

**COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU PNEUSOL
ETUDE SUR MODELE REDUIT TRIDIMENSIONNEL
ESSAIS SUR TABLE VIBRANTE.**

N.B.ROMDHANE* , R.NASRI* , M.T.CHAIEB* , N.T.LONG.**

RESUME:

Le "pneusol" est une association de pneus ou d'éléments de pneus usagés et de sol ou de déchets de sol. L'article traite d'une étude expérimentale sur modèle réduit excité au moyen d'une table vibrante. Son objectif est l'examen de la capacité d'atténuation des accélérations sismiques d'un massif de pneusol. Pour cela, plusieurs arrangements de nappes de pneus dans le massif sont expérimentés ainsi que différentes qualités de sols renforcés.

ABSTRACT:

"Pneusol" is a special reinforced soil made of old tyres or parts of old tyres (an industrial waste) and natural or artificial ground or wastes. Our paper will deal with the tests made on a small scale model subjected to dynamic loadings. The aim is to study the attenuation of the accelerations resulting from different arrangements of layers in the small scale model and from different kinds of soils.

1. INTRODUCTION:

Le pneusol est un matériau composite stratifié formé de l'association de pneus ou d'éléments de pneus usagés et de sols (Fig.1).

Le pneusol se distingue par son faible coût et ses bonnes qualités mécaniques; on cite en particulier une capacité à supporter les tassements, à répartir les efforts dans le sol et à rigidifier les sols médiocres. Il est donc utilisé pour les ouvrages de soutènement et les fondations des routes et chemins de fer.

Des recherches ont été entreprises et ont permis au matériau ainsi formé de se développer dans divers domaines d'utilisation du génie civil et de concurrencer les matériaux classiques (1).

On se propose ici d'évaluer le comportement antivibratoire du pneusol par une expérimentation à échelle réduite sur table vibrante. Pour cela, on agira sur les paramètres géotechniques et géométriques du stratifié ainsi que sur le contenu fréquentiel du signal et sa direction. On recherchera enfin les dispositions optimales des empilements des couches en vue de leur transposition aux applications réelles.

2. ANALYSE DIMENSIONNELLE DU MODELE REDUIT:

La limitation en charge de la table vibrante disponible dans nos laboratoires (charge maximale: 50 kg) nous a amené à dimensionner une cuve d'essai de dimensions 30cm*30cm*30cm.

L'analyse dimensionnelle qui suit fixera les plages de variation des paramètres étudiés.

On consigne dans le tableau Tab.1 les paramètres intervenant dans notre problème ainsi que leurs dimensions.

De ces treize paramètres, on tire dix grandeurs adimensionnelles car le rang de la matrice est de 3. Ces grandeurs sont choisies indépendantes comme suit:

$$P_1 = W / e \quad ; \quad P_2 = \frac{h}{e} \quad ; \quad P_3 = \Phi \quad ; \quad P_4 = n \quad ; \quad P_5 = \frac{\rho_s}{\rho_p}$$
$$P_6 = \frac{E_s}{E_r} \quad ; \quad P_7 = \frac{f^2 \cdot e^2 \cdot \rho_s}{E_p} \quad ; \quad P_8 = \frac{R_t}{E_p} \quad ; \quad P_9 = \frac{\lambda}{e} \quad ; \quad P_{10} = F.$$

L'idée de la similitude consiste à définir un facteur d'échelle $K=x/x'$ où x' est la grandeur relative au modèle réduit et x celle relative au prototype.

* Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunis, Tunisie.

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

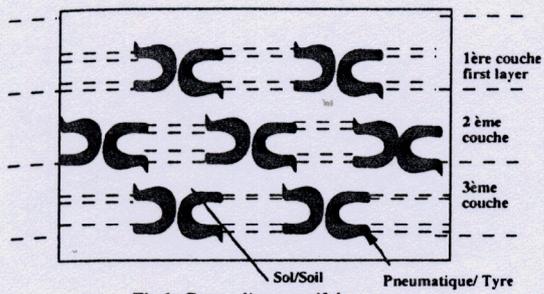


Fig.1- Coupe d'un massif de pneusol/
Cross-section of a pneusol

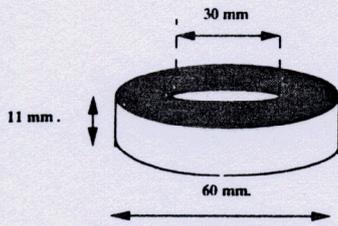


Fig.2 -Pneu réduit/
Small scale tyre

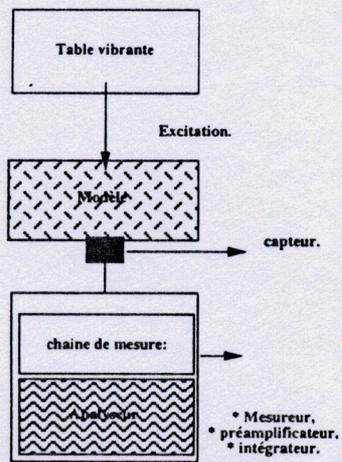


Fig. 3- Schéma de montage/
Experimental model

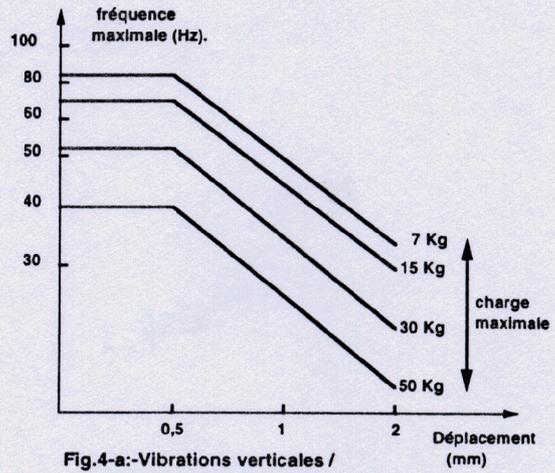


Fig.4-a- Vibrations verticales /
Vertical vibrations

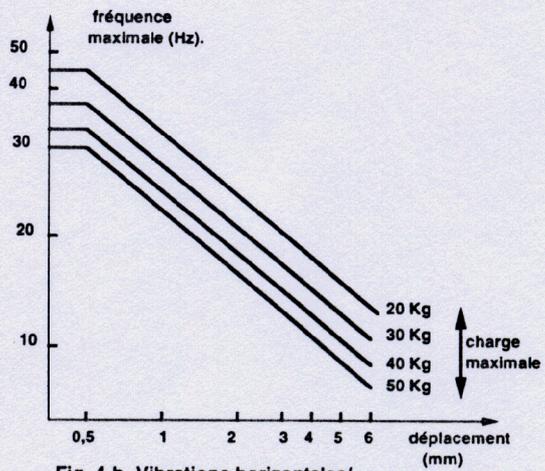


Fig. 4-b- Vibrations horizontales/
Horizontal vibrations

Tab.1

Paramètre	Signification.	M	L	T
ρ_s	masse volumique du sol,	1	-3	0
Φ_s	angle de frottement du sol,	0	0	0
E_s	module d'Young du sol,	1	-1	-2
ρ_p	masse volumique du pneu,	1	-3	0
E_p	module d'Young du pneu,	1	-1	-2
R_{tp}	résistance à la traction du pneu,	1	-1	-2
Φ	coefficient de frottement sol-pneu,	0	0	0
n	nombre de couches de pneus,	0	0	0
e	espacement entre pneus,	0	1	0
h	distance de la première nappe de pneus à la surface libre,	0	1	0
w	tassement,	0	1	0
f	fréquence de vibration,	0	0	-1
λ	longueur d'onde de la vibration.	0	1	0

En ce qui nous concerne, on prendra le rapport 1/20 par nécessité géométrique (il correspond au rapport de diamètre entre les pneus réels et les pneus réduits). On vérifiera d'autre part les égalités des rapports sans dimensions: $V_i = 1,10 P_i = P'_i$ pour le modèle et le prototype.

Le modèle réduit sera constitué de matériaux ayant des caractéristiques mécaniques identiques à celles du prototype. Le sol du modèle réduit sera donc nettement plus rigide que le sol réel.

Le comportement de l'ensemble sera considéré linéaire et amène à la relation de fréquence suivante:

$$\frac{f^2 \cdot e^2}{E_p} = \frac{f'^2 \cdot e'^2}{E'_p};$$

comme $E_p = E'_p$ (s'agissant d'un même sol) et $e = e'/20$, on aura $f = 20f'$.

La zone des fréquences réelles qui nous préoccupent étant voisine, dans le cas d'un séisme, de 2 hz, on aura à travailler sur des fréquences situées au voisinage de 40 hz.

3. MATERIAUX UTILISES ET BANC D'ESSAIS

3.1. Pneus et Sols

Les pneus de renforcement sont modélisés par des pneus pleins de forme cylindrique creux de faible épaisseur (Fig.2) et de module d'Young $E_p = 2,2$ bars (2). Il s'agit d'un modèle réduit équivalent à l'échelle 1/20 du pneu usagé courant. Deux types de sols ont été utilisés dans notre expérimentation:

* sol 1: sable de Khélidia: il s'agit d'un sable à granulométrie variée, de coefficient d'uniformité $C_u = 2,8$, qui présente l'avantage de disponibilité, de facilité de remplissage et de facilité de compactage par vibration. Ses principales caractéristiques sont:

$$\begin{aligned} \rho_s &= 1840 \text{ Kg/m}^3 \text{ (18,40 KN/m}^3\text{)}, \\ C_s &= 0 \text{ (cohésion nulle)}, \\ \Phi_s &= 32^\circ, \\ E_s &= 6 \text{ bars.} \end{aligned}$$

* sol 2: vase de Tunis qui a été l'objet d'une étude au laboratoire (3). Ses principales caractéristiques sont, concernant :

- les masses volumiques:

$$\rho_v \text{ humide : } 1660 \text{ Kg/m}^3 \text{ (16,6 kN/m}^3\text{)},$$

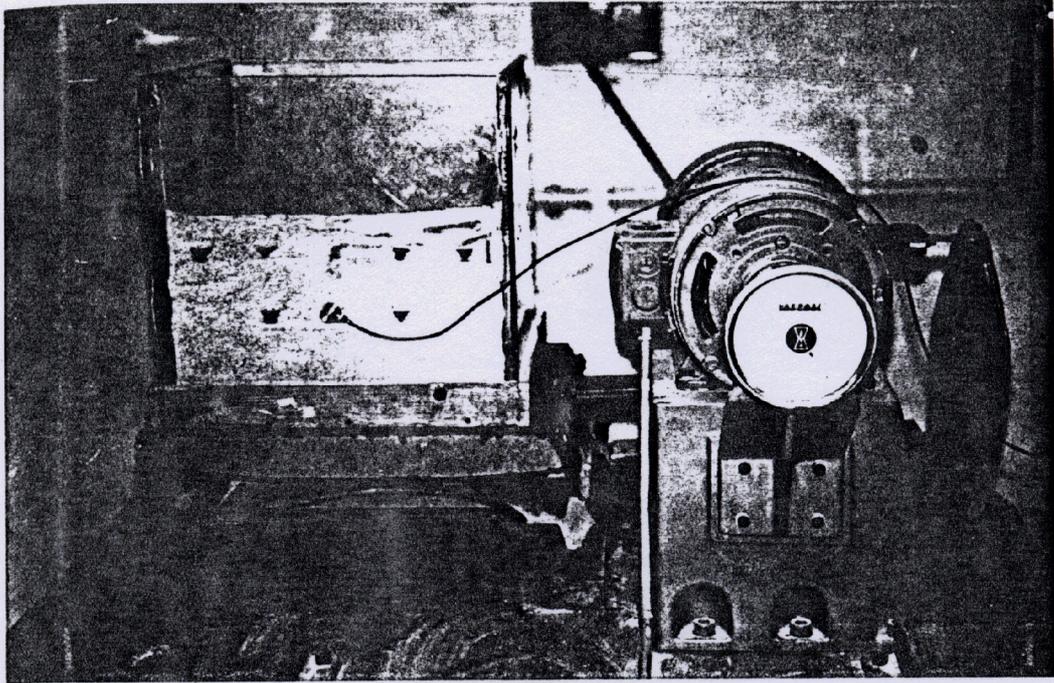


Fig.5-a- Dispositif d'essai; cas de vibrations horizontales
Placement of the measuring instruments; case of horizontal vibrations.

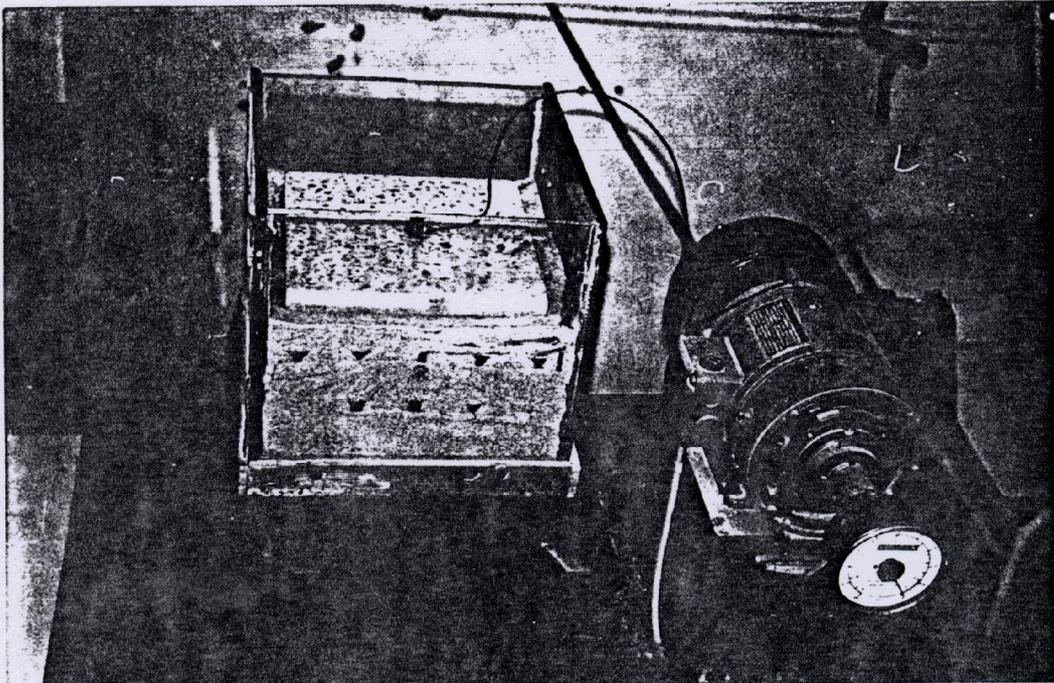


Fig.5-b- Dispositif d'essai; cas de vibrations verticales
Placement of the measuring instruments; case of vertical vibrations.

- $\rho_v \text{ sec}$: 2600 Kg/m³ (26 kN/m³);
- les limites d'Atterberg:
 - limite de liquidité : WL = 73%,
 - limite de plasticité: WP = 26%,
 - indice de plasticité: IP = 47%;
 - les caractéristiques mécaniques:
 - drainées: $C'_v = 0,08 \text{ bar}$,
 - $\Phi'_v = 25^\circ$,
 - non drainées:
 - $C_{vuu} = 0,08 \text{ bar}$ et $\Phi_{vuu} = 3^\circ$,
 - $C_{vcu} = 0,05 \text{ bar}$ et $\Phi_{vcu} = 15^\circ$.

Enfin une analyse granulométrique par sédimentométrie a révélé que :

- 100% des particules ont un diamètre inférieur à 80 μm ,
- 87% des particules ont un diamètre inférieur à 20 μm ,
- 55% des particules ont un diamètre inférieur à 2 μm .

3.2. Dispositif d'essai

Le dispositif d'essai est schématisé en Fig.3.

Nous présentons ci-dessous le mécanisme d'excitation et la chaîne de mesure.

L'excitation se fait par inertie par l'intermédiaire d'une table vibrante actionnée par un moteur à excentriques (d'excentricités réglables) au moyen de deux ressorts à lames parallèles. Deux modes différents de liaison entre l'excentrique et la table permettent de simuler des vibrations horizontales et verticales.

Le massif de pneusol réduit est disposé dans un bac en plexiglass fixé rigidement sur la table vibrante. Un carreau posé à la surface du massif assure une bonne adhérence du transducteur.

La table vibrante a les caractéristiques suivantes :

- * fréquence maximale: 100 Hz,
- * déplacement maximal: 20 mm.

Ces grandeurs sont prises à vide; la charge de la structure à exciter agit sur ces limites conformément aux figures 4-a et 4-b.

Le capteur piézoélectrique est un accéléromètre fonctionnant dans la zone de fréquence de 0,2 Hz à 5KHz avec une parfaite linéarité; sa petite masse (50 grammes) n'influe pratiquement pas sur le comportement du système.

Dans le cas de vibrations horizontales, le capteur est fixé par vis sur le bac en plexiglass au niveau de la surface libre du modèle (Fig.5-a). Dans le cas de vibrations verticales, le capteur est fixé au moyen d'une cire d'abeille sur le carreau (Fig.5-b). Dans le cas de mesures au niveau des couches intermédiaires, le capteur est enfermé dans un boîtier en plexiglass étanche, lui même enterré dans le composite . On vérifiera dans chaque cas la bonne adhérence entre le capteur et le sol.En ce qui concerne la mesure des accélérations à la base de la table, un aimant assure une parfaite adhérence entre la plaque métallique support du modèle et le capteur.

Un mesureur de vibrations permet de visualiser la valeur efficace de l'accélération. Celle-ci sera utilisée pour l'évaluation du coefficient d'atténuation de l'accélération $\eta = \frac{U_{\text{sortie}}}{U_{\text{entrée}}}$ (entrée: base de la table et sortie: surface libre ou intercouche). Il est évident que cette atténuation est le produit de l'atténuation causée par le modèle et celle causée par le bac en plexiglass; cette dernière sera donc mesurée au départ et déduite des calculs.

4. RESULTATS DES ESSAIS

4.1. Vibrations horizontales

Les vibrations étudiées sont transversales; en effet, le mouvement de la matière se fait horizontalement et la perturbation est ascendante. Ce type de propagation correspond au mouvement vibratoire le plus destructeur dans le cas d'un séisme ou bien d'une machine tournante;

4.1.1. Sable + pneus

Les caractéristiques du sable ont été détaillées en 3-1.

a/ Influence du nombre de couches de pneus n

On analyse le résultat $A = \ln\left(\frac{\text{accélération surface libre}}{\text{accélération à la base}}\right) = \ln(h) = f(n)$ pour différentes fréquences.

La figure Fig.6 montre la variation de A fonction du nombre de couches de pneus n. On constate que l'atténuation des vibrations transversales (SV) augmente avec le nombre de couches de pneus. Ce résultat est vérifié pour toutes les fréquences investiguées avec toutefois plus de netteté en basses fréquences (5Hz).

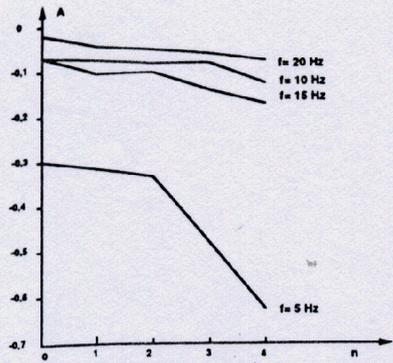


Fig.6- Vibrations horizontales; Sable et pneus; Effet de n; h = 1 et e = 1/
Horizontal vibrations; Sand and tyres; Effect of n; h = 1 and e = 1

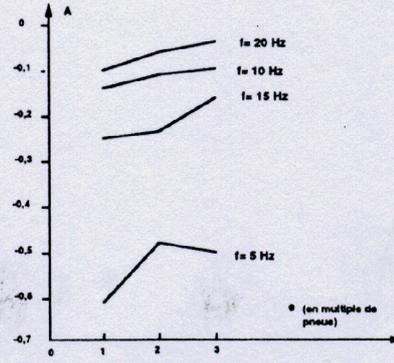


Fig.8-a- Vibrations horizontales; Sable et pneus; Effet de e; h = 0 et n = 4/
Horizontal vibrations; Sand and tyres; Effect of e; h = 0 and n = 4

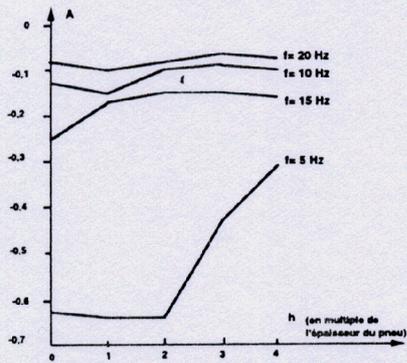


Fig.7a- Vibrations horizontales; Sable et pneus; Effet de h; e = 1 et n = 4 /
Horizontal vibrations; Sand and tyres; Effect of h; e = 1 and n = 4

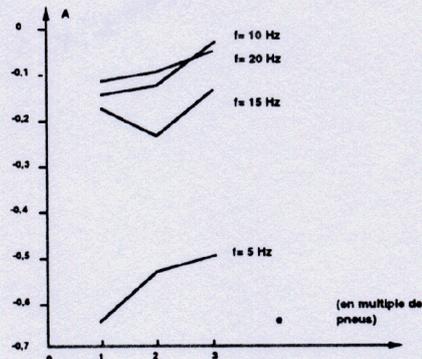


Fig.8-b- Vibrations horizontales; Sable et pneus; Effet de e; h = 1 et n = 4/
Horizontal vibrations; Sand and tyres; Effect of e; h = 1 and n = 4.

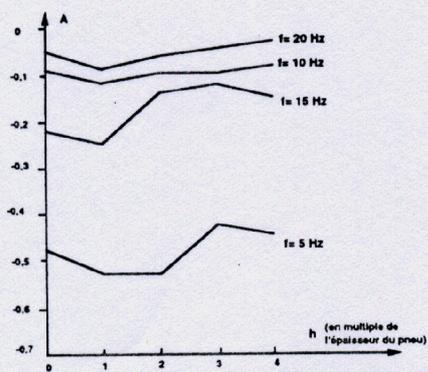


Fig.7b- Vibrations horizontales; Sable et pneus; Effet de h; e = 2 et n = 4 /
Horizontal vibrations; Sand and tyres; Effect of h; e = 2 and n = 4

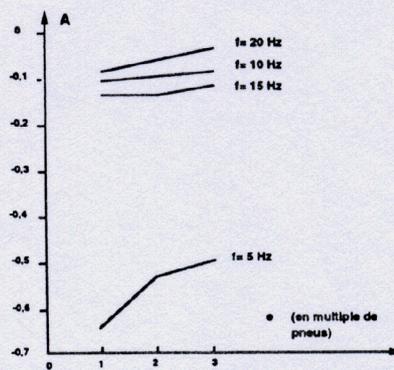


Fig.8-c- Vibrations horizontales; Sable et pneus; Effet de e; h = 2 et n = 4/
Horizontal vibrations; Sand and tyres; Effect of e; h = 2 and n = 4

b/ Influence de la profondeur h de la première couche de pneus.

On se fixe pour cela le nombre de couches à 4 (la meilleure disposition d'après les résultats du paragraphe précédent). La distance entre les couches est prise égale à une fois et deux fois l'épaisseur de la couche de pneus ($e = 1$ et $e = 2$) (Fig. 7-a et 7-b).

Hormis la fréquence $f = 15$ Hz, on est tenté de conclure que la meilleure disposition correspond à une profondeur de première couche de renforcement égale à l'épaisseur du pneu , soit $h = 1$.

c/ Influence de l'espacement e entre couches de pneus.

Notre étude visant la stabilisation d'un sol composite, on n'examinera pas le cas où $e = 0$. On se fixe $n = 4$ et on étudie $A = f(e)$ pour différentes valeurs de h (épaisseur de la couche supérieure de sol) pour les mêmes fréquences. Les résultats sont présentés dans les figures 8-a, 8-b et 8-c . Mis à part le cas où $h = 0$ (première couche de pneus disposée à la surface du massif), A augmente avec e. La meilleure disposition est celle où $e = 1$.

d/ Conclusion.

Concernant les vibrations horizontales, et pour un sable renforcé de pneus, le stratifié périodique le plus atténuant doit être composé d'une alternance de couches de sol et de pneus de mêmes épaisseurs et ce à partir de la surface, dans la plage de variation qu'on s'est fixée.

4.1.2. Vase et pneus.

Nous avons procédé avec la vase comme avec le sable.

a/ Influence du nombre de couches de pneus n

Compte tenu de la difficulté de mise en place de la vase de Tunis, la hauteur globale du modèle a été réduite et par conséquent, nous avons limité le nombre de couches de pneus à $n = 3$. Les résultats sont illustrés dans la figure Fig. 9.

Là encore, l'atténuation la meilleure est atteinte pour un nombre maximum possible de couches de pneus.

b/ Influence de la profondeur h de la première couche de pneus.

On se fixe le nombre de couches de pneus à $n = 3$ et on choisit différents espacements entre couches e pneus. On prendra $e = 1, 2$ et 3 fois l'épaisseur de la couche de pneus. Les résultats sont consignés dans les figures Fig. 10-a, 10-b et 10-c.

A la lecture de ces courbes, et toujours en écartant les résultats relatifs à la fréquence 15 Hz, on retrouve une meilleure atténuation pour un stratifié périodique dont le motif est bistraté de même épaisseur: pour $e = 1$ on a $h = 1$, pour $e = 2$ on a $h = 2$ et pour $e = 3$ on a $h = 3$.

c/ Influence de l'espacement e entre couches de pneus.

Pour cette étude, examinons les dispositions $n = 3$ avec $h = 1, 2$ et 3 . Les résultats sont consignés en figures 11-a, 11-b et 11-c.

Dans ce cas encore, la disposition la meilleure est celle du stratifié périodique d'alternance de pneus et de sol de même épaisseur.

Ainsi, les conclusions obtenues pour le premier sol (sable) sont confirmées pour le second (vase).

4.2. Vibrations verticales

Seul le sol sableux est utilisé pour cette étude. L'étude du sol vaseux est en cours. Les essais préliminaires ont montré une telle amplification des accélérations , qu'il a été impossible de conserver le carreau de ciment qu'on a remplacé par une plaque métallique. Par ailleurs, une réduction de la hauteur de sol a permis d'atteindre des fréquences allant jusqu'à 40 Hz. Les conditions opératoires ayant été modifiées, les conclusions tirées de ces derniers essais ne peuvent être associées aux premières.

Contrairement aux vibrations horizontales, on constate une amplification des vibrations verticales après passage à travers un massif de sable seul (Fig. 12-a, 12-b pour $n = 0$).

a/ Influence du nombre de couches de pneus n

L'introduction de couches de pneus permet d'atténuer cette amplification (Fig. 12-a, 12-b) et même de l'éliminer complètement pour certaines dispositions: $h = 1, e = 1$ et $n = 3$ pour $f = 10$ Hz et $h = 2, e = 1$ et $n = 2$ pour $f = 10$ Hz et $f = 20$ Hz. Cependant, seules des investigations supplémentaires permettront d'avancer une conclusion conséquente.

b/ Influence de la profondeur h de la première couche de pneus.

Compte tenu des résultats précédents, nous nous sommes intéressés au cas où $e = 1$. Dans ces conditions, la hauteur h la plus grande possible est la meilleure pour atténuer les amplifications (Fig. 13-a et b); il apparaît que les hautes fréquences sont influencées par la résonance du système (35 Hz).

c/ Influence de l'espacement e entre couches de pneus.

L'examen des résultats expérimentaux ne permet pas de dégager une conclusion définitive.

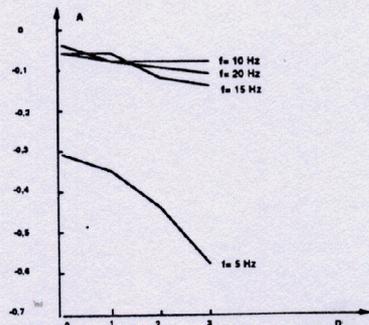


Fig.9- Vibrations horizontales; Vase et pneus; Effet de n; h=1 et e=1 / Horizontal vibrations; mud and tyres; Effect of n; h=1 and e=1.

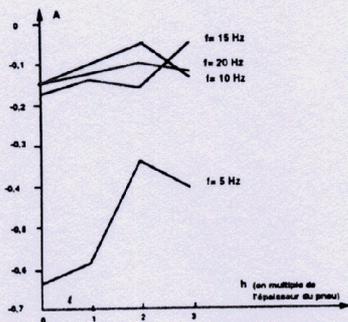


Fig.10-a: Vibrations horizontales; Vase et pneus; Effet de h; e=1 et n=3 / Horizontal vibrations; mud and tyres; Effect of h; e=1 and n=3.

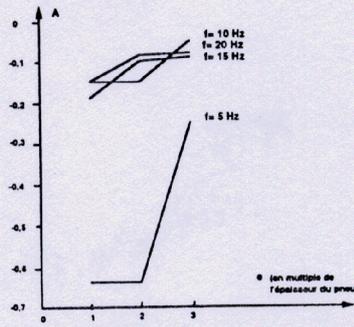


Fig.11-a: Vibrations horizontales; Vase et pneus; Effet de e; h=0 et n=3 / Horizontal vibrations; mud and tyres; Effect of e; h=0 and n=3.

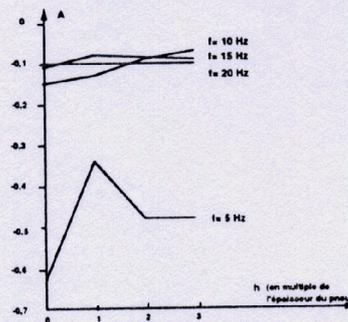


Fig.10-b: Vibrations horizontales; Vase et pneus; Effet de h; e=2 et n=3 / Horizontal vibrations; mud and tyres; Effect of h; e=2 and n=3.

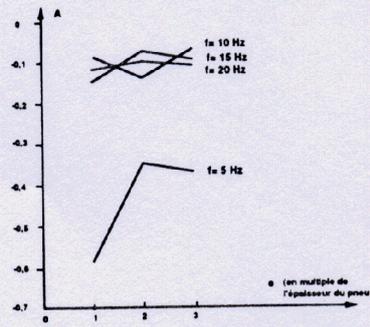


Fig.11-b: Vibrations horizontales; Vase et pneus; Effet de e; h=1 et n=3 / Horizontal vibrations; mud and tyres; Effect of e; h=1 and n=3.

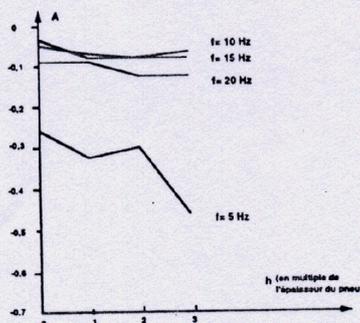


Fig.10-c: Vibrations horizontales; Vase et pneus; Effet de h; e=3 et n=3 / Horizontal vibrations; mud and tyres; Effect of h; e=3 and n=3.

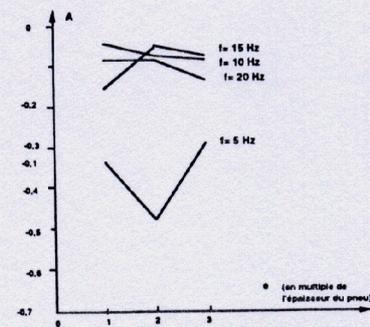


Fig.11-c: Vibrations horizontales; Vase et pneus; Effet de e; h=2 et n=3 / Horizontal vibrations; mud and tyres; Effect of e; h=2 and n=3.

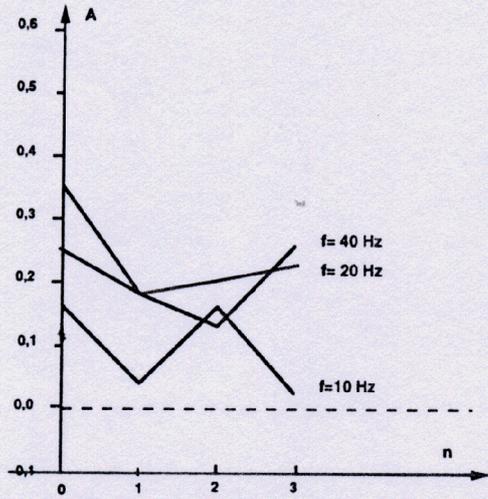


Fig.12-a- Vibrations verticales ; Sable et Pneus;
Effet de n ; h=0 et e=1 /
Vertical vibrations; Sand and tyres;
Effect of n; h=0 and e=1.

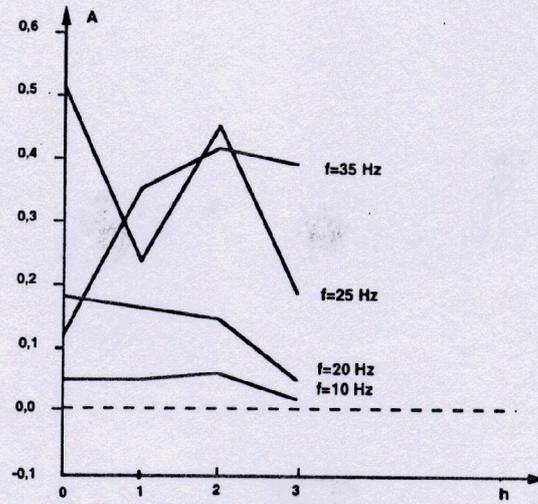


Fig.13-a- Vibrations verticales ; Sable et Pneus;
Effet de h ; n=1 et e=1 /
Vertical vibrations; Sand and tyres;
Effect of h; n=1 and e=1.

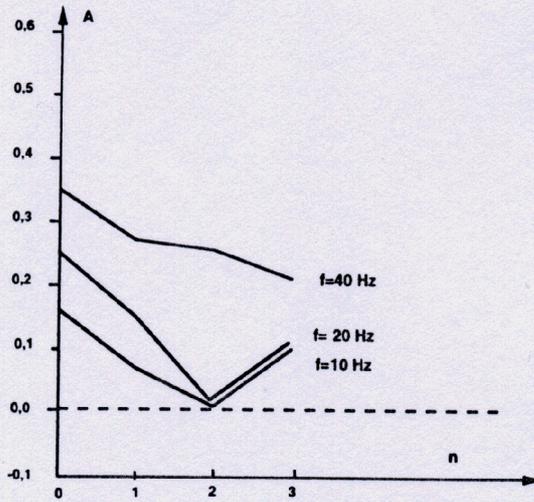


Fig.12-b- Vibrations verticales ; Sable et Pneus;
Effet de n ; h=2 et e=1 /
Vertical vibrations; Sand and tyres;
Effect of n; h=2 and e=1.

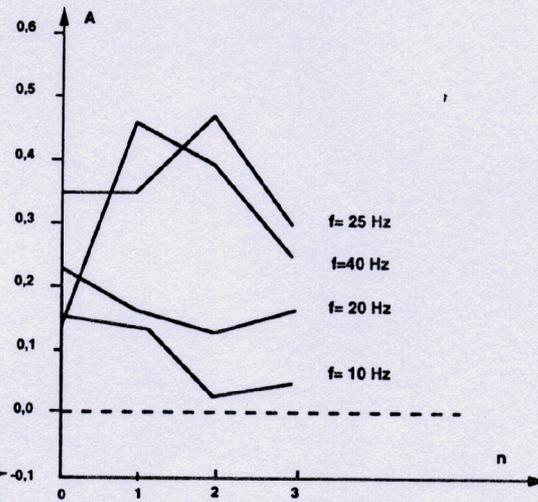


Fig.13-b- Vibrations verticales ; Sable et Pneus;
Effet de h ; n=2 et e=1 /
Vertical vibrations; Sand and tyres;
Effect of h; n=2 and e=1.

5. CONCLUSION GENERALE

Notre étude expérimentale a été réalisée sur un modèle réduit excité par une table vibrante. Elle a montré que le pneusol a des propriétés d'atténuation des phénomènes vibratoires intéressantes: son utilisation dans le domaine des sollicitations dynamiques (séisme, installations industrielles, circulation...) est envisageable. L'examen des vibrations horizontales a montré que l'atténuation de l'accélération est notable et la meilleure disposition correspond à un stratifié périodique de couches de sol d'épaisseur identique à celle des couches de pneus. Concernant les vibrations verticales, un sol meuble amplifie notablement les amplitudes des accélérations. L'adjonction de couches de pneus permet de réduire de manière significative cette amplification. Cette disposition est encore plus avantageuse si elle est surmontée d'une couche de sol d'épaisseur maximale, de manière à assurer une meilleure adhérence entre les différents composants. Une étude expérimentale et théorique (par éléments finis) plus approfondie, menée actuellement dans nos laboratoires, nous permettra de présenter prochainement des résultats plus complets.

6. REFERENCES

- (1) N.T.LONG N.T.,(1985).Le pneusol , Rapport des laboratoires des Ponts et Chaussées. Série géotechnique.
- (2) GELAS J. et MAURIER S.,(1992).Le pneusol, répartiteur de pression, PFE, INSA LYON .
- (3) BOUSSETTA S. et MAKHLOUF S.,(1994).Etude expérimentale du renforcement de la vase de Tunis, PFE, ENIT.
- (4) BRÛEL et KJAER ,(1983).Instruction manual, field balancing set type 3517.Danemark.
- (5) KHALFALLAH M. et KOSSENTINI M.,(1994).Comportement dynamique du pneusol; Etude sur modèle réduit II, PFE, ENIT.
- (6) DAVIDOVICI V.,(1985).Génie parasismique,Annales des ponts et chaussées ,Paris.
- (7) LALANNE M., BERTHIER P. et DER HAGOPIAN J.(1986).Mécanique des vibrations linéaires, 2ème édition. Edition Masson, Paris, New York, Barcelone, Milan .
- (8) LANGHAAR H.L.,(1956).Traduit par C.HARCOSSET.Analyse dimensionnelle et théorie des maquettes. Dunod. Paris 1956.