagés, en les valorisant en matériau de construction aux propriétés originales et très utiles.

Enfin, suivant la logique le chapitre suivant traite justement sur la valorisation du pneumatique d'une manière globale.

II.1. INTRODUCTION

Devant les besoins sans cesse croissant des ressources en matériaux et aux exigences et conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous produits industriels notamment dans le domaine du génie civil.

Cette démarche consiste évidemment à développer et appuyer l'utilisation de ce déchet industriel dans les divers travaux de génie civil ce qui contribuera d'une part, à la préservation de l'environnement, et d'autre part, à la réduction des coûts induits par l'utilisation des matériaux de plus en plus rares notamment dans certaines régions du pays.

Enfin a noté aussi que le critère économique nous oblige à nous orienter vers l'utilisation d'un déchet particulièrement abondant, qu'est le pneumatique usagé, qui cause actuellement des problèmes d'environnement (Stockage et Protection de la couche d'ozone).

En effet, les pneumatiques usagés constituent à eux seuls la presque totalité des déchets de caoutchouc, leur récupération et leur valorisation constituent pour notre pays un impératif économique.

La valorisation des pneumatiques usagés concerne principalement les opérations suivantes:

- ✓ Le réemploi
- ✓ Le rechapage
- ✓ Le recyclage
- ✓ L'utilisation comme combustible
- ✓ L'incinération avec récupération d'énergie
- ✓ L'utilisation pour ensilage par des agriculteurs
- ✓ Le broyage ou le découpage uniquement en vue de valorisation.
- ✓ L'utilisation le domaine des Travaux Publics ou de Génie Civil

II.2. VALORISATION DU PNEUMATIQUE USAGE

Qu'est ce qu'un pneu non réutilisable ?

Un pneumatique est déclaré Pneumatique Usagé non réutilisable (PUNR) par les professionnels du secteur lorsqu'il ne remplit plus sa fonction initiale: la mobilité en toute sécurité. Les pneus ont longtemps fini leur vie dans des décharges mais aujourd'hui le pneu usagé non réutilisable (PUNR) fait l'objet d'une meilleure valorisation et différents procédés permettent sa ré-exploitation.

Les pneumatiques usagés constituent à eux seuls la presque totalité des déchets de caoutchouc. Cependant avant d'être considérés comme des déchets, un nombre de pneumatiques usagés fait l'objet d'une valorisation qui peut se présenter sous l'une des formes suivantes:

II.2.1. Valorisation matière.

Cette valorisation se compose principalement de trois cas;

- *Par rechapage*
- *Valorisation par transformation mécanique*
- *Valorisation par transformation chimique*

II.2.1.a. Valorisation par rechapage

Le rechapage est une forme de recyclage hautement pratique et efficace. Il fait en sorte qu'il soit possible de réutiliser des pneus usés. Au lieu de jeter des pneus dont la sculpture est usée, mais dont les flancs sont encore bons, nous les remettons à neuf pour qu'ils puissent à nouveau être utilisés.

Cette technologie consiste à rapporter une nouvelle bande de roulement sur un pneumatique lorsque la précédente a atteint sa limite d'usure alors que le support conserve tout son potentiel. Cette filière est très utilisée pour les poids lourds. Cette technique permet d'offrir au pneumatique une seconde, voire une troisième vie.

De plus, le rechapage est, comme le réemploi, la meilleure valorisation envisageable puisqu'il économise de substantielles importations de matières premières (caoutchouc) et de dériver pétrolier

En Algérie le rechapage se fait très timidement, de plus il n'existe aucun chiffre ou statistique, comparativement à d'autres pays.

II.2.1.b. Valorisation par transformation mécanique

La voie la plus prometteuse est le broyage en vue de l'obtention de poudrettes ou de granulés. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux.



Photo.II.1. Collecte et valorisation mécanique des pneus

- Poudrettes : il s'agit de particules de caoutchouc dont la dimension est inférieure à 2mm. Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. A titre d'exemple la production française est de l'ordre de 16000t/an, dont la moitié est issue de l'industrie du rechapage.



Photo.II.2. Production de la Poudrette

Finement broyé, mélangé ou non avec des polymères synthétiques ou des thermoplastiques, le pneu usagé entre dans la confection d'objets moulés, tels que les roulettes de caddies et conteneurs à déchets, les barrières antibruit, les signalisations et accessoires routiers.

Une autre application prometteuse est l'usage de poudrette dans les enrobés de routes : cette application a fait ses preuves en termes de réduction du bruit de roulement, de réduction du risque d'aquaplaning, et de garantie de durée de vie.

- Granulés : il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques.

Exemple d'utilisation : aires de jeux qui doivent être amortissantes, pavés antidérapants, revêtement pour terrain de sport



Photo.II.3. Différentes utilisations

(Qui consiste à incorporer dans la masse de sable des granulats en caoutchouc compressibles et élastiques, rendant ainsi le mélange plus souple surface souple, diminution des nuisances sonores le principe de base...)

II.2.1.c. Valorisation par transformation chimique

Ils existent plusieurs voies, dont certaines sont relativement anciennes.

- Régénération : elle résulte d'une combinaison d'actions chimiques, mécaniques et thermique. Cette technique a pour but de "casser" les liaisons soufrées et de diminuer la longueur des chaînes de polymères, comme la poudrette, le régénéré abaisse aussi les caractéristiques mécaniques des mélanges et donc limite son emploi.
- Pyrolyse – Thermolyse : l'action de la chaleur en l'absence partielle ou totale d'oxygène provoque une décomposition des polymères. A l'issue de cette réaction, nous retrouvons les monomères d'origine, ainsi que beaucoup d'autres molécules. Le développement industriel de cette solution est cependant freiné par son coût de mise en œuvre.

L'emploi des produits obtenus par transformation chimique ou mécanique, se heurtent aux obstacles bien connus de filière de valorisation, à savoir:

- Réputation de "produits bas de gamme" attachée à l'emploi de matières recyclées,
- L'inexistence de normes et de règlements couvrant les caractéristiques et l'emploi de ces produits nouveaux.
- La concurrence de produits vierges aptes à remplir la même fonction à moindre coût.
- Le nombre restreint d'opérateurs réalisant industriellement et économiquement le broyage.

La réticence des transformateurs à se lancer dans une voie "nouvelle" sans marché clairement identifié.

II.2.2. Valorisation énergétique.

Un pneumatique usagé possède un pouvoir calorifique comparable à celui d'un charbon de bonne qualité : 30 à 34 Mégajoules/kg. Une tonne de pneus apporte ainsi une énergie équivalente à celle produite par 0,7 tonne de pétrole.

La faible quantité de soufre (1 %) contenue dans les pneus par rapport à certains charbons (5 %) en fait un combustible de substitution ayant moins d'impact sur l'environnement.

Les cimenteries, par exemple, grandes consommatrices d'énergie, utilisent les pneus usagés non réutilisables comme combustibles. Le carbone et l'acier contenus dans le pneu se retrouvent incorporés dans le ciment brut. En l'absence de pneu, ces éléments doivent être rajoutés dans le four.

Donc d'une manière générale cette valorisation consiste à produire de l'énergie par combustion des vieux pneus jetés dans les décharges. En effet, le pneumatique, de par son origine polymérique, à un excellent pouvoir calorifique

En Algérie le problème reste posé, la réglementation n'est pas encore claire sur la valorisation énergétique. Les cimenteries Algérienne préfère utiliser du gaz naturel que de la poudrette de caoutchouc.

II.2.3. Valorisation originale dans le domaine du génie civil - un secteur en plein développement-

Dans le processus de valorisation matière, le pneu usagé est employé sous différentes formes :

a- Pneus entiers

Le pneu usagé entier peut être utilisé dans les applications suivantes : remblais de route, ouvrages de soutènement, murs anti-bruit.

L'une des techniques employées est le procédé breveté :

- ① 'Pneusol' qui consiste à superposer des couches de pneus de poids lourds reliés entre eux et remplis de matériaux de remblai. Cette technique permet la réalisation d'ouvrages de soutènement, de remblais légers, d'ouvrages absorbant l'énergie comme protection contre les chutes de blocs, et les répartiteurs de contraintes au dessus des conduites enterrées.
- ① 'Armapneusol' associe pneus, remblai et armatures en nappes de treillis soudés, et la technique 'Pneutex' associe pneus et membranes en géotextile.
- ① 'Pneurésil' consiste à empiler des pneus de poids lourds en colonnes à empêcher le sol courant de remplir les vides créés à l'intérieur et entre les pneus; cette structure, à la masse volumique très faible, peut être utilisée comme soubassement de routes ou comme remblai derrière les culées de pont ou les murs de soutènement.
- ① 'Drainage' l'utilisation de pneus ligaturés entre eux et mis en place sous forme de tube permet le drainage de fossés et de parcelles.
- ① 'Protection de quai' des pneus entiers sont couramment utilisés comme absorbants de chocs le long de quais et de jetées.
- ① 'Ensilage' certaines techniques agricoles utilisent des pneus pour le maintien des bâches d'ensilage.

b- Pneus découpés

La bande de roulement peut être utilisée comme tapis support de voie ferrée pour réduire les bruits et les vibrations.

c- Pneus déchiquetés

Les propriétés drainantes, la compressibilité, la masse volumique faible du produit permettent au déchiqueté de pneus d'être utilisé comme remblai léger dans la construction de routes ou comme sous couches drainantes de centres d'enfouissement technique.

Des applications multiples peuvent être utilisées, nous citerons quelques unes à titre d'exemple :

Le tapis de pneus antivibration

Le tapis de pneus, composé de deux lits croisés de bandes de roulement de pneumatiques, est intercalé entre le ballast et la couche de forme (ou posé sur les tabliers des ponts ferroviaires) pour atténuer les vibrations provoquées par diverses machines, les trains, les tramways, les rames du métro. . .

La construction de récifs artificiels

Immergés à des profondeurs de dix ou vingt mètres, assemblés et lestés à l'aide de blocs de ciment, les pneus peuvent former des récifs artificiels constituant des zones de calme pour la faune marine. Le Japon et les Etats-Unis ont développé une véritable industrie du récif artificiel ; par exemple, en Caroline du Nord, plus de 500.000 pneumatiques ont été immergés entre 1974 et 1977. En France, cinq récifs artificiels ont été construits à Palavas-les-Flots, à Langrune-sur-Mer, à Arcachon-sur-Mer, à Golfe-Juan et à Port-la-Nouvelle.

Mur antibruit ACIAL (1992)

L'ingénieur R.Beyler a proposé un mur antibruit dont la structure absorbante est réalisée avec des pneus usagés enfermés dans un caisson métallique dont une face est perforée de trous. Les essais effectués en 1992 selon les normes AFNOR S 31089 ont donné des résultats supérieurs aux valeurs maximales fixées dans la norme, ce qui classe ce mur antibruit parmi l'un des plus intéressants.

Le Pneusol (1974)

Classé par l'ANRED comme une valorisation originale, le Pneusol est un matériau inventé au Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées et constitué de pneus entiers ou d'éléments et sols naturels ou artificiels ou de déchets. Depuis 1974, plus de deux cent cinquante ouvrages en Pneusol ont été construits. [1]

II.3. CARACTERISTIQUES DES PNEUMATIQUES

Avant de traité le pneusol dans le chapitre suivant, nous passons en revue dans ce qui suit les principaux constituants du pneumatique ainsi que ses caractéristiques.

II.3.1. Principaux constituants d'un pneumatique

Le pneu est un composite, c'est-à-dire un assemblage solidaire de matériaux aux propriétés très diverses dont la confection requiert une grande précision, sa conception est une opération délicate car la technologie employée est des plus complexes.

Ainsi, mieux comprendre comment est composé le pneu permet de mieux analyser le comportement de ce dernier et sont intérêt à être recyclé dans de nombreux domaines.

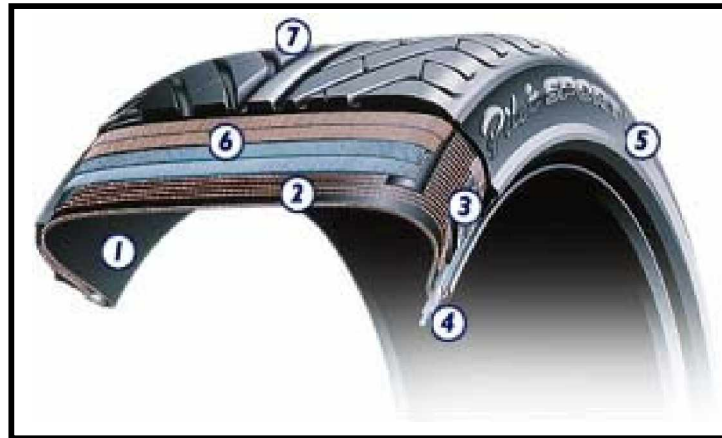


Photo.II.4. Coupe d'un pneu

Composition d'un pneumatique :

① Une feuille d'un caoutchouc synthétique très étanche à l'air : cette feuille va se trouver à l'intérieur du pneu et fera fonction de chambre à air.

② La nappe-carasse : cette carcasse est composée de minces câbles en fibres textiles disposés en arceaux droits et collés au caoutchouc. Ces câbles sont un élément clé de la structure du pneu et vont lui permettre de résister à la pression. Dans une nappe de pneu automobile, il y a environ 1400 câbles qui peuvent chacun résisté à une force de 15 kgf.

③ Un bourrage zone basse son rôle est de transmettre les couples moteurs et freineur de la jante vers l'aire de contact au sol.

④ Les tringles servent à serrer le pneu sur la jante elles peuvent supporter jusqu'à 1800 kg sans risque de rupture.

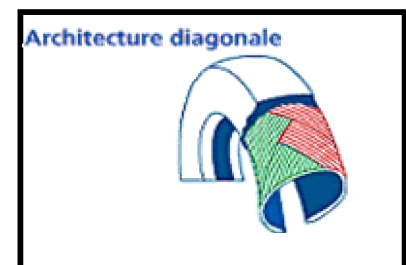
⑤ Les flancs en gomme souple vont protéger le pneu des chocs qui pourraient endommager la carcasse, comme les chocs contre les trottoirs, par exemple. Une gomme dure assure la liaison entre le pneu et la jante.

⑥ Les nappes-sommet, armées de câbles en acier très fins et très résistants, elles sont croisées obliquement et collées l'une sur l'autre. Le croisement de leur fils avec ceux de la carcasse forme des triangles indéformables. Dénommée triangulation, cette disposition assure la rigidification du sommet. Ces nappes, qui ceinturent tout le sommet du pneu, ont un rôle très complexe:

Elles doivent être rigides dans le sens transversal pour résister aux efforts de dérive. Mais elles doivent également être souples dans le sens vertical pour "boire l'obstacle".

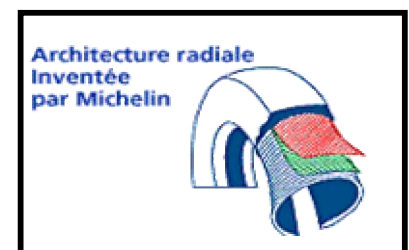
⑦ La bande de roulement est posée par dessus les nappes sommet. Cette partie du pneu, qui recevra les sculptures, sera en contact avec la route. Dans l'aire de contact au sol, la bande de roulement doit pouvoir résister à des efforts très importants. Le mélange qui la constitue doit être adhérent sur tous types de sols, résister à l'usure, à l'abrasion et doit s'échauffer faiblement. [7]

Cette coupe montre la construction du pneu diagonal. Plusieurs nappes textiles sont posées obliquement de tringle à tringle, alternativement dans un sens puis dans l'autre. Le nombre de nappes dépend de la taille du pneu et de la charge portée. L'empilage de nappes est identique au sommet du pneu et dans les flancs.



L'architecture radiale est composée d'une nappe-carcasse formée d'arceaux textiles qui vont de tringle en tringle. Chaque arceau fait un angle de 90° avec la direction de roulement du pneu.

Au sommet du pneu, cette nappe-carcasse est surmontée d'une ceinture sommet constituée de plusieurs nappes armées de câbles métalliques. Ces nappes sommet sont superposées et croisées entre elles selon des angles adaptés à chaque type de pneus. L'empilage des nappes au sommet et sur les flancs est différent pour mieux spécialiser le travail de chacune des parties du pneu. [7]



II.3.2. Caractéristiques générales des pneumatiques

Nous citons ci-après pour mémoire quelques caractéristiques générales du pneu [2]

Humidité :	< 1 % en poids
Métaux lourds :	< 0,1 % en poids (excepté pour le Zn)
Température d'inflammation :	338 ± 8 ° C
Température d'auto inflammation :	465 ± 8 ° C
Pouvoir calorifique :	32-34 MJ/kg

Tableau-II-1- dimensions des différents types de pneumatiques

Poids lourd	Diamètre extérieur	1.10 à 1.20 m
	Diamètre intérieur	0.55 à 0.60 m
	Epaisseur	0.26 à 0.23 m
	Poids	40 à 70 kg
	Densité apparente	12.4 kg/m ³
Tourisme	Diamètre extérieur	0.60m
	Diamètre intérieur	0.30m
	Poids	5 à 6 kg

II.3.3. Caractéristiques mécaniques des pneumatiques

Mécaniquement les pneumatiques (les armatures) doivent être souples pour donner au Pneusol sa caractéristique essentielle de bonne déformabilité, elles doivent par ailleurs supporter des efforts de traction importants et posséder une bonne adhérence avec le matériau de remblai.

Afin de quantifier la résistance mécanique du pneu ou de ses composants, des essais mécaniques ont été effectués sur une presse munie d'un enregistreur d'effort de traction en fonction de la déformation, l'interprétation statique des résultats obtenus donne pour les différentes parties, ce qui suit :

Bandes de roulement : La résistance moyenne à la traction est de 56 KN, dont la probabilité pour que toutes les bandes aient une résistance supérieure à 26 KN est de 90%, elle est de 80% pour une résistance supérieure à 36 KN.

Flancs : La résistance moyenne à la traction est de 25 KN, cela explique que la rupture par mise en traction d'un pneu complet commence par les flancs avant les bandes de roulement.

II.3.4. Caractéristiques physico-chimiques

La matière de base du pneumatique est composée principalement d'élastomère naturel (caoutchouc) ou synthétique (copolymère de styrène-butadiène ou autres issus de la pétrochimie) à laquelle on ajoute des charges (noir de carbone), des plastifiants, des antioxydants et des agents de vulcanisation tels que l'oxyde de zinc ou le soufre.

II.3.5. Caractéristiques géotechniques

Compte tenu du contexte normatif et réglementaire actuel, il existe très peu de données sur les caractéristiques des produits issus des pneus usagés. Le tableau (I-3) donne les caractéristiques mécaniques de la bande de roulement et des flancs des pneumatiques PUNR. Ces caractéristiques ont été déterminées dans le cadre de la réalisation des ouvrages PNEUSOL (Long, 1985).

La masse volumique moyenne d'un pneu entier et du broyat est respectivement de $0,15 \text{ t/m}^3$ et de $0,5 \text{ t/m}^3$.

II.3.6. Filières de valorisation des PUNR

Différentes étapes sont organisées avant l'entrée dans la filière de valorisation : la collecte, le tri, le transport et le stockage ; elles concernent les pneumatiques entiers. Le critère technique de tri entre les PUR et les PUNR porte sur la profondeur de la sculpture et l'intégrité de la structure de l'enveloppe.

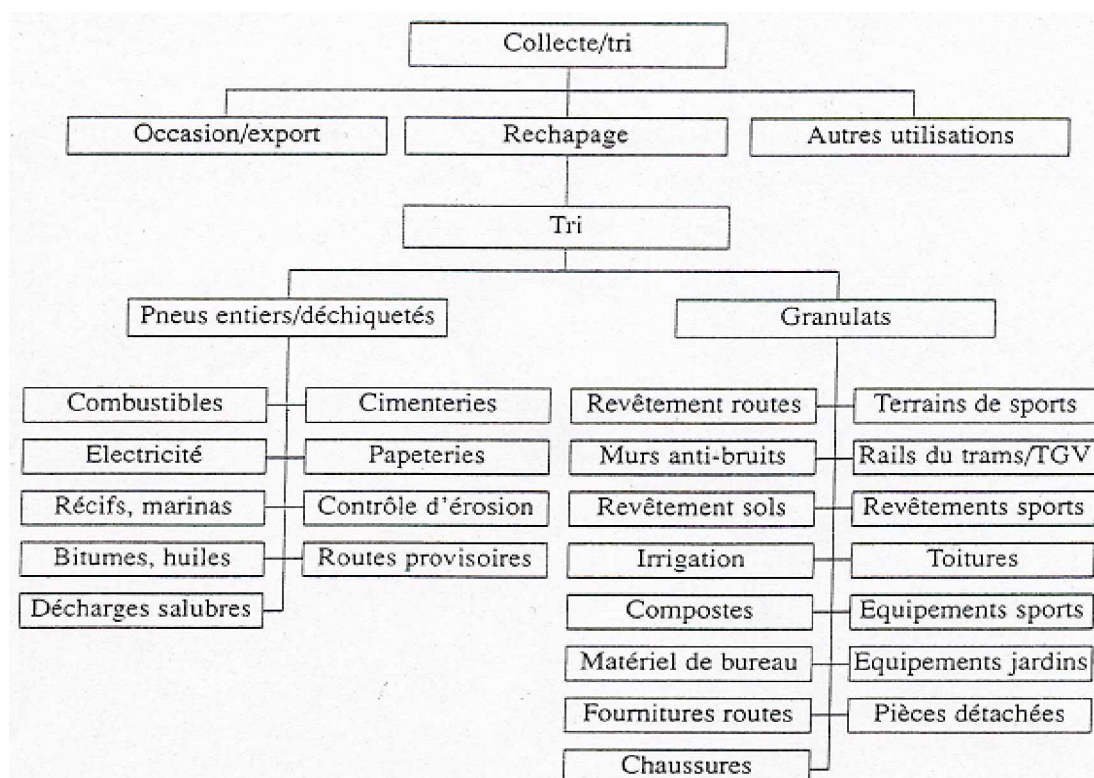


Figure.II.1. Organigramme des différentes filières de valorisation

II.4. CRITERES DE DUREE DE SERVICE

Le vieillissement du caoutchouc des pneus est un phénomène complexe et dépendant de nombreux facteurs. Les plus importants en pratique sont:

La lumière et la chaleur (les rayons ultra-violet): Ces paramètres provoquent une décomposition superficielle, qui se manifeste par un dessèchement du caoutchouc avec apparition de craquelures plus ou moins profondes.

Ce phénomène ne se produit pas quand le pneumatique est complètement enterré. Si le pneu sert de parement et est exposé à la lumière, ces craquelures ne sont pas gênantes car le pneu sert seulement de bac à terre ou de gabion.

D'autre part, dans un remblai, la température moyenne en profondeur varie dans une fourchette relativement étroite (3 à 4 degrés) suivant la teneur en eau du matériau. Près de la surface du sol, elle est beaucoup plus influencée par les variations saisonnières, mais la température la plus grande reste de l'ordre de 15°, température beaucoup plus basse que celle subie par le pneu lors de son utilisation et sans effet sur le caoutchouc.

En cas d'incendie, des dégâts aux pneus de parement restent inévitables, la seule solution envisageable étant de construire un double parement, les pneus ne pouvant brûler dans le sol.

- l'ozone : Le caoutchouc est détérioré par l'ozone dont la quantité est heureusement très faible voire négligeable dans le sol.
- -l'acidité du sol : On sait qu'un acide fort (pH de l'ordre de 1) détruit le caoutchouc. Le pH de l'eau extraite des remblais est assez souvent de l'ordre de 4 ou 5, ce qui montre qu'en général les sols naturels sont relativement peu acides. Mais ce paramètre doit être obligatoirement contrôlé pour les matériaux non courants et pour les déchets, qui doivent d'autre part satisfaire aux exigences de toutes les réglementations sur l'environnement.

K.AB.MALEK et A.STEVENSON ont mis en évidence le bon comportement des pneus dans l'eau de mer. Ils ont en effet effectué des analyses poussées sur des échantillons de pneus se trouvant dans un bateau coulé pendant la seconde guerre mondiale. Quarante deux ans après, toutes les armatures sont restées intactes. Leurs caractéristiques mécaniques n'ont pas bougé. Seule la teneur en eau du caoutchouc a légèrement changé en quelques points du pneu et sur quelques micromètres de profondeur. [1]

II.5. COMPORTEMENT DES PNEUS DANS L'EAU

On peut dire que le caoutchouc brut, ainsi que la gomme ne sont solubles ni dans l'eau, ni dans les alcalis aqueux. C'est pourquoi les pneus et les autres déchets de gomme déposés dans les décharges - conclut un rapport- ne peuvent pas dégager des substances qui pourraient pénétrer dans l'eau de pluie pour polluer ainsi les eaux souterraines. [8]

Notons cependant que l'usure des pneumatiques libère des hydrocarbures polycliques et les additifs du caoutchouc : du cadmiun sous forme de naphatéate et d'octoate, des organostanniques, ajoutés également comme stabilisants du caoutchouc, du soufre, du zinc, remplacé aujourd'hui le plus souvent par des composés de cadmiun.

A cette évaporation s'ajoute le dépôt résultant de la friction des pneus sur les chaussées. Une étude du Ministère de l'Environnement (1983) montre que, pour une autoroute à deux fois deux voies supportant un trafic de 10.000 véhicules/jour, et si l'on fixe la durée de vie d'un train de pneus à 40.000 km, l'usure correspondrait à 2,5 kg/voiture, d'où une production de matière de 0,8 à 1,2kg/km/jour. Cette matière contenant de 1 à 2% d'oxyde de zinc, ce métal serait produit à raison de 6 à 24 g/km/jour.

Toutefois aucun de ces produits n'a été détecté dans la nappe proche des grands axes routiers.

(HENENSAL et BENOIT 1987) MALEK et STEVENSON (1986) ont, comme déjà indiqué mis en évidence le bon comportement des pneus dans l'eau de mer en analysant des pneus neufs immergés pendant 42 ans dans la Manche et qui se trouvent à l'intérieur d'un navire marchand (SS Breda) attaqué pendant la seconde guerre mondiale. Les auteurs ont analysé pour cela différents types de pneus, de camions, tourisme, motos, bicyclettes, en prélevant à différentes profondeurs des échantillons et en les soumettant à de nombreux essais. De plus, aucune attaque microbienne n'a été décelée.

II.6. CONCLUSION

Les pneumatiques usagés sont considérés dans les pays développés comme un déchet encombrant et abondant. On peut les valoriser en matériau de construction aux propriétés originales et fort utiles, offrant un large éventail d'applications, sans doute encore insuffisamment exploré.

Le problème est encore plus grand pour les pays en voie de développement où aucune valorisation n'est pratiquée, où le Pneusol rendrait un grand service à la nature, en même temps résoudrait certains problèmes rencontrés dans le domaine du génie civil.

En Algérie le problème reste posé. Les sociétés les entreprises les différentes administrations des différents secteurs ont un problème de stockage, les pneus usagés sont jetés en pleine nature. Il serait souhaitable de créer des entreprises de collectes de ces pneumatiques, de faire un tri et de les valoriser par réutilisation dans les différents domaines.

L'ENTP, s'est lancé dans cette valorisation depuis 1989 avec une modeste participation sous forme de travaux de recherche (PNR, PRU, axe de recherche, communications ...). Ainsi, qu'une expérimentation à grande échelle à Bousmail et le plus grand ouvrage en Pneusol d'Afrique à Mostaganem en collaboration avec le Ministère des Travaux Publics.

Enfin, dans notre projet nous avons utilisé la technique 'Pneusol' inventé par le L.C.P.C de Paris (1974), classé par l'agence Française pour la récupération et l'élimination des déchets comme une valorisation originale. Cette technique est exposé dans le chapitre qui suit afin d'illustrer notre travail de recherche.

III.1. INTRODUCTION

On entend par le mot « Pneusol » des pneus et des sols pour des ouvrages en terre, tel que le mot « sol » englobe tout aussi bien les variétés de terrains naturels de caractéristiques mécaniques aussi différentes que les matériaux pulvérulents et cohérents, que les déchets divers.

Quand au mot pneu sert à définir tout les éléments du pneu usagé (deux flancs, une bande de roulement) associés linéairement en nappe susceptible de supporter des efforts de traction importants.

Les préoccupations des ingénieurs et des chercheurs et d'obtenir un matériau de génie civil économique non seulement pouvant rivaliser avec les matériaux existants mais aussi qui sert à renforcer les sols d'une manière générale par une inclusion résistante à la traction de façon à rendre ses caractéristiques compétitives.

Par l'intermédiaire du Pneusol, l'ingénieur est appelé à réutiliser ces déchets techniquement et économiquement intéressant dans un certain nombre de domaines du génie civil (renforcement des sols, absorbeur d'énergie, répartiteur de contraintes, remblai léger, protecteur des berges et des fond des canaux....etc.)

III.2. HISTORIQUE DES RECHERCHES

Dans notre travail de recherche, nous avons essayé de retracer d'une manière générale les différents travaux. Les premières recherches ont été réalisées en 1974 par la Délégation Générale Française à la Recherche Scientifique et Technique. De part ailleurs des essais d'adhérence sol-pneumatique ont été réalisés en collaboration entre le Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées de Paris et celui de Clermont Ferrand, qui ont permis de comprendre ce phénomène, en 1982.

D'autres expérimentations ont eue lieu, tel que la réalisation d'un mur expérimental en vraie grandeur de 5 m de hauteur et de 10 m de longueur à Langres, cette construction a démontré la facilité de mise en œuvre des ouvrages de soutènement en Pneusol. Aussi, une piste en Pneusol a été testée au CER de Rouen (1982), mais n'a pas donné les résultats escomptés.

Le premier ouvrage réel (mur de Fertrupt 54m de longueur et 5m de hauteur) n'a été construit que seulement en 1984 soit après deux ans d'observation du mur expérimental de Langres. Vient ensuite la paravalanche de la Grave (1984), le remblai léger de Cannes Mandelieu (1985), le répartiteur de contraintes de Monistrol sur Loire (1985), la protection des berges de Strasbourg (1986) ...

Les premières recherches en Algérie ont été débutées à l'E.N.T.P d'Alger, en 1990, sur le « Pneusol réducteur de poussée », et le « Pneusol antisismique », se basant sur des essais sur modèle réduit.

En 2004 à l'ENTP, un mémoire de fin d'étude a été consacré sur une étude expérimentale et comparative entre le Pneusol et le Géotextile en terme de réduction de poussée, les essais ont été effectués sur modèle réduit, le graphe suivant représente les différentes combinaisons examinées ainsi que les résultats obtenues :

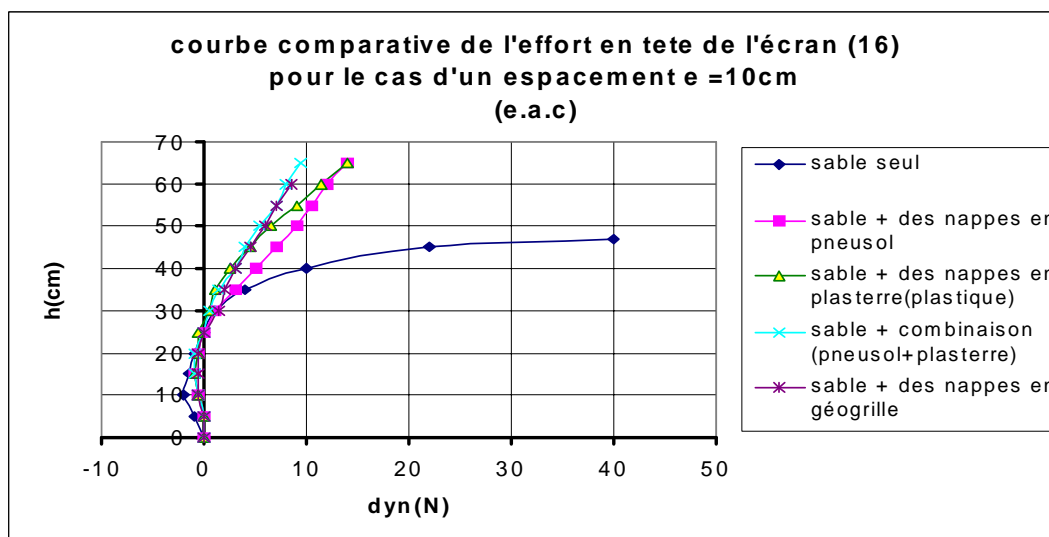


Figure.III.1. Courbe comparative entre les différentes combinaison exécutées.

Il est à signaler que lors de la campagne expérimentale, le mode de fixation des nappes à l'écran central a été tenu en compte :

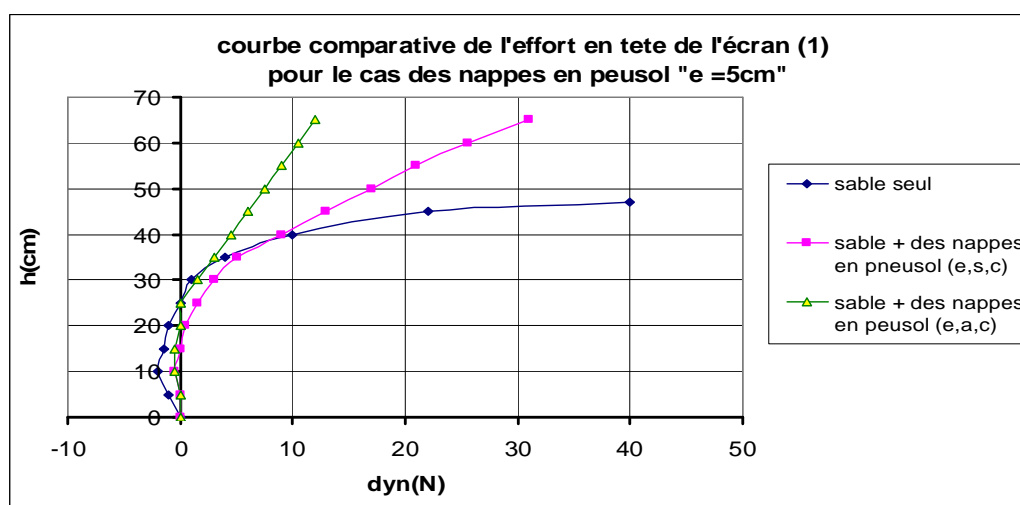


Figure.III.2. Courbe comparative entre les nappes attachées à l'écran(e.a.c) et les nappes non attachées à l'écran de mesure(e.s.c).

La technique du Pneusol a intéressé aussi d'autres universités en Algérie, en cite par exemple l'université de Blida, à travers un mémoire de fin d'étude qui porte sur l'expérimentation en vraie grandeur « Déviation de Bousmail, Stabilité d'un talus en Pneusol ».

Les travaux du projet consistent à la réalisation d'un remblai par la technique Pneusol ; Ce remblai est mis en place au pied d'un grand talus d'une hauteur avoisinant 13 m, plus exactement au PK 8+278 ± 25 m, exécuté dans le cadre des travaux de réalisation de l'évitement de la ville de Bousmail dans la wilaya de Tipaza. Les étudiants ont rapportés tous les étapes de réalisation avec des photos justificatives, ainsi un calcul théorique de la stabilité de ce talus.

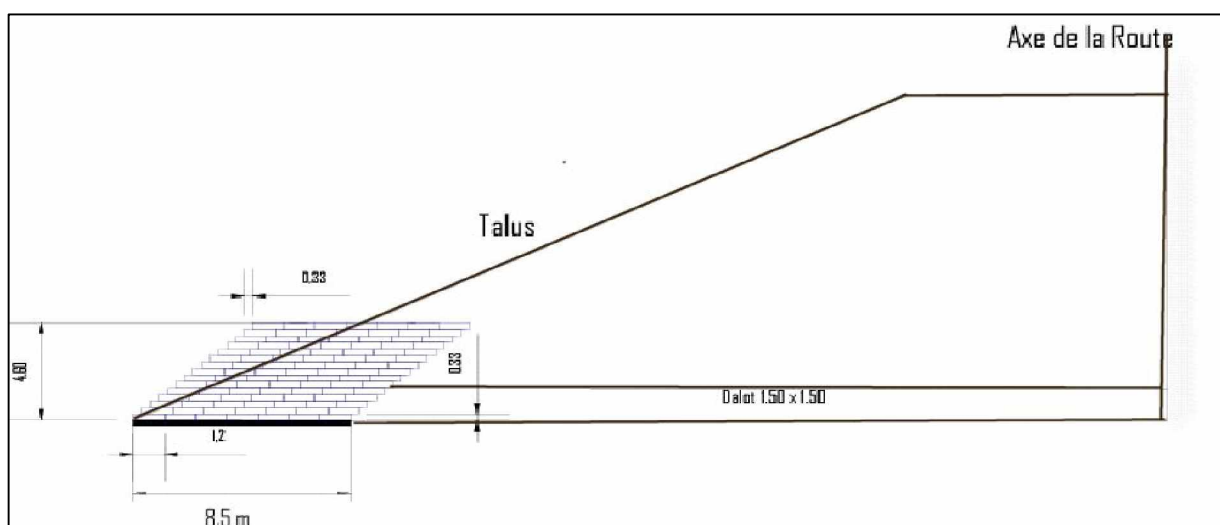


Figure.III.3. Schéma explicatif de la position de l'ouvrage.

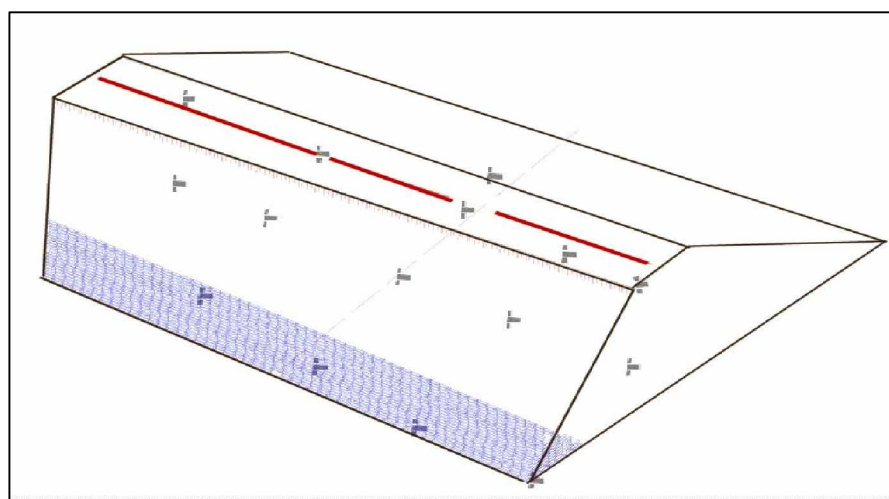


Figure.III.4. Vue en haut de l'ensemble de l'ouvrage.

D'autres expérimentations en vraie grandeur ont été conçues en 2007, sur la RN 11 à Mostaganem « Renforcement et stabilité d'un remblai sous chaussée ».

Nous rappelons encore qu'actuellement, plus de deux cent cinquante ouvrages connus ont été construits en France, dix sept en Algérie, six aux Etats Unis, en Suisse, en Allemagne, en Roumaine, en Jordanie et au Rwanda. D'autres projets en Pneusol sont en vue de réalisation en Pologne, en Hongrie, au Canada.

III.3. AVANTAGES DU PNEUSOL

D'une manière générale, le Pneusol présente l'avantage, outre celui d'aider à la résorption des décharges de vieux pneus, de pouvoir améliorer les propriétés mécaniques du sol soit de manière anisotrope c'est à dire uniquement dans les directions où le matériau est le plus sollicité (nappes, bandes linéaires), soit de manière isotrope dans toutes les directions (chaînes continue d'éléments de pneus ou de pneus entiers vides ou remplis).

L'une des qualités du Pneusol est sa souplesse qui lui permet de supporter des tassements différentiels importants. L'utilisation des pneumatiques en nappes permet, en outre, une meilleure répartition des efforts dans la masse du sol renforcé et sur les fondations, cette qualité essentielle fait du Pneusol un très bon matériau de Génie Civil dont les avantages sont les suivants:

- ◆ Standardisation et rapidité d'exécution.
- ◆ Continuité avec les remblais adjacents.
- ◆ Construction par étapes et par lots.
- ◆ Utilisation d'un matériau de remblai médiocre.
- ◆ Possibilité de construction
- ◆ Murs courbes avec de faibles rayons de courbure.
- ◆ Ouvrages en site terrestre.
- ◆ Ouvrages avec effets architecturaux et amélioration du site.
- ◆ Amélioration de l'environnement par l'utilisation d'un déchet important.
- ◆ Economie d'énergie et remplacement de l'acier par un déchet.
- ◆ Amélioration du compactage.
- ◆ Une grande facilité de mise en oeuvre.

Aussi le Pneusol est un procédé qui a le mérite d'allier les intérêts de la route à ceux de l'environnement et qui économiquement, devrait se révéler compétitif.

III.4. DOMAINES D'UTILISATION DU PNEUSOL

Le Pneusol est utilisé aujourd'hui dans plusieurs cas de figures ou domaines en Génie Civil.

III.4.1. Pneusol 'remblai léger'

Dans certains cas les constructeurs se heurtent à des problèmes délicats dont les solutions sont onéreuses.

Le problème le plus souvent rencontré est qu'on se trouve en présence de sols ayant une faible portance (vases, tourbes, marécage ou pente instable; éboulis).

Le franchissement de tels sols est réalisé avec des fondations profondes très coûteuses. D'autre part un remblai ordinaire subira des tassements insupportables pour les usagers et les ouvrages lui même.



Photo.III.1. Remblai léger en crête de talus

Ainsi la solution idéale consiste en la mise en place d'un remblai léger qui évitera ainsi un apport de charges, de surcharges incompatibles avec la stabilité des sols de fondations tout en réduisant de manière importante le tassement pour un coût acceptable.

III.4.2. Réducteur de poussées

Dix ouvrages connus utilisant le Pneusol comme réducteur de poussée ont été réalisés en France. Ses ouvrages ont été conçus avec un type de Pneusol dit "lourd" avec des bandes de roulement sur chant disposées en nappes et liaisonnées par des bandelettes en polyester. Le remblai se trouvant à l'intérieur de la bande ne poussant pas et celui compris entre deux nappes se trouvant freiné. Le massif Pneusol se comporte comme un mur poids composé de milliers de petits gabions empilés les uns sur les autres, si l'espacement des nappes est faible



Photo.III.2. Réducteur de poussée

III.4.3. Pneusol 'antivibration'

Parmi les nuisances dues aux vibrations et qui se propage vers les bâtiments, on remarque celles transmises au sol par le trafic routier. Les plus importantes sont dues essentiellement aux autobus et aux poids lourds.

Elles sont 10 fois plus élevées que celles générées par les véhicules de tourisme. Les vibrations engendrent sur les structures des ébranlements d'amplitude relativement faibles ($2,5 \cdot 10^6$ cm) mais qui entraînent une certaine fatigue des structures due à leur nombre élevé de cycles et par suite des dommages de celle-ci non négligeables tel que le déversement de route, tassement différentiel et désagrégation des joints de mortier, sans compter les désagréments occasionnés aux habitants voisins de ces grandes voies de circulation.

Des essais de comparaison entre Pneusol léger et un remblai ont mis en évidence l'apport appréciable de la présence des pneus ainsi que la diminution des accélérations mesurées. Cette diminution pourrait s'expliquer par la discontinuité du milieu dues aux vides laissés par la chambre à air qui ne sont pas remplis et du module du Pneusol qui est relativement faible, de l'ordre de 100 bars équivalent à un limon argileux.

Le comportement sismique d'un ouvrage dépend du mouvement sismique imposé par le sol, de la réponse dynamique de l'ouvrage et du comportement des fondations pendant et après le séisme et en fin de la capacité de résistance de la superstructure.

Les caractéristiques géotechniques du sol de fondation ont un rôle primordial sur les trois premiers aspects, leurs études systématiques sont faites par des spécialistes des problèmes sismiques.



Photo.III.3. Site d'essai expérimental de N. T. LONG du Pneusol antisismique

D'une manière générale, on pourrait dire que la solution d'utilisation du pneusol consiste à rendre la structure indépendante des fondations par l'interposition non pas de plaques d'appuis classiques mais d'un certain nombre de chambres à air. Ce dispositif permet un libre déplacement du sol par rapport à la structure.

On notera aussi, que N. T. LONG a cité le travail de GHAFFA-ZADAH (1982) qui ont mis en évidence l'influence de la raideur sur la réponse de l'ouvrage, en effet la fréquence de résonance diminue quand la raideur de l'ouvrage diminue, et ils ont donné aussi comme conclusion qu'un faible module de sol (compatible avec la stabilité de l'ouvrage) donnerait le meilleur comportement de celui-ci.

III.4.4. Pneusol répartiteur de contraintes

De nombreux essais in situ ont été faits en vue de déterminer les caractéristiques du « Pneusol » pour son utilisation notamment comme répartiteur de contraintes.

Tous les constructeurs savent bien que lorsque l'on enterre une canalisation rigide en béton sous de fortes hauteurs de remblais, on constate une très forte concentration des charges à la clé pouvant atteindre deux fois la hauteur des terres.

Le phénomène est dû à un tassement différentiel entre l'ouvrage en terre et le remblai technique environnant. Le Pneusol léger, associé à un conduit rigide permet à celui-ci de se compacter comme un conduit souple qui crée un allègement par la création d'un effet de voûte.



Photo.III.4. Répartiteur de contraintes au-dessus des conduits enterrés sous fortes hauteurs de remblai (Berne et al 1998)

L'introduction du Pneusol dans le corps d'un remblai permet de réduire la charge s'exerçant sur un ouvrage par la formation de voûtes de décharges s'appuyant sur les remblais contiguës.

Cette caractéristique offre la possibilité de construire des ouvrages semi-rigides en béton armé sous des remblais de grandes hauteurs.

III.4.5. Pneusol absorbeur d'énergie

Dans la vie quotidienne, on observe couramment l'utilisation des pneus pour amortir certains chocs. On peut citer les deux exemples souvent remarquables :

- ◆ des pneus entreposés dans les virages difficiles d'un circuit de formule 1, amortissent des sorties non contrôlées des bolides.
- ◆ Le long des quais d'embarquement, les pneus sont suspendus, afin d'amortir le choc des navires.
- ◆ Et comme exemple d'application on cite :
 - ◆ Radiers amortisseurs : constituée par la superposition de plusieurs couches de pneus entiers au dessus des ouvrages existants ou à réaliser pour les protéger contre les chutes des blocs.
 - ◆ Mur absorbeur : il est destiné à arrêter les prismes des roches fragmentées du sommet des talus et des falaises.

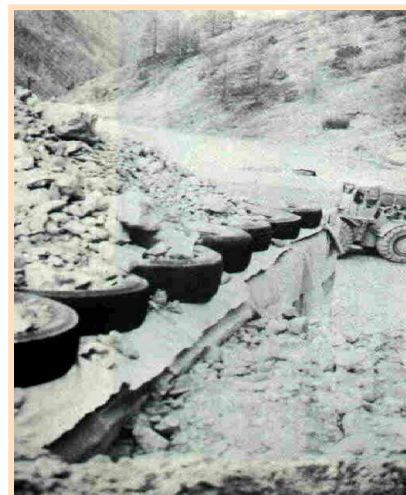
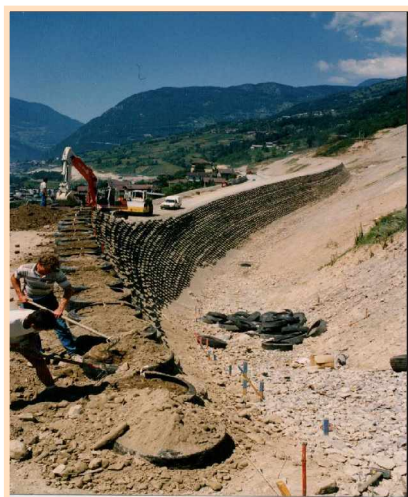


Photo.III.5. Mur de protection contre les chutes de blocs et paravalanches

III.4.6. Protection des pentes et des berges

Concernant les berges; Le passage des bateaux provoque des mouvements de l'eau susceptible d'éroder les berges des rivières et des canaux. L'action de l'eau sur une berge est fonction de la vitesse moyenne et de l'agitation de l'eau à son contact, ainsi que d'éventuelles sous-pressions, pour cela, on peut distinguer deux phénomènes essentiels tels que les ondes et l'abaissement moyen du plan d'eau. Ses ondes qui ont des directions variables pouvant favoriser l'arrachement et l'entraînement des matériaux de la berge.

L'abaissement moyen du plan d'eau a pour effet de créer des sous-pressions dans le sol et de déplacer la tranche intéressée par l'action des ondes sur la berge.



Photo.III.6. protections de la pente et de berge

La solution Pneusol est tout a fait indiquée a cause de son économie par rapport à une solution classique (béton, palplanche, gabion...etc): elle permet un raidissement des berges, de présenter une surface en pente et en fond de canal insensible au batillage, à l'action des remous de l'hélice et à la vitesse de l'eau.

III.4.7. Ouvrages de soutènement

L'ouvrage de soutènement en pneusol, est composé constitué principalement de pneus (pneumatique ou élément pneumatique disposé linéairement ou en nappes selon des lits horizontaux). D'un remblai qui comble les vides laissée et séparant les lits ou les nappes de pneus. Ces remblais ne présentent pas des caractéristiques géotechniques contraignantes. Et enfin, de parement préfabriqué en béton protégeant les « pneus », empêchant le remblai de s'ébouler entre les lits de pneus et pouvant jouer un rôle architectural; s'il n'y'as pas de parement en béton comme dans le cas de raidissement de la pente (pente à 1/2, à 1/3), les pneus non aucun rôle mécanique.

Un tel mur présente plusieurs avantages :

- ◆ Standardisation et rapidité d'exécution
- ◆ Continuité avec les remblais adjacents
- ◆ Réalisation des courbes à faible rayon de courbure
- ◆ Réalisation en site terrestre ou aquatique
- ◆ Amélioration du compactage



Photo.III.7. Soutènement avec parement en béton et renforcements en Pneusol

III.4.8. Les gabions

Les pneus usagés entiers (en particulier les pneus poids lourds) sont comprimés et engagés par un grillage métallique sous forme de ballots (photo.III.9.) et utilisés ensuite comme matériau dans les ouvrages de type murs et remblais. Cette technique utilise également les demi-produits comme les déchiquetés et les granulats. (photo.III.8.)



Photo.III.8.
Utilisation en gabion et en vrac des granulats de Pneus sous forme de pastille



Photo.III.9.
Utilisation en gabion des pneus entier

Utilisation en gabion et en vrac des granulats de pneus sous forme de pastille [CER/NIKOPNEU]

III.4.9. Stabilité des Talus

Nous citerons à titre d'illustration, deux ouvrages réalisés en Algérie.

Les travaux du premier projet [photo.III.10.] consistent à la réalisation d'un remblai par la technique Pneusol; Ce remblai est mis en place au pied d'un grand talus d'une hauteur avoisinant 13 m, plus exactement au PK 8+278 \pm 25 m, exécuté dans le cadre des travaux de réalisation de l'évitement de la ville de Bousmail dans la wilaya de Tipaza.

Ce projet qui est le premier dans son genre en Algérie, a comme rôle principal d'augmenter la stabilité du talus de la route, et de raidir sa pente et enfin alléger les charges sur le coté aval du dalot.



Photo.III.10. Stabilité d'un talus – Cas de BOUSMAIL

Concernant le deuxième projet, les travaux consistent en la réalisation d'un remblai léger par la technique "Pneusol".

Ce remblai est mis en place sur une section de route nationale RN11 de 200 m, qui vient se buter sur un petit mur en maçonnerie 1 m de haut et parallèle à la même section, plus exactement entre le profil 181-189, exécuté dans le cadre des travaux de modernisation de la RN1 entre Sidi Lakhdar et Mostaganem, dans la wilaya de Mostaganem.

Les objectifs techniques de cet ouvrage, qui est le second dans son genre en Algérie, sont d'augmenter la stabilité du talus de la route, de raidir sa pente, d'alléger le sol et enfin d'éviter le grand problème qui se pose dans la région liée au phénomène d'érosion.

En plus de son rôle environnemental (absorption des déchets pneumatiques en abondance dans la nature), ce projet est une application directe suite au bon résultat enregistré sur la planche expérimentale initié par la Direction de la Recherche du MTP au niveau de la déviation de Bousmail.



Photo.III.11. Stabilité d'un talus – Cas de Mostaganem

III.4.10. Les pneumatiques dans les routes

Lorsqu'il s'agit de routes établies sur des pentes argileuses instables, la lutte contre les glissements des terrains par les méthodes classiques de soutènement entraîne souvent des travaux coûteux.

Pour une confortation moins coûteuse, les études et les recherches géotechniques ont démontré que la stabilisation pouvait être obtenue par un allègement des masses en mouvement en substituant les sols de la tête du glissement par un massif en « Pneusol »

Des pneus usagés de poids lourd sont disposés soigneusement à plat (sur chant) en plusieurs couches. Les vides entre pneus ainsi que l'intérieur de la jante sont remblayés par une partie des matériaux de décapage.

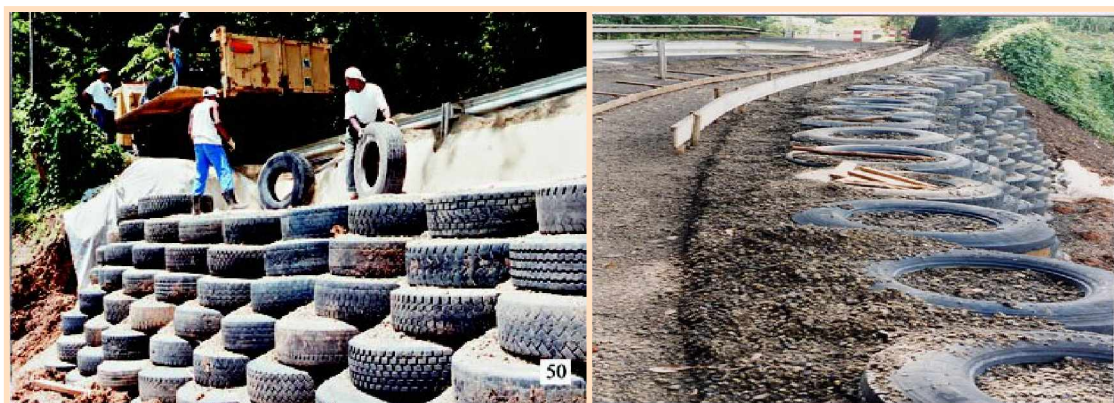


Photo.III.12. Mise en place d'un massif en pneusol au sur l'accotement d'une chaussée classique

Dans le domaine routier, un tronçon de plus d'un kilomètre a été réalisé en France sur un terrain de très mauvaise portance, avec un remblai de plus de 6m allégé par des pneus usagés. Aucune dégradation ou tassement n'a été observé jusqu'à ce jour.



Photo.III.13. Section d'une route en technique pneusol

III.4.11. Autres Applications

a/ ' l'asphalt caoutchouté '

Les pneus sont utilisés sous forme de granulats ou de poudrettes pour la fabrication des enrobés destinés aux couches de roulement des routes. Les différentes fractions granulométriques utilisées sont : 0/0,5 mm, 0,5/2 mm, 2/7 mm et 7/15 mm.

- Le bitume - caoutchouc

La première application en France date de 1965 au Pecq (78). Mais l'idée a été ensuite abandonnée. Le procédé s'est développé aux Etats-Unis et a fait l'objet d'un brevet de Mc Donald. Un colloque international a été organisé en octobre 1981 à San Antonio (Texas – USA). Le développement de cette technique en France en enduit date de 1982. Le principe est d'incorporer la poudrette de caoutchouc 0,2/1 mm ou 2 mm dans le bitume pour améliorer ses performances physico-mécaniques. Le dosage est de 15 à 25 %. Cette utilisation se développe peu face au développement de l'emploi généralisé des polymères dans les liants modifiés].

- Les enrobés aux liants hydrocarbonés

La poudrette est incorporée comme granulats dans le mélange à la fabrication de l'enrobé. Cette application vise à améliorer les caractéristiques acoustiques de l'enrobé. Le dosage est de l'ordre de quelques pourcents. Le gain en niveau de bruit routier est de l'ordre de 5 dB. Les poudrettes rentrent également dans la fabrication des enrobés drainants



Photo.III.14. Autre technique 'l'asphalt caoutchouté'

b/ Mur anti-bruit

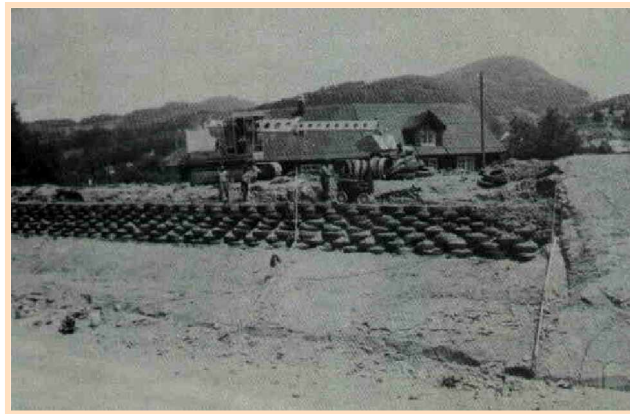


Photo.III.15. Autre technique 'mur anti-bruit'

c/ Protection contre les éboulements et les chutes de pierres



Photo.III.16.Exemple de protection contre les éboulements et les chutes de pierres

e/ Protection contre les glissement en grande masse

C'est également une technique de renforcement de sol dérivée de la technique PNEUSOL traditionnelle. Le principe s'apparente à celui de la technique ARMAPNEUSOL® Les pneus sont des pneus poids lourds entiers avec un flanc en face supérieure découpé. Le renforcement du massif de sol est assuré par des nappes de géotextile. Les pneus sont disposés horizontalement et longitudinalement et jouent le rôle de parement. Les nappes de géotextile de renfort sont disposées horizontalement et pincées entre deux rangs de pneus. Le premier ouvrage de merlon de protection a été construit en 1989 [Photo.III.16.] pour stopper les glissements de grande masse.



Photo.III.17. Protection contre les glissements de terrain en grande masse

f/ Absorbeur d'énergie – Séparateur de trafic.

Les séparateurs en béton du type New Jersey habituellement disposés entre les chaussées d'autoroutes et le long des voies urbaines à terre-plein central réduit ; sont utilisés avec succès en bordure de voie comme écran d'arrêt de pierres et de blocs roulant sur une pente. Son équivalence en pneusol est un empilement de pneus de tourisme (ou de poids lourds suivant la hauteur souhaitée). Remplis de remblais et encastrés dans le sol à l'aide d'une tige métallique [photo.III.17.]

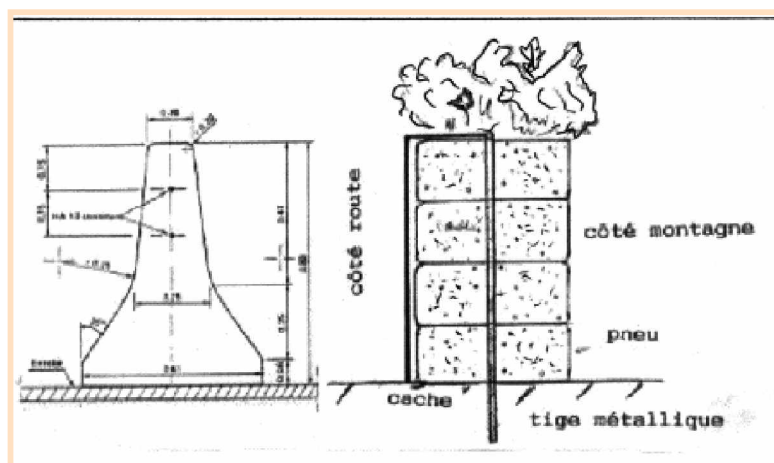


Photo.III.18. Séparateurs en béton et en pneusol

L'énergie d'un bloc en mouvement sera absorbée tout d'abord par la déformation du pneu, la mise en butée du remblai et finalement par la déformation de la tige.

L'inertie d'un tel dispositif est relativement importante et sa souplesse, comparée au séparateur en béton, est évidente. Le problème esthétique peut être résolu par une végétalisation de la partie supérieure du muret et par la mise en œuvre d'une cache colorée sur la partie latérale visible.



Photo.III.19.Essai de choc frontal sur un séparateur de trafic en pneusol.

g/ Cas particulier.



Photo.III.20. Support pour Panneau de signalisation Boufarik'

III.5. COMPORTEMENT DU PNEUSOL

Utiliser des inclusions résistantes à la traction pour améliorer les caractéristiques mécaniques d'un sol, coûte souvent très cher. Une solution très économique consiste à utiliser le Pneusol, qui est constitué de l'association de sol avec des pneumatiques usagés (ou des parties de pneumatiques) de camions ou de véhicules de tourisme.

Cette utilisation de pneumatiques comme matériaux de renfort est très intéressante, de part leur disponibilité, et au niveau du comportement mécanique. Dans cette association, le rôle des pneus est d'apporter une cohésion au sol et éventuellement d'alléger le massif.

III.5.1. Comportement général du Pneusol

Le Pneusol est un matériau composite constitué de deux éléments ayant des modules de déformation très différents; d'une part le pneu et d'autre part le sol.

Le comportement global d'un tel matériau résulte des caractéristiques mécaniques des deux composants de base et de leurs proportions relatives.

Comme pour beaucoup de sols renforcés, la caractéristique essentielle du Pneusol est sa déformabilité et les ouvrages construits avec celui ci sont donc souples, capables de supporter sans dommage des tassements différentiels importants.

Une autre caractéristique est que la construction d'un ouvrage en Pneusol doit pouvoir s'effectuer rapidement, c'est à dire au même rythme qu'un remblai. De plus, on peut adapter pour le procédé une technique de réalisation par éléments préfabriqués, transportables et facilement assemblés sur place. Cela conduirait à un possible standardisation des différents éléments et par suite, à une facilité de mise en oeuvre.

Les pneumatiques, qui constituent en dehors du matériau de remblai l'élément essentiel du Pneusol, doivent être durables.

Selon des spécialistes du caoutchouc (MICHELIN), des pneumatiques enterrés dans le sol pendant plus de quarante ans sont retrouvés absolument intacts et ne présentent aucune dégradation.

A noter que les attaches, qui relient les éléments les uns aux autres, doivent être compatibles avec la durée de service de l'ouvrage.

III.5.2. Comportement mécanique du Pneusol

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

Le Pneusol présente l'avantage de pouvoir améliorer les propriétés mécaniques du sol soit de manière anisotrope, c'est-à-dire uniquement dans les directions où le matériaux est le plus sollicité (nappes, bandes linéaires...) soit de manière isotrope dans tous les directions (chaînes continue d'élément mélangée au sol de remblai).

La principale caractéristique appréciée du procédé pneusol est le fait qu'il procure une souplesse au sol renforcé et une stabilité aux ouvrages en supportant des grands tassements même si ils sont différentiels.

Généralement, afin de simplifier le comportement mécanique du pneusol, on adopte des hypothèses simplificatrices.

- les armatures et le sol ont des comportements élastiques linéaires dans chaque nappe de matériau renforcé,
- la liaison au niveau de l'interface entre l'armature et le sol est parfaite,
- le comportement du sol est élastoplastique entre chaque nappe..

Le comportement de l'ensemble sol-armatures est alors orthotrope d'axe vertical 'OY', isotrope dans le plan horizontal 'XOZ'

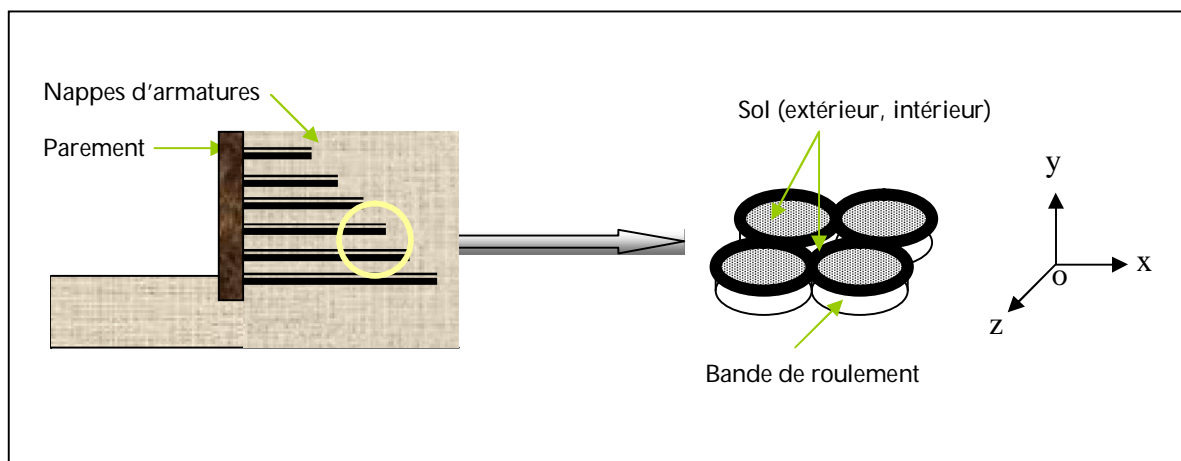


Figure.III.5. Comportement mécanique du pneusol

L'utilisation d'une méthode d'homogénéisation pour l'analyse de problèmes de pneusol permet de déterminer un comportement équivalent du matériau. Deux méthodes d'homogénéisation sont adoptées: l'une numérique et l'autre analytique.

III.6. ADHERENCE TERRE-PNEUMATIQUES

Les matériaux de remblais peuvent être soit des sols naturels soit des matériaux utilisables et doivent répondre aux critères géotechniques.

Des essais en vraie grandeur de traction d'éléments pneumatiques noyés dans le remblai ont permis une bonne compréhension du phénomène d'interaction sol-pneumatiques.

D'après les essais, l'adhérence bande aplatie-sol dépend essentiellement de l'interaction sol-caoutchouc du pneumatique, il n'en est pas de même de celle des bandes de roulements sur chant et des flancs.

En effet, l'effort de traction appliqué sur une bande de roulement sur chant est équilibré par:

- ◆ Le frottement sol-caoutchouc sur la surface peut varier en fonction de l'effort exercé puisque la déformation de l'élément est importante.
- ◆ Le frottement sol-sol le long de deux surfaces de cisaillements délimités par les bords.

III.7. PRINCIPE D'EXECUTION

Le procédé consiste à utiliser ces pneus liés les uns aux autres et disposés à plat, puis recouverts d'une couche de matériaux de remblais sur laquelle repose un nouvel assemblage de pneus, lui même surmonté d'une autre épaisseur de remblais, et ainsi de suite.

Le principe d'exécution ne présente pas de différence fondamentale avec celui de la terre armée ou de sols renforcés.

Il faut s'assurer que :

- ◆ aucun élément pneumatique ne présente de défaut trop apparent (déchirures profondes.)
- ◆ tous les éléments pneumatiques sont bien attachés
- ◆ les engins de transport ne doivent pas, sans raison majeure, rouler sur les lits des renforcements.
- ◆ il importe de ne jamais tolérer que le matériau soit poussé parallèlement aux renforcements.
- ◆ dans le cas où les engins à chenilles sont utilisés, il convient d'en interdire strictement la circulation

q le compactage

Le compactage dans un ouvrage en Pneusol a essentiellement pour but d'empêcher tout tassement ultérieur du matériau. Le but doit être véritablement recensé pour les ouvrages supportant une chaussée.

III.8. FORMES D'ASSEMBLAGE

Les éléments résultant de la découpe du pneu peuvent être disposés de différentes façons:

- ◆ flanc posé à plat,
- ◆ bande de roulement posée sur chant,
- ◆ bande de roulement aplatie,
- ◆ pneu de poids lourd posé à plat en entier,
- ◆ pneu de tourisme posé à plat en entier,

Les pneus peuvent être mis en place avec un seul flanc [photo.III.21.], ou entiers, d'une façon



Photo.III.21. Pneus avec flancs



Photo.III.22. Pneus sans flancs

L'assemblage de ces différents éléments permet de réaliser des armatures linéaires et des nappes. Dans tous les cas, le montage des éléments doit rester simple pour pouvoir rendre le procédé technologiquement et économiquement valable au niveau de la mise en oeuvre.

L'utilisation de la bande aplatie nécessite une opération supplémentaire, qui alourdit le coût du matériau.

Il convient aussi dans l'assemblage de tenir compte de la possibilité de moduler la résistance du renforcement dans les zones où les efforts de traction sont les importants. [1]

III.9. ATTACHES DES PNEUMATIQUES

Les éléments résultant de la découpe du pneu peuvent être disposés de différentes façons :

- flanc posé a plat
- bande de roulement posée sur chant
- bande de roulement aplatie
- pneu de poids lourd posé à plat en entier
- pneu de tourisme posé à plat en entier



Photo.III.23. Système d'attaches en lanière

Plusieurs sortes d'attaches sont possibles en fonction des besoins et de la structure de l'ouvrage.

Nous en décrivons quelques exemples dans ce qui suit. Lors des essais préliminaires, un certain nombre d'attaches métalliques en acier doux de diamètre 16 mm avait été utilisé, ainsi que des pièces facilement usinables.



Photo.III.24. Crochets en plaque d'acier

On peut aussi utiliser des agrafes en U pour les bandes de roulement, dont l'écartement est relativement faible (deux fois l'épaisseur de la bande); l'agrafe est fichée dans le sol. Le caoutchouc étant particulièrement sensible au poinçonnement, les surfaces qui seront en contact avec lui doivent être aussi larges que possible pour éviter ce phénomène.

Des crochets métalliques de l'ordre de 60 cm peuvent être utilisés pour accrocher entre eux les pneus de poids lourds dont le diamètre est voisin de 1.20m.



Photo.III.25. Attaches en crochets métalliques

A noter que éventuellement, des attaches spécifiques pourront être utilisées pour accrocher des armatures métalliques de type Terre Armée sur des parements en Pneusol.

Des essais de nœuds effectués lors des expérimentations en vraie grandeur ont montré qu'un double nœud est largement suffisant. En effet, les nœuds ainsi réalisés sont entourés de remblai compacté et il est très difficile de les défaire. Nous avons opté finalement pour des nœuds avec des bandelettes en polyester.

Une autre façon de lier les pneus de poids lourds est de placer au-dessus de la couche de pneus un géotextile non tissé qui par sa déformation importante, permet au remblai de bien remplir les jantes. Le deuxième avantage de ce non tissé est aussi d'empêcher le sol de pénétrer dans le vide de la chambre à air.



Photo.III.26. Exemple d'attaches en cordelette de nylon- cas de Mostaganem

III.10. REALISATIONS EN PNEUSOL

Plusieurs réalisations en Pneusol ont été effectuées dans le monde, nous citons dans ce qui suit quelques réalisations importantes:

Tableau.III.1. Réalisations par la technique Pneusol en Algérie

Type d'ouvrage	Lieu de réalisation	Nombre d'ouvrage
Répartiteur de contrainte	Ain Temouchent (1986)	12 Ouvrages
Ouvrage de soutènement	Mur de soutènement provisoire Métro d'Alger (2002)	1 Ouvrages
Stabilité de talus	Renforcement d'un talus Evitement de La ville de Bouismail Wilaya de Tipaza (2005)	1 Ouvrage
Protection contre les glissements	Mr OUMEDJBAR Wilaya de Bejaia (2006)	1 Ouvrage
Stabilité de talus	Modernisation de la RN 11 Wilaya de Mostaganem (2007)	1 Ouvrage
Digue de Protection	Pont de Bou Arfa Wilaya de Blida (2008)	1 Ouvrage

Tableau.III.2. Réalisations en Pneusol en France

Raidissement de pentes	Caractéristiques
Route de Kruth-Marstein (1984)	Longueur: 80 m ; Hauteur: 4 m
CD 7 Petite Pierre (1988)	Longueur: 50 m ; Hauteur: 4 m
Vierzon (1986)	Longueur: 80 m ; Hauteur: 3 m
Stand Oswald (1988)	Longueur: 10 m ; Hauteur: 4 m
CD 130 Route de Strutof (1990)	Longueur: 25 m ; Hauteur: 8 m

Ouvrage de soutènement	Caractéristiques
Mur expérimental de Langres (1982)	Longueur: 10 m ; Hauteur: 5 m
Mur de Meyzieu (1986)	Longueur: 25 m ; Hauteur: 5 m
Mur du col de Bussang (1987) (6 ouvrages)	Longueur: 80 m ; Hauteur: 3 m
Stand Oswald (1988)	Longueur: 10 m ; Hauteur: 4 m
CD 130 Route de Strutof (1990)	Longueur: 25 m ; Hauteur: 8 m

Pneusol répartiteur de contrainte	Dimension
Moniste - Sur- Loire (1985)	Longueur : 140 m ; Epaisseur: 2m
Franchissement de Banach (1985)	Longueur : 140 m ; Epaisseur: 2 m
Le Marquera (1987/1988)	Longueur: 54 m ; Epaisseur: 2.5 m
Pont de Say (1989)	Longueur: 100 m ; Epaisseur: 2 m
Xertigny (1987)	Longueur: 58 m ; Epaisseur: 2 m
Bruckenbach (1988)	Longueur: 55 m ; Epaisseur: 2 m
Mouans - Sartoux (1988/89)	Longueur total 300m, épaisseur : 2m
Contournement de Béziers (1990)	Longueur: 80 m ; Epaisseur: 2 m
St-Chely d'Apcher RN9 (1990)	Longueur: 120 m ; Epaisseur: 2 m
RN20 Croisières (1990)	Longueur: 70 m ; Epaisseur: 2 m

Remblai léger	Caractéristiques
Cannes - Mandelieu -Autoroute (1985)	Longueur: 80 m ; Hauteur: 3 m
Tennis d'Altkirch (1986)	Surface: 800 m ² ; Epaisseur: 1 m
Glissement de Dommiers (1987/1988)	Longueur: 50 m ; Hauteur: 3.5 m
Glissement de Crouttes (1988)	Longueur: 50 m ; Hauteur: 3.5 m
Piste de Matocross & Romilly-sur-Seine (1989)	Longueur:1200 m Largeur 4 m Epaisseur:1 m
Cannes Mandelieu RN 7 (1989)	Longueur: 100 m ; Hauteur: 3.5 m
Boulsios (1990) (SNCF)	Longueur: 60 m ; Hauteur: 4 m

Réducteur de poussée	Caractéristiques
Mur de Mende (1986)	Longueur: 54 m ; Hauteur: 5 m; Epaisseur: 4 m
Mur de Munster (1988)	Longueur: 40 m ; Hauteur: 6 m ; Epaisseur: 3 m
Piste Olympique de Val d'Isère (1989) (2 ouvrages)	Longueur: 200 m ; Hauteur: 6 m
Mur de Sélestat (1990)	Longueur: 15 m ; Hauteur: 5 m
Piste - Mur de Vendôme (1988)	Longueur: 20 m ; Hauteur: 5 m
Mur de la Fonderie (1988)	Longueur: 50 m ; Hauteur : 6 m
Mur de Cernay (1990)	Longueur: 15 m ; Hauteur: 4 m
Boulsios (1990) (CNCF)	Longueur: 30 m ; Hauteur: 1.5 m

Tableau .III.3. Réalisation en Pneusol à travers le monde 1984-2005

PAYS	NOMBRE D'OUVRAGES
ALGERIE	17
FRANCE	250
ETATS UNIS	06
SUISSE	06
Allemagne	01
ROUMANIE	01
JORDANIE	01
BRESIL	01
RWANDA	01
TOTAL = 284ouvrages	

III.11. CONCLUSION

Cette partie a porté sur le Pneusol où nous avons essayé de présenter leur caractéristiques, leur constitutions, leur comportement et les différents domaines d'utilisations.

Les bons résultats des recherches, une mise en œuvre facile, un comportement excellent dans le temps, font du Pneusol un bon matériau de génie civil.

L'idée de la valorisation des pneumatiques usagés constitue actuellement la priorité principale. En effet, le pneumatique usagé est un déchet très encombrant, mais qui peut devenir très utiles, le génie civil offre de nombreuses possibilités d'utilisation de ce matériau, en les valorisant en matériau de construction aux propriétés originales très compétitives.

Malgré qu'actuellement la connaissance parfaite du comportement de ce matériau ne soit pas atteinte, il reste cependant un matériau d'avenir, et ce pour plusieurs raisons:

- ✓ L'intérêt écologique, vu qu'il débarrasse la nature d'un déchet encombrant, polluant et non biodégradable.
- ✓ L'amélioration des propriétés mécaniques du sol.
- ✓ La mise en œuvre facile et rapide et ne nécessitant ni main d'œuvre ni machinerie spécialisées.
- ✓ Le coût très compétitif par rapport à celui des autres techniques de renforcement.

Notre objectif est de comprendre le comportement d'un mur de soutènement dont le remblai derrière est renforcé par des nappes en pneumatiques usagés. Pour cela une étude expérimentale a été conçue, afin d'étudier plusieurs paramètres qui nous jugeons indispensables :

- q l'influence des inclusions de renforcement dans un massif;
- q l'influence de l'espacement « e » entre les nappes de renforcement sur le déplacement;
- q l'influence de la disposition des éléments de renforcement sur le déplacement;
- q la ligne de rupture et son développement en surface et au sein du massif ;
- q Traction des couronnes ;
- q Essais d'arrachement des couronnes noyées dans le remblai ;
- q Étude de développement des lignes de ruptures.



2^{ème} Partie

ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1. INTRODUCTION

La résolution d'un problème de mécanique consiste dans le plus souvent des cas à déterminer les charges et les déformations à la rupture ainsi que les charges et les déformations en service.

Mais parfois, on est appelé à connaître d'avantage de choses et de déterminer des éléments plus précis. Dans ces conditions et pour poser correctement et complètement un problème de mécanique on a besoin de :

- § la définition de la structure
- § la définition des conditions aux limites et éventuellement aux frontières
- § la définition du changement
- § la définition des relations de comportement de la matière de structure.

Face à ce problème l'ingénieur à recours à deux (02) outils:

- § le calcul théorique
- § l'expérimentation

Si le progrès considérable réalisé dans le domaine numérique et technologique par des moyens de calcul ont pu mettre des outils très performants à la disponibilité des ingénieurs, par contre le deuxième outil pose toujours d'innombrables problèmes.

Cette dernière méthode requiert la réalisation d'essais grandeur nature ou sur modèle réduit. La réalisation du premier type d'essais est rarement utilisée due à son coût très élevé, en effet, ceux ci nécessitent un investissement très important et leur mise au point est longue et délicate. Les essais sur modèles réduits sont plus rapides, reproductibles et peuvent être conduits jusqu'à la rupture.

A cet effet, nous traitons dans ce chapitre d'une manière globale les essais sur modèle réduit uniquement faisant ainsi l'objet majeur de notre travail de recherche, afin de nous introduire directement dans notre expérimentation.

IV.2. CLASSIFICATION DES MODELES REDUITS

Le recours à ce type d'essais consiste à reproduire la structure, ses conditions aux limites, ses changements et les lois de comportements des matériaux du prototype en respectant toutes les lois mathématiques et physiques correspondants à cette transformation géométrique appelées lois de similitude

Actuellement ces essais sont beaucoup plus utilisés, vu leurs faibles coûts par rapport aux coûts des essais en vraie grandeur, leur reproductibilité et leur extrapolation à la rupture (mécanisme de ruine), ils peuvent être classés en 3 catégories :

1. Le modèle est considéré comme un petit prototype qui permet d'examiner les phénomènes qui se produisent à la rupture et de vérifier les hypothèses qui ont été adoptées lors de l'étude analytique de l'ouvrage projeté, de manière quantitative. Il doit être conforme aux hypothèses prises de l'étude théorique pour pouvoir confronter les résultats expérimentaux et théoriques.
2. Le modèle sert à déterminer et à satisfaire les conditions de similitude de manière à pouvoir déduire le comportement de l'ouvrage de façon correcte à partir de l'observation de modèle. La similitude du modèle doit satisfaire aux équations d'équilibre de la mécanique des milieux continus et suivre la loi de comportement du sol. Certains paramètres étant méconnus, cette catégorie est en général très peu utilisée pour les milieux granulaires.
3. Le modèle a pour but de fournir des informations détaillées sur les contraintes et les déformations, afin d'accroître la connaissance de comportement du sol et de l'interaction sol-structure.

A partir des informations fournies par ces différentes méthodes, des lois de comportement du sol peuvent être développées. Elles permettent de vérifier les résultats numériques et de prévoir le comportement dans un massif de sol réel.

La réalisation d'un modèle réduit est en générale assez simple d'où l'avantage de ce type de procédé, il peut y avoir cependant quelques difficultés pour des cas singuliers nécessitant par exemple une bonne précision où une certaine technologie de fabrication, mais ces cas sont toujours surmontables. On peut dire de même pour les conditions aux limites (réalisation d'encastrement, articulation...etc.), mais en général il est beaucoup plus une question de temps, de soin, que de principe.

S'agissant des matériaux, la représentation de leurs comportements ne pose pas de problème dans le domaine de petites perturbations et les résultats de simulation sont en général excellents. Cependant en frôlant la rupture, le nombre de paramètres intervenant pour représenter correctement le matériau devient grand et il est difficile de trouver un matériau dont toutes les propriétés soient en similitude avec le réel.

Parfois même il existe des matériaux pour lesquels les propriétés mécaniques d'un grand morceau diffèrent de celle d'un petit morceau et il devient difficile de comparer ce qui se passe en vraie grandeur avec le comportement à l'échelle réduite (effet d'échelle).

La figure IV.1 donne un schéma illustrant l'approche entreprise pour l'étude d'un phénomène :

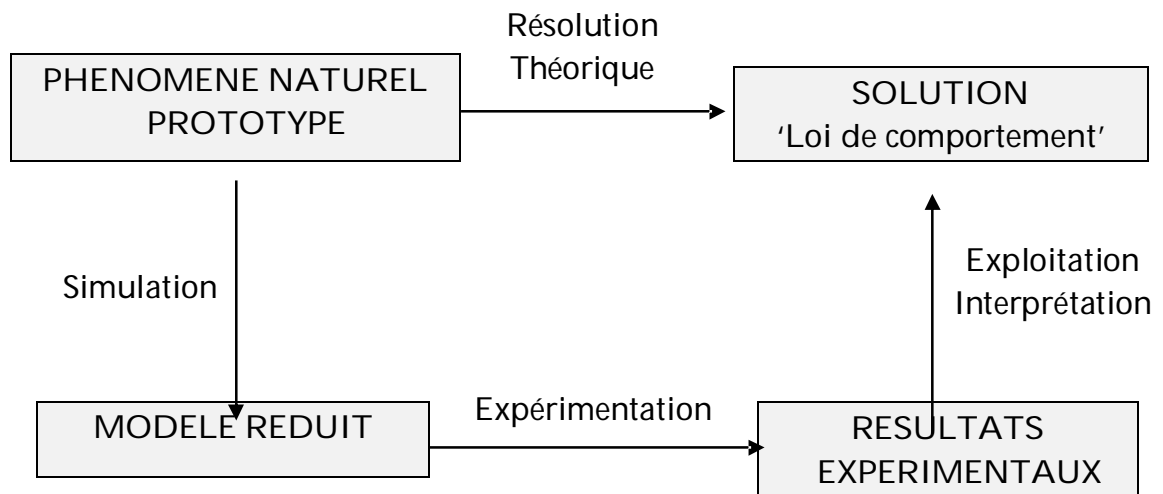


Figure.IV.1. Schéma d'étude d'un phénomène de comportement

IV.3 FONCTIONS PRINCIPALES D'UN MODELE REDUIT

L'utilisation des modèles réduits en mécanique des sols peut mettre en évidence deux fonctions principales:

1. la première fonction est celle qui permet de prévoir directement le comportement du prototype. Afin d'aboutir à cette fonction il est nécessaire que le sol constitutif du modèle soit bien représenté par le sol du prototype et que les principales conditions de similitude soient respectées. Ces conditions sont souvent difficiles à obtenir et nécessitent souvent des modèles centrifugés.
2. le modèle réduit est un support expérimental destiné à vérifier:
 - ◆ Les hypothèses de comportement du sol, et donc les lois de comportements et les méthodes de calcul.
 - ◆ Mettre en évidence les mécanismes de comportement du sol.
 - ◆ Suggérer de nouvelles approches.

IV.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS

L'utilisation d'un modèle réduit par rapport à un modèle en grandeur réelle a les avantages suivants :

- ◆ La rapidité d'exécution de l'expérimentation et moindre coût.
- ◆ La possibilité d'aller jusqu'à la rupture.
- ◆ La répétition possible des essais (reproductibilité).
- ◆ Les conditions aux limites et les paramètres rhéologiques du matériau sont aisément contrôlées.
- ◆ L'étude du matériau sous différents chargements.
- ◆ Les études paramétriques (modification du chargement ou géométriques).

Le seul inconvénient quand à l'utilisation d'un modèle réduit est de ne pas respecter toutes les conditions des lois de similitudes. De plus le modèle ne peut pas reproduire la totalité des conditions réelles des phénomènes à simuler, aussi il ne peut pas prendre en compte l'histoire préalable du sol et des travaux dans toute leur complexité.

IV.5. CONDITIONS DE SIMILITUDE DU PHENOMENE DANS L'ETUDE SUR MODELE REDUIT

Pour une bonne prévision du comportement de la structure du prototype, il est question de préciser les conditions de similitude auxquelles doit répondre le modèle réduit du prototype.

Nombreux sont ceux qui ont développé des conditions de similitude tel que WEBER (1968), MANDEL (1962) et ROCHA (1955), et tant d'autres chercheurs.

IV.5.1. Définitions et lois de similitude

Si U_m est la valeur d'une grandeur du modèle réduit et U_p est la valeur de la même grandeur du prototype alors :

$$U^* = \frac{U_m}{U_p} \text{ Est le rapport de similitude de la grandeur } U .$$

La similitude doit satisfaire :

- 1.L'équation générale de l'équilibre
- 2.L'équation de continuité
- 3.La relation contrainte déformation

- ◆ En modèle réel l'équation d'équilibre dynamique s'écrit :

$$\sum \sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho U_{i,tt} \quad (\text{Système d'équation})$$

Une de ces équations s'écrit :

$$\frac{\delta \sigma_{11p}}{\delta x_{1p}} + \frac{\delta \sigma_{12p}}{\delta x_{2p}} + \frac{\delta \sigma_{13p}}{\delta x_{3p}} + \rho_p g_{1p} = \rho_p \frac{\delta^2 U_{1p}}{\delta t_p^2} \quad U \text{ Déplacement} \dots \dots \dots (1)$$

En modèle réduit elle s'écrit :

$$\frac{\delta \sigma_{11m}}{\delta x_{1m}} + \frac{\delta \sigma_{12m}}{\delta x_{2m}} + \frac{\delta \sigma_{13m}}{\delta x_{3m}} + \rho_m g_m = \rho_m \frac{\delta^2 U_{1m}}{\delta t_m^2} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{Notons } \sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_p}, \rho^* = \frac{\rho_m}{\rho_p}, x^* = \frac{x_m}{x_p}, U^* = \frac{U_m}{U_p}, g^* = \frac{g_m}{g_p}$$

Par substitution dans (2) on trouve :

$$\frac{\sigma^*}{x^*} \left(\frac{\delta \sigma_{11p}}{\delta x_{1p}} + \frac{\delta \sigma_{12p}}{\delta x_{2p}} + \frac{\delta \sigma_{13p}}{\delta x_{3p}} \right) + \rho^* g^* \rho_p g_{1p} = \rho^* \frac{x^*}{(t^*)^2} \rho_p \frac{\delta U_{1p}}{\delta t_p^2}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\delta \sigma_{11p}}{\delta x_{1p}} + \frac{\delta \sigma_{12p}}{\delta x_{2p}} + \frac{\delta \sigma_{13p}}{\delta x_{3p}} \right) + \frac{\rho^* g^* x^*}{\sigma^*} \rho_p g_{1p} = \frac{\rho^* (x^*)^2}{\sigma^* (t^*)^2} \rho_p \frac{\delta U_{1p}}{\delta t_p^2}$$

Par identification avec (1) on déduit :

$$\frac{\rho^* g^* x^*}{\sigma^*} = 1 \quad \text{Et} \quad \frac{\rho^* (x^*)^2}{\sigma^* (t^*)^2} = 1$$

Dans le cas d'équilibre statique, seule la relation $\frac{\rho^* g^* x^*}{\sigma^*} = 1$ (A) intervient

◆ Dans le modèle réel et en variable d'EULER l'équation de continuité

S'écrit :

$$\frac{\delta \rho_p}{\delta t_p} + \text{div}(\rho_p V_p) = 0 \quad \text{Avec } V_p = \frac{dU_p}{dt_p} \quad U \text{ déplacement}$$

Si le matériau est incompressible $\rho_p = \text{constante}$ alors:

$$\frac{\delta \rho_p}{\delta t_p} + \rho_p \operatorname{div}(V_p) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\delta \rho_p}{\delta t_p} + \rho_p \frac{\delta}{\delta x_p} \left(\frac{dU_p}{\delta t_p} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Et en modèle réduit :

$$\frac{\delta \rho_m}{\delta t_m} + \rho_m \frac{\delta}{\delta x_m} \left(\frac{dU_m}{\delta t_m} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Et en notant : $\rho^* = \frac{\rho_m}{\rho_p}, t^* = \frac{t_m}{t_p}, U^* = \frac{U_m}{U_p}, x^* = \frac{x_m}{x_p}$

$$\text{Alors : } \rho_m = \rho^* \rho_p, t_m = t^* t_p, U_m = U^* U_p, x_m = x^* x_p \quad \dots\dots\dots (3)$$

Par substitution de (3) dans (2) et par identification avec (1) on trouve :

$$\frac{U^*}{U} = 1 \quad (B)$$

L'échelle des déplacements est la même que celle de la géométrie.

◆ Pour satisfaire la relation contrainte déformation du prototype et du modèle réduit, ROCHA annonça que la condition de similitude dans ce cas exige que le diagramme dans le modèle réduit peut s'obtenir à partir du modèle prototype en multipliant les ordonnées et les abscisses par σ^* et ε^* respectivement échelles des contraintes et déformations.

$$d\sigma_p = E_p d\varepsilon_p \text{ et } d\sigma_m = \sigma^* d\sigma_p$$

$$d\sigma_m = E_m d\varepsilon_m \text{ et } d\varepsilon_m = \varepsilon^* d\varepsilon_p$$

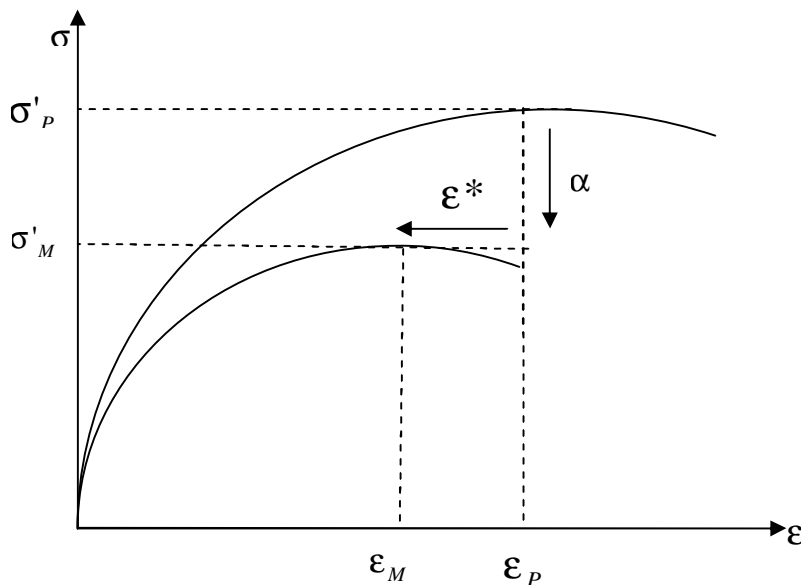


Figure.IV.2. Relation contrainte déformations des matériaux.

D'où :

$$\begin{aligned} d\sigma_p &= E_p d\varepsilon_p \\ d\sigma_p &= E_m \delta^* d\delta_p \end{aligned} \rightarrow \sigma^* = \frac{E_m}{E_p} \varepsilon^* = E_m = E_p \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} \rightarrow \frac{E_m}{E_p} = E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*}$$

Or $\varepsilon^* = 1$ (adimensionnel) d'où : $E^* = \sigma^* (C)$

L'échelle des modules d'YOUNG est la même que celle des contraintes

Donc pour des essais statiques sur modèle réduit qui tendent à simuler un prototype réel, on a en général les relations de similitude A, B et C.

$$\sigma^* = \rho^* g^* x^*, U^* = x^*, E^* = \sigma^*$$

Pour les sols la densité du matériau dans le modèle réduit est la même que celle du prototype ou presque (même sol) car la simulation du sol par un autre matériau en gardant toutes ses caractéristiques physiques et mécaniques est extrêmement difficile (densité, taille de grains, angularité et granulométrie etc...) c'est ainsi donc que $\rho^* = 1$ et l'on aura : $\sigma^* = g^* x^*$.

Comme l'expérimentation sur centrifugeuse est complexe, il est souhaitable d'examiner les conditions nécessaires pour une similitude correcte pour les essais sur modèle réduit effectué à 1g au laboratoire alors $g^* = 1$ d'où $\sigma^* = x^*$, l'échelle des contraintes est égale à l'échelle géométrique.

Ainsi afin d'obtenir les contraintes dans le modèle réel il suffit de diviser les contraintes du modèle réduit par x^* . Pour la force, il faut diviser celle du modèle réduit par $(x^*)^3$ pour obtenir la force du modèle réel et de même les moments et énergie seront à diviser par $(x^*)^4$, le moment d'inertie est à diviser par $(x^*)^5$.

Et si on veut produire une relation contrainte déformation similaire dans les 2 modèles il suffit de reproduire les mêmes contraintes en des points homologues et ceci implique que $\sigma^* = 1$ d'où $g^* x^* = 1$ donc la similitude peut être obtenue seulement si :

$$g^* = \frac{1}{x^*} : \text{Facteur d'échelle géométrique.}$$

La conséquence est d'utiliser une très grande accélération dans les essais sur modèle réduit ce qui a conduit au développement des centrifugeurs géotechniques.

IV.5.2. Aperçue sur la centrifugation des modèles réduits

Les essais sur modèle réduit en centrifugeuse ont pour justification première de permettre de recréer au sein du corps d'épreuve le même champ de force de masse que dans l'ouvrage en vraie grandeur, l'intensité du champ de pesanteur créée par l'accélération centrifuge communiquée au modèle doit être inversement proportionnelle à l'échelle géométrique.

Cette idée semble avoir intéressé de nombreux chercheurs et dans différents pays.

En 1931 cette méthode a été initiée par BUCKY aux ETATS UNIS suivi par POKROVOSKI qui a étudié la stabilité des berges du canal reliant les fleuves USA et VOLGA et qui présentait avec FIODOROV une communication la première du genre au congrès international de mécanique des sols de CAMBRIDGE (1936).

Au JAPON les premières expériences ont été menées par MIKASA en 1964 dans le but de valider sa théorie sur la consolidation des sols fins en grande déformation. L'équipe de l'université d'OSAKA a enchaîné par l'étude de divers problèmes classiques de mécanique des sols tels que stabilité des pentes, portance et déformations.....etc.).

Après les traductions faites sur les ouvrages de POKROVOSKI et FIODOROV et sous l'inspection du Britannique A.N SCHOFIELD la modélisation en centrifugeuse commence à se développer en Grande Bretagne.

A titre d'exemple, on citera aussi que l'idée de modélisation en centrifugeuse en France est rentrée en application pour la première fois en 1970 au laboratoire de mécanique des sols de l'école polytechnique puis au LCPC.

A partir des années 80 d'autres pays se sont engagés dans ce domaine tel que l'Allemagne Fédérale, Canada, la Chine, le Danemark par la construction de moyens d'essais de forte capacité (en poids et accélération).



Photo.IV.1. Centrifugeuse du LCPC

IV.6. EFFET D'ECHELLE

Le but du modèle réduit est d'étudier les phénomènes qui apparaissent sous un système de sollicitations semblable à celui du prototype, pour se faire, on tente d'utiliser le même matériau que celui du prototype dans la mesure du possible.

Mais l'expérience nous a montré que même avec ces précautions nous avons toujours un écart entre les résultats obtenus avec ceux que théoriquement on obtient.

Parmi de nombreux auteurs, KERISEL (1972) s'est intéressé à ces difficultés que rencontre les chercheurs, et qui sont liées du fait que le modèle ne respecte pas les règles de similitude. Ainsi il montre que les coefficients de poussée et de butée déduits des petits modèles sont généralement bien plus élevés que ceux des prototypes.

KERISEL a aussi effectué une synthèse des essais de butée réalisés par translation d'un écran dans des sables denses, avec une surface libre horizontale. On peut apprécier l'effet d'échelle en comparant les coefficients de butée en projection horizontale, $KP(\delta) \cdot \cos\delta$, pour des valeurs de δ voisines (Figure.IV. 3).

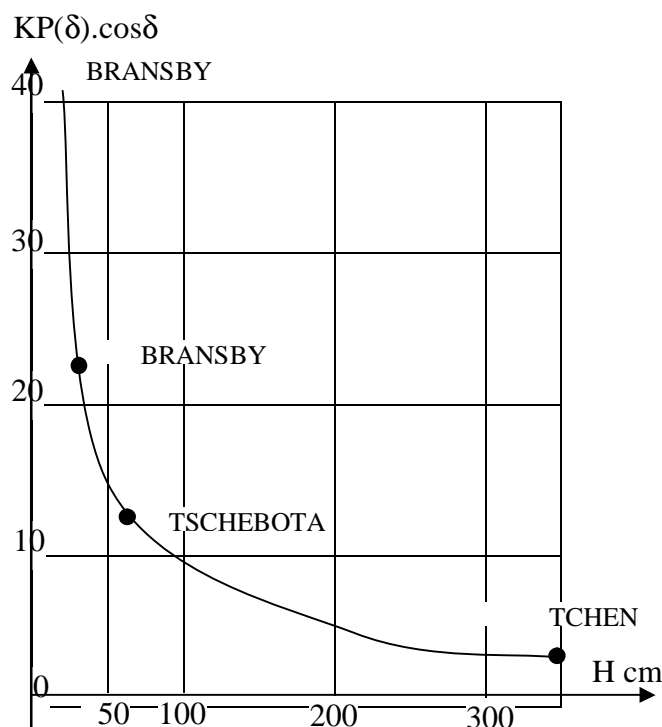


Figure.IV.3. Comparaison de k_p en fonction de H quelques modèles caractéristiques

De nombreux auteurs ont mis en évidence « l'apparition d'effet d'échelle » dans l'étude de la poussée sur modèle réduit; cela est dû essentiellement au non-respect des conditions de similitude.

Aussi, les résultats annoncés devront être extrapolé en vraie grandeur avec certaines précautions. Pour résoudre ces problèmes, il serait souhaitable et dans la mesure du possible de faire des essais en centrifugeuse.

IV.7. LES EFFETS DE BORD

Afin d'éliminer si possible ou réduire tous effets parasites qui peuvent fausser les mesures, et par la suite faire une bonne analyse des phénomènes étudiés, il est nécessaire de prendre certaines précautions tant dans la conception du modèle lui-même que dans le mode d'exécution des essais.

Parmi ces phénomènes non désirable et qui pourrait fausser les résultats causant un phénomène d'effet du bord. Généralement il est généré par le frottement du massif sur les parois latérales de la cuve. Alors il convient de respecter certain rapport entre la largeur L et la hauteur H du modèle, la condition ; $L \geq 2H$ est généralement souhaitée.

En pratique il est très difficile de satisfaire cette condition à cause du volume de matériau à manipuler. La largeur L est alors réduite, et les effets dits de bord sont amplifiés.

LAZEBNIK et CHERNYSHEVA (1968) ont mis en évidence la variation de l'effort de poussée lorsque le rapport L / H diminue (figure.IV.4.)

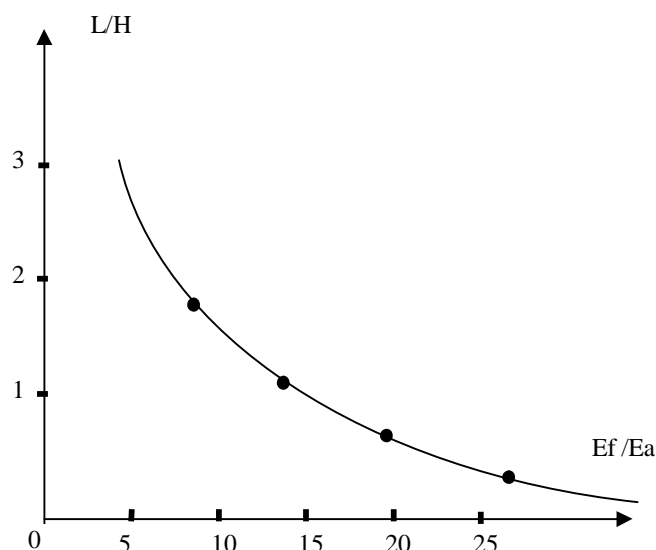


Figure.IV.4. Décroissance de l'effort de poussée avec le rapport L / H d'après LAZEBNIK ET CHERNYSHEVA (1968)

E_f/E_a représentant le pourcentage de la décroissance.

Ces essais sont réalisés avec un écran de 1,57m de haut retenant un massif pulvérulent d'angle de frottement interne égal à 28°.

D'autre part, et bien que leurs résultats soient relatifs à des essais de terre armée sur modèle réduit, LAREAL et BACO (1973) ont montré de la même manière que la largeur du modèle a une influence sur la hauteur de rupture de remblai.

La figure.IV.5 représente les points expérimentaux obtenus pour deux résistances à la traction des armatures (épaisseurs de 9 et 18 microns), celles -ci présentent une longueur constante de 20cm, une largeur de 4mm, et elles sont réparties uniformément dans le massif constitué par de la silice. Il apparaît que la largeur de modèle n'a plus d'influence, pour la longueur d'armature testée, sur la hauteur de rupture lorsqu'elle devient supérieure à :

35cm pour les armatures de 9 microns.
70cm pour les armatures de 18 microns.

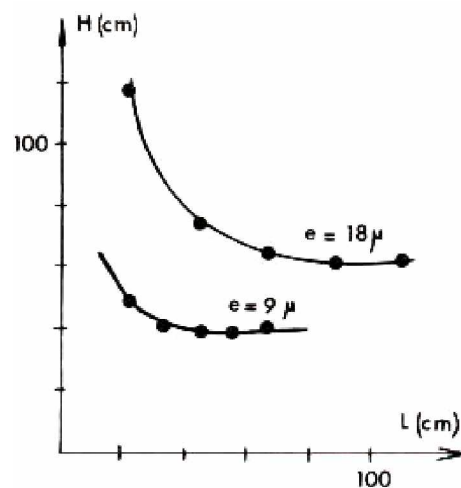


Figure.IV.5. Hauteur de rupture en fonction de L dans un massif de terre armée d'après LAREAL et BACOT (1973).

Signalons enfin les résultats de BRANSBY et SMITH (1975) qui ont calculé, à l'aide d'une méthode des caractéristiques basée sur celle de SOKOWSKI, la décroissance du coefficient de poussée lorsque l'on réduit la largeur L, pour une hauteur H donnée (figure.IV.6).

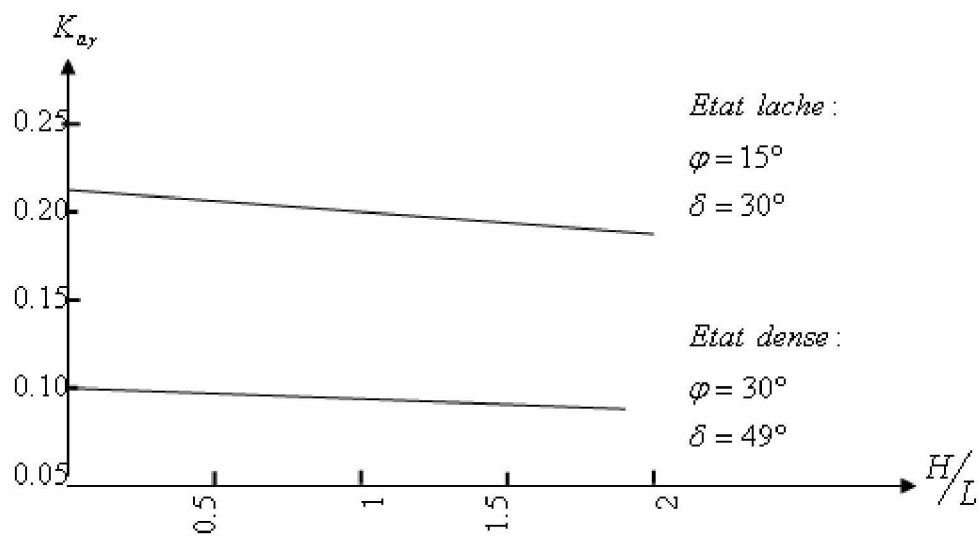


Figure.IV.6. Influence de rapport H / L sur K_{ay} d'après BRANSBY et SMITH (1975)

Deux méthodes sont généralement utilisées, outre la condition sur le rapport H/L , pour s'affranchir au maximum des effets de bord dans les modèles de poussé des terres :

Il est possible de réduire le coefficient de frottement matériau/parois latérales, en traitant ces dernières de manière à les rendre aussi lisses que possible.

C'est ainsi que dans notre modèle réduit, nous avons veillés à rendre ces parois lisses, afin de répondre à tous ces critères et en même temps de réduire ce coefficient au minimum.

La mesure d'effort sur notre modèle réduit est effectuée sur l'écran central de largeur $B=24\text{cm} < L$ est indépendante des deux parties latérales (chapitre.V.).

Il faut également s'assurer que la mise en place des inclusions ne soit pas en contact avec les parois latérales, de manière à éliminer le maximum de frottement entre les inclusions et les parois latérales du modèle réduit pour en déduire de bons résultats.

Dans notre modèle réduit, outre le respect de toutes ces conditions, nous avons également assuré la continuité de massif en arrière de l'écran.

IV.8. CONCLUSION

En conclusion, nous dirons que comparés aux essais en vraie grandeur les essais sur modèle réduit sont le plus souvent des essais de laboratoire, beaucoup moins coûteux, pouvant être facilement poussés jusqu'à la rupture, rapides et aisément reproductibles. Leur inconvénient majeur réside dans la difficulté d'extrapoler leurs résultats au cas d'ouvrages réels. L'extrapolation totale d'un essai nécessite la connaissance des lois de similitude qui résultent en partie de la connaissance du comportement de sol.

Enfin pour tout les résultats trouvés et analyse faite, il faudra de toute les façons rester très prudent quant à l'interprétation théorique et à l'extrapolation directe des résultats en vraie grandeur, même basé sur d'autres modes de renforcement.

Dans notre campagne expérimentale on verra toutefois que les tests effectués montrent une excellente précision des mesures et une très bonne reproductibilité des essais.

V.1. INTRODUCTION

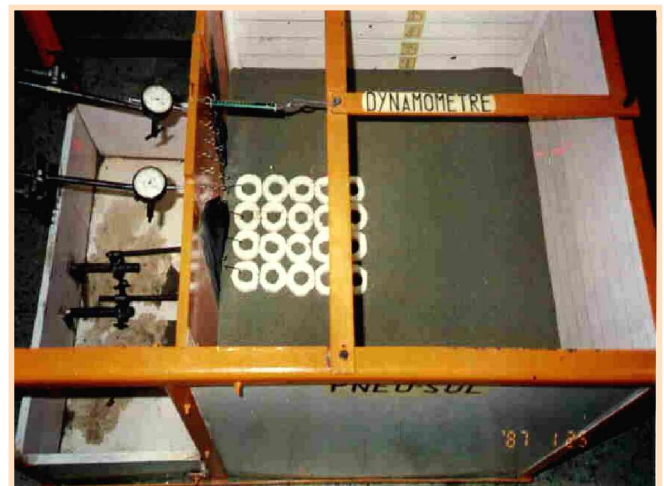
Tous phénomènes physiques ne peuvent être bien compris que grâce à l'évolution parallèle de la théorie et de l'expérimentation, d'une manière générale et le plus souvent des travaux de recherches se basent sur une expérimentation en vraie grandeur ou sur modèle réduit. Dans les deux cas des inconvénients et des avantages apparaissent.

On présente dans ce chapitre le modèle réduit tridimensionnel au laboratoire de l'ENTP qui a servi pour notre campagne expérimentale, et a porté sur une étude du Pneusol réducteur de poussée. Bien entendu, l'utilisation de modèle réduit présente des inconvénients qui sont connus, en particulier, le difficile respect des lois de similitudes. Mais étant donné que le but essentiel de ces recherches est d'obtenir des résultats d'ordre qualitatif qui permettent de mettre en évidence l'effet de ce matériau de renforcement qu'est le pneumatique usagé dans la réduction de la poussée derrière un mur de soutènement.

Dans le modèle expérimental on appellera 'Pneusol' l'association de sable et de 'couronnes' en polystyrène (ENTP), dont seules les dimensions respectent une similitude géométrique.

V.2. LE MODELE REDUIT 'ENTP' ET LES MATERIAUX UTILISES

Globalement la conception et la réalisation de ce modèle réduit ont permis de faire une étude du Pneusol réducteur de poussée et l'étude de comportement des murs de soutènement.



Photos.V.1. Modèle Réduit E.N.T.P d'expérimentation du Pneusol.

V.2.1. Description du dispositif expérimental

Le modèle réduit en question comprend les parties suivantes :

V.2.1.1. La cuve

La cuve contenant le matériau d'essai (sable) est parallélépipédique de 78 cm de hauteur, de 78 cm de longueur et une largeur de 72,5cm, son ossature est constituée par des cornières métalliques bien soudés, les abords de la cuve sont en contre-plaqué de 15mm d'épaisseur, solidaire aux cornières par boulonnage et sur lesquelles on a tracé des traits de niveau de 0 à 70 cm servant de repère. La cote zéro correspond à la base supérieure de la semelle de écran.

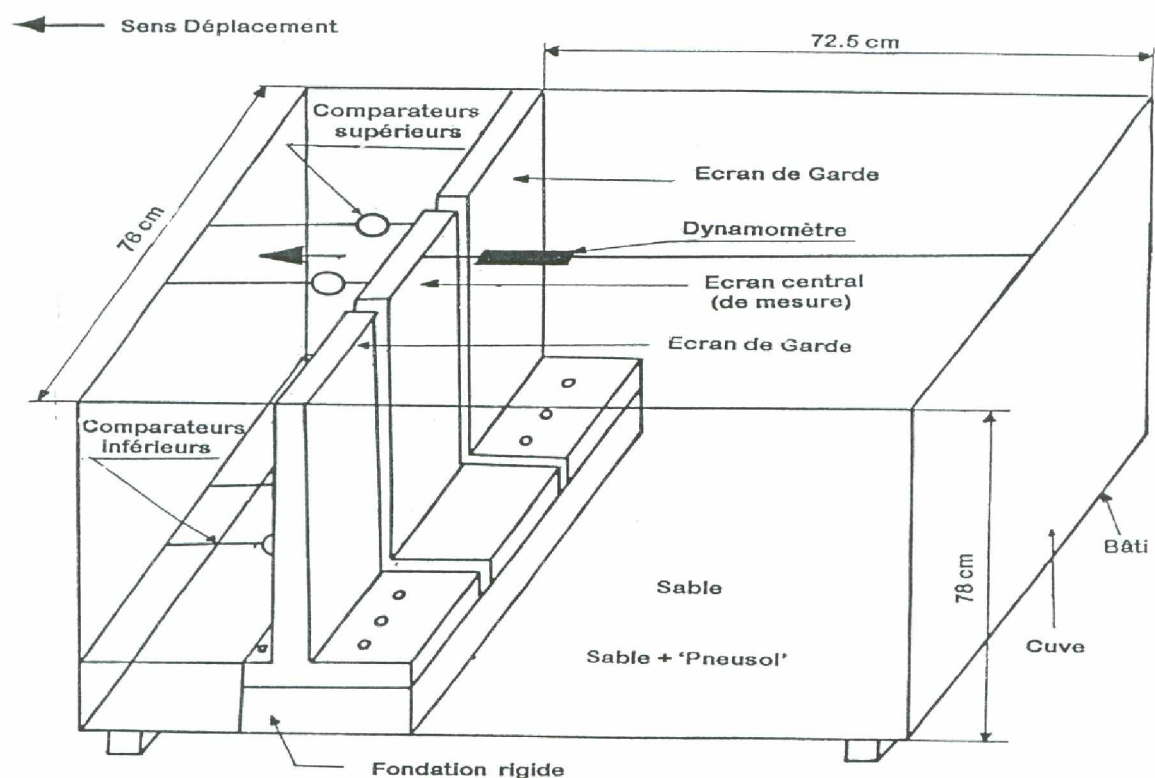


Figure.V.1. Vue d'ensemble du modèle (ENTP)

V.2.1.2. Les écrans

Ce sont des panneaux en bois (multiplié), placés transversalement à la cuve et composés de trois éléments identiques et indépendants; l'écran central est appelé écran de mesure, il est totalement libre et peut être ainsi source de mesures des déplacements alors que les deux autres écrans appelés de garde sont fixes.

Ces éléments sont constitués par des panneaux de 24,8 x 70 x 1,20 cm et des semelles de 12 x 24,8 x 1,5 cm et reposent sur une base rigide (Figure.V.2).

Afin d'effectuer des essais pour un sol renforcé par nappes non attachées à l'écran, un autre écran de même dimensions et de même nature a été conçu qui contient des crochets ancrés dans celui-ci, auxquels peuvent être attachés les nappes de renforcement. Cet écran peut remplacer l'écran de mesures pour effectuer l'essai correspondant.

D'autre part pour étudier l'essai de traction des couronnes noyées dans le remblai, on a confectionné un autre écran perforé transversalement. Derrière chaque perforation on a collé un tube d'environ 7 cm de longueur permettant de réduire l'effet de bord.

La surface de l'ensemble de ces écrans est bien polie et huilée pour pouvoir la considérer comme lisse.

Le vide existant entre l'écran de garde et celui de mesure a été couvert au moyen d'un couvre joint en polyane collé sur l'écran de garde afin de réduire l'échappement des grains de sable à travers ce vide.

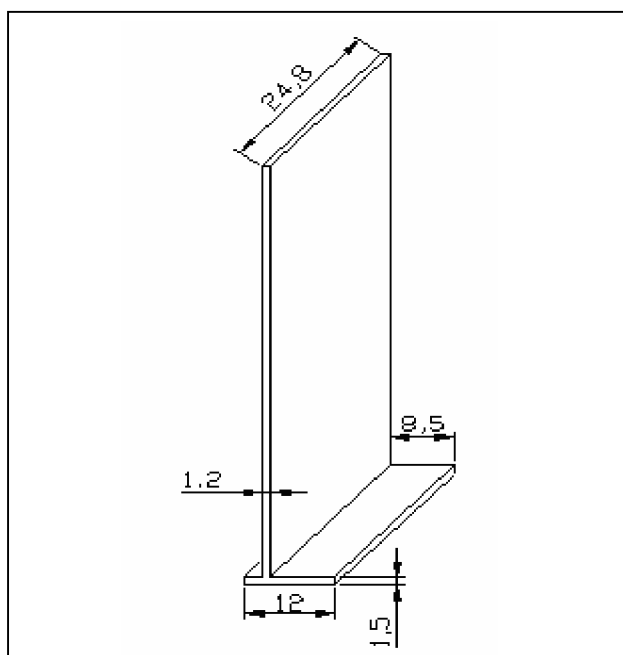


Figure.V.2. Ecran central de mesure

V.2.1.3. Dispositif de mesure sur le modèle

Les mesures sont effectuées uniquement sur le panneau central à l'aide de quatre comparateurs de déplacement et un dynamomètre étalonné. Les comparateurs ont pour but de mesurer les déplacements horizontaux d'écran à la base et à la tête alors que le dynamomètre permet de mesurer l'effort F.

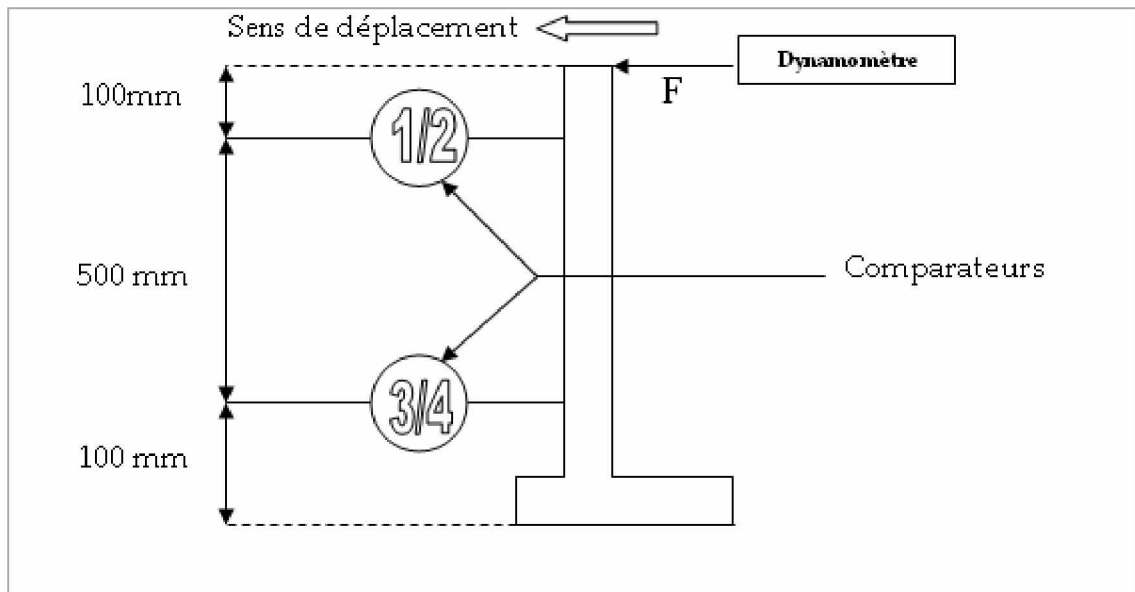


Figure.V.3. Chaîne de mesure



Photos.V.2. Dispositif de mesure



V.2.1.4. Matériaux utilisés

◆ Matériau de remblai

Le matériau utilisé pour confectionner le massif en pneusol d'une part et le remblai d'autre part, est un sable de granulométrie uniforme ($D_{\min} = 0,08 \text{ mm}$, $D_{\max} = 2 \text{ mm}$) provenant de la côte d'Alger (Tipaza), il est mis en place à une densité moyenne de 1,56.

Tableau.V.1. Caractéristiques du matériau utilisé

Désignation	Poids spécifique des grains solides g/cm^3	Poids spécifique Sec g/cm^3		Dimension(mm)		Indice des vides	
		$\gamma_{d \min}$	$\gamma_{d \max}$	d_{\min}	d_{\max}	e_{\min}	e_{\max}
Sable	γ_s	1,42	1,45	0,08	2,00	54%	85,5%
	2,69						

L'angle de frottement interne a été déterminé par la boîte de « casagrande ».

Les essais effectués sur ce sable ont donnés les résultats suivants :

- Une densité humide γ_h : $1,47 < \gamma_h < 1,49$
- Equivalent de sable 91,1%

L'angle de frottement interne ϕ déterminé à partir de la courbe intrinsèque est estimé à 31° .

◆ Matériau de renforcement

Les pneumatiques sont simulés par des couronnes en polystyrène type ENTP à l'échelle 1/20.

- ® Diamètre intérieur $\longrightarrow d = 30 \text{ mm}$
- ® Diamètre extérieur $\longrightarrow D = 60 \text{ mm}$
- ® Epaisseur $\longrightarrow e = 12 \text{ mm}$

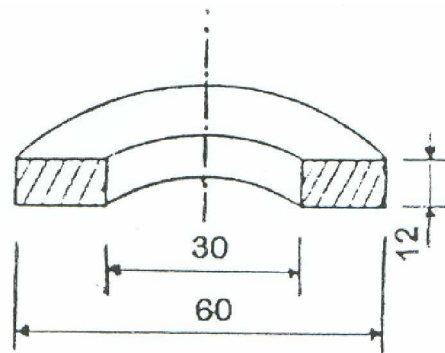


Figure.V.4. Couronne de pneu à l'échelle 1/20

V.2.2. Déroulement des essais sur modèle réduit

Les essais de poussée se font à déformations contrôlées. Il s'agit de procéder au remblaiement de la cuve selon les repères en hauteur du modèle réduit; le matériau est mis en place dans un état lâche, cette opération s'effectue par déversement du matériau à l'aide d'un tamis dont le diamètre est supérieur au diamètre du sable utilisé, et ceci afin d'assurer une bonne répartition par couche de 1 cm sur toute la surface jusqu'à ce qu'il atteigne la hauteur désirée.

L'écran, qui avant remblaiement, était placé verticalement sur le support de fondation commence à faire sentir à partir d'une hauteur de massif de 10cm un renversement par rotation.

Au fur et à mesure du remblaiement, les lectures de déplacement se font sur les comparateurs et l'effort en tête de l'écran est mesuré sur le dynamomètre d'une manière simultanée, en maintenant une vitesse de manipulation constante pour tous les essais.

Ce mode opératoire a été respecté tout le long du programme des essais effectués, soit :

- ◆ sur un sol non renforcé pour déterminer les courbes de référence.
- ◆ sur un sol renforcé par nappes de couronnes attachées selon une disposition normale en file.
- ◆ sur un sol renforcé par nappes de couronnes attachées selon une disposition orthorhombique.



Photos.V.3. Disposition orthorhombique



Photos.V.4. Disposition en file (normale)

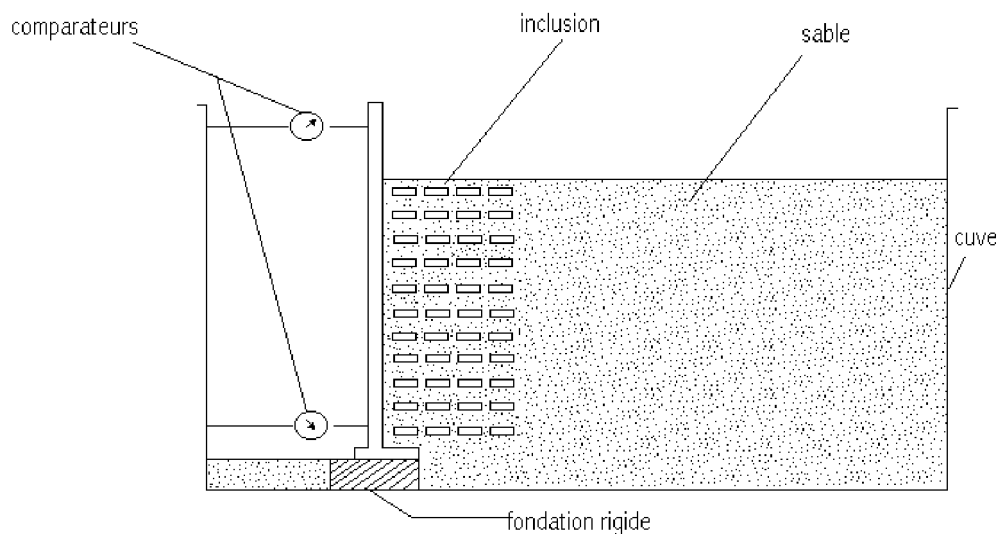
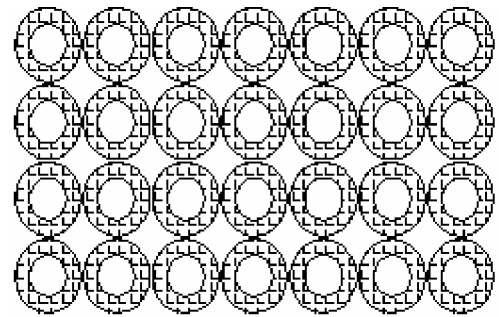
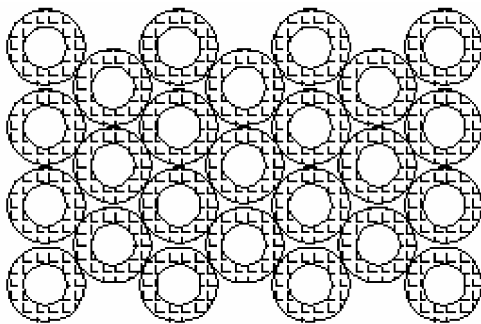


Figure.V.7. Mode opératoire et Mise en place d'inclusion de renforcement

On signalera que la durée moyenne d'un essai en préparation est de 3 jours. Le chargement est d'environ quatre (04) heures. (Par la suite il faudra veiller à la vidange de la cuve, nettoyage et réglage de l'appareillage pour la préparation du nouvel essai).



Photos.V.5. Vu d'ensemble des nappes utilisées – cas des murs à redans

Pendant toute la campagne expérimentale, nous avons adopté strictement le même mode opératoire, relevé des mesures à chaque mise en place de couche de sable respectives, et garder la même vitesse d'exécution d'essai constante et identique pour éviter tous risque d'écart de mesures.

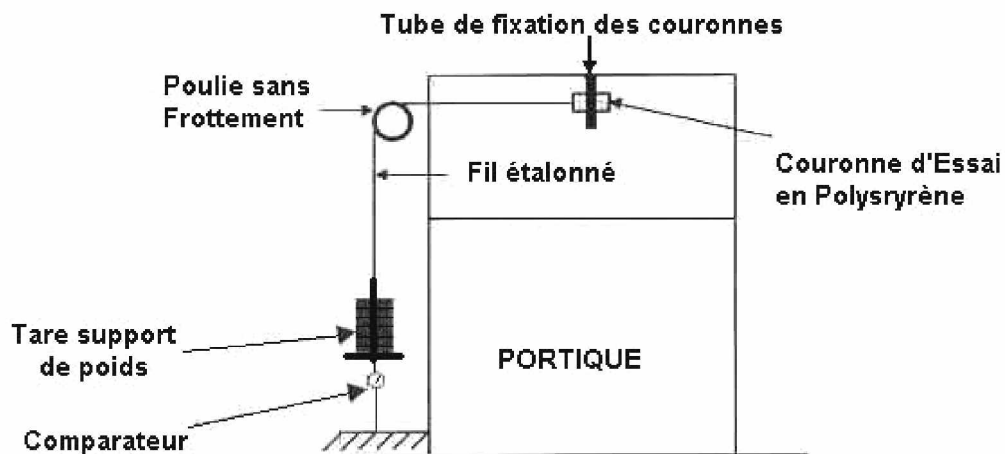
V.3. ESSAIS PARTICULIERS

Des essais particuliers bien spécifiques ont été réalisés pendant notre campagne expérimentale.

V.3.1. Essais de traction

A cet effet nous avons conçus et réalisé un bâti d'expérimentation de mesure pour l'étude de traction des inclusions de couronnes de pneus.

La résistance de traction de ces couronnes de pneus, a été déterminé au moyen d'essais de traction simple sur un échantillon de 12 couronnes, à l'aide d'un portique doté d'une poulie à travers laquelle passe un fil étalonné attaché d'un côté à la couronne et de l'autre liée à une tare pouvant supporter des poids et s'appuyant sur un comparateur.



En faisant augmenter le poids, on note les déplacements correspondants sur le comparateur jusqu'à la rupture des couronnes.

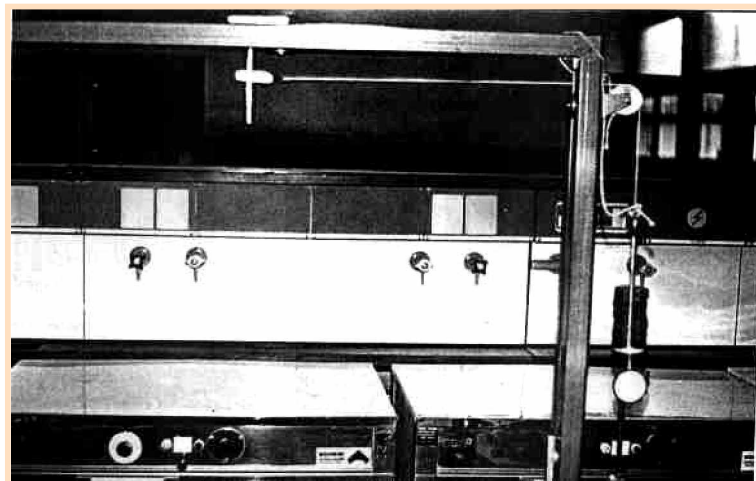


Photo.V.6. Dispositif pour l'essai de traction des couronnes

Le diagramme ci-après donne la relation effort déplacement des couronnes en polystyrène type ENTP, utilisées dans notre campagne expérimentale (figure.V.7).

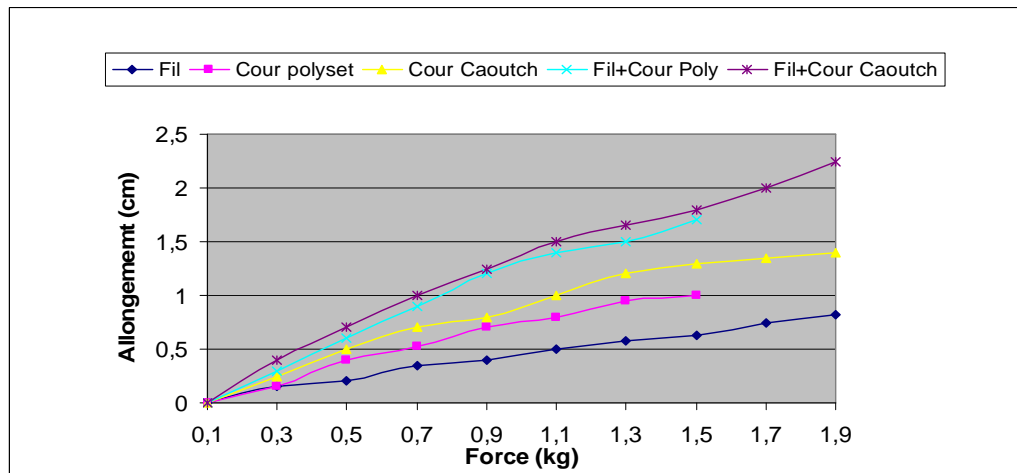


Figure.V.9. Variation du déplacement en fonction de l'effort

La contrainte de rupture est égale à :

$$\sigma^r = \frac{F}{S} = \frac{1,5}{(6-3) \times 1,4} \text{ soit } \sigma^r = 0,357 \text{ kg/cm}^2$$

On signalera toutefois que des essais similaires ont été effectués avec des couronnes en caoutchouc type INSA de Lyon sur notre bâti, la rupture n'a pas été observée.

La pesée sur balance électronique d'un élément de polystyrène de $(10 \times 10 \times 5) \text{ cm}^3$ a donné un poids de 0,2 g ce qui donne une densité γ_r égale à :

$$\gamma_r = \frac{0,2}{10 \times 10 \times 5} = 0,0004 \text{ g/cm}^3 \text{ soit } 0,4 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^3$$

V.3.2. Essais de flexion

Ce bâti de mesure a été spécialement conçu et réalisé, afin d'effectuer des essais de mesure pour l'étude de flexion du matériau formant l'écran du modèle réduit

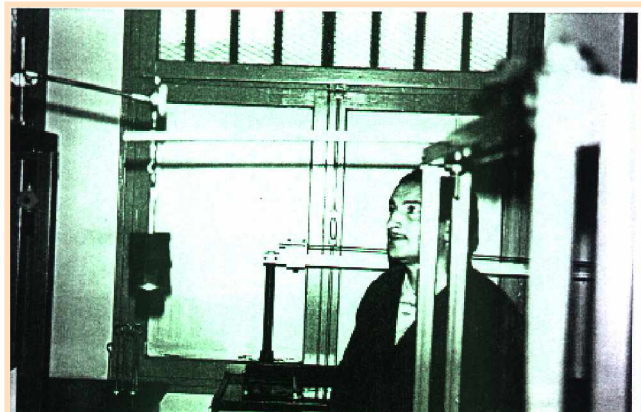


Photo.V.6. Dispositif pour l'évaluation du modèle de Young de l'écran en bois

L'écran de mesure est en bois formé de contre plaquée multicouche, l'influence du module d'élasticité de l'écran étant déterminé, reste important.

La connaissance précise de la valeur de ce module est donc nécessaire surtout si on sait que le module d'élasticité du bois varie selon la nature de celui ci et selon la disposition des fibres formant le matériau.

A cet effet, nous avons envisagé un essai simple qui consiste à prendre un élément de bois d'une longueur de 70 cm, une largeur de 6 cm et une épaisseur de 1.5 cm. On fixe une de ses extrémités sur un portique de telle sorte à réaliser un encastrement (pas de rotation) et soumettre l'autre extrémité à un chargement concentrique progressif à l'aide d'une tare support de poids. Un comparateur se trouvant au droit de la charge concentrique permet de faire la lecture de la flèche correspondante à chaque charge.

On procède donc au chargement et déchargement de l'élément d'où on obtient le graphe F(DL) donnant la flèche DL en fonction de la charge concentrique F.

Cette flèche calculée par la résistance des matériaux donne :

$$DL = \frac{l^3}{3EI} F$$

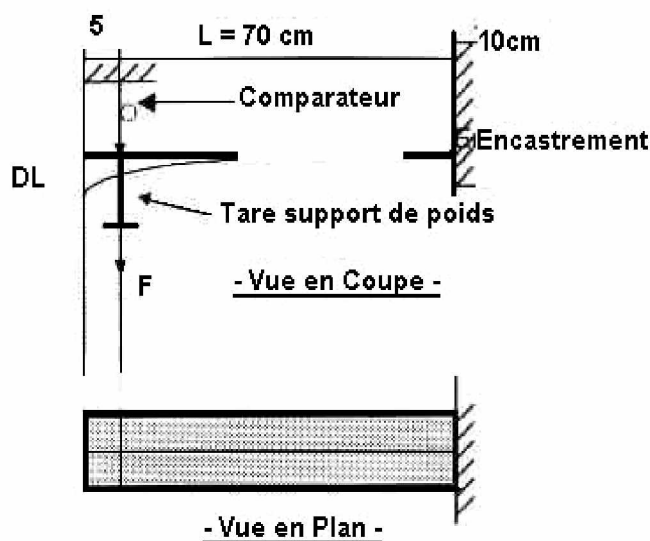


Figure.V.10. Dispositif pour l'évaluation du module de Young de l'écran en bois

La pente de la courbe F(DL) nous permet alors de déterminer facilement le module d'élasticité de l'écran utilisé (figure.V.9).

$$\frac{\Delta DL}{\Delta F} = \frac{l^3}{3EI} = \text{tg}\alpha \Rightarrow E = \frac{l^3}{3I \text{tg}\alpha} \quad , \quad I \text{ est le moment d'inertie d'une section rectangulaire :}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{6 \times (1.5^3)}{12} = 0,6875 \text{cm}^4$$

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta DL}{\Delta F} = \frac{1,2}{0,4} = 3 \Rightarrow E = \frac{70^3}{3 \times 3 \times 0,6875} \approx 55435 \text{ kg/cm}^2$$

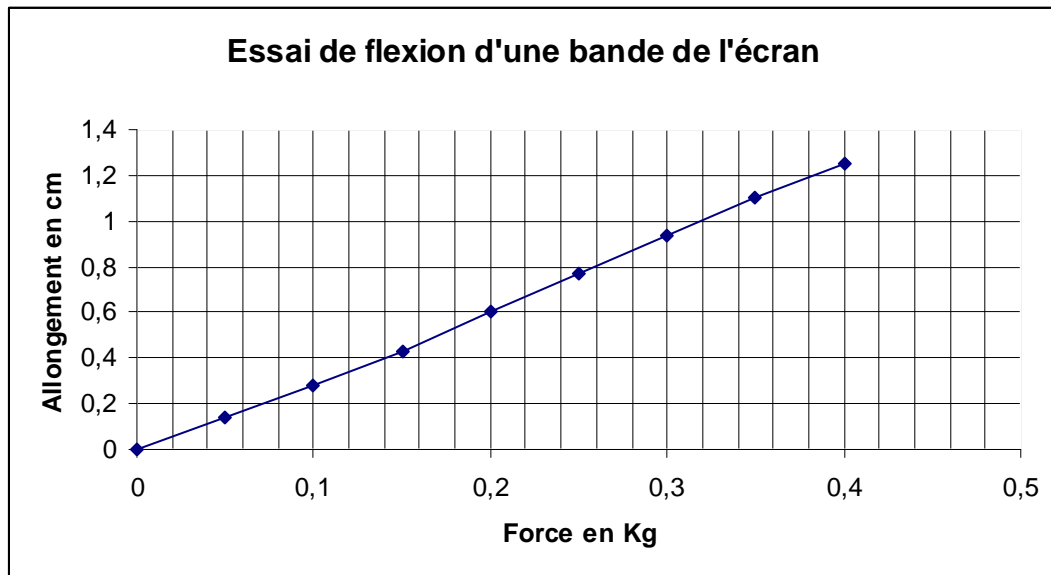


Figure.V.11. Variation de DL en fonction de F

V.3.3. Essais d'arrachements des couronnes

Cet essai a été envisagé pour examiner le mode de rupture des nappes de renforcement et d'évaluer la contrainte de rupture de ces renforcements soit par glissement (perte d'adhérence) ou par cassure.

Dans cet essai, l'écran central muni de fentes disposées à différents niveaux est fixé et ne peut effectuer des déplacements. Le remblaiement de la cuve s'effectue de la même manière que celle des essais précités. Au niveau de chaque fente, on intercale une couronne ou une nappe de couronne (selon l'essai), l'extrémité du fil traversant la fente est liée à l'inclusion au moyen d'une tige rigide permettant la répartition de l'effort d'arrachement sur l'ensemble des couronnes, et son autre extrémité qui passe par la poulie et réservée pour supporter les poids faisant l'effort d'arrachement.

Une fois avoir remblayé la cuve, on procède à l'arrachement des renforcements par mise en poids des tares et ce niveau par niveau jusqu'à la rupture des inclusions.

Evidemment pour chaque effort appliqué aux renforcements on note le déplacement correspondant après stabilisation du comparateur.

Dans l'essai de traction des couronnes sont noyées dans le remblai. Celles ci sont attachées à une tare au moyen d'un fil étalonné passant par des fentes réalisés dans l'écran à différente hauteur et par une poulie fixée à l'avant de la cuve. La poulie tourne sans frottement et peut coulisser le long d'un axe vertical pour pouvoir réaliser des tractions à différentes profondeurs. La tare supporte des poids et s'appuie sur un comparateur nous permettant de mesurer les déplacements totaux des couronnes et de l'allongement du fil.

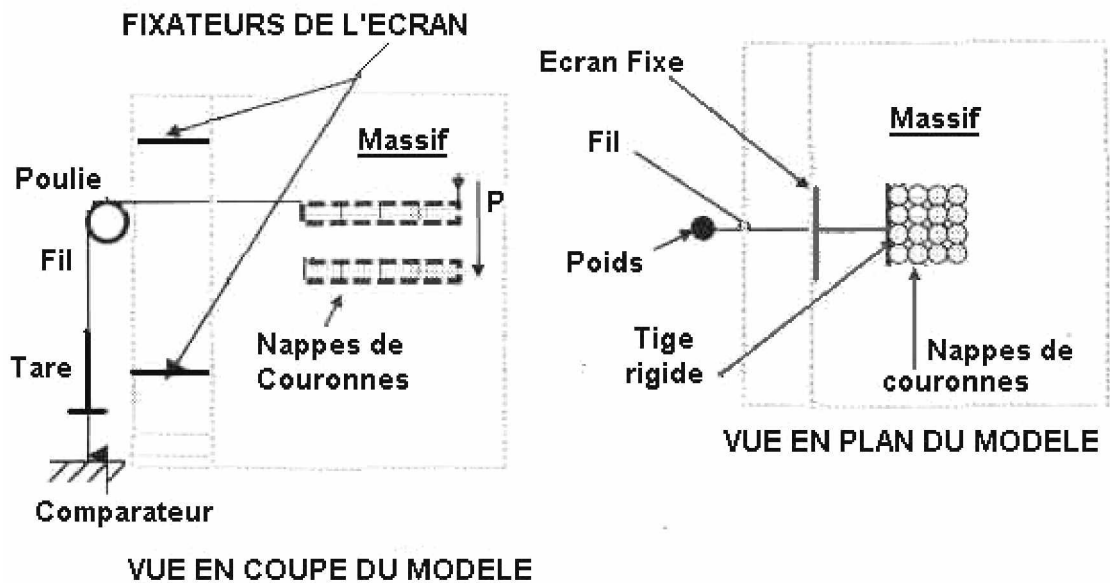


Figure.V.12. Essai d'arrachement des inclusions de renforcement

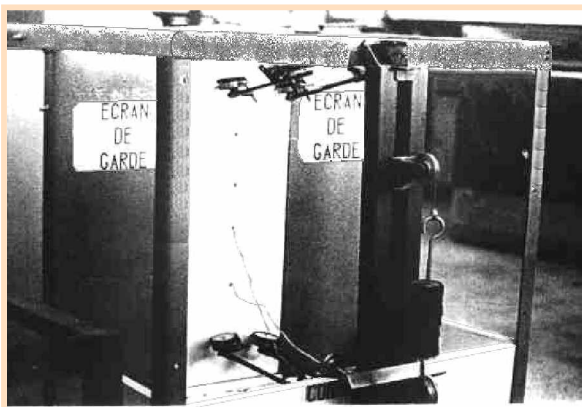


Photo.V.11. Dispositif d'arrachement du bâti

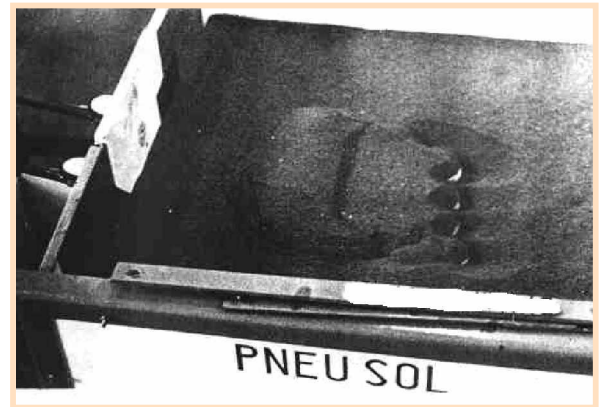


Photo.V.12. Développement de surface de rupture

On peut écrire : $\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{couronne}} + \Delta L_{\text{Fil}}$

Pour obtenir le déplacement des couronnes uniquement on a réalisé un essai de traction du fil dans le même montage pour tenir compte des mêmes paramètres pouvant ainsi influé sur l'essai.

Ainsi pour chaque effort F appliqué on a : $\Delta L_{\text{couronne}} = \Delta L_{\text{Total}} - \Delta L_{\text{Fil}}$

Les résultats des essais ainsi que l'étude des surfaces de rupture au sein même du massif et à la surface du massif seront traités dans la partie résultats expérimentaux.

V.3.4. Essais particuliers (développement des lignes de ruptures)

Ces essais ont été effectués dans l'optique d'une étude des lignes de ruptures au sein même du massif ainsi que le développement des surfaces de ruptures observées pendant notre campagne expérimentale, ainsi qu'à travers d'essais spécifiques par utilisation de bandes de sable colorées au bleu de méthylène.

Bien entendu, dan la troisième partie de ce mémoire nous traitons cette aspect par une étude et interprétation des résultats.

V.4. PROGRAMME D'ESSAIS

Les essais effectués sur le modèle réduit sont regroupés dans le tableau ci-après, à ce programme s'ajoute évidemment les essais particuliers.

Dans le programme d'essais on a fait varier les paramètres suivants :

- l'espacement des nappes « e »
- le nombre des couronnes par nappe « n »
- le nombre de nappes « Np »
- La disposition des pneus « Dpn » « Dpo » (normale ou orthorhombique)

Toutefois, on signalera que l'on a effectué des essais avec du sable seul, qui nous ont permis d'avoir les courbes de référence avec un massif non renforcé, seront comparées avec celles réaliser par des nappes des couronnes relatif à un massif renforcé.

Tableau.V.1. Programme d'essais

Nature d'essai	Disposition des couronnes	Espacement des nappes « e »cm	Nbr des couronnes par nappes « n »	Nombre d'essais	But de l'essai
Sol non renforcé	/	/	/	2	Courbe de référence
Sol renforcé par des nappes	Normale	0	4×9	2	1. Influence de l'espacement sur la poussée 2. Influence de la disposition des couronnes sur la poussée
Sol renforcé par des nappes	Normale	1	4×9	2	
Sol renforcé par des nappes	Normale	5	4×9	2	
Sol renforcé par des nappes	Normale	10	4×9	2	
Sol renforcé par des nappes	Orthorhombique	0	4×9	2	1. Influence de l'espacement sur la poussée 2. Influence de la disposition des couronnes sur la poussée
Sol renforcé par des nappes	Orthorhombique	1	4×9	2	
Sol renforcé par des nappes	Orthorhombique	5	4×9	2	
Sol renforcé par des nappes	Orthorhombique	10	4×9	2	
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	5	4×1	4	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	5	4×4	3	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	5	4×6	3	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	5	1×9	3	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	15	4×6	2	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	25	4×6	1	Effort d'arrachement et contrainte de rupture

V.5. CONCLUSION

Le but essentiel de cette recherche est d'obtenir des résultats d'ordre qualitatif qui permettent de mettre en évidence l'effet des pneumatiques usagés en tant que inclusion de renforcement dans un remblai derrière un mur de soutènement, ainsi d'étudier l'influence de certains paramètres (l'espacement entre les nappes, leurs dispositions, leurs dimensions, le nombre de pneus par nappe, leurs natures...).

Nous verrons toutefois dans les chapitres suivants, que nous avons obtenus des résultats très riches de renseignements, l'utilisation d'un modèle réduit favorise l'utilisation et la combinaison de paramètres, ce qui fait une facilité de la mise en œuvre, qui nous a autorisé la multiplication des essais dans des conditions très diverses, et qui a permis de voir l'influence respective de divers paramètres étudiés.

Enfin, les testes effectués montrent une excellente précision des mesures et une très bonne reproductibilité des essais.

En conclusion, nous dirons que comparés aux essais en vraie grandeur les essais sur modèle réduit sont le plus souvent des essais de laboratoire, beaucoup moins coûteux, pouvant être facilement poussés jusqu'à la rupture, rapides et aisément reproductibles. Leur inconvénient majeur réside dans la difficulté d'extrapoler leurs résultats au cas d'ouvrages réels.

VI.1. INTRODUCTION

Le rôle des ouvrages de soutènement est de retenir les massifs de terre. Il existe une grande variété se caractérisant par des fonctionnements différents et conduisant à des études de stabilité interne spécifiques.

Tous ces ouvrages ont en commun la force de poussée exercée par le massif de sol retenu. Par contre c'est principalement la manière dont est reprise cette force de poussée qui différencie les différents types d'ouvrages.

Avant de s'introduire directement dans la partie de l'exploitation des résultats et à leurs interprétations, il nous a paru nécessaire de traiter d'une manière très succinct le principe des murs de soutènement, de voir le phénomène de la poussée au niveau des remblais concernant des massifs de sol derrière le mur avec et sans renforcements par des inclusions d'une manière globale.

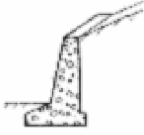

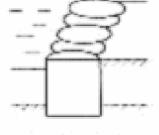

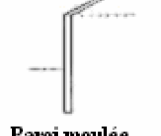
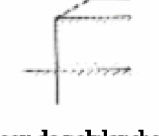



VI.2. DIFFERENTS TYPES D'OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

Un ouvrage de soutènement peut retenir soit des terres en remblais c'est-à-dire rapportées, soit le terrain en place.

L'effort de poussée exercé par le massif de terre retenu peut être repris de diverses manières. Trois modes principaux peuvent être distingués :

- La poussée est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement
- La poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage de soutènement
- La poussée est reprise par des encrages

Tableau .VI.1. Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la poussée

Mode de reprise de la poussée	Ouvrages de soutènement		
Poids de l'ouvrage	 <p>Mur poids en béton ou maçonnerie</p>	 <p>Mur en Terre Armée</p>	 <p>Ouvrage cellulaire</p>
Encastrement	 <p>Mur de soutènement en béton armé</p>	 <p>Paroi moulée</p>	 <p>Rideau de palplanches</p>
Ancrage	 <p>Mur en béton encré</p>	 <p>Paroi moulée ancrée</p>	 <p>Rideau ancré</p>

VI.3. DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

Dimensionner un ouvrage de soutènement consiste à déterminer ses éléments géométriques et ses éléments structuraux pour qu'il soit stable sous l'action des forces qui lui sont appliquées et notamment de la poussée des terres qu'il retient sur des calculs à la rupture avec la prise en compte de coefficient de sécurité

VI.3.1. Modes de rupture des ouvrages de soutènement

Cinq modes de rupture, illustrer sur la figure.VI.1 peut être rencontrés dans les ouvrages de soutènement

- le glissement de l'ouvrage sur sa base (a)
- le renversement de l'ouvrage (b)
- le poinçonnement du sol de fondation (c)
- le grand glissement englobant l'ouvrage (d)
- la rupture des éléments structuraux de l'ouvrage (e)

Les quatre premiers types de rupture sont relatifs à l'instabilité externe de l'ouvrage, la rupture des éléments structuraux constituant l'instabilité interne.

L'étude de la stabilité interne d'un ouvrage de soutènement fait appel à des concepts et à des méthodes de calcul qui sont commun à l'ensemble des ouvrages. Par contre l'étude de stabilité interne est assez spécifique à chaque type d'ouvrage. [20]

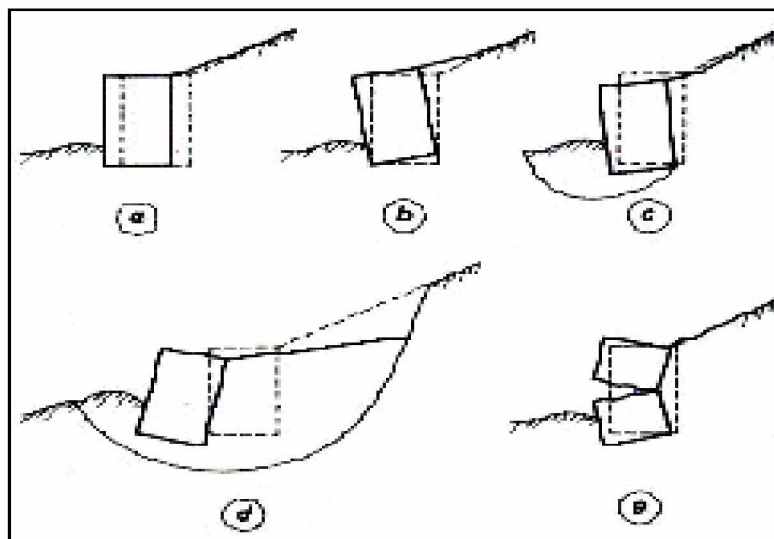


Figure.VI.1. Modes de rupture des ouvrages de soutènement

VI.3.2. Résistance au cisaillement du sol et frottement sol-mur

1) Paramètres de Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement du sol est l'un des paramètres les plus importants dans l'étude de la stabilité d'un ouvrage de soutènement. En dehors des sols pulvérulents où seul intervient l'angle de frottement interne F_i , les sols comportant une partie notable de fines, ont une résistance au cisaillement dépendant à la fois de leur état de saturation et de la rapidité de la sollicitation de cisaillement.

2) Frottement sol-mur

L'angle de frottement δ entre le sol et le parement arrière du mur dépend des facteurs suivants :

- ◆ la rugosité du parement
- ◆ l'angle de frottement interne du sol φ
- ◆ le tassement relatif entre le mur et le sol
- ◆ l'inclinaison de la surface

VI.3.3. Calcul des efforts de poussées ou de butées

Le calcul des efforts de poussées ou de butée dans les ouvrages de soutènement doit tenir compte des paramètres et des facteurs suivants [17] :

- ◆ le poids volumique du sol
- ◆ la cohésion du sol
- ◆ le frottement entre le sol et l'ouvrage
- ◆ l'inclinaison de la surface du sol à l'amont et à l'aval de l'ouvrage
- ◆ les déformations et déplacements relatifs de l'ouvrage par rapport au sol
- ◆ la présence d'une nappe d'eau
- ◆ les surcharges à la surface du sol

VI.4. RENFORCEMENT DES SOLS PAR INCLUSIONS

Le renforcement des sols consiste, dans son principe, à associer un sol à des éléments résistants de manière à former un matériau composite.

Dans les ouvrages de soutènement de type traditionnel : murs poids, parois moulées, rideaux de palplanches, le sol retenu ne participe pas à la stabilité de l'ouvrage. Au contraire, dans les ouvrages de type plus récent : murs cellulaires ou à caisson, murs à ancrages multiples et ouvrages en sol renforcé, une partie du sol à retenir participe à la stabilité d'ensemble de l'ouvrage.

VI.4.1. Concept de sol renforcé

Dans un sol renforcé, les propriétés mécaniques du sol initial, qui le plus souvent ne possède pas de résistance en traction, se trouvent améliorées par la mise en place d'inclusions résistant à la traction.[12]

Le calcul précis de la cohésion apparente d'un sol renforcé, matériaux composite anisotrope, est relativement complexe [11] et peu utilisé en pratique pour le dimensionnement des ouvrages en sol renforcé par des éléments linaires ou bidimensionnels

Pour que, dans un ouvrage, le sol et les renforcements se comportent comme un matériau composite, il est important que les éléments de renforcement soient suffisamment nombreux par rapport aux dimensions de l'ouvrage. De plus, pour contenir le sol entre les éléments, il est le plus souvent nécessaire d'installer un parement, dont la rigidité doit être compatible avec des renforcements. [10]

VI.4.2. Type 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 [13et14].

En outre, un grand nombre de matériaux constitutifs sont possibles : acier, fibre, de verre, géotextiles et produit apparentés (matières plastique), etc..., ces matériaux sont appelés 'matériaux innovants, le tableau ci-dessous donne une classification des principales techniques de sol renforcé en fonction de la géométrie des renforcements et du type de sol (sol apporté ou en place)

Tableau.VI.2.Classification des techniques de renforcement suivant les éléments de renforcement utilisés

Type de sol	Techniques de renforcement des sols		
	Renforcements unidimensionnels (linéaires)	Renforcements bidimensionnels	Renforcements tridimensionnels
Sols rapportés	Terre Armée (armatures métalliques)	treillis métalliques horizontaux	microrenforcements (disquettes, plaquettes)
	procédé Fressisol (armatures en matière synthétique: Paraweb)	mur Tervoile(treillis verticaux)	fibres (métalliques, géosynthétiques)
	mur VSL (bandes de treillis métalliques)	nappes en géosynthétiques (géotextiles, géogrilles, géocomposites)	Texsol (fil continu)
		procédé utilisant des pneus (Pneusol, Arma-Pneusol, pneu- tex)	
Sols en place	micropieux (groupes ou réseaux)		
	clouage en soutènement et en pente		

Tableau.VI.3.Efforts majeurs dans les inclusions pour différentes techniques de renforcement des sols[15]

Techniques de Renforcement	Flexion	Traction	Compression	Cisaillement
- Armatures ou bandes en remblai (Terre Armée, Mur Fressinet, mur VSL...)		***		
- Nappes en remblai (géotextiles, géogrilles, géocomposites) - Treillis horizontaux ou verticaux (Tervoile) procédés utilisant des pneus en remblai (Pneusol, ArmaPneusol, Pneutex)		***		
- Clouage en soutènement (Sol en Place)	*	**		*
- Clouage en pente instable (Sol en place)	***		*	***
- Micropieux en groupes ou réseaux (Sol en place)	*	**	**	*
- Renforcement tridimensionnels en remblai (microrenforcements, fibres, Fils)		***	*	

- * Faible
- ** Important
- *** Prépondérante

VI.4.3. Interaction Sol – Inclusion

Dans le renforcement des sols, les inclusions sont qualifiées, de passives car elle ne t pas mis en tension lors de leur installation, c'est sous l'effet des déformations du sol, durant ou après la construction, et par l'intermédiaire de l'interaction entre le sol et le renforcement qu'elles se mettent à travailler. [10]

Suivant le type d'application, l'un ou l'autre des efforts sera privilégié. En soutènement, les éléments de renforcement horizontaux travaillent essentiellement en traction tandis que ceux placés verticalement sont soumis à un chargement combiné en compression, cisaillement et flexion. [10]

VI.5 METHODES DE CALCUL DES ECRANS DE SOUTÈNEMENTS

VI.5.1 Introduction

Les méthodes de calcul des écrans de soutènement en usage aujourd'hui sont très diverses. Coexistent ainsi dans les documents techniques, depuis les manuels scolaires jusqu'aux documents mis à la disposition des ingénieurs, des méthodes nées au début du siècle et des méthodes développées à partir des années 1970, des méthodes complètement empiriques et des méthodes reposant uniquement sur des modèles théoriques, des méthodes prétendant rendre compte du comportement en service des ouvrages, tout en étant qualifiées de méthodes « à la rupture », et des méthodes rendant effectivement compte du comportement à la rupture des ouvrages, bien qu'en faible nombre pour ces dernières.

VI.5.2 Définition des forces de poussée et de butée

Considérons un ouvrage de soutènement simple, par exemple un mur en béton retenant un massif de sol, et examinons sommairement les types de sollicitation qui s'exercent sur ce mur.

En dehors des forces de pesanteur, représentés par le poids W du mur, s'exercent sur les faces du mur, en contact avec le sol, trois forces dont la connaissance est du ressort de la mécanique des Sols :

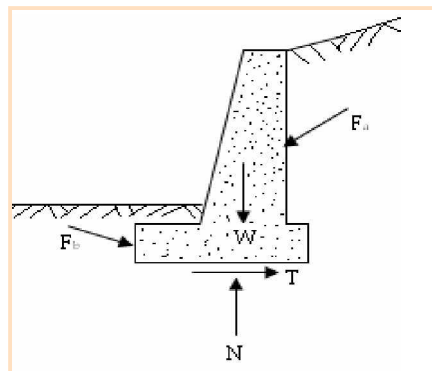


Figure.VI.2. Sollicitations exercées sur un mur de soutènement

1 – Sur la face amont du mur, généralement verticale, le massif de sol retenu exerce des efforts ayant tendance soit à renverser le mur, soit à le déplacer horizontalement. La résultante générale de ces efforts est une force dont la composante principale est horizontale. On appelle force de poussée et on la note F_a .

2 - Sur la face aval du Mur, dont la portée enterrée est souvent faible, la sol exerce des efforts qui ont tendance à retenir le Mur leur résultante générale est une force dont la composante principale est horizontale et opposée à la composante horizontale de F_a on l'appelle cette résultante Force de Butée et on la note F_p .

3 - Sur la base du mur, le sol de fondation exerce des efforts dont la résultante générale est une force inclinée par rapport au vertical. Sa composante verticale, notée N , est appelée force portante, tandis que la composante horizontale, noté T , est appelée force de résistance au glissement, car elle s'oppose au glissement du mur sur sa base, sous l'action de la force de poussée. [10]

VI.5.3 Dimensionnement des écrans de soutènement

Les réponses apportées à l'époque (méthode de Coulomb et théories de Rankine et de Boussinesq, en particulier) permettent en effet de traiter ce problème de façon satisfaisante : les murs poids, ouvrages rigides, présentent en général une cinématique qui consiste principalement en un déversement de l'ouvrage, sous l'action de la poussée du terrain soutenu, ce dernier se trouvant ainsi décomprimé latéralement et amené dans un état d'équilibre limite de poussée. [19]

A la question de la poussée des terres s'ajoute maintenant la question de la butée des terres, compte tenu de l'appui opposé par le sol à la partie en fiche de l'ouvrage.

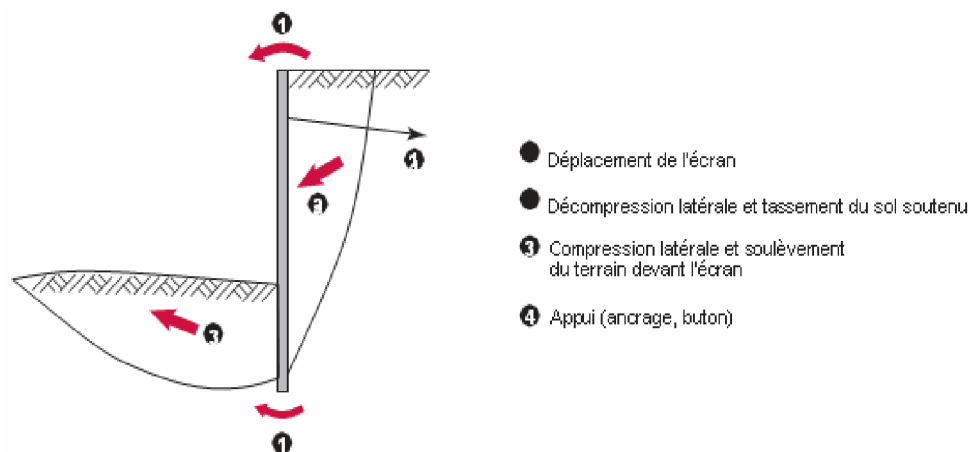


Figure.VI.3. Cinématique d'un écran de soutènement rigide et du terrain environnant

VI.5.4. Méthodes de calcul de poussée et de butée

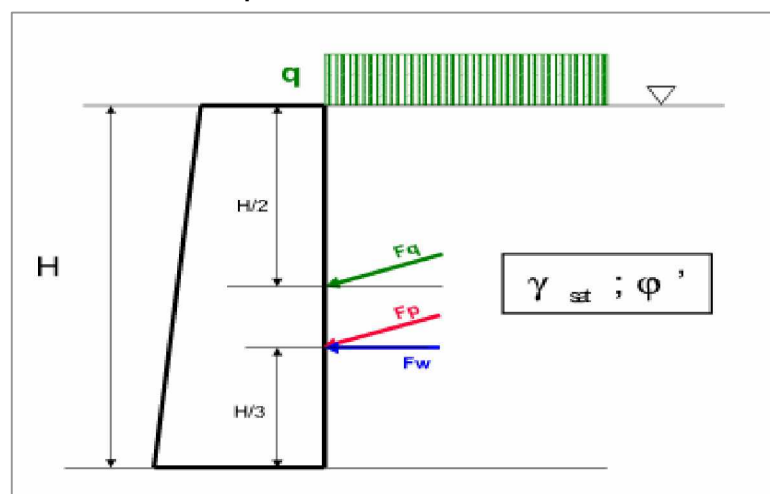


Figure.VI.4. Bilan de forces agissant sur un mur de soutènement.

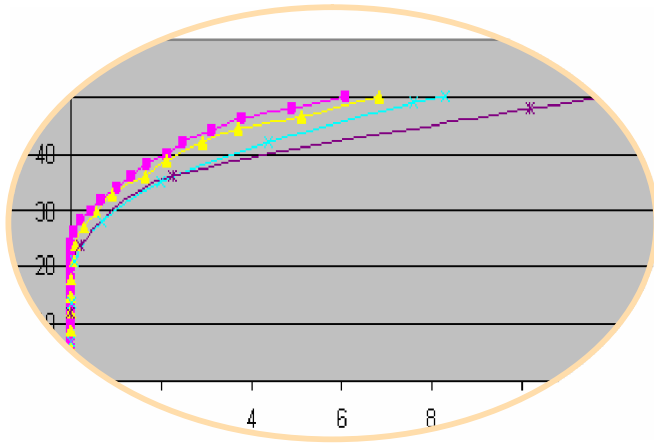
L'identification successive de ces nouveaux aspects de l'interaction sol-écran de soutènement et les tentatives d'y apporter des réponses, ces dernières tenant par ailleurs compte des outils généraux alors disponibles, constitue autant d'étapes du développement des méthodes de calcul des écrans de soutènement. Les directions prises par ces développements sont au nombre de quatre :

- la voie empruntée semble-t-il de prime abord se situe dans la lignée des travaux menés à partir du XVIIIe siècle dans le domaine des murs de soutènement. Les travaux réalisés font largement appel aux théories de poussée développées antérieurement, ainsi qu'à la statique et aux méthodes de la résistance des matériaux. Elles ont permis le développement des méthodes dites « classiques » ;
- à cette première approche s'adjoint assez vite l'approche fondée sur la notion de module, ou coefficient, de réaction dont les bases ont été définies à la fin du XIXe siècle. Cette approche reste toutefois peu développée pendant toute la première moitié du XXe siècle car elle nécessite des moyens d'intégration qui ne seront réellement mis à la disposition de l'ingénieur qu'avec l'apparition du calcul informatique, dans les années 1960;
- très tôt, ces approches théoriques se heurtent à des limites dans la représentation des phénomènes physiques et une branche empirique se développe ; celle-ci va rester présente tout au long du XXe siècle et va contribuer à l'élaboration d'un référentiel en termes de comportement observé des ouvrages, référentiel toujours en usage ;
- ultérieurement, le domaine des ouvrages de soutènement va bénéficier des progrès réalisés dans les domaines de la mécanique et des méthodes numériques, pour constituer, à partir des années 1970, à l'égal des autres catégories d'ouvrages géotechniques, un champ d'application de la méthode des éléments finis.[11]

VI.6. CONCLUSION

Les poussées des terres sont des phénomènes compliqués par leurs mécanismes, beaucoup de chercheurs ont développés des méthodes de calculs; chacune d'elles considère le phénomène de pousses des terres dans un cadre de condition et d'hypothèse.

Plusieurs solutions sont alors envisageables, soit de bâtir des ouvrages qui soutiennent les terres en risques, ou bien de renforcer le terrain lui-même en modifiant sa résistance par de nombreux procédés tel que les macédoines (renforcement par des maillages de tige planter dans le sol) ou bien par d'autres procédés. Parmi ces procédés, il existe les inclusions en Pneusol qui font l'objet de notre étude, afin d'étudier le "pneusol réducteur de poussée".



3^{ème} Partie

RESULTATS EXPERIMENTAUX

II.1. INTRODUCTION

La compréhension du phénomène de la poussée des terres, comme bien d'autres phénomènes physiques, ne peut aboutir que grâce à l'évolution parallèle de la théorie et de l'expérimentation que ce soit en vraie grandeur ou sur modèles réduit.

Nous traitons dans ce chapitre les résultats de la campagne expérimentale qui nous paraît très riche en renseignements afin de l'exploiter et déterminer la relation entre les différents paramètres étudiés.

Rappelons que cette étude expérimentale est consacrée à apprécier le comportement d'un mur de soutènement ainsi que l'effet de la réduction de poussée par l'introduction d'inclusion de renforcement et en même temps allègement du sol.

Le remblai se trouvant derrière ce mur est renforcé par des inclusions composées par des nappes de pneumatiques usagés. Il sera question d'étudier ainsi l'influence de certains paramètres tels que l'espacement 'e', le mode de disposition des nappes, le mode d'attaches...

Plusieurs séries d'essais ont été exécutées :

- ◆ Série d'essais sur sable seul
- ◆ Série d'essais sur sable renforcé par nappes de couronnes attachées selon une disposition normale (en file)
- ◆ Série d'essais sur sable renforcé par nappes de couronnes attachées selon une disposition orthorhombique
- ◆ Série d'essais particuliers :
 - § Traction des couronnes
 - § Essais d'arrachement des couronnes noyées dans le remblai
 - § Développement des lignes de ruptures

De même, nous présentons les résultats et l'interprétation des essais effectués, tout en essayant de faire une comparaison entre les différents paramètres.

Pour chaque cas étudié, on mesure d'une part les déplacements en tête et au pied du mur, et d'autre part l'effort en tête.

VII.2. PROGRAMME D'ESSAI

Les essais effectués sur le modèle réduit sont regroupés dans le tableau ci-après, à ce programme s'ajoute évidemment les essais effectués pour l'évaluation de la contrainte de rupture des couronnes ainsi que ceux permettant l'évaluation du module d'élasticité de l'écran et l'identification du matériau de remblai.

Le nombre total d'expérimentation [Tableau.V.1 ; Chapitre.V] réalisés sur modèle réduit est de 34 essais et se résument comme suit :

Tableau.VII.1. Programme d'essais

Nature d'essai	Disposition des couronnes	Espacement des nappes « e »cm	Nombre d'essais	But de l'essai
Sol non renforcé	/	/	2	Courbe de référence
Sol renforcé par des nappes	Normale	0	2	1. Influence de l'espacement sur la poussée 2. Influence de la disposition des couronnes sur la poussée
Sol renforcé par des nappes	Normale	1	2	
Sol renforcé par des nappes	Normale	5	2	
Sol renforcé par des nappes	Normale	10	2	
Sol renforcé par des nappes	Orthorhombique	0	2	1. Influence de l'espacement sur la poussée 2. Influence de la disposition des couronnes sur la poussée
Sol renforcé par des nappes	Orthorhombique	1	2	
Sol renforcé par des nappes	Orthorhombique	5	2	
Sol renforcé par des nappes	Orthorhombique	10	2	
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	5	4	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	5	3	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	5	3	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	5	3	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	15	2	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Traction des nappes noyées dans le remblai	/	25	1	Effort d'arrachement et contrainte de rupture
Bande de sable coloré	/	/	1	Prisme de rupture
Bande de sable coloré	Orthorhombique	5	1	Prisme de rupture (nappes sans attaches)
Bande de sable coloré	Orthorhombique	5	1	Prisme de rupture (nappes avec attaches)

VII.3 ESSAIS SUR SABLE SEUL

Afin d'apprécier l'effet qu'apporte une inclusion de renforcement au sein du massif, il faut procéder tout d'abord à l'étude du cas simple, d'un sable seul sans renforcement, c'est une démarche nécessaire pour faire la comparaison. Les essais sur sable seul permettent d'obtenir la courbe de référence.

Trois essais ont été réalisés nous permettant de tracer les courbes moyennes des déplacements en tête et en pied de l'écran, ainsi que l'effort enregistré dans le dynamomètre placé en tête de l'écran, et ce, en fonction de la hauteur de l'écran.

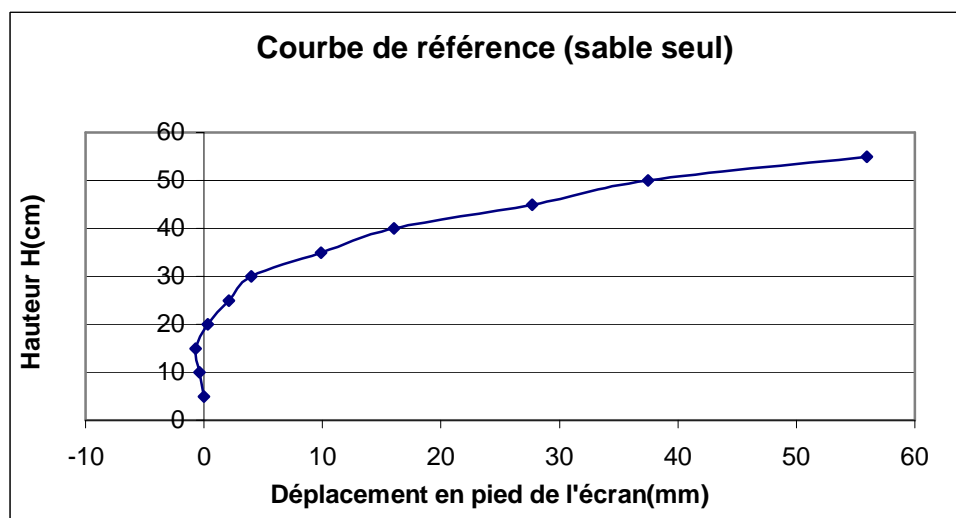


Figure.VII.1.Courbe de référence : déplacement en pied de l'écran $DP=f(H)$

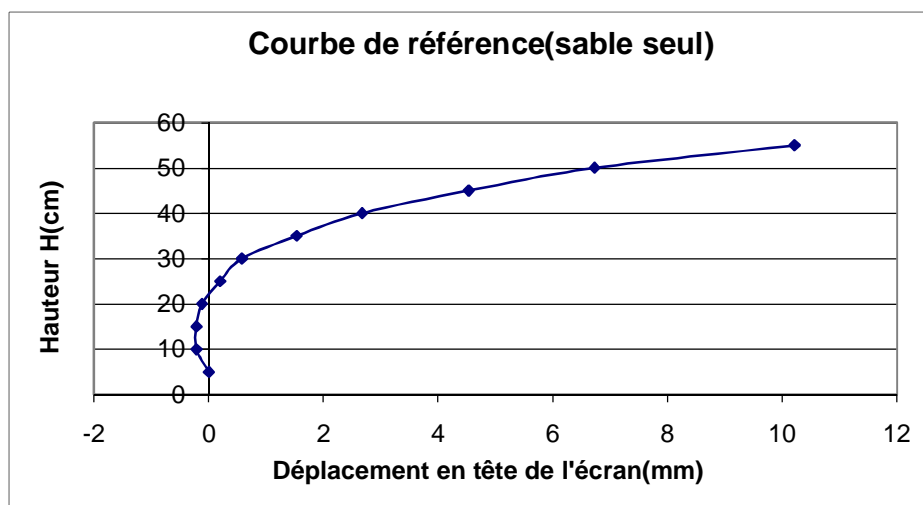


Figure.VII.2. Courbe de référence : déplacement en tête de l'écran $DT=f(H)$

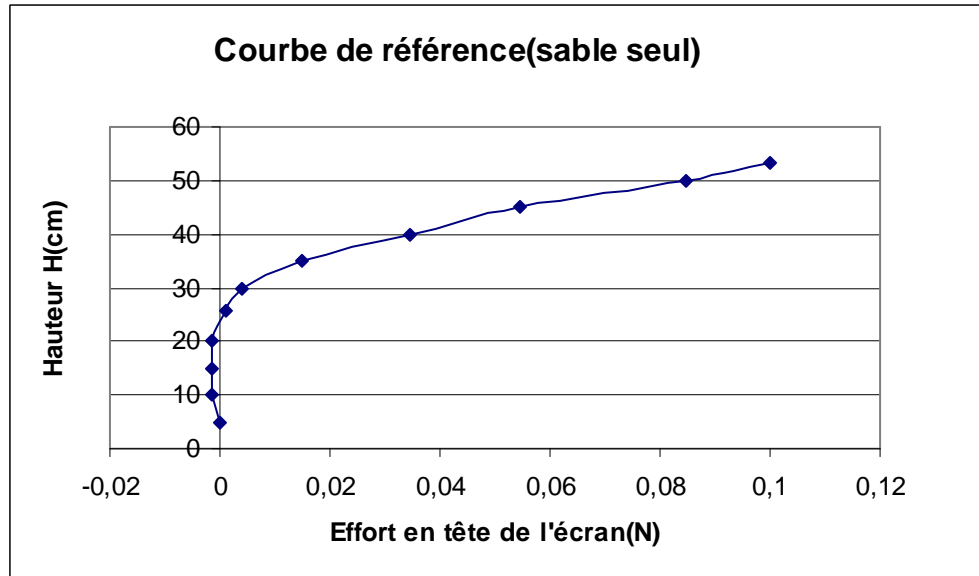


Figure.VII.3. Courbe de référence : effort en tête de l'écran

En examinant ces différentes courbes, on constate qu'elles sont similaires à la courbe de cisaillement d'un sable lâche. En effet, les déplacements augmentent rapidement avec la mise en place des couches de remblai derrière l'écran jusqu'à la rupture de l'ouvrage qui se traduit par un renversement suite à une rotation de l'ensemble écran-semelle.

Cette rotation semble prendre naissance à partir de la hauteur moyenne $H = 280$ mm du remblai. A partir de cette hauteur le renversement du mur et la ruine du massif commencent à se faire sentir, par les comparateurs qui deviennent très sensibles, jusqu'au renversement brutal en rupture.



Photo.VII.1. Renversement 'Ruine du mur'

Cette hauteur critique peut être calculée théoriquement en faisant l'équilibre des moments renversant et stabilisateurs comme indiqués ci-après :

$$\Sigma M_{\text{stab}} = M_{\text{st}} (\text{semelle}) + M_{\text{st}} (\text{écran}) + M_{\text{st}} (\text{remblai}).$$

$$= (1.285 + 3.249 + 2.820 H) = (4.534 + 2.820 H) \text{ kg cm}$$

$$\Sigma M_{\text{renv}} = 0.0022 H^3$$

$$H_{\text{crt}} = 36.58 \text{ cm} \quad \text{è} \quad H_{\text{crt}} \approx 37 \text{ cm}$$

On rappelle les données de calcul :

- Densité du remblai $\gamma_s = 0,0017 \text{ kg/cm}^3$
- Densité du bois formant l'écran et la semelle $\gamma_b = 0,0006 \text{ kg/cm}^3$.

On remarque donc que la hauteur critique expérimentale est proche de celle donnée par le calcul théorique.

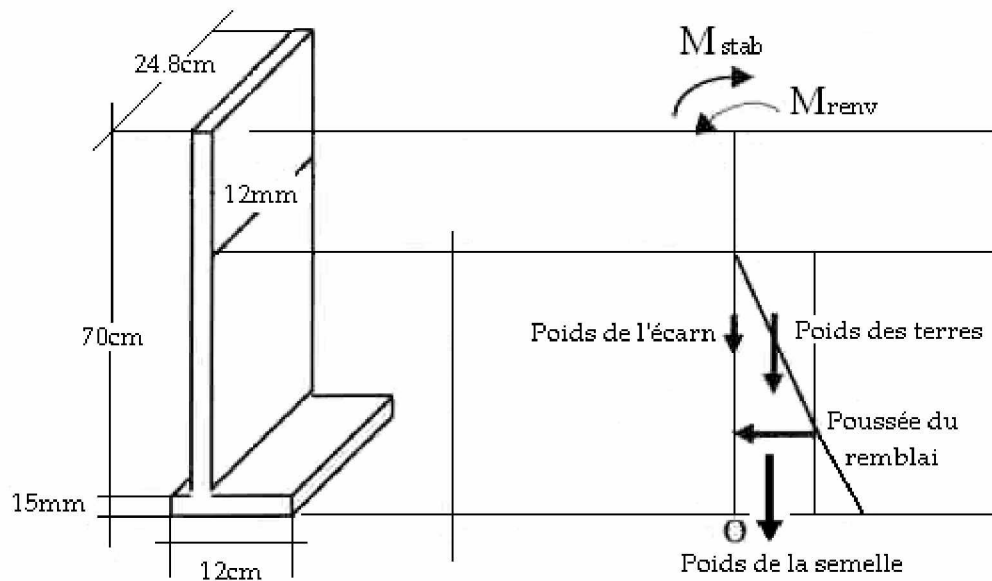


Figure.VII.4. Schéma de calcul de la hauteur de renversement

Lors de l'exécution de certains essais, on a observé des déplacements négatifs du mur, cela est dû essentiellement, lors de la mise en oeuvre du remblai, à une stabilisation de la semelle sur le massif de fondation qui présente une certaine rugosité, ces phénomènes parasites ne se stabilisent que lorsque la surcharge du sol est suffisante sur la semelle amont, notons que ces phénomènes n'affectent pas l'analyse des résultats.

Ce même phénomène parasite (déplacement négatifs) a été observé à l'I.N.S.A de Lyon (Figure.VII.5) sur des essais comparables, (essais effectués sur du sable seul de Fontainebleau ; $D_{min}=0.3$ mm; $D_{max}=1$ mm; densité constante de 1.43)

La hauteur moyenne notée du début de déplacement du mur étant de l'ordre de 230mm.

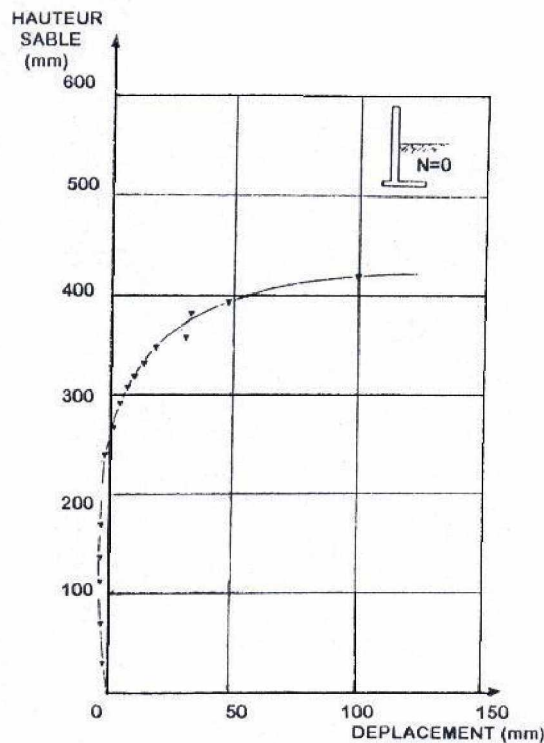


Figure.VII.5.Hauteur en fonction du déplacement pour le cas du sable seul
(Résultats I.N.S.A Lyon)

VII.4. ESSAIS AVEC DES INCLUSIONS DE RENFORCEMENT

La campagne expérimentale a permis de faire varier les paramètres suivants :

- ◆ La disposition des couronnes (en file ou orthorhombique)
- ◆ L'espacement entre les nappes "e"

En premier lieu nous constatons que pour tous les essais avec pneusol, la hauteur du massif au début du déplacement de l'écran est nettement supérieure à celle du sable seul et ceci quel que soit le cas de variation des paramètres. Ceci est dû à l'amélioration de la stabilisation du mur dès l'introduction du pneusol.

A partir du premier paramètre on peut illustrer l'influence du pourcentage de vide sur la réduction de poussée que l'on peut gagner éventuellement avec la disposition orthorhombique, tandis que le deuxième paramètre il permettra de voir l'influence et le rôle que peut jouer l'espacement entre les nappes de couronnes.

On signale toutefois, que dans cette série d'essai on a utilisé la forme à redans des nappes de couronnes, autrement dit, on commence avec une nappe de 9×4 couronnes et on fait diminuer une file à chaque 5cm pour avoir la forme recherchée, et on aura en dernier une disposition d'une nappe de 4×4 couronnes.

Cette forme contribue à décomposer et à réduire la poussée afin assurer une meilleure continuité et homogénéité avec le remblai adjacent.

VII.4.1 Influence des inclusions de renforcements sur la poussée du sol

Afin de mieux apprécier l'effet des inclusions de renforcements, on effectue une étude comparative à partir d'essais entre sable seul et sable renforcé avec des nappes de couronnes espacées de 5cm (figure.VII.6, VII.7., VII.8).

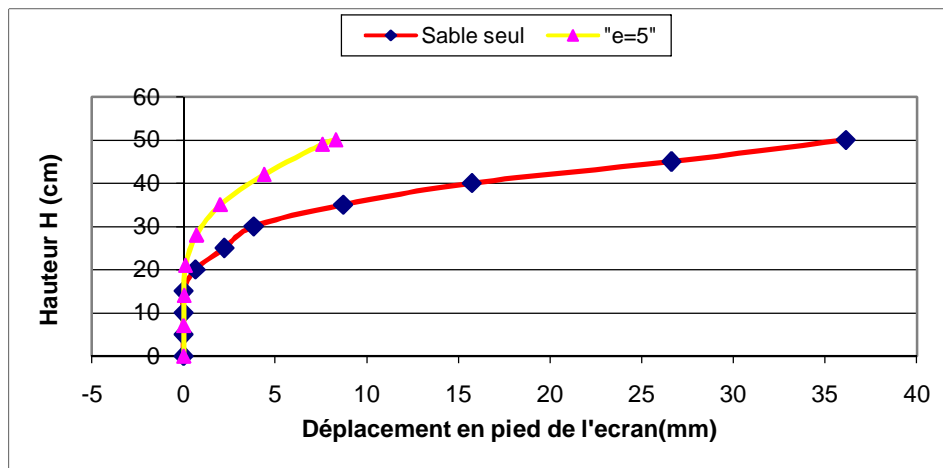


Figure.VII.6. Courbes comparatives : déplacement en pied de l'écran

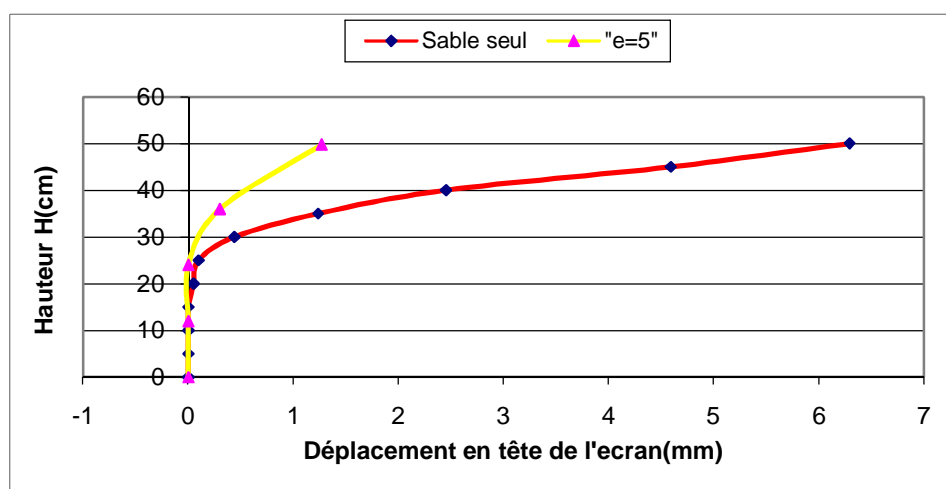


Figure.VII.7. Courbes comparatives : déplacement en tête de l'écran

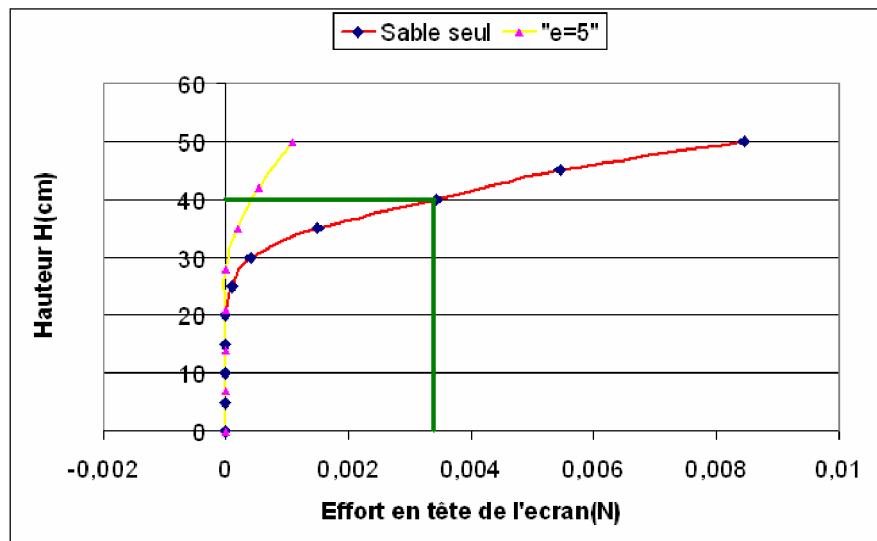


Figure .VII.8. Courbes comparatives : effort en tête de l'écran

Les figures précédentes, représentent successivement les déplacements en pied de l'écran, les déplacements et l'effort en tête de l'écran en fonction de la hauteur du remblai H.

L'examen des graphes de ces planches montre que les variations des déplacements et de l'effort dans le dynamomètre sont du type :

$$DT = \alpha H^{n1} \quad DP = \beta H^{n2} \quad F = \gamma H^{n3}$$

L'allure des courbes est similaire à celles du sable non renforcé avec un léger aplatissement et une légère amélioration de la réduction des déplacements de l'écran pour la même hauteur de remblai.

En observant ces trois courbes comparatives, on constate que les déplacements de l'écran, dont on a renforcé le sable derrière sont très faibles par rapport aux déplacements dus au sable non renforcé. A titre comparatif, et en prenant comme exemple l'effort en tête de l'écran, pour une hauteur de 40cm on enregistre un effort moins important pour un remblai renforcé avec des nappes de couronnes espacées de 5cm, par rapport à un remblai non renforcé (cas du sable seul).

La même constatation est faite pour les déplacements en tête et en pied de l'écran, on peut dire ici que la différence est très remarquable, on conclut alors que l'introduction de ces inclusions de renforcements au sein du massif de sol sert à intervenir dans la réduction de la poussée des terres derrière l'écran.

VII.4.2. Influence du mode de disposition des couronnes sur la poussée

L'objectif prévu de cette étude est de montrer l'influence du mode de disposition des nappes de pneus sur la réduction de la poussée derrière un mur de soutènement (comportement global de l'ouvrage ainsi renforcé).

Pour cela, on prévoit d'étudier deux modes différents de dispositions :

- § La disposition normale (en file) ;
- § La disposition orthorhombique.

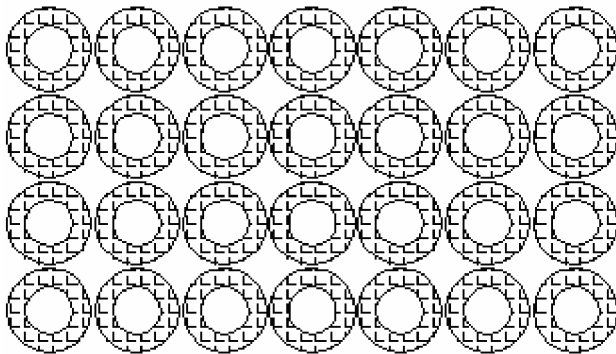
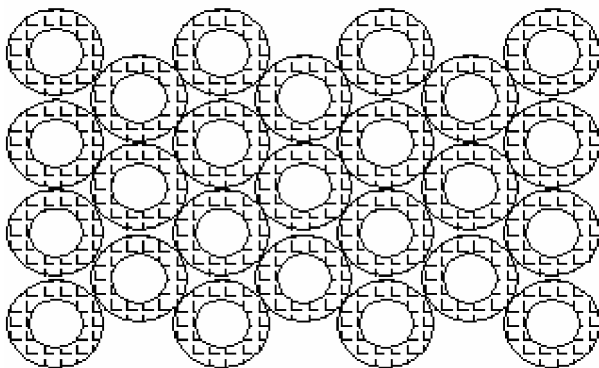


Figure .VII.9. Disposition en file



Figur.VII.10. Disposition orthorhombique

La disposition normale comme indiqué sur le schéma se caractérise par une forme très simple qui nous fournit une mise en œuvre facile et rapide, mais elle présente un indice de vide très élevé par rapport à la disposition orthorhombique et un arrangement instable ; le pneu s'appuie sur quatre points en cette disposition et sur six points en disposition orthorhombique ce qui classe cette disposition comme étant la plus favorable en terme de stabilité, reste alors à déterminer son pouvoir de réduire la poussée.

Avec cette disposition on tend vers des murs encore plus stables et plus 'renforcés', et de plus on peut atteindre des hauteurs de remblai importantes derrière un mur de soutènement sans qu'il y est de poussée importante.

Cette solution peut être envisagée dans le cas où on a des murs réalisés et qui sont sous dimensionnés, on pourra mettre en place des nappes d'inclusion type pneusol afin de diminuer de façon très appréciables la poussée.

Le mode de disposition joue donc un rôle très important. Afin d'étudier cette influence, on effectue une étude comparative entre une disposition en file et une disposition orthorhombique, on prendra comme référence le cas d'un espacement de 5cm.

Nota : il est à signaler que DN indique la Disposition Normale (en file), et DO signifié la Disposition Orthorhombique.

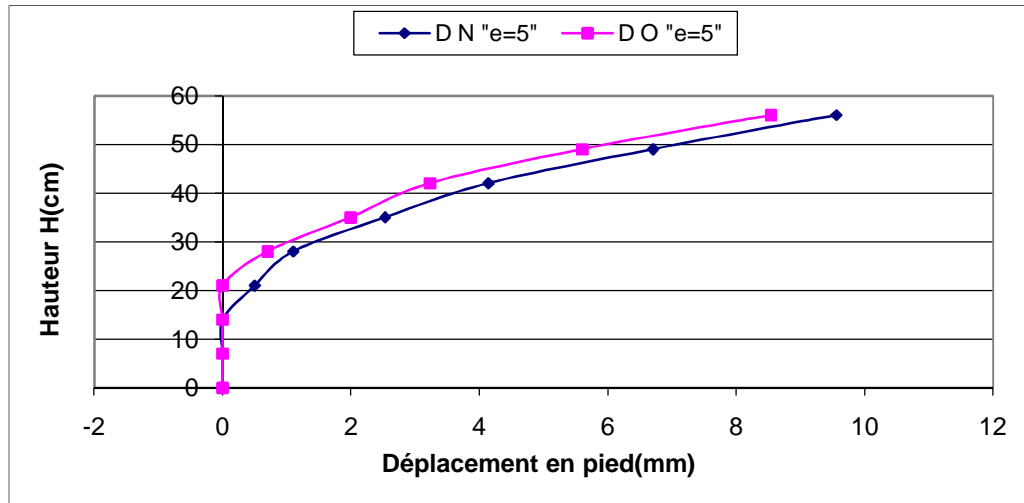


Figure.VII.11. Courbe comparative : mode en disposition en file et orthorhombique

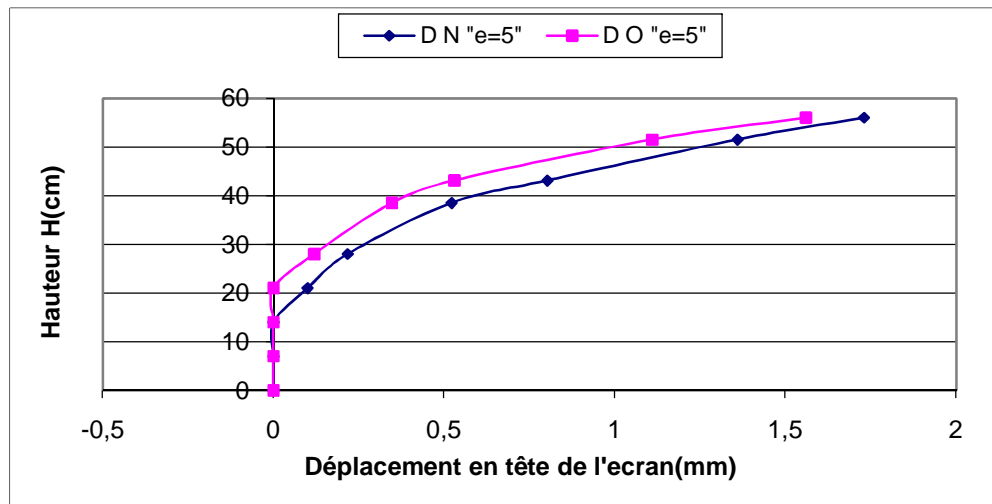


Figure.VII.12. Courbe comparative : mode en disposition en file et orthorhombique

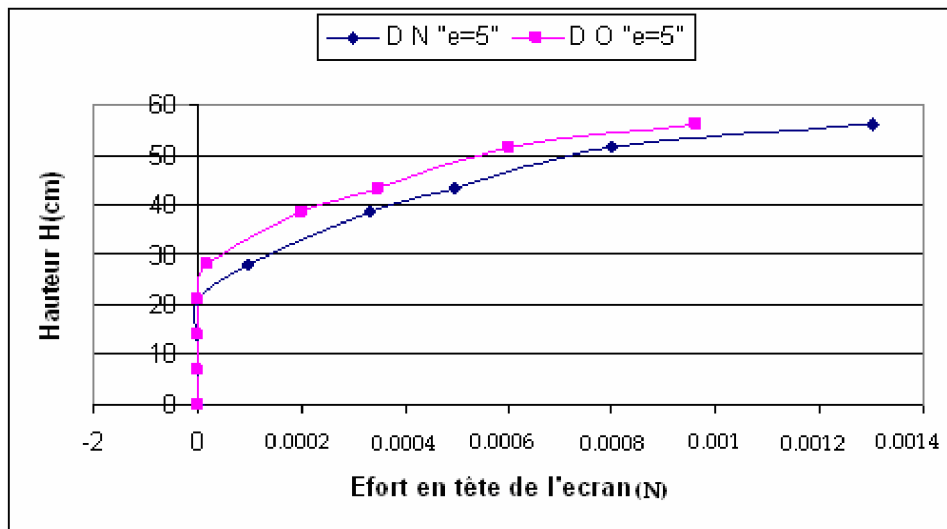


Figure.VII.13. Courbe comparative : mode en disposition normale et orthorhombique

Les premières constatations de ces courbes comparatives entre les deux dispositions, on remarque que pour une disposition orthorhombique (DO) les déplacements en pied et en tête de l'écran se font sentir à partir d'une hauteur moyenne de 250 mm, par contre pour une disposition en file (DN), les déplacements ne commencent à se faire sentir qu'à partir d'une hauteur de 150 mm. Ceci explique que la première disposition permet d'atteindre des hauteurs plus importantes, ce gain se traduit en même temps par une réduction de poussée, et donne ainsi une stabilité considérable à l'ouvrage.

Ainsi, on recommandera, d'adopter une disposition orthorhombique au niveau des ouvrages, ce mode influe d'une façon remarquable sur la poussée, avec bien sûr un effet réducteur sur les ouvrages de soutènement. Sans oublier que la présence des inclusions améliore toujours la stabilité du mur.

Dans l'étude par approche théorique dans le dernier chapitre, on simulera ces modes de dispositions, afin de définir des cellules de base et d'appliquer la méthode d'homogénéisation.

L'utilisation d'une méthode d'homogénéisation pour l'analyse de problèmes de pneusol permet de déterminer un comportement équivalent du matériau.

VII.4.3 Influence de l'espacement 'e' entre les nappes d'inclusion sur la poussée

Les figures.VII.14. VII.15, VII.16 illustrent l'influence de l'espacement 'e', pour un nombre de pneus fixé. On note la confirmation des observations précédentes.

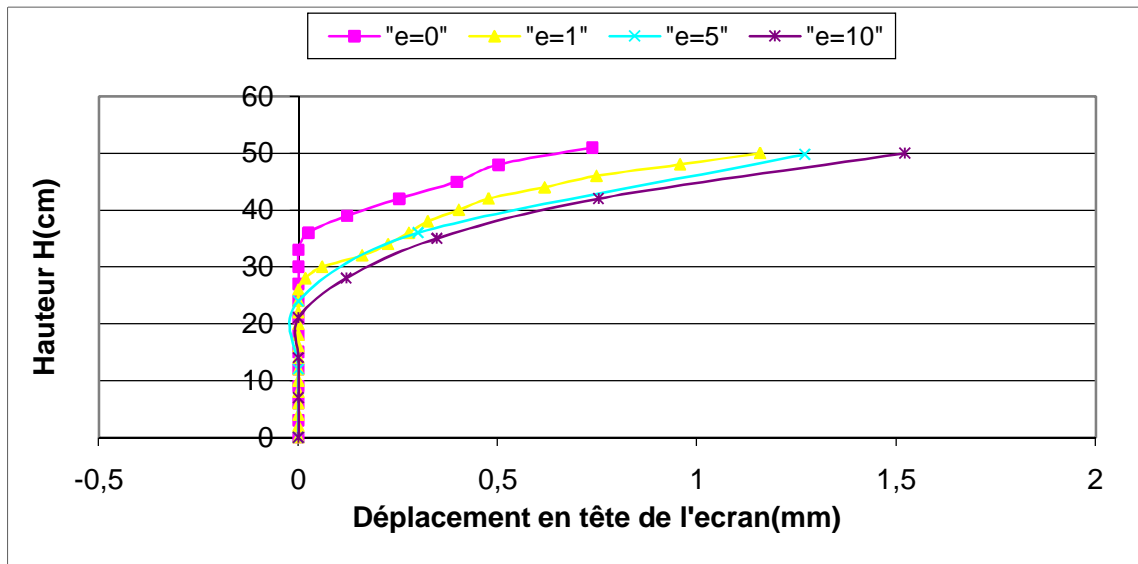


Figure.VII.14. Variation des déplacements de l'écran en fonction de la hauteur du remblai

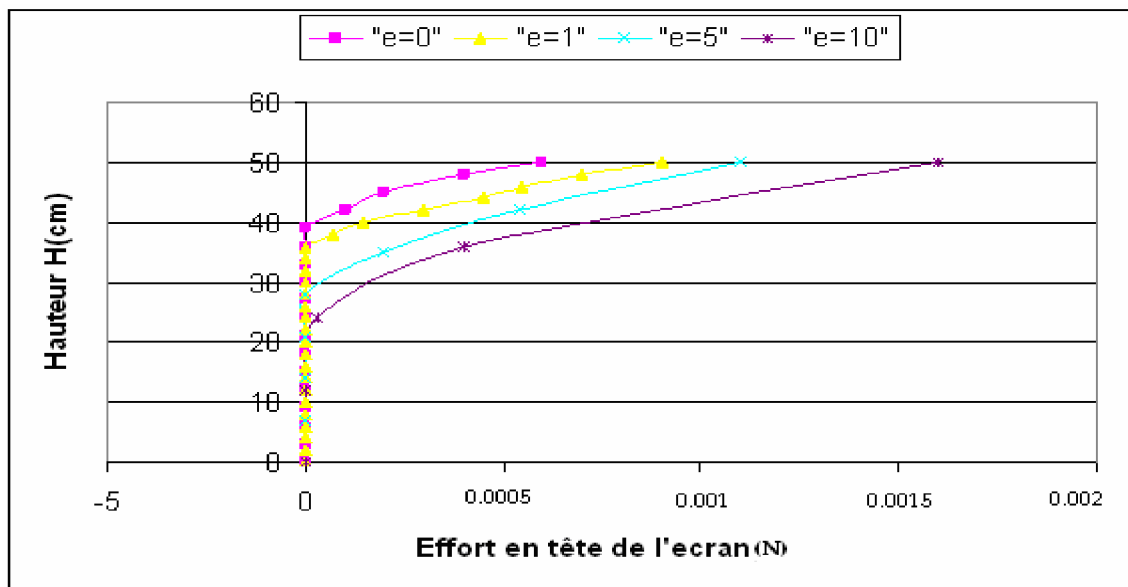


Figure .VII.15. Variation des déplacements de l'écran en fonction de la hauteur du remblai

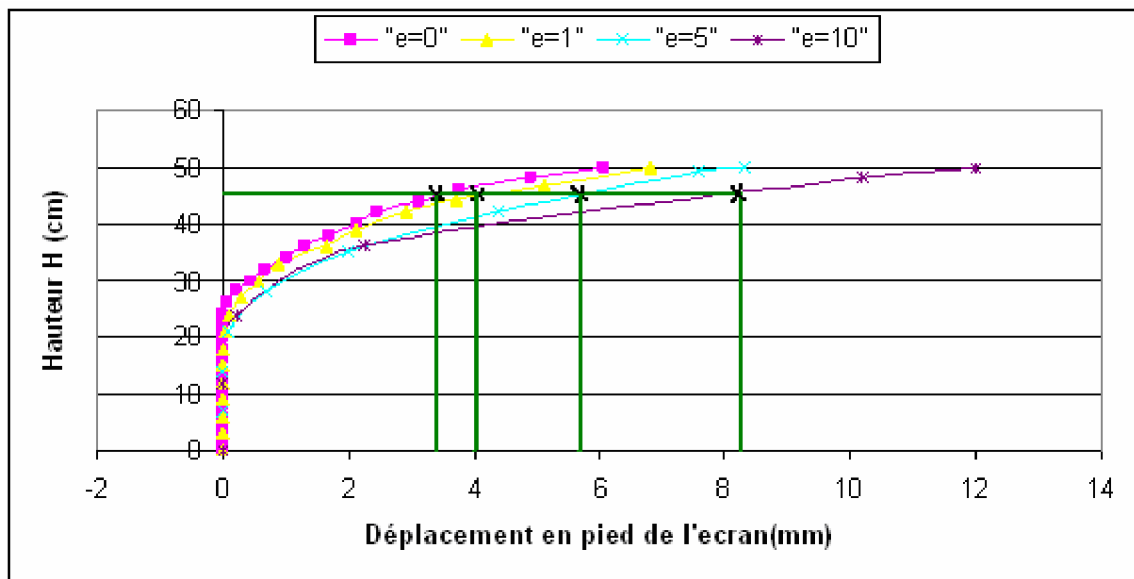


Figure.VII.16.Variation des déplacements de l'écran en fonction de la hauteur du remblai

Afin de comparer ces quatre courbes, on prend une hauteur de remblai fixe et on vérifie les déplacements correspondants à chaque cas. A titre d'exemple pour une hauteur de remblai fixée à 450 mm on enregistre un déplacement environ 8,5mm relatif à un espacement entre les nappes $e=100$ mm, et un déplacement de 5,5mm pour un espacement $e=50$ mm, et une valeur de déplacement de 4mm pour un espacement de 10mm et enfin un déplacement de 3,5mm pour des nappes des couronnes superposées (espacement des nappes $e=0$ mm). Il est à signaler que dans les quatre cas on n'arrive pas à la rupture, et les déplacements se font sentir pratiquement qu'à partir d'une hauteur moyenne de remblai de 240mm.

Les courbes sont pratiquement tous confondues jusqu'à une hauteur de 240mm, c'est à dire que déjà les espacements entre les nappes ne jouent aucun rôle puisque le mur avec des inclusions en pneusol ne subit que peu de déplacement par le fait qu'il soit peu sollicité. Par contre lorsqu'on s'approche de la hauteur critique, son effet entraîne une diminution remarquable du déplacement.

Dans le cas de la disposition orthorhombique des pneus, on conclut que l'efficacité optimale du renforcement est obtenue avec un espacement entre les nappes de $e=0$ mm (nappes d'inclusions en pneus superposés).

Enfin, nous constatons que la rupture du sable non renforcé est brutale, alors que la présence d'inclusions en pneumatiques usagés avec des espacements différents, traduit une rupture progressive.

Les simulations de ces essais que l'on a effectués, ont permis de retrouver qualitativement le gain de résistance en fonction de l'espacement des nappes utilisées.

Le pneusol améliore la stabilité d'un mur de soutènement avec un effet réducteur de la poussée.

VII.4.4. Relation déplacement du mur en fonction de la hauteur de remblai

En fixant le déplacement de l'écran, ainsi que le nombre des couronnes par nappe, et en faisant varier l'espacement entre les nappes des couronnes, on obtient des courbes de variation de la hauteur du remblai en fonction de l'espacement 'e'.

Le tableau suivant, présente des résultats obtenus, pour des exemples de déplacements donnés et fixés à $\Delta L = 0, 1, 2$ et 5 mm (Figure.VII.17.).

Tableau.VII.2. relation déplacement du mur en fonction de la hauteur de remblai

ΔL (mm) Déplacement fixé	2					5				
e (cm) Espacements des nappes	0	1	5	10	15	0	1	5	10	15
h (cm) Hauteur du remblai	45	41	39	38	36	63	59	57	54	48

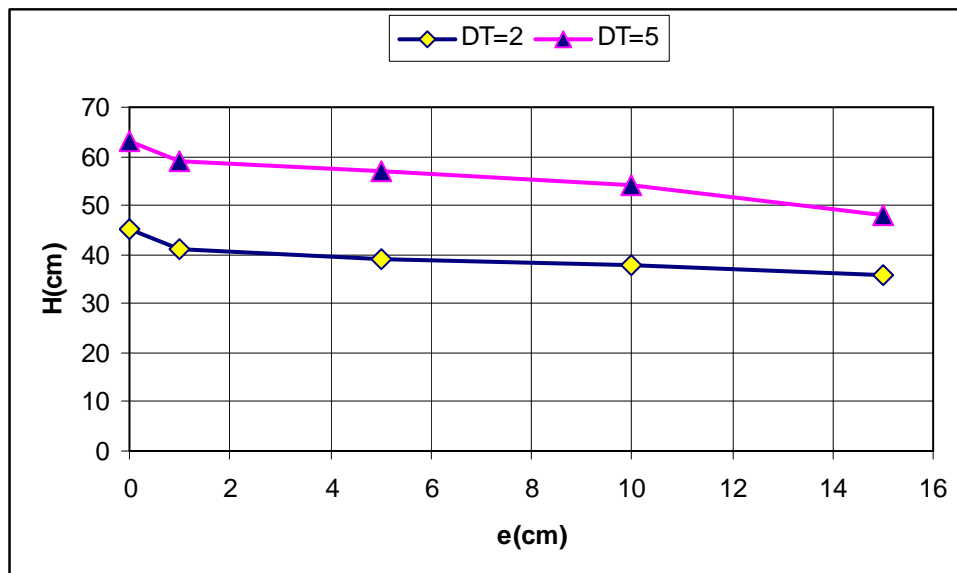


Figure .VII.17. Variation de la hauteur en fonction de l'espacement pour un déplacement fixe.

Ces résultats ont été obtenus à partir d'un sable renforcé par des inclusions en nappes de dimension de 4×4 couronnes

On constate que plus cet espacement est faible, pour un déplacement donné, plus la hauteur de remblai correspondante à ce déplacement est grande.

Le gain de la hauteur de rupture (correspondant à un déplacement de 5 mm) décroît lorsque l'espacement entre les nappes de Pneusol augmente, le renforcement n'étant sensible que pour des espacements inférieurs à environ trois fois l'épaisseur des renforts.

VII.4.5. Point d'application de la force de poussée.

On notera en finalité qu'à partir de toutes les courbes et des résultats obtenus, on a pu déduire la hauteur moyenne du début de déplacement de l'écran qui est de l'ordre de 275 mm (moyenne de tous les essais de la campagne expérimentale).

Ainsi, le tableau comparatif entre nos résultats et les résultats obtenus à l'INSA de Lyon, suivant donne les différents points d'application pour le cas du sable seul et les différents espacements :

Tableau.VII.3. Tableau comparatif du point d'application de la force de poussée

Type d'essai	Sable seul	Nappes Esp : e=0 cm	Nappes Esp :e=1cm	Nappes Esp :e= 5cm	Nappes Esp :e=10cm
Résultats ENTP	240 mm	300mm	290mm	260mm	250mm
$\frac{x}{H}$	0.40	0.42	0.41	0.37	0.35
Résultats INSA	230 mm	280 mm	260 mm	250 mm	-
$\frac{x}{H}$	0.33	0.40	0.37	0.36	-

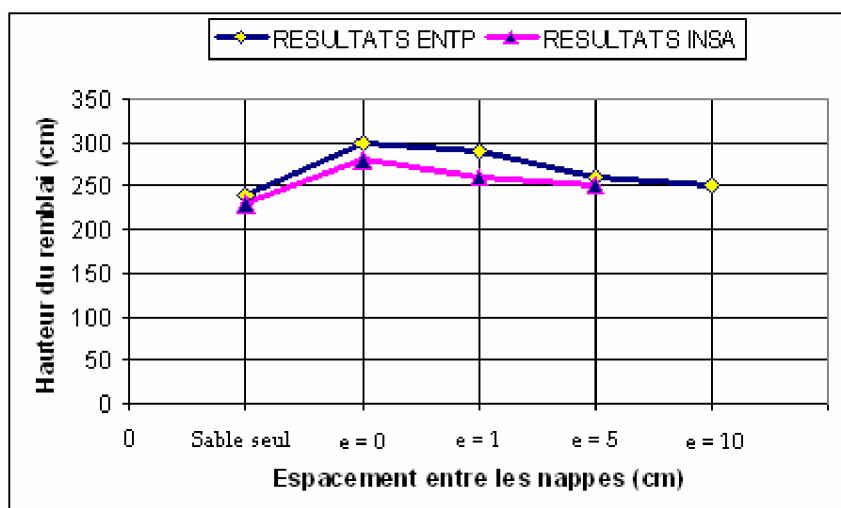


Figure.VII. 18. Courbe comparative du point d'application de la force de poussée.

On notera que les résultats ne sont pas trop dispersés, et que les valeurs sont pratiquement confirmées par ceux de l'INSA. On aura à cet effet une valeur moyenne du point d'application de 275 mm par rapport à la valeur théorique qui serait de 233 mm. On notera aussi que pour les essais effectués à l'INSA de Lyon, il a été utilisé des couronnes de pneus en caoutchouc à l'échelle 1/20, qui justifie cette légère différence.

On notera toutefois, que pour le sable renforcé par les nappes, les points d'application sont légèrement élevés, vu que le remblai ainsi renforcé a acquit une certaine cohésion.

A titre comparatif, nous avons dressé le tableau.VII. 4 à partir d'une recherche bibliographique, donnant le rapport $\frac{x}{H}$ pour différents modèles réduits avec un massif d'essai en sable seul de caractéristiques différentes.

Tableau.VII.4. Tableau comparatif du point d'application selon plusieurs auteurs

Auteurs		H (cm)	φ	$\frac{x}{H}$
FELD	(1923)	150	31.70	0.340
JENCKIN	(1932)	76	33	0.380
TERZAGHI	(1934)	150	51.40	0.453
TSAGARELLI	(1965)	200	31	0.430
		250	31.40	0.420
		300	32.30	0.430
FAOU	(1966)	30	39.30	0.420
FAGNOUL	(1972)	50	38	0.340
BOURDEAU	(1977)	50	38	0.400
BELABDELOUAHAB	(1988)	30	38	0.380
		40	38	0.380
MEKSAOUINE	(1993)	30	38	0.380
		40	38	0.380
ENTP	(2008)	70	31	0.400

VII.5 ESSAIS PARTICULIERS

VII.5.1. Essais de traction

Comme citer dans le chapitre V précédant, des essais particuliers ont été réalisés afin de compléter notre étude, pour bien comprendre ce phénomène et le comportement des couronnes confectionnées, et en plus pour évaluer la résistance à la traction de ces couronnes.

Pour cela nous avons conçus et réalisé un bâti d'expérimentation de mesure pour l'étude de traction des inclusions de couronnes de pneus à l'échelle 1/20.

La résistance de traction de ces couronnes de pneus, a été déterminé au moyen d'essais de traction simple sur un échantillon de 12 couronnes, à l'aide d'un portique doté d'une poulie à travers laquelle passe un fil étalonné attaché d'un côté à la couronne et de l'autre liée à une tare pouvant supporter des poids et s'appuyant sur un comparateur.

La courbe ci-après donne la relation effort-allongement des couronnes utilisées, la contrainte de rupture est égale à :

$$\sigma^r = \frac{F}{S} \frac{1,5kg}{(6-3) \times 1,4cm^2} \text{ Soit } \sigma^r = 0,357kg/cm^2$$

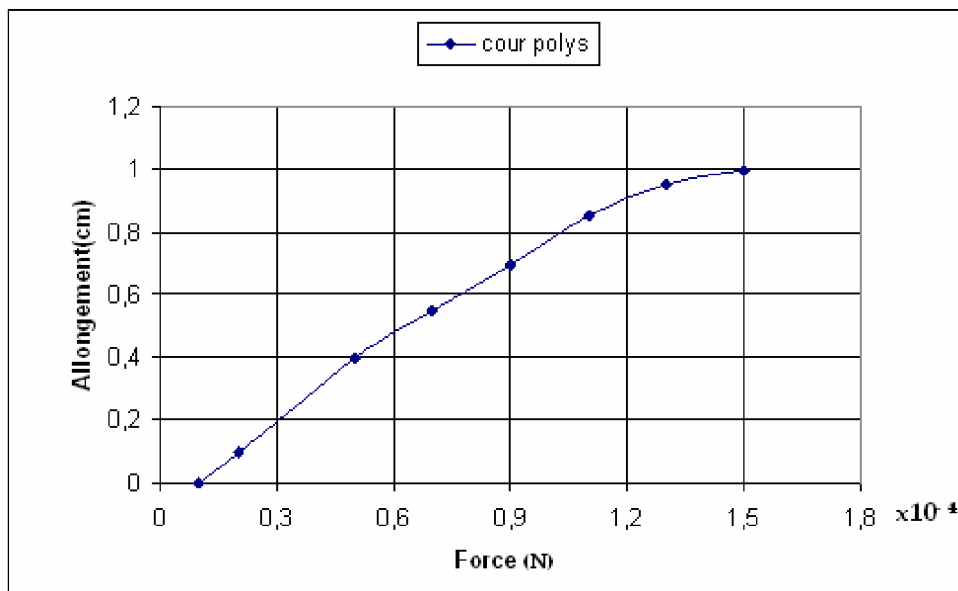


Figure .VII.19.Courbe de relation effort-allongement d'une couronne

La pesé sur balance électronique d'un élément de polystyrène de $(10 \times 10 \times 5)cm^3$ a donné un poids de 0,2 g ce qui donne une densité de : $\frac{0.2}{10 \times 10 \times 5} = 4 \times 10^{-4} g/cm^3$

VII.5.2 Essais d'arrachements des couronnes noyées dans le remblai

Rappelons que cet essai a été envisagé pour examiner le mode de rupture des nappes de renforcement noyées dans le sol et d'évaluer la contrainte de rupture de ces renforcements soit par glissement (perte d'adhérence) ou par cassure.

Pour cela, nous avons examiné plusieurs cas en vu d'illustrer la variation de la traction en fonction de la dimension de la nappe de couronne:

- § Une couronne noyée dans le sol
- § Une nappe de 4 × 4 couronnes
- § Une nappe de 4 × 6 couronnes
- § Une nappe de 4 × 9 couronnes

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous :

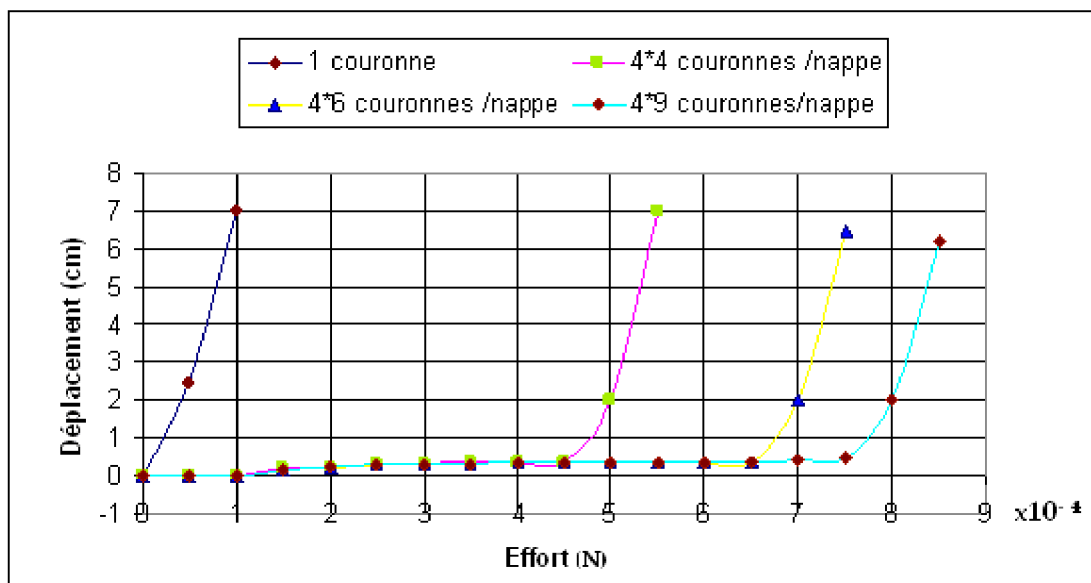


Figure.VII.20.Traction des nappes dans le remblai H=5cm

En analysant cette courbe comparative, et si on prend comme exemple le point de référence relatif à un déplacement de 2cm, on remarque qu'on obtient cette valeur avec une seule couronne en mettant un poids de 0.5N seulement, tandis que pour une nappes de 4 × 4 couronnes on arrive jusqu'à 0.1N, pour une nappe de 4 × 6 couronnes on arrive jusqu'à 0.7N et enfin 0.85N pour une nappe de 4 × 9 couronnes.

Ces constatations nous permettent d'affirmer que les déplacements diminuent en augmentant la longueur de la nappe de couronne.

VII.5.3. Essais particulier (développement de la ligne de rupture)

Afin d'apprécier et de préciser la forme du prisme de rupture que ce soit à la surface ou au sein du massif, plusieurs méthodes plus ou moins complexe existent pour de telles observations et ceci pour les deux états, de poussée ou de butée.

Dans notre expérimentation, nous avons effectués trois (03) essais spéciaux et très minutieux, nous avons optés pour la méthode avec des bandes de sable coloré au bleu de méthylène afin d'étudier et de déterminer la ligne de rupture au sein même du massif.

Nous donnerons en premier lieu les observations à la surface du massif, puis en second lieu les observations au sein du massif.

VII.5.3.1. Observations à la surface du massif

Parallèlement à la mesure des efforts et la mesure des déplacements dans notre campagne expérimentale, nous avons procédé au relevé du cône de rupture et de ces limites telles qu'elles apparaissent à la surface du massif pour les essais avec massif non renforcé ou renforcé par les nappes de pneumatiques et ceci systématiquement à chaque essai.

On a observé en général la formation d'un affaissement derrière l'écran central de mesure (écran en mouvement). Le développement de la surface de rupture à l'arrière de l'écran étant noté "a" [figure.VII.21].

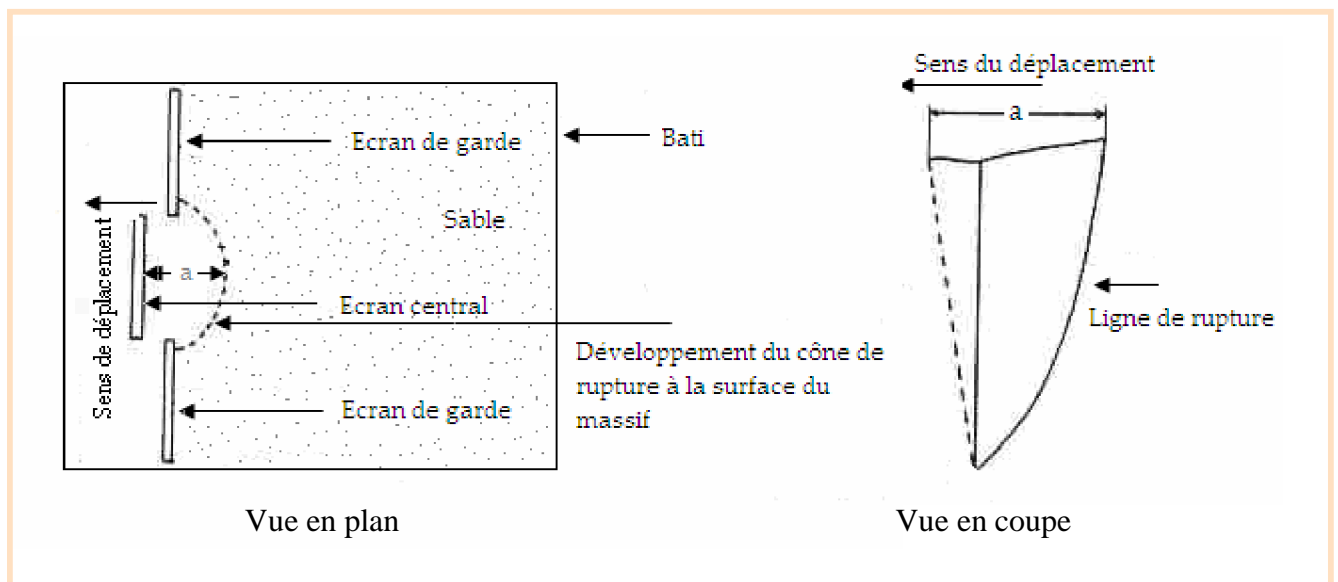
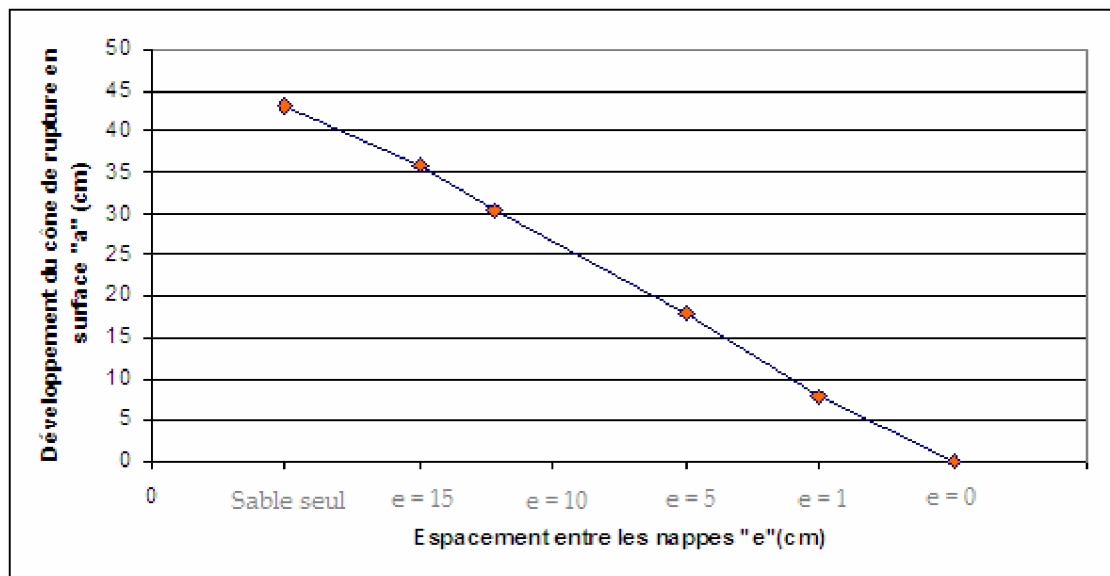


Figure.VII.21.Développement du prisme de rupture

Dans le tableau suivant, sont repris les valeurs moyennes de "a" de tous les essais de notre campagne expérimentale, nous notons dans la figure.VII.22 que la diminution du développement du cône de rupture à l'arrière de l'écran est fonction de la diminution de l'espacement des inclusions en nappes de pneus.

Tableau.VII.5. Valeurs de "a" en fonction de l'espacement et l'état du massif

Etat du Massif	Sable Seul	Sable Renforcé				
Espacement	-----	e=15 cm	e=10cm	e=5cm	e=1cm	e=0cm
Développement du cône de rupture en surface "a" (cm)	43	36	32	18	6	0

Figure.VII.22. Valeurs expérimentales $a=f(e)$ du développement du prisme de rupture à la surface du massif

On constate donc que la relation ainsi obtenue pour des essais avec un massif renforcé suivant l'espacement "e" des nappes d'inclusions, peut être prolongée jusqu'à la valeur trouvée pour le cas des essais pour sable seul (cas de référence).

Inversement lorsque l'espacement devient nul ($e \rightarrow 0$), on tend vers un mur poids stable juxtaposé au mur en "T" renversé.

L'analyse des résultats montre donc que l'espacement "e" entre les inclusions de renforcement est un paramètre qui influe beaucoup sur le développement de la surface de rupture.

Concernant les essais particuliers que nous avons effectués avec les bandes de sable coloré, nous avons obtenus un développement (figure.VII.23) en surface pour le cas du sable seul plus marqué par rapport à un massif en pneusol.

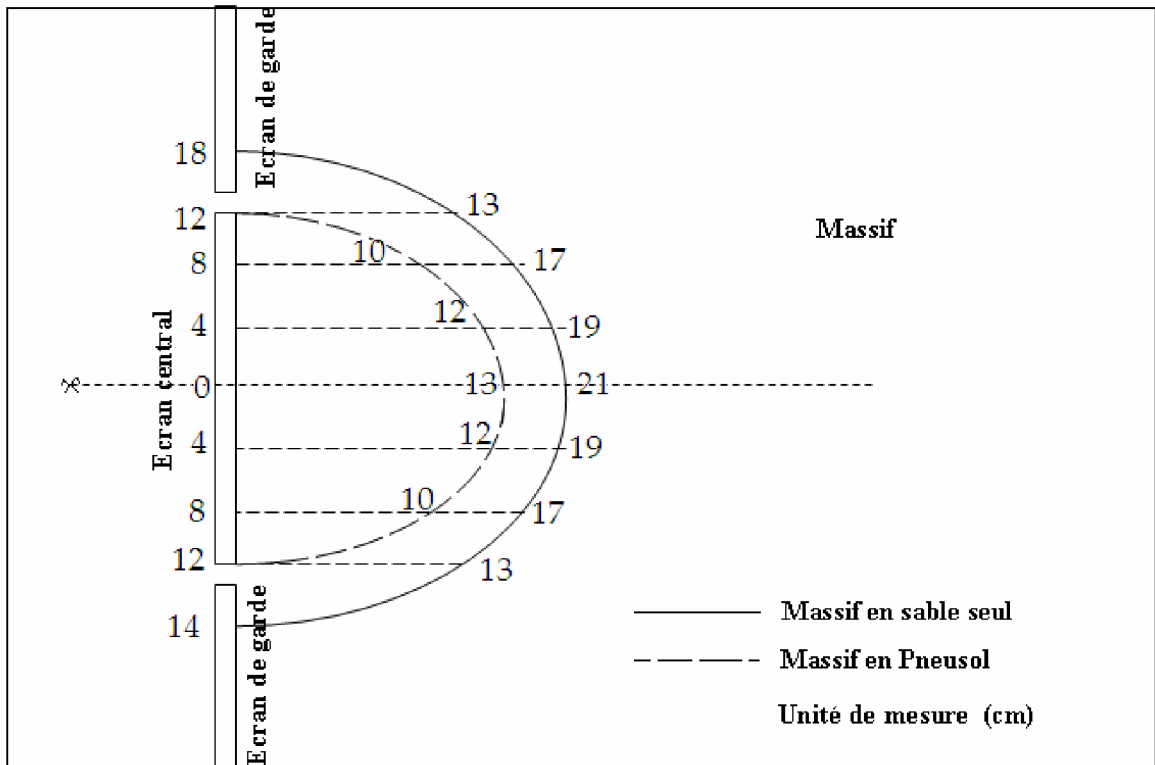


Figure.VII.23. Développement en surface des prismes de rupture

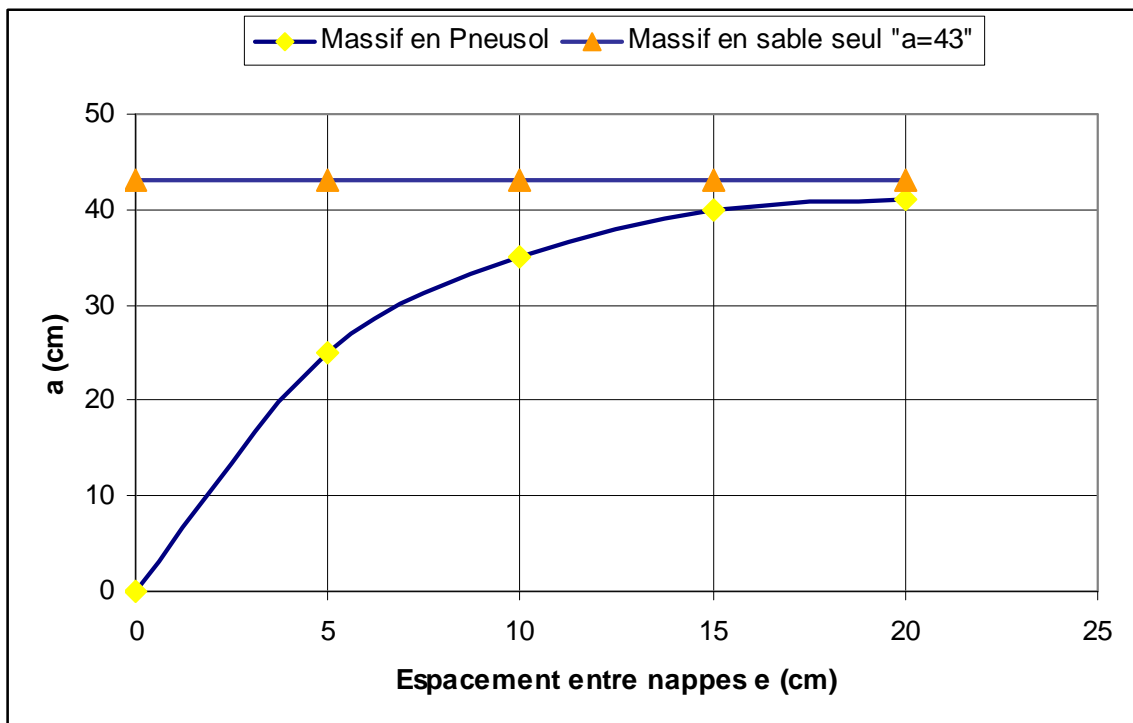


Figure.VII.24. Valeurs expérimentales $a=f(e)$ du développement du prisme de rupture à la surface du massif

VII.5.3.2. Observations au sein du massif

A. Les différentes méthodes d'observations

Il existe plusieurs méthodes plus ou moins complexes pour l'analyse et l'observation dans le plan vertical, de l'évolution de la ligne de rupture à l'intérieur du massif.

A titre d'exemple, on peut observer la ligne de glissement, en superposant des photographies prises à travers un côté vitré de la cuve d'essais. Mais en raison des frottements latéraux réduisant le coin de glissement au voisinage des parois, cette méthode n'est pas rigoureuse.

BOURDEAU (1977), par expérience faite sur un sable à l'état lâche montre effectivement que la surface de glissement n'est pas rectiligne au niveau de la surface libre ; celle-ci s'étend beaucoup plus au centre du massif que le long des parois latérales (figure.VII.25)

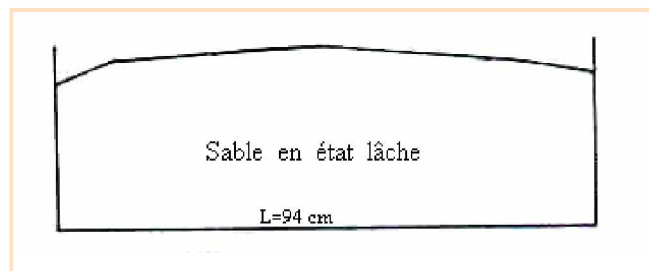


Figure.VII.25. Ligne de glissement observée à la surface d'un massif de sable lâche sur modèle réduit (BOURDEAU 1977)

Pour cette raison les lignes de glissement doivent être déterminées à l'intérieur du massif.

ROSCOE et AL en 1963 à CAMBRIDGE, a utilisé une méthode qui consiste en la mise en place d'objets métalliques (billes) dans le massif, lesquels ont été photographiés aux rayons X au cours de leur déplacement (figure.VII.26).

Cette méthode permet d'observer les mouvements du massif à partir d'un réseau de bille en plomb introduit dans le plan médian du massif. A chaque déplacement de l'écran un cliché donne la position correspondante des billes, l'analyse de ces clichés permet de construire par la suite le champ de déplacement.

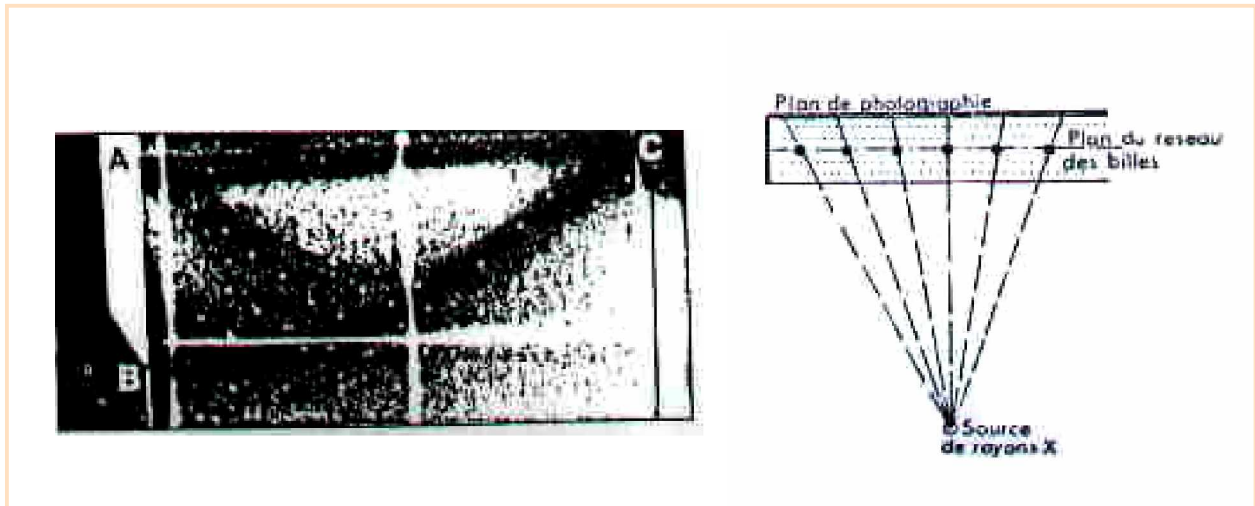
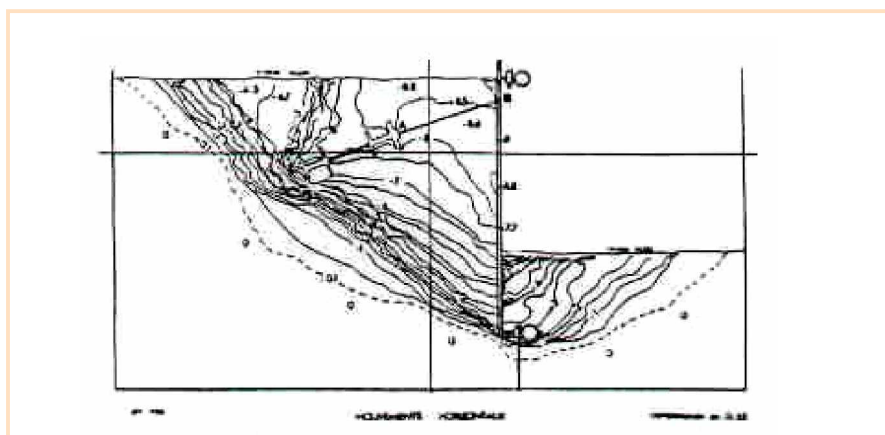


Figure.VII.26. Observation par rayon X (ROSCOE 1963)

Le champ de déformation peut être aussi déterminé au sein du massif par la méthode de la stéréophotogrammétrie. Celle-ci consiste en la prise de clichés successifs d'une face du modèle à diverses phases de l'expérimentation par observation stéréoscopique. Les déplacements apparaissent alors sous forme de relief après superposition des diverses prises.

Notons que dans le cas d'un modèle utilisant du sable, cette méthode nécessite la présence d'une face vitrée et un traitement coloré du sable.

Cette technique a notamment été utilisée par BUTTERFIELD et AI (1970), BEYNET et AI (1977), BENEFICE et AI (1979), DESCRUES et AI (1984), KASTNER et AI (1986), F. MASROURI (1986) [figure.VII.27].

Figure.VII.27. Résultats stéréophotogrammétriques obtenus sur rideau de palplanches
(F. MASROURI 1986)

Il existe aussi, une autre méthode qui consiste à introduire des colonnes verticales de sable coloré, de propriétés semblables à celles du sable étudié lors de la mise en place

du massif (figure.VII.28). Après l'essai, afin de noter les nouvelles coordonnées des colonnes le massif est excavé par couches. On notera que pour cette technique, l'essai est très complexe par le fait d'introduire des colonnes en disposition verticale.

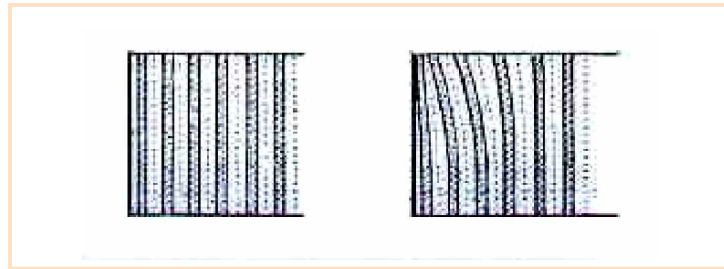


Figure.VII.28. Détermination des lignes de glissement avec des colonnes de sable coloré.

.B. Méthode adoptée.

Vu l'indisponibilité des méthodes citées précédemment, et qui sont très complexe, nous avons opté dans notre expérimentation la méthode des bandes horizontales de sable coloré dans le massif.

Le sable coloré a les propriétés semblables à celles du sable étudié, il a été teinté au bleu de méthylène.

Cette méthode a été aussi préférée dans notre expérimentation par rapport aux autres méthodes (Rayon X, stéréophotogramétrie...) pour sa facilité de mise en œuvre

.C. Description et résultats d'essais.

Pour l'observation de la forme du prisme de rupture au sein du massif, 3 essais spéciaux ont été exécutés en utilisant la méthode d'observation des bandes horizontales de sable coloré.

Nous signalerons toutefois, que la préparation et la mise en place de ces bandes étant relativement très longues, nous nous sommes limités à trois essais. Effectivement il fallait colorier une cuve de sable au bleu de méthylène, par la suite il fallait sécher ce dernier dans des étuves, il fallait par la suite exécuter l'essai avec beaucoup d'adresse et de précision, par la mise en place de ces couches et faire le lever des mesures des déplacements et de celle de l'effort sur l'écran en même temps.

A la fin de l'essai, le massif a été humidifié avec de l'eau, afin de lui de donner une légère cohésion. On peut faire ainsi des coupes stables verticales permettant l'observation des lignes de rupture au sein même du massif.

Le 1^{er} essai a été effectué sans nappes d'inclusion en pneus, qui consisté à mettre en place des bandes de sable coloré de 1cm d'épaisseur entre des bandes de sable non coloré de 4 cm d'épaisseur (photo.VII.2.) en utilisant des écrans lisses.

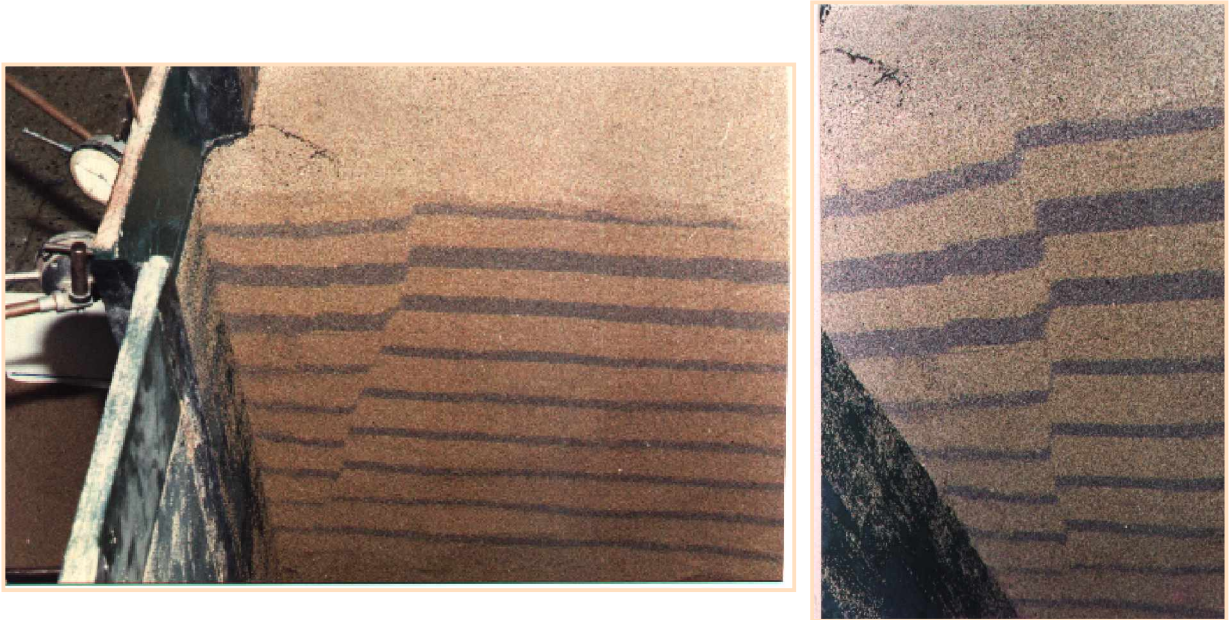


Photo.VII.2. Observation du prisme de rupture au sein du massif sans inclusions de pneus.

Le 2^{ème} essai, a été réalisé avec le même principe que précédemment, sauf qu'une répartition de nappe d'inclusion en pneus (4x5) a été ajoutée au niveau de la bande de sable non coloré (bande de 4cm d'épaisseur) (photo.VII.3). Les pneus ont été placés sans attaches.



Photo.VII.3. Observation du prisme de rupture au sein du massif avec inclusions de pneus.
(Cas des inclusions en nappes sans attaches)

Le 3^{ème} essai, a été réalisé avec le même principe que précédemment, sauf qu'une répartition de nappe d'inclusion en pneus (4x5) a été ajoutée au niveau de la bande de sable non coloré (bande de 4cm d'épaisseur) (photo.VII.4.), mais on a rajouté des attaches entre les pneus, en prenant aussi le cas des nappes attachées à l'écran.

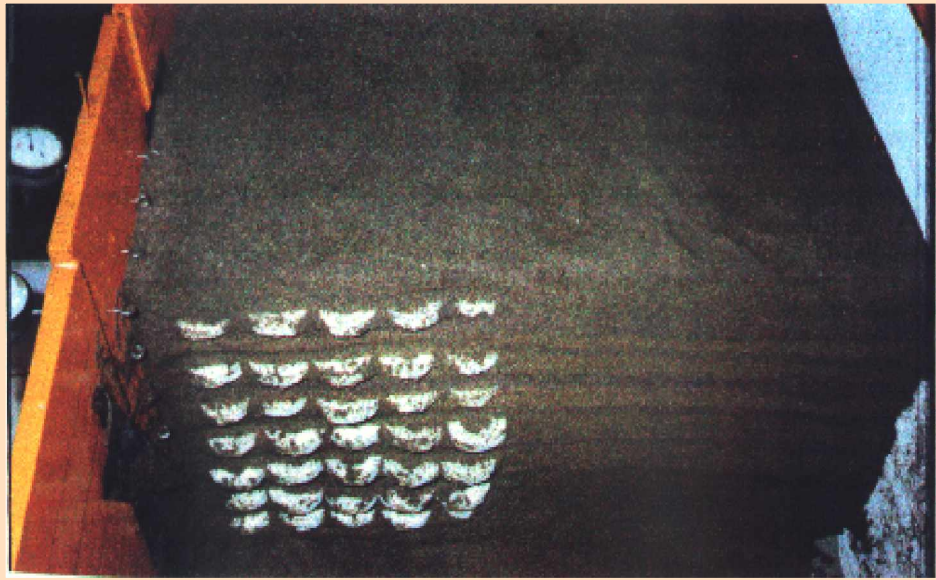


Photo.VII.4. Observation du prisme de rupture au sein du massif avec inclusions de pneus.

Le relevé au sein du massif a été effectué selon le schéma suivant (figure.VII.29), par rapport à l'écran central de mesure et les écrans de gardes.

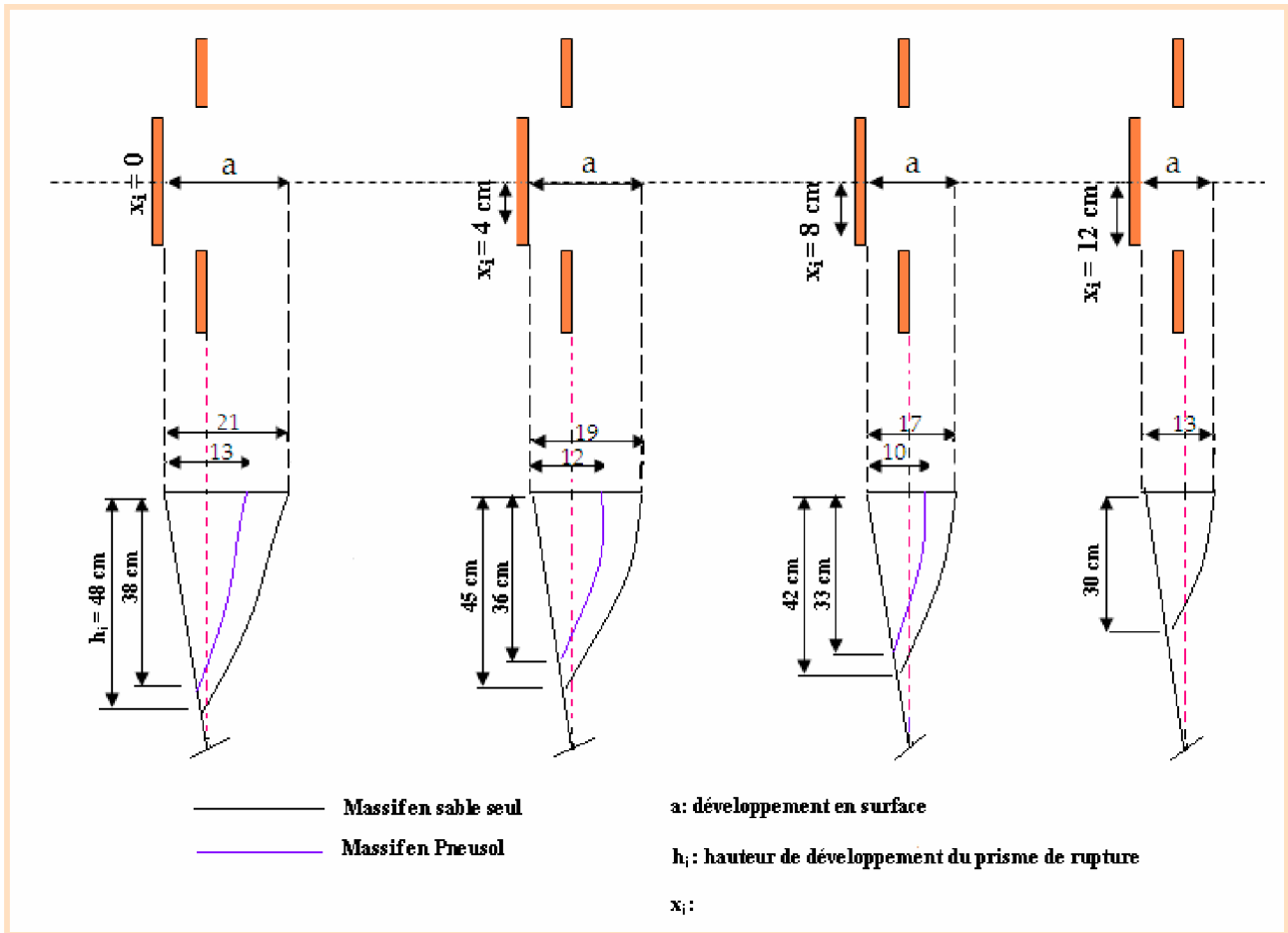


Figure.VII.29. Vue en plan du relevé et des coupes effectuées au sein du massif.

La superposition des coupes ainsi obtenues au sein du massif (figure.VII.29), nous montre bien l'influence de la présence des inclusions en nappe de pneus par rapport au cas du sable seul.

Nous avons les mêmes observations sur la figure.VII.30 et la figure.VII.31, la nette différence quant à l'évolution de la ligne de rupture.

On notera que x_i , correspond au point de relevé de la coupe effectuée par rapport à l'extrémité de l'écran central de mesure.

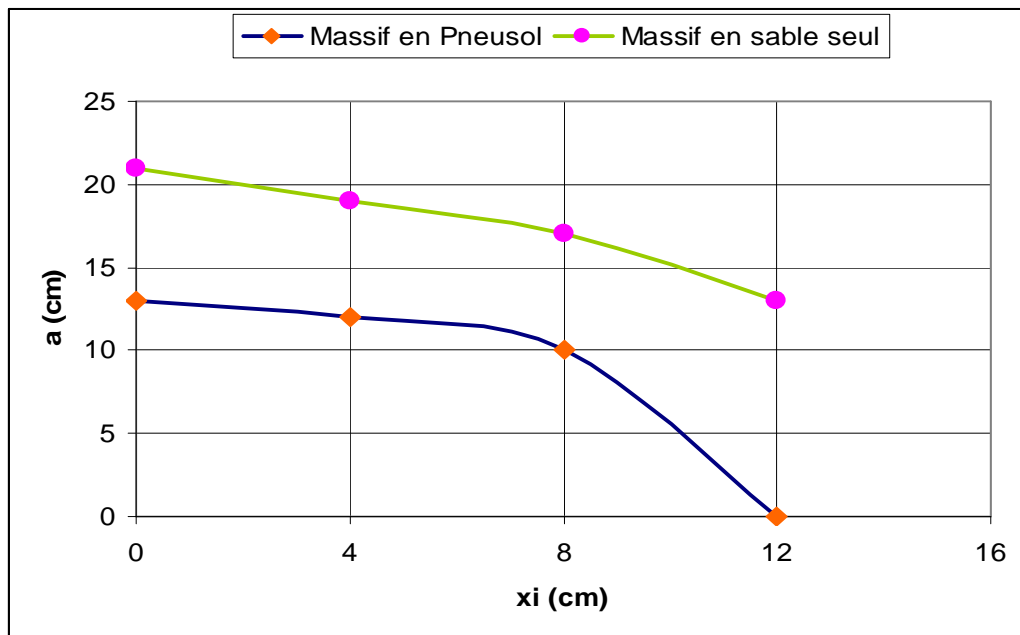


Figure.VII.30. Evolution du cône de rupture à la surface du massif

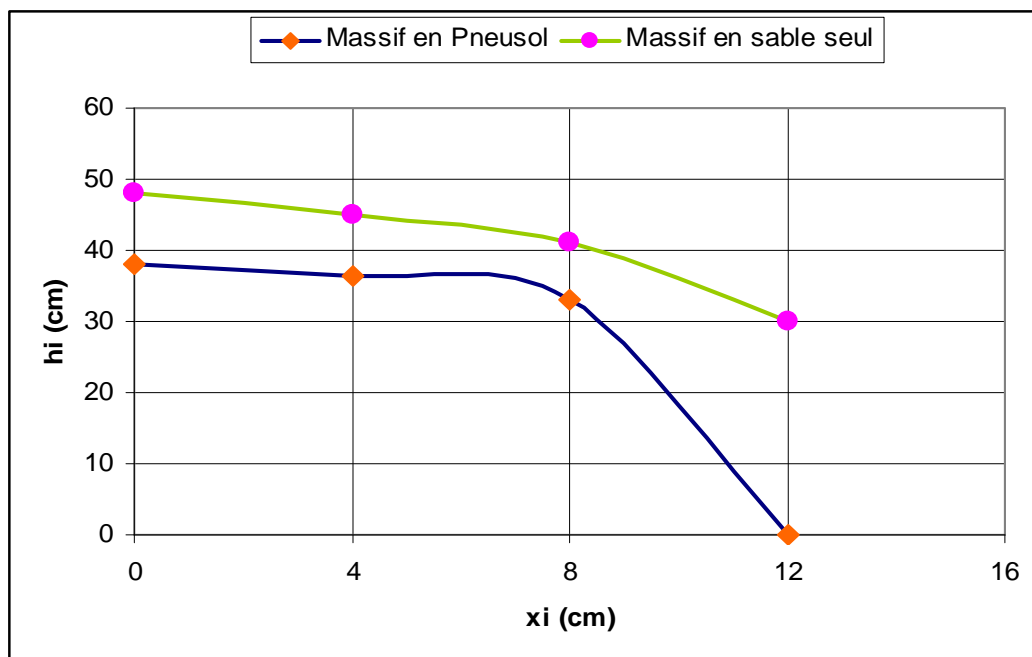


Figure.VII.31. Evolution du cône de rupture au sein du massif

.D. Discussions

Les observations sur modèle montrent que les lignes de glissement sont généralement rectilignes dans leur partie haute et qu'elles s'incurvent vers le pied de l'écran. La forme de cette partie curviligne dépend de la nature du mouvement, de la densité du massif et de la rugosité de l'écran.

Parmi les différentes observations des lignes de rupture, nous citons celles de TCHENG (1975), figure.VII.32 pour le cas d'un écran en translation et celle de JAMES et LORD (1972) pour le cas d'un écran en rotation autour du sommet (figure.VII.33).

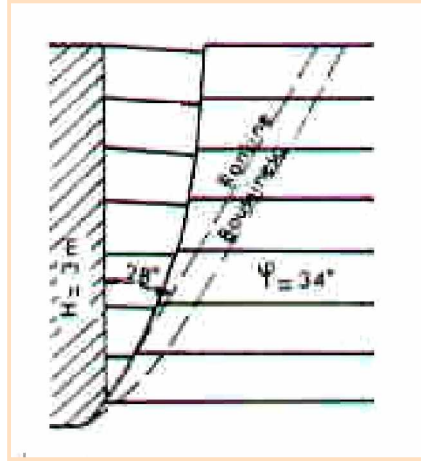


Figure.VII.32. Ligne de rupture observée par TCHENG (1975)

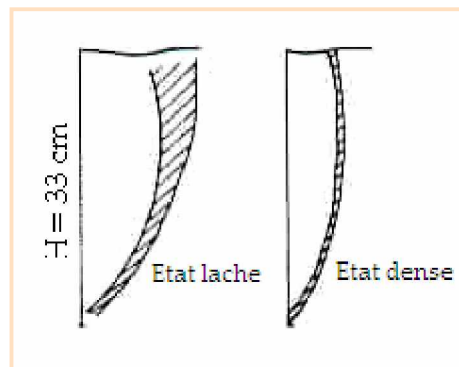


Figure.VII.33. Lignes de rupture observées par JAMES et LORD (1972)

Jean BACOT (1981) a étudié le frottement entre une inclusion souple et un matériau pulvérulent. L'analyse de la forme de rupture a montré que la ligne de rupture (figure.VII.34) se rapproche d'une droite inclinée $(\pi/4 - \varphi/2)$. Ce même phénomène a été observé sur d'autres modèles tridimensionnels (LAREAL, BACOT 1973).

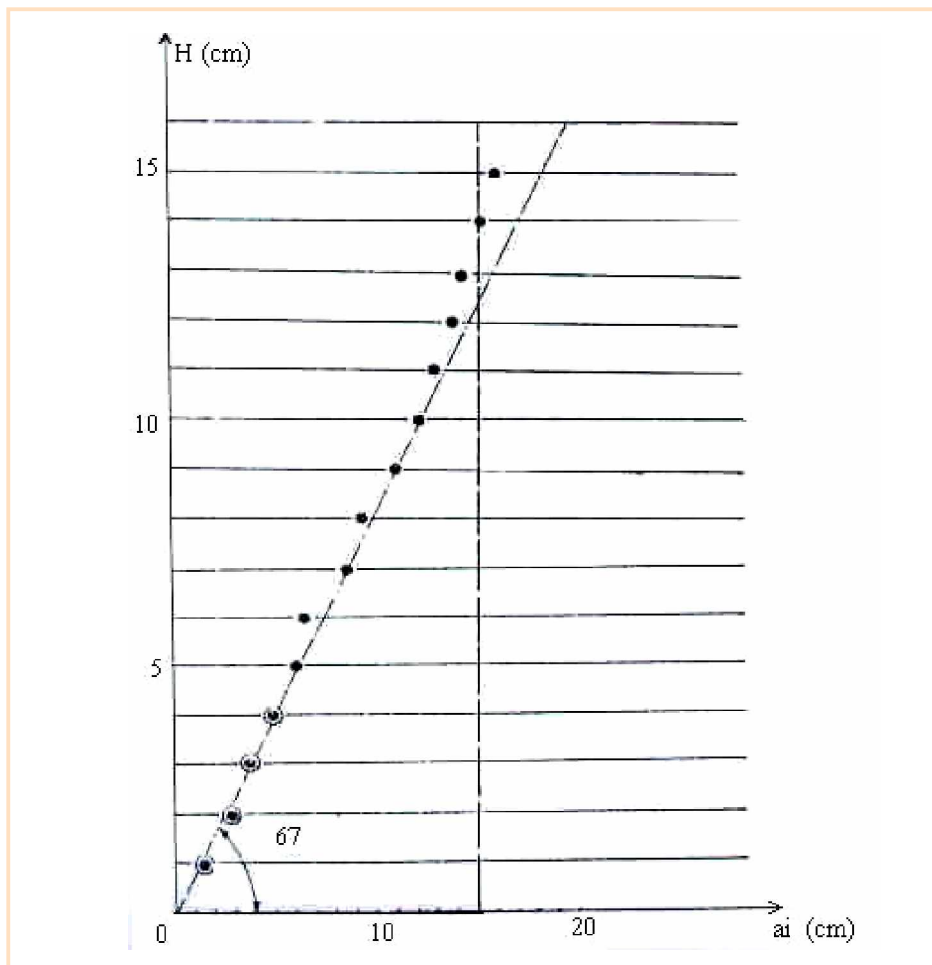


Figure.VII.34. Comparaison de la ligne de rupture observée avec la position des points de rupture des armatures.

Pour le cas de notre modèle réduit, les résultats que nous avons obtenus se rapprochent des observations précédentes, on remarque que la ligne de rupture rejoint un peu celle d'une droite inclinée à $\pi/4-\varphi/2$ (figure.VII.35).

.E. Conclusion

Cette étude expérimentale et bibliographique confirme toutes les difficultés qu'il y a d'interpréter la forme du coin de rupture.

Les résultats ainsi obtenus, montrent bien que cette surface du prisme de rupture dépend de la présence des nappes d'inclusions en pneumatiques et l'espacement entre elles.

On se rapproche des résultats trouvés dans la littérature relative à l'utilisation d'armatures au sein d'un massif, et que cette ligne de rupture rejoint celle d'une droite inclinée de $\pi/4-\varphi/2$.

On signalera toutefois, l'absence ou peu de bibliographie qui traite directement le cas des massifs renforcés par des nappes en pneumatiques (pneusol).

Cependant ces résultats sont partiels dans la mesure où notre étude n'a fait l'objet que de quelques expérimentations. Il faudra néanmoins étudier aussi l'influence de certains paramètres, tels que la rugosité de l'écran, l'espacement des nappes et le nombre de pneus par nappes.

VII.6.TAUX DE REDUCTION DE LA POUSSEE

Afin d'apprécier le taux de réduction de la poussée dans notre modèle réduit tridimensionnelle relatif à un massif de sable renforcé par des inclusions en pneumatiques en fonction de l'espacement "e" entre ces nappes, nous avons calculés cette effet pour une hauteur fixé à 40cm. Le tableau.VII.6 précise les valeurs trouvées pour les différents types d'essais effectués (cas de la disposition orthorhombique, déplacement en pied de l'écran):

Tableau.VII.36. Taux de réduction de la poussée en fonction de l'espacement "e"

Etat du Massif	Sable Seul	Sable Renforcé			
		e = 10cm	e = 5cm	e = 1cm	e = 0cm
Espacement	-----				
Déplacement en pied de l'écran en (mm)	15.72	9.12	4.30	3.00	2.15
Taux de réduction De la poussée (%)	-----	35	60	65	70

N.B : ce pourcentage est calculé par rapport au sable seul.

En traçant la courbe $R(\%)=f(e)$ [figure.VII.36], on constate que celle-ci varie pratiquement linéairement et que plus on diminue l'espacement, plus le taux de réduction augmente, ce qui explique que le massif devient plus stable avec une meilleur cohésion, et ce qui traduit aussi un allègement de sol.

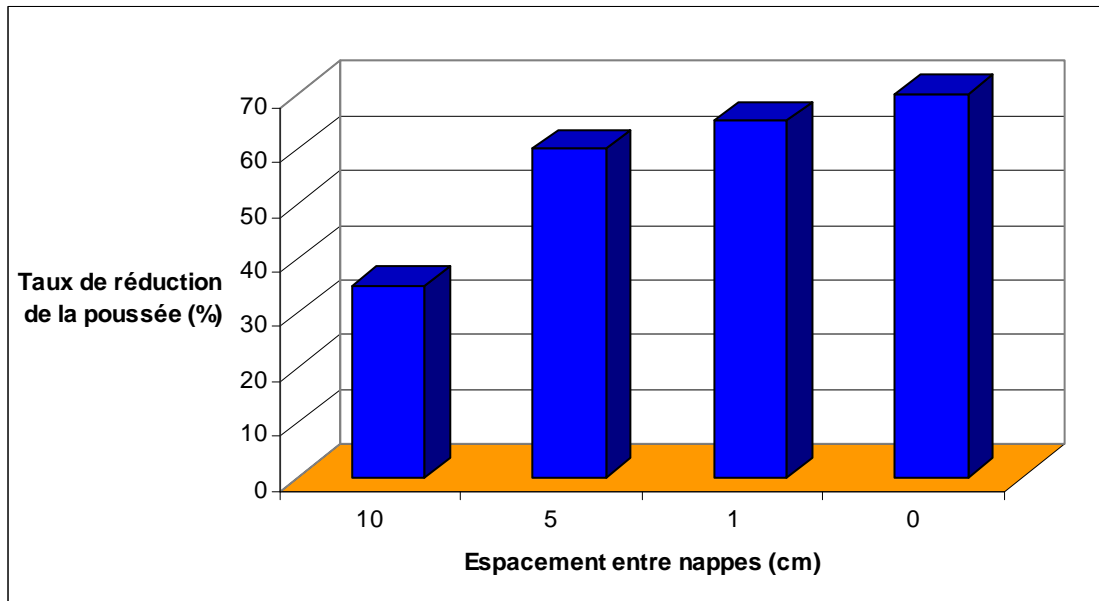


Figure.VII.36. Taux de réduction de la poussée en fonction de l'espacement entre nappes des couronnes

On notera, que pour le cas où les nappes sont superposées, c'est à dire un $e=0$, les nappes se comportent comme un mur poids juxtaposé au mur en 'T' renversé, et qu'il n'y a pratiquement aucun effet sur l'écran central de mesure.

Ce cas peut être adopté dans le cas des murs de soutènement déjà réalisés et qui présente un sous dimensionnement, le remblai peut être réalisé en technique pneusol.

VII.7.CONCLUSION

Dans l'interprétation des résultats de notre étude expérimentale nous avons pu mettre en évidence l'influence de certains paramètres tels que l'espacement 'e' entre les nappes d'inclusion, et l'influence de la disposition d'une manière générale des nappes.

On a remarqué que l'introduction des inclusions en nappes de pneus permettent d'avoir un gain en hauteur de remblai derrière l'écran; phénomène qui est similaire à un sol cohérent par rapport à un sol non cohérent, on peut expliquer cette amélioration par le fait que le massif composite a acquis une « sorte » de cohésion qui réduit l'effort de poussée.

L'effet "réducteur de poussée" augmente avec la diminution de l'espacement 'e' entre les différentes nappes qui constituent le massif. Ainsi, la diminution de l'espacement entre les nappes augmente l'effet stabilisateur.

Les observations ont données une rupture du sable non renforcé brutale, alors que pour une présence des nappes en pneus comme inclusion de renforcement avec des espacements différents 'e=0, 1, 5 et 10 la rupture est progressive. Le 'Pneusol' comme matériau de renforcement améliore donc la stabilité d'un mur de soutènement. Ainsi la présence d'une inclusion de renforcement diminue la soudaineté de la rupture lorsqu'en tend vers la hauteur critique.

Les essais nécessaires à cette étude ont été réalisés sur un sable obéissant à la loi de COULOMB dont l'angle de frottement interne est de 31°.

Les résultats ainsi obtenus, ne peuvent être extrapolés en vraie grandeur qu'avec beaucoup de précautions, car les conditions de similitude ne sont pas toutes respectées; mais grâce à ces essais de laboratoire on peut éviter des essais en vraies grandeurs, coûteux et non utilisables.

D'une manière générale et le plus souvent des travaux de recherches se basent sur une expérimentation en vraie grandeur ou sur modèle réduit. Dans les deux cas des inconvénients et des avantages apparaissent.

En résumé, à travers notre campagne expérimentale, on a les constatations suivantes :

- ∅ L'introduction des pneus dans le sol stabilise le massif derrière le mur
- ∅ La mise en place du pneusol modifie la nature du massif mis en remblai derrière l'ouvrage et par suite son fonctionnement, car ce

remblai a acquis une certaine cohésion qui réduit la poussée exercée sur le mur, de plus il constitue en lui même un massif plus déformable réduisant ainsi la poussée sur le mur à renforcer.

- ∅ L'effet "réducteur de poussée" du Pneusol augmente avec le nombre de pneus par nappe.
- ∅ La diminution de l'espacement entre les nappes augmente l'effet stabilisateur du pneusol, en effet quand l'espacement diminue le pneusol tend à se comporter comme un ouvrage poids juxtaposé au mur cantilever.
- ∅ En jouant sur le nombre de pneus par nappe, on constate que l'utilisation du Pneusol sera d'autant plus intéressante que les déplacements autorisés du mur seront élevés.
- ∅ La disposition orthorhombique des pneus en nappes est nettement meilleure que la disposition en files, car les couronnes de pneus étant liées les unes aux autres, se dotent ainsi d'une rigidité meilleure et d'une adhérence appréciable avec l'apparition d'un effet de groupe positifs.
- ∅ La présence du Pneusol diminue la soudaineté de la rupture lorsqu'en tend vers la hauteur critique.

A cet effet, en présence d'un mur de soutènement type 'Cantilever', si on diminue le poids volumique du matériau de remblai on diminue le moment résistant exercé sur le mur. Or malgré cela la stabilité du mur a augmenté ce qui signifie que le pouvoir réducteur de poussée du 'Pneusol' est important.

On a pu déduire une réduction de poussée très appréciable, le taux est de l'ordre de 70% (ce résultat est obtenu en comparant les résultats issus des essais avec des inclusions de renforcement en nappes de pneus et celles avec du sable seul).

VIII.1 INTRODUCTION

Les matériaux composites sont formés de l'association de plusieurs matériaux aux caractéristiques complémentaires, dans le cas courant, ils résultent à partir de l'union soit :

- d'un renfort se présentant sous forme d'élément longitudinaux (fibre) ou plat (feuilles, plaque).
- d'une matrice servant de support aux éléments renforçants.

Suivant la disposition relative fibre-matrice, on peut considérer deux grandes catégories de composites :

- ü Ceux à structure aléatoire pour lequel la position fibre-matrice est quelconque; comme par exemple en géotechnique le Texsol utilisé pour la stabilité des pentes.
- ü Ceux à structure régulière ou périodique ce qui signifie que la position fibre-matrice est parfaitement défini. C'est ainsi que l'on peut générer une structure faite avec un tel matériau par juxtaposition d'un petit élément de volume choisi judicieusement. On peut citer, comme exemple dans le Génie Civil, la Terre armée, les groupes de pieux, les colonnes ballastées et le renforcement par géosynthétiques.

Ces matériaux composites génèrent des structure fortement hétérogènes sur lesquels les calculs sont complexe. C'est pourquoi, les chercheurs se sont orientés vers le développement des méthodes permettant de leur associé un matériau équivalent, afin de se ramener à des problèmes mécaniques avec des solutions analytiques connues ou encore s'orienter vers une résolution numérique simplifiée. Ce processus est qualifié d'homogénéisation, c'est un domaine de la mécanique qui a fait l'objet de beaucoup de recherche durant ses dernières années.

Parmi toutes les recherches entreprises dans ce domaine, on peut citer (Bensoussan et al, 1978) qui ont introduit les bases mathématiques de la théorie de l'homogénéisation, (Dumontet, 1982) qui a étudié les problèmes d'homogénéisation en phase élastique sur les matériaux fibrés sur des stratifié, Suquet (Suquet,1982) a élaboré la théorie de l'homogénéisation en phase elastoplastique, (De Buhan ,1986), en s'appuyant sur les concepts du calcul à la rupture introduit par (Salençon,1983), a élaboré une théorie permettant à partir des critères de rupture de chaque constituant de définir celui du matériau équivalent.

Dans ce chapitre, nous donnons les bases et quelques aspects fondamentaux de la théorie d'homogénéisation, en phase élastique linéaire et en calcul à la rupture. Comme cette théorie demande une étude très approfondie appliquée au cas d'un mur de soutènement (qui serait souhaitable de le faire comme une autre recherche à la suite de ce travail de magister), nous traitons à titre d'application un cas réel d'un talus renforcé par des inclusions en pneumatiques usagés placées en nappes afin d'illustrer et de voir l'importance de cette théorie.

VIII.2. METHODE D'HOMOGENEISATION NUMERIQUE

La méthode d'homogénéisation numérique est basée sur une méthode de la moyenne. Dans cette méthode, on suppose que les grandeurs macroscopiques (contraintes ou déformations) sont les moyennes sur la cellule de base des grandeurs microscopiques correspondantes [21].

Dans l'approche en déplacement, les hypothèses de la méthode sont les suivantes :

les faces opposées de la cellule de base restent parallèles avant et après déformation ;

- ∅ les faces opposées de la cellule de base restent parallèles avant et après déformation ;
- ∅ le tenseur des contraintes microscopiques est périodique, c'est-à-dire qu'il prend des valeurs égales sur des faces opposées de la frontière de la cellule de base ;
- ∅ les constituants sont parfaitement collés, subissant des petites déformations, et ont des comportements élastiques linéaires.

On notera ε^m et σ^m les tenseurs de déformations et de contraintes macroscopiques respectivement ε et σ les tenseurs de déformations et de contraintes microscopiques.

On peut définir les grandeurs macroscopiques suivantes :

Le champ des contraintes globales σ^m est la moyenne de celui des contraintes locales σ :

$$\sigma^m = \frac{1}{|V|} \int_V \sigma dv \quad \text{avec 'V' la cellule de base de mesure}$$

Le champ des déformations globales ε^m est la moyenne de celui des déformations locales ' ε ' :

$$\varepsilon^m = \frac{1}{|V|} \int_V \varepsilon dv$$

Dans cette approche en déformation, on se donne une moyenne des déformations sur la cellule de base (ou déformation macroscopique) ε^m , et on calcul les valeurs de σ^m correspondantes. Pour cela, on utilise un programme de calcul par éléments finis spécialement adapté pour cette homogénéisation.

VIII.3. Méthode d'homogénéisation analytique

Une deuxième méthode d'homogénéisation basée sur un calcul analytique simplifié, est proposée pour permettre d'obtenir, par un calcul direct, les valeurs des paramètres équivalents de la cellule de base. Ce calcul analytique nécessite les hypothèses suivantes [22] :

Le sable et les armatures travaillent ensemble, les déformations sont donc les mêmes pour les deux matériaux ;

Les surfaces verticales de la cellule de base restent verticales avant et après déformation, et il en est de même pour les surfaces horizontales ;

Les armatures ne travaillent pas au cisaillement, du fait de leur souplesse et de leur faible pourcentage en volume par rapport au sol. Le module de cisaillement du matériau équivalent est donc considéré comme égal à celui du sol ;

L'armature ne pouvant travailler qu'en traction, dans le cas de compression de la contrainte horizontale, le module de rigidité horizontale équivalente et le coefficient de Poisson horizontal équivalent sont pris égaux à ceux du sol.

Pour déterminer le module de rigidité verticale équivalente E_v^{eqv} et le coefficient de Poisson vertical équivalent V_v^{eqv} , on soumet la cellule de base à une sollicitation verticale et on assimile le 'Pneusol' à des ressorts en série et en parallèle. Soient E_a et E_s les modules d'Young de l'armature (bande de roulement) et du sol, et V_s le coefficient de Poisson du sol.

Posons :

ω = le rapport de hauteur de la nappe d'armature sur la hauteur d'une cellule de base.

$$\bar{\omega} = \frac{R_{int}^2}{R_{ext}^2} \quad \text{où } R_{ext} \text{ et } R_{int} \text{ sont les rayons extérieur et intérieur de l'armature.}$$

Dans le cas de la disposition normale, on a :

$$E_v = \frac{\pi}{4} \bar{\omega} E_r + \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) E_s + \frac{\pi}{4} (1 - \bar{\omega}) E_a \quad \text{et} \quad V_v = \frac{\pi}{4} \bar{\omega} V_r + \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) V_s + \frac{\pi}{4} (1 - \bar{\omega}) V_a$$

On obtient les paramètres équivalents avec les relations suivantes:

$$\frac{1}{E_v^{eqv}} = \frac{1-\omega}{E_s} + \frac{\omega}{E_v} - \frac{2(V_v - V_s)^2 \omega (1-\omega)}{(1-V_s)E_s} \quad \text{et} \quad V_v^{eqv} = (1-\omega)V_s + \bar{V}_v$$

Dans lesquelles
$$\bar{V}_v = \frac{E_s}{E_v} V_v$$

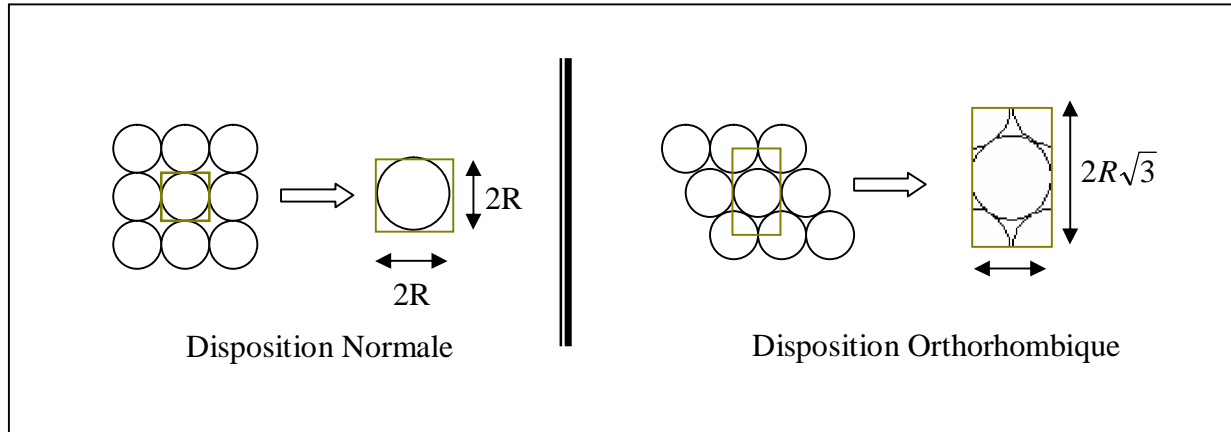


Figure. VIII.1. Types d'assemblage et cellule de base correspondante

Dans le cas de la disposition orthorhombique, les calculs de E_v^{eqv} et V_v^{eqv} sont identiques aux précédents mais avec les valeurs de E_v et V_v suivantes :

$$E_v = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \bar{\omega} E_r + \left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}}\right) E_s + \frac{\pi}{2\sqrt{3}} (1 - \bar{\omega}) E_a$$

$$V_v = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \bar{\omega} V_r + \left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}}\right) V_s + \frac{\pi}{2\sqrt{3}} (1 - \bar{\omega}) V_a$$

VIII.4. METHODE D'HOMOGENEISATION APPLIQUEE AUX SOLS RENFORCES

Cette méthode élaborée pour le dimensionnement des sols renforcés fondée d'une part sur la théorie du calcul à la rupture conçue comme généralisation de l'analyse limite (Salençon 1983) et d'autre part sur les théories relatives à l'homogénéisation des milieux hétérogènes périodiques (De Buban).

Dans son principe cette méthode repose tout simplement sur l'intuition selon laquelle à l'échelle des dimensions des ouvrages, les sols renforcés peuvent être perçus comme des milieux homogènes anisotropes dont les caractéristiques de résistance mécanique peuvent être déterminées à partir de celles des constituants (sols et renforcements).

VIII.4.1. Conditions fondamentales

L'idée d'employer une méthode d'homogénéisation pour l'étude des sols renforcés n'est à vrai dire pas tout à fait récente. On la retrouve présentée par exemple chez Gérard (Gérard ,1982), Gérard et al (Gérard et al ,1984) et elle constitue même le fil directeur des travaux de Sawicki sur la terre armée depuis plusieurs années (Sawicki, 1979 et 1983).

L'application de cette méthode d'homogénéisation pour les sols renforcée repose sur trois conditions :

Les inclusions de renforcement sont réparties dans le sol d'une façon régulière, afin de pouvoir modéliser le sol renforcé comme un matériau composite à structure périodique.

La période caractéristique (l'espacement vertical entre deux nappes horizontales successives de renfort) peut être considéré comme petite, vis à vis de la dimension de l'ouvrage.

Le concept d'homogénéisation d'un sol renforcé ne revêt de sens que dans la mesure où l'on s'intéresse non pas à ce qui peut se passer localement en tel ou tel point de l'ouvrage, mais à l'évaluation de la grandeur globale qui se rattache à celui-ci.

L'analyse de la stabilité est menée dans l'esprit du calcul à la rupture c'est à dire à partir de la seule donnée du critère de résistance du matériau constitutif de l'ouvrage examiné. Ainsi la méthode d'homogénéisation dépend fondamentalement de la possibilité de définir un critère de résistance qui permet de caractériser les capacités de résistance du sol renforcé considérées autant que le matériau homogène.

VIII.4.2. Calcul à la rupture

La mise en œuvre de la méthode d'homogénéisation dans l'étude de la stabilité des sols renforcés comporte deux étapes distinctes :

- § La détermination du critère de résistance macroscopique du sol renforcé à partir de la connaissance des capacités de résistance de ses constituants ;
- § La résolution du problème associé fondé sur l'utilisation de ce critère.

VIII.4.3. Critère de résistance

On notera que l'hypothèse de périodicité du matériau renforcé joue ici son rôle car elle permet d'envisager une cellule de base représentative de volume totale 'V' qui comporte une seule d'inclusion de volume 'Vr'. Ceci permet déjà de déterminer les proportions volumiques du sol et de l'inclusion dans cette cellule (voir fig. VIII.2)

$$\lambda_s = \frac{V_s}{V}, \lambda_r = \frac{V_r}{V} \Leftrightarrow \lambda_s + \lambda_r = 1$$

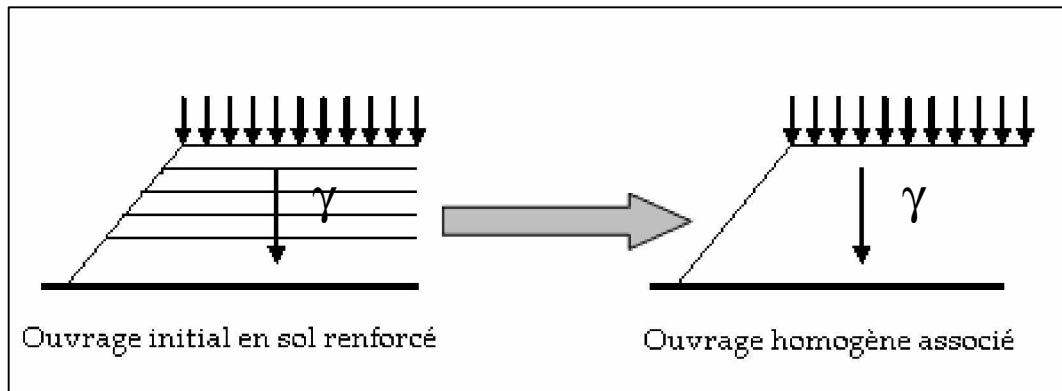


Figure VIII.2. Principe de la méthode d'homogénéisation

En supposant que le contact sol inclusion est à adhérence totale, le critère de résistance macroscopique du sol renforcé (domaine G_{Hom}) peut être obtenu en effectuant la moyenne volumique sur la cellule de base de tous les champs de contraintes qui sont périodiques et l'on écrit:

$$\bar{\Sigma} = \lambda_s \bar{\sigma}^s + \lambda_r \bar{\sigma}^r \quad (1) \quad \text{et en notation matricielle :}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\Sigma}_{xx} & \bar{\Sigma}_{xy} \\ \bar{\Sigma}_{yx} & \bar{\Sigma}_{yy} \end{bmatrix} = \lambda_s \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^s & \sigma_{xy}^s \\ \sigma_{yx}^s & \sigma_{yy}^s \end{bmatrix} + \lambda_r \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^r & \sigma_{xy}^r \\ \sigma_{yx}^r & \sigma_{yy}^r \end{bmatrix}$$

Avec $\bar{\sigma}^s$ et $\bar{\sigma}^r$ vérifiant leurs propres critères de résistance.

Sol: validité du critère de Coulomb qui, dans l'espace des contraintes principales s'écrit :

$$(\sigma_1^s - \sigma_2^s) + (\sigma_1^s + \sigma_2^s) \sin \varphi - 2c_s \cos \varphi \leq 0$$

φ : Angle de frottement interne

c_s : Cohésion

Inclusion : validité du critère de TRESCA qui dans l'espace des contraintes principales s'écrit :

$$\frac{1}{2}(\sigma_1^r - \sigma_2^r) \leq c^r y, c^r y \quad \text{Constante d'écoulement de l'inclusion}$$

VIII.4.4. Approche théorique par la méthode d'homogénéisation à la rupture

En utilisant l'approche théorique basée sur la méthode d'homogénéisation, le calcul à la rupture développée par DE Buhan (DE Buhan, 1986) nous allons essayer de quantifier l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol renforcé par des nappes continues en matière plastique. Nous rappelons que le principe de cette méthode repose sur l'intuition, selon laquelle à l'échelle des dimensions des ouvrages les sols renforcés, peuvent être perçus comme des milieux homogènes anisotropie dont les caractéristiques de résistance mécanique peuvent être déterminées à partir de celles des constituants (sol et renforcement). La méthode d'homogénéisation en calcul à la rupture développée à partir de cette intuition est alors appliquée à l'analyse de stabilité de quelques ouvrages types dans lesquels le sol renforcé est modélisé comme un matériau multicouche.

VIII.4.5. Principe de la méthode

Les travaux sur la théorie d'homogénéisation des milieux périodique en calcul à la rupture ont permis dans le cadre de cette théorie de construire, à partir des données du problème initial, le critère de résistance macroscopique du matériau homogène associé à un sol homogène pour lequel :

- Le matériau de renforcement responsable de l'hétérogénéité de la structure est reparti périodiquement au sein de celle si ;
- La période est petite au regard des dimensions de la structure.

Vu l'importance de la propriété de la périodicité de renforcement, cette dernière a permis de mettre en évidence la cellule de base représentative du sol renforcée qui comporte généralement une seule inclusion. La construction du critère découle alors de la résolution d'un problème de calcul à la rupture défini sur cette cellule de base de la manière suivante :

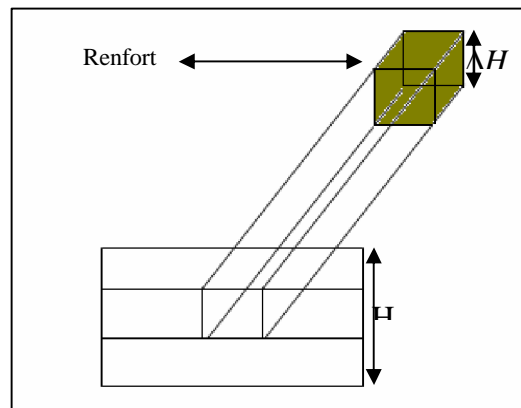


Figure.VIII.3. Cellule de base représentative d'un sol renforcé

Désignant par :

- G_s domaine convexe de résistance de sol (σ^s admissible).
- G_r domaine convexe de résistance du renfort (σ^r admissible).
- G_{int} domaine convexe de résistance de l'interface (σ^{int} admissible).
- G^{homo} domaine convexe de résistance macroscopique (Σ admissible).

Le critère de résistance macroscopique noté ' G^{homo} ' du sol renforcé est formé par l'ensemble des états de contraintes macroscopique ' Σ ', obtenus en effectuant la moyenne volumique ou surfacique (dans le cas d'une résolution de problème en déformation plane) sur la cellule de base de tout le champ de contrainte périodique, en équilibre et respectant le critère de résistance en tout point, soit :

$$\Sigma \in G^{homo} \Leftrightarrow \sigma \text{ Périodique} / \Sigma = \sigma, \text{div} \sigma = 0$$

En tout point $x \in \text{volume}, \sigma(x) \in G_s, G_r, \text{ou } G_{int}$

$G(x)$: est invariable; indépendant du temps et des sollicitations

VIII.4.6.Cas de multicouche

Ce modèle représente (entre autre) le cas des sols renforcés par lits parallèles de renfort qui présentent une périodicité dans une seule direction (verticale).

1. Avantage du modèle

La théorie de l'homogénéisation conduit à une définition simple du critère de résistance macroscopique du matériau multicouche ;

Les problèmes d'analyse de stabilité d'ouvrages sont posés dans le cadre du calcul à la rupture en déformation plane (Salençon ; 1983) ;

Possibilité d'étudier l'incidence des conditions de la rupture de l'interface de contact sur le domaine de résistance macroscopique.

2. Evaluation de la contrainte macroscopique

- Cas d'une adhérence totale entre le sol et le renfort

Le sol renforcé, modélisé comme un matériau multicouche bidimensionnel, est repéré dans les axes « OXY », l'axe « OX » étant pris parallèle à l'orientation des couches, le sol (de cohésion nulle) ainsi que le matériau de renforcement sont supposés des milieux homogènes isotropes.

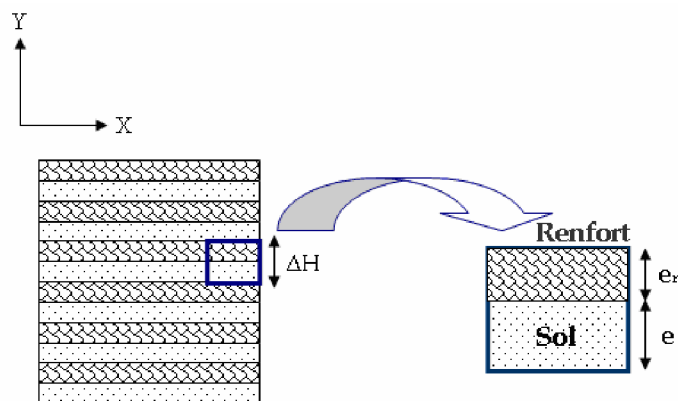


Figure.VIII.4. Sol renforcé multicouche

Le matériau hétérogène ainsi considéré présente deux constituants homogènes alternés d'épaisseur constante e_i ($i=r$ ou s) et de proportion volumique λ_i ($i = r$ ou s).

Cette hypothèse conduit à une autre écriture de « G^{homo} » (domaine dans l'espace des contraintes bidimensionnelles), soit :

$$\Sigma \in G^{\text{homo}} \Leftrightarrow \Sigma = \lambda_s \sigma^s + \lambda_r \sigma^r$$

$$\underline{\underline{\sigma}}^s \cdot \vec{n} = \underline{\underline{\sigma}}^r \cdot \vec{n} = \underline{\underline{\Sigma}} \cdot \vec{n}$$

G^{homo} caractérise les capacités de résistance du matériau multicouche à l'échelle macroscopique.

σ^s et $\underline{\sigma}^r$ vérifient les conditions de résistance respectives du sol et du matériau de renforcement :

$$\sigma^i \in G_i \quad (i=r, s)$$

VIII.4.7. Définition du critère macroscopique

Définition statique

L'approche statique par l'intérieur considère que l'ouvrage dit potentiellement stable sous le chargement Q , s'il est possible de remplacer Q par un champ de contrainte σ , tel que :

$$\sigma(X) \in G^{\text{homo}} \quad \text{en tout point de } X$$

On désigne alors par Q^{homo} la valeur extrême du chargement défini par :

$$Q \leq Q^{\text{homo}} \Leftrightarrow \text{Ouvrage potentiellement stable sous } Q.$$

L'utilisation de l'approche statique conduit à l'obtention d'un minorant de Q^{homo} .

Le critère macroscopique s'écrit :

$$F^{\text{homo}}(\Sigma) \leq 0 \Leftrightarrow \left\{ \Sigma = \lambda_s \sigma^s + \lambda_r \sigma^r ; F(\sigma^s) \leq 0, F(\sigma^r) \leq 0 \right\}$$

$F(\sigma)$: critère de rupture en déformation plane

Définition cinématique

L'utilisation de l'approche cinématique conduit à l'obtention d'un majorant de Q^{homo} . Cette approche s'appuie sur le théorème des puissances dont nous rappelons la forme générale :

$$\int_V \sigma \cdot V \, dv = Q(\sigma) \cdot q(V)$$

$q(V)$: vitesse de déformation du système

$\sigma \cdot V$: puissance de déformation pour dv

V : volume

$Q(v)$: chargement du système

En considérant un tenseur de vitesse de déformation « V », la fonction d'appui du convexe G^{hom_o} est défini quelque soit $V \in R^3$ par :

$$\Pi_{G^{\text{hom}_o}}(V) = \inf \left\{ \lambda_s \Pi_s(V_s) + \lambda_r \Pi_r(V_r) \right\} \text{ avec } \lambda_s V_s + \lambda_r V_r = V \text{ et } V_s^{XX} = V_r^{XX} = V$$

$\Pi_s(V_s)$: fonction d'appui du domaine G_s

$\Pi_r(V_r)$: fonction d'appui du domaine G_r

$\Pi_{G^{\text{hom}_o}}(V)$: Traduit la puissance dissipée du matériau homogénéisé

$\Pi_s(V) = \sigma$: V associé à σ

VIII.4.8. Domaine de validité de la méthode

L'application de la méthode d'homogénéisation proposée pour l'analyse de stabilité des ouvrages en sols renforcés repose sur certaines conditions fondamentales, à savoir :

La périodicité de renforcement (condition essentielle qui permet d'obtenir une formulation théorique du critère de résistance macroscopique.

Le nombre suffisant d'inclusion de renforcement permettant de conféré au matériau composite une certaine homogénéité macroscopique.

En supposant que ses conditions soient satisfaites, la question qui reste posées, est quel est le lien entre la solution du problème de calcul à la rupture sur l'ouvrage homogène associé et celle du problème initial. Dans ce cadre un résultat d'homogénéisation de portée très générale établi par Suquet (Suquet, 1983) puis De Buhan (De Buhan, 1986) permet de répondre partiellement à cette question.

Il peut s'énoncer ainsi :

« *L'ouvrage homogène associé est plus stable que l'ouvrage réel initial* », ce qui se traduit par l'inégalité $Q^{\text{hom}_o} \geq Q$ (Q représente le chargement extrême au-delà duquel l'ouvrage n'est plus stable). L'inégalité inverse ne peut être prouvée.

VIII.4.9. Expression simplifié le critère de la rupture macroscopique

Des recherches sur la terre armée modélisée comme un matériau multicouche bidimensionnel, menées par De Buhan et al (De Buhan et al, 1985), De Buhan (De Buhan, 1986) et Siad (Siad, 1987) ont montré que le domaine de résistance macroscopique G^{hom_o} est définie par :

$$\Sigma \in G^{\text{hom}_o} \Leftrightarrow \Sigma = \lambda_s \sigma^s + \lambda_r \sigma^r, \sigma^s \in G_s, \sigma^r \in G_r$$

Dans le cas où les armatures métalliques (renfort) seraient considérés comme des inclusions d'épaisseurs très minces de sorte que la proportion volumique est très faible devant le volume du massif ; tandis que la cohésion C_r est d'un ordre de grandeur bien supérieur aux valeurs observées pour les sols, cette définition peut être aussi écrite de la façon suivante :

En partant de :

$$\Sigma = \lambda_s \sigma^s + \lambda_r \sigma^r \text{ Avec } \lambda_s = \frac{e_s}{(e_s + e_r)} ; \lambda_r = \frac{e_r}{(e_s + e_r)} \text{ et } e_r + e_s \approx e_s$$

On obtient :

$$\Sigma = \frac{e_s}{e_s} \sigma^s + \frac{e_r}{e_s} \sigma^r$$

En considérant que les armatures ne travaillent qu'en traction dans la direction du renforcement, on aura alors *suivant la direction du renforcement* :

$$\begin{aligned} \sigma^r &= \frac{F^r}{e_r} \Rightarrow \Sigma = \sigma^s + \frac{F^r}{e_s} \\ \Rightarrow \Sigma &= \sigma^s + \sigma \quad \text{avec } \sigma = \frac{F^r}{e_s} \end{aligned}$$

F^r étant la résistance à la rupture en traction du renfort

Suivant la direction perpendiculaire au renforcement, on aura :

$$\Sigma = \sigma^s$$

La définition statique du critère macroscopique s'écrit alors :

$$F^{\text{hom}o}(\Sigma) \leq 0 \Leftrightarrow \left\{ \Sigma = \sigma^s + \sigma \cdot e_x \otimes e_x, F(\sigma) \leq 0; \sigma^r \leq \sigma \leq 0 \forall \sigma \in R \right\}$$

La formulation du critère montre que l'amélioration de la résistance du sol ne dépend que de la résistance du renfort.

Le critère $F^{\text{hom}o}(\Sigma) \leq 0$ est un critère anisotrope, il met en évidence le rôle privilégié de la direction de renforcement.

VIII.5.PRESENTATION GEOMETRIQUE DU DOMAINE DE RESISTANCE DANS L'ESPACE DES CONTRAINTES

Il serait très intéressant de voir le comportement d'un matériau analogue au pneusol par cette théorie d'homogénéisation. Effectivement l'étude de la terre armée a conduit les mêmes auteurs (De Buhan, 1985-De Buhan, 1986) à représenter géométriquement le domaine de résistance macroscopique dans l'espace des contraintes.

En prenant comme critère de rupture pour les sols le critère de Mohr Coulomb, le domaine G^{homo} obtenu à partir de l'enveloppe du cône de coulomb G_s par translation dans l'espace R^3 des contraintes d'une quantité égale à $-\sigma$ le long de l'axe σ_{xx} , sa représentation géométrique dans l'espace des contraintes rapportée aux axes de coordonnées Σ_{xx} , Σ_{yy} , $\Sigma_{xy} = 0$ est donnée par la 'figure .VIII.5 '

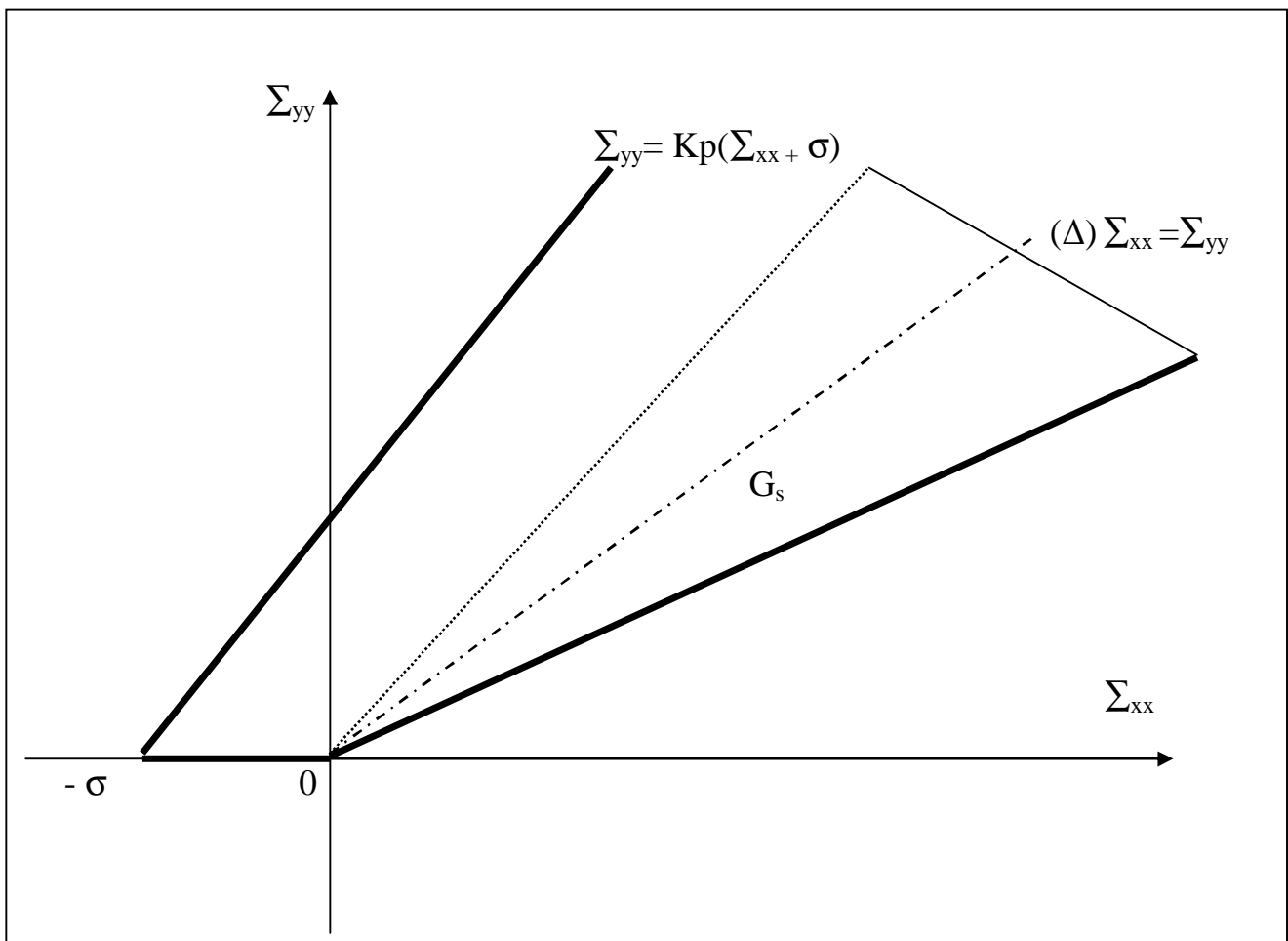


Figure.VIII.5. représentation du domaine G^{homo} dans le plan $\Sigma_{xx}, \Sigma_{yy}, \Sigma_{xy} = 0$. (Siad,1987)

Cette représentation géométrique met clairement en évidence l'augmentation de la résistance du sol apportée par l'introduction des armatures, puisque le domaine G_s est strictement inclus dans le domaine G^{homo}

En faisant un changement de variable, et en introduisant un système d'axe de coordonnées (P,S,T) ; tel que :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Sigma_{xx} + \Sigma_{yy})$$

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Sigma_{xx} - \Sigma_{yy})$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{2}} \Sigma_{xy}$$

Cette représentation du domaine G_s sera représenté, dans le plan (T, S), par un cercle de centre 'o' et de rayon 'P.sinφ', et G^{homo} sera limité par G_s d'un côté et par un arc de cercle de centre $\frac{-\sigma}{\sqrt{2}}$ et de rayon $(P + \frac{\sigma}{\sqrt{2}}). \sin \varphi$ de l'autre (Fig.VIII.6)

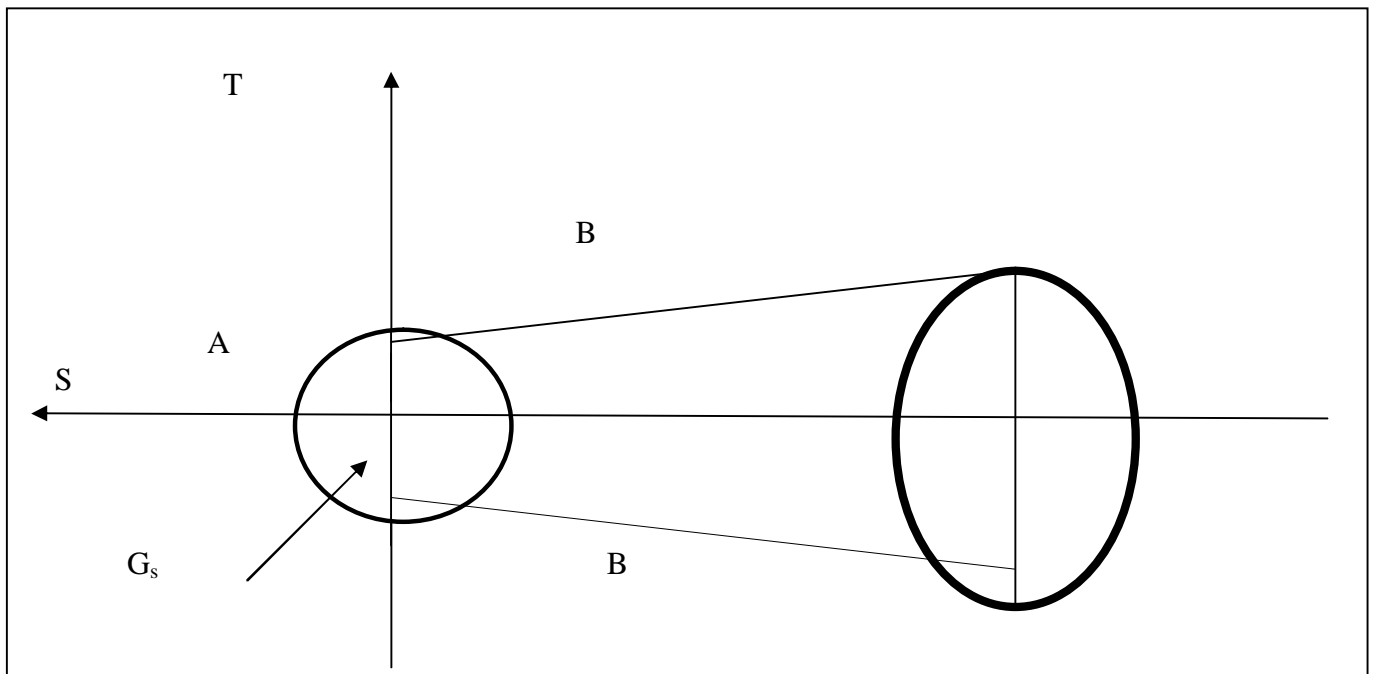


Figure VIII.6.représentation géométrique du domaine G^{homo} dans le système P.S.T. (Siad,1987)

La partie A : Seule la résistance du sol est mobilisée.

La partie B : états de contraintes macroscopiques limités :

Le sol est en état de rupture.

Traction dans le renfort inférieur à l'état limite en traction.

La partie C : rupture du sol et des renforts (rendement maximal des deux constituants.)

En conclusion, quel que soit le mode de rupture du matériau homogène, le sol est à l'état limite de ses capacités.

Une validation d'expérimentation du critère macroscopique construit par la voie théorique a été menée à l'aide des essais de compression à l'appareil triaxial sur des éprouvettes de sable armé par des disques métalliques inclinée selon différentes directions 'figure VIII.7'. Le critère macroscopique est exprimé en fonction des contraintes principales et de l'inclinaison α des renforcements.

$$\left[(\Sigma_1 - \Sigma_2)^2 + 2\sigma(\Sigma_1 - \Sigma_2)\cos 2\alpha + \sigma^2 \right]^{1/2} \leq (\Sigma_1 + \Sigma_2 - \sigma)\sin \varphi$$

$$-\sigma^r \leq \sigma \leq 0$$

Pour $\alpha=0$: renforts horizontaux, le critère s'écrit :

$$\left[(\Sigma_1 - \Sigma_2)^2 + 2\sigma(\Sigma_1 - \Sigma_2) + \sigma^2 \right]^{1/2} \leq (\Sigma_1 + \Sigma_2 - \sigma)\sin \varphi$$

Avec $Kp = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$

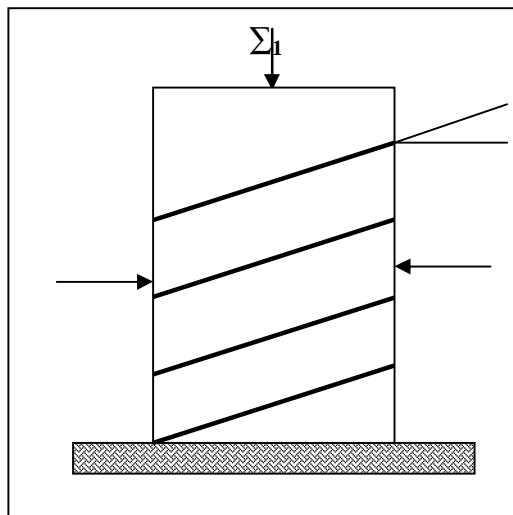


Figure VIII.7. Disposition des armatures dans les éprouvettes

VIII.6.CONCLUSION

Les matériaux composites génèrent des structures fortement hétérogènes sur lesquels les calculs sont complexes, pour laquelle le processus d'homogénéisation soit l'objet de beaucoup de recherches ses dernières années.

On notera que l'utilisation de cette théorie d'homogénéisation pour notre cas ; cas d'un mur de soutènement avec des renforcements en nappes de pneus usagés, génère une étude plus approfondie et plus longue, qui serait intéressant de la développée dans une étude ou recherche ultérieure.

Pour cela dans la fin de ce chapitre on va utiliser cette théorie d'homogénéisation pour quantifier l'amélioration des caractéristiques mécanique pour le cas d'un remblai renforcé par des inclusions en nappes de pneumatiques usagés (remblai renforcé par la technique pneusol).

Nous insistons encore une fois que nous avons traité dans ce chapitre la théorie d'homogénéisation et son application dans le cas du Pneusol ainsi que le développement des équations en quelque sorte afin de tirer les paramètres associés, et afin de quantifier ces relations à la lumière d'un cas réel, en traitera à titre d'exemple le cas du renforcement d'un talus sur l'évitement de la ville de BOUSMAIL.

VIII.7. CALCUL ET ETUDE DE LA STABILITE D'UN TALUS 'CAS DE BOUSMAIL' « UTILISATION DE LA METHODE D'HOMOGENEISATION »

Pour l'étude de la stabilité du talus de Bousmail, nous proposons à cet effet deux types de soutènement.

Le 1^{er} type consiste à soutenir un talus de 15m de hauteur par un empilement de pneus sur une hauteur de 4.6m et une longueur de 8.5m

Le 2^{ème} type consiste à intercaler entre 2 nappes de pneus successifs une couche de sol de 40cm d'épaisseur.

Afin d'étudier la stabilité, nous avons considéré le 1^{er} cas comme un mur poids, le 2^{ème} cas comme étant un sol renforcé par des nappes horizontales (remblai léger).

L'ouvrage est constitué totalement de pneus superposés l'un sur l'autre et d'une manière décalée, formant une pente de 1/1, pour le remblai il est utilisé un sol sableux qui permet de remplir les vides entre elles (pneus), et à l'intérieure du pneu (Fig.VIII.8)

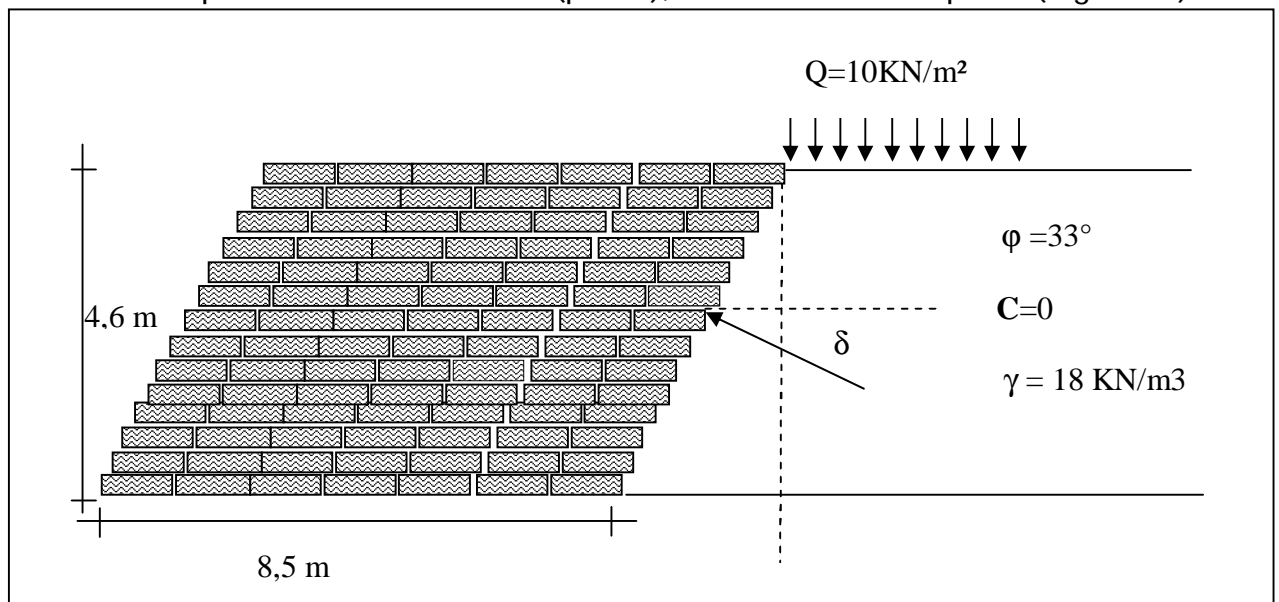


Figure.VIII.8 : un mur de soutènement en pneus

Notre objectif de calcul se résume sur la détermination :

1. Du coefficient de sécurité de glissement F_s afin de s'assurer qu'il n'y a pas de risque de déplacement horizontal de l'ensemble.
2. La contrainte verticale pour la vérification au poinçonnement.

✓ Hypothèse de calcul

La butée est généralement négligée, car celle-ci n'est mobilisée que si le déplacement du mur est de l'ordre du 10^{ième} de la hauteur, ce qui n'est généralement pas admissible pour ce genre d'ouvrage.

Le choix de la valeur de 'l' revient du faite que l'on soit en présence d'un sol pulvérulent.

✓ Les données du projet

Caractéristiques du sol :

Cohésion	$C=0\text{KN/m}^2$
L'angle de frottement interne	$\varphi=33^\circ$
Densité volumique du sol	$\gamma_d=18\text{ KN/m}^3$
Contrainte admissible de sol	$\sigma_{adm} = 2\text{ bars}$

Caractéristiques des pneus :

Densité volumique	$\gamma_{(pneu)} = 0.124\text{ KN/ m}^3$
Epaisseur des pneus	$e = 0.33\text{ m}$
Diamètre extérieur des pneus	$D=1.2\text{ m}$
Diamètre intérieur des pneus	$d=0.6\text{ m}$
Force de traction des pneus	$F= 120\text{ KN}$

Caractéristiques du mur :

Hauteur du mur	$H=4,6\text{m}$
Largeur de la base du mur	$B = 8,5\text{ m}$
Longueur de mur	$L=50\text{m}$
Inclinaison du mur par rapport a la vertical	$\lambda=45^\circ$
Surcharge	$Q=10\text{KN/ml}$
Résultante de butée éventuelle	$Bu= 0\text{ KN/m}^2$
Inclinaison de la force de poussée / à l'axe normale (Mur intermédiairement rugueux (frottement mur /sol))	$\delta=2/3\varphi$

✓ Application et Calcul

Détermination du coefficient de sécurité F_s

$$F_s = \frac{(2/3).C.B + (R_v - U).tg((2/3).\varphi)}{Rh - Bu} > 1.5$$

De la contrainte verticale σ_v

$$\sigma_v \ll \sigma_{ad}$$

Basé sur la détermination de la résultante des forces horizontales R_h et la résultante des forces verticales R_v .

Résultante des forces verticales

On a trois forces verticales commençant par :

- La projection verticale de la force de poussée

$$P_v = P \sin(\delta)$$

$$P = (1 / 2).(\gamma_r . h^2 . K_a)$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \lambda)}{\cos(\lambda + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \lambda) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\lambda + \delta) \cos(\beta - \lambda)}} \right]^2}$$

AN :

$$k_a = 0.466 \text{ avec}$$

$$P = 177.5 \text{ KN/ml}$$

$$\beta = 0^\circ$$

$$\varphi = 33^\circ$$

$$\lambda = 45^\circ$$

$$\delta = 2/3 \varphi = 22^\circ$$

$$P_v = 66.5 \text{ KN/ml}$$

$$h = 6.505 \text{ m}$$

- Poids du mur

On peut concéder le poids du mur comme étant la somme des poids des pneus et le poids de sol (Fig. VIII.9)

Surface d'un cercle	:	$\pi (D/2)^2$
Surface du pneu S_{pneu}	:	$\pi [(D/2)^2 - (d/2)^2]$
Surface du sol S_s	:	$D^2 - S_{pneu}$
Poids du pneu P_{pneu}	:	$S_{pneu} \times \gamma_{pneu} \times e$
Poids des terres P_{sol}	:	$S_s \times \gamma_s \times e$

AN :

$$S_s = 3.14 \times ((1.2/2)^2 - (0.6/2)^2)$$

$$S_s = 1.2^2 - 0.85 = 0.59 \text{ m}^2$$

$$S_{pneu} = 0.85 \text{ m}^2$$

$$S_s = 0.59 \text{ m}^2$$

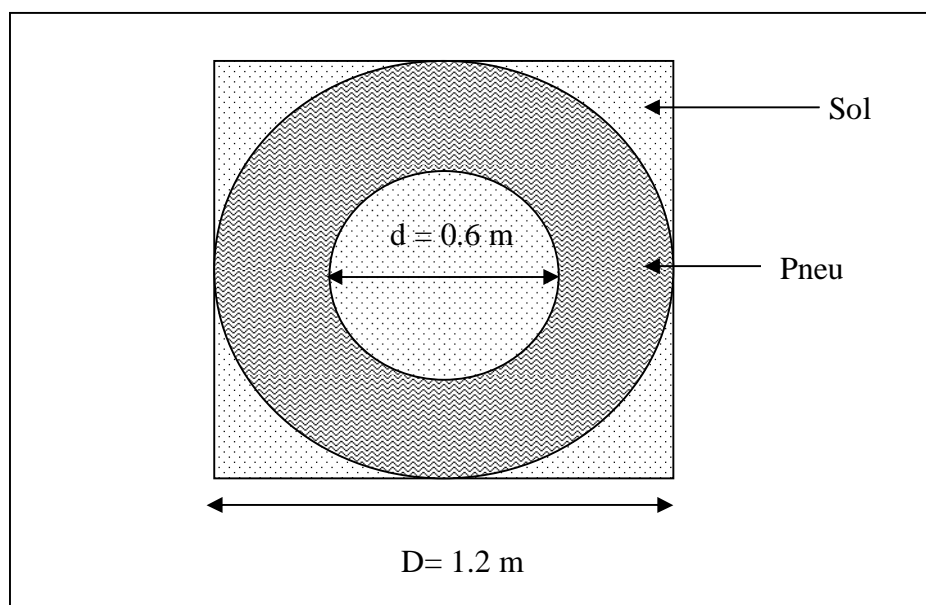


Fig. VIII.9. Vu dessus d'un pneu

$$P_s = 18 \times 0.59 \times 0.33 = 3.5 \text{ KN}$$

$$P_{pneu} = 0.85 \times 0.124 \times 0.33 = 0.035 \text{ KN}$$

$$P_s = 3.5 \text{ KN}$$

$$P_{pneu} = 0.035 \text{ KN}$$

Sachant que l'on a utilisé 3500 pneus sur une longueur de 50 m, ce qui veut dire que l'on a 3500 exemplaires de carrées sur la figure VIII.8.

Qui représente la somme des poids de pneus et de terre. Ce qui fait que pour trouver le poids du remblai par mètre linéaire, il suffit de multiplier le poids de pneus et de terre par 3500 et de diviser par la longueur de remblais qui est de 50 m.

- Poids du mur :

$$P_{mur} = (P_s + P_{pneu}) \times 3500$$

$$P_{mur} (KN/m) = P_{mur} / L$$

AN:

$$P_{mur} = (3.5 + 0.035) \times 3500$$

$$P_{mur} = 12372.5 \text{ kN}$$

$$P_{mur} = 12372.5 / 50$$

$$P_{mur} = 12372.5 \text{ KN}$$

$$P_{mur} = 247 \text{ KN/ml}$$

- la surcharge Q:

Pour des raisons de sécurité on ajoute une surcharge de 10KN/ml sur le remblai, elle est considérée comme une surcharge d'exploitation

$$Q = 10 \text{ KN/ml}$$

D'où la résultante de la force verticale est de :

$$R_v = P_{mur} + P_v + Q$$

AN :

$$R_v = 10 + 247 + 66.5$$

$$= 324 \text{ KN/ml } R_v$$

b-Résultante des forces horizontales

On a deux forces horizontales

- La Force de frottement (l'effet de cisaillement)

$$F_f = \tau \times s$$

$$\zeta = C + \sigma \cdot \text{tg}(2/3\varphi) \quad \text{Et} \quad \sigma = P_{mur} / s$$

$$F_f = P_{mur} \cdot \text{tg}(2\varphi/3)$$

AN :

$$F_f = 247.45 \times \text{tg}(2/3 \times 33)$$

$$100 \text{ KN/ml} \approx F_f = 99.98$$

- La projection horizontale de la force de poussée

$$P_h = P \cos(\delta)$$

AN :

$$P_h = 177.5 \times \cos(22^\circ)$$

$$P_h = 165 \text{ KN/ml}$$

D'où la résultante horizontale sera de la forme suivante :

$$R_h = P_h - F_f$$

AN :

$$R_h = 165 - 100$$

$$R_h = 65 \text{ KN/ml}$$

En Calcul définitif on aura les résultats suivants :

- Le coefficient de sécurité

$$F_s = \frac{(2/3)C.B + R_v.tg(2.\varphi/3)}{R_h} > 1.5$$

AN :

$$F_s = \frac{0 + 324. x tg(2/3x33^\circ)}{65}$$

$$F_s = 2.01 > 1.5$$

∅ La condition est vérifiée

- La contrainte verticale

$$\sigma_v = P_{mur} / S_{mur} \ll \sigma_{adm}$$

AN :

$$\sigma_v = \frac{12372.5}{8.5 x 50}$$

$$\sigma_v = 29 \text{ KN} / \text{m}^2 \ll 200 \text{ KN} / \text{m}^2$$

- Conclusion

On constate, que notre ouvrage résiste bien au glissement de terrain ainsi qu'au poinçonnement grâce à son propre poids léger.

VIII.8. CALCUL DES CARACTERISTIQUES MECANIKUES DU REMBLAI RENFORCE

Les matériaux composites génèrent des structures fortement hétérogènes sur lesquels les calculs sont complexes, pour laquelle les recherches se sont orientées à trouver une théorie qualifiée qui peut substituer un sol hétérogène en sol homogène associé [théorie d'homogénéisation].

Comme toutes les conditions pour l'application de cette théorie sont vérifiées, se résume en :

- ∅ la périodicité du renforcement (condition essentielle qui permet d'obtenir une formulation théorique du critère de résistance macroscopique)
- ∅ le nombre suffisant d'inclusion de renforcement permettant de conférer au matériau composite une certaine 'homogénéité macroscopique '

VIII.8.1.Objectif

L'objectif dans cette partie de calcul est quantifié par l'amélioration des caractéristiques mécaniques (C_H, ϕ_H) du sol renforcé par des nappes continues en matière pneumatique.

VIII.8.2.Principe de calcul

Le principe utilisé dans cette partie est basé sur la théorie d'homogénéisation, elle consiste à substituer un sol hétérogène (renfort +sol) par un sol homogène de nouvelle caractéristique (C_H, ϕ_H) [figure VIII.10].

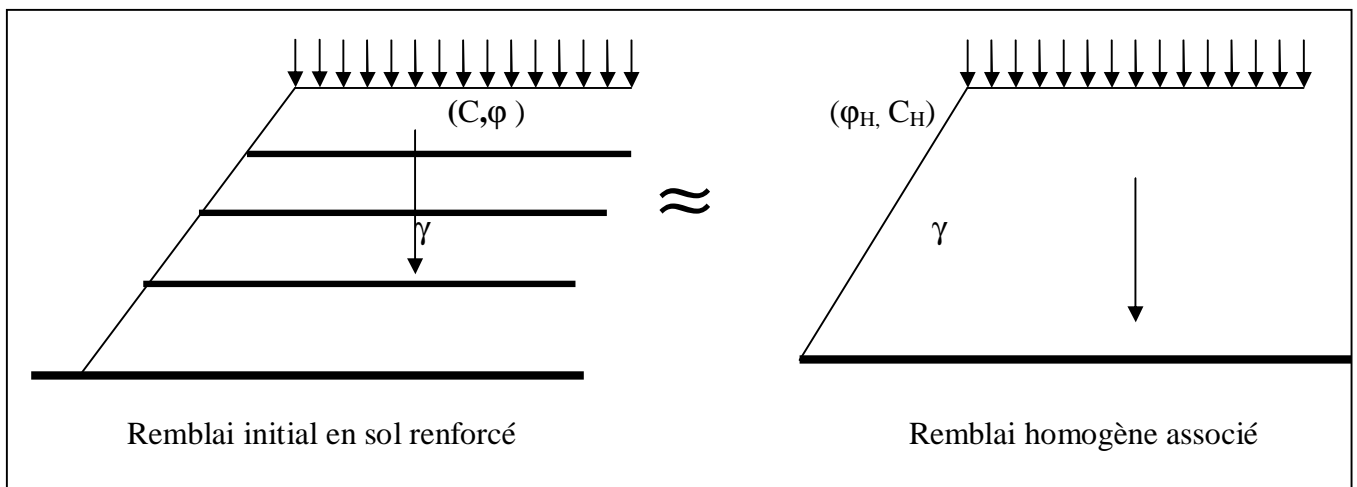


Figure VIII.10. Principe de la méthode d'homogénéisation

VIII.8.3.Déroulement de calcul

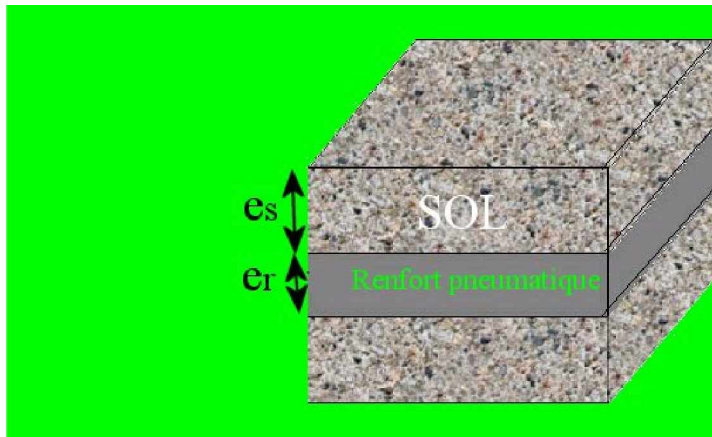


Figure.VIII.11.Principe de la cellule de base

- Principe du critère de rupture macroscopique en fonction de la contrainte principale

$$\underline{\underline{\Sigma}} \in G^{hom} \Leftrightarrow \{ \underline{\underline{\Sigma}} = \lambda_s \underline{\underline{\sigma}}^s + \lambda_r \underline{\underline{\sigma}}^r, \underline{\underline{\sigma}}^s \in G_s, \underline{\underline{\sigma}}^r \in G_r \}$$

$$\left[(\Sigma_1 - \Sigma_2)^2 + 2\sigma(\Sigma_1 - \Sigma_2)\cos 2\alpha + \sigma^2 \right]^{1/2} \leq (\Sigma_1 - \Sigma_2 - \sigma)x \sin \phi$$

$$-\sigma^r \leq \sigma \leq 0$$

Pour $\alpha=0$; renforts horizontaux, le critère s'écrit alors :

$$\left[(\Sigma_1 - \Sigma_2)^2 + 2\sigma(\Sigma_1 - \Sigma_2) + \sigma^2 \right]^{1/2} \leq (\Sigma_1 - \Sigma_2 - \sigma)x \sin \phi$$

- Ecriture des équations de Mohr en contrainte macroscopique :

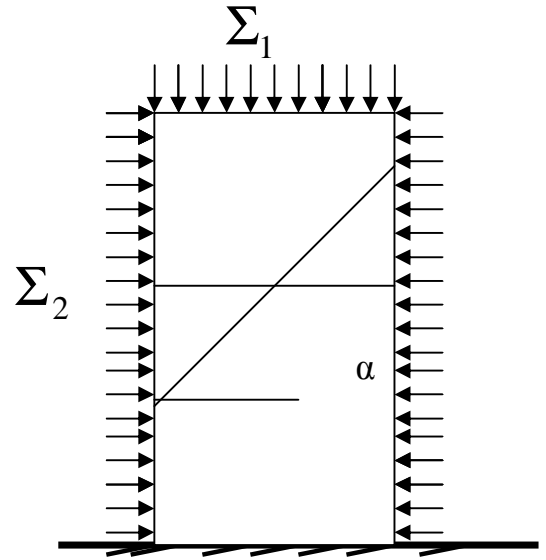
$$\sigma_n = \frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} + \frac{\Sigma + \Sigma_{21}}{2} x \cos 2\alpha \quad \dots \dots \dots (*)$$

$$\tau = \frac{\Sigma_1 - \Sigma_2}{2} x \sin 2\alpha$$

Et $\Sigma_1 = K_p + \Sigma_2 \quad (3)$

$$\text{Avec } K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

$$\Sigma_2 = \sigma_2^s + \sigma \quad \text{Et} \quad \sigma = \frac{F^r}{h}$$



D'après (*) le critère de Mohr Coulomb s'écrit :

$$\Sigma_1 = \sigma_n + \tau_x \left(\frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \right) \quad (1)$$

$$\Sigma_2 = \sigma_n - \tau_x \left(\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \right) \quad (2)$$

En remplaçant (1) et (2) dans (3) on aura :

$$\tau = A x \sigma_n + \frac{1}{2} x \frac{\cos \varphi}{(1 - \sin \varphi)}$$

Avec :

A : expression trigonométrique en fonction de φ .

K_p : coefficient de poussée passive.

Par approximation du composite comme un milieu frottant isotrope.

- Le critère définissant le domaine isotrope :

$$\sigma_1 x (1 - \sin \varphi) - \sigma_2 (1 + \sin \varphi) - 2C_{isotro} x \cos \varphi \leq 0 \quad (1)$$

- Le critère s'écrit en fonction de Σ_1, Σ_2 et σ_{ren} :

$$(\Sigma_1 - \Sigma_2) - (\Sigma_1 + \Sigma_2) x \sin \varphi - (1 - \sin \varphi) x \sigma \leq 0 \quad (2)$$

Par identification, entre (1) et (2), la cohésion isotrope aura comme valeur :

$$C = \frac{1}{2} x \left(\frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \right) x \sigma \quad \text{ou} \quad C = \frac{1}{2} x \left(\frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) x \sigma$$

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

F : La résistance a la traction des pneus.

S : La section de la cellule de base, $S = H \times 1$ (ml)

De ce fait, on a mis en évidence la cohésion homogène correspondant à notre sol renforcé.

$$C_H = \frac{1}{2} x \left(\frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \right) x \sigma$$

Avec

$$\sigma = \frac{F}{\Delta H \times 1 \text{ ml}}$$

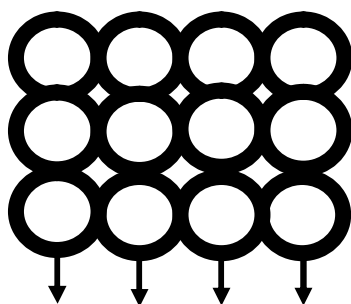
AN :

$$C_H = \left[\frac{1 + \sin 33^\circ}{2 \times \cos 33^\circ} \right] X \frac{F}{0.4 \times 1}$$

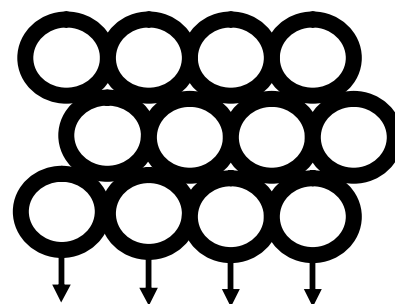
$$C_H = 276 \text{ KN/m}^2$$

VIII.9.OBSERVATION ET COMPORTEMENT

Nous rappelons car cela est très important, que l'assemblage de ces différents éléments permet de réaliser des armatures linéaires ou en nappe. Il convient toutefois dans l'assemblage de tenir compte des possibilités de moduler la résistance du renforcement dans les zones où les efforts de traction sont les plus importants.



Disposition en file



Disposition orthorhombique

Figure VIII.12. Mode d'assemblage 'Nappe de Pneusol'

- § La diminution de l'espacement entre les nappes augmente l'effet stabilisateur.
- § En effet lorsque l'espacement « e » entre les nappes de pneus est faible ou nul, la hauteur de remblai est élevée, car les grains de sable sont doublement emprisonnés d'abord à l'intérieur des éléments de pneumatique et ensuite à l'intérieur des boucles que forme la chaîne continue. Ils sont donc fortement liés les uns aux autres par ce double effet de rouleau, par un serrage introduisant un effet de dilatance important, ensuite par le frottement sol-pneumatique et le frottement interne du sable lui-même.

§

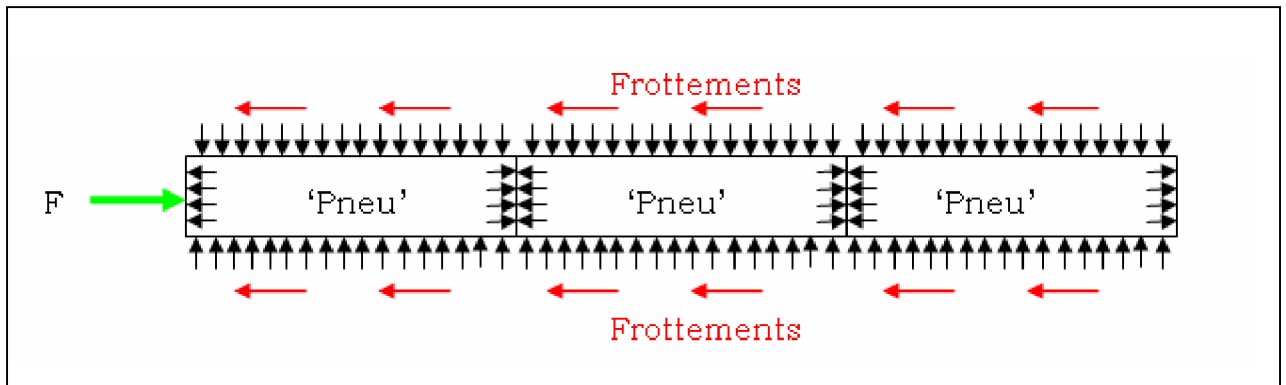


Figure. VIII.13. Schéma de comportement

'ADHERENCE SOL-PNEUMATIQUE'

VIII.10.CONCLUSION

La possibilité d'homogénéiser un sol renforcé, c'est-à-dire de l'assimiler à un matériau homogène équivalent, suppose en effet remplir trois conditions :

- ce concept permet l'évaluation des grandeurs globales qui se rattachent au matériau composite.
- les inclusions doivent être réparties de façon presque uniforme de sorte que le sol puisse être modélisé comme matériau composite à structure périodique. Cette condition de périodicité apparaît souvent, quelque soit le type de renforcement exception faite pour le texsol (renforcement aléatoire).
- la période caractéristique du renforcement (espacement des nappes) doit être considéré petite par rapport aux dimensions de l'ensemble de l'ouvrage.

Ainsi il est possible d'analyser la stabilité d'un ouvrage en sol renforcé en considérant un ouvrage homogène associé de même géométrie, de même chargement, de mêmes conditions aux limites mais avec un matériau homogène anisotrope.

A travers le calcul réalisé on a pu quantifier le degré de la réussite de l'application de cette technique au renforcement des sols.

Les ouvrages ainsi réalisés sont très stables et ne présentent aucun risque de glissement ou même d'instabilité locale par rapport aux inclusions en pneus ou par rapport à l'ensemble de l'ouvrage.

***CONCLUSION
GENERALE***

La préoccupation de l'homme pour la protection de son environnement devant l'agressivité de son appareil industriel, ainsi que l'orientation de ses idées vers l'optimisation des coûts et délais de réalisation de ses projets ont poussé les chercheurs dans le lancement de plusieurs travaux visant à proposer de nouvelles technologies de réalisations surtout si on ajoute le souci d'élimination des déchets encombrant la nature.

La présente recherche est une contribution modeste dans l'approfondissement de l'étude d'un des procédés de renforcement des sols qui sert notamment à dégager un des déchets de l'environnement "les pneumatiques usagés". On a pu déterminer à partir de ce travail le pouvoir du Pneusol d'améliorer les caractéristiques d'un sol afin de participer dans la stabilité principalement des ouvrages, et élargir la possibilité d'utilisation dans différents domaines du génie civil.

Cette étude est basée principalement sur une expérimentation sur modèle réduit à travers laquelle nous avons pu tester le comportement d'un sol renforcé par des inclusions en nappes de couronnes de polystyrène en changeant à chaque séries d'essais l'arrangement et le mode d'emplacement de ces dernières afin d'étudiés l'influence de plusieurs paramètres.

Ce travail se résume comme suit :

La première partie de notre étude a été réservé à l'introduction d'une recherche bibliographique sur l'environnement, les pneumatiques usagés et la valorisation de ces derniers. De même on traite en général la technique du Pneusol et qui résume pratiquement les travaux effectués par les différents chercheurs dans ce contexte.

La deuxième partie intitulée : étude expérimentale, illustre quelques aspects liés aux modèles réduits. Une présentation détaillée est énoncé de notre modèle réduit utilisé dans la campagne expérimentale, les matériaux utilisés en termes de remblai ou d'inclusion de renforcement. On donne aussi, la description du mode opératoire suivi qu'un tableau résumé du programme d'essai effectué dans le programme prévu de notre recherche.

Dans la troisième partie nous avons présenté les résultats obtenus à partir des essais effectuées sur modèle réduit, à chaque fois des interprétations sont données à cet effet. Le phénomène étudié (pneusol réducteur de poussée) a fait l'objet d'une large exploitation mettant en évidence la relation entre les différents paramètres testés.

Plusieurs séries d'essais ont été exécutées :

- ◆ Série d'essais sur sable seul
- ◆ Série d'essais sur sable renforcé par des nappes de couronnes attachées selon une disposition normale (en file)
- ◆ Série d'essais sur sable renforcé par des nappes de couronnes attachées selon une disposition orthorhombique
- ◆ Série d'essais particuliers :
 - § Traction des couronnes
 - § Essais d'arrachement des couronnes noyées dans le remblai
 - § Etude et développement des lignes de ruptures

La première série d'essais a été élaboré avec du sable seul afin de mettre en évidence la courbe de référence, les courbes trouvées sont similaires à la courbe de cisaillement d'un sable lâche.

En ce qui concerne la deuxième série d'essais, elle simule un sable dont lequel on ajoute des couronnes de polystyrène sous deux modes de dispositions : la disposition des couronnes soit en file soit en disposition orthorhombique. Nous avons constaté que pour tous les essais qu'avec les couronnes, la hauteur du massif atteinte derrière l'écran est nettement supérieure à celle du sable seul et ceci quelque soit le cas de variation de disposition. Ceci est dû à l'amélioration de la stabilisation du mur dès l'introduction du Pneusol.

Aussi, nous avons démontré l'influence du pourcentage de vide sur la réduction de poussée que l'on peut gagner éventuellement avec la disposition orthorhombique.

Dans la troisième série d'essai, on a fait varier l'espacement entre les nappes d'inclusion des couronnes pour déterminer l'influence de ce paramètre sur le comportement de notre remblai, les résultats issues ont montrées la rupture du sable non renforcé d'une manière brutale, alors que la présence d'inclusions en pneumatiques usagés avec des espacements différents, traduit une rupture progressive.

La comparaison entre les différentes courbes obtenues en variant l'espacement entre les nappes des couronnes, nous montrent que l'efficacité optimale du renforcement est obtenue avec un espacement entre les nappes égal à zéro " nappes superposée", ceci revient à dire dans ce cas, que l'on a affaire au cas d'un mur poids juxtaposé à notre mur de soutènement.

Aussi le gain de la hauteur de rupture décroît lorsque l'espacement entre les nappes de Pneusol augmente, le renforcement n'étant sensible que pour des espacements inférieurs à environ trois fois l'épaisseur des renforts.

On a démontré ainsi que pour le sable renforcé par les nappes, les points d'application de la poussée sont légèrement élevés, vu que le remblai renforcé a acquis une certaine cohésion.

En ce qui concerne les essais particuliers (la quatrième série d'essai) ou on a étudié en premier lieu la traction d'une seule couronne, la contrainte de rupture est de l'ordre de $\sigma_0^r = 0,357 \text{ kg/cm}^2$. Quant aux essais d'arrachement des couronnes noyées dans le sol, nous permettent d'affirmer que les déplacements diminuent en augmentant la longueur de la nappe de couronne.

Afin d'apprécier et de préciser la forme du prisme de rupture que ce soit à la surface ou au sein du massif. Nous avons effectués trois (03) essais spéciaux très minutieux, nous avons optés pour la méthode avec des bandes de sable coloré au bleu de méthylène afin d'étudier et de déterminer la ligne de rupture au sein même du massif.

On remarque que les lignes de glissement sont généralement rectilignes dans leur partie haute et qu'elles s'incurvent vers le pied de l'écran. La forme de cette partie curviligne dépend de la nature du mouvement, de la densité du massif et de la rugosité de l'écran.

Les résultats ainsi obtenus, montrent bien que cette surface du prisme de rupture dépend de la présence des nappes d'inclusions en pneumatiques et l'espacement entre elles.

Les résultats obtenues démontrent la relation entre l'espacement des nappes et le taux de réduction de poussée, nous avons constaté que plus on diminue l'espacement, plus le taux de réduction augmente, ce qui explique que le massif devient plus stable avec une meilleure cohésion, et ce qui traduit aussi un allègement de sol.

En résumé, à travers notre étude sur le Pneusol réducteur de poussée on notera que:

- ∅ L'introduction des pneus dans le sol stabilise le massif derrière le mur
- ∅ La mise en place du Pneusol modifie la nature du massif mis en remblai derrière l'ouvrage et par la suite son fonctionnement, car ce remblai a acquis une certaine cohésion qui réduit la poussée exercée sur le mur, de plus il constitue en lui même un massif plus déformable réduisant ainsi la poussée sur le mur à renforcer.
- ∅ L'effet "réducteur de poussée" du Pneusol augmente avec le nombre de pneus par nappe.
- ∅ La diminution de l'espacement entre les nappes augmente l'effet stabilisateur du pneusol, en effet quand l'espacement diminue le

pneusol tend à se comporter comme un ouvrage poids juxtaposé au mur cantilever.

- ∅ En jouant sur le nombre de pneus par nappe, on constate que l'utilisation du Pneusol sera d'autant plus intéressante que les déplacements autorisés du mur seront élevés.
- ∅ La disposition orthorhombique des pneus en nappes est nettement meilleure que la disposition en files, car les couronnes de pneus étant liés les unes aux autres, se dotent ainsi d'une rigidité meilleure et d'une adhérence appréciable avec l'apparition d'un effet de groupe positifs.
- ∅ La présence du Pneusol diminue la soudaineté de la rupture lorsqu'en tend vers la hauteur critique.
- ∅ Le taux de réduction de poussée est de l'ordre de 70%

Enfin de mémoire, nous donnons les bases et quelques aspects fondamentaux de la théorie d'homogénéisation, en phase élastique linéaire et en calcul à la rupture. Comme cette théorie demande une étude très approfondie appliquée au cas d'un mur de soutènement (qui serait souhaitable de le faire comme une autre recherche à la suite de ce travail de magister), nous avons traité titre d'application un cas réel d'un talus renforcé par des inclusions en pneumatiques usagés placées en nappes afin d'illustrer et de voir l'importance de cette théorie.

A travers le calcul réalisé on a pu quantifier le degré de la réussite de l'application de cette technique au renforcement des sols.

Ainsi il est possible d'analyser la stabilité d'un ouvrage en sol renforcé en considérant un ouvrage homogène associé de même géométrie, de même chargement, de mêmes conditions aux limites mais avec un matériau homogène anisotrope.

Nous dirons aussi que les ouvrages ainsi réalisés sont très stables et ne présentent aucun risque de glissement ou même d'instabilité locale par rapport aux inclusions en pneus ou par rapport à l'ensemble de l'ouvrage.

Enfin, nous souhaitons aussi que notre travail contribue d'une façon rationnelle à une plus large diffusion de l'utilisation de ce matériau dans le domaine du Génie civil.

BIBLIOGRAPHIE

The logo for 'BIBLIOGRAPHIE' features a large, stylized letter 'B' in a metallic, 3D font with a yellow and orange gradient. To the right of the 'B', the word 'BIBLIOGRAPHIE' is written in a smaller, all-caps, serif font with a similar metallic texture.

-
- [1]- NGUYEN THANH LONG « Le Pneusol : Recherches- Réalisations- Perspectives » (1993)
- [2]- N.T.LONG et JEAN-CLAUDE VALEUX « Le Pneusol léger » Rapports des laboratoires (1989)
- [3]- M.ABDURAHMEN, R.BOUZIDI, P.JOUVE, N.T.LONG « Modélisation du Pneusol »
- [4]-EMILE CONSTANT « La problématique du pneus usagés non rechapable (P.U.N.R)»(1998)
- [5]- Le Guide de tous les déchets caoutchouc et pneumatique
- [6]- SCHLEELE, université technique de HANOVRE « rapport d'expertise » La circulaire N°2/73 du l'association de l'industrie allemande des caoutchouc
- [7]- YVAN BOURDEAU « poussée des sols pulvérulents, influence des caractéristiques des sols et du modèle d'essai » (1977)
- [8]- N.T.LONG « Le Pneusol » Rapports des laboratoires (1985)
- [9]- FRANÇOIS SCHLOSSER « Ouvrages de soutènement, poussée et butée » (1990)
- [10]- FRANÇOIS SCHLOSSER et PHILIPPE UNTERREINER « Renforcement des sols par inclusions » Techniques de l'ingénieur (1990)
- [11]- BUHAN.P et SALENCON.J « Analyse de stabilité des ouvrages en sol renforcé par une méthode d'homogénéisation » Revue française de géotechnique N°41(1987)
- [12]- SCHLOSSER.F et LONG.N.T « Recent results in french research on reinforced earth » Journal ASCE, vol 100 (1974)
- [13]- SCHLOSSER.F, MAGNAN.J.P et HOLTZ.R.D « Constructions géotechniques » Rapport général .C.R XI^e Congrès International de mécanique des sols et des Travaux de Fondations, San Francisco (1985)
- [14]- SCHLOSSER.F, UNTERREINER.P et PLUMELLE.C « Synthèse sur le renforcement des sols. Club IREX- Renforcement des sols (1991)
- [15]- SCHLOSSER.F, JACOBSEN.H.M et JURAN.I « Le renforcement des sols » C.R VIII^e Conférence Européenne de Mécanique des Sols et Travaux de Fondations, revue française de géotechnique, N°29 (1983)
- [16]- CAMBEFORT.H « Géotechnique de l'ingénieur, reconnaissance des sols » (1972)
- [17]- CAQUOT.A et KERISEL.J « Traité de Mécanique des sols » (1966)
- [18]- CHERCHALI.C « Calcul des talus renforcés, clouage des sols »
-

-
- [19]- LUC DELATTRE « l'approche par le calcul (les méthodes classiques et la méthode au coefficient de réaction » bulletin des laboratoires des ponts chaussées, REF 4308 (2001)
- [20]- SCHLOSSER.F « Murs de soutènement » Techniques de l'ingénieur
- [21]- SUQUET. P « Une méthode duale en homogénéisation : application aux milieux élastiques » Journal de Mécanique Théorique et Appliquée, n° spécial (1982).
- [22]- BOUTIN. C, JOUVE. P, LAREAL. P & Long N.T « Essais d'homogénéisation du Pneusol » Rapport scientifique, GRECO Géomatériaux (1992).
- [24]- DANTEC.P, JEAN.P.A, LONG.N.T, POUGET.P, SAPY.M, « le Pneusol et l'effet de voûte » Colloque international interaction sols structures Mais 1987 Paris.
- [25]- F. BELABDELOUAHAB, R. DERBAH « Le Pneusol » II Congrès Algérien de la route (ARAL) Annaba - Algérie. 1996.
- [26]- F. BELABDELOUAHAB, N. T. LONG, P. LAREAL. « Etude expérimentale du Pneusol réducteur de poussée » Séminaire International sur le thème pathologie des fondations, première rencontre en géotechnique des pays Francophones Africains, Marrakech - Maroc. (17/18/19 Septembre 1996)
- [27]- F. BELABDELOUAHAB « Etude du Pneusol réducteur de poussée » First Arabic Mechanics Congress "AMC 97" Damas – Syrie. 1997.
- [28]- F. BELABDELOUAHAB, H. BOUZIANE « Pneusol Antisismique » Séminaire Maghrébin sur le Risque Sismique - Oran. Algérie 1997.
- [29]- H. TROUZINE, A. ASROUN, N. T. LONG, « Pneusol » 30 ans après "XXII^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, Marne La Vallée – 2004
- [30]- F. BELABDELOUAHAB, A. BOUDCHICHE « Etude expérimentale et comparative sur modèle réduit : Pneusol –Plasterre-Géotextile » Journée scientifique sur la valorisation des pneus usagés et les déchets plastiques dans le domaine des travaux publics, MTP, Dar el Dief, Bouchaoui, Alger, (12 Nov.2005)
- [31]- F. BELABDELOUAHAB « Expérimentation en vraie grandeur-Déviation de Bousmail-Stabilité d'un talus en pneusol – Ouvrage O.C 1/1 PK 8+278 » Congrès Africain de la Route-6-8 Décembre 2005 – Alger.
- [32]- BELABDELOUAHAB F., TAKI M., DJIDJELI Z., MAHIOUZ M. « Large scale experimentation slope stability of soil tyre » INTER BUILD 2007 " – 21-25 juin 2007. CICC-Cairo – Egypt.
-

[33]- F. BELABDELOUAHAB, A. ZERZOUR « Recherche et valorisation des pneumatiques usagés dans le domaine du génie civil » JERRED'08 – 04 juin 2008. Oran – Algérie.

[34]- H. TROUZINE, A. ASROUN, N.T. LONG. « Pneus usés et sols gonflants »- Actes Orgagec'08 Organic Materials for Construction: Technical and Environmental Performances. Paris.2008

[35]- H. TROUZINE, A. ASROUN, N.T. LONG. « Laboratory study of Waste tires fill used with foundations in expansive soils "International Journal of Applied Engineering Research. ISSN 0973-4562. Volume 3, Number 2 (2008), pp. 287– 304
