

CHAPITRE 2 - COMPORTEMENT MECANIQUE DU PNEUSOL

2.1. INTRODUCTION

Le programme des essais sur le Pneusol doit tenir compte de sa composition (association de pneus usagés et de sols) et aussi des moyens disponibles. De plus le matériau utilisant un déchet abondant, le pneu usagé non rechappable (pnur), ces essais ont aussi pour but de convaincre les maîtres d'ouvrages du "sérieux de notre étude" et de les inciter à l'utiliser et aussi à prendre notre relève. Ils sont donc orientés dans plusieurs directions:

- une étude théorique et expérimentale à partir des essais à l'appareil triaxial sur un sol renforcé "sable-latex" pour montrer que grâce à la présence des armatures dans les pneus les résultats espérés sont bien meilleurs que ceux obtenus avec ce mélange,
- des essais in situ pour déterminer l'adhérence pneumatique-sol, facteur important dans le calcul de la stabilité externe des ouvrages de soutènement en Pneusol,
- des essais in situ de capacité portante, de comportement sous charges dynamiques
- des essais ponctuels sur modèles réduits tridimensionnels ayant pour objet d'obtenir des résultats d'ordre qualitatif permettant de mettre en évidence l'influence de certains paramètres.
- des suivis sur des ouvrages réels.

Nous allons développer les trois premiers points et pour les deux derniers, les expliciter au fur et à mesure dans les applications du Pneusol.

2.2. ETUDE EN LABORATOIRE DU MELANGE "SABLE-LATEX"

Le Pneusol est 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.

Renforcer un sol par un matériau de module plus faible que le sol est à priori une mauvaise idée. Le matériau ainsi réalisé serait intermédiaire et posséderait des caractéristiques plus faibles que le sol de base.

Or la plupart des constituants du pneu sont armés par des armatures très résistantes. Leur schématisation en laboratoire n'est pas aisée à réaliser. On peut cependant tenter de cerner

partiellement leur comportement, notamment dans le cas simple où le fonctionnement du Pneusol est basé sur le frottement (bandes de roulement aplaties). Ceci ne correspond pas au cas que l'on utilise habituellement, c'est à dire avec les bandes de roulement sur chant.

Des essais ont été réalisés à l'appareil triaxial sur des échantillons cylindriques de sable armé par des disques horizontaux de feuilles d'aluminium ou de latex. Les échantillons avaient 10 cm de diamètre et 20 cm de hauteur. Le sable utilisé était du sable de Fontainebleau, dont la granulométrie est très serrée (diamètre moyen des grains : 0,10 mm) et le poids volumique compris entre les valeurs extrêmes suivantes :

$$13,90 \text{ kN/m}^3 \leq \gamma_d \leq 17,20 \text{ kN/m}^3$$

Chaque lit d'armature était constitué par un disque circulaire de même diamètre que l'éprouvette. Le papier d'aluminium a 18 μ m d'épaisseur, une résistance moyenne à la traction de 11,50 kN par centimètre. Le module E de l'aluminium est de l'ordre de 7x10⁹ kPa. Le latex utilisé a 0,5 mm d'épaisseur, un module dépendant du taux de déformation et une résistance à la rupture de l'ordre de 20 MPa

| | |
|---------------------|-----------|
| 100% de déformation | E=0,7 MPa |
| 300% de déformation | E=1,6 MPa |
| 600% de déformation | E=9,5 MPa |

Les lits d'armatures, tous identiques, étaient disposés horizontalement et régulièrement espacés d'une distance ΔH égale à 2 cm ou 5 cm.

Le comportement de la Terre Armée à l'appareil triaxial a été abondamment étudié par de nombreux laboratoires et notamment par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et l'INSA de Lyon et les principaux résultats sont déjà largement publiés.

Rappelons ici quelques résultats marquants et leur comparaison avec les essais sur des échantillons armés de latex.

* Courbes contrainte-déformation (Fig.11)

La courbe contrainte-déformation de l'échantillon de sable armé classique (disques d'aluminium) possède une tangente commune avec celle du sable seul, contrairement à celle du latex (pente plus faible).

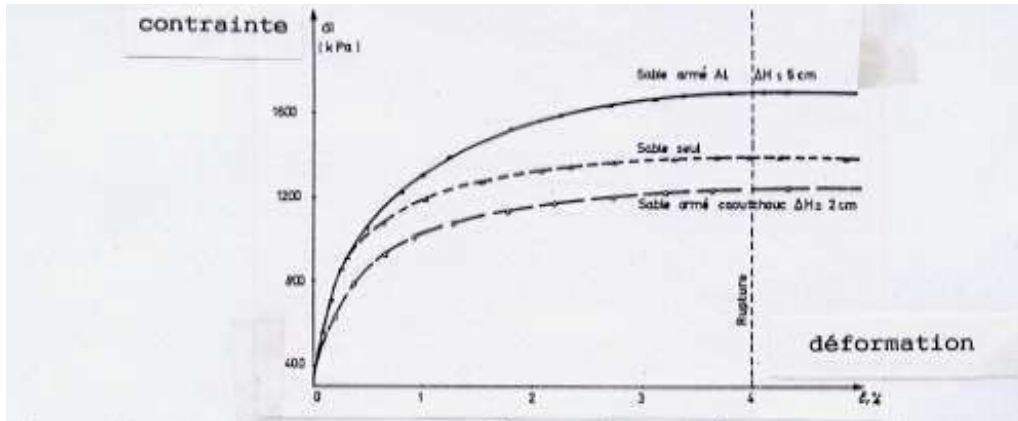


Figure 11 : Courbes "contrainte-déformation" d'éprouvettes de sable et de sable armé d'aluminium ou de latex

Cela signifie que les modules tangents à l'origine sont différents et dépendent des caractéristiques des armatures, de l'espacement ΔH entre les armatures et de leur épaisseur.

L'épaisseur non négligeable des disques de latex explique aussi pour une bonne part l'obtention d'un module tangent plus faible.

a) Courbes intrinsèques

L'étude du comportement global du sable armé classique permet de dégager les conclusions suivantes:

* Il existe deux types de rupture de l'échantillon :

- rupture par défaut d'adhérence, caractérisée par une déformation en tonneau de l'éprouvette et sans cassure des armatures;
- rupture des armatures, avec apparition d'un plan de rupture;

* A la rupture, lorsqu'il y a cassure des armatures, le sable est à l'état limite et la présence des armatures se traduit par l'existence d'une cohésion anisotrope, proportionnelle à la densité des armatures et dont la valeur maximale est donnée par la relation suivante:

$$C = (1/2\sqrt{K_p}) \times R_t / \Delta H$$

R_t = résistance à la traction/unité de longueur

ΔH = espacement des armatures

$K_p = 1/K_a$ = coefficient de butée de Rankine

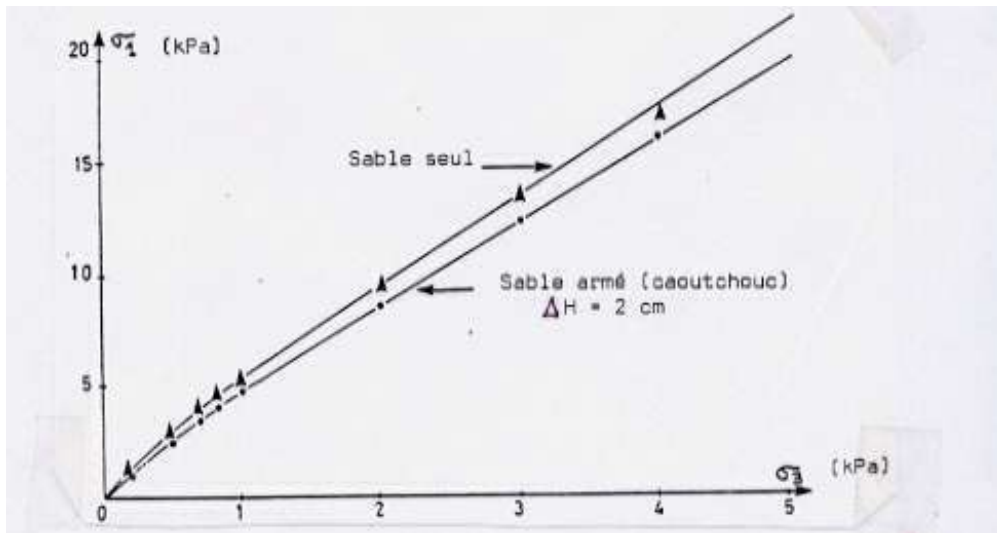


Figure 12: Courbe intrinsèque d'un sable et d'un sable armée de caoutchouc

* Dans une sollicitation triaxiale à contrainte latérale constante, le sable situé entre les armatures voit son état de contrainte moyen évoluer progressivement depuis l'état de repos ($K = K_0$) jusqu'à l'état limite K_a .

L'étude du comportement global du sable armé de latex montre par contre :

- des déformation axiales (ϵ_1) et latérale (ϵ_3) plus importante que le sable seul.

- un déviateur à la rupture légèrement plus faible que pour le sable seul ainsi qu'une déformation à la rupture ϵ_1 plus importante. La comparaison des deux courbes intrinsèques semble montrer un léger décalage, qui se caractérise par une faible diminution de l'angle de frottement (angle de frottement du sable $\Phi = 37^\circ$). Outre le module du latex, son épaisseur peut également jouer un rôle assez important (Fig.12).

b) Explications du comportement

Considérons deux matériaux de modules E_1 et E_2 soumis à une force F se répartissant entre F_1 et F_2 ($F = F_1 + F_2$).

Soient S_1 et S_2 leurs sections respectives et la déformation commune, on a :

$$\epsilon = F_1 / E_1 S_1 = F_2 / E_2 S_2$$

=

$$F_1 = \epsilon E_1 S_1$$

$$F_2 = \epsilon E_2 S_2$$

Si E_1 est infiniment supérieur à E_2 (cas du sable armé classique), la force F_1 sera infiniment supérieure à F_2 et on aura alors F_1 peu différente de F (Fig.13).

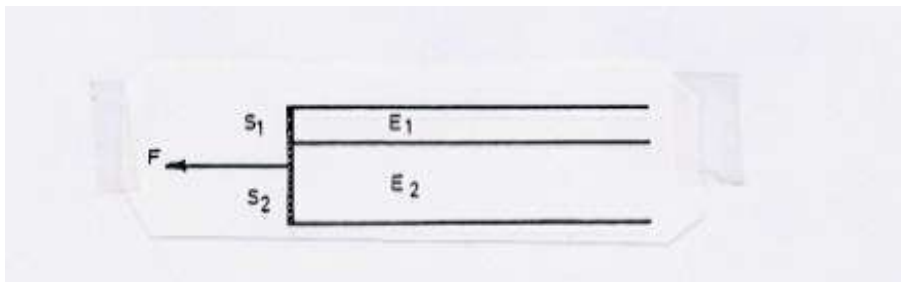


Figure 13 : Comportement en traction d'un matériau composite

Les efforts qui se développent dans la masse du sol sont repris alors par les armatures, par le biais

du frottement sol-armature, ce qui confère au matériau la cohésion trouvée lors des essais triaxiaux.

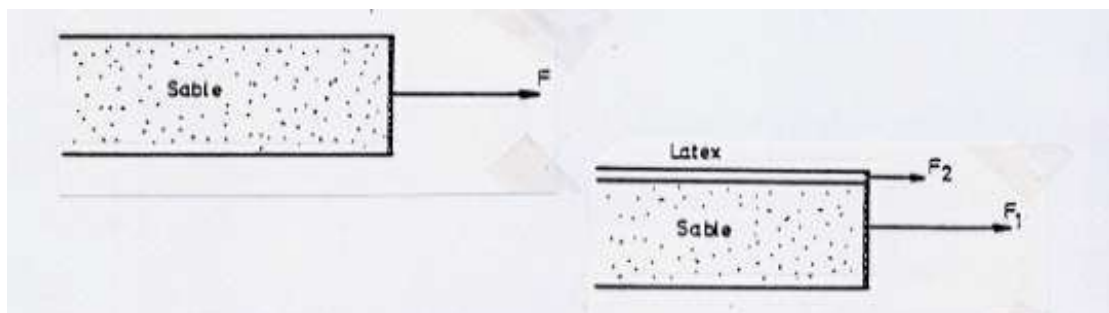


Figure 14 : Comportement comparé d'un sable et d'un sable latex

Dans le cas d'un échantillon de sable-latex, le module du latex est très largement inférieur à celui du sable; ce dernier a donc repris l'ensemble des efforts. Notons que l'épaisseur du latex joue un rôle également important.

Considérons de nouveau les deux mêmes matériaux, le sable et le latex. Supposons qu'on les soumet à un effort de traction selon le principe ci-dessous

Si nous remplaçons une partie du sable de module E_1 par du latex de module $E_2 = \alpha E_1$ (avec α petit que 1) et de section μS (S la section de l'élément), comparons les contraintes dans le sable pour une même sollicitation F :

$$\text{Cas 1 : } \sigma_1 \text{ sable} = F/S$$

$$\text{Cas 2 : } \sigma_2 \text{ sable} = F_1/(1-\mu)S$$

$$\text{Or on a : } F_1/(1-\mu) S E_1 = F_2/\mu S E_2 = F/S [E_1(1-\mu) + \mu E_2], \text{ d'où :}$$

$$\sigma_2 \text{ sable} = F E_1/S [E_1(1-\mu) + \mu E_2] = \sigma_1 \text{ sable} \cdot 1/(1-\mu) + \mu \alpha = 1/1 + \mu(\alpha - 1)$$

or α est très inférieur à 1 et $\alpha - 1$ est négatif et $1 + \mu(\alpha - 1)$ est inférieur à 1, ce qui entraîne que $1/1 + \mu(\alpha - 1)$ est supérieur à 1.

On en déduit donc que la contrainte dans le sable est plus forte dans le deuxième cas que dans le premier.

Le sable dans l'échantillon de sable-latex est soumis à des efforts plus importants que celui d'un échantillon de sable seul. Il n'est donc pas intéressant "d'armer" le sable avec du latex. Le calcul s'applique aussi pour le renforcement avec des non-tissés.

Dans la pratique, les pneumatiques sont fabriqués à partir du caoutchouc vulcanisé, c'est à dire comportant de l'ordre de 40% à 50% de latex, mais aussi différents autres éléments tels que l'huile, les copolymères butadiène-styrène, etc... Ils possèdent de plus la particularité d'être particulièrement bien armés par des fils câblés, des fibres naturelles ou artificielles (nylon, rayonne..) ou métalliques qui constituent une sorte d'armatures des pneus, supportant les flancs et la bande de roulement.

On peut donc penser qu'à partir de ces essais simples, la courbe intrinsèque du Pneusol est intermédiaire entre celle d'un sable armé d'acier et celle d'un sable armé de caoutchouc (mélange de latex et de divers produits chimiques) avec une cohésion induite importante par suite des caractéristiques élevées de l'acier.

Il est certain que la rupture d'un tel matériau composite résulte tout d'abord de la rupture du sable.

La figure 15 montre les courbes "contrainte-déformation" de ces matériaux. Le module du sable-latex est toujours plus faible que celui du sable. Compte tenu des résultats précédents,

en dosant convenablement la quantité de pneumatiques à "injecter" dans le sol, on devrait obtenir un matériau composite à faible module initial et à fort déviateur à la rupture.

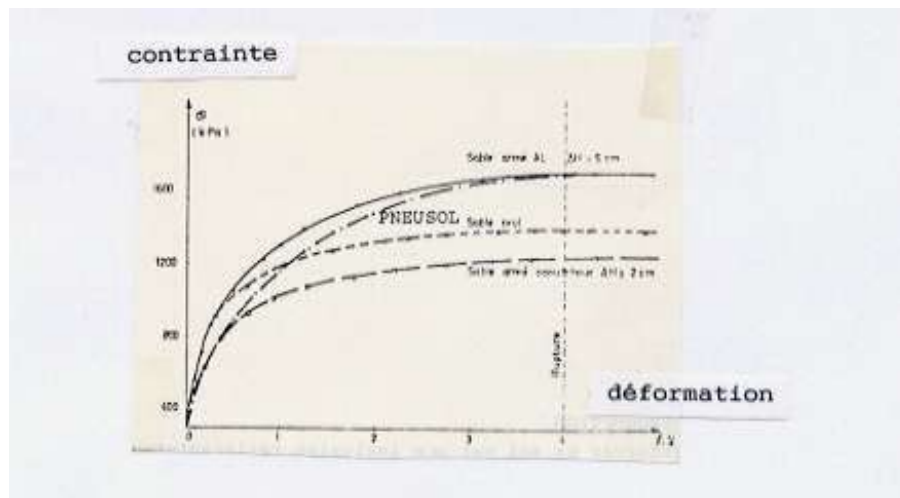


Figure 15 : Courbes "contraintes-déformations"
(La courbe du Pneusol est une hypothèse)

Le comportement du Pneusol est en fait très complexe et, suivant le mode d'utilisation des éléments de pneumatiques, l'effet du frottement "sol-pneumatique" peut devenir très secondaire par rapport à l'effet d'ancrage, qu'on ne peut étudier en laboratoire.

2.3. L'ADHERENCE SOL-PNEUMATIQUE : ESSAIS D'ARRACHEMENT

L'adhérence sol-pneumatique a été étudiée en 1974 au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont Ferrand, au moyen d'essais en vraie grandeur de traction d'éléments de pneumatique noyés dans un remblai (LONG et POUGET, 1980). Nous avons plus particulièrement cherché à mettre en évidence l'influence :

- du type d'armature, en bande ou en nappe,
- de la longueur de l'armature,
- de la contrainte verticale s_v (hauteur du remblai)

Le pneumatique utilisé était du type MICHELIN ZX 145*130

2.3.1. Description de l'essai

Chaque élément testé est mis en place sous une épaisseur de remblai constitué de grave alluvionnaire de l'Allier (granulométrie 0/60). Un câble en acier (élingue) est mis en place à

l'avant de l'élément et permet d'effectuer la mise en traction à partir d'un ou deux camions situés à environ 5m du pied du massif. On supprime les frottements et les effets de bord le long de la plus grande partie de ce câble par sa mise en place à l'intérieur d'un tube en acier de diamètre 50 mm (Fig.16).

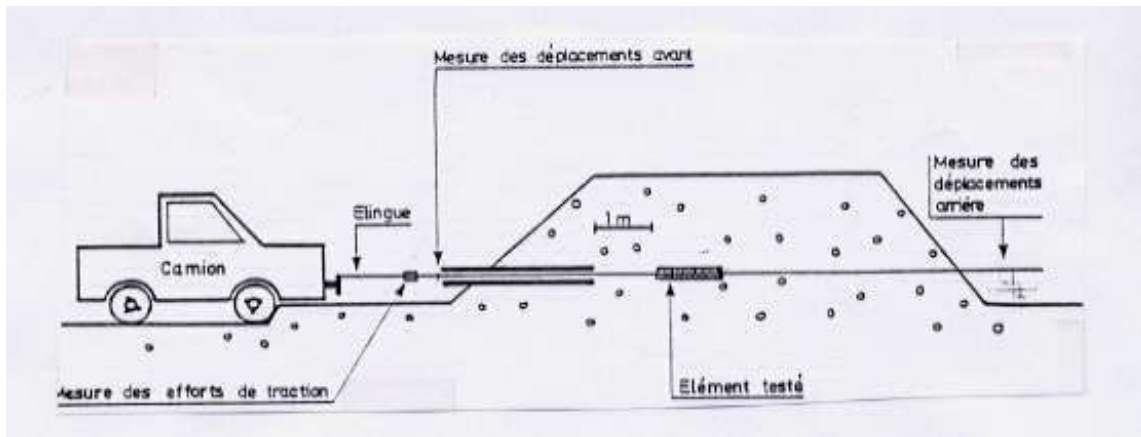


Figure 16 : Schéma de principe des essais d'arrachement d'éléments de pneumatique

Le treuil du camion permet d'atteindre une force de traction maximale de 120 kN après mouflage. La traction du câble a été réalisée la plupart du temps à raison d'une traction de 1 à 2 cm toutes les 20 secondes, soit environ 0,75 mm/s.

Les valeurs relevées sont :

- l'effort de traction, mesuré par un dynamomètre de traction à jauges de contraintes avec lecture sur un galvanomètre à pont de Wheastone et monté entre l'élingue et la poulie de mouflage. La précision de la mesure est de plus ou moins 0,500 kN pour une mesure maximale de 100 kN (0,50%);

- le déplacement à l'avant de l'élément testé, obtenu par la mesure du déplacement de l'élingue à l'aide d'un onglet fixé sur celle-ci. La précision de la mesure est de l'ordre de plus ou moins 2 mm;

- le déplacement à l'arrière de l'élément est obtenu en mesurant à l'arrière du remblai le déplacement d'un petit câble d'acier de 1 mm de diamètre enfilé dans un tube de plastique souple de 4 mm de diamètre. Plusieurs points peuvent ainsi être suivis en déplacement suivant les points d'accrochage sur l'élément. La précision de la mesure est ici de plus ou moins 1mm.

Le compactage du remblai a été réalisé dans la plupart des cas par le chargeur approvisionnant le chantier en matériau.

Pour chaque hauteur de remblai étudié, des étalonnages des élingues avec le système d'attache de l'élément testé ont été réalisés.

A la fin de chaque série d'essais, le remblai a été démonté avec soin, afin d'observer l'état des armatures (type de déformation, rupture)

De plus, la compacité du remblai a été mesurée tous les 50cm (20 kN/m^3).

2.3.2. Formes d'assemblages

Les différents éléments de pneumatiques peuvent être disposés de plusieurs manières :

- flanc posé à plat,
- bande de roulement mise sur chant,
- bande de roulement aplatie; une telle solution (double épaisseur de pneumatique) évite de couper transversalement la bande et de mettre ainsi à nu les aciers. De plus, c'est aussi une opération en moins, donc des économies lors de la mise en œuvre de ce matériau.

L'assemblage de ces éléments permet de réaliser des armatures linéaires ou en nappes. Il convient de tenir compte dans cet assemblage de la possibilité de moduler la résistance de l'armature en certains points où les efforts de traction sont plus importants, ou tout simplement de limiter la déformation. De plus, le montage des éléments doit rester simple pour rendre le procédé techniquement et économiquement valable. La liaison entre les différents éléments est faite avec des pièces métalliques adaptées. Par la suite, diverses liaisons ont été étudiées.

Six remblais de hauteurs différentes ont été réalisés:

- le remblai R1 a surtout permis la mise au point de l'ensemble des opérations de mise en œuvre et d'essai.
- les remblais R2, R3, R4, de hauteurs différentes, reproduisent les mêmes types d'essais sur des armatures linéaires;
- le remblai R5 a permis de tester des éléments de pneumatiques assemblés en nappes (flancs et bandes de roulement sur chant);
- le remblai R6 a fourni en un complément d'essais de traction sur des élingues (étalonnage).

La figure 17 montre une vue en plan des différents remblais

Figure 17 : Vue en plan des remblais

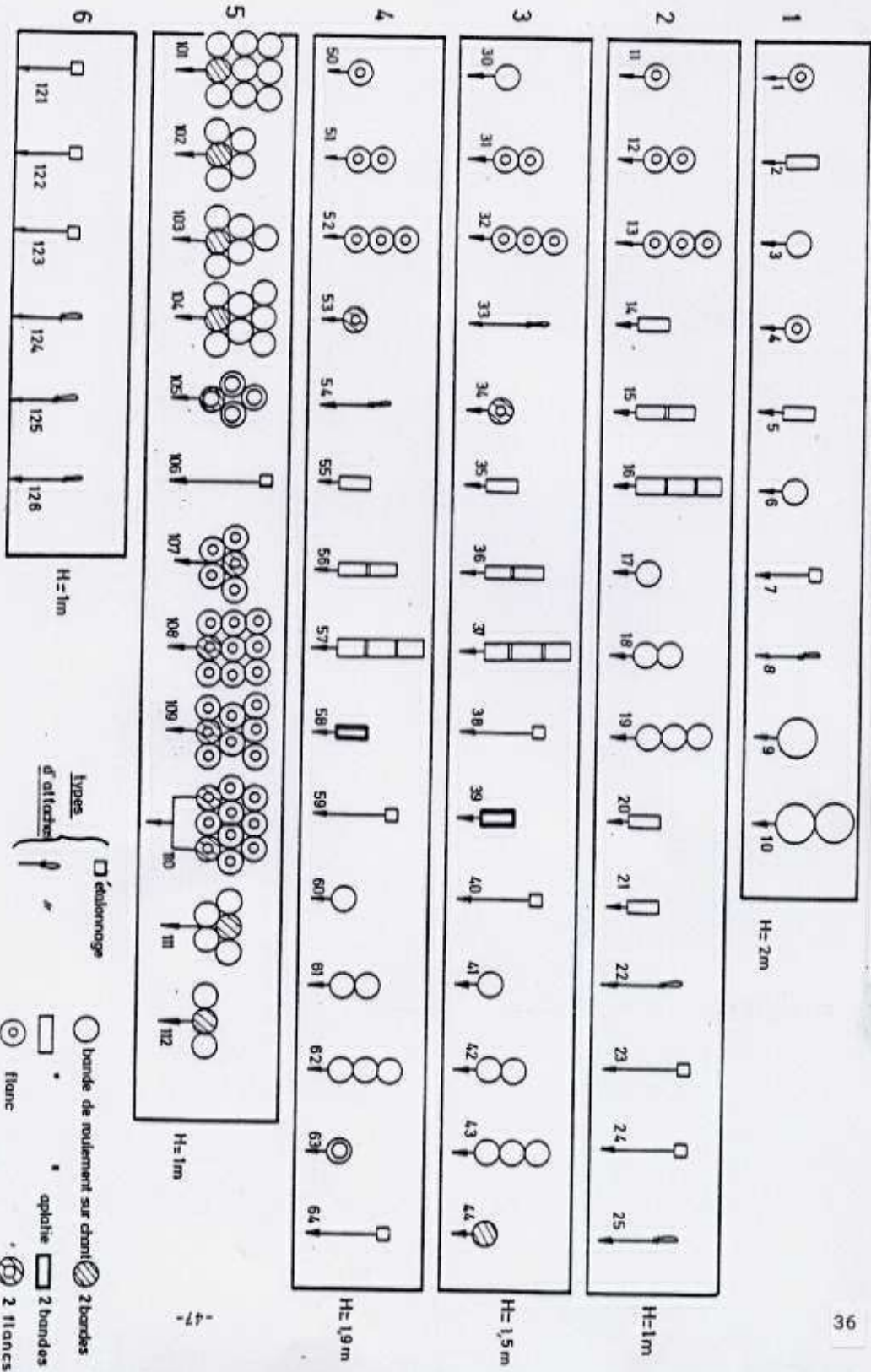


Figure 17 : Vue en plan des remblais

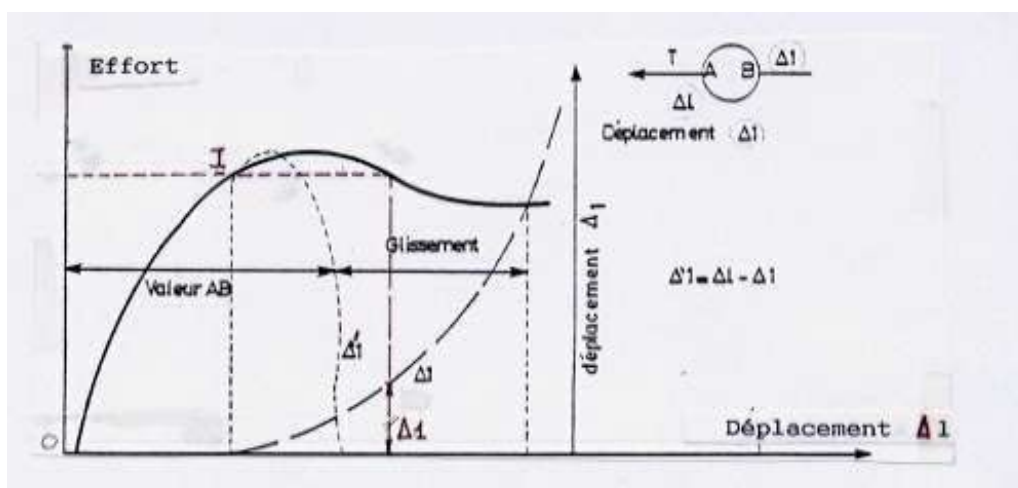
2.3.3. Résultats des essais

Les courbes "effort-déformation" obtenues lors des essais sont données en annexe A.

On trouve sur ces courbes (Fig.18):

- les efforts T mesurés au niveau du câble de traction (T) en fonction du déplacement Δ_L à l'avant de l'élément testé, déduction faite de l'étalonnage du système d'attache, réalisé systématiquement pour chaque type d'attache et chaque remblai;
- le déplacement Δ_1 à l'arrière de l'élément,
- l'allongement de l'élément testé, par déduction des courbes précédentes: $\Delta = \Delta_L - \Delta_1$
- pour certains essais, est également représenté l'allongement de l'élément en fonction des efforts appliqués.

On peut grâce à ces mesures déterminer le glissement, le diamètre et l'allongement de l'élément enfoui dans le remblai.



Pour chaque essais sont également indiqués:

- la valeur de l'effort maximal (avec l'indication de rupture éventuelle de l'attache lorsque celle-ci se produit),

- le déplacement Δ_l correspondant à l'effort maximal de traction;
- la valeur de l'effort de traction pour une déformation de 10 cm et de 15 cm.

Les courbes "effort-déformation" obtenues présentent généralement la même allure, avec une assez forte tangente à l'origine (1,1 à 10 kN/m - moyenne de 4 essais). On constate que la valeur du déplacement correspondant au maximum de l'effort de traction augmente avec le nombre des éléments et que cet effort maximal n'est pas directement proportionnel au nombre d'éléments. D'autre part, l'effort maximum de traction n'est obtenu qu'après le début du glissement de l'ensemble de l'éprouvette testée.

Les dispositions mises en œuvre permettent de séparer la déformation propre de l'élément soumis à l'effort de traction du glissement lui-même.

L'interprétation fine de l'ensemble des résultats est faite sur le même schéma que celle de la courbe type.

On constate que la courbe "effort-déplacement" présente pratiquement toujours un maximum plus ou moins marqué, plus ou aplati.

Plus l'effort appliqué est grand, plus la déformation est grande. Au point I, on observe le déplacement de l'arrière de l'élément testé.

Au-delà du point I, par exemple lorsqu'on atteint le sommet de la courbe, le déplacement mesuré est composé de la déformation du pneu et de son glissement. Cette façon de procéder permet tout d'abord de procéder au traçage de la courbe en pointillé, de la déformation réelle du pneu. Elle permet en outre de déterminer le déplacement et les efforts des différents points se trouvant derrière le point d'application de l'effort.

a) Assemblage de type linéaire

a.1. Bandes de roulement aplaties

Le tableau 1 montre l'influence du nombre d'éléments et de la contrainte verticale sur l'effort maximum obtenu.

Bien que la dispersion des résultats soit importante, on constate que, dans l'ensemble, la traction maximale a plutôt tendance à augmenter avec le nombre d'éléments. Pour une armature composée de trois éléments, elle est de l'ordre de 60 kN.

Seul le premier essai permet de tracer l'ensemble des courbes "effort-déformation" (Fig.19). Pour les trois éléments, on note une progression assez linéaire de la force de traction. Le pic est atteint pour des déformations croissantes et presque proportionnelles avec le nombre

d'éléments testés. Les éléments testés ne dépassent pas le nombre de trois; il nous est donc difficile d'extrapoler pour un assemblage dépassant ce nombre.

En comparant la courbe "contrainte-déplacement" pour un élément avec la courbe Δ_1 du déplacement à l'arrière du pneu, on constate que le glissement commence à un effort assez proche du maximum, qui n'est atteint que grâce à un déplacement de quelques centimètres. La courbe Δ_1 montre la déformation réelle de l'élément.

Tableau 1 : Effort de traction en fonction du nombre d'éléments (bandes de roulement aplaties)

| Contrainte verticale | Effort de traction | | |
|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| | 1élément (kN) | 2éléments (kN) | 3éléments (kN) |
| H=1m(20,5kPa) | 31 | 49 | 68 |
| H=1,5m(30,7kPa) | 16,3 | 49 | 68 |
| H=1,8m(36,9kPa) | 55* | 85* | 67* |
| H=2m(41kPa) | 43,5 | | |

*Dédution non faite de l'étalonnage

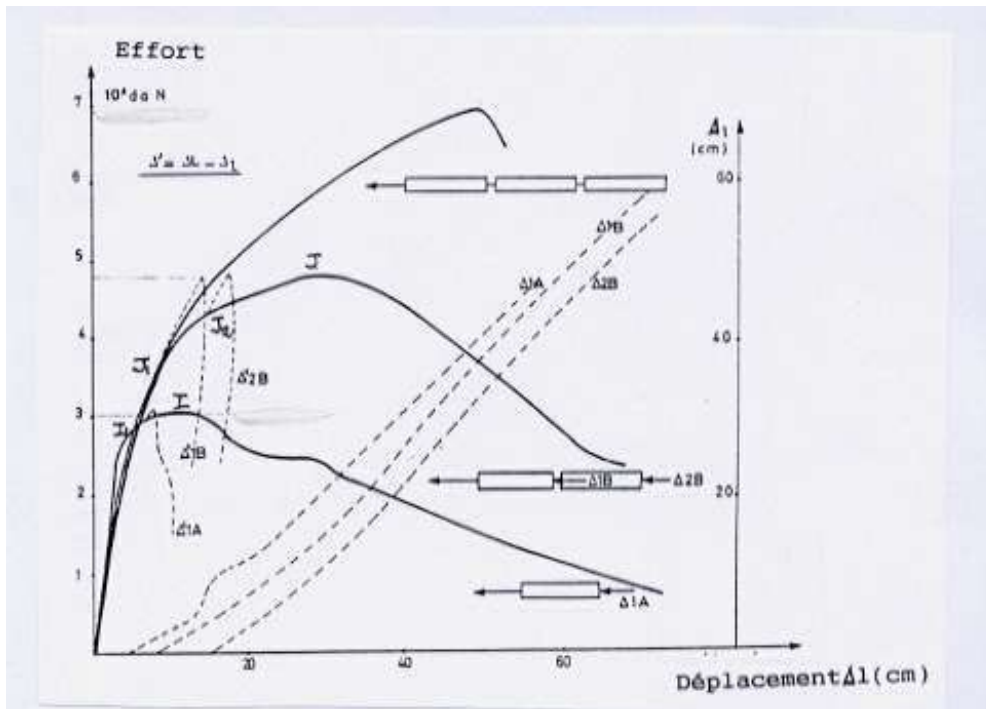


Figure 19 : Courbes "contrainte-déformation" des bandes de roulement aplaties

Tableau 2: Déformation maximale

| | 1élément | 2éléments | 3éléments |
|----------------------|----------|-----------|-----------|
| Traction maximale | 30kN | 47,5kN | 69kN |
| Déformation maximale | 10cm | 30cm | 50cm |

La courbe "contrainte-déplacement" pour deux éléments s'interprète de la même façon. Au point J_1 , (pour un effort de l'ordre de 35kN) on assiste au déplacement du premier élément. Il faut attendre pratiquement un déplacement de 7cm, au point J_2 (42,5kN), pour solliciter l'arrière de l'élément 2.

Par contre, l'étude de l'influence de la contrainte verticale montre une très grande dispersion. En tout état de cause, on peut cependant définir les ordres de grandeur pour les efforts maximaux mesurés avant rupture ou lors du glissement des éléments, dans le cas d'une contrainte verticale supérieure ou égale à 20,5 kPa.

Il est certain que, sous l'action de l'effort de traction, les bandes de roulement aplaties s'allongent en présentant vraisemblablement une légère réduction de section.

L'analyse des résultats montre un allongement important du premier élément puis un glissement de celui-ci, qui met en traction le deuxième élément, pour lequel on observe un allongement propre plus faible, le troisième étant peu sollicité.

a.2. Bandes de roulement sur chant

Les valeurs de la traction maximale sont dans l'ensemble très dispersées. Le tableau 3 donne une idée de l'ordre de grandeurs des valeurs obtenues.

Par comparaison avec les essais précédents, on constate une faible amélioration de l'effort maximal obtenu et de plus le nombre des éléments semblent avoir que peu d'influence (Fig.20).

On peut reprendre l'interprétation précédente, qui montre une mise en traction progressive des éléments et une déformation assez importante des différents assemblages.

Tableau : 3 Tractions maximales dans les bandes de roulement

| Contrainte verticale | Efforts de traction (kN) | | |
|-------------------------|--------------------------|-----------|-----------|
| | 1élément | 2éléments | 3éléments |
| H=1m(20,5kPa) | 33,50 | 32 | 41 |
| H=1,5m(30,75kPa) | 25,50 | 35 | 6 |
| H=1,85m(37,9kPa) | sup66* | sup60* | sup58* |
| H=2m(41kPa) | sup51* | | |

* Rupture des attaches

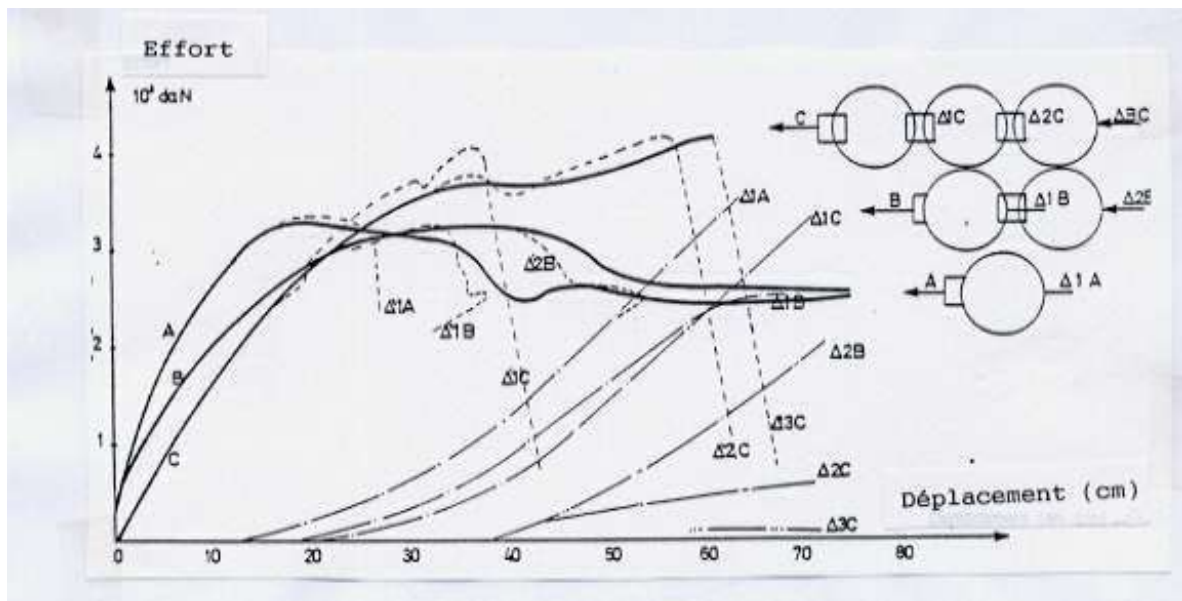


Figure 20 : Courbes "effort-déformation" pour des bandes de roulement sur chant ($\sigma_v = 20,5 \text{ kPa}$)

Lors du déblaiement, on observe que, sous l'action de la sollicitation, la déformation de la bande de roulement sur chant fait évoluer sa forme initiale circulaire vers une forme en goutte d'eau. Le périmètre de la bande de roulement augmente avec l'effort. Dans le cas de plusieurs éléments, la déformation est accentuée également au niveau des attaches entre les éléments. La transmission des efforts étant progressive, la déformation du second élément est moins accentuée, ainsi que celle du troisième.



Figure 21 : Allure des bandes de roulement sur chant après essai

On observe que, dans tous les cas, le maximum n'est atteint qu'après un glissement de l'éprouvette testée et pendant l'ovalisation de celle-ci.

Comme pour le cas des bandes de roulement aplaties, l'adjonction d'un élément supplémentaire entraîne un meilleur ancrage du premier élément mais confère par contre une plus grande déformation pour des valeurs d'effort sensiblement identiques. De plus, il apparaît qu'il existe une déformation limite qu'on ne peut guère dépasser, même par l'adjonction d'un plus grand nombre d'éléments: c'est la déformation maximale du premier élément.

Le tableau 4 donne les allongements mesurés dans les configurations testées pour des bandes de roulement aplaties pour des contraintes verticales de 20,5 et 30,75 kPa et au maximum de l'effort de traction.

Tableau 4 : Allongements maximaux en fonction du nombre d'éléments pour des bandes de roulement aplaties

| Contrainte verticale | Allongement mesuré (cm) | | |
|-----------------------|-------------------------|------------|------------|
| | 1 élément | 2 éléments | 3 éléments |
| H=1m (20,5 kPa) | 27 | - | - |
| | 34 | 9 | - |
| | 37 | 20 | 4 |
| H=1,5m (30,75 kPa) | 17 | - | - |
| | 25 | 4 | - |
| | 24 | 11 | 6 |

Il apparaît également que les déformations sont moins importantes lorsque la contrainte verticale augmente.

Les déformations mesurées avec les bandes de roulement sur chant sont beaucoup plus importantes que celles mesurées dans le cas des bandes de roulement aplaties, du fait de l'ovalisation de la bande.

A titre indicatif, pour un effort de traction de 20kN, la déformation ΔL à l'avant du premier élément est donnée dans le tableau 5.

Tableau 5 : Allongements maximaux globaux en fonction du nombre d'éléments pour des bandes de roulement sur chant.

| Contrainte verticale (kPa) | Allongement global mesuré (cm) | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------|------------|
| | 1 élément | 2 éléments | 3 éléments |
| 20,5kPa | 5,5 | 11 | 13 |
| 30,75 | 13,5 | 15 | |
| 37,9 | 4 | 4 | 4 |

a.3. Les flancs

Les résultats obtenus pour ces essais sont beaucoup moins dispersés que lors des essais précédents. On pourrait penser que les aciers et la forme des tringles sont beaucoup plus homogènes.

Tableau 6 : Tractions maximales dans les flancs des pneus en fonction du nombre d'éléments

| Contrainte verticale(kPa) | Traction maximale (kN) | | |
|------------------------------|------------------------|------------|------------|
| | 1 élément | 2 éléments | 3 éléments |
| 20,50 | 19,50 | 30 | sup33,5* |
| 30,75 | 33 | sup27* | |
| 41 | sup30* | sup27* | sup26* |

*Rupture des flancs au niveau de l'attache

Le vieillissement des pneus joue faiblement sur les caractéristiques des flancs, dont l'élément essentiel est justement ces aciers.

On observe toutefois une rupture des flancs au niveau de l'attache au fur et à mesure que la contrainte verticale et le nombre d'éléments augmentent.

Les courbes "contrainte-déformation" montrent peu de différence entre les valeurs pour deux et trois éléments (Fig.22).

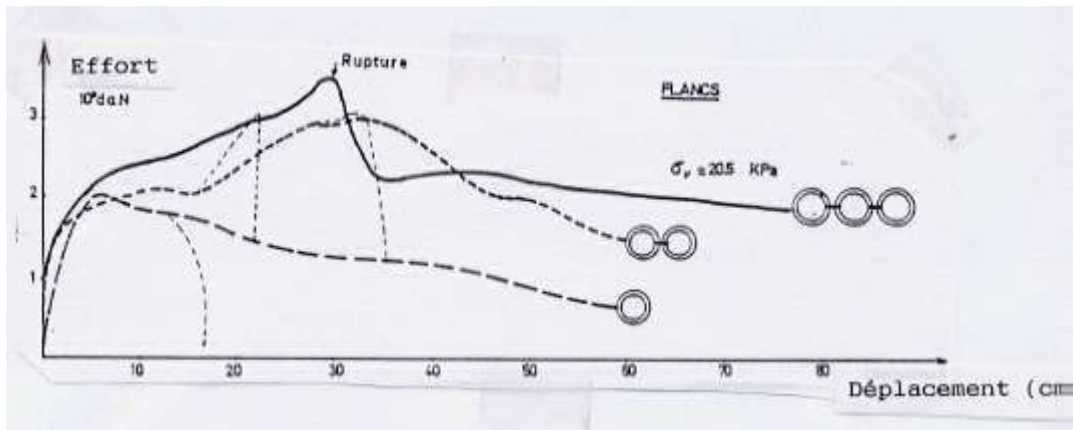


Figure 22 : Courbes "effort-déformation" pour différent nombre d'éléments de flancs
($H = 1\text{m}$, $\sigma_v = 20,5\text{ kPa}$)

Sous la sollicitation, les flancs se déforiment et passent d'une forme circulaire à une forme ovale (Fig 23). De plus, la couronne de caoutchouc entourant la tringle ondule pour former de petites vaguelettes à l'avant de l'élément.

Comme pour tous les autres essais la déformation est plus important lorsque le nombre des éléments augmente c'est-à-dire l'ancrage du premier élément est mieux assuré.



Figure 23 : Allure des flancs après l'essai de traction

L'effort maximal de traction a été obtenu en même temps que ou immédiatement après le début du glissement de l'éprouvette.

Pendant la phase de glissement, les déformations restent assez constantes.

Compte tenu des nombreuses ruptures d'attaches observées lors des essais, il n'est pas possible d'en déduire les déformations des différents éléments. Toutefois, il semble que :

- la déformation d'un élément est plus importante (à hauteur constante) lorsqu'il est attaché à un autre élément dans sa partie arrière, c'est à dire qu'il est mieux ancré ;

- la déformation est moins importante lorsque la contrainte verticale croît, ce qui est tout à fait normal à cause de l'influence du poids des terres.

b) Assemblages en nappes

Des essais de traction ont été réalisés sur des éléments de pneumatiques se prêtant particulièrement bien à un assemblage en nappe : (Fig.24)

- les bandes de roulement sur chant,
- les flancs.

Les essais ont été réalisés sous une seule charge verticale (massif de hauteur 1m).

On trouvera en annexe les courbes "contrainte-déformation" des différents assemblages testés (trame en losange ou en carré).



Figure 24 : Assemblage de pneumatiques en nappes

b.1. Bandes de roulement sur chant

Deux sortes d'essais ont été réalisées avec des dispositions différentes :

- trame en losange : 5 essais de 3 à 8 éléments,
- trame en carré : 1 essai à 9 éléments.

Ces essais ont été conduits jusqu'à la rupture, qui a toujours lieu au niveau de l'attache et qui est intervenue pour des tractions de 38 à 68 kN.

La figure 25 présente les principaux résultats obtenus, avec en particulier la valeur de l'effort de traction mesuré pour un déplacement de 5 cm.

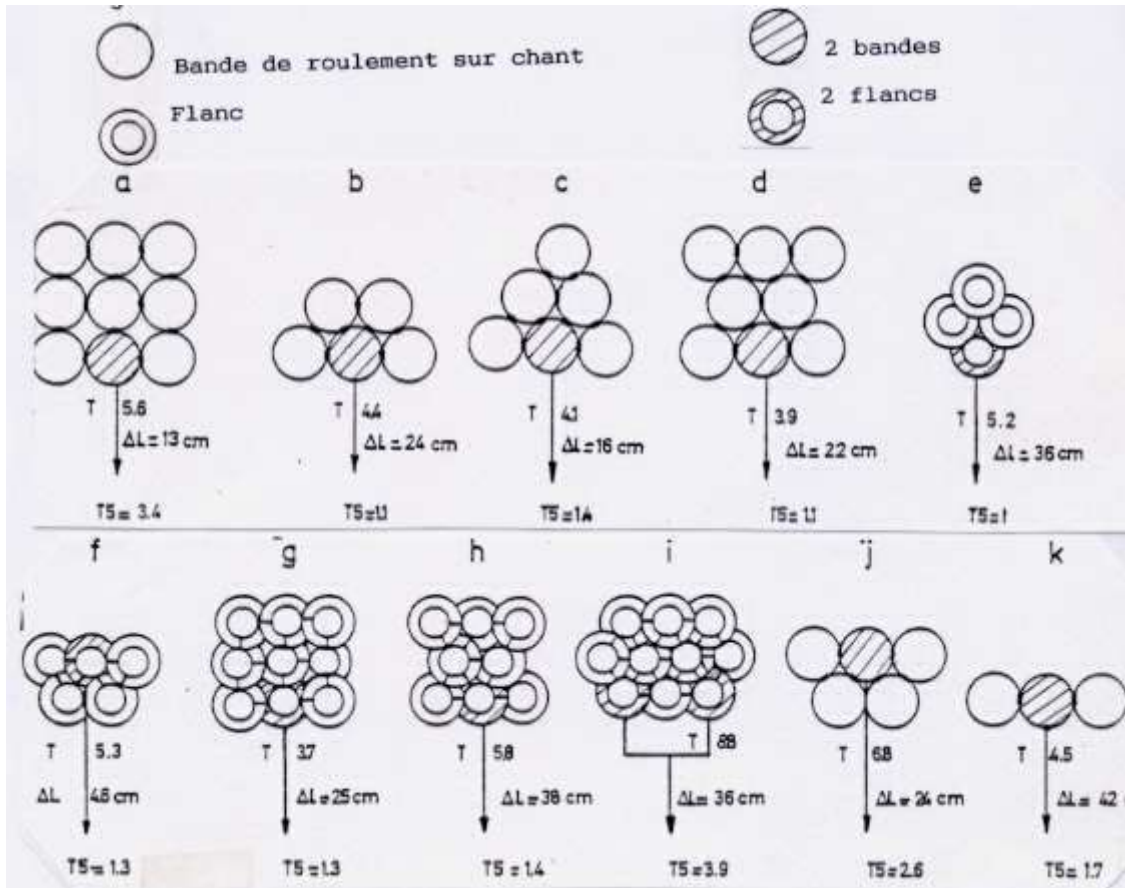


Figure 25 : Essais en nappes

Les déplacements mesurés sont toujours inférieurs à ceux que l'on a pu observer dans le cas des essais sur des armatures linéaires. A titre indicatif, pour un effort de traction de 21 kN, le déplacement, au niveau de l'attache, est de (pour H= 1m) :

(a) 2 cm pour 9 éléments disposés en trame carrée (Fig.26),



Figure 26 : Bandes de roulement sur chant en nappes (trame carrée). Vue avant remblaiement

- (b) 9 cm pour 5 éléments disposés en losange,
- (c) 7 cm pour 6 éléments disposés en losange,
- (d) 9,5 cm pour 8 éléments disposés en losange,
- (j) 4 cm pour 5 éléments disposés en losange, mais avec l'application de l'effort de traction sur l'élément central arrière;
- (k) 6 cm pour 3 éléments disposés perpendiculairement à l'axe de traction.

On constate que la meilleure disposition est celle de la trame carrée (cas a), qui peut éventuellement être associée au cas j, c'est dire possédant une attache sur un élément situé au deuxième rang.

Ces valeurs sont à comparer à celles données dans le tableau 8 dans le cas de deux ou trois éléments par armature.

A titre indicatif, nous donnons la courbe obtenue pour l'essai avec 5 éléments et avec le point d'application de l'attache situé à l'arrière (Fig.27).

On constate tout d'abord que la pente à l'origine est plus importante (une déformation faible) que pour les autres essais. Le glissement n'apparaît que pour un allongement de l'ordre de 7 cm (34 kN).

L'ancrage est en fait assuré par une seule bande de roulement, maintenue latéralement par deux autres; les deux autres bandes de la première rangée jouent principalement le rôle de butée, de blocage.

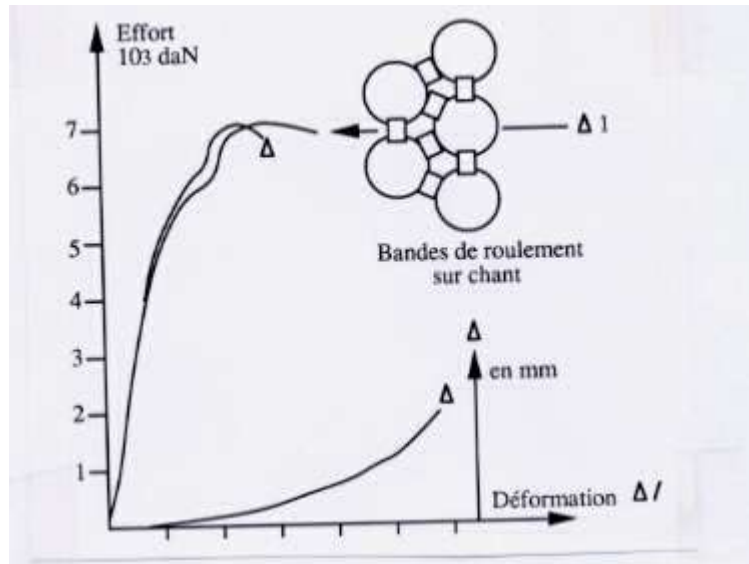


Figure 27 : Résultats de l'essai (j) (5 bandes de roulement sur chant)

b.2. Cas des flancs de pneus

Ces essais, comme les précédents, ont été conduits jusqu'à la rupture au niveau de l'attache. Cette rupture est intervenue pour des valeurs de l'effort de 33 à 57,5 kN.

Cinq essais (e, f, g, h, i) ont été réalisés, et l'on constate que, malgré la symétrie de l'assemblage des éléments et le centrage des efforts appliqués, les déplacements des éléments se trouvant à l'arrière ne se produisent pas de manière symétrique.

Un essai particulier (essai i) a été réalisé en appliquant l'effort sur deux éléments en même temps). Les déplacements mesurés au niveau de l'attache sont les plus faibles de cette série d'essais (5,5 cm pour un effort de 44 kN). Son application pratique risque cependant d'être onéreuse à cause de la fabrication du crochet spécial permettant l'application de la force.

Pour les autres essais, un effort de traction de 20 kN entraîne un déplacement au niveau de l'attache de :

-(e) 11 cm (4 éléments selon une trame en losange),

-(f) 8 cm (5 éléments à trame en losange et attache sur l'élément central arrière),

-(h) 8 cm (8 éléments à trame en losange),

-(g) 10 cm (9 éléments à trame carrée) (Fig.28),



Figure 28 : Flancs en nappe

Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles mesurées lors des essais sur des éléments linéaires.

c) Essais particuliers

Des essais de traction ont été réalisés sur des éléments doublés; l'éprouvette étant constituée de deux éléments l'un dans l'autre pour les bandes de roulement et l'un sur l'autre pour les flancs.

Dans tous les cas, les résultats obtenus sont comparables à ceux d'un seul élément lorsqu'il y a glissement de l'éprouvette (défaut d'adhérence). Par contre, lorsque l'ancrage est suffisant, les efforts de traction obtenus sont beaucoup plus importants pour un élément doublé, cette augmentation pouvant atteindre le double de la valeur initiale. Une telle disposition est particulièrement intéressante pour renforcer localement certains assemblages et les attaches.

2.3.4. Tentatives d'interprétation de l'adhérence "sol-pneumatique"

L'interprétation des résultats précédents n'est pas aisée car nous avons affaire dans la plupart des cas à de grandes déformations. Cependant, on peut penser que certains calculs utilisés pour le dimensionnement des sols renforcés (Terre Armée, etc....) ou pour interpréter l'interaction sol-renforcement pourraient être adaptés aux cas des ouvrages en Pneusol (VIDAL, 1966; SCHLOSSER et VIDAL, 1969).

a) Bande de roulement aplatie

La mise bout à bout des bandes de roulement aplaties conduit à une armature linéaire et l'interprétation peut être faite simplement comme pour le cas d'une armature de Terre Armée de faible module.

L'effort de traction appliqué est équilibré par le frottement sol-caoutchouc exercé sur les deux faces des éléments enterrés dans le remblai. Suivant le degré d'usure et le type de dessins des pneus, une partie de ce frottement peut être considérée comme de type sol-sol (Schlosser, 1972).

Si f est le frottement sol-pneumatique, on peut faire le calcul très simplifié suivant:

$$T_m = \sigma_v f S$$

$$\sigma_v = \gamma H$$

$$S = 2bL$$

$$f = T_m / 2 \gamma H b L$$

T_m : effort de traction maximal,

H : hauteur de remblai,

γ : poids volumique du remblai,

b : largeur de l'élément (ici $b = 16,50$ cm) en négligeant les éventuels rétrécissements,

L : longueur de l'armature. Cette longueur est déterminée pour T_m sur les courbes d'essais. La longueur d'un élément au repos est de l'ordre de 92 cm.

Les résultats sont reportés dans le tableau 7. On constate une certaine homogénéité des valeurs obtenues pour le coefficient f .

Tableau 7 : Coefficient de frottement f pour les bandes aplaties

| Contrainte verticale (kPa) | 1 élément | 2 éléments | 3 éléments |
|----------------------------------|-----------|------------|------------|
| 20,50 | 4,60 | 3,60 | 3,20 |
| 30,75 | 1,70 | sup2,20 | sup1,28 |
| 41 | sup2,88 | | |

b) Bandes de roulement sur chant

L'effort de traction T_m est équilibré par:

* le frottement sol-caoutchouc sur la surface verticale externe de l'élément, sur les côtés et à l'avant de celui-ci. Cette surface varie en fonction de l'effort appliqué ;

* le frottement sol-sol le long de deux surfaces engendrées par le remplissage de la bande de roulement. Ces deux surfaces sont initialement circulaires, mais là aussi, elles varient en fonction de l'effort appliqué et éventuellement du système d'attache (poinçonnement plus ou moins important du caoutchouc). On peut supposer pour simplifier le calcul, que les deux surfaces horizontales sont invariables et égales à la surface initiale du cercle proche du diamètre du pneu;

* de la butée exercée à l'avant de l'éprouvette.

Un calcul approché peut être réalisé en ne considérant que la butée F_b et le frottement F_s sur les deux surfaces horizontales engendrées par la bande de roulement (Fig.29).

On a:

$$T_m = F_b + F_s \text{ pour 1 élément}$$

$$T_m = F_b + 2 F_s \text{ pour 2 éléments}$$



Figure 29 : Hypothèse de calcul pour les bandes de roulement sur chant

Avec: T_m = effort maximum de traction,

F_b = effort dû à la butée à l'avant du premier élément,

$$F_b = K_p \gamma [a^2/2] \quad \text{avec } a=0,165 \text{ m} = \text{largeur de la bande,}$$

F_s = effort dû au frottement sol-sol le long de deux surfaces circulaires

$$F_s = 2 \gamma H S \operatorname{tg} \Phi \quad \text{pour } S = 0,269 \text{ m}^2$$

En prenant un angle de frottement interne de 35° pour le matériau de remblai, on arrive aux résultats du tableau 8, qui sont comparables malgré quelques écarts avec les résultats expérimentaux.

Tableau 8 : Valeurs mesurées et calculées des efforts de tractions

| Configuration | Contrainte verticale (kPa) | Mesures T_m (kN) | Calculs T_{cal} (kN) |
|---------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1 élément | 20,50 | 33,5 | 16 |
| | 30,75 | 25,5 | 23 |
| | 41, | 30,5 | 30 |
| 2 éléments | 20,5 | 32, | 24 |
| | 30,75 | 35, | 35 |
| 3 éléments | 20,5 | 41, | 32 |

c) Les flancs des pneumatiques

L'analyse la plus "aisée" à faire concerne les flancs associés linéairement puisqu'on peut supposer que leur comportement et leur fonctionnement sont semblables à ceux des bandes de roulement aplaties.

Cependant, les efforts mesurés ne résultent pas des mêmes actions et l'observation des éprouvettes après essai montre que le frottement sol-pneumatique est loin d'être négligeable. Au fur et à mesure des déformations, des "vaguelettes" apparaissent à l'avant de l'élément.

Il est difficile de faire la part du frottement sol-sol provenant du cisaillement des tringles et du frottement sol-caoutchouc et, de plus, la surface des flancs est variable.

On retiendra cependant que les efforts mesurés restent assez importants (supérieurs à 20 kN) pour l'ensemble des essais réalisés pour des déformations du même ordre de grandeur.

d) Synthèse des résultats

D'une manière générale, les courbes "effort-déformation" présentent d'assez fortes tangentes à l'origine et on observe même une partie rectiligne pour la plupart d'entre elles.

* Pour l'ensemble des essais réalisés, les pentes de ces parties rectilignes (lorsqu'elles existent) varient de :

- 11 à 90 kN/m (moyenne 40 kN/m) pour les essais sur bandes de roulement aplaties ;
- 17 à 115 kN/m (moyenne 43 kN/m) pour les essais sur flancs;
- 12 à 105 kN/m (moyenne 30 kN/m) pour les essais sur bandes de roulement sur chant

* Par exemple, nous avons reproduit sur la figure 29, les courbes "effort-déplacement" pour la même charge verticale ($H=1\text{ m}$) et pour les éléments isolés testés.

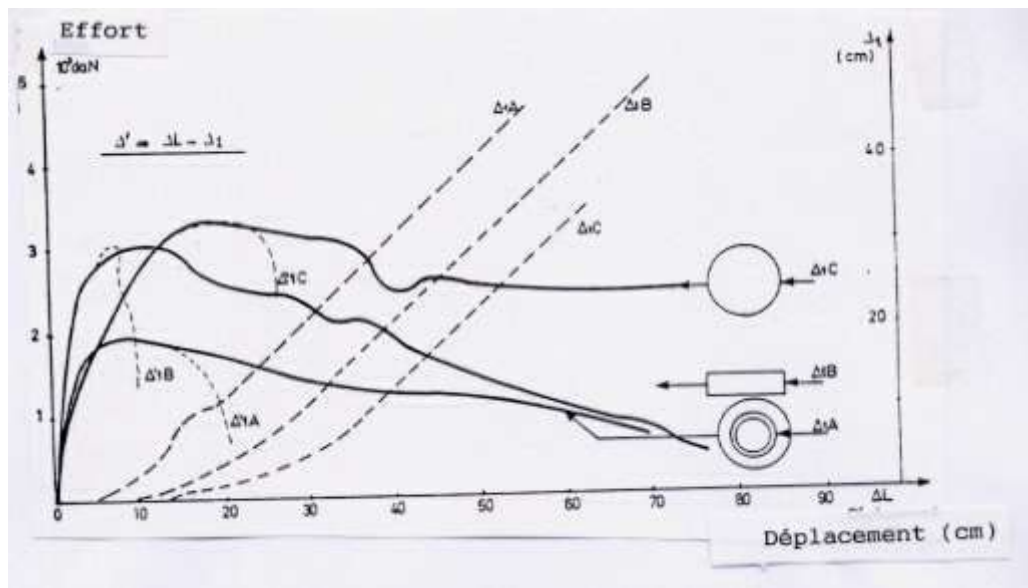


Figure 30 : Courbes "effort-déplacement" de trois éprouvettes élémentaires

On constate que :

- la valeur de l'effort maximum est à peu près identique entre bandes de roulement sur chant et aplaties (30 kN), alors qu'elle diminue de manière assez importante pour les flancs (20kN). Les déplacements sont par contre plus importants pour les bandes de roulement sur chant (18 cm au lieu de 8 à 9 cm pour les autres) ;

- au niveau des déformations propres des éprouvettes, le comportement est différent suivant le type étudié : on observe une déformation propre de 10 cm pour la bande de roulement aplatie, de 20 cm pour les flancs et de 30 cm pour la bande de roulement sur chant, cette dernière étant soumise de plus à un effort d'ovalisation ;

- pendant le glissement de l'élément de pneu, la longueur de l'élément testé reste sensiblement constante.

* Dans le cas des armatures linéaires, on a pu obtenir pour certains essais une courbe "effort-déplacement" complète avec "glissement" de l'élément de pneu testé. Par contre, pour toute augmentation de la surcharge verticale ou toute association supplémentaire de pneus entraîne une rupture de l'attache, notamment au point de liaison.

En ce qui concerne les armatures en nappes, la rupture de l'attache a été observée pratiquement dans tous les essais. On peut conclure que l'association de plusieurs éléments entraîne une augmentation de l'effort d'ancrage et donc de l'effort global de traction.

* D'une manière générale, on constate que la valeur du déplacement correspondant au maximum de l'effort de traction augmente avec le nombre d'éléments dans le cas des armatures linéaires.

* Les déformations des éléments sont différentes suivant leur mode d'assemblage :

- pour les bandes de roulement aplaties, il s'agit d'une déformation propre de l'élément, qui peut atteindre des valeurs élevées(18%) ;

- pour les bandes de roulement sur chant et pour les flancs, il s'agit d'une déformation propre de l'élément (étirement) ainsi que d'une ovalisation de la forme de l'éprouvette, qui augmente la valeur initiale de son diamètre dans le sens de la traction. La somme des deux déformations peut donner une valeur élevée :

.25 cm pour les flancs, alors que leur diamètre intérieur est de 35 cm ;

.37 cm pour les bandes de roulement sur chant, alors que leur diamètre intérieur est de l'ordre de 56 cm.

Les éprouvettes détériorées après essais montrent la forme en cœur de ces éléments initialement circulaires.

Les résultats obtenus dépendent aussi des caractéristiques du matériau de remblai (poids volumique, angle de frottement,...). On voit ainsi toute l'importance d'avoir un bon matériau de remblai bien compacté. L'hétérogénéité de certains des résultats pourrait provenir des conditions d'essais (remblai non compacté).

On retiendra également que les armatures en nappes présentent des déformations beaucoup moins importantes que les armatures linéaires dans les conditions de surcharges verticales, et plus particulièrement pour ce qui concerne les bandes de roulement sur chant. C'est cette disposition qui sera utilisée par la suite.

Enfin, au niveau de la mise en œuvre, il faut veiller à ne pas déplacer les éléments de pneus lors du remblayage.

2.3.5. Conclusions

Les essais d'adhérence sol-pneumatique ont permis de bien connaître ce phénomène et surtout de dimensionner la longueur des renforcements (linéaire ou en nappe). Le phénomène de défaut d'adhérence n'est pas fréquent et, à partir d'une association de trois éléments, l'effort maximal est toujours obtenu par rupture des attaches.

Les valeurs de cet effort sont en général très élevées de l'ordre de 20 à 60 kN avec cependant des déformations élevées. Néanmoins on peut limiter ces déformations en limitant les efforts appliqués.

De toutes façons, dans tous les cas de figures, un assemblage en nappe paraît toujours être le meilleur (effort élevé, déformation la plus faible).

La figure 25 montre que, pour une déformation de 5 cm, on peut obtenir un effort de l'ordre de 20 kN pour une trame carrée. Un tel assemblage, associé à un dispositif d'accrochage

judicieux (par exemple, attache sur la deuxième rangée des éléments), permettra de limiter encore plus la déformation.

L'assemblage par nappe est extrêmement intéressant, notamment dans le cas d'une construction sur sols de faible portance; l'ensemble se comporte comme un massif cohérent constitué par des milliers de petits gabions liés les uns aux autres. Cette disposition permet de plus de mieux répartir les charges sur le sol de fondation, de limiter le tassement différentiel entre les différents points du massif et d'empêcher le développement des fissures à l'intérieur de la masse de remblai.

2.4. CAPACITE PORTANTE D'UN MASSIF DE PNEUSOL

2.4.1. Généralités

Nous avons profité d'un essai croisé de fondations superficielles sur un sable saturé pour réaliser le premier essai de capacité portante sur Pneusol.

Deux essais de chargement de semelles circulaires de 2 m^2 de surface ($B= 1,6\text{m}$), réalisés sur un massif de Pneusol, ont été réalisés en octobre 1987 sur le site expérimental de Chatenay-sur-Seine par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'Est Parisien (CANEPA, 1987)).

2.4.2. Données générales de l'expérimentation

La station expérimentale de Chatenay-sur-Seine se trouve à 70 km de Paris. Une fosse d'essais a été creusée sur le site. De forme rectangulaire, son emprise au niveau du terrain est de l'ordre de 230 m^2 . De section trapézoïdale, elle a une profondeur d'environ 3,20m. La fosse a été imperméabilisée au moyen d'une bâche en plastique. Un drain entouré d'un géotextile non-tissé a par ailleurs été mis en place à deux niveaux à sa périphérie. La figure 30 montre la géométrie de la fosse.

Son volume est de 424 m^3 . Des tirants d'ancrage ont été réalisés pour permettre la mise en charge des semelles.

Quatre lits de pneumatiques de poids lourds ont été mis en œuvre et associés à du sable de Fontainebleau. Les figures 31 et 32 montrent de manière schématique respectivement une coupe et une vue de dessus du massif de Pneusol réalisée. Les figures 33, 34 montrent la disposition du Pneusol à l'intérieur de la fosse.

a) Le sable de Fontainebleau

Une dizaine d'analyses granulométriques ont été réalisées. Le fuseau des résultats obtenus est donné sur la figure 35.

Le tableau 9 récapitule les pourcentages moyens des refus pondéraux cumulés pour chaque tamis, ainsi que les coefficients granulométriques qui en découlent. Comme on peut le voir, il s'agit d'un sable mal gradué à granulométrie serrée.

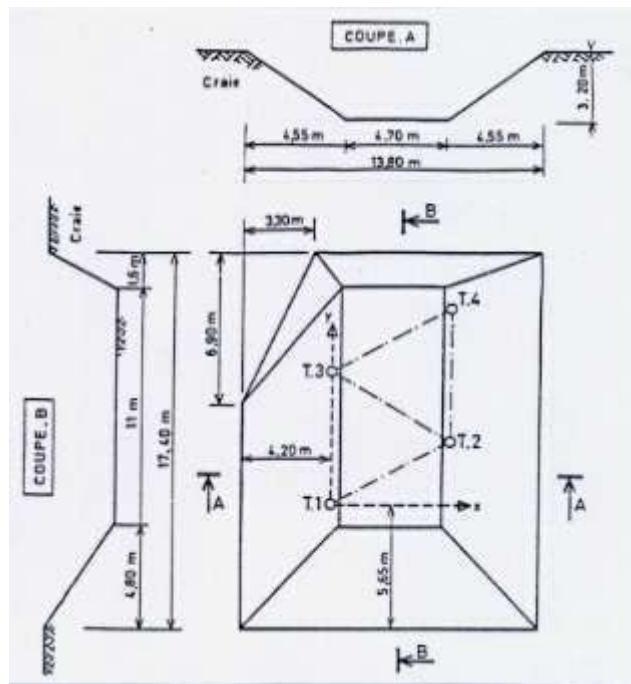


Figure 31 : Géométrie de la fosse d'essai (Chatenay-sur-Seine)

Tableau 9 : Caractéristiques granulométriques moyennes

| Tamis (mm) | Refus pondéral (%) | Coefficients granulométriques |
|---------------|-----------------------|----------------------------------|
|---------------|-----------------------|----------------------------------|

| | | |
|-------|-------|--|
| 0,40 | 0,40 | $C_u = D_{60}/D_{10} = 1,90$ |
| 0,315 | 3,10 | |
| 0,250 | 17,80 | |
| 0,160 | 74,80 | $C_c = (D_{30})^2/D_{10} * D_{60} = 1$ |
| 0,100 | 98,80 | |
| 0,080 | 99,30 | |

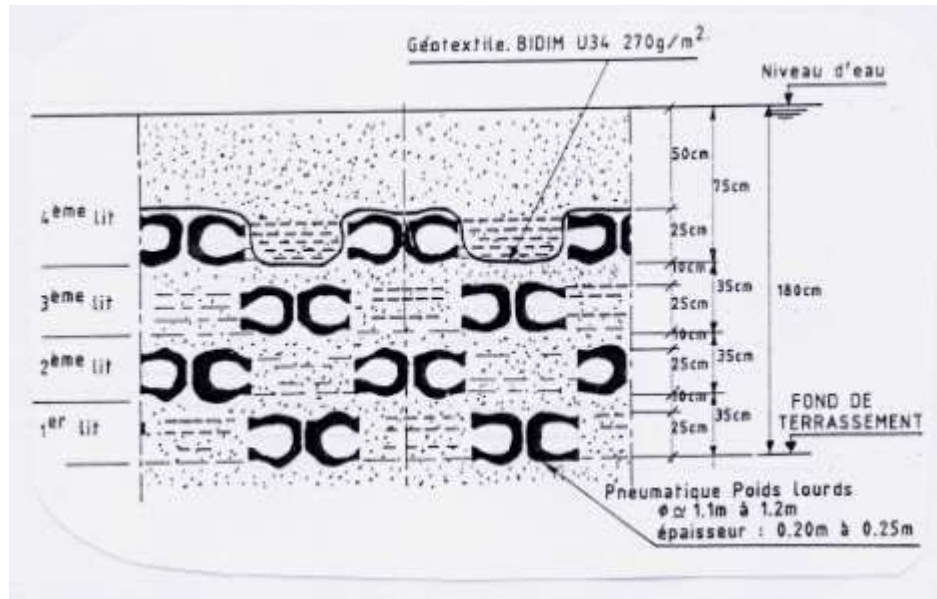


Figure 32 : Coupe schématique du massif de Pneusol

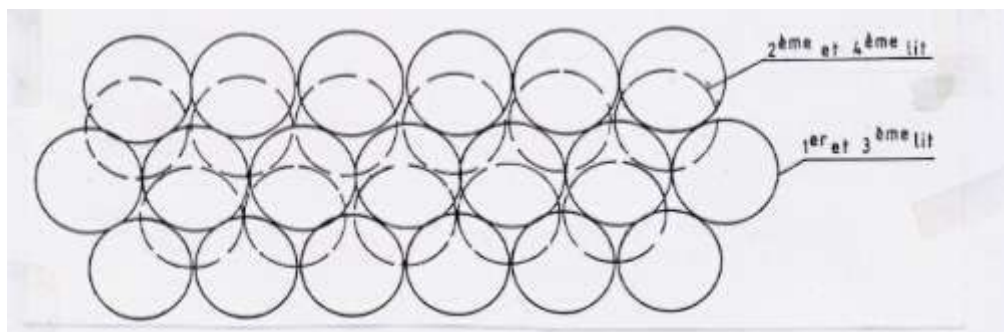


Figure 33 : Empilement de principe des pneus dans le massif de Pneusol

Un essai de compactage ainsi que des mesures de l'indice portant C.B.R ont été réalisés et ont donné les résultats suivants:

$$\gamma_d \text{ OPN} = 15,4 \text{ kN/m}^3$$

$$w \text{ OPN} = 16\%$$

$$\text{indice CBR} = 14\%$$

Les mesures de poids volumiques réalisées sur le sable ont fourni:

$$\gamma_{dmin} = 13,57 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{dmax} = 16,55 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_s = 26 \text{ kN/m}^3$$

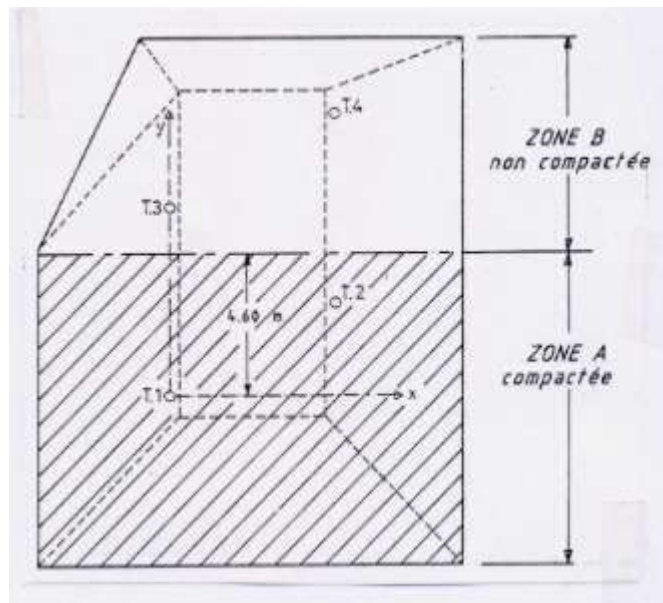


Figure 34 : Géométrie générale du massif expérimental de Pneusol

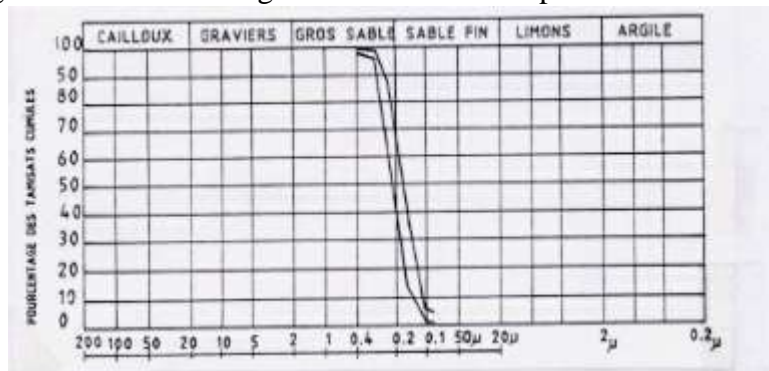


Figure 35 : Fuseau granulométrique du sable de Fontainebleau

Dans le massif, nous avons obtenu $\gamma_d = 14,54 \text{ kN/m}^3$ avec un degré de saturation D_r de 36%.

Les caractéristiques pressiométriques moyennes obtenues respectivement pour le massif de sable seul (support du massif de Pneusol) noyé et partiellement immergé sont indiquées dans le tableau 10.

Tableau 10 : Caractéristiques mécaniques moyennes du massif de sable totalement et partiellement immergé

| Massif | Pressiomètre | | Pénétromètre. dynamique | Pénétromètre statique | |
|---------|----------------|----------------|----------------------------|--------------------------|----------------|
| | p_l (kPa) | E_M (kPa) | q_d (kPa) | q_c (kPa) | f_s (kPa) |
| Noyé | 430 | 4500 | 1800 | 4400 | 70 |
| $w=7\%$ | 650 | 8200 | 3500 | | |

b) Mise en œuvre du Pneusol

D'une manière générale, la mise en œuvre de chaque couche a été effectuée de la manière suivante:

- mise en place des pneumatiques,
- remblaiement en sable de Fontainebleau au moyen d'une mini-pelle mécanique montée sur chenilles, jusqu'à recouvrement des pneus sous 10cm de sable,
- arrosage de la couche,
- compactage,
- contrôle de la densité.

Pour la quatrième et dernière couche, il a été procédé différemment:

- pose des pneumatiques,
- étalement d'un géotextile non-tissé,
- remblaiement en sable de Fontainebleau jusqu'à recouvrement des pneus sous 40cm de sable,

- arrosage de la couche,
- compactage d'une seule moitié du massif,
- contrôle de la densité.

Notons que le compactage est relativement léger et est dû uniquement à la circulation de la mini-pelle.

c) Contrôle de la mise en œuvre

Le principe de la mesure de la densité est relativement simple: le contrôle est effectué pour le remblai se trouvant à l'intérieur du trou de la jante. La couche appelée 1 est celle qui est la plus profonde. Deux paramètres sont relevés: le poids volumique sec γ_d (kN/m³) et la teneur en eau w(%) (Tableau 11).

Tableau 11 : Résultats du contrôle du compactage

| Couche 1 | | Couche 2 | | Couche 3 | | Couche 4 | | Couche 5 | |
|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
| γ_d | w | γ_d | w | γ_d | w | γ_d | w | γ_d | w |
| 14,3 | 5,8 | 14,2 | 6,6 | 14,0 | 4,8 | 14,0 | 6,2 | 14,3 | 5,3 |

d) Description des mesures

Quatre capteurs de pressions totales ont été posés dans le massif expérimental au droit des semelles: deux de dimensions 200*300 et deux de 100*200. La figure 36 montre l'implantation initiale de ces appareils.

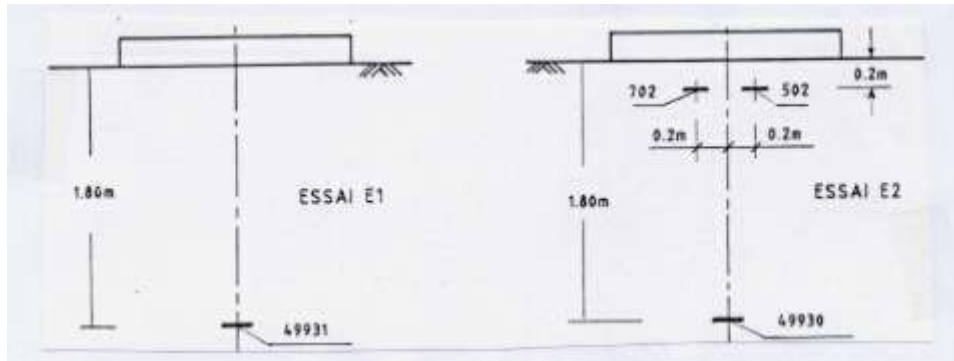


Figure 36 : Plan d'implantation des capteurs de pression totale

Un seul type de semelle a été utilisé pour les essais de chargement. C'est une semelle circulaire de surface 2m^2 (1,6m de diamètre) et 20cm d'épaisseur. Elle est en béton armé avec, à sa partie supérieure, une plaque en acier de 30mm d'épaisseur et de 1m de diamètre permettant le centrage de la rotule et, à la base, une autre plaque d'acier de 10mm d'épaisseur, dont l'objet est d'assurer un contact lisse fondation-sol. La figure 37 rappelle les principales caractéristiques de cette semelle.

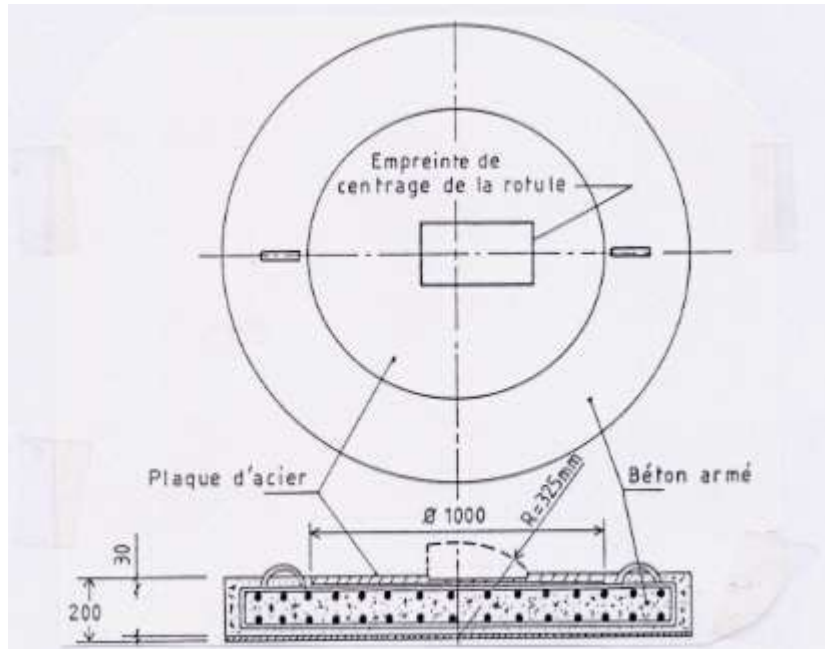


Figure 37 : Schéma de la semelle utilisée pour le chargement

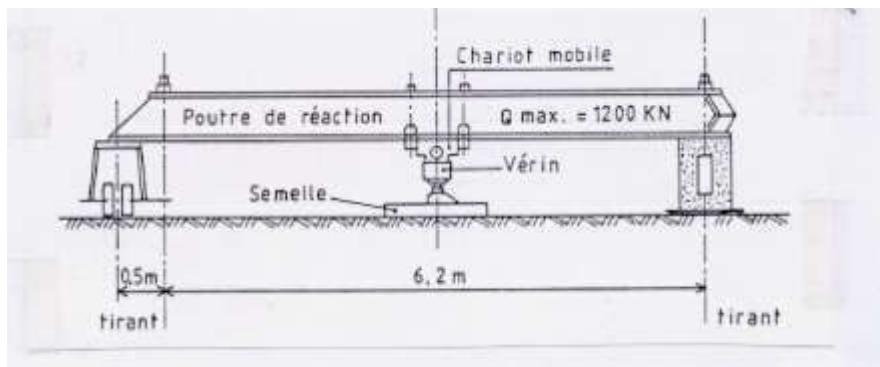


Figure 38 : Conception générale du dispositif de chargement

La charge est appliquée sur la semelle au moyen d'un vérin hydraulique monté sur un chariot mobile pouvant coulisser sur une poutre retenue à chacune de ses extrémités par un tirant d'ancrage. La figure 38 montre le dispositif de chargement.

Une rotule est intercalée entre l'extrémité du vérin et la semelle d'essai. Elle est conçue pour que le centre de la portion sphérique coïncide avec le centre du plan inférieur de la fondation. En phase de chargement, la rotation de la semelle autour de ce centre est permise.

2.4.3. Méthodologie des essais

a) Généralités

Globalement, les deux essais ont été conduits de la même façon. La charge a été appliquée de manière progressive sur la fondation par paliers, jusqu'à enfoncement de la semelle de 15 à 20cm, chaque palier étant maintenu pendant 30 minutes ou plus. Il s'agit donc d'essais relativement courts, dont la durée maximale de chargement (essai E2) n'a pas dépassé 4 heures.

b) Les mesures en cours de chargement

Quatre paramètres ont été contrôlés au cours du chargement :

- la charge appliquée,
- l'enfoncement de la fondation,
- les mouvements verticaux de la surface du sol à proximité de la fondation,
- les pressions totales dans le massif au droit de la semelle.

La charge est déduite de la pression du fluide dans le vérin.

L'enfoncement de la semelle est repéré par 4 capteurs de déplacement, disposés suivant deux diamètres perpendiculaires.

Six capteurs de déplacement ont été utilisés pour suivre les déplacements verticaux à proximité immédiate de la semelle pendant son chargement.

Les pressions totales développées dans le massif au droit des fondations ont été suivies par 4 capteurs.

Pendant la durée de chaque palier de chargement, les mesures sont effectuées "en continu", chaque capteur étant relevé tous les 6 secondes. Au-delà de 10 minutes, elles ne le sont que toutes les 2 minutes.

Pour chaque niveau de chargement, une mesure de pression a été effectuée à la fin du palier.

2.4.4. Résultats des essais

a) Généralités

Les deux essais réalisés ont donné les résultats suivants sont rassemblés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Résultats des essais

| N° | Diamètre Semelle | Nombre Paliers | Durée totale Chargement | Charge maxi. appliquée | Enfoncement mesuré |
|----|------------------|----------------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| 1 | 160 cm | 5 | 126 min | 499 kN | 134.66 mm |
| 2 | 160 cm | 7 | 186 min | 551 kN | 145.00 mm |

Dans ce qui suit, sont fournis uniquement les résultats concernant les enfoncements moyens de la fondation en fonction de la pression moyenne transmise au sol, leur évolution en fonction du temps sous charge constante (Q) et les pressions totales mesurées dans le sol pour chaque palier de chargement.

L'interprétation des résultats des essais a été conduite de manière identique à celle pratiquée habituellement pour ce type d'essai. Les principales définitions sont explicitées ci-après:

- Paramètre de fluage

Lorsqu'on examine les mesures de tassements d'une semelle sous charge constante, on s'aperçoit qu'elles évoluent en fonction du temps. Si l'on prend comme origine des temps le début de chaque palier de chargement, on constate que les tassements augmentent linéairement avec le logarithme des temps. La figure 39 illustre cette particularité dans le cas de l'essai E1.

Les paramètres de fluage sont, par définition, la pente (notée A) et l'ordonnée à l'origine (notée B) des droites "moyennes" caractérisant chaque palier de chargement. Ces droites sont appelées des droites de stabilisation.

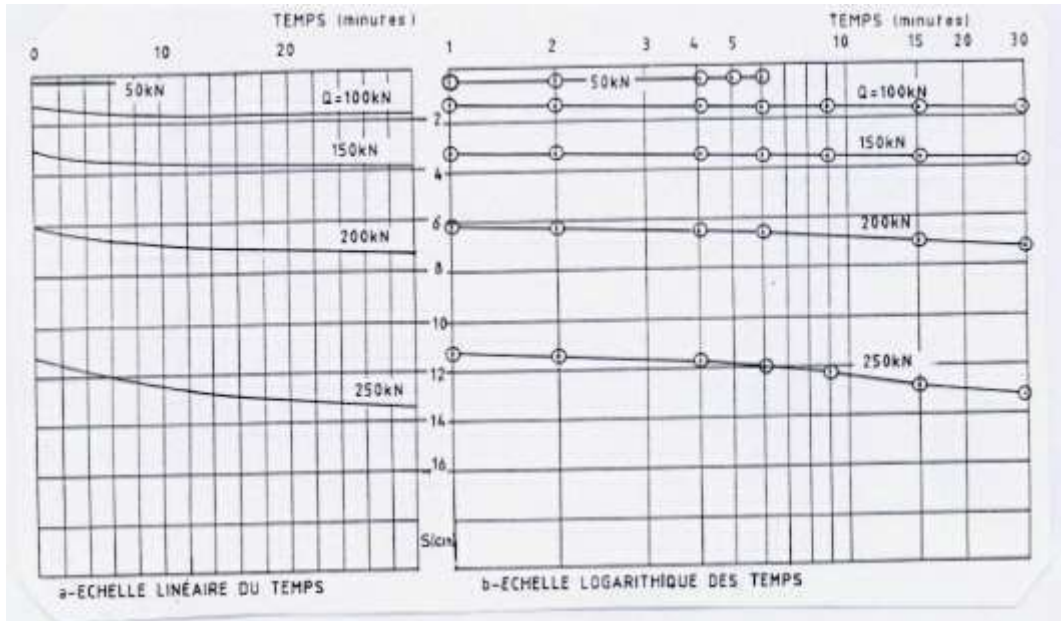


Figure 39 : Courbes d'enfoncement moyen de la fondation en fonction du temps.
Résultats de l'essai E1

- Corrections des paramètres de fluage

Pour tenir compte de l'influence de la loi de chargement sur les paramètres A et B ainsi obtenus, nous avons été amenés à corriger les mesures d'enfoncement moyen des semelles. La figure 39 schématise la méthode utilisée (méthode de Koppejan). Elle conduit à de nouvelles droites de stabilisation, que l'on suppose indépendantes de la durée et du nombre de paliers réalisés. Les paramètres de fluage corrigés sont par définition la pente (notée A_{COR}) et l'ordonnée à l'origine (notée B_{COR}) de ces nouvelles droites.

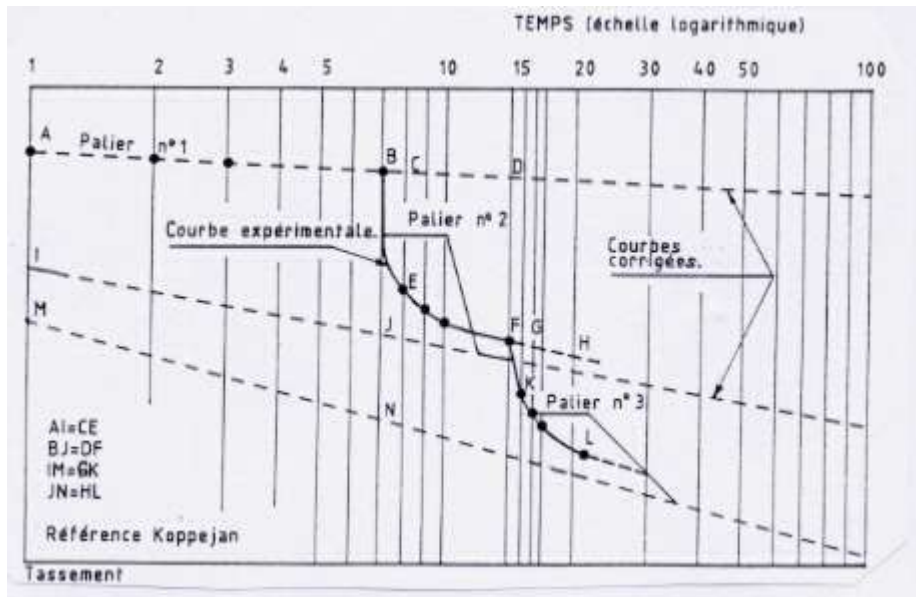


Figure 40 : Correction des paramètres de fluage. Schéma de principe de la méthode utilisée.

- Courbes de fluage

Ces courbes donnent l'évolution de la pente des droites de stabilisation en fonction de la pression moyenne transmise au sol. Deux courbes sont fournies dans ce qui suit. La première correspond au paramètre A (notée "courbe brute"). La seconde correspond au paramètre A_{COR} (notée "courbe corrigée").

- Courbes de tassement

Elles donnent l'évolution du tassement de la fondation en fonction de la pression moyenne transmise au sol. Là aussi, deux courbes sont données. La première, dite "courbe brute", correspond au tassement mesuré à la fin de chaque palier de chargement. La seconde dite "courbe de référence", donne le tassement "à 10 ans", estimé à partir des paramètres A_{COR} et B_{COR} .

- Paramètres caractéristiques d'un essai

Pour l'interprétation des essais, une pression de rupture notée q_r et un fluage caractéristique A_C ont été conventionnellement définis:

.la pression de rupture q_r est la pression correspondant à un enfoncement de 15% de la largeur de la semelle sur la courbe de référence;

.le fluage caractéristique A_C , est la pente des droites de stabilisation corrigées observée sous une pression de chargement égale à $q_r/2$.

b) Résultats des mesures d'enfoncement

Les courbes de fluage et de tassement du sable présentent un aspect classique: une allure parabolique au fur et à mesure de l'augmentation du chargement (Fig.41).

Les deux essais sur le Pneusol donnent à peu près les mêmes résultats. Le seul écart correspond au "coude" des courbes. Ce résultat est extrêmement intéressant, car il montre que, sous une hauteur de remblai de l'ordre de 0,4 mètre, le "mélange" est à peu près homogène. La disposition des semelles étant différente, on aurait pu penser pouvoir déceler des différences plus marquées. Cette expérience a conduit, au moins à fixer, lors des réalisations en vraie grandeur, l'épaisseur de couverture du Pneusol à 0,40 m.

Ce résultat corrobore les essais de plaque effectués en terrassements sur des bicouches. Lorsqu'on compacte un bicouche, la couche inférieure étant de module plus faible que la couche supérieure, le module d'ensemble obtenu est toujours plus faible jusqu'à une certaine hauteur de remblai de l'ordre de 0,50m. C'est à partir de là que l'influence de la couche la plus faible ne se manifeste plus. Bien entendu, cette hauteur dépend du rapport des modules des deux matériaux.

En pratique, on retiendra de ces essais que les courbes de chargement présentent toutes une première partie approximativement linéaire, où les enfoncements peuvent être considérés comme proportionnels aux charges appliquées. Ensuite les enfoncements croissent plus rapidement. On ne note pas de rupture au-delà de la phase pseudo-linéaire. Pour le sable, les ruptures diffèrent selon le type de sols et le cas de chargement considéré.

Pour tenir compte des différentes sortes de rupture observées, et de l'influence de la durée des paliers sur les courbes expérimentales obtenues, nous avons défini précédemment une courbe de chargement de référence et une pression de rupture conventionnelle. Nous avons retenu la courbe à "10 ans", c'est à dire une courbe extrapolée à partir des mesures de fluage faite sous chaque palier de chargement, et défini conventionnellement la pression de rupture q_r comme celle qui correspond à un enfoncement de 0,15b à 10 ans (AMAR et al 1983).

* Comparaison entre le Pneusol et le sable

Le tableau 13 ci-dessous récapitule les résultats de l'ensemble des essais effectués et donnent les caractéristiques q_r et A_c des massifs de Pneusol (P1,P2) et de sable (S1,S2).

Tableau 13 : Comparaison Pneusol et sable

| Essai | q_r (kPa) | A_c (mm) | Cas de figure |
|-------|----------------|---------------|------------------|
| S1 | 517 | 6,7 | 1 |
| S2 | 511 | 5,4 | 1 |
| P1 | 247 | 3,8 | 2 |
| P2 | 262 | 1,7 | 3 |

On tire de ce tableau des résultats importants pour l'utilisation du Pneusol dans d'autres domaines du Génie Civil :

- si la capacité portante du Pneusol est égale à la moitié de celle du sable, elle est cependant loin d'être négligeable. Elle est de plus largement suffisante pour supporter un ouvrage (maison individuelle par exemple).

- le coefficient de fluage est lui aussi un peu plus faible. Une telle structure serait amenée à tasser un peu moins dans le temps. Des essais réalisés sur modèles réduits à l'INSA de Lyon donneront certainement plus de précisions sur ce résultats.

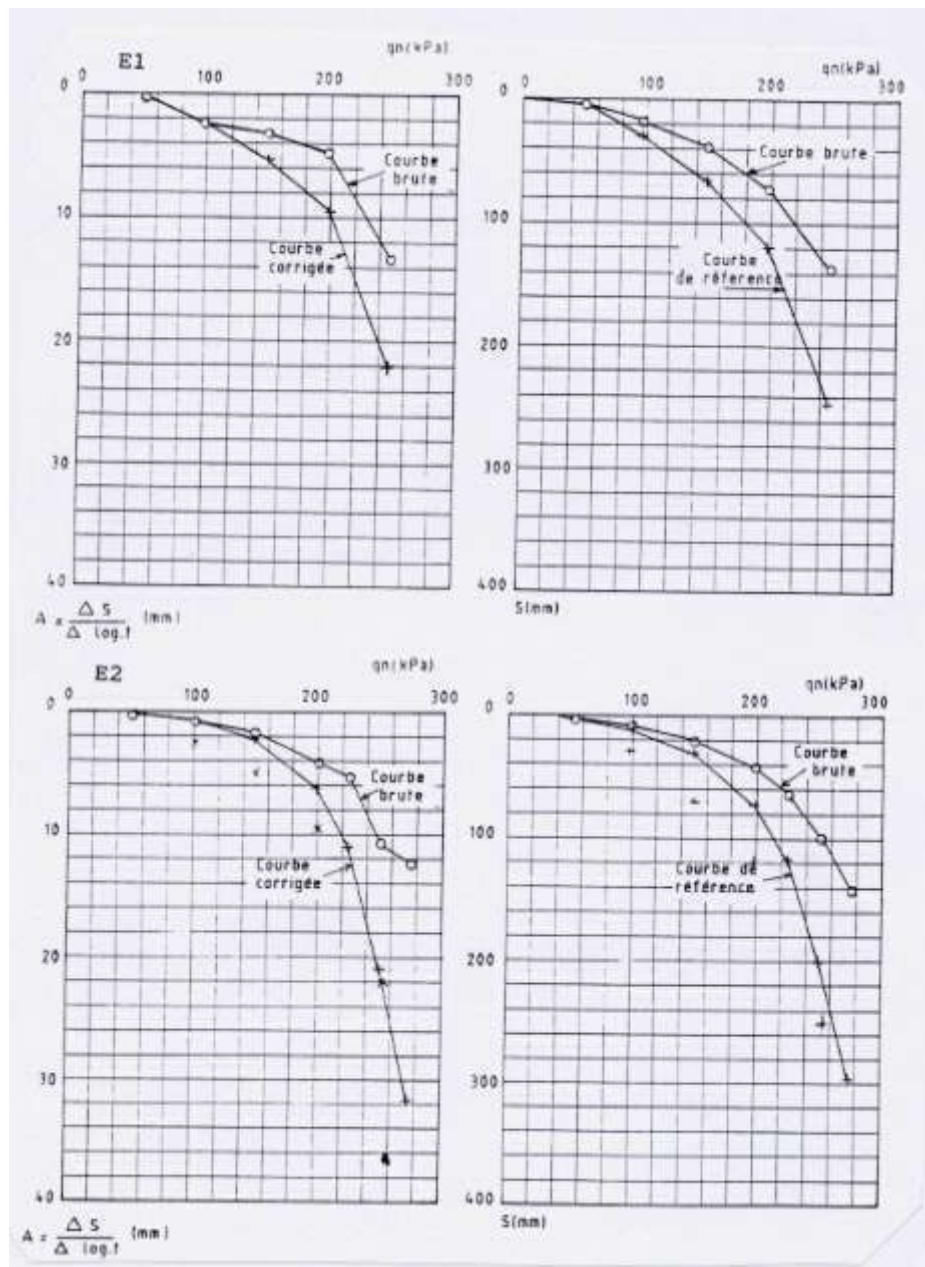


Figure 41 : Courbes de fluage et de tassement des essais E1 et E2.

La figure 42 schématise les différents cas de figures expérimentés.

Les essais effectués sont les premiers réalisés pour l'étude de la capacité portante du Pneusol. Ils sont dans l'ensemble assez probants et la dispersion des résultats est relativement faible.

Lors de la réalisation du remblai en Pneusol léger de Cannes-Mandelieu sur l'Autoroute du Soleil A8 (1985) des essais d'homogénéité ont été faits. Le Pneusol étant recouvert de 50cm d'une grave de bonne qualité et compactée dans les conditions des Recommandations pour les Terrassements Routiers (LCPC, SETRA, 1994), les essais à la dynaplaque sur toute la

surface du chantier ont montré une faible variation du coefficient d'amortissement, démontrant ainsi une bonne homogénéité de la structure.

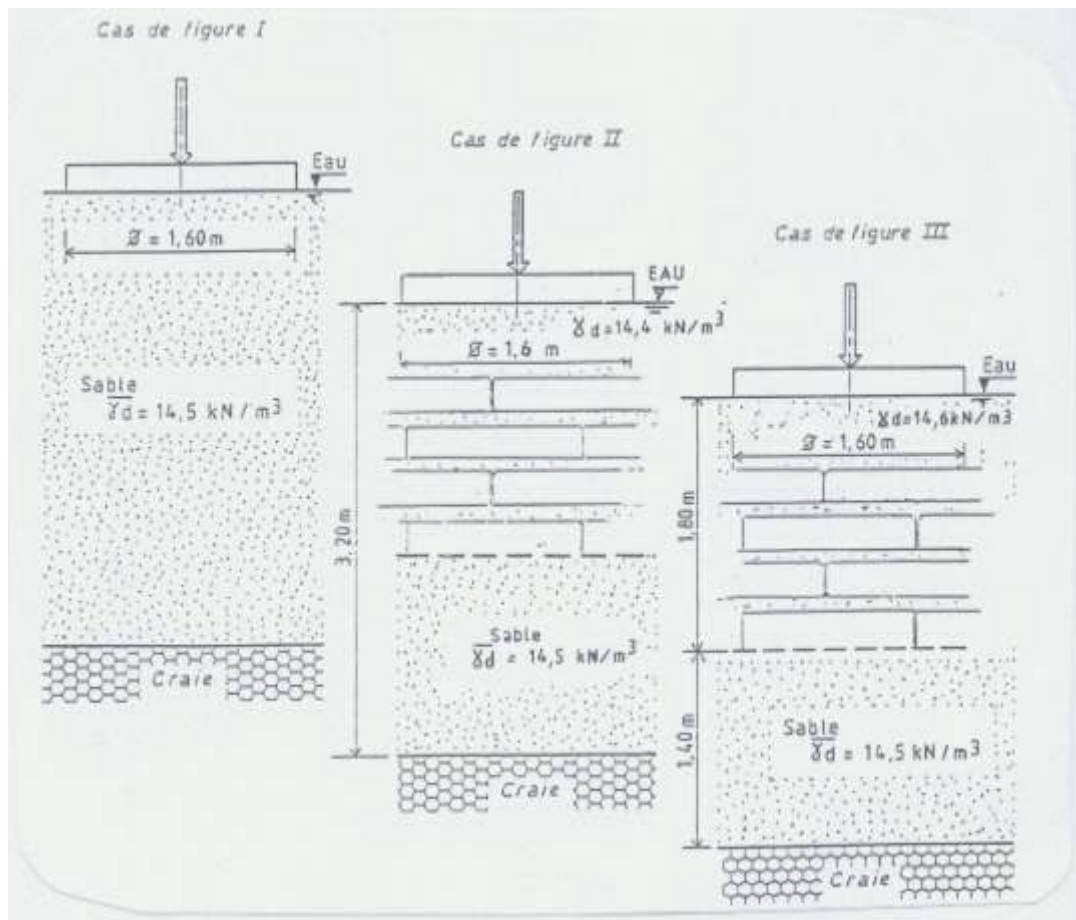


Figure 42 : Schéma des cas de figures expérimentés

2.5. COMPORTEMENT D'UN MASSIF DE PNEUSOL SOUS CHARGES DYNAMIQUES

2.5.1. Introduction

Cette étude expérimentale en vraie grandeur a été réalisée sur treize massifs (5 m par 6 m), construits avec deux matériaux différents: trois massifs avec du sable au CER de Rouen en 1984 (deux massifs de Pneusol de conception différente et un massif de référence) et dix massifs avec du mâchefer au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg en 1986 (9 massifs de Pneusol et un massif de référence)

Tous ces massifs ont été soumis à des sollicitations dynamiques. Des appareils de mesure (accéléromètres et capteurs de pressions) ont été posés à l'intérieur de ces massifs pour

permettre la comparaison de leurs performances. Cependant, seuls les trois massifs du CER ont été relativement bien équipés, avec pour objectif la détermination des caractéristiques mécaniques du Pneusol. Les structures strasbourgeoises, moins équipées, étaient destinées à la recherche de la structure la plus efficace.

2.5.2. Matériaux utilisés

a) sable

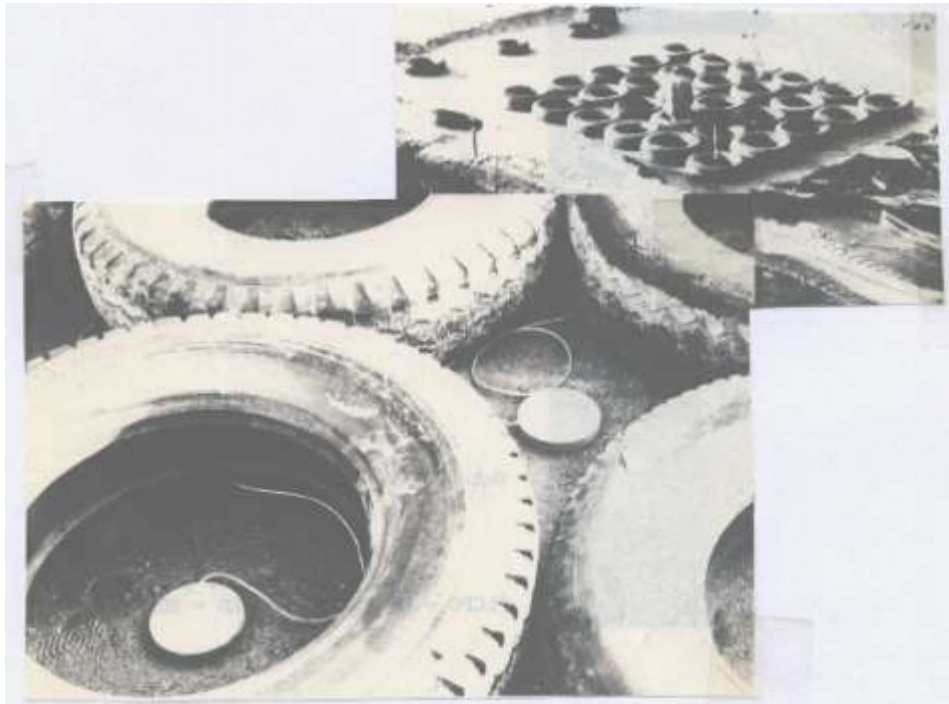


Figure 43 : Disposition des appareils de mesure

Le sable utilisé pour la construction des trois massifs du CER est un sable limoneux de granulométrie 0/10 provenant des carrières SNEC, sol sensible à l'eau dont l'emploi en remblai nécessite une mise en œuvre dans des conditions très voisines de celles de l'Optimum Proctor Normal. Les principales caractéristiques de ce matériau sont résumés dans le tableau 14.

Tableau 14 : Caractéristiques du sable utilisé au CER.

| Classe Proctor CBR à | Granulométrie de sable | | | Equivalent | | Poids volumique | |
|----------------------------|---------------------------|--------|-------|------------|-----|--------------------|----------|
| | d/D | %<80µm | %>2mm | ES | ES' | γ_s | γ |
| RTR w w _{opn} | | | | | | | |
| B2m | 0/10 | 8% | 20% | 26 | 29 | 26,5 | 20 8% 51 |

b) Les pneumatiques

Les pneumatiques sont des pneus usagés de poids lourds. Ils sont utilisés tels quels, jointivement (sans lien entre eux) pour constituer des nappes.

c) Le géotextile

Le géotextile incorporé aux structures est un non tissé réalisé à partir de filaments continus 100% polyester :

- identification Bidim U 36 (Rhône Poulenc Textiles)
- masse surfacique 270 g/m²

Le poids volumique du Pneusol ainsi réalisé est de 8 à 10 kN/m³. Il dépend pour beaucoup de l'épaisseur de la couche de remblai intercalaire séparant chaque nappe de pneus.

d) Le mâchefer

Le mâchefer utilisé pour les essais du LRPC de Strasbourg provient de l'incinération d'ordures ménagères. Son poids volumique sec est de l'ordre de 16.60 kN/m³. La teneur en eau est de l'ordre de 21.5% ; son pH est de 4,65 et il a un angle de frottement Φ important de 45°. Après déferraillage, la mise en œuvre est relativement aisée :

- par temps sec, si la teneur en eau est inférieure à $\omega_{PN}+2\%$
- par temps humide, si la teneur en eau est inférieure ω_{PN} (petite pluie)

Le compactage se fait par couche de 30 à 50 cm, soit 4 à 6 passes avec un CV 415 vibrant plus éventuellement 5 à 10 passes d'un compacteur à pneus.

Le module mesuré à l'essai de plaque après compactage est compris entre 35 et 60 MPa.

Si nous devons utiliser dans la réalité ce mâchefer pour des ouvrages il est absolument nécessaire de vérifier la conformité du matériau avec les Recommandations du ministère de l'Environnement

2.5.3. Description des massifs testés

Les trois massifs réalisés à Rouen ont pour dimensions 5m par 6m et environ 1,30m d'épaisseur. Ils sont mis en œuvre et compactés chacune en trois couches élémentaires de 45 cm d'épaisseur. Les massifs testés à Strasbourg ont des structures variées.

a) Structure 1 (CER de Rouen)

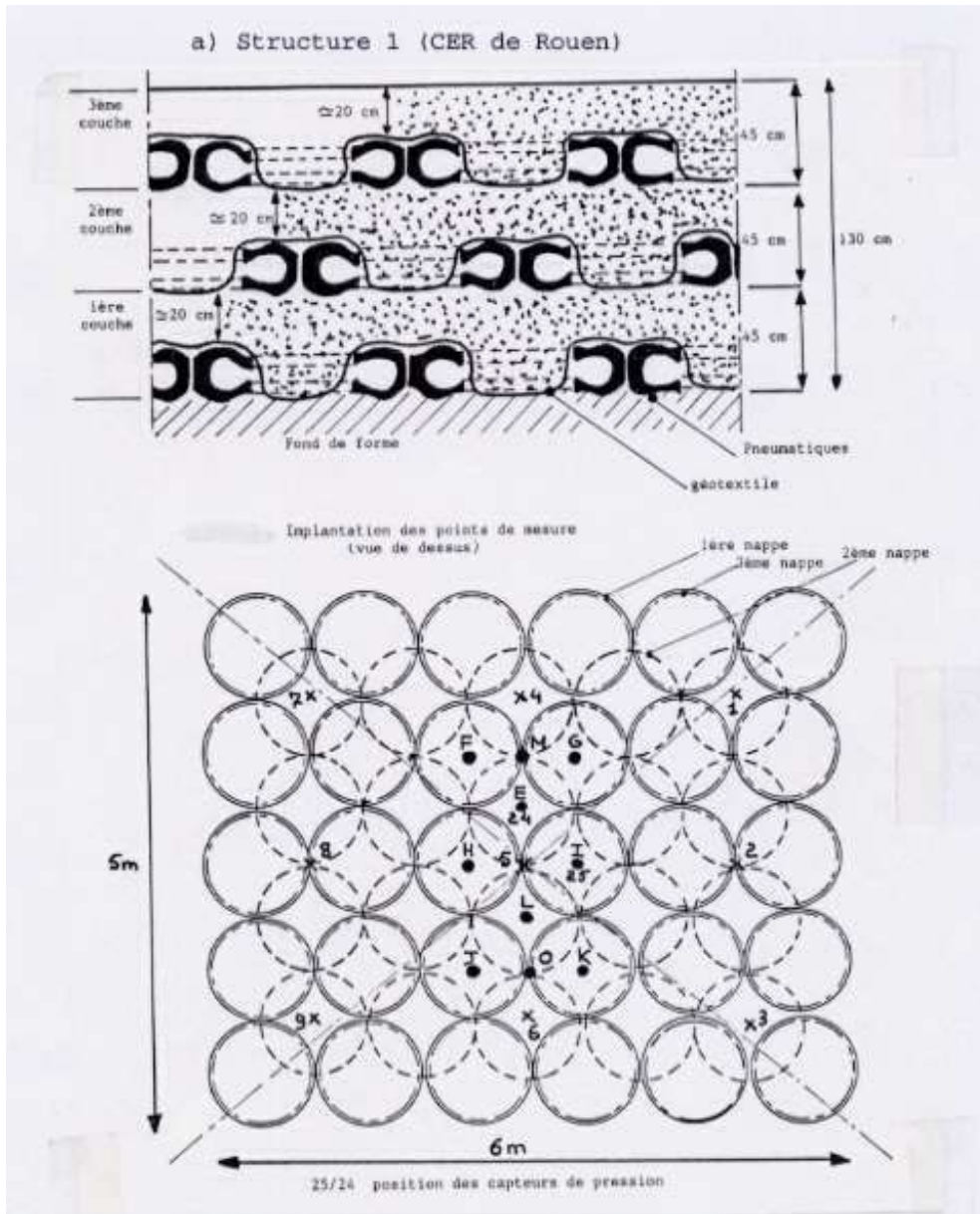


Figure 44 : Structure 1 - Coupe et Vue en plan

Réalisée en trois couches de 45cm d'épaisseur environ, chaque couche est constituée d'une nappe de pneumatiques posés jointivement soit sur le fond de forme (cas de la première

couche), soit sur la couche précédente (cas de la deuxième et de la troisième couche). La deuxième nappe de pneumatiques est décalée par rapport à la première et à la troisième.

Au-dessus de chaque nappe de pneumatiques, on dispose le géotextile de manière à le faire rentrer grossièrement à l'intérieur du volume de la jante (opération effectuée par piétinement); ensuite, le sable est mis en place à l'avancement au chargeur ou à la pelle hydraulique, de façon à obtenir environ 20 cm d'épaisseur (après compactage) au-dessus du flanc des pneumatiques.

La situation et le repérage des différents points de mesure (nivellement, dynaplaque ...) sont représentés , ainsi que la position des deux capteurs situés sur le fond de forme de la structure. La figure 44 montre les capteurs de pression installés dans le massif.

b) Structure 2 (CER de Rouen)

Elle se différencie par le fait que le géotextile est cette fois disposé préalablement au-dessus de chaque couche finie (Fig.45). Le sable est mis de la même manière.

Il est certain que le géotextile n'a dans ce cas qu'un rôle d'anticondaminant. De plus, il permet aussi de faire la comparaison avec le précédent lorsqu'on les sollicite sous chocs ou sous chargements rapides.

On remarque que pour cette structure, le volume des vides peut être plus faible que dans le précédent, le sable mis en place n'étant pas retenu par le géotextile et ayant de ce fait plus de facilités pour remplir les vides et en particulier l'intérieur des pneumatiques. En particulier, lors du compactage, les bords des pneus ont plutôt tendance à se refermer.

La disposition des autres nappes (2 et 3) ne change pas. La situation et le repérage des appareils de mesures sont indiqués sur la figure 45.

c) Structure 3

La structure 3 est une structure de référence et est constituée de trois couches de sable de 45cm d'épaisseur après compactage. Elle est équipée d'un capteur et d'un accéléromètre.

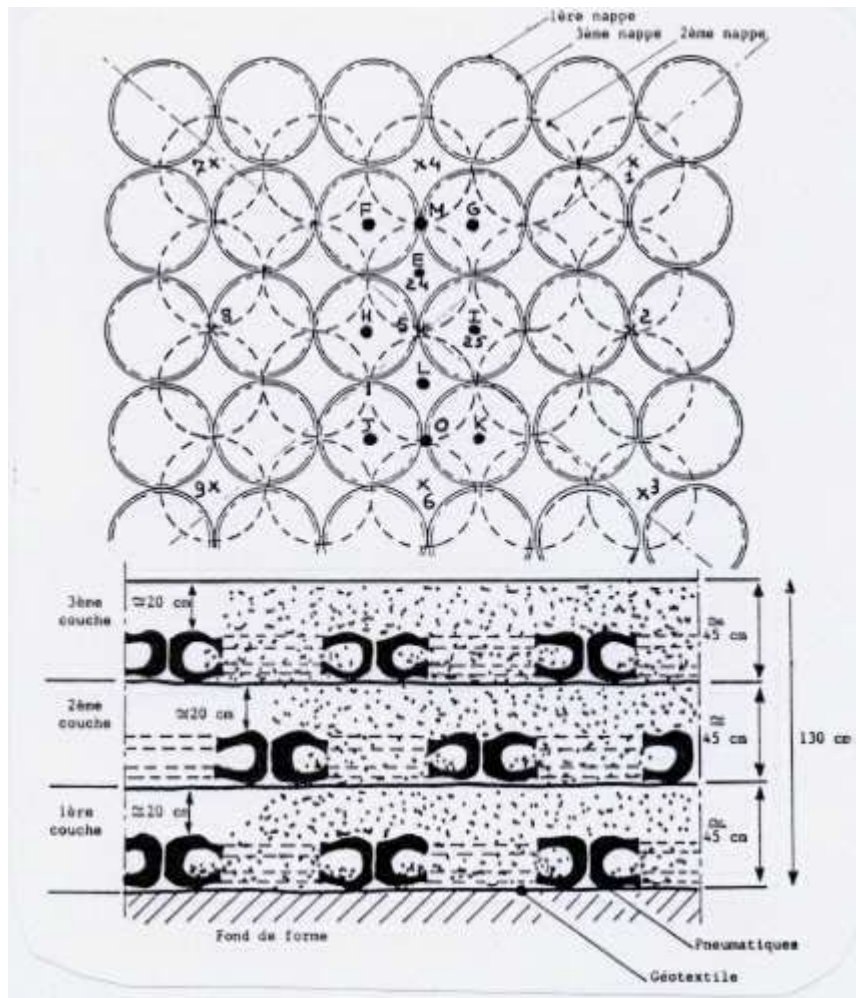


Figure 45: Structure 2 - Coupe et Vue en plan

d) Structures du LRPC de Strasbourg

Les structures testées sont nombreuses et variées et sont constituées soit de pneus de poids lourds, soit de pneus de tourisme en entiers ou partiellement découpés. Elles ont

essentiellement pour but la détermination de la meilleure structure parmi celles testées. La figure 46 montre quelques profils de toutes ces structures

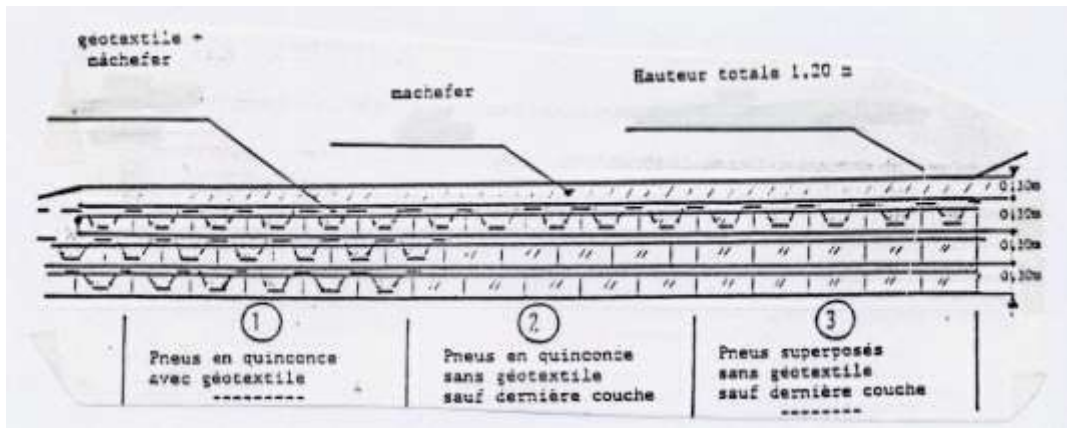


Figure 46 : Coupes de quelques profils testées au LRPC de Strasbourg

2.5.4. Principe des essais

Les essais consistent à mesurer l'amortissement du Pneusol en utilisant deux types d'excitateurs. Le premier, utilisé à Rouen, est une dynaplaque, appareil de mesure de la déformabilité des plates-formes de terrassement et des couches de forme. Il permet d'appliquer sur la plate-forme à ausculter une sollicitation dynamique analogue en intensité et fréquence à celle provoquée par le passage d'un essieu chargé à 13 tonnes roulant à 60 km/h au moyen d'une masse que l'on fait tomber sur une couronne de ressorts fixés sur une plaque métallique de 600 mm de diamètre reposant sur le sol. Le temps d'application de la charge est de l'ordre de 15 à 20 microsecondes (Fig.47).

La réponse de la plate-forme à la sollicitation est mesurée par le coefficient de restitution énergétique du choc ainsi engendré, qui s'exprime par le rapport entre la hauteur du rebond de la masse et la hauteur de la chute initiale. Une courbe d'étalonnage permet de traduire le coefficient de restitution en un module dynamique. Le nombre de mesures effectuées après chaque couche est de 15 pour les massifs Pneusol et de 5 pour le massif de référence.

Préalablement, le sol support est contrôlé en 5 points. Les résultats sont représentés sur les figures 49 à 51.

Le deuxième excitateur, utilisé à Strasbourg, est constitué d'une masse tombant sur une plaque métallique de diamètre 300 mm et de 20 mm d'épaisseur.

Les capteurs de mesure sont des accéléromètres placés soit à l'intérieur de la structure testée, soit à 3 m d'elle et, dans ce cas, fixés sur une embase métallique très lourde.

Les signaux résultants sont traités de façon à obtenir des vitesses particulières, puis analysés en temps et fréquence. Dans le domaine temporel, ce sont les valeurs crêtes-crêtes de la vitesse particulière qui ont été relevées, afin de prendre en compte toute l'énergie du signal, qui n'est pas toujours symétrique (Fig.48).

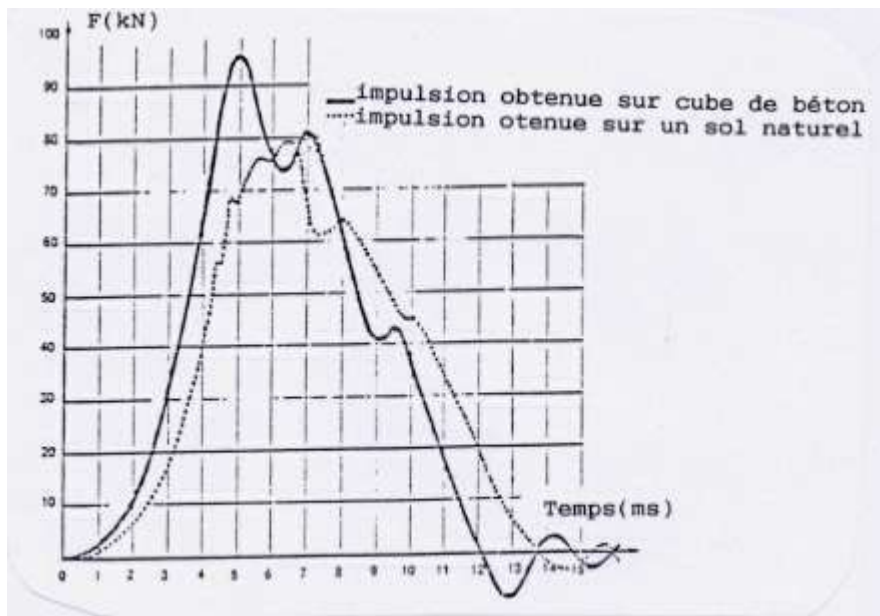


Figure 47 : Caractéristique de l'impulsion produite pour une hauteur de chute de 0.50 m

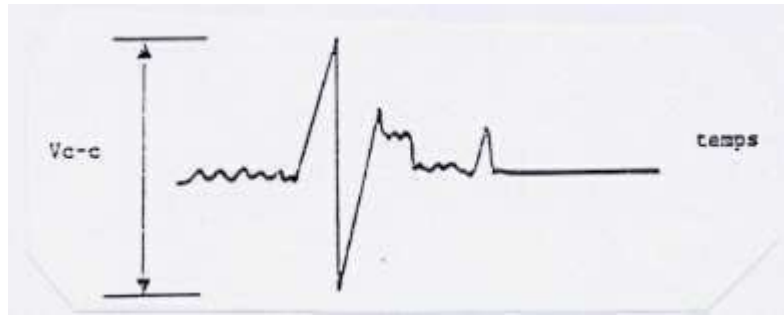


Figure 48 : Définition de la vitesse crête-crête

Les spectres de fréquence ont été tracés entre 10 et 200 Hz. L'amplitude de ces représentations ne présente que peu d'intérêt, puisqu'il s'agit d'une source artificielle.

2.5.5. Résultats des contrôles de mise en œuvre

a) Epaisseur des couches

Pour les trois massifs de Rouen, les épaisseurs des couches élémentaires varient de 40 à 48 cm et les épaisseurs totales de 126 à 138 cm.

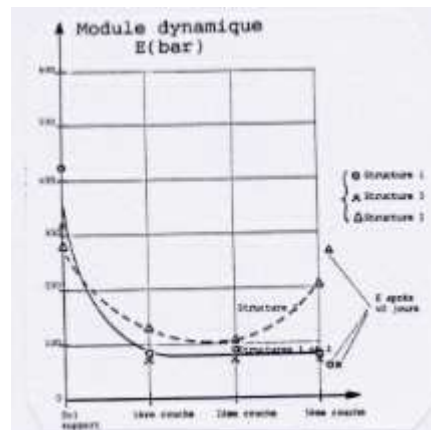


Figure 49 : Module dynamique (Dynamaplaque) en fonction de la structure et du nombre de couches (1er chargement, essais du CER de Rouen)

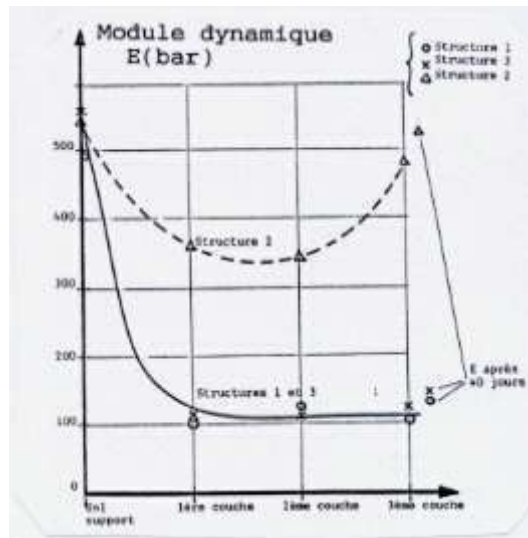


Figure 50 : Module dynamique (Dynaplaque) en fonction de la structure et du nombre de couches(2ème chargement, essais du CER de Rouen)

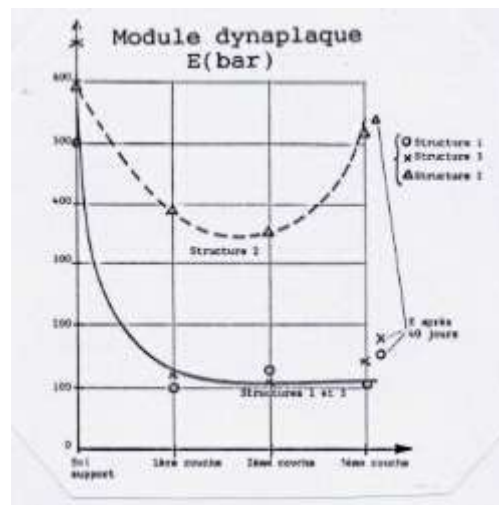


Figure 51 : Module dynamique (Dynaplaque) en fonction de la structure et du nombre de couches(3ème chargement, essais du CER de Rouen)

b) Poids volumiques

Le compactage de chaque couche, réalisé à l'aide d'un compacteur vibrant, est contrôlé par un gammadensimètre à profondeur variable en 9 points répartis sur la structure et après 4, 8, et 16 passes du compacteur.

Les résultats sont traduits graphiquement sur la figure 51 en taux de compactage moyen en fonction du logarithme du nombre de passes du compacteur (taux de compactage = poids volumique sec moyen divisé par le poids volumique Proctor de référence, en pourcentage).

On observe (Fig.52), que pour le Pneusol, l'évolution du compactage en fonction du nombre de passes est très faible ; le taux de compactage maximum est pratiquement obtenu pour 4 passes. Il existe peu de différences entre les massifs de Pneusol. Par contre, le massif de référence en sable a vu son taux de compactage évoluer de manière importante et atteint 100% (contre 98%) après 16 passes du compacteur.

On peut cependant remarquer sur les massifs de Pneusol l'apparition de fissures dans le matériau au droit des pneus (Fig.53). Ces fissures semblent marquer la mise en place du matériau dans les pneumatiques après environ 8 passes pour une hauteur au-dessus des pneus de l'ordre de 20 cm. Elles marquent aussi les zones de modules différents (le pneu et le sol).

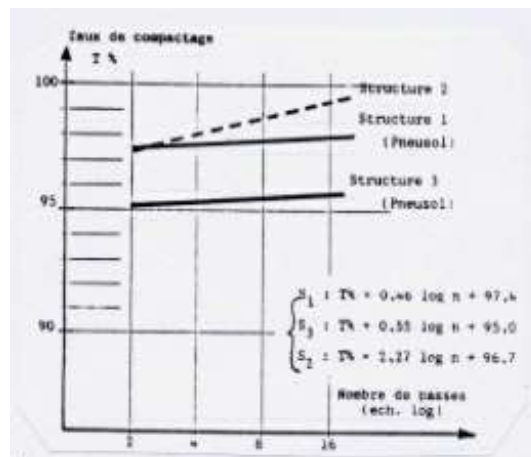


Figure 52 : Evolution du taux de compactage en fonction du nombre de passes (essais du CER de Rouen)

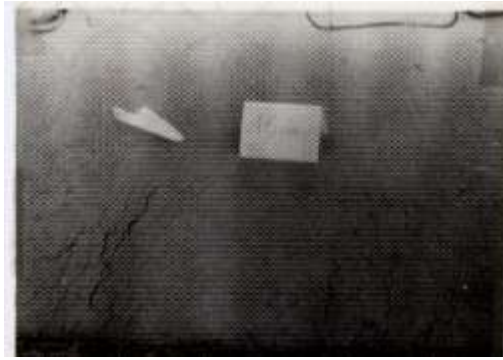


Figure 53 : Vue de la surface d'un massif de Pneusol après compactage (essais du CER de Rouen).

2.5.6. Résultats des essais du CER de ROUEN

Au cours de la mise en œuvre des différents massifs et après leur réalisation, les tests suivants ont été réalisés :

- suivi de l'évolution du module dynamique à la dynaplaque,
- mesure de la pression et de l'accélération induite dans le matériau, sous la dynaplaque, au passage du compacteur vibrant et sous chocs.

a) Module dynamique des massifs

Quelle que soit le massif considéré, le module dynamique diminue par rapport à celui du sol support dès la mise en œuvre de la première couche : il est divisé par 4 à 5,5 pour les massifs de Pneusol et seulement par 1,5 à 2 pour le massif de sable de référence.

Après la mise en œuvre de la deuxième couche, on ne constate plus d'évolution du module quelle que soit la structure. Par contre, après la mise en œuvre de la troisième couche, le module augmente pour le massif de référence (la valeur atteinte est sensiblement égale à celle mesurée sur la plate-forme initiale).

Pour les massifs de Pneusol, la mise en œuvre de la troisième couche ne modifie pas sensiblement la valeur initiale observée sur la première couche. Cela signifie que la déformabilité n'évolue pas sous l'action des sollicitations répétées. Ces résultats permettent de conclure que le module dynamique du Pneusol n'évolue pas en fonction du nombre de couches. Les essais à la dynaplaque refaits après 40 jours n'ont pas donné de différence marquante.

b) Pressions et accélérations sous sollicitations de la dynaplaque

La position des capteurs et des accéléromètres est indiquée sur les figures 44 et 45. Les capteurs situés en I et E sur le massif 1 n'ont pas au-dessus d'eux la même structure que les capteurs situés au point 5 dans le massif 2. En effet, à la verticale de ces deux capteurs, on ne rencontre pas de pneumatiques, même après la mise en œuvre de la troisième couche. Les résultats sont traduits sur la figure 53. Quelle que soit la structure, les pressions et accélérations induites diminuent en fonction du nombre de couches (augmentation de la distance entre le capteur et l'embase de la dynaplaque). Cette diminution est plus importante sur les massifs 1 et 2 que sur le massif 3, où les valeurs sont déjà très faibles à l'origine.

Après la mise en œuvre de la première couche de Pneusol, les pressions au chargement sont de l'ordre de 6 fois plus faibles que sur le massif 3 ; après la mise en œuvre des deux autres couches, elles sont 3 à 5 fois plus faibles. En accélération induite, celles-ci sont 3 à 4 fois plus faibles sur le massif de Pneusol sous 2 à 3 couches.

En fonction du nombre de chargements, les pressions évoluent peu dans le massif 3 quel que soit le nombre de couches. Pour le massif 2, il faut la mise en place de la troisième couche pour que les pressions n'augmentent plus en fonction du nombre de chargement.

Le massif de Pneusol 1 semble avoir une réponse différente du massif 2 ; en tout cas, il conduit à des pressions induites supérieures ou égales à celles observées sur le massif de référence. Ceci est tout à fait normal dans la mesure où le chargement est directement appliqué sur le capteur, sans l'interposition d'aucune nappe de pneumatiques.

Ces résultats démontrent que la meilleure disposition des pneus est celle où un chargement rencontre toujours au moins un pneu. Il faut donc adopter la disposition orthorhombique des pneus afin de présenter un minimum de vides. La couche suivante sera donc décalée par rapport à la première d'un demi-diamètre. Chaque massif doit avoir au moins trois couches.

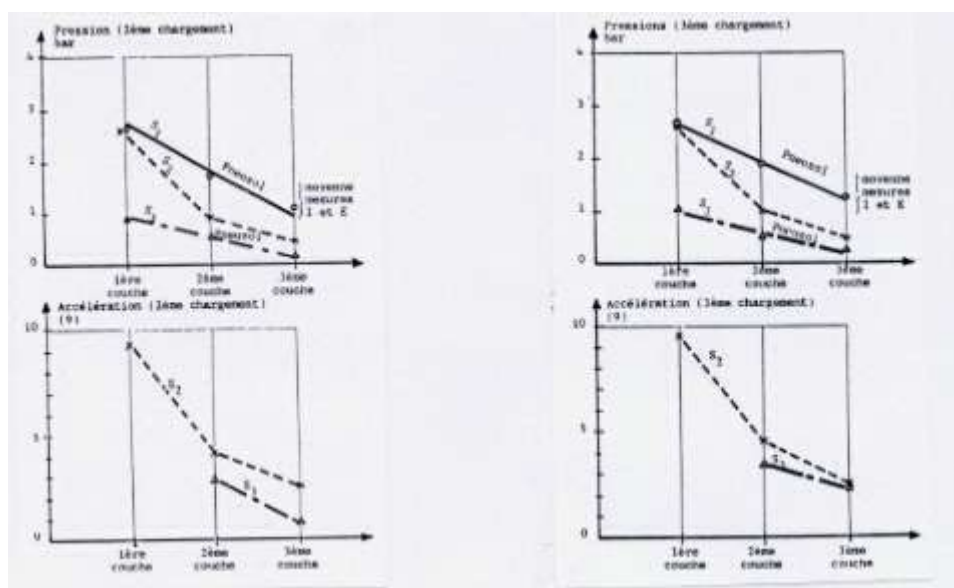


Figure 54 : Pressions et accélérations lors des trois chargements (Essais du CER de Rouen)

c) Pressions et accélérations sous compacteur vibrant

Après le compactage de la troisième couche, les pressions et accélérations induites à la base des massifs sont mesurées lors d'un passage supplémentaire (après 16 passes) du compacteur vibrant. Les résultats sont conformes aux autres mesures. Par exemple, la pression induite dans la massif 2 est environ 2 fois plus faible que la pression enregistrée à la base du massif de référence et du massif 1

d) Pressions et accélérations sous chocs

Les sollicitations dynamiques sont réalisées à l'aide d'un boulet en acier de 400 kg et de deux masses en béton de 520 kg (0,60m*0,60m*0,60m) et de 1100 kg (1m*1m*0,50m), qui devraient tomber d'une hauteur de 5m. En fait, le système de décrochage des blocs n'étant pas instantané, la hauteur de chute a varié de 1,50 à 2 m ; de plus, ces blocs ne sont pas parfaitement horizontaux lorsqu'ils touchent le sol.

Cependant, pour une hauteur de chute de l'ordre de 2,10 m de la masse de 520 kg, la pression induite dans le massif de référence est deux fois supérieure à celle du massif 1 (0,385 MPa pour 0,164 MPa). Pour une hauteur de chute du boulet de 2,1 m, la pression induite dans le massif de sable est de 20% plus élevée que la pression induite dans le massif 1.

Il semblerait que le comportement d'une structure en Pneusol dépend beaucoup de la disposition des pneus et aussi peut-être de la forme des blocs (influence sur la répartition des contraintes dans le sol). Des essais en vraie grandeur (DDE du Var, Campenon Bernard..) permettent d'avoir quelques résultats quantitatifs.

2.5.7. Résultats des essais du LRPC de Strasbourg

Pour les dix massifs du LRPC de Strasbourg construits avec du mâchefer, le dépouillement des signaux enregistrés permet de tirer des résultats très intéressants. Un exemple de signal temporel et du spectre de fréquence correspondant est donné sur la figure 55.

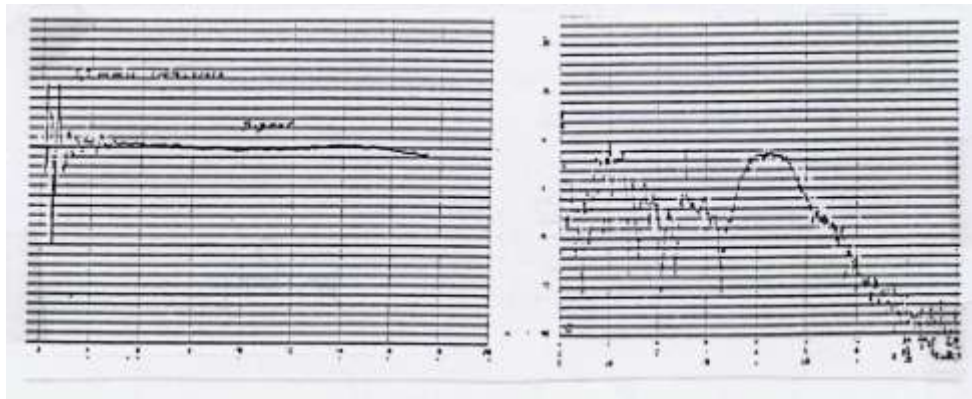


Figure 55 : Type de signal temporel et spectre de fréquence (Essais du LRPC de Strasbourg)

Seule l'analyse des signaux temporels a permis d'aboutir à des conclusions intéressantes, car la variation entre les spectres obtenus sur les différentes structures est trop faible pour être significative. Par contre, les niveaux crête-crête obtenus à partir des signaux temporels mettent en évidence des atténuations significatives des vitesses particulières. Les résultats sont résumés dans le tableau 15.

Tableau 15 : Vitesses particulières mesurées dans les différents massifs testés au LRPC de Strasbourg

| Massifs 10ref. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Vitesse(mm/s) | 1,5 | 1,3 | 2,2 | 1,1 | 1,3 | 1,2 | 2,3 | 4,4 | 3,8 | 4,8 |

On constate, tout d'abord, que tous les massifs comportant un Pneusol fabriqué à partir de pneus de poids lourds (1-2-3-4-5-6-7) ont une vitesse crête-crête plus faible que celle du massif de référence (10). Elles ont un bon "pouvoir absorbant".

Pour une épaisseur faible (1,2m), une disposition en quinconce donne de meilleurs résultats (exemple: massifs 1-2 par rapport à 3). Par contre, la différence n'est plus significative lorsque la hauteur est un peu plus importante (2m) (exemple : 4-5-6).

Le passage de trois à six couches ne produit pas de différence sensible et marquante.

Des analyses plus fines restent à faire au niveau du filtrage des fréquences. Mais, d'ores et déjà, on peut envisager l'utilisation du Pneusol comme matériau anti-vibration. Possédant un module relativement élevé (environ 10 MPa à 12 MPa pour un matériau de base de l'ordre de 30 MPa) il pourrait servir par exemple de couche de fondation à une chaussée anti-vibration, afin de limiter les nuisances dues notamment à la circulation des camions ou des tramways.

Un tel matériau pourrait aussi servir de fondation "antisismique" ou sur sols gonflants pour des maisons individuelles. Ce sera un programme de longue haleine car les recherches dans le domaine de la mitigation sismique ne sont pas aisées et nécessitent beaucoup de temps, d'argent.

Un programme de recherches de faisabilité sur ce sujet est en cours de réalisation entre l'ENIT (Tunisie) et le LCPC. Une étude a été proposée par le LCPC pour protéger le synchrotron de Grenoble des vibrations routières.

2.6. ETUDE EN LABORATOIRE DU PNEUSOL LEGER

2.6.1. Généralités

Les pneus usagés constituent une population diverse et variée par les marques, les tailles, le degré de vieillissement, d'usure, la forme des trous, des déchirures, les renforcements internes des bandes de roulement, des tringles... Les paramètres à étudier (s'il fallait les étudier tous) sont donc très nombreux. De plus, il ne serait certainement pas aisé de le faire car la concurrence entre les firmes est très sévère et les secrets de fabrication (constitution de la gomme, type des armatures utilisées, etc.) sont jalousement gardés.

Pour toutes ces raisons, un essai de chargement sur deux empilements de pneus sans sol ne peut donner les mêmes valeurs de l'effort et des déformations. Et c'est là qu'interviennent les sols de remblaiement dont l'utilisation a essentiellement pour but d'atténuer les dispersions dues aux disparités structurelles et formelles des pneus et aussi de donner au nouveau matériau un module suffisant pour supporter des structures variées (routes, maisons,..).

Si l'on considère un pneu de poids lourd dont le trou de la jante est rempli de remblai et soumis à un chargement, tout effort de compression se répartit entre un effort principal dans le sol de remblai et un effort faible voire négligeable du pneu compte tenu de la différence de modules de déformations entre ces deux matériaux (Fig.56).

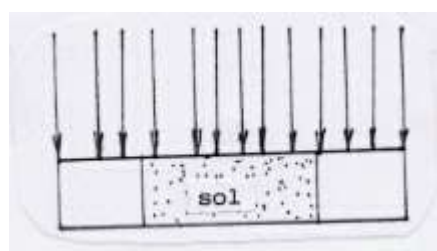


Figure 56 : Pneusol, matériau composite

La rupture de ce matériau composite correspond en principe à la limite de résistance du sol car, paradoxalement, bien que de faible module, le pneu a des résistances plus importantes (présence de fibres de renforcement) que le sol. Or ce dernier est fortement confiné à l'intérieur du trou de la jante.

La déformation latérale du sol est donc empêchée. Il n'est pas aisé dans l'état actuel des recherches de définir la rupture d'un tel matériau, et ses caractéristiques mécaniques à la rupture, tout au moins pour les pneus de poids lourds.

On peut aussi se poser la question de savoir quelle part respective de la résistance du cisaillement du sol et des pneus on mobilise au cours de la sollicitation depuis les valeurs très faibles des déformations jusqu'à la rupture (s'il y a rupture).

De cette analyse sommaire du comportement du Pneusol on voit que la qualité du remblai participe au bon fonctionnement du Pneusol (et fonction de la destination de l'ouvrage).

2.6.2. Essai de chargement d'une colonne de pneus

La figure 57 montre les résultats d'un essai de chargement en "laboratoire" effectué sur une colonne de quatre pneus vides et de Pneusol (le remblai étant de la grave sableuse).

La déformation augmente avec la charge et est très importante dans le cas des pneus vides. Le module de cette colonne de quatre pneus vides est de 0,15 MPa, à comparer à 1,2MPa pour le Pneusol.

Un compactage par vibration effectué à la fin du chargement n'a pas changé le module du déchargement. On constate, par contre, un léger fluage des pneus dans le cas des pneus vides.

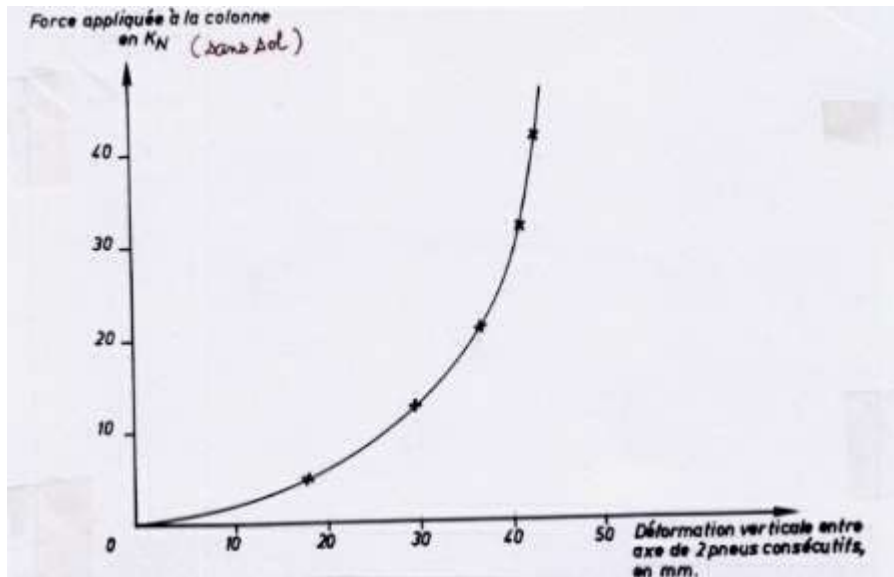


Figure 57 : Essai de compression: "Courbe contrainte-déformation"

A ce phénomène il faut ajouter le fait que la déformation des pneus dépend aussi du nombre de ceux-ci ; une colonne de quatre pneus ne se déforme pas de la même manière qu'une colonne de huit. Les empilements de pneus vides sont très sensibles aux efforts extérieurs notamment les efforts horizontaux.

2.7. CONCLUSIONS

Le programme des essais préconisés comportant une étude expérimentale et théorique à partir des essais à l'appareil triaxial sur un sol renforcé "sable-latex", des essais in situ d'adhérence "pneumatique-sol", de capacité portante, de comportement sous charges dynamiques ont permis de dégager les principales conclusions suivantes:

- * un sable "renforcé" par des feuilles de latex a des caractéristiques globales plus faibles que celles du sable seul. Le module du latex étant plus faible que celui du sable, l'introduction de ce dernier dans un échantillon de sable ne permet pas une amélioration du matériau composite ainsi réalisé. On observe ainsi de nombreux résultats d'essais de composite sable non-tissé. Contrairement au latex le pneu usagé possède de très nombreuses armatures dans la bande de roulement et dans les tringles.

- * les essais d'adhérence "pneumatique-sol" sur de nombreux assemblages (bandes de roulement, flancs,..) ont permis d'avoir de nombreux résultats indispensables pour une meilleure connaissance et réalisation d'ouvrages de soutènement. On obtient peu de ruptures par défaut d'adhérence c'est à dire rupture par glissement sans cassure des renforcements dénotant une bonne adhérence entre les différents assemblages testés avec le sol utilisé. Actuellement le maillage le plus intéressant est le carré, fait avec des bandes de roulement

sur chant. Mais rien ne nous empêche ultérieurement d'utiliser des pneus de tourisme en entier moyennant quelques essais complémentaires.

* En pratique, on retient des essais de chargement in situ de sable et de Pneusol, que si la capacité portante du Pneusol est égale à la moitié de celle du sable, elle est cependant loin d'être négligeable. Elle est de plus largement suffisante pour supporter un ouvrage (maison individuelle, par exemple).

* Soumis aux sollicitations dynamiques, tous les massifs comportant un Pneusol fabriqué à partir de pneus de poids lourds ont une vitesse crête-crête plus faible que celle du massif de référence. Ils ont un bon "pouvoir absorbant".

Mais, d'ores et déjà, on peut envisager l'utilisation du Pneusol dans le domaine routier. Possédant un module relativement élevé, il pourrait servir par exemple de couche de fondation à une chaussée anti-vibration, afin de limiter les nuisances dues notamment à la circulation des camions ou des tramways. Des essais complémentaires sont réalisés en collaboration avec ESRF de Grenoble en vue de ce type d'application.

"Il y a quelque chose de pire que d'avoir une âme perverse, c'est d'avoir une âme habituée" (C. Peguy)