Mitigation sismique par le Pneusol
Propositions de mesures à la Déchetterie d'Edouard Bénito-Espinal

Nguyen Thanh Long

Présentation du problème

Françoise Pagney Bénito-Espinal, Maître conférence à l'Université des Antilles et de la Guyane a bien présenté la situation sismique des îles de la région et notamment les Caraïbes français, la Martinique, la Guadeloupe et ses dépendances proches que sont les Saintes, Marie-Galante, la Désirade et Petites-Terres. Issues de la plaque caraïbe qui s'étend depuis le passage de l'Anégada séparant les Petites Antilles des îles Vierges jusqu'à une ligne joignant Tobago aux Antilles néerlandaises sur de l'ordre de 900 km, cette zone de subduction soumise aux hautes températures et aux pressions induites par l'enfoncement de la plaque est le siège d'une intense activité volcanique, manifestant dans sa partie émergée de l'arc antillais par des activités sismiques importantes.

Sans rentrer dans les problèmes complexes des séismes de la région , séismes superficiels, intermédiaires et profonds ni de la corrélation entre séisme et volcanisme il nous importe surtout de mesurer une mitigation potentielle du Pneusol notamment lorsqu'il supporte une structure, une maison classique et d'effectuer une comparaison avec une structure à peu près équivalente au moyen « des bruits de fond »

Définition du Pneusol utilisé [NGUYEN THANH 1984, 1985]

Le Pneusol est formé de l'association de deux éléments : le pneu et le sol. Le mot « pneu » sert à définir tous les éléments du pneu usagé (deux flancs, une bande de roulement) ou le pneu en entier lui-même, associés linéairement ou en nappes et susceptibles de supporter des efforts de traction importants. Le sol englobe toutes les variétés de terrains naturels, artificiels ou des déchets divers. La technologie est un élément essentiel du Pneusol car son principe relativement simple, ne pouvait se développer et s'imposer dans le domaine du génie civil sans une étude technique très détaillée des éléments technologiques permettant d'aboutir à une standardisation du matériau.

D'une manière générale, on a plusieurs sortes de Pneusol, celui qui nous intéresse est le Pneusol dit léger:

- un Pneusol avec des pneus poids lourds entiers (associés ou non à un non-tissé) est un ***matériau léger*** de poids volumique compris entre 6 kN à 10 kN/m3. Le remblai de remplissage, n'entrant pas à l'intérieur de la chambre à air, est surtout destiné au régalage de l'ensemble des pneus qui sont de dimension, de taille, et d'état différents. Le Pneusol divise approximativement le poids volumique du remblai par deux. Aussi, enfin de rendre le matériau encore plus léger, dans certains cas, on pourrait

utiliser par exemple du pouzzolane, des cendres volantes, du mâchefer,..sous réserve de leur compatibilité avec les pneus et de leur bon comportement dans l'eau pour éviter des problèmes de pollution. De ce point de vue, ***il faut respecter scrupuleusement les diverses recommandations du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.*** C'est ce Pneusol qui a été utilisé sur la Déchetterie « Edouard Bénito-Espinal » sur lequel la maison du gardien a été construite. A côté de cette déchetterie, à l'entrée de la décharge de la Gabarre, le SICTOM construit une maison de réunion spacieuse de même type de structure. C'est donc la comparaison des deux séries de mesures que nous nous proposons de faire.

Pour mémoire :

- un Pneusol avec des éléments de pneus (enlèvement d'un flanc) ou avec des bandes de roulement sur chant est un assemblage de petits ou grands gabions selon la taille des pneus, c'est à dire selon les possibilités d'approvisionnement locales,
- un Pneusol avec des flancs disposés en nappe ressemble alors à un ouvrage en sols renforcés

Notons quelques éléments de dimensions:

poids lourds : diamètre extérieur : 1.10 à 1.20m
diamètre intérieur : 0.55 à 0.60m
épaisseur : 0.26 0.33m
poids : 40 à 70 kg
densité apparente du pneu : 12.4 kg/m3

tourisme : diamètre extérieur : 0.6Om
diamètre intérieur : 0.30m
poids : 5 à 6 kg

Méthode « des bruits de fond »

La caractérisation des structures par le bruit de fond a été proposée dès les années 1970 par Stubbs I.R, Mac Lamore V.R au Cinquième Congrès sur les tremblements de terre à Rome en 1973. L'essai repose sur le constat qu'en permanence, les structures sont sollicitées par un bruit de fond mécanique dont l'origine est à rechercher dans le trafic urbain, les activités humaines environnantes. Elles parviennent aux structures notamment par le sol et les fondations. Ces sources sont d'amplitude inconnue assez faible et en succesion aléatoire, mais néanmoins les réponses des structures sont dans la plupart des cas mesurables. Ne nécessitant pas, par principe de dispositif de mise en vibration, la mise en œuvre consiste simplement à mettre en place le système de mesure. On relève des accélérations de l'ordre de 0,1 mm/s2 et dépendant bien entendu du type de structure.

L’identification des fréquences propres s’effectue à partir des spectres directement obtenus par transformée de Fourier rapide des signaux accélérométriques. Les spectres des signaux font nettement ressortir des pics qui correspondent aux premières fréquences nodales. Notons que ces pis sont d’autant plus marqués qu’on s’élève dans la structure.

En bruit de fond, il suffit de relever, aux fréquences propres identifiées par les pics fréquentiels, les amplitudes et les déphasages donnés par les fonctions de transfert. Les oscillations forcées donnent également accès à l’allure des déformées des modes fondamentaux, par le calcul des rapports des amplitudes maximales aux fréquences propres.
Nous avons opté pour la mesure du bruit de fond au lieu d’effectuer des mesures avec excitateur harmonique ou sous chocs à cause de la simplicité et des matériels assez faciles à transporter.
Nous utilisons une chaîen de mesure constituée par :

Des accéléromètres unidirectionnels d’une sensibilité de 0,05 mm/s2

Une centrale d’acquisition dynamique munie de voies analogiques synchrones,

Un ordinateur équipé d’un logiciel de sauvegarde et de traitements des signaux

(Eventuellement un groupe électrogène assurant l’autonomie de l’ensemble)

On solidarise les accéléromètres à la structure pour enregistrer ses mouvements et en utilisants les différentes configurations c’est-à-dire en plaçant les capteurs dans des positions et orientations adaptées, on repère les différentes modes de vibrations.

Mais d’ors et déjà, il me paraît nécessaire de passer en revue un certain nombre de cas où le Pneusol léger constitue un bon remblai « antisismique ». Le premier cas est celui de remblai derrière un mur de soutènement

1) Mur de soutènement

Lors du tremblement de terre de Hyogoken Nanbu (Kobé), le Coordinateur des Travaux souterrains du Ministère de Construction a dressé la liste des dommages causés aux différents types de murs de soutènement On trouve de plusieurs sortes

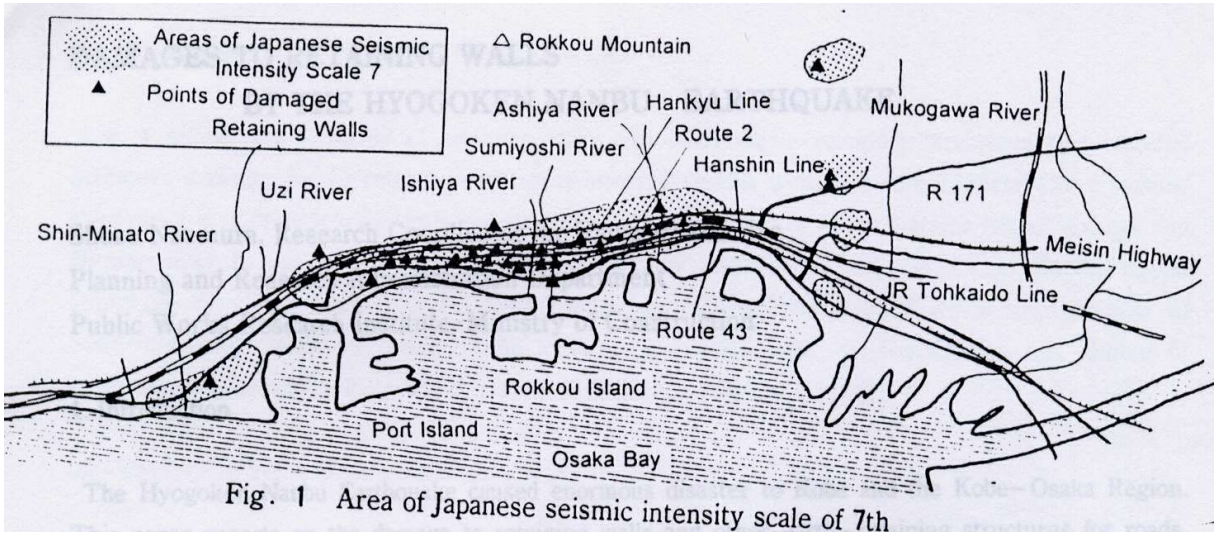


Fig. 1 Area of Japanese seismic intensity scale of 7th

Figure 1 : Zone où l'intensité du séisme est de 7 et la zone hachurée où se trouvent les murs de soutènements recensés.

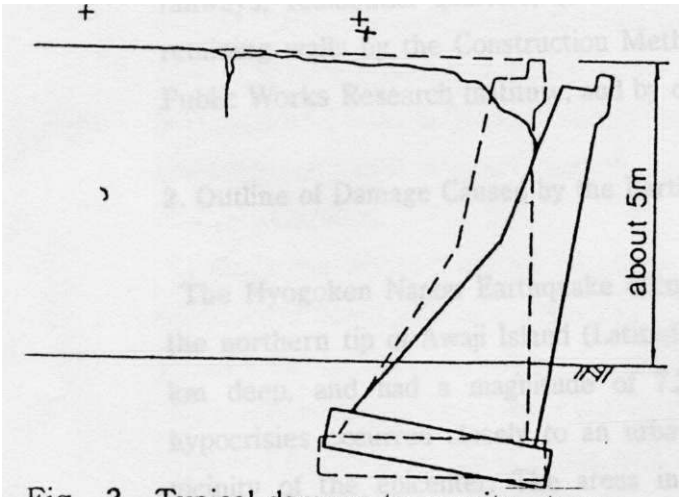
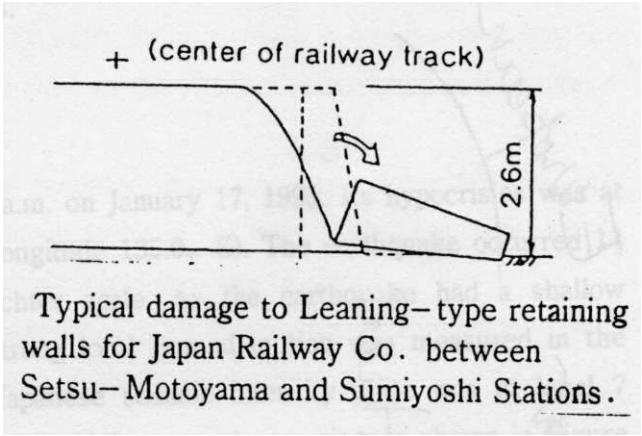


Fig. 2 Typical damage to gravity–type retaining walls for Hanshin Railway Co. adjacent to Ishiyagawa Station.

Rupture d'un mur poids par renversement



Typical damage to Leaning–type retaining walls for Japan Railway Co. between Setsu–Motoyama and Sumiyoshi Stations.

Rupture d'un mur poids par renversement

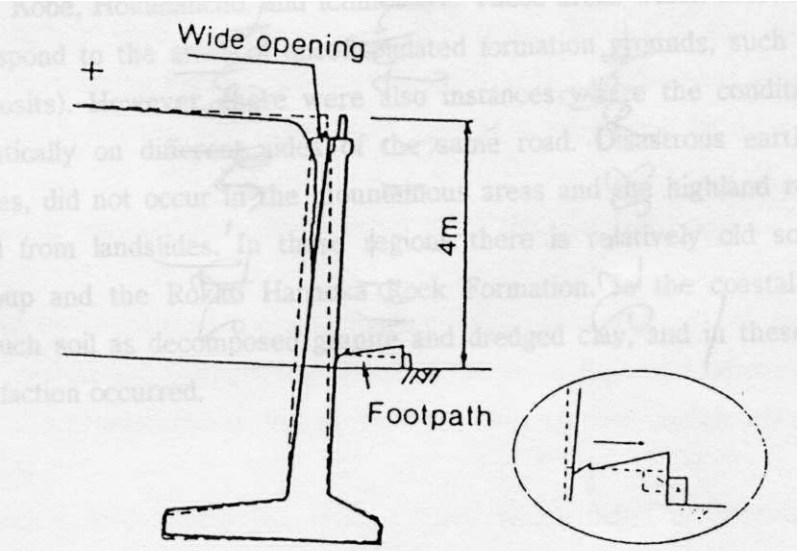


Fig. 4 Typical damage to cantilever–type retaining walls for Japan Railway Co. between Hyogo and Shin–Nagata Stations

Rupture d'un mur cantilever par renversement

En général, lorsque la rupture survient c'est toujours que la poussée exercée devient trop importante sous l'action du séisme, augmentation de la poussée dûe à une accélération forte. Les cas de la figure 2 et de lafigure 4 sont des cas favorables dans la mesure où la butée prévue devant les murs de soutènements est suffisamment importante pour empêcher le mur de se renverser, ce qui n'est pas le cas de la figure 3 (pas de butée). Corté et al ont présenté un exemple de calcul d'un mur poids sous séisme.(Davidovici page 780). On n'a pas besoin de grands calculs pour constater tout de suite que si le poids volumique du matérieu de remblai diminue, la poussée exercée derrière un mur de soutènement diminue ! En divisant le poids volumique du matériau par (grosso modo) de l'ordre de deux on diminue autant la poussée exercée. A cela il faut ajouter le fait que l'empilement des pneus dans le cas d'un Pneusol léger donne à ce matériau une cohésion importante. Les nombreux essais effectués à l'INSA de Lyon démontrent de plus une amélioration très importante d'une association mur + Pneusol et ce quelque soit le type de mur utilisé.

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 5 montre quelques profils de toutes ces structures

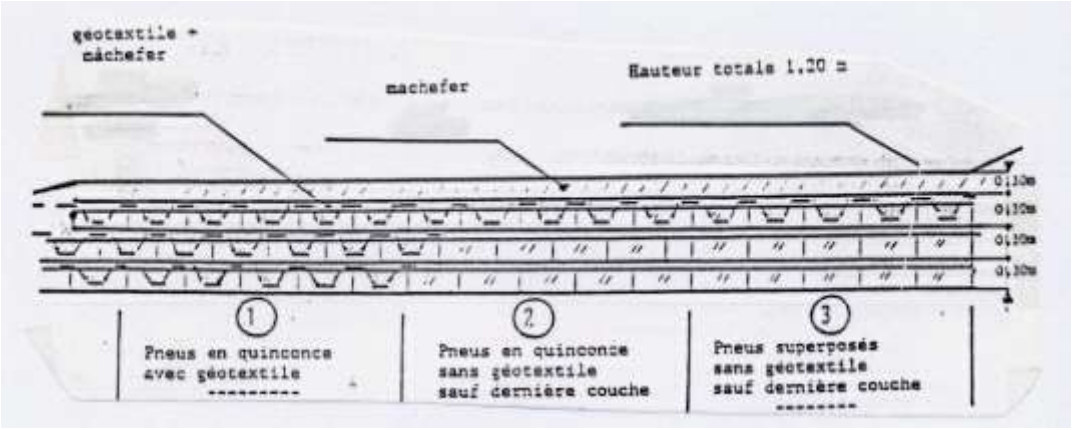


Figure 5: Coupes de quelques profils testées au LRPC de Strasbourg

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 particulaires, puis analysés en temps et fréquence. Dans le domaine temporel, ce sont les valeurs crêtes-crêtes de la vitesse particulaire qui

ont été relevées, afin de prendre en compte toute l'énergie du signal, qui n'est pas toujours symétrique (Fig.48).

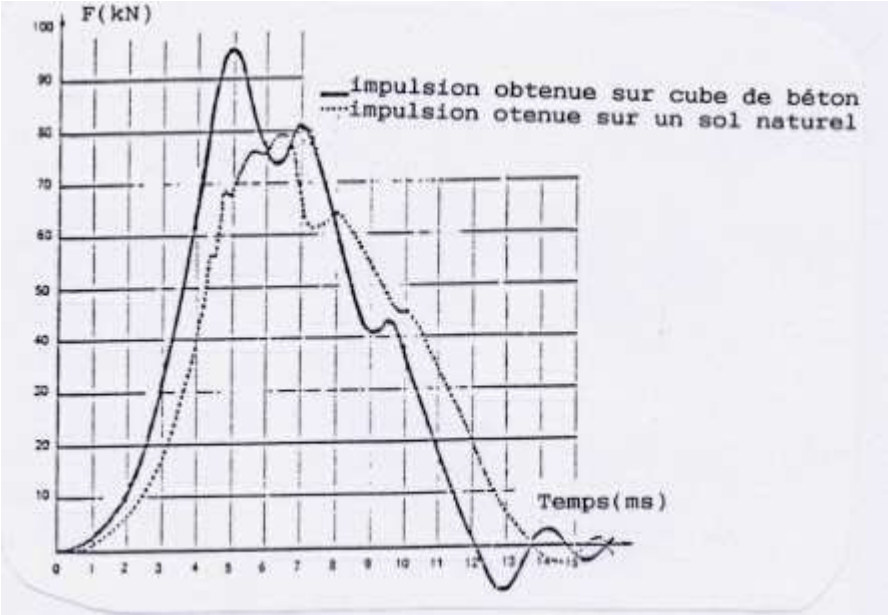


Figure 47 : Caractéristique de l'impulsion produite pour une hauteur de chute de 0.50 m

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.

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.

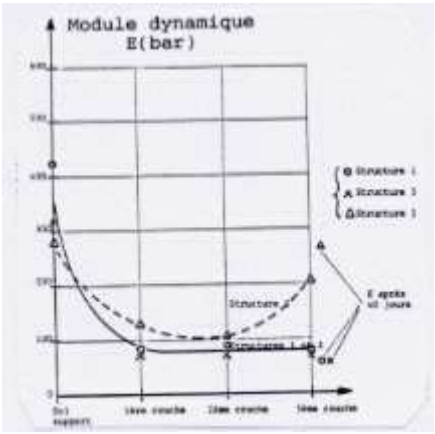


Figure 49 : Module dynamique (Dynaplaque) en fonction de la structure et du nombre de couches (1er chargement, essais du CER de Rouen)

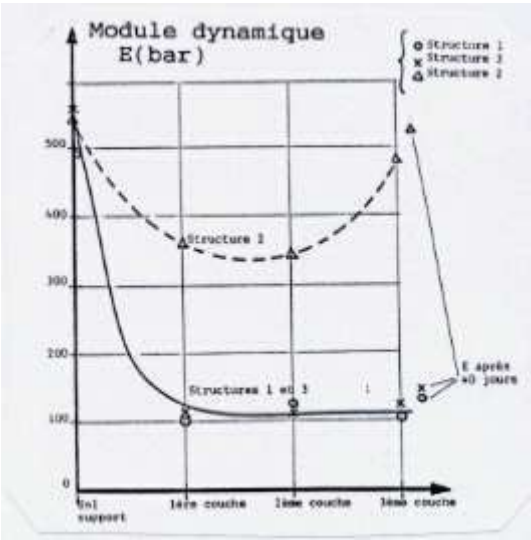


Figure 50 : Module dynamique (Dynaplaque) en fonction de la structure et du nombre de couches(2ème chargement, essais du CER de Rouen)

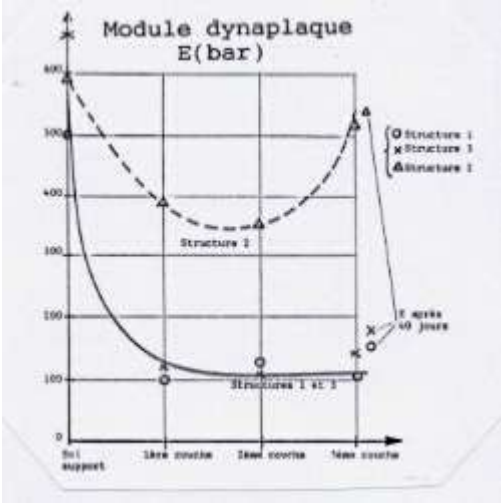


Figure 51 : Module dynamique (Dynaplaque) en fonction de la structure et du
nombre de couches(3ème chargement, essais du CER de Rouen)

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).

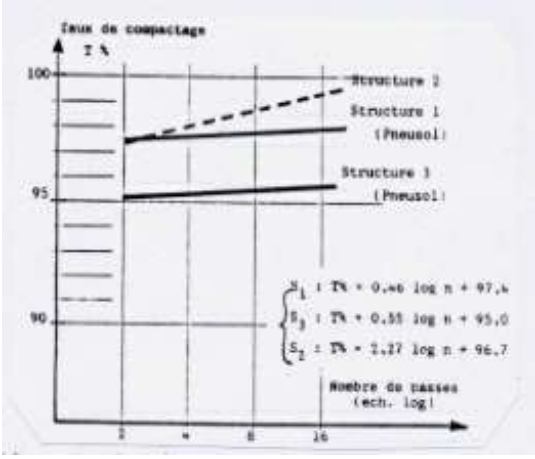


Figure 52 : Evolution du taux de compactage en fonction du nombre de passes (essais du CER de Rouen)

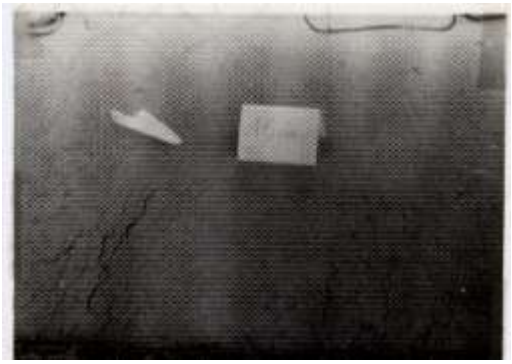


Figure 53 : Vue de la surface d'un massif de Pneusol après compactage (essais du CER de Rouen).

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 indiqué 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.

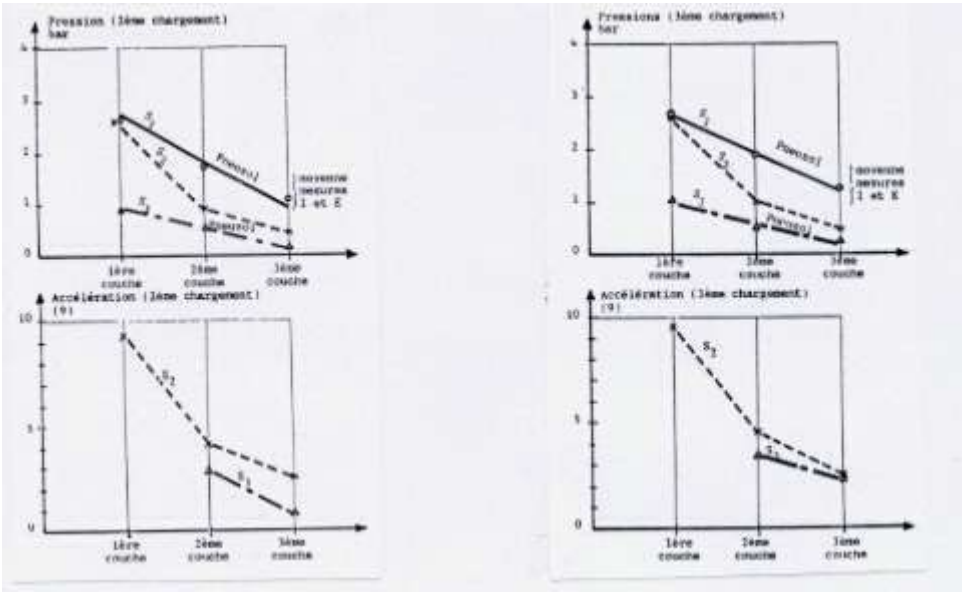


Figure 54 : Pressions et accélérations lors des trois chargements (Essais du CER de Rouen)

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.

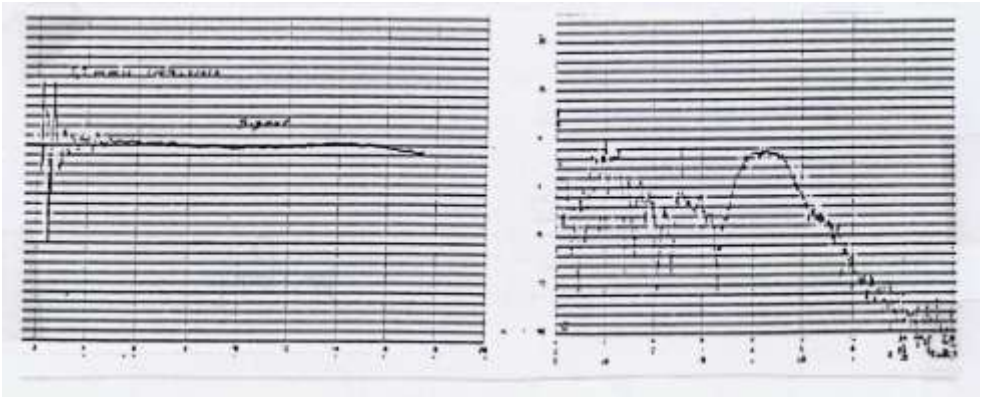


Figure 55 : Type de signal temporel et spectre de fréquence (Essais du LRPC de Strasbourg)

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 particulaires. Les résultats sont résumés dans le tableau 15.

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

Massifs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10ref.
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.