

# Modélisation du Pneusol - Application aux murs de soutènement

M. ABDURAHMAN\*, R. BOUZIDI\*, P. JOUVE\*, P. LAREAL\*\* & N.T. LONG\*\*\*

\* *Université de Nantes, France*

\*\* *Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France*

\*\*\* *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France.*

## 1. Introduction

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 (plus de 250 000 tonnes sont jetées chaque année en France), 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.

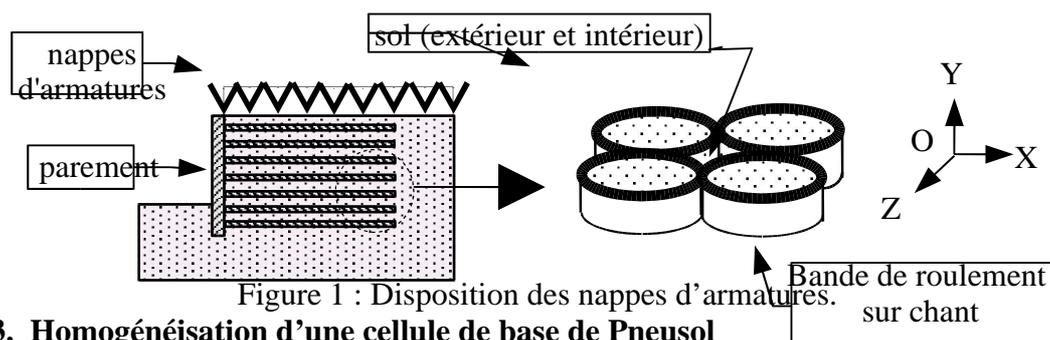
Les applications possibles du Pneusol sont multiples et variées [6] : ouvrages de soutènement, raidissement de pentes, pistes avec matériaux non cohérents de faible stabilité, absorbeurs d'énergie, remblais légers sur terrains compressibles. Le but de cette communication est de montrer comment on peut modéliser le Pneusol, et comment appliquer cette modélisation à la simulation des murs de soutènement.

## 2. Comportement mécanique du Pneusol

Des hypothèses simplificatrices sont nécessaires pour modéliser le comportement du Pneusol :

- 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, voir figure 1.



## 3. Homogénéisation d'une cellule de base de 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.

Pour la géométrie du Pneusol en nappes, il y a deux possibilités d'assemblage ; la disposition normale et la disposition orthorhombique (figure 2). La disposition géométrique des deux constituants (sable et pneumatiques) étant périodique dans le plan XOZ, cela permet de définir une cellule de base.

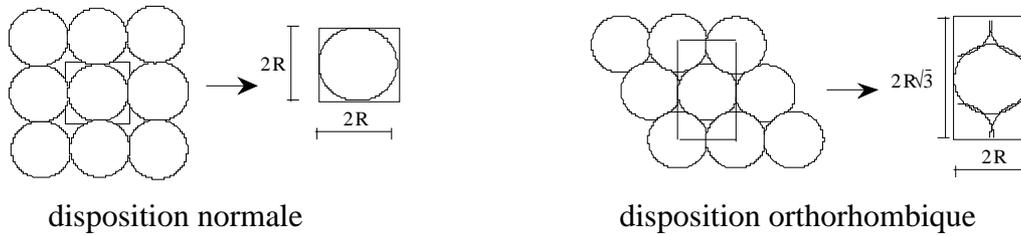


Figure 2 : Types d'assemblage et cellules de base correspondantes.

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 [7].

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 ;
- 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  $\epsilon^m$  et  $\sigma^m$  ( respectivement  $\epsilon$  et  $\sigma$ ) les tenseurs de déformations et de contraintes macroscopiques (respectivement microscopiques).

On peut définir les grandeurs macroscopiques suivantes :

- le champ des contraintes globales  $\sigma^m$  est la moyenne de celui des contraintes locales  $\sigma$  :

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

- le champ des déformations globales  $\epsilon^m$  est la moyenne de celui des déformations locales  $\epsilon$  :

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

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

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 [4] :

- 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  $E_v^{eq}$  et le coefficient de Poisson vertical équivalent  $\nu_v^{eq}$ , 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  $\nu_s$  le coefficient de Poisson du sol. Posons :

$\omega$  = le rapport de hauteur de la nappe d'armature sur la hauteur d'une cellule de base.

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

Dans le cas de la disposition normale, on a :

$$E_v = \frac{\pi}{4} \bar{\omega} E_r + (1 - \frac{\pi}{4}) E_s + \frac{\pi}{4} (1 - \bar{\omega}) E_a \quad \text{et} \quad \nu_v = \frac{\pi}{4} \bar{\omega} \nu_r + (1 - \frac{\pi}{4}) \nu_s + \frac{\pi}{4} (1 - \bar{\omega}) \nu_a$$

On obtient les paramètres équivalents avec les relations :

$$\frac{1}{E_v^{eq}} = \frac{1 - \omega}{E_s} + \frac{\omega}{E_v} - \frac{2(\nu_v - \nu_s)^2 \omega(1 - \omega)}{(1 - \nu_s) E_s} \quad \text{et} \quad \nu_v^{eq} = (1 - \omega) \nu_s + \bar{\nu}_v$$

dans lesquelles :  $\bar{\nu}_v = \frac{E_s}{E_v} \nu_v$ .

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

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

$$\nu_v = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \bar{\omega} \nu_r + (1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}}) \nu_s + \frac{\pi}{2\sqrt{3}} (1 - \bar{\omega}) \nu_a.$$

#### 4. Exemple d'homogénéisation

On considère un mur de soutènement renforcé par des nappes de Pneusol dont l'espacement entre deux lits d'armatures est de 0,56 m. Les caractéristiques mécaniques de la cellule de base de Pneusol sont les suivantes :

- Pneumatiques : module de rigidité  $E_a = 2000$  MPa, coefficient de Poisson :  $\nu_a = 0,35$ , rayon extérieur  $R_{ext} = 35$  cm, rayon intérieur  $R_{int} = 33$  cm, hauteur de bande de roulement sur chant = 24 cm.
- Sable :  $E_s = 100$  MPa,  $\nu_s = 0,25$ , disposition d'armatures : normale.

Par la méthode d'homogénéisation simplifiée, on obtient pour le module de rigidité verticale équivalente :  $E_v^{eq} = 126$  Mpa, et pour le coefficient de Poisson vertical équivalent :  $\nu_v^{eq} = 0,196$

Avec la même cellule de base, on a également fait un calcul d'homogénéisation numérique avec le maillage représenté figure 3. La cellule à disposition normale est

maillée avec 444 éléments et 612 noeuds. La cellule à disposition orthorhombique comporte 447 éléments et 600 noeuds.

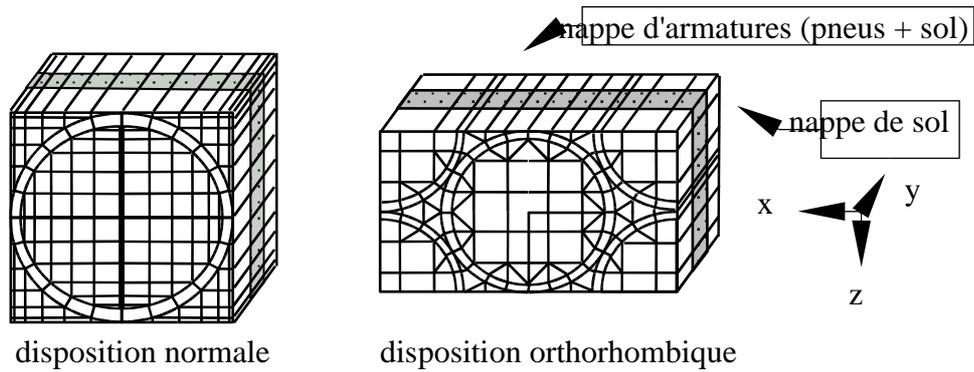


Figure 3 : Maillage de la cellule de base.

On donne dans le tableau 1 les caractéristiques homogénéisées obtenues. Pour la disposition normale, on constate que le calcul numérique donne des rigidités plus grandes que le calcul analytique. D'autre part, cet exemple montre que la disposition normale donne dans l'ensemble un comportement légèrement plus orthotrope que la disposition orthorhombique.

Disposition normale			Disposition orthorhombique		
$E_x = 120,5$	$E_y = 132,0$	$E_z = 120,5$	$E_x = 127,6$	$E_y = 129,5$	$E_z = 126,2$
$\nu_{xy} = 0,221$	$\nu_{xz} = 0,281$	$\nu_{yz} = 0,221$	$\nu_{xy} = 0,225$	$\nu_{xz} = 0,271$	$\nu_{yz} = 0,231$
$G_{xy} = 49,1$	$G_{xz} = 49,1$	$G_{yz} = 49,1$	$G_{xy} = 48,5$	$G_{xz} = 50,1$	$G_{yz} = 50,1$

Tableau 1 : Résultats de calcul d'homogénéisation.

Les figures 4 à 7 résument les résultats des simulations dans le cas de la disposition normale,  $h_t$  et  $h_s$  désignant les hauteurs de la cellule de base et du sol. On constate sur ces figures, que les modules de rigidités du Pneusol sont nettement supérieurs à ceux du sol seul, dans la mesure où la densité d'armatures est suffisante ( $h_t/h_s \leq 0,3$ ). Par contre, les coefficients de Poisson sont peu sensibles à  $h_t/h_s$ .

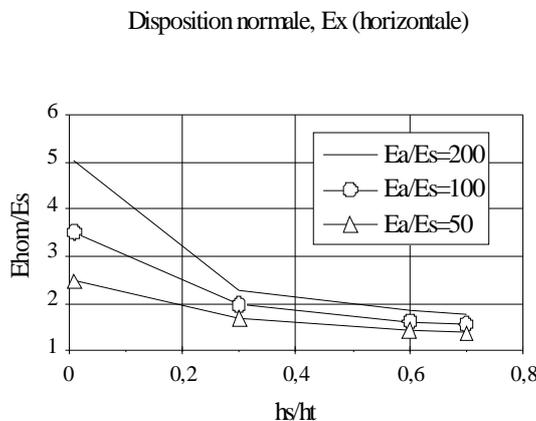


Figure 4 : Variation de  $E_x^{hom}/E_s$  en fonction de  $h_s/h_t$ , pour différentes valeurs de  $E_a/E_s$ .

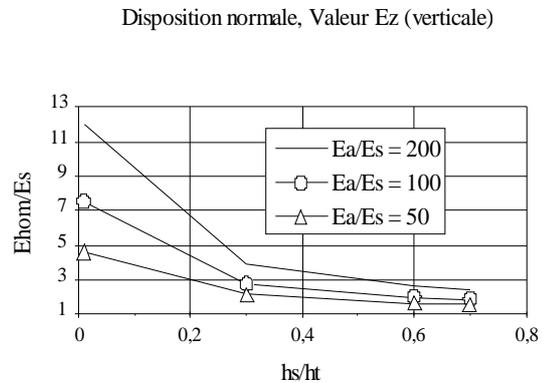


Figure 5 : Variation de  $E_z^{hom}/E_s$  en fonction de  $h_s/h_t$ , pour différentes valeurs de  $E_a/E_s$ .

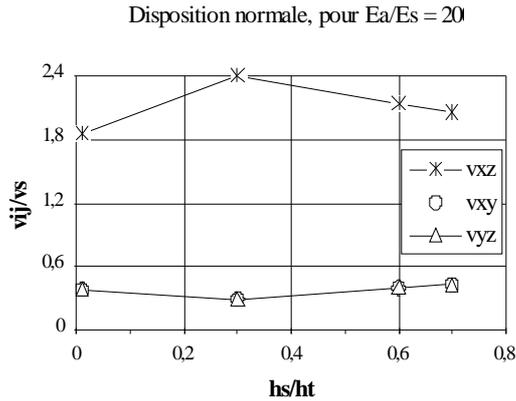


Figure 6 : Variation de  $v_{ij}^{hom}/v_s$  en fonction de  $h_s/h_t$ , pour la disposition normale.

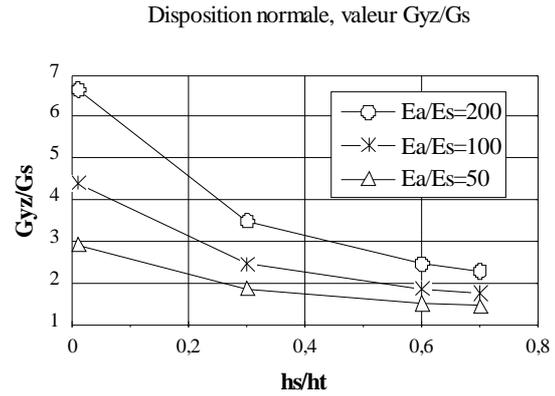


Figure 7 : Variation de  $G_i^{hom}/G_s$  en fonction de  $h_s/h_t$ , pour la disposition normale.

## 5. Calcul en déplacement d'un mur de soutènement

On considère un mur de soutènement renforcé, constitué de couches alternées de sable et de Pneusol. Pour les couches de sable, on suppose que le matériau a un comportement élastoplastique. Le modèle repose sur des idées et des lois empiriques simples, et incorpore [2] :

- le critère de rupture de Drücker-Prager,
- la loi hyperbolique cisaillement-distorsion de Köndner-Zelasko (1963).

Le modèle comporte trois surfaces de charge (figure 8). La première surface de charge  $F^1$ , de type Drücker-Prager, représente les écoulements plastiques liés au cisaillement. La seconde surface  $F^2$  représente les écoulements plastiques liés à la consolidation. La troisième surface  $F^3$ , représentée par un plan perpendiculaire à la trissectrice, permet d'étendre le comportement du matériau à des cas de traction jusqu'à  $p = -p_c$ . Cette surface permet également d'éliminer les problèmes numériques liés à la singularité du sommet du cône.

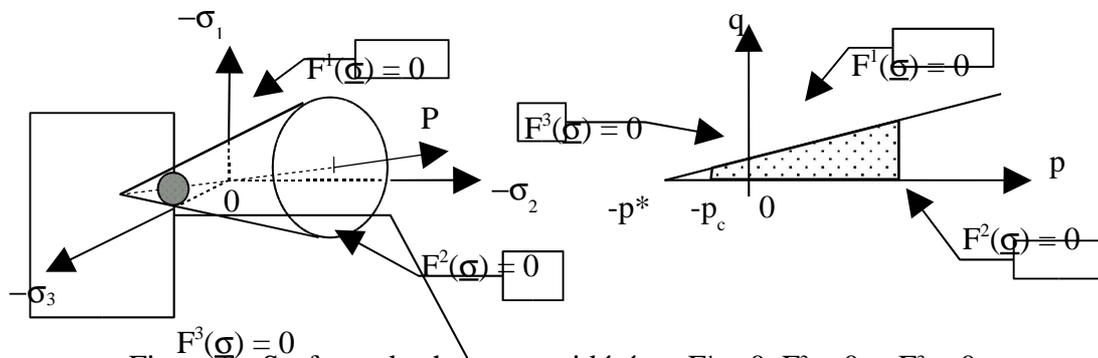


Figure 8 : Surfaces de charge considérées :  $F^1 = 0$ ,  $F^2 = 0$  et  $F^3 = 0$ .

On se propose de simuler un mur de soutènement renforcé par des nappes de Pneusol (figure 9). Ce calcul a été effectué à l'aide du code MECAMEF développé au L.M.G. de l'Université de Nantes. Les paramètres de l'étude sont les suivants :

- remblai (sable) :  $E_s = 100 \text{ MPa}$ ,  $\nu_s = 0,25$ , et les paramètres élastoplastique :  
 $p^* = -50 \text{ kPa}$ ,  $p_c = -25 \text{ kPa}$ ,  $p_o = 100 \text{ kPa}$ ,  $\beta = 0,96$ ,  $\delta = 0,20$ ,  $\zeta = 0,46$  ;  
 $q = 100 \text{ kPa}$

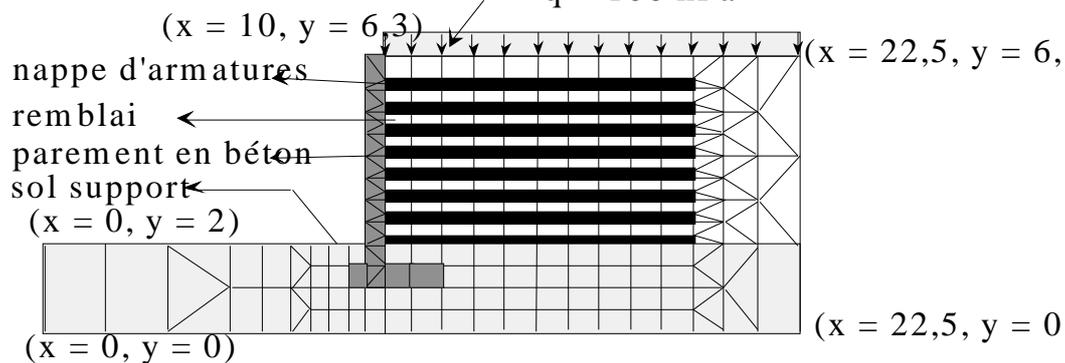


Figure 9 : Maillage de la structure calculée.

- armatures : rayon = 35 cm,  $E_a = 5\,000 \text{ MPa}$ ,  $\nu_a = 0,35$  ;
  - parement : épaisseur = 0,5 m, hauteur = 5,3 m,  $E_b = 1\,500 \text{ MPa}$ ,  $\nu_b = 0,25$ .
- Les figures 10 à 13 montrent les résultats des différents calculs, en faisant varier les paramètres suivants :
- module de cisaillement des éléments interfaces entre le parement et le remblai, à partir du type glissant ( $G_h = 2 \text{ kPa}$ ) jusqu'au type collé ( $G_h = 20 \text{ MPa}$ ) ;
  - longueur des armatures : 1,4 m - 2,8 m - 3,5 m - 4,2 m - 4,9 m - 7,0 m ;
  - module de rigidité du mur : 1 000 MPa - 1 500 MPa - 5 000 MPa - 8 000 MPa.

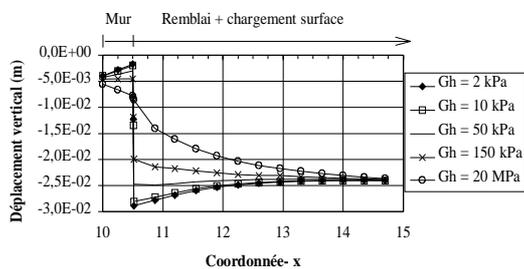


Figure 10 : Déplacement vertical de la surface, pour différentes valeurs de  $G_H$

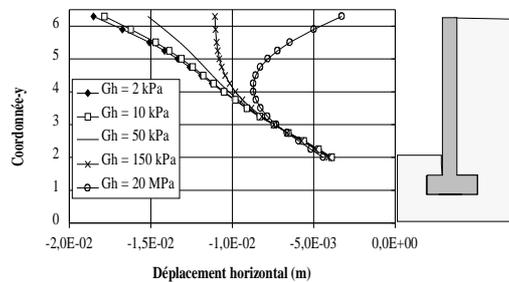


Figure 11 : Déplacement horizontal du mur en fonction de  $G_H$ .

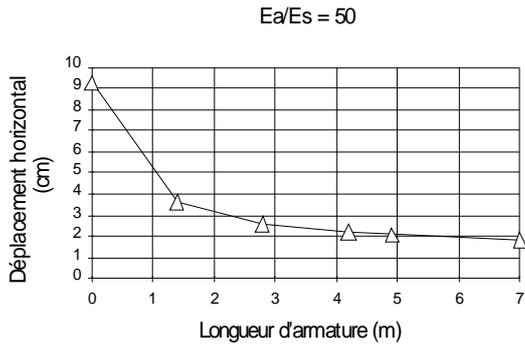


Figure 12 : Déplacement horizontal du mur en fonction de la longueur des armatures (interface glissante).

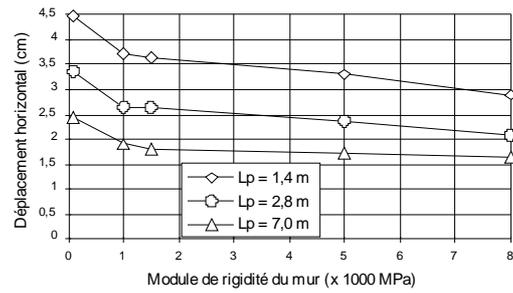


Figure 13 : Déplacement horizontal du mur en fonction de la rigidité (interface glissante).

Les figures 10 et 11 montrent que les conditions à l'interface entre le parement et le sol jouent un rôle important sur les contraintes et sur les déformations dans ces structures. L'utilisation d'éléments interfaces, qui permettent de simuler un glissement partiel ou total, est alors indispensable.

L'augmentation de la longueur des nappes d'armatures a essentiellement pour effet de réduire les contraintes et les déplacements horizontaux du mur (figures 12 et 13). Les armatures travaillent donc comme des réducteurs de poussée.

## 6. Essais d'un mur de soutènement modèle réduit

Une expérimentation sur un mur de soutènement en Pneusol a été effectuée au Laboratoire Géotechnique de l'INSA de Lyon, en collaboration avec L.C.P.C. [5]. La figure 14 montre les dispositifs d'essais, le but étant de connaître le comportement d'un mur renforcé au voisinage la rupture. Les modèles réduits de pneus utilisés sont des rondelles en mousse en polyuréthane qui peuvent être liées ou non liées.

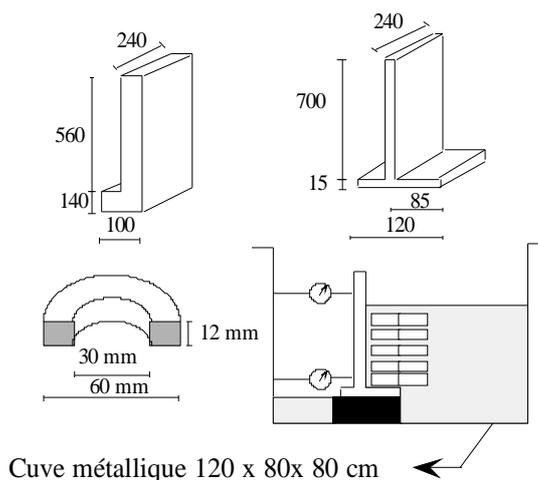


Figure 14 : Schéma du modèle réduit [5].

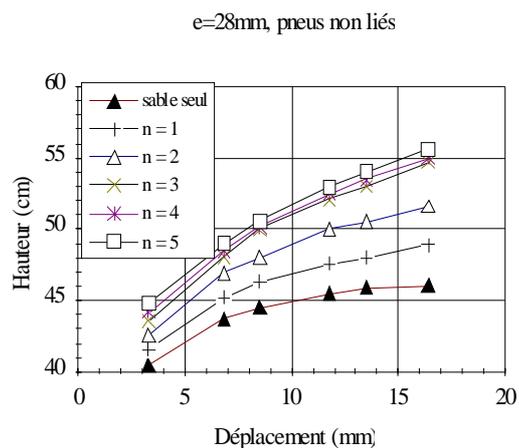


Figure 15 : Courbe de rupture pour des pneus non-liés [3].

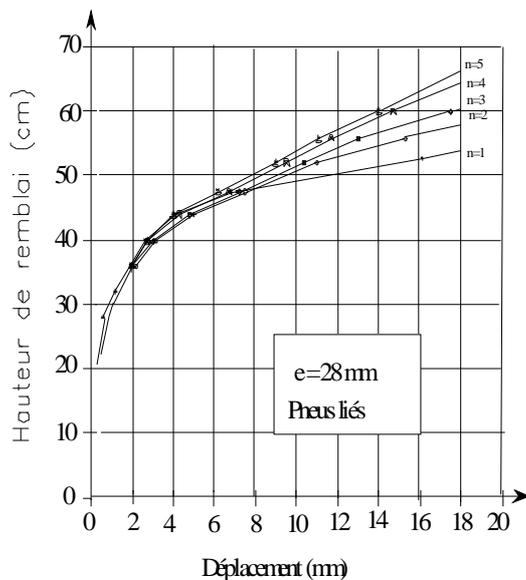


Figure 16 : Courbe de rupture pour des pneus liés [3].

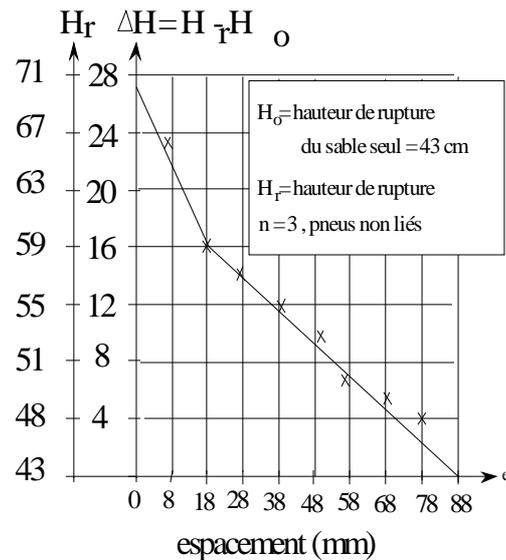


Figure 17 : Gain de hauteur en fonction de l'espacement [5].

Dans le cas de pneus non liés, la figure 15 montre que l'efficacité optimale du renforcement est obtenue avec des nappes de 4 pneus.

Dans le cas de pneus liés (figure 16), l'approche de la rupture se fait plus doucement et le niveau de rupture est plus important (augmentation d'environ 10%). Le gain de hauteur de rupture (correspondant à un déplacement de 15 mm) décroît lorsque l'espacement entre les nappes de Pneusol augmentent, le renforcement n'étant sensible que pour des espacements inférieurs à environ trois fois l'épaisseur des renforts.

Les simulations de cet essai que l'on a faites (voir [1]), ont permis de retrouver qualitativement le gain de résistance en fonction du nombre de pneus utilisés par nappe. Des difficultés subsistent encore car les murs modélisés apparaissent trop rigides par rapport aux essais.

## 7. Conclusion et perspectives

Ce travail, qui a été développé en France dans le cadre du GRECO Géomatériaux [4], avait pour objet la prédiction par la simulation numérique du comportement d'ouvrages en sol renforcé par des pneumatiques. Pour pouvoir faire de telles simulations, on a montré comment il fallait homogénéiser les parties constituées de sol et de renforts. Les simulations d'ouvrages sont satisfaisantes du point de vue qualitatif, et on constate que :

- L'utilisation des armatures dans un mur de soutènement permet d'augmenter la rigidité du remblai, ce qui revient à pouvoir faire des économies sur les dimensions du mur.
- La longueur d'armature est déterminante jusqu'à une valeur qui correspond à la limite de la ligne de rupture. Au-delà de cette limite, l'augmentation de la longueur d'armature n'améliore pratiquement plus la résistance de l'ouvrage.

La prédiction quantitative du comportement des ouvrages demande de continuer à améliorer la modélisation, mais aussi à réaliser des essais en vraie grandeur pour effectuer un calage précis des modèles. La simulation pourra alors prendre tout son sens en permettant de dimensionner à moindre coût des ouvrages en Pneusol.

## 8. Références bibliographiques

1. Abdurahman M., *Modélisation et simulation des ouvrages en Pneusol*, thèse de doctorat, Université de Nantes, 11 juillet 1995.
2. Bouzidi R., *Modélisation élastoplastique des matériaux granulaires. Application au renforcement par fils des sols et aux ouvrages*, thèse de doctorat, Université de Nantes, 30 novembre 1993.
3. Benamur F. & Collas P., *Le Pneusol réducteur de poussée*, T.F.E., I.N.S.A. de Lyon (1991).
4. Boutin C., Jouve P., Lareal P. & Long N.T., *Essais d'homogénéisation du Pneusol*, Rapport scientifique, GRECO Géomatériaux (1992).
5. Lareal P. & Long N.T., *Pressure reducing Pneusol : Researchs and Applications*, 9th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok (1991).
6. Long N.T., *Le Pneusol : Recherches - Réalisation - Perspectives*, thèse de doctorat, INSA de Lyon (1993).
7. Suquet P., *Une méthode duale en homogénéisation : application aux milieux élastiques*, Journal de Mécanique Théorique et Appliquée, n° spécial (1982), pp. 79-98.