

CHAPITRE 3 - EXEMPLES D'APPLICATIONS DU PNEUSOL

3.1. GENERALITES

D'une manière générale, le dimensionnement des ouvrages en Pneusol n'est pas aisé car les données disponibles restent fragmentaires.

Pour chaque application, nous avons essayé de présenter une méthode de dimensionnement aussi réaliste que possible et d'en vérifier la bonne concordance sur des ouvrages réels. Il est certain que, pour chaque type d'ouvrage, on pourrait construire un ouvrage expérimental équipé d'appareils de mesure permettant de faire des constatations et un suivi dans le temps. Mais cela n'a pas été possible et les résultats présentés dans le chapitre 2 sont la seule base expérimentale qui a permis de caractériser le matériau pour pouvoir ensuite convaincre les maîtres d'œuvre et d'ouvrages de réaliser des ouvrages en Pneusol et de participer aux constatations et au suivi.

Par exemple, grâce aux résultats des essais du Centre d'Expérimentation Routière de Rouen (connaissance entre autres du module et du poids volumique du Pneusol), nous avons pu réaliser le remblai léger de Cannes-Mandelieu et le massif de Pneusol répartiteur de contraintes de Monistrol-sur-Loire pour créer un effet de voûte sur un conduit en béton armé sous-dimensionné et enterré sous une forte hauteur de remblai (13 m).

De plus, les moyens disponibles pour les constatations et le suivi doivent rester mesurés et un juste milieu doit être trouvé entre les impératifs d'une bonne recherche (résultats nombreux permettant des études paramétriques,...) et la simple vérification du bon comportement de l'ouvrage.

3.2. OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT.

Nous avons jusqu'à présent limité volontairement la hauteur de des murs de soutènement en Pneusol à 5 mètres, notamment lorsqu'on utilise des renforcements constitués de bandes de roulement sur chant disposées en nappes. Cette hauteur couvre à peu près 80% des ouvrages de soutènement actuellement construits, tous procédés confondus. Pour des hauteurs plus importantes (inférieures à 7 mètres), la méthode reste valable mais des précautions supplémentaires doivent être prises, notamment lors de la mise en place des nappes, et un tri des bandes de roulement est nécessaire.

Nous avons préféré d'autre part souvent l'utilisation de l'ARMAPNEUSOL, c'est à dire l'association d'un parement en Pneusol et des renforcements en treillis soudés, qui respectent strictement les normes concernant la corrosion.

3.2.1. Méthode de dimensionnement interne

a) Généralités

Les ouvrages de soutènement (murs) ont été les premiers ouvrages en Pneusol conçus et réalisés. Après les premiers essais en laboratoire pour déterminer les caractéristiques mécaniques des pneumatiques et les premiers essais en place pour étudier l'adhérence sol-pneumatique, le premier mur expérimental en Pneusol a été construit en 1982 pour vérifier le bien fondé de la méthode de dimensionnement et de la mise en œuvre.

Avec l'aide de SCETAUROUTE (Agence de Nancy), un site a été défini sur la section Toul-Gemonville de l'autoroute A4, près du village d'Harmonville. A cet endroit, l'autoroute est longée par un chemin de désenclavement prévu en remblai de 5m de hauteur. Le mur construit a 5m de hauteur et 10m de longueur. On y a utilisé des nappes de bandes de roulement sur chant de 5m de longueur.

Nous avons profité, lors de la réalisation de ce mur comme lors des études préliminaires, des importantes recherches et réalisations effectuées sur la Terre-armée et des connaissances plus classiques sur les murs de soutènements, notamment les murs-poids.

Rappelons ici quelques résultats particulièrement intéressants pour la suite de notre travail (LONG et al.), 1972, 1973)

Les essais effectués sur des modèles bidimensionnels ont mis en évidence trois types de ruptures pour les murs en sol renforcé:

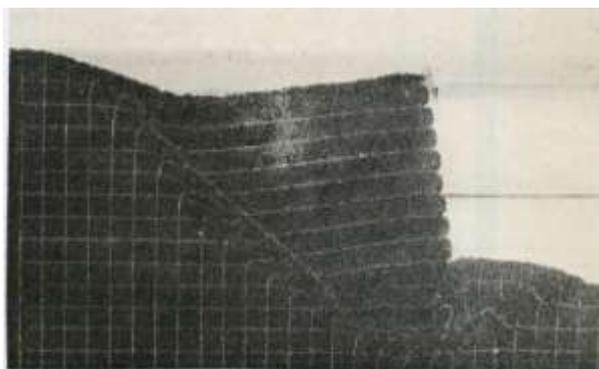


Figure 58 : Rupture par grand glissement d'un massif bidimensionnel renforcé par des armatures en papier d'aluminium.

- une rupture dans laquelle la masse renforcée ne se déforme pas. Il peut s'agir soit d'un grand glissement englobant le mur (Fig.58), soit d'un glissement sur la base. L'étude de ce type de stabilité fait appel aux méthodes classiques de la mécanique des sols;

- une rupture dans laquelle il y a décohesion de la masse renforcée par glissement des armatures (Fig.59). Pour éviter ce genre de rupture, il est nécessaire que les longueurs des armatures soient supérieures à une longueur minimale appelée "longueur d'adhérence". Cette longueur d'adhérence est fonction du niveau du lit d'armatures, de la géométrie du mur et des sollicitations exercées;

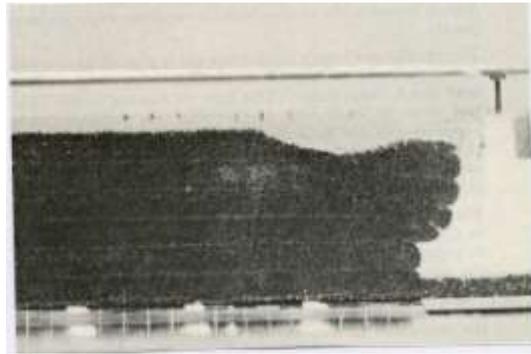


Figure 59 : Rupture par défaut d'adhérence d'un massif bidimensionnel Renforcé par des armatures en papier d'aluminium

- une rupture dans laquelle il y a décohesion de la masse renforcée par rupture des armatures (Fig.60). Dans la rupture par cassure des armatures, lorsque les armatures ne sont pas sollicitées de la même manière, il y a propagation de la rupture à partir du point où a lieu la première cassure d'armatures.

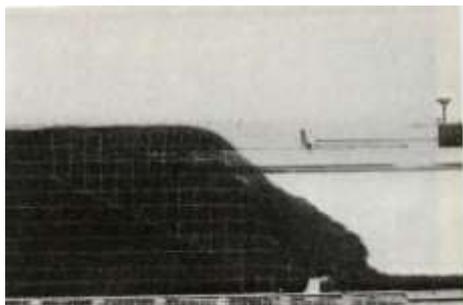


Figure 60 : Rupture par cassure des armatures dans massif bidimensionnel renforcé

Les méthodes de calcul développées pour le Pneusol visent à prévenir ces trois types de ruptures. Elles comportent, comme pour la Terre-armée, un calcul des tractions dans les nappes, un calcul de la longueur d'adhérence et un calcul de stabilité générale.

b) Calcul de la traction dans les nappes

Le principe du calcul utilisé pour déterminer les tractions dans les renforcements d'un mur en Pneusol consiste à écrire l'équilibre local entre le parement et la nappe de pneus au niveau considéré. On suppose que le matériau de remblai entre les nappes est en état de rupture et que les directions des contraintes principales sont parallèles et perpendiculaires au parement (Fig.61).

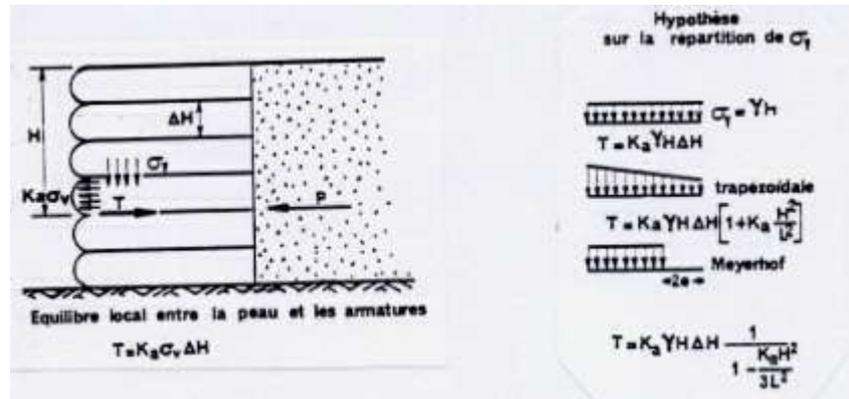


Figure 61 : Dimensionnement interne des murs en Pneusol

Cette méthode permet de déterminer l'effort de traction dans chaque lit de renforcement, en accord avec les phénomènes qui apparaissent lors d'une rupture par cassure des renforcements.

L'hypothèse selon laquelle le matériau de remblai entre les renforcements est partout en état de rupture est tout fait valable car les renforcements utilisés sont assez déformables et les efforts de cisaillement qui se développent entre deux nappes sont rapidement mobilisés. Les observations sur ouvrages réels ont effectivement confirmé le bien fondé de cette hypothèse.

Cette méthode suppose de plus que les efforts dans les renforcements sont maximaux sur le parement.

L'équilibre local entre le parement et le lit de renforcements se traduit pour le Pneusol par la formule:

$$T = K_a \sigma_v \Delta H$$

où K_a est le coefficient de poussée, égal à $\text{tg}(\Phi/4 + \phi/2)$ dans le cas d'un sol pulvérulent, et ΔH est l'espacement entre deux nappes de renforcements.

Le calcul définitif de la force de traction T nécessite une hypothèse sur la répartition de la contrainte verticale σ_v . l'équilibre du mur de soutènement sous l'action des forces de poussée qui s'y exercent permet de considérer trois types simples de répartition:

la répartition linéaire
 la répartition de Meyerhof
 la répartition uniforme

Elles conduisent aux formules suivantes pour la valeur de la traction maximale par mètre de mur dans un lit de renforcements situé à la profondeur H à partir du sommet du mur:

Répartition linéaire:

$$T_1 = K_a \gamma H \Delta H (1 + K_a H^2/L^2)$$

Répartition de Meyerhof

$$T_2 = K_a \gamma H \Delta H / (1 - K_a H^2/3L^2)$$

Répartition uniforme

$$T_3 = K_a \gamma H \Delta H$$

c) Calcul de la longueur d'adhérence. (SCHLOSSER, 1972)

Après avoir calculé les valeurs des forces de traction maximales dans les différents lits, il convient de vérifier que les longueurs des nappes sont suffisantes pour qu'il n'y ait pas danger de rupture de l'ouvrage en Pneusol par défaut d'adhérence. Pour simplifier, l'idée consiste à écrire que la longueur d'adhérence L_a est supérieure à la longueur limite d'adhérence l_a .

Si la contrainte normale σ qui s'exerce sur la nappe est uniforme et approximativement égale à la valeur (γH) résultant du poids des terres, la condition d'adhérence s'écrit:

$$T_m < \int 2bf \gamma H dl = 2bf \gamma H L_a \quad \text{d'où:}$$

$l_a > T_m / 2bf \gamma H \sim K_a \Delta H / 2bf n$ n étant le nombre d'armatures par mètre ou égal à un pour les nappes.

La longueur limite d'adhérence l_a est donc en première approximation indépendante du niveau du lit considéré.

Un calcul plus précis nécessiterait de prendre en compte la répartition réelle de la contrainte normale verticale σ_v . En prenant la répartition de Meyerhof, par exemple, pour le calcul de T_m , il vient (Fig.62) :

$$K_a \Delta H$$

$$l_a = 2e + \frac{H^2}{3L} \frac{1 - K_a/3(H/L)^2}{1 - K_a/3(H/L)^2}$$

soit:

$$l_a = \frac{H^2}{3L} K_a + \frac{1}{1 - K_a/3(H/L)^2} K_a \frac{\Delta H}{2bf_n}$$

ce qui donne une longueur minimale d'adhérence l_a légèrement croissante avec la profondeur H.

Pour obtenir l_a la longueur limite d'un lit, il faudrait ajouter à la longueur limite d'adhérence l_a calculée précédemment, une quantité correspondant à la largeur du coin de poussée du niveau considéré.

Tenant compte de l'expérience de la Terre armée, nous avons opté pour une géométrie $L = 0,5H$, L étant la largeur du mur et H sa hauteur.

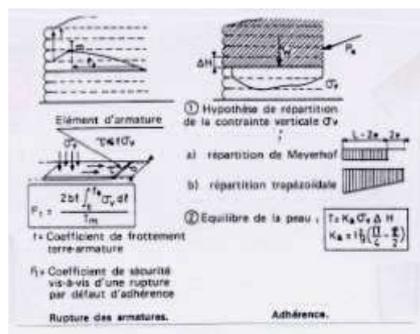


Figure 62 : Calcul sommaire de la longueur d'adhérence (type Terre Armée)

d) Prédimensionnement du mur en Pneusol

Comme on l'a déjà indiqué plus haut, le dimensionnement d'un mur en Pneusol comporte deux parties:

- le dimensionnement interne, c'est à dire la détermination de la résistance à la traction des nappes de renforcements et de leurs longueurs pour éviter la rupture par cassure des renforcements et par défaut d'adhérence;

- le dimensionnement externe, c'est à dire la vérification de la stabilité au poinçonnement, au glissement sur la base, au glissement général et la vérification des conditions de drainage. Ce sont des problèmes classiques de mécanique des sols et des fondations.

Pour commencer ces calculs, il faut "prédimensionner" le mur. D'une manière générale, pour les murs dont la hauteur est inférieure ou égale à 5 mètres, on prend $L = 0,5 H$, L étant la longueur des

renforcements et H la hauteur du mur. C'est à partir de ce profil minimal que toutes les vérifications seront faites.

Le drainage ne doit en aucun cas être oublié.

3.2.2. Le mur de Fertrupt (Bas Rhin, 1987, GAIOTTINO et al)

Ce mur a été construit en 1984 à l'occasion de la rectification d'une route départementale (CD 416) le long d'un ruisseau appelé "le Fertrupt". Le projet consiste à remplacer sur 40m le mur en pierre sèche qui menace de s'écrouler et d'élargir de 1m à 1.5m la voie supérieure (Fig.63).

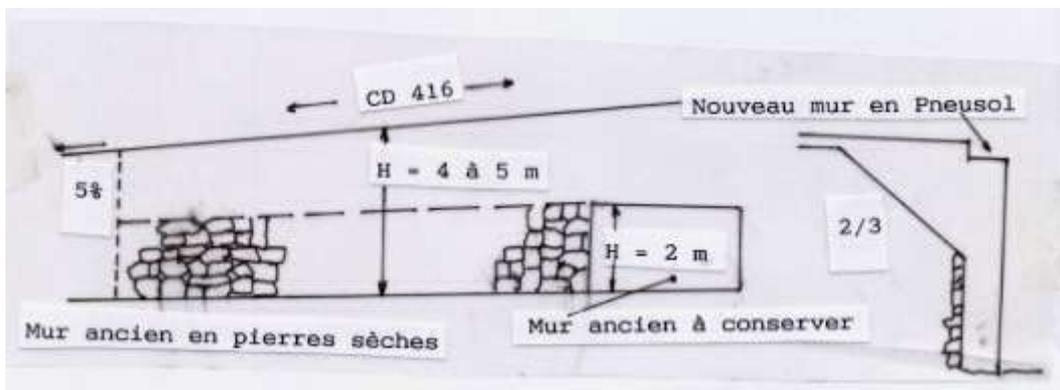


Figure 63 : Vue de face et de profil du mur en pierre sèche

Le nouveau mur est construit à la place de l'ancien en pierres sèches mais aussi sur un bout du mur en béton armé qu'on conserve.

Les terrains existants sur le site sont des gneiss appartenant à la série métamorphique de Sainte-Marie-aux-Mines. Ces gneiss, très fracturés, constituent un substratum compact qui a été reconnu par un sondage carotté à une profondeur de -4 à -4,5m en dessous de la chaussée. Le recouvrement est constitué d'éboulis argileux, avec des débris de roches altérées.

Granulométrie: $d_{\max} = 60\text{mm}$
 $< 80\mu = 30\%$

Equivalent de sable 17%

Classification de la RTR : C2 ou B6

Essai Proctor normal sur 0/20 : $\bar{\omega}_{\text{OPN}} = 12\%$

$\gamma_d \text{ OPN} = 19,60\text{kN/m}^3$

Indice CBR à la teneur en eau optimale = 10

Teneur en eau optimale : 10 à 11%

Le régime hydraulique du ruisseau est de type torrentiel avec des plus hautes eaux à 1m par rapport au lit habituel. La solution technique adoptée est un ouvrage de soutènement en Pneusol comportant, pour des raisons esthétiques, un parement en béton. Ce parement comme nous l'avons vu, joue un rôle mécanique assez faible. L'élément choisi a la forme d'une plaque en T aplati de 14 cm d'épaisseur et de surface d'un mètre carré. Par la suite, on a utilisé des plaques de dimensions plus importantes (ouvrages du Col de Bussang).

La plaque supérieure repose sur le sol et sur le retour de la plaque inférieure. La face arrière du retour comporte deux amorces, sur lesquelles viennent se fixer ultérieurement les renforcements.

L'obturation des joints verticaux et horizontaux, pour éviter des pertes de fines, est assurée par un non-tissé et des bandes de mousse de polyuréthane.

Les renforcements en pneumatiques, constitués de bandes de roulement sur chant, sont disposés en nappes horizontales. Le comportement d'une telle structure est différent de celui des ouvrages classiques en sols renforcés. En effet, le sol se trouvant à l'intérieur de la bande de roulement est emprisonné et ne pousse pas sur le parement ; celui se trouvant entre deux nappes pousse faiblement par suite du frottement élevé, égale à $\tan \Phi$ (Φ angle de frottement du sol), exercé sur toute la surface de la nappe.

On peut considérer aussi que le Pneusol, dans ce cas, est constitué d'un empilement de petits gabions posés les uns sur les autres si l'espacement des nappes est faible. De ce type de fonctionnement (très favorable) découlent des critères de choix des matériaux moins sévères, car on peut mobiliser toute la résistance au cisaillement du sol et "l'effet des gabions".

Le dimensionnement externe est classique et doit être fait pour tout ouvrage en tenant compte bien entendu de la souplesse du Pneusol.

Le dimensionnement interne tient compte des différents types d'assemblages des pneus, des caractéristiques du matériau de remblai, des charges appliquées, de l'hypothèse choisie sur la répartition de la contrainte verticale.

Pour le mur de Fertrupt de hauteur $H = 5\text{m}$, avec $L = 2,5\text{m}$, $H = 0,5\text{m}$, $K_a = 0,39$, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, on a selon les différentes hypothèses sur la répartition de la contrainte verticale σ_v :

Répartition linéaire

$$T_1 = 22 \text{ kN ,}$$

Répartition trapézoïdale

$$T_2 = 19 \text{ kN ,}$$

Répartition Meyerhof

$$T_3 = 17 \text{ kN}$$

Le suivi du mur a été fait par contrôle des inclinaisons des plaques et par les mesures des pressions totales horizontales et verticales (capteurs Glötzl) près du parement, ainsi que par des tassomètres placés dans l'axe du massif traité. La figure 64 montre l'évolution des mesures.

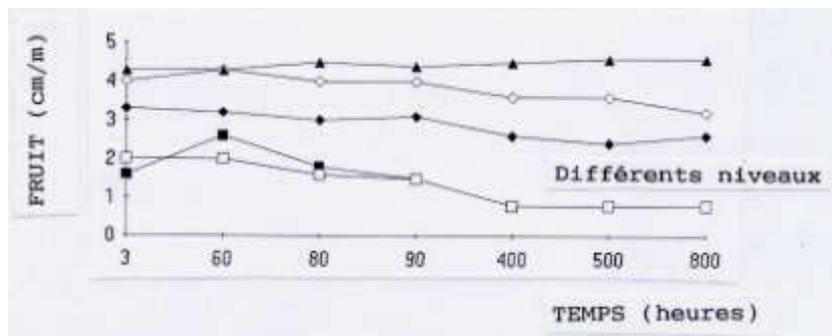


Figure 64 : Evolution des déplacements du mur de Fertrupe

On en a conclu que:

- dès la pose, la plaque perd environ la moitié du fruit initial d'où la précaution initiale de bien tendre la nappe vers l'arrière avant le remblaiement ;

- l'ensemble est devenu quasi stable au bout de trois mois. Le déplacement moyen des plaques a été de l'ordre de 1 à 1,5 cm/m de hauteur, soit globalement environ un centième de la hauteur du mur.

La déformation du mur est seulement due à la déformation du premier élément de pneumatique fixé sur le parement.

Bien que les mesures données par les capteurs présentent une certaine dispersion, il se confirme que la contrainte horizontale σ_h sur le parement est relativement faible, de l'ordre de 0,75 à 1 KPa. Ce résultat est d'ailleurs déjà obtenu sur le mur de Langres construit en Octobre 1982. La contrainte verticale σ_v est aussi faible, de l'ordre de 0.20 à 0.26.10⁵ KPa.

Bien la contrainte verticale et horizontale ne soient pas des contraintes principales, leur rapport donne cependant une idée de l'état du sol; on trouve $\sigma_h/\sigma_v = 0,30$.

La valeur expérimentale de la poussée horizontale trouvée à Fertrupe est inférieure (trois fois plus faible) à celle calculée précédemment.

Plusieurs raisons pourraient expliquer ces faibles valeurs expérimentales:

- * difficultés de compactage du remblai près du parement.
- * poussée faible du remblai, due au frettage important des renforcements Pneusol;

* déformation immédiate de la première bande de roulement sur chant, permettant au remblai d'atteindre l'état limite.

En conclusions, si des perfectionnements sur la méthode de dimensionnement sont toujours possibles, il reste qu'elle est parfaitement opérationnelle car les résultats théoriques obtenus sont assez pessimistes.

Le coût au mètre carré de cet ouvrage est de l'ordre de 15% moins cher qu'un mur en béton armé. Cette économie est relativement faible. C'est pourquoi la solution de parement en béton a été abandonnée au profit d'un parement en Pneusol, sauf dans certains cas particuliers (Pneusol léger caché par des plaques en béton).

3.2.3. Le mur de Lutzelhouse (Bas-Rhin, 1986, LONG et al)

Au printemps, lors de la fonte des neiges, des glissements de terrains se produisent souvent, parfois dans des pentes très faibles. Ils sont dus dans la majorité des cas à des infiltrations d'eau dans le sol.

Les solutions de réfection sont multiples et variées. Certaines peuvent être mises en œuvre rapidement et de manière économique. C'est le cas de notre présentation.

Un glissement de terrain est survenu au début de l'année 1986 sur la route nationale 420 à l'entrée de la ville de Lutzelhouse dans l'est de la France. Ce glissement intéresse le talus aval de la route, qui passe en profil mixte au pied d'une colline dont les affleurements sont des grès feldspathiques, conglomérats et brèches (Fig.65).

Une série de sondages à la tarière et au pénétromètre statique ont montré la présence de sols, qui sont, dans l'ensemble, des couches sableuses avec présence de fines très sensibles à l'eau. On a constaté en particulier :

* l'existence de venues d'eau depuis l'amont, collectées par un fossé vers - 2m par rapport à la cote de la chaussée (cote de référence) ;

* l'existence d'une couche sablo-graveleuse de 0,30m d'épaisseur vers - 4m de profondeur. Dès l'arrivée de la tarière dans cette couche, le niveau d'eau s'est établi rapidement vers -0,20m ;

* au droit de la crête de talus, les sols rencontrés jusqu'à - 4,20m sont très peu compacts ($q_c = 0,5$ à 1 MPa), puis leur résistance augmente de - 4,2 m à - 7,75, avec une résistance de cône q_c croissant de 1,2 à 3 MPa (1,5 à 2 MPa en moyenne);

* le sol en place ne devient compact ou très compact qu'à partir de -8m de profondeur.



Figure 65 : Vue du glissement de Lutzelhouse

Le glissement de Lutzelhouse s'est produit en raison de la conjonction de plusieurs facteurs défavorables (Fig.66) :

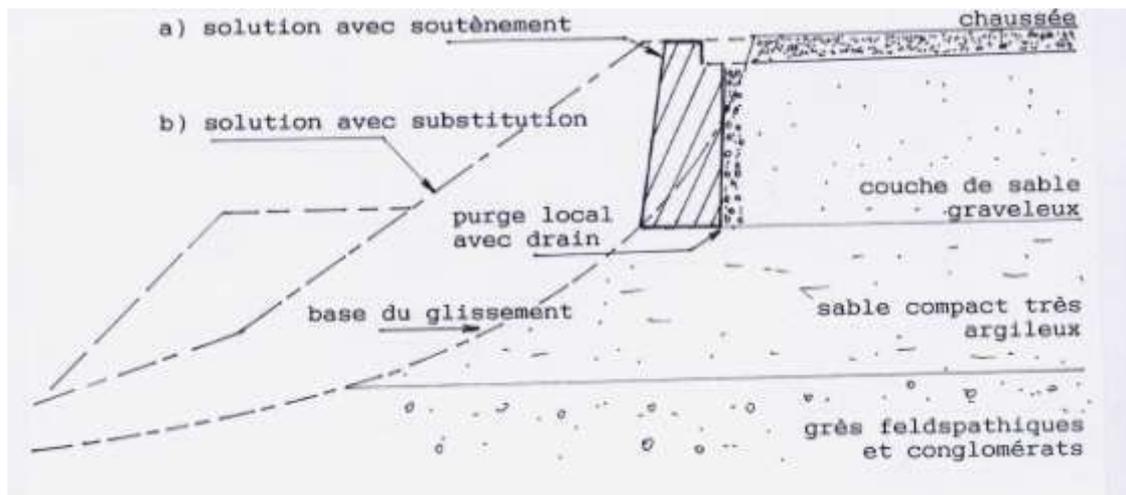


Figure 66 : Analyse du glissement de Lutzelhouse

- existence d'une source juste en amont, ancien collecteur disjoint et absence d'étanchéité du fossé ;

- présence d'un matériau (sol en place et matériaux rapportés) très sensibles à l'eau : sable fin légèrement limoneux, avec niveaux plus perméables sablo-graveleux, dont les caractéristiques de résistance au cisaillement sont médiocres:

$$\gamma_d = 27^\circ$$

$$C_d = 0$$

- profil du talus assez défavorable par suite du manque de butée en pied ;

- mauvais drainage en pied.

Pour la confortation de ce glissement, les travaux réalisés peuvent être divisés en trois parties:

- drainage extérieur effectué en priorité

Il s'agit de capter toutes les eaux internes et externes, de les canaliser et de les éloigner de la zone instable. Les fossés situés au niveau de la chaussée sont approfondis et rendus étanches. La source située en amont est captée et ses eaux canalisées.

- confortation du talus sous accotement et leur drainage

Deux possibilités se présentent. La première, consiste à reconstituer le talus ancien avec la construction d'une banquette (Fig.67). Elle nécessitait toutefois une purge de la zone aval (pied de talus) avec le risque de perturber l'équilibre fragile du site. Elle présentait, d'autre part, l'inconvénient d'une longue stabilisation au niveau de la chaussée et l'amenée d'engins de terrassement dans une zone d'accès très difficile.

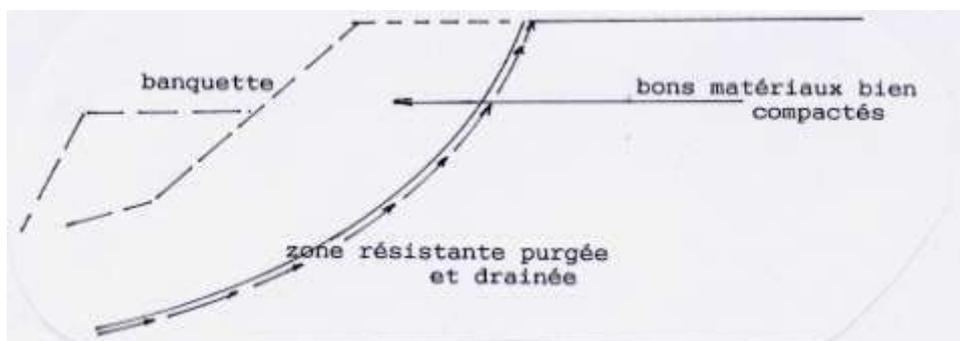


Figure 67 : Une variante de réparation du glissement de Lutzelhouse: reconstitution du profil avec banquette.

La deuxième solution consiste à réaliser un mur de soutènement sous accotement, solution qui présente plusieurs avantages:

* la possibilité de construire des plots très courts et d'accéder par le haut,

* la non nécessité de traiter la partie aval

L'inconvénient de cette solution pourrait être son coût, si l'on se réfère aux ouvrages classiques adoptés jusqu'alors.

Compte tenu de l'époque hivernale, une solution du deuxième type a été retenue pour ne pas modifier l'équilibre des terres à l'aval et ne pas provoquer de nouveaux glissements qui auraient pu entraîner la détérioration d'une habitation située non loin de là. La purge du volume de terrain glissé ABCDE nécessitait en effet une excavation quasi complète, donc un allègement de la zone résistante néfaste à l'équilibre global.

L'exécution d'un mur de soutènement était envisageable avec différentes techniques:

- murs préfabriqués
- la Terre armée
- le Pneusol
- massifs d'enrochements de grandes dimensions.

L'appel d'offre a montré que la solution en Pneusol a un coût plus faible.

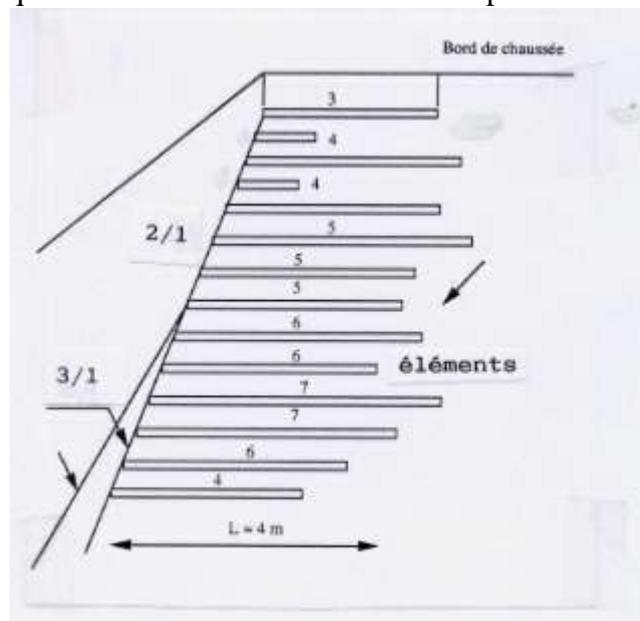


Figure 68 : Profil du mur en Pneusol (glissement de Lutzelhouse)

Le massif de Pneusol a été réalisé avec des bandes de roulement de pneus de tourisme, disposées sur chant et reliées par une sangle en polyester de résistance à la traction de l'ordre de 15 kN. Cet

assemblage constitue une nappe tridimensionnelle, dont la figure 68 donne une section transversale.

Plusieurs dispositions ont été adoptées lors de la réalisation de cet ouvrage :

.un dispositif de drainage amont et aval, avec évacuation des eaux tous les 15m. Dans le cas présent, un collecteur central était suffisant. Les drains sont de petit diamètre et placés dans une cuvette étanche;

.un premier matériau de remblaiement, sur deux lits, en grave propre drainante, un matériau local, un déchet de carrière 0/150 (5 à 10% de fines). L'emploi d'un vibreur léger est suffisant pour compacter des couches de 25 à 30cm;

.le parement aval est réglé avec une pente de 3/1 puis de 2/1

.les plots définis pour l'exécution ont 7 m de longueur.

L'ouvrage est dimensionné comme un mur-poids de 6m de haut reposant sur un bon sol de fondation. Les paramètres pris en compte pour effectuer ce calcul de stabilité sont les suivants:

+ la géométrie représentée sur la figure 68,

+ les caractéristiques du sol $\Phi = 25^\circ$

$$c' = 0$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3,$$

+ nappe sous la base du mur

+ la résistance de pointe q_c prise en compte entre -6m et -8m est de 2 MPa

Le nombre de pneus par nappes est trop important pour avoir une rupture par défaut d'adhérence d'autant plus que le mur est buté sur presque toute sa hauteur.

Le coefficient de sécurité au poinçonnement est de l'ordre de 3 et celui vis à vis du glissement sur la base est supérieur à 2.

A la suite de cette opération un bilan financier précis a été établi. Il s'ensuit que le coût de ce mur s'établit à 540 F/m² de surface (en élévation) pour une hauteur de référence de 5,6 m.

Ce type d'ouvrage est particulièrement économique et actuellement, nous le proposons de plus en plus, par exemple pour les murs antibruit facilement végétalisables.

Notons que pour cet ouvrage, quelques économies supplémentaires auraient pu être faites, par exemple en diminuant l'épaisseur de la couche drainante en grave de la base.

La mise en œuvre des poteaux des glissières de sécurité fichés de deux mètres dans le Pneusol, n'a pas présenté de difficultés particulières.

Le remblai terminé, les premiers nivellements sur le bord des talus ont montré une stabilité complète (tassements nuls et absence de fissures). Un an après, de nouveaux contrôles n'ont pas montré . L'ouvrage et la route sont en parfait état.

3.2.4. Le mur d'Aigueblanche (Haute Savoie)

a) Généralités sur le mur

C'est à la suite de plusieurs études effectuées par MM Rochet (LRPC Lyon), Corté et Lepert (LCPC), Marchal (LRPC Lyon) et par Melle Pichollet (DDE Savoie) que plusieurs solutions ont été proposées au maître d'ouvrage pour la construction du merlon de protection contre les chutes de blocs à Aigueblanche (Terre armée, Plasterre, etc.). Ce paragraphe présente la solution initiale en Pneusol présentée par le LCPC et la solution finale adoptée.

L'idée du mur en Pneusol "absorbeur d'énergie" découle de l'observation courante de la vie quotidienne. En effet, sur les murs des garages, on constate l'existence de quelques pneus négligemment appuyés. Dans les virages difficiles d'un circuit de formule 1, des pneus ont été entreposés pour amortir les sorties non contrôlées des bolides. Le long des quais d'embarquement, des pneus sont suspendus tantôt seuls, tantôt dans un mandrier en bois.

Les premiers essais effectués au CER de Rouen ont permis de bien connaître le comportement dynamique de ce matériau, par exemple que son coefficient de restitution, égal à 0,10 (rapport entre la hauteur de rebond H de la masse tombante et sa hauteur de chute H_0). Ce coefficient exprime le rendement énergétique du matériau. Il signifie que le Pneusol a rendement faible et un grand pouvoir absorbeur. De plus, sa vitesse particulière est beaucoup plus faible (jusqu'à 300%). Les ondes s'y propagent beaucoup plus difficilement que dans un milieu homogène.

La décision prise à la fois de supprimer la traversée de l'agglomération d'Aigueblanche par la Nationale 90 et de protéger les biens et les personnes directement menacés par les chutes des blocs venant des falaises de la Roche Plate et de la Roche Pourrie a amené la DDE et le Conseil Général de la Savoie à s'orienter vers la solution d'un merlon de protection avec fosse de récupération en amont pour la protection de cette route élargie à quatre voies.

Le dimensionnement de cet ouvrage a été effectué en deux phases:

- * une étude de trajectographie s'appuyant sur des données géomécaniques,
- * le dimensionnement de l'ouvrage en s'appuyant sur une étude en centrifugeuse.

L'étude de trajectographie effectuée par le CETE de Lyon, combinée avec l'observation des impacts réels antérieurs, a permis de déterminer la hauteur du merlon par rapport au terrain naturel.

Pour obtenir cette hauteur de coupure, on a retenu un talus de 7,20 m de hauteur avec un parement incliné sur l'horizontale de 60 degrés (Fig.69)

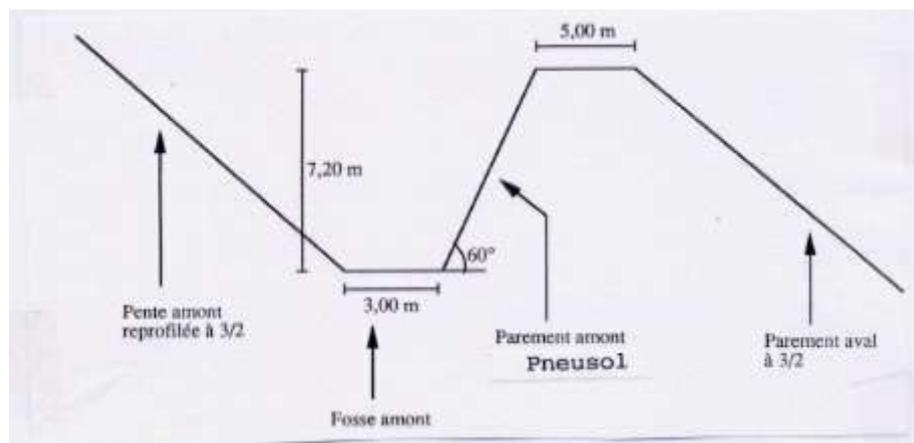


Figure 69 : Coupe type du merlon d'Aigueblanche

Le parement aval ne posant pas de problèmes particuliers, celui d'amont impose l'utilisation de remblais renforcés que nous développons ultérieurement.

Après bien des difficultés de mise au point, les essais en centrifugeuse ont pu être réalisés et ont donné des résultats très intéressants : pour la vitesse d'impact et l'incidence étudiées pour un bloc de 500 tonnes, l'enfoncement du bloc varie de 2,40 à 3,80 m, le déplacement du merlon lui-même étant faible à l'échelle de l'ouvrage. Par contre, les désordres en crête s'étendent sur deux fois le diamètre du bloc, soit environ 15m. Dans le plan vertical contenant l'axe du projectile, la zone plastique la forme d'une ellipse dont le demi-grand axe vertical dépasse de 2 m par rapport au rayon du projectile, et dont le petit axe horizontal ne déborde que de 50 cm. En profondeur, à l'avant du bloc, la zone des grandes déformations plastiques s'étend sur une longueur au moins égale au diamètre du projectile, soit environ 7 m.

Il semblerait qu'au-delà de 20 m du point d'impact les déformations soient essentiellement réversibles, cependant qu'aucune mesure directe ne vient confirmer cette observation.

A partir de cette distance, il est possible de retenir l'hypothèse de propagation d'ondes élastiques pour estimer les efforts et les sollicitations sur les ouvrages sous remblai.

L'ensemble des essais en centrifugation montre que le dimensionnement adopté pour le merlon devrait être suffisant pour stopper une chute de blocs de 200 m³ avec une marge de sécurité suffisante pour tenir compte des incertitudes liées à une rotation possible du bloc sur lui-même.

b) Dimensionnement du mur

Un mur en Pneusol "absorbeur d'énergie" est composé

- d'un parement en Pneusol constitué de pneus de poids lourds,
- de renforcements en Pneusol ou en tout autre type d'inclusions, à la condition que le frottement sol-renforcement soit le plus élevé possible,

- de remblais de bonne qualité.

Le profil du mur construit à Aigueblanche est indiqué sur la figure 69. Selon sa masse (sa taille, son inertie), un tel mur peut être destiné à arrêter, soit les prismes fragmentés détachés du sommet des falaises, soit les blocs eux-mêmes.

Dans un mur absorbeur, le parement est l'un des éléments les plus importants de l'ouvrage car c'est lui qui reçoit en premier les blocs. Certes, il doit tout d'abord être résistant, flexible, stable et déformable pour pouvoir lors d'un choc encaisser une grande partie des énergies avant de solliciter la butée du massif situé à l'arrière du parement. Cette butée est particulièrement importante, car elle conditionne la stabilité de l'ensemble de l'ouvrage.

Cette mobilisation doit être optimale et c'est là qu'intervient la qualité des inclusions, qui doit présenter un coefficient de frottement sol-inclusion aussi élevé que possible. Des inclusions lisses seraient peu adaptées car elles fragiliseraient le massif de butée en y créant des surfaces potentielles de rupture.

Un brevet déposé par la société BORIE-SAE (Pierre Vezole) et le LCPC (Nguyen Thanh Long) permet de remédier à cette inconvénient, en utilisant notamment des grilles de très faible déformabilité (par exemple des treillis soudés galvanisés).

Notons enfin que l'aspect esthétique du parement ne joue qu'un rôle secondaire dans la mesure où il est placé face à un éboulement, c'est-à-dire face à une zone interdite à la circulation piétonnière et que, de plus, il est facilement végétalisable.

L'utilisation de pneus poids de lourds est hautement conseillée, surtout si l'on a affaire à des blocs de grandes tailles. De plus pour leur donner plus d'inertie et de poids, un seul flanc serait enlevé et l'élément restant rempli de bon matériau de remblai.

Le dimensionnement d'un tel ouvrage est difficile car ce genre de problème est relativement rare ; c'est pourquoi, à la demande de la DDE de la Savoie, le LCPC a effectué l'étude en centrifugeuse évoquée plus haut.

Comme pour tout ouvrage en sol renforcé, le dimensionnement du Pneusol est composé de deux parties, une étude de stabilité interne et une étude de stabilité externe. Cette dernière, effectuée par le LRPC de Lyon, a donné de très bons résultats, au niveau de sa stabilité au poinçonnement, au glissement sur la base ou au glissement général avec des cercles de glissement à l'intérieur et à l'extérieur du Pneusol.

L'utilisation du programme CARTAGE, mis au point pour l'étude des massifs renforcés à l'aide de géotextiles, moyennant quelques hypothèses simplificatrices, a aussi donné des coefficients de sécurité satisfaisants.

La solution adoptée finalement à Aigueblanche est un mur composé d'un parement en Pneusol précédemment décrit, renforcé à l'arrière par des nappes de géotextiles tissés.

c) Quelques aspects théoriques

D'une manière générale, le phénomène d'impact d'un bloc sur un remblai de sol est encore relativement peu connu. De nombreux chercheurs se sont penchés sur ce problème depuis EULER en 1742, et on s'y intéresse encore aujourd'hui.

Trois directions essentielles ont été suivies par les auteurs de ces études. La première consiste à interpréter des essais, en laboratoire ou in situ, pour donner les propriétés qualitatives du choc, particulièrement en ce qui concerne l'influence des principaux paramètres (dimensions, masse et vitesse du projectile, nature du sol,...), qu'il est possible de faire varier. La seconde consiste à tirer d'un programme d'essais des formules quantitatives pour les contraintes et les mouvements. La troisième part d'une formule établie par un raisonnement théorique et dont les coefficients sont ajustés par comparaison avec des résultats expérimentaux. Une étude bibliographique sur ce thème sera publiée prochainement par l'auteur. On se contentera de citer ici quelques résultats facilement applicables pour les ouvrages en Pneusol.

La formule de la capacité portante de TERZAGHI est bien connue (qualités et défauts) dans le cas d'un chargement statique du sol. Aussi de nombreux chercheurs ont essayé de l'étendre au cas d'un chargement dynamique.

Dans le cas des fondations de dimensions finies, on considère que la formule générale de TERZAGHI donnant la contrainte moyenne limite est encore valable à condition d'affecter les termes de coefficients correctifs empiriques en rapport avec la géométrie de la fondation.

$$q_c = \gamma z N_q + 0,80 \gamma B/2N\gamma + 1,3 cN_c \text{ (fondation carrée } B*B)$$

$$q_l = \gamma z N_q + 0,60 rN\gamma + 1,30 cN_c \text{ (fondation circulaire de rayon } r)$$

avec:

q_l : pression moyenne de rupture du sol,

γ : poids volumique du sol

B : largeur de la semelle

z : profondeur d'encastrement de la semelle

c : la cohésion du sol

$N_q, N\gamma, N_c$, sont les facteurs de portance du sol

Si l'on suppose que l'on est toujours dans les conditions de la rupture du sol, la réaction R du sol à un projectile de surface projetée S vaut:

$$R = q_1 * S$$

Cette approche est particulièrement féconde car le problème du chargement statique est en principe particulièrement bien connu.

Habib admet que la pénétration du bloc dans le matelas de sol est possible parce que la force dynamique a dépassé la limite de rupture du sol, d'où la formule précédente exposée dans l'étude d'Awad, qui comporte en outre un calcul pour différentes conditions de chute, (sol ou bloc incliné). Il est intéressant de noter qu'une inclinaison du sol de 30° divise R par 4. (Awad, 1980).

Pour tenir compte de l'effet dynamique, les coefficients statiques de la méthode précédente seront multipliés par 3, facteur par lequel on multiplie les coefficients statiques obtenus lors d'un essai pressiométrique quand on traite un problème dynamique.

Selig et Mc Kee (1961), partant de la même formule de Terzaghi, ont fait des essais sur du sable ($c=0$) et avec un enfoncement faible. Le terme dominant est donc celui en $N\gamma$.

Pour une semelle circulaire, ils arrivent à: $q_1 = 0,60 \gamma_r N\gamma'$ et pour une semelle carrée $q_1 = 0,40B N\gamma'$ où $N\gamma'$ est un coefficient de portance dynamique établi expérimentalement.

Des formules empiriques ont été mises au point par *le Service Fédéral des Routes de Suisse* à partir des essais de chute de blocs dont la masse atteint 57 kg, pour une hauteur de chute de 45 mètres sur un matelas de gravier de 70 cm d'épaisseur. Elles fournissent un majorant de R, soit

$$R_{\max} = 137h/45Mg$$

R_{\max} en Newtons

h : hauteur de chute en mètres

g : accélération de la pesanteur (m^2/s),

M : masse du bloc en kilogrammes.

En supposant la réaction du sol constante et égale à R_{\max} , on majore la réaction de calcul par un coefficient de sécurité.

On trouve des formules analogues chez *Reese et al* : $R_{\max} = 23,9 MV_0$, où M est la masse du projectile en kg et V_0 la vitesse d'impact en m/s, et chez *Poor et al* (1975).

Des essais en vraie grandeur effectués par *Campenon Bernard*, la DDE du Var et le LCPC à l'occasion de la construction de la station d'épuration du Cap Sicié ont été faits (bloc de 7 tonnes, hauteur de chute 37m).

3.3. PNEUSOL REPARTITEUR DE CONTRAINTES

3.3.1. Généralités sur l'effet de voûte

Le phénomène d'effet de voûte est très connu et largement étudié par de nombreux chercheurs. Le phénomène peut être mis en évidence de manière extrêmement simple. Un essai de chargement effectué sur deux conduits, l'un en clinquant de cuivre souple, l'autre en matière plastique rigide montre une concentration de contraintes sur la génératrice supérieure du tuyau plastique rigide, alors qu'il se développe un effet de voûte sur celui en clinquant souple.

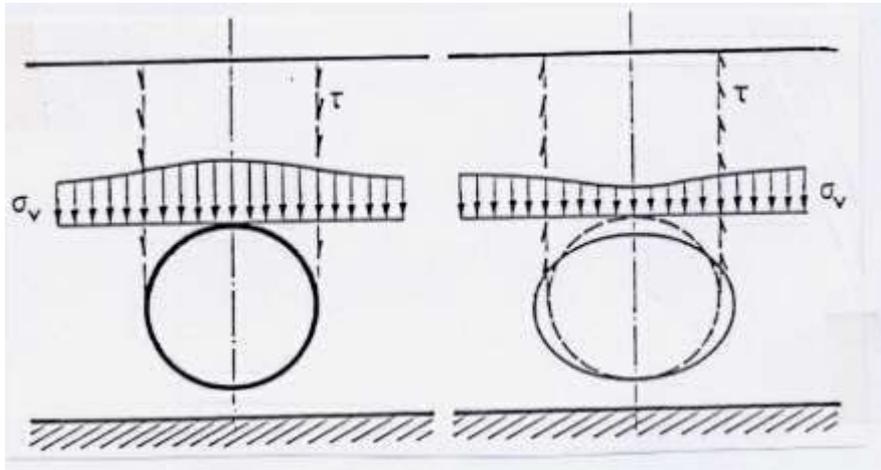


Figure 70 : Comportements comparés d'un conduit rigide et souple

Dans le cas des buses souples enterrées (buses métalliques par exemple), les charges se reportent sur le remblai technique environnant par suite de l'ovalisation de la buse et du tassement différentiel entre celle-ci et le remblai. Dans le cas d'un conduit rigide, le report des charges se fait dans l'autre sens, avec une concentration de la charge sur la buse et un tassement plus important du remblai.

On schématise souvent ce phénomène en disant que, sur deux plans verticaux encadrant la section de la buse, se développent des contraintes de cisaillement qui, dans le cas d'une buse rigide, sont orientées vers le bas, et dans le cas d'une buse souple, sont orientées vers la surface libre.(Fig.70).

Tirée de celle qui est utilisée pour le calcul des silos, la théorie de Marston, basée sur l'hypothèse d'un remblai pulvérulent et de l'existence de deux plans de cisaillement encadrant la conduite,

permet de déterminer la position d'un plan d'égal tassement à la hauteur H_e . Au-dessus de la buse (Fig.71) (Dantec et al, 1987).

Cela entraîne pour la conduite une charge verticale supérieure au poids des terres. On appellera K ou "coefficient de Marston" le rapport entre ces deux charges. Spangler (19) propose les formules suivantes en fonction de K_a , coefficient de poussée du matériau de remblai, et $\mu = \tan\Phi$ où Φ est l'angle de frottement interne du remblai:

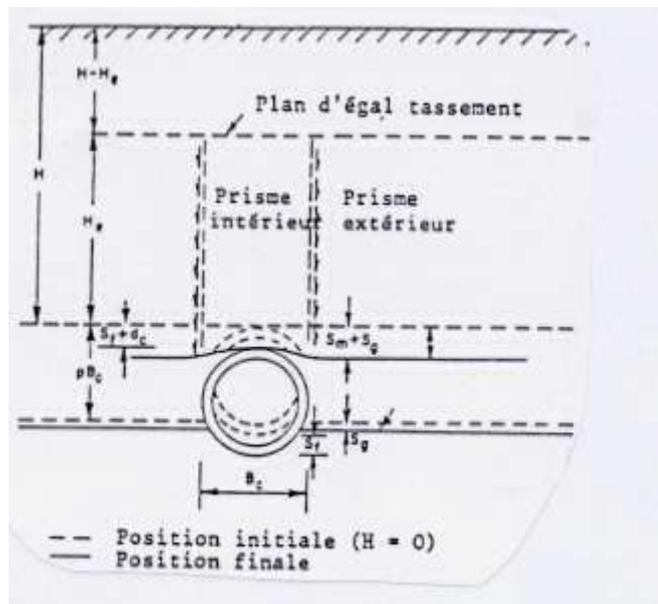


Figure 71 : Effet de voûte (Dantec et al, 1987)

- lorsque $H < H_e$:

Le plan d'égal tassement est virtuel ; les forces de frottement négatif dues aux tassements différentiels entre le prisme intérieur et les deux prismes extérieurs agissent sur toute la hauteur H .

$$K = \frac{\exp(2K_a \mu H/B_c) - 1}{2K_a \mu H/B_c}$$

- lorsque $H > H_e$:

Le plan d'égal tassement est réel ; les forces de frottement négatif n'agissent que sur la hauteur H_e et le remblai au-dessus de H_e agit comme une surcharge répartie.

$$K = \frac{[\exp(2K_a H_e/B_c) - 1] + (1 - H_e/H)\exp(2K_a \mu H_e/B_c)}{2K_a \mu H/B_c}$$

D'autres auteurs ont travaillé sur ce sujet; citons pour mémoire, entre autres: CURIAL, WOLFER, WETZORFE, GUERRIN,...et bien entendu MARSTON et SPANGLER.

3.3.2. Calcul de l'épaisseur du Pneusol.(LONG, 1985)

Pour éviter l'effet Marston" décrit ci-dessus au-dessus d'une buse rigide, il suffit de provoquer un tassement du remblai situé au-dessus de la génératrice supérieure du conduit, tassement qui sera plus important que celui du remblai technique environnant.

A notre connaissance, le calcul de cette épaisseur de sol "mou" pour créer l'effet de voûte n'a été abordé par aucun chercheur, il existe diverses recommandations étrangères préconisant, pour cette épaisseur, la portée de l'ouvrage et en largeur deux fois cette même portée.

Nous avons opté pour la simplicité de la méthode de dimensionnement, afin de permettre une large diffusion du Pneusol auprès des entreprises de génie civil. Cette simplification n'exclut pas la rigueur dans sa vérification expérimentale. Cette façon de procéder a été fructueuse au vu des résultats obtenus puisque actuellement, près du tiers des ouvrages Pneusol sont des répartiteurs de contraintes.

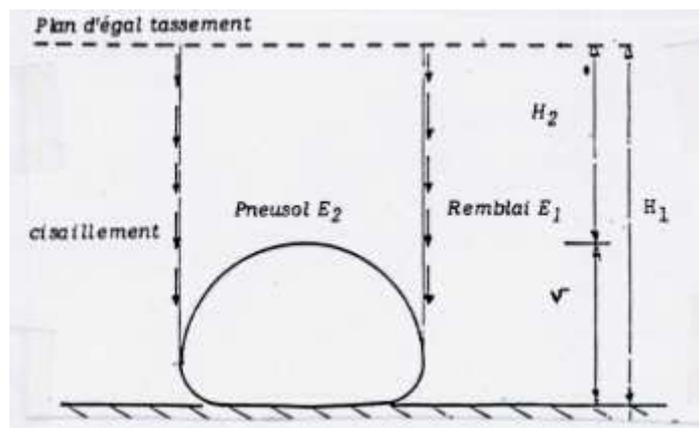


Figure 72 : Schéma de calcul de l'épaisseur du Pneusol

C'est le principe de la "pose en dépression" qui est d'adapter un phasage des travaux de terrassement et de module de remblai tel que le plan d'égal tassement se situe aussi près que

possible de la génératrice supérieure de l'ouvrage. Ainsi, le poids des terres ne sera pas majoré! (Fig.72).

E_1 et H_1 , respectivement module et hauteur des remblais techniques latéraux situés entre le niveau d'assise et le plan d'égal tassement ;

E_2 et H_2 , module et hauteur du remblai en Pneusol situé au-dessus du conduit, entre la génératrice supérieure et le plan d'égal tassement ;

σ_v , contrainte uniforme exercée au-dessus de ce plan d'égal tassement.

En admettant que le conduit est très rigide (non déformable) et par la définition même du plan d'égal tassement, on a approximativement:

$$H_1 / E_1 = H_2 / E_2 = (H_1 + H_2) / (E_1 + E_2) = V / (E_1 + E_2)$$

ce qui permet de calculer H_2 au moyen de la formule

$$\mathbf{H_2 = V E_2 / (E_1 - E_2)}$$

3.3.3. Application à Monistrol-sur-Loire

a) Caractéristique du conduit et des matériaux

L'ouvrage concerné sert de galerie technique à la conduite forcée du Lignon alimentant en eau potable la ville de St-Etienne. Une déviation routière en remblai d'environ 10 m d'épaisseur doit recouvrir le conduit, de type P.I.V. et constitué d'éléments préfabriqués en béton armé de 5,1 de portée et 1,24 de longueur

Les éléments préfabriqués s'appuient sur des longrines en béton armé fondées sur des micro-pieux ancrés dans le substratum rocheux granitique.

La longueur totale de l'ouvrage est de 137,75 m. L'ouvrage présente une pente longitudinale moyenne de l'ordre de 8%.

L'ensemble du projet de déviation étant situé dans une zone granitique, les matériaux de remblai utilisés sur le site sont des arènes granitiques de granulométrie 0-140 mm environ. Ce sont des matériaux de bonne qualité, se mettant en œuvre facilement.

Des contrôles de compactage à la dynaplaque ont été effectués durant toute la construction du remblai. C'est sur cet ouvrage que la méthode de "pose en dépression" avec l'utilisation du Pneusol a été appliquée pour la première fois en France et dans le monde, le SETRA ayant estimé que le coefficient de Marston appliqué au dimensionnement de l'ouvrage insuffisant. Toute l'opération vise à limiter au maximum les descentes de charges sur l'ouvrage en ramenant autour de l'unité ce coefficient de Marston et aussi en les rejetant suffisamment loin pour ne pas perturber les micro-pieux qui ne supportent pas de poussée horizontale.

Le calcul de l'épaisseur selon la méthode précédemment exposée donne:

$$H_2 = VE_2 / E_1 - E_2$$

$E_2 = \text{environ } 15 \text{ MPa}$
 $E_1 = \text{environ } 50 \text{ MPa}$
 $V = 3,7 \text{ m.}$

d'où $H_2 = 1,6 \text{ m.}$

Comme c'était notre première opération, nous avons arrondi à 2 m pour plus de sécurité.

L'ouvrage et les remblais ont été réalisés au cours de l'hiver 1985-1986, les travaux étant achevés au cours du mois de février 1986.

b) Résultats des constatations

Afin de vérifier l'efficacité de ce système de "pose en dépression", un programme de mesures et de contrôles a été mis en place. Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, chargé de la réalisation, a procédé aux mesures des contraintes totales exercées par le remblai sur l'ouvrage et latéralement à celui-ci pendant toute la construction du remblai et jusqu'à 12 mois après la fin du remblaiement.

Pour mesurer les pressions totales, nous avons utilisé des cellules Glötlz E/20KF20 (sensibilité + ou - 2kPa)

Lorsque la hauteur de remblai a atteint la cote de + 0,20 m au-dessus de la longrine de clé de l'ouvrage, 17 cellules de pression totale ont été posées selon trois profils en travers de l'ouvrage distants de 0,50 m. Les cellules ont été disposées comme suit:

- * 3 au droit de la clé de voûte (au-dessus de la longrine),
- * 4 au droit des articulations,
- * 4 en limite d'emprise des pneumatiques,
- * 6 hors d'emprise des pneumatiques, dans les remblais latéraux.

Le détail de l'implantation est explicité sur la figure 73.

Nous avons reporté ci-après:

- le tableau des pressions enregistrées par les capteurs jusqu'à 12 mois après la fin du remblaiement (chaussée sous circulation). A noter que toutes les cellules ont fonctionné normalement.
- les graphiques d'évolution des pressions totales pour les 3 profils instrumentés (Fig 74, 75, 76)) ainsi que l'évolution des valeurs moyennes mesurées (Fig.77).

Des commentaires peuvent être formulés à deux niveaux sur cette expérimentation:

- Tout d'abord et globalement, on peut dire que la "pose en dépression" utilisant le Pneusol a atteint son objectif. Si on se reporte au diagramme représentant l'évolution des pressions totales sur un profil moyen de P1, P2, P3 (Fig.76), on peut constater que les pressions totales enregistrées sous la couche de Pneusol sont inférieures aux pressions totales enregistrées dans les remblais adjacents (excepté au droit de la longrine de clé où les pressions sont plus élevées). Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point particulier.

Les valeurs les plus faibles sont enregistrées au droit des articulations avec des contraintes variant de 0,17 à 0,21 MPa. En limite de la nappe mais à l'intérieur de celle-ci, elles sont de l'ordre de 0,23 à 0,27 MPa et, enfin, dans les remblais latéraux, de l'ordre de 0,27 à 0,40 MPa.

Les contraintes mesurées au droit des articulations de l'ouvrage sont donc de l'ordre de 35% à 45% inférieures à celles mesurées en dehors de l'emprise de l'ouvrage.

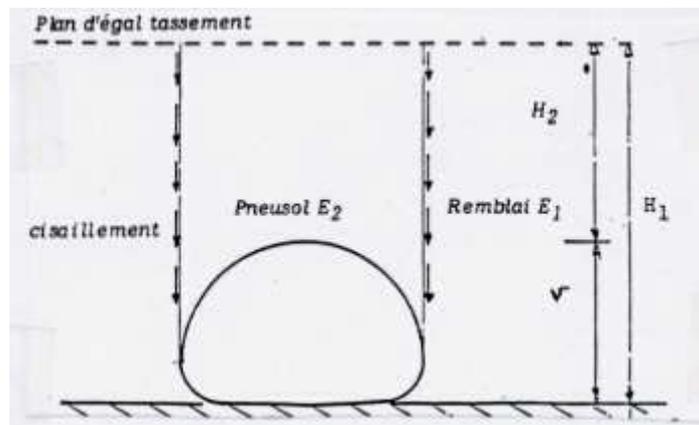


Figure 73 : Plan de situation des capteurs sur la buse de Monistrol-sur-Loire

Les valeurs de contraintes élevées mesurées dans la partie centrale de l'ouvrage peuvent être liées à la proximité de la longrine en béton située à une quinzaine de centimètres sous les capteurs et qui constitue de ce fait un point dur. Pour remédier à ce problème, on doit utiliser un Pneusol d'épaisseur variable, plus épaisse dans la partie centrale que sur les bords, ou créer un module plus faible au centre que sur les côtés.

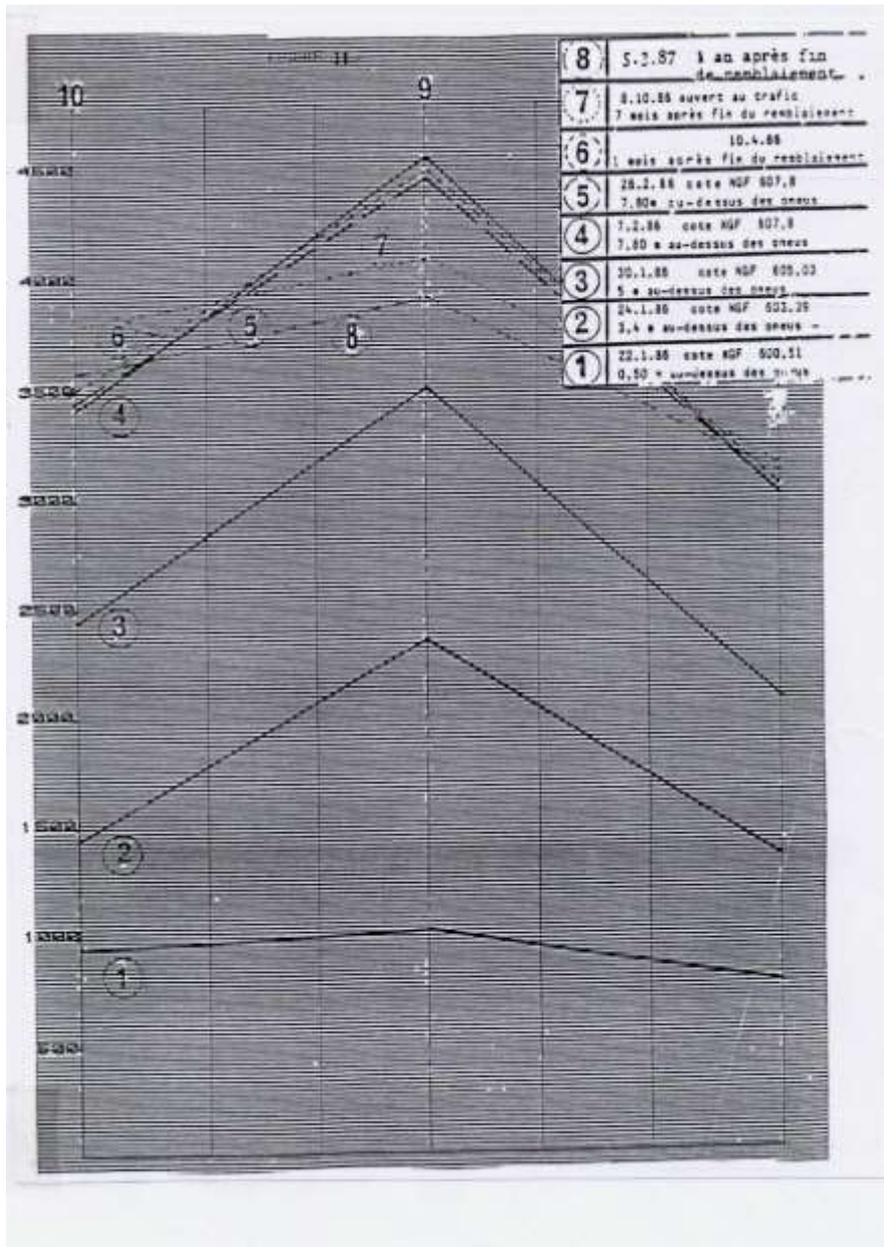


Figure 74 : Capteurs de pressions totales - Profil P1

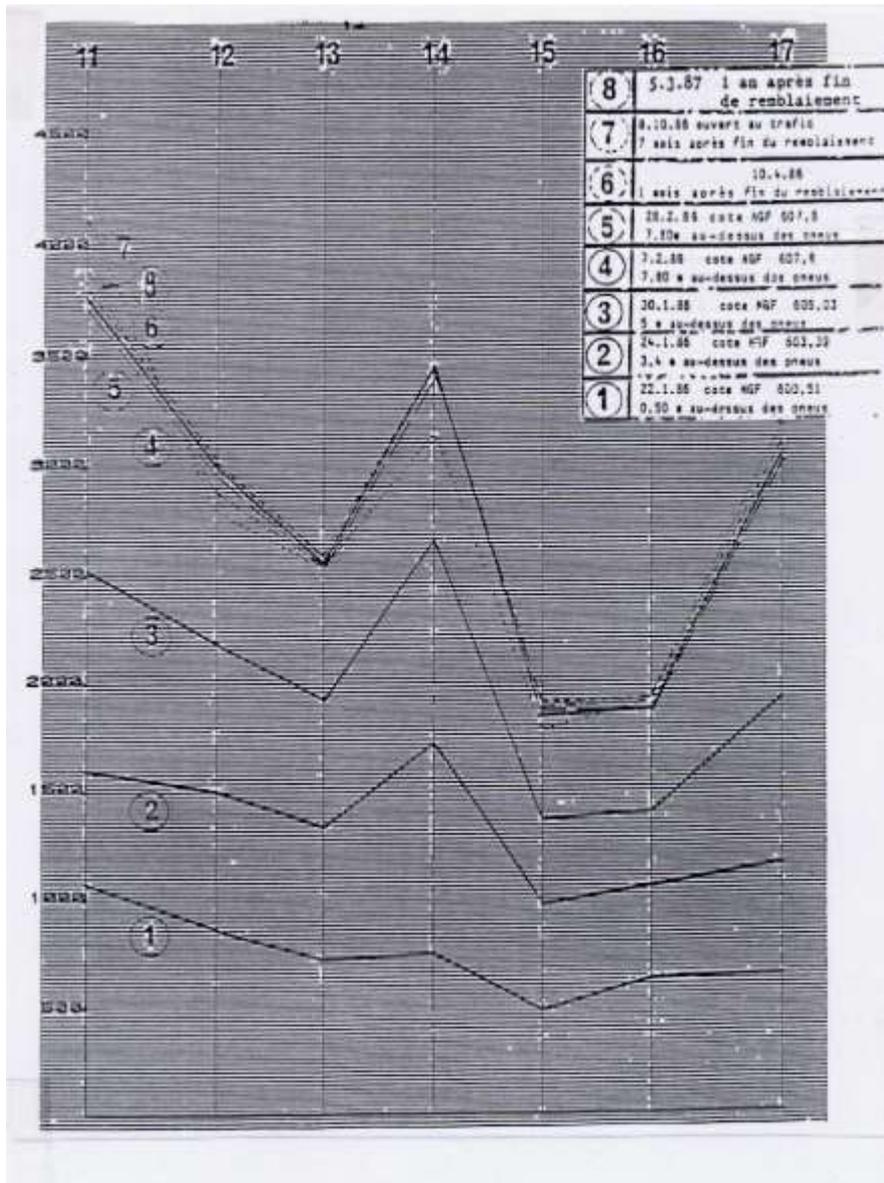


Figure 75 : Capteurs de pressions totales - Profil P2

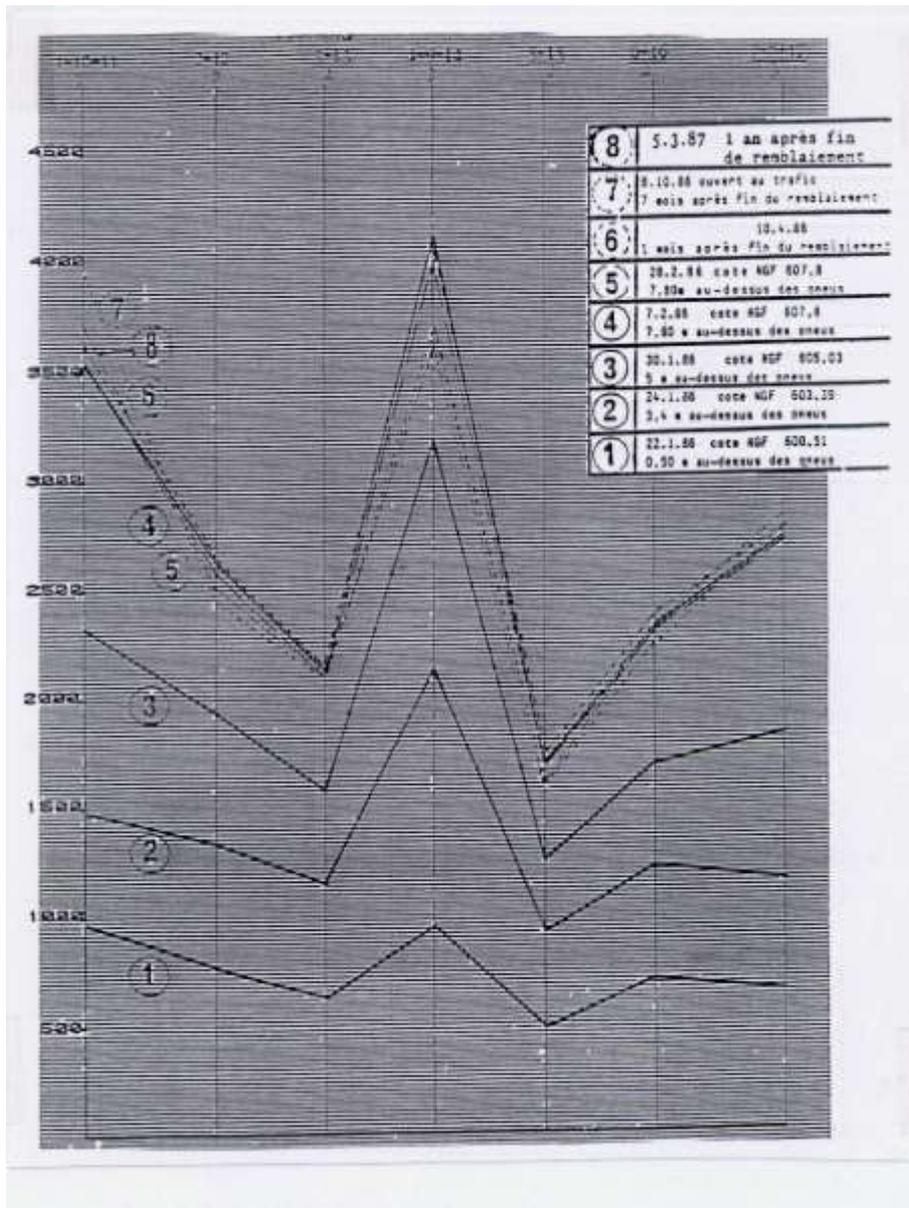


Figure 76 : Capteurs de pressions totales - Profil P3

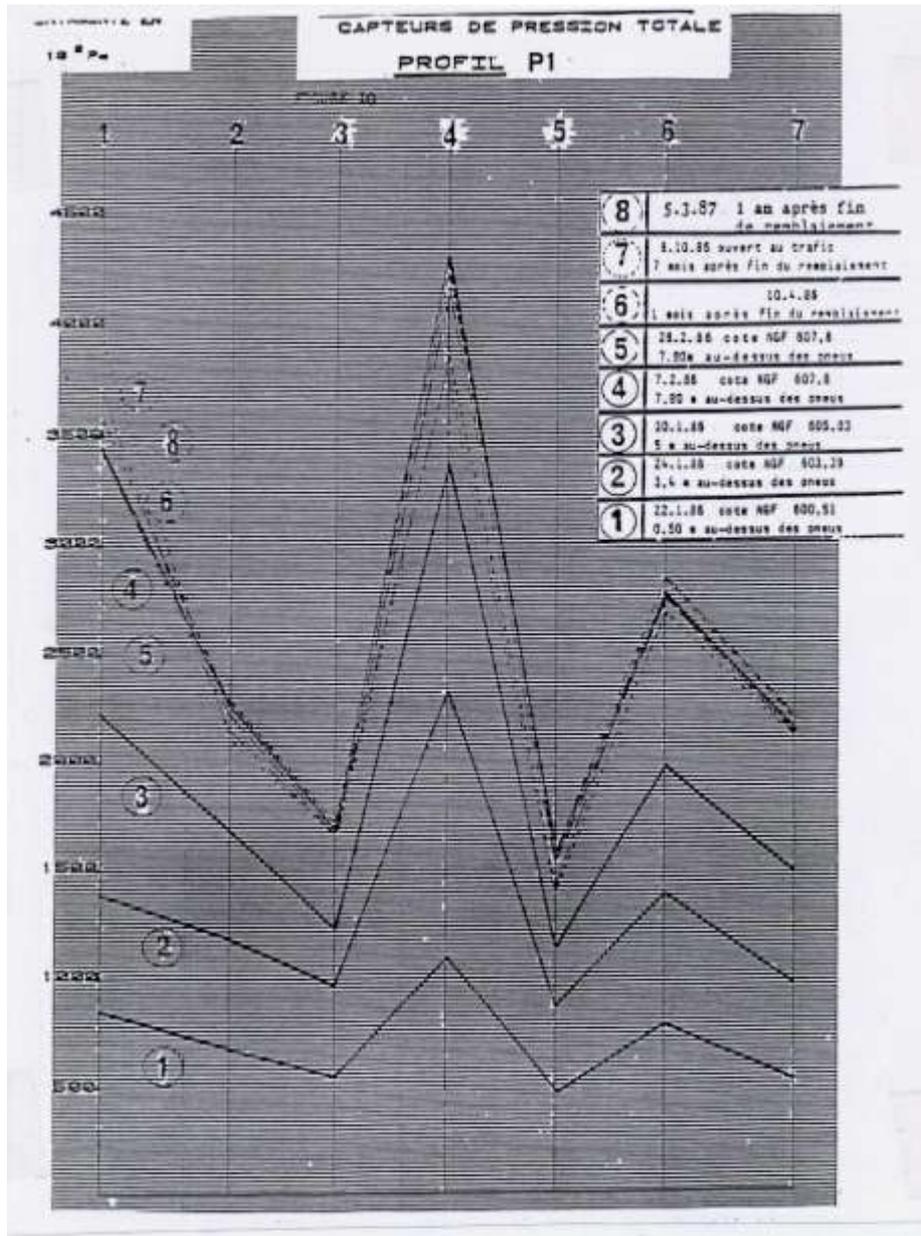


Figure 77 : Capteurs de pressions totales, moyennes de P1, P2, P3.

- On peut ajouter les observations suivantes:

* Jusqu'à une hauteur de remblai de 3,40 m. au-dessus du Pneusol, l'accroissement de pression totale est sensiblement régulier pour l'ensemble des capteurs (excepté au-dessus de la longrine de clé où elles sont plus rapides). Entre la mesure (1) et la mesure (2), soit pour une montée de 3 m (60 kPa), cet accroissement moyen de la pression totale est de 50 kPa au sein du remblai et aux droits des articulations. L'effet de voûte ne s'est pas encore développé;

* Entre les mesures (2) et (3), c'est à dire lorsqu'on passe de 3,40 m à 5 m au-dessus du Pneusol (de l'ordre de 32 kPa), la pression totale croit beaucoup plus rapidement dans les remblais latéraux (de l'ordre de 70 à 80 kPa) qu'aux droits des articulations (30 à 35 kPa). La déformation du Pneusol est suffisamment importante pour déclencher l'effet de voûte ;

* de la mesure (3) à la mesure (4), c'est à dire lorsqu'on passe de 5 à 7 m (de l'ordre de 56 kPa), le phénomène de répartition s'amplifie:

- 40 à 50 Pa au droit des articulations,
- 60 à 65 kPa en limite du Pneusol,
- 90 à 120 kPa dans les remblais latéraux
- 90 kPa à la clé.

On retrouve ici des résultats à peu près identiques à ceux obtenus pour les mesures (1) et (2);

* lors des mesures (5) et (6), c'est à dire jusqu'à 1 mois après la fin du remblaiement, les valeurs restent relativement constantes, bien que la hauteur du remblai passe de 7,8 m à 8,2 m au-dessus des pneus, du fait de la réalisation de la chaussée ;

* pour ce qui concerne les mesures dans le temps qui ont été réalisées jusqu'à un an après la construction de l'ouvrage, on notera une légère diminution des pressions au droit de la clé de voûte

Les valeurs des contraintes mesurées dans le remblai en dehors de l'emprise de l'ouvrage augmentent par contre très légèrement (de 4 à 19 kPa) montrant ainsi la poursuite du développement de l'effet de voûte ;

* enfin, si l'on compare la valeur de la surcharge apportée par le remblai au-dessus des capteurs (10,40 m) aux valeurs des contraintes mesurées, on obtient les résultats suivants un an après l'achèvement des terrassements:

- contrainte apportée par le poids des terres: 220 kPa environ ;
- contrainte mesurée au droit des articulations de l'ouvrage: 159,7 à 201 kPa ;
- contrainte mesurée dans le remblai en dehors de l'emprise de l'ouvrage: 281,3 à 382,8 kPa

;

* en outre, les mesures effectuées sur les jauges de déformation collées sur les aciers ont montré que la voûte en béton était entièrement comprimée.

3.3.4. Conclusions

L'utilisation du Pneusol dans le corps d'un remblai permet de réduire la charge appliquée à l'ouvrage par la formation de voûtes de décharge s'appuyant sur les remblais techniques contigus.

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

Plus de soixante ouvrages de ce type ont été réalisés à ce jour selon cette technique, donnant entièrement satisfaction. Certes, d'autres techniques basées sur le même principe, comme le remplacement du Pneusol par du remblai peu ou pas compacté, de la paille, de la sciure de bois donnent des résultats équivalents. Ces matériaux présentent cependant l'inconvénient d'une méconnaissance totale de leurs caractéristiques mécaniques (leur module, par exemple) et leur mise en œuvre malaisée (remblai non compacté). De plus, pour les autres, leur comportement dans le temps laisse à désirer car ils pourrissent et l'état des contraintes autour des conduits ne serait plus homogène.

Les avantages du Pneusol résident dans la facilité de sa mise en œuvre et dans la constance de la valeur de son module de déformation au cours des travaux, notamment avec la circulation des engins de terrassement, et au cours du temps après la fin des travaux. Le rapport du module du Pneusol par rapport au sol est toujours de l'ordre 1/3 à 1/4.

Des calculs plus poussés sont actuellement entrepris pour mieux cerner le phénomène de répartition des contraintes. Plusieurs plans d'égal tassement sont ainsi mis en évidence (LONG et VEZOLE, 1993), et on les retrouvera par la suite dans l'étude du Pneusol par les éléments finis.

3.3.5. Etudes numériques

a) Généralités

Le code de calcul CESAR-LCPC, dont le développement a débuté en 1981, est le successeur du système ROSALIE développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de 1968 à 1983. C'est un programme général de calcul par la méthode des éléments finis, particulièrement adapté à la résolution des problèmes de génie civil et de génie industriel; calculs des structures, mécanique des sols et des roches, thermique, hydrogéologie. (HUMBERT 1989)

Réaliser une modélisation avec CESAR-LCPC se traduit en général par l'enchaînement des étapes suivantes:

- * utilisation du pré-processeur MAX pour la généralisation des données de CESAR (maillage et autres données);

- * lancement du programme de calcul par éléments finis CESAR qui effectue la résolution numérique du problème étudié;

- * utilisation du post-processeur PEGGY pour l'interprétation des résultats sur écran graphique et la réalisation des sorties graphiques sur traceur.

b) Caractéristiques et calculs

Les calculs effectués ont essentiellement pour but de vérifier de manière qualitative l'amélioration de l'effet de voûte par l'utilisation du Pneusol sans prendre en compte les caractéristiques réelles du conduit et des matériaux de remblais utilisés.

Le cas d'école considéré est une voûte semi-circulaire en béton armé de 2,5 m de rayon et 0,3 m d'épaisseur; le niveau du substratum granitique est à 2,5 m en dessous de la base du conduit (DOAN et al, 1992, 1993).

Les caractéristiques mécaniques sont indiquées ci-dessous :

Tableau 16 : Caractéristiques mécaniques adoptées

	E(MPa)	ν	γ (kN/m ³)
Béton	25000	0,3	25
Pneusol	10	0,1	10
Sol	90	0,3	20

Les limites du maillage, sont définies verticalement par:

- * la hauteur maximale du remblai au-dessus de la buse,
- * les rayons intérieur et extérieur de la buse,
- * le niveau du substratum rigide,

et, horizontalement par une longueur L égale à 6 fois le rayon de la buse, au-delà de laquelle on admet que le sol n'est pas perturbé par la présence du conduit.

Les déplacements latéraux (direction Ox) sont nuls sur l'axe de symétrie et le long de l'autre limite verticale du maillage.

Les déplacements verticaux sont nuls au niveau du substratum rigide et au niveau de la semelle du conduit, fondée sur des micro-pieux (Fig.78).

Deux lois de comportement ont été utilisées :

* modèle élastique linéaire. Cette première étude suppose une loi élastique, linéaire et isotrope pour l'ensemble des matériaux. Elle a permis de déterminer l'influence des paramètres suivants:

- hauteur du remblai,

- module du sol,
- longueur de la couche de Pneusol;

* modèle élastoplastique. La deuxième étude est limitée à l'étude de l'influence de la longueur du Pneusol, avec respectivement les hypothèses suivantes :

- élasticité linéaire isotrope pour la buse en béton et le Pneusol,
- élastoplasticité avec le critère de Mohr-Coulomb pour le sol,
- lois de comportement spécifiques pour les éléments de contact entre le sol et le béton pour des contacts de type "adhérence", frottement de Coulomb et glissement parfait, respectivement.

L'effet Marston est défini localement par le rapport K de la contrainte verticale à la pression correspondant au poids des terres sus-jacentes.

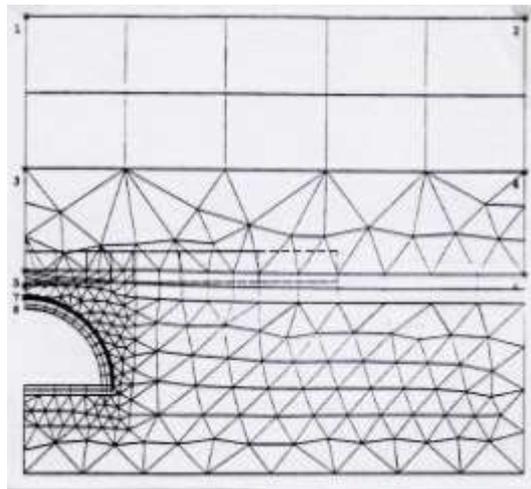


Figure 78 : Maillage automatique

c) Résultats du calcul

c.1. Résultats obtenus avec un modèle élastique

+ Influence du module du sol

Le tableau 17 et la figure 79 montrent la variation du coefficient de Marston pour une hauteur de 10 mètres en fonction de la longueur du Pneusol L_p et du module du sol E . La couche de Pneusol a une épaisseur d'un mètre et un module de 10 MPa.

Tableau 17 : Variation du coefficient de Marston

longueur Pneusol Lp(m)	E=50 MPa		E=70 MPa		E=90 MPa		K
	P(kPa)	K	P(kPa)	K	P(kPa)	K	
0,00	288	1,44	275	1,38	264	1,32	
2,80	190	0,95	163	0,81	143	0,71	
3,50	198	0,99	170	0,85	153	0,75	
5,00	210	1,05	185	0,92	168	0,84	
7,50	220	1,10	200	1,00	185	0,92	

Ces résultats appellent plusieurs remarques, qui ont une influence sur l'utilisation pratique du Pneusol:

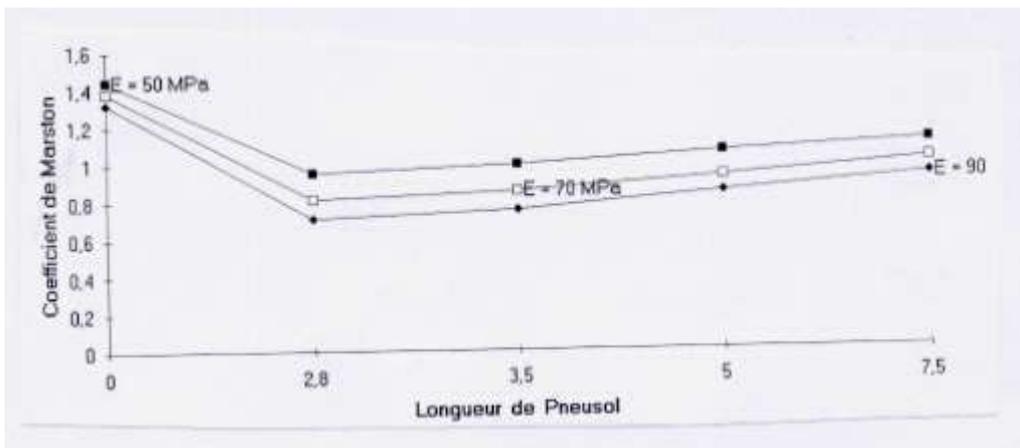


Figure 79 : Coefficient de Marston en fonction de E (H=10m)

* la concentration des contraintes sur la génératrice supérieure d'un conduit rigide diminue avec le module du matériau de remblai utilisé. Pour $L_p = 0$, le coefficient K passe de 1,44 à 1,32 quand le module du sol passe de 50 MPa à 90 MPa. On a donc tout intérêt à utiliser un bon matériau de remblai technique ;

* pour une hauteur de couverture donnée (10 m), il existe une longueur minimale de la couche de Pneusol donnant le maximum de report des charges. Elle est à peu près égale au diamètre du conduit. Une augmentation sensible de cette longueur entraîne par contre une faible augmentation du coefficient de Marston.

+ Influence de la hauteur de couverture H

Pour une valeur donnée du module du sol égale à 50 MPa , on a fait varier la longueur du Pneusol en fonction de H. Le tableau 11 montre l'ensemble des résultats obtenus.

Tableau 18 : Variation du coefficient de Marston

longueur Pneusol	H = 3m		H = 5m		H = 10m	
(m) (kPa)	K	P(kPa)	K	P(kPa)	K	P
0,00	69	1,15	132	1,32	288	1,44
2,80	52	0,87	93	0,93	190	0,95
5,00	54	0,90	102	1,02	210	1,05
7,50	54	0,90	105	1,05	220	1,10

La valeur de la longueur minimale du Pneusol ne semble pas changer et influe relativement peu sur le coefficient de Marston pour les faibles hauteurs de couverture. *Le Pneusol serait d'autant plus efficace que la hauteur de couverture est importante.*

+ pression sur le conduit

La pression calculée sur le conduit augmente de la semelle vers la clé de voûte en passant par un maximum dont la localisation et la valeur dépendent des paramètres étudiés. Un exemple de courbe de variation est indiqué dans l'étude avec le modèle élastoplastique.

c.2.Résultats obtenus avec un modèle élastoplastique

Nous avons adopté pour le sol et les éléments de contact les valeurs suivantes:

angle de frottement $\Phi = 30$ degrés
 cohésion = 0

+ Déformation de la structure

Pour une structure comportant une couche de Pneusol de 2,80m de largeur et une couverture de 10 m, on peut observer d'importantes distorsions du maillage au voisinage du conduit et un état général de plastification du sol.

La figure 80 montre les lignes d'égal tassement vertical du remblai au voisinage du conduit. On observe qu'à l'intérieur du Pneusol les lignes sont à peu près horizontales.

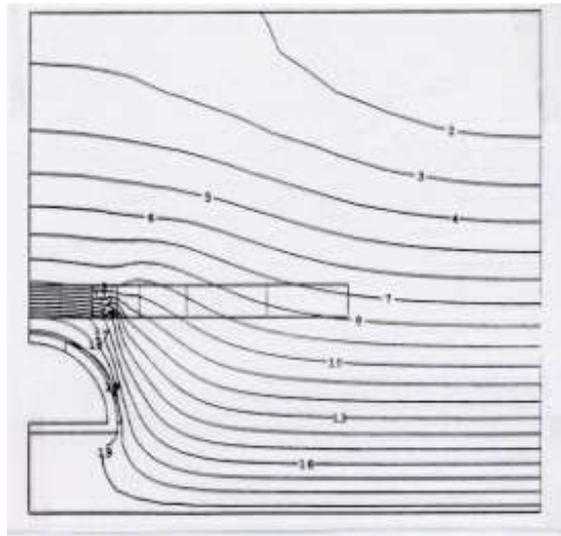


Figure 80 : Lignes d'égal tassement (DOAN et al, 1992)

Pour la ligne 14, le tassement au niveau de la génératrice supérieure est à peu près égal à la ligne horizontale passant par la semelle. Le glissement est observé sur la moitié du conduit.(Fig.81)

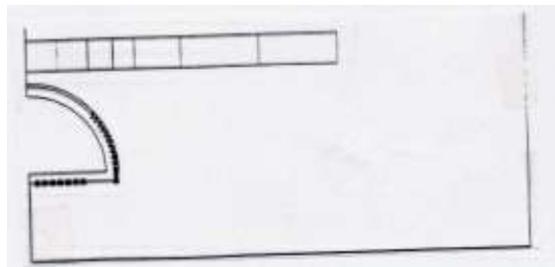


Figure 81 : Points de glissement du sol au contact du béton

+ Influence de la longueur du Pneusol

Nous montrons les résultats pour une hauteur de 10 m pour illustrer l'allègement des contraintes observé sur la clé et, d'autre part, le rôle de répartiteur de contraintes du Pneusol.

La figure 82 montre la répartition des contraintes verticales sur une ligne horizontale passant au-dessus du conduit en fonction de la longueur du Pneusol de 0 à 10 m.

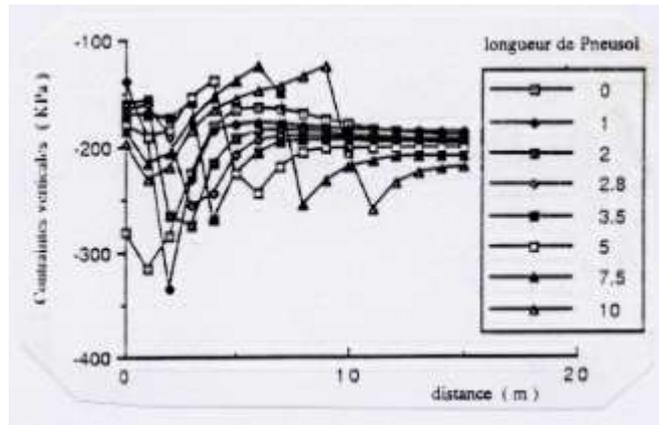


Figure 82 : Répartition des contraintes verticales

On remarque que :

* la contrainte maximale (sans PneuSol) n'est pas à la clé de voûte mais située approximativement à $2/3 R$. L'écart entre la valeur à la clé (275 kPa) et ce maximum (325 kPa) est de l'ordre de 50 kPa soit presque 20%;

* c'est certainement avec $L_p = 1\text{m}$ que le report des charges à la clé est le plus important (275 à 140 kPa) avec cependant un inconvénient majeur, celui de les reporter un peu plus loin mais toujours au-dessus du conduit, la contrainte verticale est de plus de 375 kPa, supérieure à la contrainte sans PneuSol (325 kPa).

* il y a peu de différence entre $L_p = 2\text{ m}$ et $L_p = 2,8\text{ m}$ en valeur globale pour l'effet de voûte mais la contrainte verticale maximale reste très proche de l'ouvrage pour $L_p = 2\text{m}$;

* lorsque la longueur du PneuSol L_p est inférieure à 7,50 m, à partir de 15 m toutes les courbes se rejoignent (poids des terres) excepté pour $L_p = 10\text{m}$.

Par contre, si on observe les contraintes maximales obtenues dans le béton sur la fibre interne et externe de la section, on constate sur une zone correspondant approximativement à $L_p = 1\text{m}$ et $L_p = 3,5$ à 5 m , la section du béton est complètement comprimée (Fig.83)

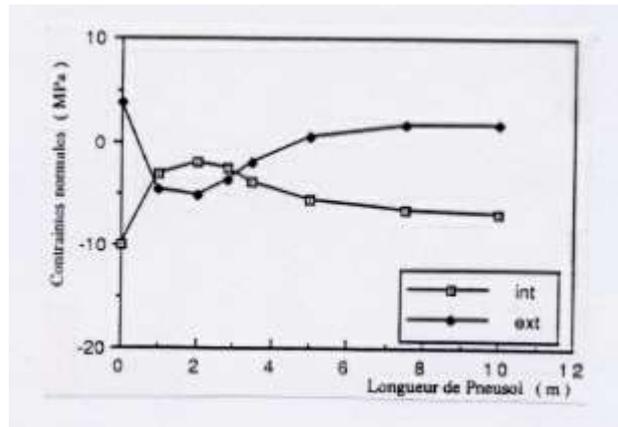


Figure 83 : Contraintes dans le béton du conduit

* toujours en faisant varier L_p , on peut obtenir une distribution des pressions quasi uniforme.

3.3.6. Canalisations de Mouans-Sartoux (Alpes Maritimes, 1988).

a) Introduction

A la demande de la DDE des Alpes Maritimes, le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nice et le LCPC ont été consultés pour formuler un avis sur la pérennité et le cas échéant sur les dispositions constructives à prendre, d'une canalisation d'eaux usées de diamètre 300 mm située dans les emprises des terrassements de la future RN 85 (déviation de Mouans-Sartoux).

Cette canalisation en tuyaux de fibres ciment Eternit a été posée entre 1975 et 1980 et découverte accidentellement lors des premiers travaux de terrassement. Elle est actuellement remblayée sur une hauteur de 2 à 2,50 m au maximum.

Le projet de déviation recoupe cette canalisation sur une longueur de l'ordre de 950 m et il est prévu localement des remblais, au droit de celle-ci, de 8,50 à 11 m de hauteur. Les questions posées étaient les suivantes :

* la charge de rupture des canalisations en place est-elle compatible avec les hauteurs de remblais prévues?

* des dispositifs constructives créant un "effet de voûte" permettraient-elles de ramener la charge au droit du conduit à des valeurs inférieures à la charge de rupture ?

b) Charge de rupture de la canalisation

La société Eternit consulté, suppose à contrario, que le tuyau, posé entre 1975 et 1980 (série 9.000) a une charge de rupture de 2.700 kN/m.

D'après leurs calculs, élaborés à partir des instructions du fascicule 70 du CCTG, la charge qui s'exercera sur un tuyau de diamètre nominal 300 mm et d'épaisseur 17 mm serait de:

- 5026 daN/m à une profondeur de 8,50 m
- 6516 daN/m à une profondeur de 11 m pour des tuyaux fabriqués à partir de 1985
- 5572 daN/m à 8,50 m
- 7224 daN/m à 10 m pour des tuyaux 9000 fabriqués entre 1975 et 1980

On constate, donc d'après ces calculs que la charge effective relative au projet dépasse très largement la charge de rupture supposée des conduits actuels qui théoriquement ne supportent que 3,40 m de remblai pour un lit de pose de 120° sur sol compacté, et 4,50 m pour 180° sur un lit de pose en sol-ciment.

c) Expérimentation sur Pneusol

Les hauteurs de remblai projetées n'étant pas admissibles pour la conduite, nous avons proposé au Maître d'Œuvre l'utilisation du Pneusol pour créer une voûte de décharge et une expérimentation pour quantifier son effet.

L'expérimentation a consisté à creuser une tranchée de 20 m de long, 1,5 m de profondeur et 1,1 m de largeur et à mesurer les contraintes totales induites par un remblai de 6 m de hauteur en fond de tranchée comblée pour moitié (10 m) par du Pneusol et pour moitié par du remblai ordinaire non compacté.

Outre les mesures de contraintes en fond de tranchée, nous avons disposé deux capteurs au niveau du terrain naturel pour servir de référence.

Les résultats des mesures sont indiqués dans le tableau 19 dans lequel les pressions sont indiquées en kPa.

En creusant la tranchée, on crée déjà un effet de voûte par le biais du frottement sur les parois et le tassement du Pneusol augmente cet effet de voûte.

On constate que l'allégement dû au Pneusol est important, bien que la hauteur de remblai soit relativement faible (entre 6 et 7 m).

Tableau 19 : Contraintes verticales mesurées en fond de tranchée

Mesure n°	1	2	3	4	5	6	7	
Date(1988)	08/06		10/06	17/06	26/06	07/07	20/07	20/08
Hm remblai	0		0	3	4,5	6	6	6,5
Remblai 1	0	0	50	74	95	74	78	
Remblai 2	0	0	90	106	130	110	114	
Pneusol 1	0	0	52	50	52	52	52	
Pneusol 2	0	0	32	28	28	28	28	
TN 1	0	0	63	140	188	150	165	
TN 2	0	0	980	150	195	158	158	

Par ailleurs, la stabilisation des pressions sous le Pneusol est assez rapide.

En supposant que le rapport entre la pression mesurée sous le Pneusol et celle mesurée au droit du niveau du terrain naturel est conservée (rapport voisin de 0,30 dans le cas le plus défavorable), on obtient pour un remblai de 11 m une pression sur le conduit correspondant sensiblement à une hauteur de terre de l'ordre de 3,70 m dans le cas d'une voûte de décharge tranchée-Pneusol.

On peut en outre considérer que l'ouvrage étant en place depuis longtemps son assise est bien consolidée et que le coefficient de pose est comprise entre 2,3 et 2,55, ce qui a pour effet d'augmenter la charge de rupture. Par ailleurs, de l'avis des spécialistes des ouvrages d'assainissement, le dimensionnement des canalisations est d'une manière générale assez sévère et conservatoire.

d) Conclusions

L'expérimentation effectuée a montré que l'on pouvait envisager de conserver la canalisation, la réalisation de la voûte de décharge étant faite selon la même méthodologie que pour l'essai en vraie grandeur, à savoir:

- creusement d'une tranchée de largeur comprise entre 0,8 m et 1 m jusqu'à 0,5 m de la génératrice supérieure de la conduite ;

- mise en place du Pneusol

Pour plus de précautions, nous avons préconisé d'ajouter une couche supplémentaire de Pneusol à la surface de la tranchée remblayée avec des pneus de poids lourds, pour éviter que la tranchée ne se compacte sous la circulation des engins de chantiers.

L'ensemble de l'opération s'est très bien déroulé et cette technique a par la suite été largement reprise pour des opérations similaires.

3.3.7. Conclusions

Plus d'une centaine d'ouvrages utilisant cette technique de "pose en dépression" ont été réalisés à ce jour en France et ont donné entièrement satisfaction.

La méthode de calcul simplifiée proposée donne de bons résultats et est parfaitement adaptée pour le dimensionnement pratique. Elle est facilitée par l'utilisation d'un programme de calcul mis au point par P.VEZOLE de la Forézienne d'Entreprises (1993) sur la base des mêmes considérations que MARSTON et SPANGLER.

3.4. PNEUSOL REDUCTEUR DE POUSSEE

3.4.1. Généralités

Les constatations effectuées sur les murs de soutènements en Pneusol avec un parement en béton ou en Pneusol ont montré de très sensible réduction de la poussée derrière ces parements. A partir de ces résultats, l'idée nous est venue de l'utiliser comme réducteur de poussée. La première application s'est effectuée sur un mur de soutènement construit à Mende et fondé sur des puits marocains. Le mur a 5 m de hauteur, 54 m de longueur et est légèrement sous-dimensionné au niveau du voile. Le Pneusol utilisé est constitué de bandes de roulement sur chant liées les unes aux autres de façon à constituer des nappes de 5 m de largeur et espacées de 0,5 m. Cette solution nécessite la découpe des pneus de tourisme, d'où l'idée d'utiliser des pneus entiers et notamment des pneus de poids lourds.(LONG, 1985).

Nous présentons ici les résultats des essais effectués à l'INSA de Lyon sur un modèle réduit tridimensionnel. Bien entendu, les inconvénients de ce genre de modèle sont connus, en particulier, le difficile respect des lois de similitude.... Ces recherches ont essentiellement pour but d'obtenir des résultats d'ordre qualitatif, qui permettent de mettre en évidence l'influence de certains des paramètres (largeur et hauteur du Pneusol, mur-poids ou mur cantilever,...). (LAREAL et LONG 1987, 1991, 1992)

3.4.2. Dispositif expérimental

Partant d'un fait bien connu en géotechnique, qui est qu'un sol cohérent pousse très peu du fait de sa cohésion, on peut prétendre qu'un sol judicieusement renforcé est un bon réducteur de poussée, à condition que son coût et sa mise en œuvre ne soient pas prohibitifs.

L'étude sur modèle a été réalisée à l'INSA de Lyon dans une cuve parallélépipède de dimensions: 0,8 m de hauteur, 0,8 m de largeur et 1,2 m de longueur (Fig.84).

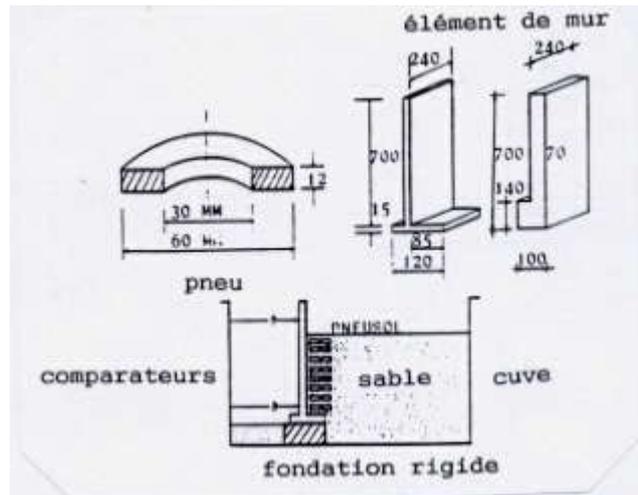


Figure 84 : Le modèle expérimental de l'INSA de Lyon

Le mur, mis en place sur la largeur du cuve, est composé de trois éléments identiques et indépendants afin d'éliminer les effets de bord. Les mesures de déplacement du mur ne sont effectuées que sur l'élément central. Le voile de chaque élément a 0,24 m de largeur et 0,7 m de hauteur, et la semelle a la même largeur et 0,12 m de longueur. La longueur amont de la semelle est de 0,085 m. Une bande de polyane forme un joint souple qui assure l'étanchéité et l'indépendance de chaque élément.

Les pneus utilisés sont en mousse de polyuréthane. Ce sont des couronnes de 12 mm d'épaisseur et respectivement de 30 et 60 mm de diamètre intérieur et extérieur (échelle de l'ordre du 1/20 par rapport à un pneu de poids lourd).

Le sol utilisé pour confectionner le massif en Pneusol, d'une part, le remblai, d'autre part, est un sable concassé de granulométrie uniforme ($D_{\min} = 0.30$ mm; $D_{\max} = 1$ mm). Il est mis en place par pluviométrie à un poids volumique constant de $14,3$ kN/m³.

Le poids volumique du Pneusol pour chaque espacement des nappes "e" et pour une disposition orthorhombique des pneus est donné par le tableau 20 :

Tableau 20 : Poids volumique mesuré du Pneusol

e(cm)	18	28	38	48	58	68	78	sable seul
γ (kN/m ³)	12,3	12,6	12,9	13,2	13,6	13,9	14,2	14,3

Le mur repose sur une fondation rigide, et son déplacement est contrôlé par deux comparateurs au centième de millimètre.

La nature et la géométrie respectives du mur, du sable et de chaque pneu étant fixées, les paramètres étudiés sont relatifs à la constitution du massif du Pneusol: l'espacement "e" des nappes de pneus entre elles, c'est à dire l'épaisseur de sable entre deux nappes, et le nombre "n" de pneus de chaque nappe. Deux types de murs ont été étudiés : le mur cantilever et le mur-poids. Pour chaque cas étudié, on mesure le déplacement du mur au fur et à mesure de la mise en place du Pneusol et du remblai.

3.4.3. Résultats des essais

Les résultats directs des mesures permettent le tracé de courbes $h = f(d)$ de la hauteur de remblai derrière le mur en fonction du déplacement de ce dernier.

a) Sable seul

Cette essai permet d'obtenir la courbe de référence pour la comparaison avec celles du Pneusol réducteur de poussée. On observe sur cette courbe des déplacements négatifs du mur, dus essentiellement, lors de la mise en œuvre du remblai, à la stabilisation de la semelle sur le massif de fondation, qui présente une certaine rugosité. Ces phénomènes parasites ne se stabilisent que lorsque la surcharge de sol est suffisante sur la semelle amont; ils seront notés dans tous les essais réalisés, mais n'affectent pas l'analyse des résultats (Fig.85).

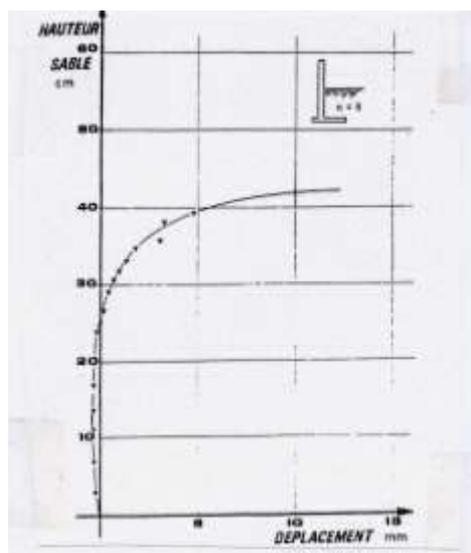


Figure 85 : Hauteur en fonction du déplacement (sable seul).

Cette courbe est similaire à la courbe de cisaillement d'un sable lâche. A partir d'une certaine hauteur de remblai, la mise en place des couches successives entraîne une augmentation rapide des déplacements et permet de tendre vers la hauteur critique de rupture de l'ouvrage, qui se renverse brutalement.

b) Mur avec Pneusol réducteur de poussée

Dans cette série d'essais, on étudie l'influence du nombre "n" de pneus par nappe pour un espacement des nappes constant, du type de mur (cantilever, mur-poids) et de la hauteur relative du remblai en Pneusol (mur mixte, c'est à dire remplacement partiel du sable par le Pneusol).

L'assemblage simple, de type carré, de chaque nappe comprend 4 pneus au contact de chaque élément de mur et est constitué de $4n$ pneus. On fait varier n de 1 à 4.

b.1. Influence du nombre de pneus

En comparant les courbes de la figure 86 entre elles, on observe que la pente de la courbe augmente avec le nombre n de pneus et que, pour $n = 3$ et 4 , la courbure devient très faible dans le domaine des hauteurs de remblai testées. De même, en dessous d'une certaine hauteur de remblai de l'ordre de 250 mm, toutes les courbes se confondent (le nombre de pneus ne joue aucun rôle), ce qui est logique puisque le mur sans Pneusol ne subit que peu de déplacement et est peu sollicité.

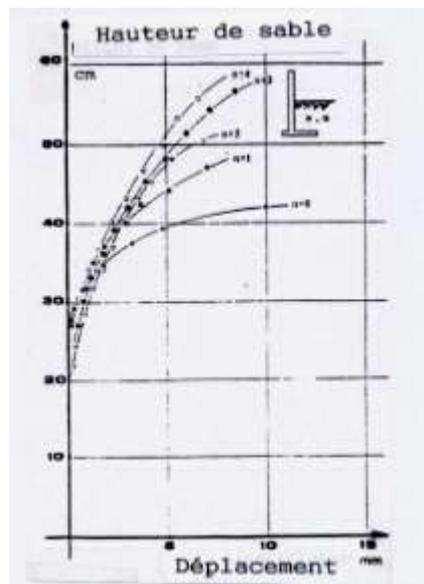


Figure 86 : Déplacement du mur en fonction de la hauteur du sable
Au-dessus de la semelle ($e = 18\text{mm}$, $n = 1, 2, 3, 4$)

Par contre, lorsqu'on approche de la hauteur critique, les renforcements entraînent une diminution sensible du déplacement. La rupture d'un mur sans Pneusol ou avec $n=1$ est brutale alors que, pour n supérieur à 1, cette rupture est progressive. La présence du Pneusol améliore toujours la stabilité du mur.

La relation entre le déplacement du mur (rotation autour de la base) et la hauteur du Pneusol et du remblai pour chaque nombre n est illustrée sur la figure 87.

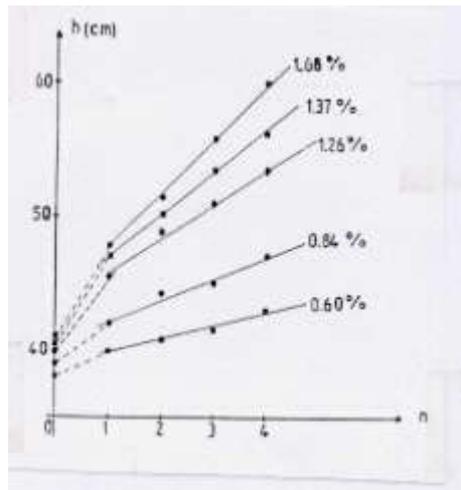


Figure 87 : Courbes $h = f(n)$ à $x\%$ fixé pour $e = 18$ mm.

On constate que:

- pour un déplacement fixé, la hauteur du remblai varie linéairement avec n ; plus le nombre de pneus augmente, plus la hauteur de remblai augmente ;

- pour des déplacements croissants, la pente de la droite et donc le gain de hauteur augmentent

Ainsi, en jouant sur le nombre de pneus par nappe, on constate que l'utilisation du Pneusol sera d'autant plus intéressante que les déplacements autorisés du mur seront élevés.

On observe que pour le sable seul ($n = 0$), les points de mesure ne sont pas situés sur les droites caractéristiques du Pneusol. La mise en place du Pneusol modifie la nature du massif mis en remblai derrière l'ouvrage, et donc son mode de fonctionnement. En effet, le massif du Pneusol a acquis une certaine "cohésion" qui réduit la poussée exercée sur le mur; de plus, il constitue en lui-même un massif plus déformable réduisant ainsi la poussée sur le mur à renforcer.

b.2. Influence de l'espacement entre les nappes de pneus

- Cas du mur cantilever

Pour un nombre de pneus fixé par nappe ($n=3$), on fait varier l'épaisseur de sable e entre chaque nappe.

La figure 88 représente les résultats obtenus pour différents déplacements du mur.

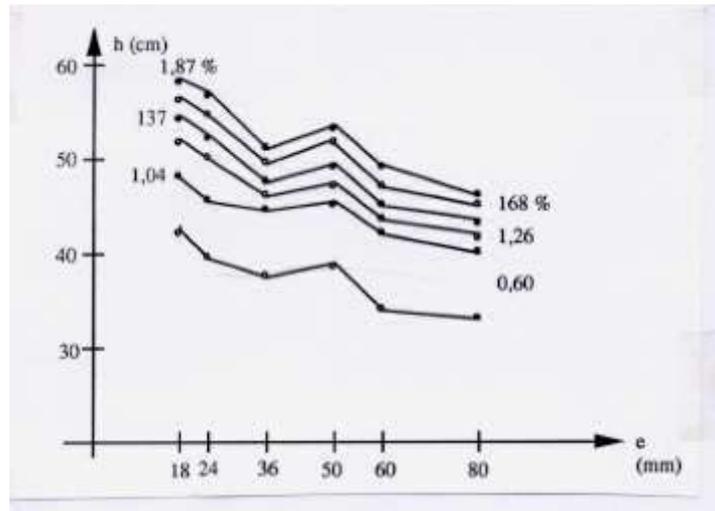


Figure 88 : Relation de $h = f(e)$ en fonction de la rotation du mur.

On constate que plus l'épaisseur des couches de sable est faible, pour un déplacement fixé, plus la hauteur atteinte par le remblai est élevée. En effet, quand e diminue, le Pneusol tend à se comporter comme un ouvrage poids composé de la juxtaposition d'un certain nombre de petits gabions posés les uns sur les autres en quinconce et en équilibre derrière le mur cantilever.

De même, l'influence de cette diminution de l'épaisseur est d'autant plus importante que le déplacement toléré du mur est élevé. Cependant, les points de mesure présentent une discontinuité pour $e = 50$ mm qui n'est pas expliquée, la reproductibilité de l'essai ayant été vérifiée.

Des essais ont été réalisés avec une épaisseur de sable nulle ($e = 0$) entre les nappes. Les résultats obtenus pour $n = 1$ et $n = 2$, confirment que, pour un déplacement donné, la hauteur de remblai atteinte augmente avec n .

L'étude de la stabilité d'un massif en Pneusol seul, monté verticalement ($e=0$) a mis en évidence l'influence de la disposition des pneus au sein de chaque nappe. Par exemple pour $n=2$, l'arrangement "cubique" utilisé dans tous les autres essais a été comparé à l'arrangement compact "orthorhombique". Ce dernier permet d'atteindre une hauteur critique du massif de 0,29 m au lieu de 0,22 m, soit un gain de plus de 30%.

Il faut remarquer que l'utilisation d'un remblai léger derrière un mur cantilever est en principe défavorable car on diminue le moment résistant dans le calcul de la stabilité de l'ouvrage.

- Cas du mur-poids

Le basculement du mur est obtenu pour une hauteur égale à 43 cm avec le sable seul. La courbe 89 montre bien qu'au fur et à mesure que l'espacement e des nappes augmente, la hauteur de rupture du mur avec Pneusol diminue jusqu'à devenir identique à un mur sans Pneusol pour $e = 88$ cm. Pour cet espacement, l'influence des pneus est nulle.

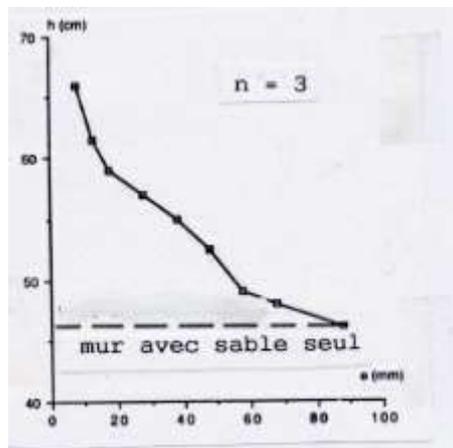


Figure 89 : Hauteur de rupture en fonction de l'espacement

b.3. Influence de la hauteur du Pneusol dans un "mur-mixte"

Pour des raisons économiques, il est quelque fois plus intéressant, pour renforcer un mur "malade", de décaisser seulement la partie supérieure de celui-ci et d'effectuer son remplacement par le Pneusol uniquement sur cette partie. C'est pour cette raison que des essais simulant cette condition ont été effectués, essais appelés "double-couches".

Si nous appelons H_r la hauteur de rupture du mur et H_s la hauteur du sable à partir de la fondation, la hauteur du Pneusol est alors donnée par la relation suivante: $H_p = H_r - H_s$

On observe sur la figure 90 que, pour une hauteur H_s inférieure à 23 cm, la hauteur totale de rupture d'un mur bi-couche est égale à la hauteur de rupture d'un mur entièrement en Pneusol. Il

n'est donc pas nécessaire de faire la substitution sur toute la hauteur du mur. Néanmoins, dans la pratique et jusqu'à ce jour, c'est tout le remblai qui est remplacé.

Ensuite, plus la hauteur de sable est élevée, plus la hauteur du mur "bi-couche" diminue, pour finalement atteindre la hauteur du mur de sable seul.

La réduction de la poussée due à la cohésion et au poids volumique faible du Pneusol, explique l'augmentation de la hauteur de rupture H_r du bi-couche par rapport au cas du sable seul.

La figure 91 montre une variation linéaire de la hauteur du Pneusol $H_r - H_s$, en fonction de la hauteur H_s de sable. La droite joignant l'abscisse H_s (hauteur du mur de sable seul) et l'ordonnée H_p (hauteur du mur avec uniquement du Pneusol) délimite deux zones : au-dessus de cette droite, se trouve la zone d'instabilité du mur bi-couche. En dessous et à l'intérieur des deux axes de coordonnées, c'est la zone de stabilité.

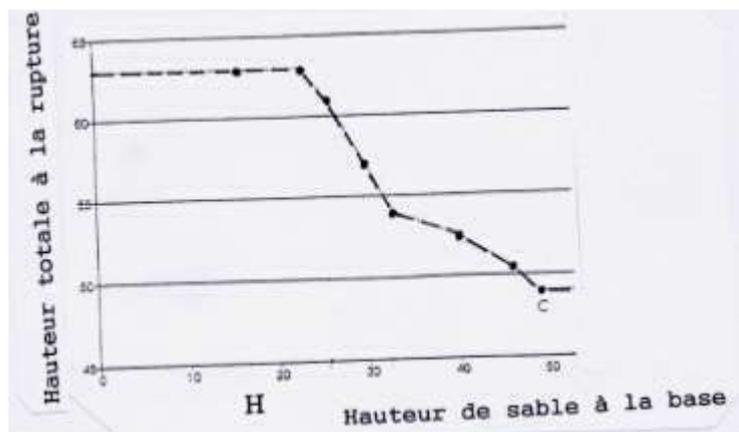


Figure 90 : Hauteur de rupture du mur "bi-couche"

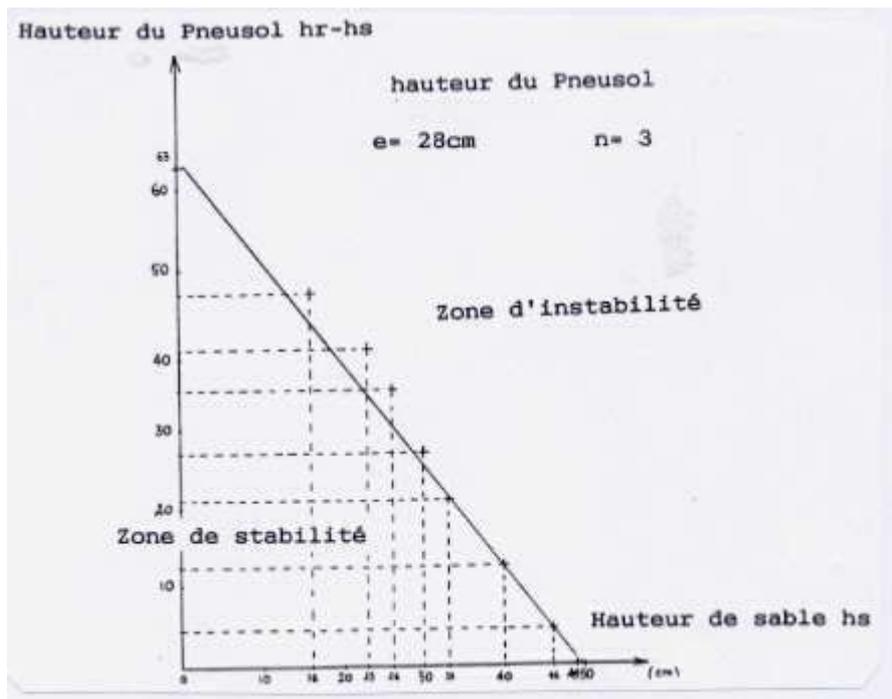


Figure 91 : Hauteur du Pneu-sol fonction de la hauteur de sable

L'ensemble des droites de stabilité correspondant aux différentes valeurs de n , (nombre de pneus par couche) et de e , (espacement des nappes), pivotent autour du point H_s , correspondant au mur sans Pneu-sol. Les essais ne sont pas assez nombreux pour tracer toutes ces droites.

b.4. Autres essais

Une campagne d'essais réalisés avec $n = 1$ et $e = 0$ a permis de comparer, pour le mur cantilever testé dans cette étude, le comportement d'un ensemble "mur + Pneu-sol" et d'un ensemble "mur + pneus sans sol". Cette dernière solution est non seulement plus défavorable par rapport à la solution Pneu-sol mais aussi par rapport au remblai c'est-à-dire sans pneus ; le pneu sans sol entraîne un trop grand allègement de la semelle amont, ce qui nuit à la stabilité du mur au renversement.

c) Réalisations

Dix ouvrages connus utilisant le Pneu-sol comme réducteur de poussée ont été construits en France. Le premier de ces ouvrages, cité au début du chapitre, a été réparé avec un Pneu-sol dit "lourd" avec des bandes de roulement sur chant disposées en nappes et liaisonnées par des bandelettes en polyester. Le remblai se trouvant à l'intérieur de la bande ne poussant pas et celui compris entre deux nappes se trouvant fortement fretté, le massif de Pneu-sol, si l'espacement des

nappes est faible, se comporte comme un mur-poids composé de milliers de petits gabions empilés les uns sur les autres.

Mais le cas le plus intéressant, similaire aux essais réalisés en laboratoire, est le mur de la Fonderie. Une heure avant le démarrage du chantier d'élargissement de la route nationale RN. 66 menant au col du Bussang, un mur ancien constitué de blocs vermoulus disposés de manière plus ou moins jointive, et se trouvant dans l'emprise (Fig.92), a été classé monument historique.

C'est la solution Pneusol qui a été immédiatement adoptée. Tenant compte des résultats des essais déjà réalisés, un Pneusol composé de nappes de pneus de poids lourds disposés de manière orthorhombique a été mis en place sur toute la hauteur du mur cyclopéen datant du 18^e siècle. Le dimensionnement est similaire à celui d'un mur-poids de poids volumique identique au Pneusol léger utilisé (10 kN/m^3). Des capteurs ont été disposés à l'intérieur du massif de Pneusol et du mur pour mesurer les contraintes horizontales et verticales. Les constatations et le dépouillement sont actuellement en cours.

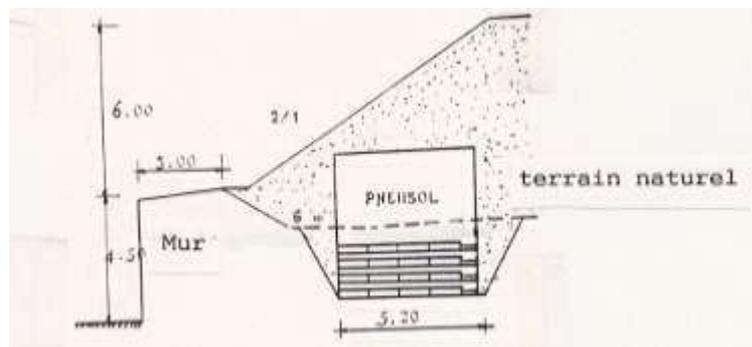


Figure 92 : Mur de la Fonderie

d) Conclusions

Ces essais sur modèle réduit tridimensionnel ont permis de mettre en évidence de manière qualitative l'effet réducteur de poussée du Pneusol. Il est d'autant plus important que le nombre de pneus par nappes est plus élevé et que l'épaisseur de sable entre les nappes est faible. Il existe aussi un espacement optimal au-delà duquel cet effet est nul.

Les essais avec le mur cantilever confirme l'efficacité du Pneusol car, bien que le mur soit fortement allégé sur sa base (diminution de son moment résistant), le Pneusol entraîne malgré tout une amélioration de la stabilité.

La présence du Pneusol diminue la soudaineté de la rupture lorsqu'on tend vers la hauteur critique.

Des abaques pourraient être déduits des droites de stabilité afin d'optimiser économiquement ce matériau car on peut éviter de décaisser le remblai sur toute la hauteur du mur mais seulement sur une partie de celui-ci.

Le dépouillement des constatations du mur de la Fonderie permettra certainement un affinement de la méthode de calcul et une meilleure connaissance du comportement de ce type de Pneusol.

3.5. PNEUSOL LEGER

3.5.1. Généralités

L'emploi des matériaux légers apporte des solutions intéressantes pour le franchissement des sols de faible portance. Que cette faiblesse provienne de la nature du terrain (vases, tourbes, argiles,...), ou de l'instabilité des pentes (éboulis..), la fondation sur les couches dures et stables est très coûteuse, tandis qu'un remblai classique ordinaire subira des déformations, des tassements différentiels insupportables pour les usagers et aussi pour l'ouvrage lui-même. Dans de nombreux cas, la solution idéale est un remblai léger qui évite un apport de charge incompatible avec la stabilité des sols de fondations ou des ouvrages voisins, et qui réduit de manière importante les tassements pour un surcoût acceptable.

La difficulté réside dans la recherche d'un matériau léger et économique. On trouve une variété importante de tels matériaux qui vont de l'écorce (pin et sapin) au polystyrène expansé en passant par les matériaux alvéolaires. Le principal problème de ces matériaux modernes est leur coût relativement élevé et parfois leur fragilité. Le critère économique nous a conduit à examiner l'utilisation des pneumatiques usagés non réchapables (ou Pnur). La notion de légèreté des matériaux est toute relative car il faut à notre avis, pour comparer les différents matériaux entre eux, prendre en compte non leur poids propre, mais celui de l'ensemble des matériaux et des structures de renforcement nécessaires (dalle, couche de forme plus importante, surdimensionnement de la chaussée). Le coût du matériau doit aussi être étudié en fonction de ce surcoût éventuel.

Les caractéristiques du Pneusol léger ont déjà été présentées. Nous ne revenons pas sur ces résultats. Par contre, il nous a paru intéressant de présenter trois cas d'applications et de réalisations de ce matériau, à Cannes Mandelieu, Bousios, Dommiers.

3.5.2 Cannes-Mandelieu (Alpes-Maritimes, 1985)

a) Aspects géologiques et géotechniques

Dans le cadre du projet d'aménagement de l'échangeur de Cannes-Mandelieu et de l'élargissement à deux fois trois voies de l'Autoroute A8, des études ont été entreprises par la société ESCOTA pour l'utilisation du polystyrène expansé comme matériau de remblai dans la traversée de la plaine de la Siagne en remblais de 3 à 8 mètres de hauteur sur environ deux kilomètres de longueur. C'est dans le cadre de cette opération qu'un remblai expérimental en Pneusol léger de 80 m de longueur et 3 m de hauteur totale (la couche de forme ayant 0,50 m d'épaisseur) a été réalisé. (BAILLY et al., 1988 ; LONG, 1990)

a.1. Reconnaissance géotechnique

Des essais en laboratoire et in situ (sondages carottés, pénétrations statiques) ont été effectués pour déterminer les caractéristiques géotechniques du sol de fondation.

Cette reconnaissance a fait apparaître schématiquement trois zones distinctes :

+ une zone superficielle d'argile et de limons plastiques de caractéristiques mécaniques faibles et dont l'épaisseur varie entre 6 et 10 mètres ;

+ une zone de sable fin ou de sable limoneux de caractéristiques nettement meilleures, mais néanmoins encore médiocres et hétérogènes, et d'épaisseur variant de 6 à 11 mètres;

+ une couche profonde de limons de caractéristiques faibles, quoique supérieures à celles de la couche superficielle, mais plus homogènes.

A l'époque de nos forages (janvier 1982) la nappe se trouvait à 3 mètres de profondeur, mais il est fort possible, compte tenu de la faible perméabilité des terrains, que le niveau hydrostatique soit en réalité plus haut. De toutes façons, en période de hautes eaux, la nappe affleure presque.

a.2. Résultats des essais de laboratoire

Les résultats des essais en laboratoire ont montré qu'il s'agit de matériaux, lâches et saturés, de compressibilité assez élevée :

- sables

$$w = 28\% \quad C_c = 0,12 \text{ à } 0,14$$

$$\gamma = 18,5 \text{ kN/m}^3 \quad e_0 = 0,68 \text{ à } 0,79$$

$$\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3 \quad C_c/(1+e_0) = 0,0075$$

- argiles et limons:

$$32 < w < 43 \% \quad C_c = 0,29 \text{ à } 0,46$$

$$7 < \gamma < 19 \text{ kN/m}^3 \quad e_0 = 1,00 \text{ à } 1,50$$

$$26 < \gamma_s < 27 \text{ kN/m}^3 \quad C_c/(1+e_0) = 0,17$$

a.3. Résultats des essais pénétrométriques

Les essais réalisés au pénétromètre statique de 100 kN montrent que les 3 zones précédentes ont les caractéristiques suivantes:

- la zone superficielle d'argile molle de très faible résistance, qui descend dans l'ensemble jusqu'à des profondeurs comprises entre 6 et 10 mètres, a une résistance de cône de 700kPa.

Toutefois, dans certaines parties du site, les premiers mètres sont encore plus faibles avec $q_c = 400 \text{ kPa}$;

- la couche intermédiaire a des caractéristiques meilleures, mais plus dispersées : $q_c = 2 \text{ à } 5 \text{ MPa}$. Cette formation, dans laquelle on a noté quelques pics de 7 à 10 MPa, correspond à la couche de sable décelée entre 12,30 et 16 m de profondeur par sondage carotté. La grande dispersion des mesures et certaines valeurs de q_c relativement modestes correspondent à des sables pollués par les limons. L'épaisseur de cette couche intermédiaire peut varier de 6 mètres à 16 mètres environ ;

- dans la couche profonde homogène on a :

$$q_c = 12 \text{ daN/cm}^2$$

Il s'agit des alluvions limoneuses de la Siagne, que l'on a retrouvées dans toute la zone de l'échangeur et qui s'étendent jusqu'à une profondeur non atteinte par notre reconnaissance, mais qui pourrait être d'une cinquantaine de mètres.

a.4. Tassement des sols sous un remblai classique

Enfin, le site, devant être recouvert d'un remblai de l'ordre de deux mètres de hauteur, subira un tassement d'environ 40 à 50 cm, avec des tassements différentiels de 10 à 15 cm.

b) Pneusol léger

Le remblai de Pneusol léger réalisé a une longueur totale de 80m et une hauteur de l'ordre de 2,50 m. Les rampes d'accès sont également réalisées en Pneusol. Le remblai d'essai comporte deux sections qui se différencient par la conception du Pneusol, avec ou sans géotextile (non-tissé) entre chaque lit de pneus et par sa couche de forme avec ou sans géogrille à l'intérieur de celle-ci. (Fig.93). Ce géogrille placé sous la couche de forme permet de voir éventuellement son influence sur la chaussée.

Il est certain que, en cas d'utilisation d'un non-tissé, aucun matériau de remblai n'entre dans le volume des vides laissé par la chambre à air. Mais les essais préliminaires (LONG et al., 1987) ont montré que cette différence est minime, voire négligeable.

Notons que le Pneusol léger, construit couche par couche (empilement en quinconce des pneus), permet aussi d'absorber partiellement les tassements différentiels.

Chacune des sections a été réalisée comme suit :

a) le terrain naturel est nettoyé mais non décapé de sa terre végétale (pour avoir des conditions les plus défavorables possibles) ;

b) la mise en place d'une couche de base de 0,2 m d'épaisseur sur le terrain existant, en matériau drainant concassé 0/60 mm ;

c) sur cette base, les pneus du premier lit sont posés à plat en disposition hexagonale excentrée (figure 94) puis recouverts ou non d'un géotextile, et ensuite remblayés (remplissage de la jante et des vides entre les pneus) sur une épaisseur d'environ 25 à 30 cm, puis compactés ;

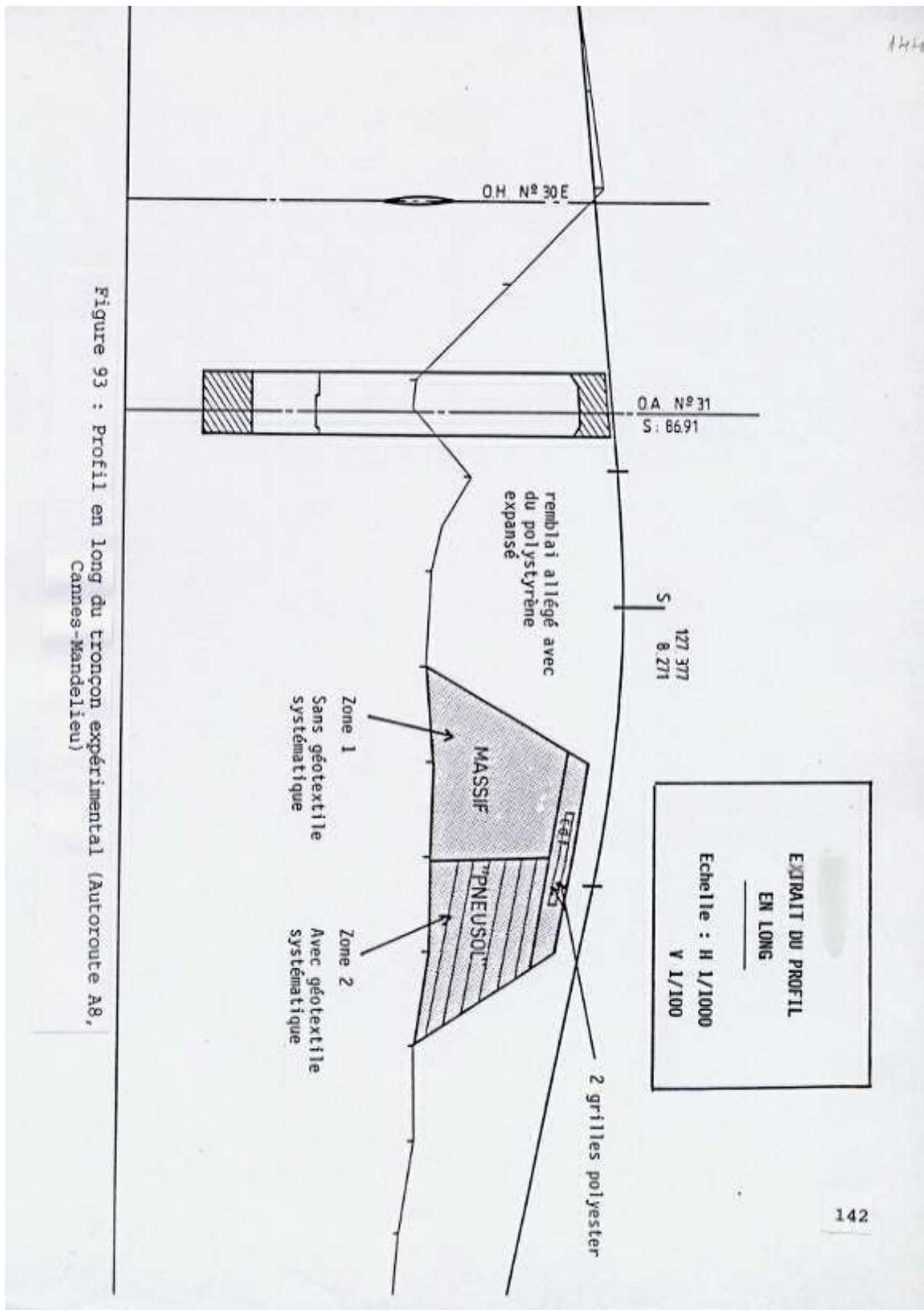


Figure 93 : Profil en long du tronçon expérimental (Autoroute A8, Cannes-Mandelieu)

d) ensuite on pose un second lit de pneus, décalé par rapport au premier d'un demi-diamètre, de manière à ce que le caoutchouc du premier lit se trouve sous le remblai du second, et on poursuit les opérations précédentes et ainsi de suite jusqu'au niveau supérieur du massif de Pneusol (Fig.94) ;

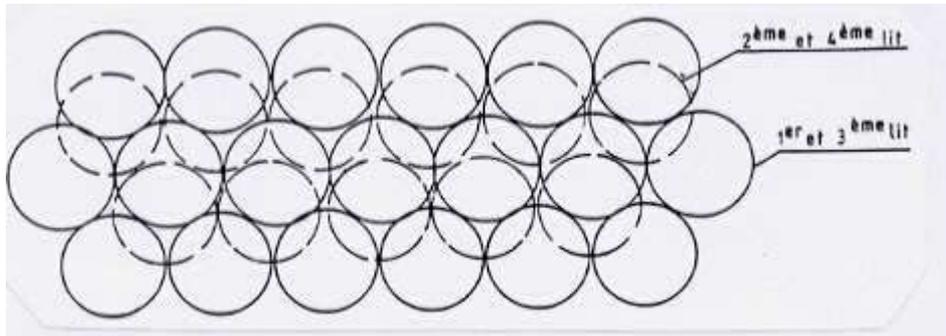


Figure 94 : Schéma de pose en plan des pneus.
(Disposition orthorhombique)

e) les matériaux utilisés sur le site sont :

- un matériau concassé 0/60 mm pour le mètre supérieur du Pneusol,
- un matériau de remblai 0/100 mm pour le reste du massif de Pneusol, les talus latéraux et les rampes d'accès ;

f) le remblai côté talus, est monté en même temps que le massif de Pneusol (Fig.95) ;

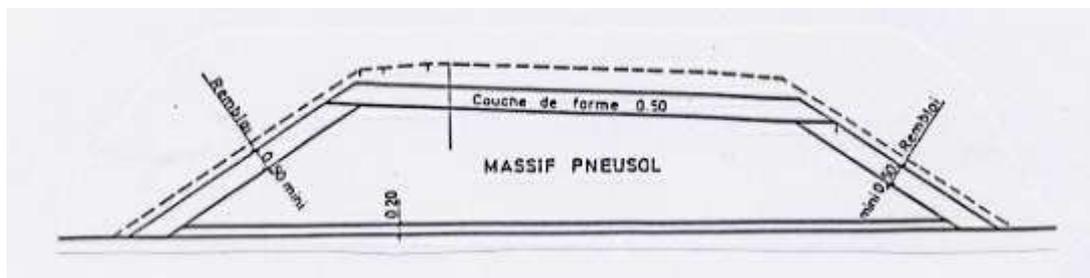


Figure 95 : Profil du remblai en Pneusol léger

g) le dernier lit de pneus est recouverte d'un non-tissé dans les deux sections (Bidim U19) ;

h) le compactage de chaque lit a comporté 2 passes de compacteur vibrant type BOMAG BW 200 pour les parties de Pneusol réalisées avec du remblai 0/100 et permis d'atteindre une compacité de 95% de l'OPM pour les parties de Pneusol réalisées avec du matériau 0/60 ;

i) la couche de forme est réalisée avec un matériau concassé 0/60 sur une épaisseur d'environ 50 cm.

A cheval sur les deux sections de 20 mètres en Pneusol et sur une longueur de 20 mètres, la couche de forme est armée de deux nappes de grilles en polyester espacées de 0,15 m, la nappe inférieure étant posée à 0,15 m du fond de forme.

Ce remblai expérimental comporte une instrumentation légère du sol support, du corps de remblai, réalisée par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Aix-en-Provence (tassomètres, capteurs de pression, nivellement en surface).

La détermination de l'épaisseur de la couche de forme tient compte des expériences acquises dans le domaine du terrassement, à savoir que le module d'un bicouche, par exemple un limon surmonté d'une grave de très bonne qualité, n'est presque plus influencé par le faible module du premier si l'épaisseur du second atteint une certaine hauteur dépendant de ce module.

Une petite planche expérimentale a été réalisée et a confirmé le bien fondé de ce résultat. Deux hauteurs ont été choisies, 15 et 60 centimètres. Déjà à 15 cm, E_{v2} atteint la valeur de 60 MPa et le rapport E_{v2}/E_{v1} est de 3. Pour 60 cm, E_{v2} est égale à 700MPa et $E_{v2}/E_{v1}= 2$.

A la fin de la construction de la couche de forme de 50 cm d'épaisseur, un contrôle systématique de l'ensemble de la plate-forme a montré que le module dynamique est comprise entre 63 MPa et 140 MPa (70 points de mesures).

Les deux parties de la couche de forme (renforcée et non renforcée) ne présentent absolument pas de différence, à la dispersion des résultats près.

c) Chaussée retenue pour le Pneusol

Ces bons résultats ont permis de choisir une chaussée classique parmi celles que nous avons envisagées :

-1) une chaussée de type "remblai en polystyrène de Palavas les Flots", qui comprend :

-

un revêtement en béton bitumineux de 8 cm,

une couche de grave-bitume de 12 cm répandue au finisseur,

une couche de grave-bitume de 20 cm répandue à la niveleuse,

une dalle de béton légèrement armé par des treillis de diamètre 6 mm et de maille 150 par 250 mm surmontant le polystyrène (LASSAUCE et al.,1984) ;

-2) une chaussée de type "remblai en polystyrène de Cannes-Mandelieu" qui avait été définie par SCETAUROUTE en section courante d'élargissement (voie de droite, destinée aux poids lourds) et qui comprend :

une couche de roulement définitive de béton bitumineux de 8cm

une couche de roulement provisoire de béton bitumineux de 7cm
une couche de base en grave-bitume de 20 cm
une couche de fondation en grave non traitée 0/31
une couche de forme en grave de 0/60 mm de 50 cm au minimum
une dalle en béton armé de 15 cm (treillis de diamètre 6 mm de maille 100 par 100 mm)
surmontant le polystyrène.

-3) une chaussée classique, dimensionnée sur la base des caractéristiques mesurée de la couche de forme sur la planche d'essai et comprenant :

une couche de roulement définitive en béton bitumineux de 7cm
une couche de roulement provisoire en béton bitumineux de 7cm
une couche de base en grave-bitume de 20 cm,
une couche de fondation en grave non traitée de 25 cm.

soit au total 59 cm.

Cette chaussée, réalisée au début de l'année 1988 et ouverte à la circulation, n'a pas évolué depuis et ne présente ni déformation ni fissure.

d) Conclusions

L'expérimentation réalisée à Cannes-Mandelieu a fourni de précieux enseignements sur le Pneusol utilisé en remblai léger en termes de caractéristiques, de prix, de mise en œuvre, de comportement dans le temps etc...:

- le poids volumique moyen donné par les capteurs de pression totale est compris entre 13 et 15 kN/m³, ce qui correspond à un poids volumique de l'ordre de 10 kN/m³ pour le Pneusol ;

- le tassement de l'ensemble de la structure est de l'ordre de 7 cm ;

- le coût de construction (Pneusol et couche de forme) est de l'ordre de 120F/m³, que l'on peut comparer à celui du remblai léger en polystyrène expansé ou de l'argile expansée 250 à 300 F/m³ au départ d'usine, 1984).

Il convient toutefois de noter que la densité moyenne des remblais allégés avec du polystyrène expansé ou de l'argile expansée correspondant aux prix annoncés est de l'ordre de 8 à 9 kN/m³, chaussée comprise, ce qui suppose plus de Pneusol pour obtenir un allègement équivalent.

Le massif de Pneusol se comporte globalement comme un massif armé doté d'une grande cohésion. Cette dernière lui permet de supporter des tassements différentiels bien plus important qu'un remblai.

La présence des pneumatiques et des vides des chambres à air donne au massif de Pneusol de bonnes caractéristiques anti-vibratoires. Cette qualité, jointe à une bonne capacité portante du

matériau, pourrait permettre à celui-ci de servir de fondation pour des voies de tramway ou de chaussées pour poids lourds, pour réduire les nuisances apportées par la circulation de ces engins.

Il serait particulièrement intéressant de suivre le comportement de la chaussée classique prévue sous circulation et de pouvoir comparer ce comportement à celui de la chaussée voisine sur polystyrène, en tenant compte bien entendu de la structure propre de chaque matériau.

Enfin, au nombre des certitudes, on peut énoncer la longévité des pneumatiques, leur résistance aux agressions de tous ordres (en particulier chimiques), la simplicité, l'universalité du procédé - les matériaux de base existant pratiquement sur place dans tous les pays - et bien sûr le caractère écologique du procédé (valorisation et élimination des déchets).

3.5.3. Réparation du glissement de Dommiers (Aisne, 1987)

Le Pneusol peut apporter une solution simple et économique à la réparation des nombreux glissements qu'ont à gérer les collectivités territoriales sans grands moyens financiers. Le glissement de Dommiers (BRICOUT et al., 1992) en est un exemple typique.

a) Situation et contexte géologique

Le glissement étudié affecte une partie de la chaussée d'une route située à 60 km au nord de Paris (Dommiers, dans l'Aisne).

Le site correspond à une zone boisée dont la topographie est accidentée (flanc de vallée) avec une pente de terrain naturel de l'ordre de 20 à 30 degrés.

A cet endroit, la route est établie en profil mixte et les fissures avec rejet concernent la moitié aval de la chaussée sur une cinquantaine de mètres de longueur (Fig.97).

"L'étude géotechnique" se résume à l'examen des échantillons obtenus à partir de deux sondages à la tarière à main pour établir une coupe stratigraphique du site, qui est la suivante:

- Remblai de la route

Il est représenté par des matériaux de natures diverses, depuis les limons argilo-sableux jusqu'aux limons calcaires en passant par des argiles incrustées de granules et de petits blocs de calcaire ;

- sable calcaire

Il s'agit d'un ensemble composé à la fois de matériaux en place et d'éboulis, qu'il n'est pas possible de distinguer. Ce sont en grande partie des sables grossiers glauconieux, qui présentent des

éléments calcaires de taille variable. Ce type de matériaux apparaît sur une épaisseur maximale de 6 m ;

- argile de Laon

C'est une argile très plastique plus ou moins compacte, de teinte foncée, légèrement sableuse à certains niveaux. Elle a été rencontrée entre 6,40 et 10,40 mètres de profondeur ;

- sables de Cuise

Ce sont des sables fins propres de couleur marron jaune, rencontrés au droit d'un seul sondage à 10,40 m de profondeur. Sur le plan hydrologique, les relevés de niveau d'eau effectués dans deux piézomètres ont respectivement permis de localiser le niveau de la nappe phréatique en avril 1986 à 5,15 m et à 4,10 m de profondeur (période relativement pluvieuse).

b) Recherche d'une solution confortative

Le choix d'une solution de confortement après une rupture suppose la connaissance des paramètres géométriques des masses en mouvement, les conditions hydrauliques du site et les caractéristiques géotechniques des différentes couches de sol rencontrées. En l'absence de toute étude géotechnique et de tout suivi inclinométrique, à cause du manque d'argent de la commune, nous avons déterminé une courbe probable de rupture à partir des fissures observées sur la route et du bourrelet situé au pied du glissement (Fig.97) et nous avons calé les caractéristiques estimées des différentes couches rencontrées pour obtenir un coefficient de sécurité égal à 1.



Figure 96 : Vue du glissement de Dommiers

Deux solutions ont été proposées au maître œuvre :

- un rabattement de la nappe en amont du site par une ligne de puits d'infiltration,

- une substitution par un matériau léger en tête du glissement.

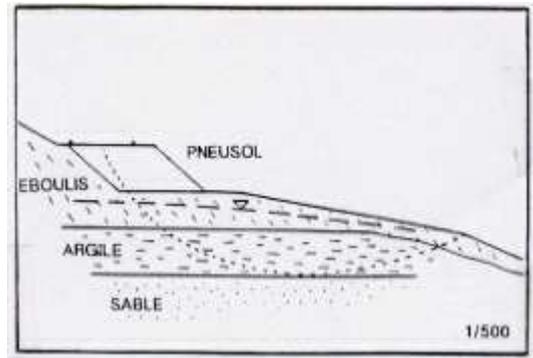


Figure 97 : Courbe de rupture probable (BRICOUT et al.,1992)

b.1. Drainage

Le rabattement de nappe réalisé en bordure de la chaussée, du côté amont, par des puits espacés d'environ 2 m et descendus jusqu'au niveau des sables cuisiers, permet théoriquement d'obtenir une majoration du coefficient de sécurité de l'ordre de 20% par rapport à l'état initial. Cette solution n'a pas été retenue à cause de son résultat assez aléatoire et de son coût.

b.2. Substitution de sol

L'allégement de la tête du glissement par un matériau léger est certainement l'une des solutions les plus intéressantes. Le coût de certains matériaux comme le polystyrène ou le Nidaplast (1,5 MF) est difficilement supportable pour le budget d'une petite commune. On s'est orienté vers le Pneusol, dont le poids volumique est de l'ordre de 10 kN/m^3 pour un matériau de remblai de remplissage de 20 kN/m^3 . Une excavation et une substitution sur une épaisseur de 3,50 m procurent une augmentation du coefficient de sécurité proche de 26%. D'une manière générale, le Pneusol divise le poids volumique du remblai de remplissage par deux (LONG, 1990 ; BRICOUT et al., 1992).

Comme pour le cas de Cannes-Mandelieu, le Pneusol choisi est un Pneusol "léger", formé de pneus de poids lourds et exécuté de la même manière sur une longueur de 35 m et une profondeur de 3,50 m.

Les différentes phases du chantier, débutant courant janvier 1988, ont été les suivantes :

- terrassement de 1330 m^3 de matériau de remblai et d'éboulis ;

- mise en place d'une base drainante de 0,20 m d'épaisseur sur le fond de fouille en matériau concassé ;

- sur cette base, les pneus de poids lourds sont posés à plat en disposition orthorhombique, puis recouverts d'un non-tissé de classe 6-8, ce dernier jouant le rôle de lien entre les pneus, (Fig.98)

- remplissage de la jante et des vides entre les pneus sur toute leur épaisseur et compactage par un engin de classe V2a ;

- pose d'un second lit de pneus décalés par rapport au premier, dans le sens transversal pour éviter un simple empilage de pneus (plus homogène) et transversal pour obtenir une pente de talus de 1/1 (Fig.99)

- répétition des opérations précédentes (pose, remplissage et compactage) jusqu'au niveau prévu ;

- fermeture du massif de Pneusol léger par un non-tissé et mise en œuvre d'une couche de forme de 0,35 m en concassé 0/40 ;

- recouvrement du talus avec de la terre végétale ;

- confection de la chaussée comprenant une grave-bitume 0/20 sur 0,07m d'épaisseur et un béton bitumineux de 0,05 m.



Figure 98 : Vue du chantier



Figure 99 : Talus du massif de Pneusol

Pour les trois premières couches, le remplissage des jantes et des vides entre les pneus a été effectué avec des gravillons 10/14 de récupération. Pour le reste, on a utilisé un tout venant local de la vallée de l'Aisne de 0/60. Les volumes mis en œuvre n'ont pas été rigoureusement évalués. Au niveau de la facturation, ils apparaissent pour 778 m³, en incluant la couche de forme et le réaménagement du site.

Pour l'ensemble du massif de substitution, 2070 pneus usagés non rechapables ont été mis en place en 9 couches (3,10 m) du 18 au 27 janvier 1988 (10 jours).

Le coût global de cette réparation (remblai léger + chaussée) est de 208 000 F HT, soit 225 F/m³, ce coût étant six fois moins cher qu'une solution classique avec un matériau "ultra léger".

c) Contrôles et constatations

Cette première réparation d'un glissement au moyen de Pneusol léger a fait l'objet:

- d'un contrôle de la compacité des matériaux mis en œuvre
- d'une instrumentation du sol support pour mesurer les déformations verticales et horizontales ainsi que les pressions totales engendrées.

c.1. Contrôle du compactage

Le contrôle du compactage a été effectué sur le remblai de remplissage du Pneusol, notamment sur les trois premières couches de la base et de la couche de forme, à l'aide d'une sonde nucléaire de surface et d'une dynaplaque.

Sur le remblai, on trouve un poids volumique sec moyen de 19 kN/m^3 et une teneur en eau moyenne de 9% (soit 95% de l'OPN), sauf pendant une courte période de pluies torrentielles.

Sur la couche de forme, on trouve un poids volumique sec de $22,4 \text{ kN/m}^3$ et une teneur en eau de 4% soit 97% de l'optimum Proctor normal.

A la dynaplaque, le coefficient de restitution évolue de 0,37 à 0,53 (valeur moyenne : 0,46) sur l'ensemble de la plate-forme.

Pour cette route départementale à faible circulation, cette valeur a été admise.

c.2. Instrumentation

L'instrumentation du remblai en Pneusol pris en charge par le LCPC, a comporté :

- un inclinomètre de type Lpc au pied du talus
- deux tassomètres de type Lpc
- deux capteurs de pressions totale de type Glötzl.

La pression se stabilise à 52 kPa pour la cellule P1 et à 56 kPa pour la cellule P2, ce qui correspond respectivement à un poids volumique du massif de 14 kN/m^3 et 15 kN/m^3 , pour l'ensemble "Pneusol", couche de forme, chaussée.

Les tassements mesurés au cours des quatre ans est inférieurs à deux centimètres (Fig.100).

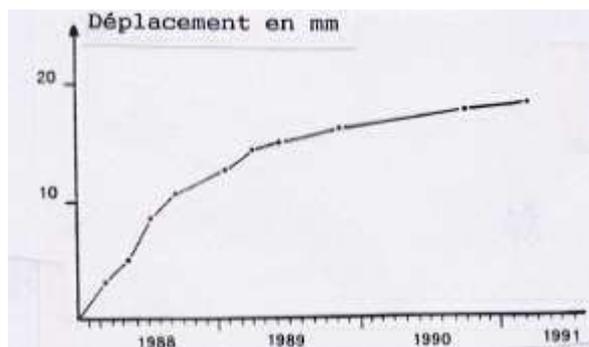


Figure 100 : Déplacements inclinométriques mesurés

Le tube inclinométrique mis en place au pied du talus est descendu à une profondeur de 8 m. Il montre tout d'abord, à la fin des travaux, une réactivation de la surface de glissement dans la couche d'argile de Laon vers 6,50 m de profondeur. En fonction du temps, le mouvement vers l'aval est reproduit sur la figure 102. Pendant les six premiers mois, les déplacements cumulés ont été relativement importants (0,90 cm) par suite d'une période de pluies torrentielles. Depuis, ils se ralentissent nettement pour atteindre un palier autour de 1,70 cm.

d) Conclusions

Pour réparer un glissement de terrain, nous pouvons utiliser deux sortes de Pneusol : un mur de soutènement avec des bandes de roulement sur chant, un remblai léger.

La première solution, nécessite plus de manipulations et a donc de coût plus élevé. La solution de substitution réalisée pour la réparation du glissement de Dommiers, sur 35 m de longueur et 3,50 de profondeur, montre que cette solution est facile et rapide à réaliser et de coût limité.

Le compactage du Pneusol, facile à exécuter, est conforme aux essais préliminaires effectués lors de la mise au point de ce matériau (LONG et VALEUX, 1989)

Si le tassement est faible, les déplacements latéraux bien que persistant sur un an, n'influent pas sur le comportement de la structure elle-même. L'ouvrage se comporte bien actuellement.

Dans ce genre d'ouvrages, le Pneusol a aussi un effet de répartition des charges entre la partie non glissée du sol et la masse du sol qui a glissé.

D'autre part, la disposition des pneus empêche la remontée de l'eau dans le sol, limitant ainsi les effets du gel dans la chaussée.

Notons pour mémoire, qu'on peut aussi utiliser un matériau de remplissage de type cendres volants, schistes, mâchefers ou pouzzolanes par exemple.

3.5.4. Réparation du glissement de Boulsios (Lozère, 1990)

a) Description du projet

La ligne de chemin de fer Béziers-Neussargues traverse à la sortie de la ville de Millau le remblai de Boulsios (km 558,020) qui a la particularité d'être construit sur un versant instable de la rive droite du Tarn. A titre indicatif, les tassements moyens de la voie sont de l'ordre de 0,50 à 1 cm par mois, depuis 1968. Ce remblai fait donc l'objet de rechargements fréquents pour rehausser la voie et compenser ainsi le glissement général du versant instable.

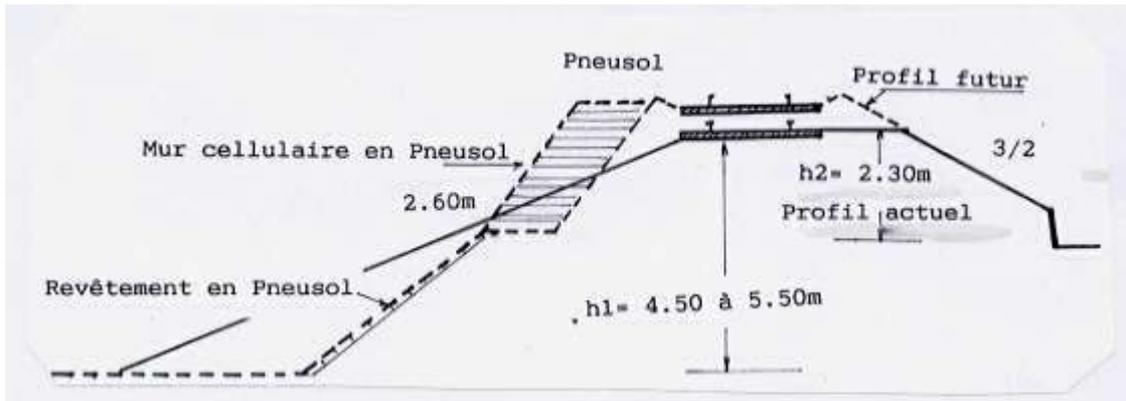


Figure 101 : Coupe du remblai de Boulsios

La SNCF désirait rehausser la cote des rails de 0,50 m avec un petit ripage de l'ordre de 0,50 m vers l'aval, afin de créer deux pistes latérales pour assurer une voie de circulation en toute sécurité à ses agents SNCF.

Cette solution nécessite l'apport d'un volume de remblai d'environ 7 m^3 par mètre linéaire de voie soit une surcharge de l'ordre de 140 kPa, peu favorable du point de vue de la stabilité générale. Le bureau d'étude géotechnique MECASOL n'avait donné son feu vert que pour la moitié de cette surcharge (Fig.101).

La solution adoptée pour rehausser le remblai de la voie est la suivante :

- dans la partie soumise à la circulation des trains, c'est à dire sous la voie avec l'angle usuel de diffusion des charges, on utilise du ballast ;

- en dehors, un raidissement de la pente du remblai et son allègement par l'utilisation de Pneusol avec de la pouzzolane. Cette dernière présente l'avantage d'avoir un poids volumique déjà relativement faible (10 kN/m^3) permet d'obtenir un Pneusol léger de 5 KN/m^3 . L'ensemble des travaux n'a donc entraîné qu'une augmentation faible, voire négligeable, de la charge.

b) Commentaires généraux

D'une manière générale, l'utilisation d'un Pneusol léger divise le poids volumique du matériau de base par deux. Outre le pouzzolane, on peut envisager l'association du Pneusol avec:

- *des cendres volantes*

Ces sous-produits de centrales thermiques et de hauts fourneaux entrent déjà dans différents procédés de construction routière. Leurs gisements, concentrés dans les zones d'activités industrielles lourdes, représentent quelques 56 millions de tonnes par an. Utilisées comme remblai (d'un poids volumique approximatif de 10 à 14 KN/m^3), les cendres volantes se placent

généralement 30 cm au-dessus du niveau maximal des crues, entre deux masques de protection. Ces matériaux, économiquement utilisables jusqu'à des distances de 50 à 100 km autour des centres de production, présentent en outre la possibilité d'une prise lente. Mais plusieurs exemples ont déjà montré qu'elles peuvent aussi gonfler lorsqu'elles sont sulfocalciques (comme à Gardanne et à Arjuzanx, par exemple) au lieu d'être silico-alumineuses. Actuellement, il existe plusieurs structures en Pneusol utilisant comme de matériau de base le mâchefer pour des allègements sur des pentes instables dans la région de Grenoble et de Strasbourg. Il faut cependant vérifier la compatibilité des métaux lourds. Des recommandations éditées par le Ministère de l'Environnement conseillent les différents essais à effectuer.

- *les schistes et argiles expansées*

Malgré quelques variations résultant des procédés de fabrication, ces matériaux possèdent des propriétés de densité, de résistance et compressibilité généralement excellentes. Leur poids volumique de 5 à 10 kN/m³ les situe entre le quart et la moitié de celui d'un matériau traditionnel. Cette solution reste malgré tout relativement onéreuse, bien que l'utilisation du Pneusol permet de diviser le volume des matériaux par deux.

De plus, lorsque l'allègement est insuffisant, on peut envisager un terrassement plus important pour augmenter le volume de Pneusol à mettre en œuvre car le terrassement est beaucoup moins coûteux lorsque le matériel est déjà sur place.

3.6. PROTECTION DES PENTES ET DES BERGES.

3.6.1. Protection de l'Etang du Puits (Creuse, 1985, GUILLEMIN et al., 1985)

a) Généralités

L'Etang du Puits, à l'extrémité orientale de la Sologne, d'une superficie de 110 ha, est un des plans d'eau les plus vastes de la région. Site sensible et fragile, il est particulièrement exposé à des risques nombreux de pollution et d'agression.

Il est fermé par une digue en terre de 800 mètres de long, 9 mètres de haut, construite de 1852 à 1859. Différents ouvrages d'évacuation des eaux ont été construits sur la digue:

- galerie de 0,8 par 1.0 m situé au niveau du radier,
- aqueduc de 0,80 m,
- déversoir de crues à l'extrémité Nord de la digue.

C'est au cours d'une inspection de la grande digue de l'Etang du Puits, au début de l'année 1985, que des signes alarmants furent décelés. Des fissures sur la chaussée au droit de l'aqueduc de décharge, un basculement du mur de tête et plusieurs fissures importantes sur l'intrados de la voûte ont été repérés. La sécurité des différentes habitations à l'aval n'était plus assurée en totalité.

Une étude a été effectuée par le Laboratoire Régionale des Ponts et Chaussées de Blois, afin de :

- faire le point sur les différents dommages de la Grande Digue de l'Etang du Puits et d'implanter des lignes piézométriques afin d'étudier l'écoulement au travers de celle-ci,
- analyser la stabilité de l'ouvrage et d'évaluer les risques de rupture,
- recenser la nature des travaux confortatifs à réaliser impérativement en urgence pour assurer la sécurité,
- estimer le coût de ces travaux.

Les résultats obtenus montrent clairement que la digue est saturée d'eau et que des écoulements importants exercent de fortes poussées sur le mur aval. Il fut alors préconisé d'étancher le masque amont et de conforter, par la pose de murs en ailes, l'aqueduc évacuateur.

Les contraintes liées à ce chantier sont de deux ordres: techniques et économiques.

Contraintes techniques

Les travaux envisagés devaient se faire, notamment en pied de digue, dans un milieu vaseux et humide peu propice à l'utilisation d'un procédé bitumineux pour assurer l'étanchéité. Ensuite, se posait le problème de la protection de celle-ci contre différentes agressions (rongeurs, battillage,...). La solution de base préconisée dans le dossier d'appel d'offres prévoyait une protection en béton sur 10 cm pour la partie inférieure et 20 cm pour la partie supérieure. La possibilité de variantes était proposée aux entreprises pour cette partie. L'appel d'offres ayant été infructueux, une protection de type Pneusol, d'un coût moins élevé, a été proposée par l'entreprise VEYER, permettant ainsi de rester dans l'enveloppe financière attribuée.

Contraintes économiques

Le site de l'Etang du Puits, protégé par la loi de 1930, est un lieu touristique régional et son impact est très important durant les mois d'été. Pour ne pas perturber la saison touristique de 1987, les travaux devaient impérativement commencer au mois d'octobre 1986 et se terminer au printemps 1987. Pour pouvoir exécuter dans des conditions normales les différents travaux, une vidange complète du plan d'eau a été nécessaire. Ce fut la seule vidange de mémoire d'homme.

b) Différentes prestations.

La surface de la digue à étancher était de 7.300 m² pour une longueur de l'ordre de 590 m. L'étanchéité est obtenue par l'utilisation d'une géomembrane protégée par deux couches de non-tissé. Les différents phases suivantes ont été réalisées:

- Ragréage préalable au mortier

Le talus de la digue était constitué d'une couche d'enrochements non jointifs recouverts de vase et de mousses diverses. Après un nettoyage à la pression et enfin d'éviter un poinçonnement possible de la géomembrane, un réglage préalable du talus au mortier a été réalisé.

- Dispositif mince d'étanchéité

Une fois la surface bien réglée, le talus amont a été recouvert d'un dispositif mince d'étanchéité composé de trois couches successives décrites, ci-dessous :

. une couche de support, constituée d'un géotextile non-tissé de classe 7, qui réduit les risques d'agression de la géomembrane par les matériaux de fond de forme et assure un drainage des éventuelles mises en pression. Ce géotextile est solidaire dans sa partie inférieure d'un drain longitudinal raccordé à l'aqueduc évacuateur ;

. une membrane étanche, géomembrane de synthèse de type plastomère (aptitude à une déformation importante permanente), qui offre une garantie de non-vieillesse et de non-diminution des propriétés initiales pendant 10 ans et présente en outre une imputrescibilité totale et une bonne résistance mécanique au poinçonnement. Ses caractéristiques sont les suivantes :

épaisseur de 1,5 mm ,

permittivité de 10^{10} s,

résistance à la rupture de 12 MPa,

allongement à la rupture de 200%.

Les soudures entre les bandes ont été faites dans le sens de la pente et présentent les résistances suivantes:

en pelage : supérieure à 200 kPa

en cisaillement : rupture en dehors de la soudure

Une couche de protection, qui est du même type que la couche de support mais à laquelle aucune propriété drainante n'est demandée. Des dispositifs d'ancrages ont été prévus dans la partie supérieure et inférieure pour éviter les infiltrations d'eau.

- Protection du dispositif mince d'étanchéité

Afin de prémunir la membrane contre d'éventuelles agressions, une protection de type Pneusol a été retenue.



Figure 102 : Vue d'ensemble de la grande digue de l'Etang du Puits

Cette protection a une épaisseur de 20 cm et est formée de l'association de pneus de tourisme, dont un flanc a été enlevé et qui sont liés entre eux par des bandes en polyester pour éviter lors de la mise en œuvre du remblai des déplacements désordonnés. L'ensemble se présente sous forme d'une multitude de bacs remplis en partie basse par de la vase traitée à la chaux et au-dessus par du sable compacté au fur et à mesure du remplissage de l'Etang (Fig.102).

Il faut noter que, pour couvrir la surface totale de la digue, 30.000 pneus ont été nécessaires. A l'époque de ces travaux, il n'existait qu'une machine de découpe relativement artisanale, permettant d'obtenir un rendement de l'ordre de 600 pneus découpés à la journée. Actuellement, plusieurs entreprises ont amélioré cette première machine de l'Administration et en ont réalisé d'autres suffisamment performantes pour découper même des pneus de poids lourds. Il faut noter aussi que la découpe des pneus ne demande pas de qualité particulière et peut être faite par des ouvriers sans qualification.

En pied de digue, les pneus ont été ancrés à 4 mètres environ à l'amont de la paroi mince et il n'existe aucune liaison entre la protection en Pneusol et la paroi mince.

En partie supérieure, la protection décrite ci-dessus a été doublée par une deuxième couche de Pneusol, fabriquée avec des bandes de roulement sur chant liées pour permettre un meilleur remplissage en petits enrochements (80/200). Le tout a été ensuite recouvert d'un mortier de surface, conformément aux stipulations de la Commission Départementale des Sites et Paysages, pour éviter l'enlèvement de ces blocs. Le chantier a été terminé dans les délais prescrits et aucun pneu n'est visible, conformément aux stipulations du CCTP.

Les chiffres bruts montrent que l'économie de la solution "Pneusol" par rapport à la solution "béton" est de 25%. Il est à noter que l'entreprise s'est approvisionnée sur place pour les matériaux de remblaiement (vase ou sable). Seuls les enrochements ont nécessité un transport.

D'un point de vue technique, le Pneusol donne satisfaction et le rapport des plongeurs chargés de contrôler les travaux effectués a indiqué un parfait remplissage du Pneusol et qu'aucun pneu n'est visible dans l'eau de la retenue.

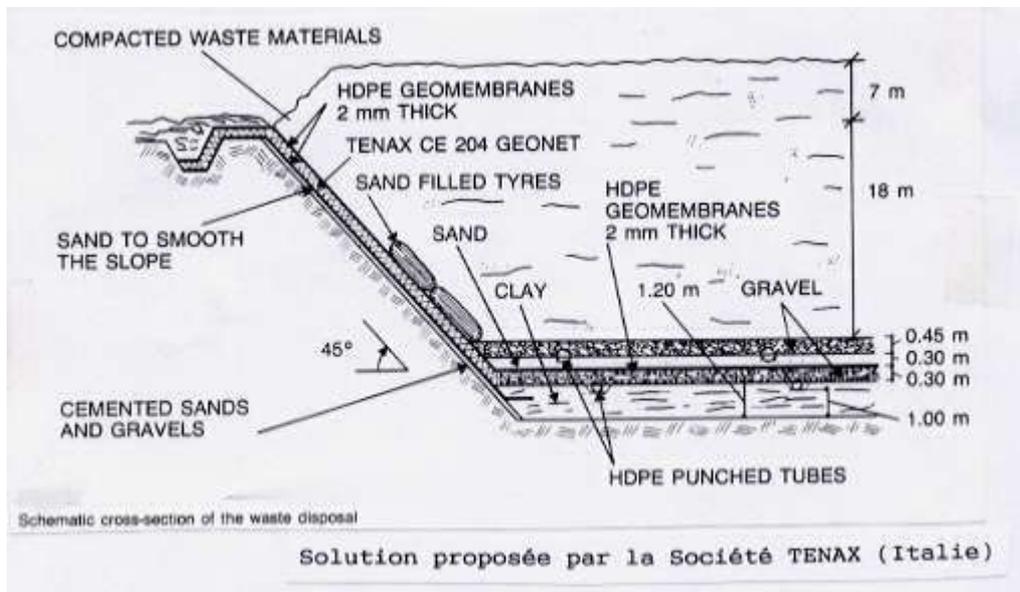


Figure 103 : Protection des décharges

Ce type d'utilisation s'est par la suite largement développé et est maintenant proposé directement par les entreprises privées, comme par exemple dans le cas de la protection des décharges (Fig.103).

3.6.2. Protection des pentes à Beaulieu-sur-Mer

a) Description de l'incident

Le 8 décembre 1988, un glissement superficiel a affecté le remblai ferroviaire sur une quinzaine de mètres au PK 236,450 à la sortie côté Vintimille du Tunnel de Saint-Laurent. Il s'agit d'un glissement de surface du matériau de remblai de type tout venant, sur une épaisseur de l'ordre d'un mètre à 1,50 mètre.

Au cours du renouvellement de la voie, une certaine quantité de vieux ballast avait été déposé en tête du talus et des engins de terrassement assez lourds laissés en stationnement sur le bord. La veille et le jour du glissement, des pluies torrentielles se sont abattues sur la région.

Du fait de la distance entre la traverse de la voie et le bord du talus (environ 5 m), il n'y avait pas de risque immédiat pour les circulations de trains. Cependant, quelques fissures restant apparentes sur les bords du talus, et les risques de pluies restant toujours importantes, une protection par film plastique a été mise en place sur le tiers supérieur du talus.

b) Choix d'une solution

Diverses visites du site ont montré que si, le risque à très court terme semblait peu probable, il existait un risque à moyen terme et qu'il convenait d'effectuer un confortement assez rapidement.

Les premières approches du problème, étudiées conjointement avec une entreprise locale, prévoyaient un renforcement du pied (gabions ou mur de soutènement) et un reprofilage du talus.

Cependant, l'inaccessibilité du site (aucun accès routier, accès piétons très difficile pour un transport de matériaux, ...) a conduit à l'abandon de ces solutions - un approvisionnement par mer (barges) ou hélicopté ayant été jugé trop risqué et trop onéreux, aussi bien par la SNCF que par l'entreprise.

Il a donc été envisagé d'opter pour une solution de type mur cellulaire et une consultation a été lancée auprès de 21 entreprises leur laissant le choix technique (mur Peller, caissons légers type Reboul, mur Loffel...) en vue de réaliser un approvisionnement uniquement par train de travaux et le travail sur site par des moyens manuels, en utilisant si possible le remblai existant, qui est un tout venant de qualité.

Quatre entreprises sur 21 ont répondu à l'appel d'offres, en présentant 8 variantes. Il a été décidé de retenir la solution la plus économique le Pneusol.

Il a été convenu que :

- les deux-tiers inférieurs du talus pouvaient être traités par des bandes de roulement posées sur chant, remblayées et compactées ;

- le tiers supérieur environ, présentant des creux plus importants du fait du glissement, et une risberme à la base pouvant servir d'appui, serait conforté par un mur cellulaire en Pneusol : deux lignes de pneus horizontaux, ligaturés et remblayés formant des rangées séparées par une couche de 10 à 15 cm de remblai compacté.

Il a été décidé en outre de conforter l'ensemble par des ancrages (broches) en fer de deux mètres de longueur et de 25 mm de diamètre.

c) Description du confortement

- Surface de la partie inférieure : trapèze de 20 m à la base et de 13,40 m au sommet, sur une hauteur de 30 m soit environ 500 m²

- Surface de la partie supérieure : rectangle de 13,40 m par 7,1 m soit environ 95 m²

Il a été mis en œuvre 2.250 pneus attachés par des bandes en polyester. 50 ancrages ont été battus (Fig.104). Les travaux se sont déroulés dans de très bonnes conditions et ont duré 15 jours répartis sur un mois à cause des intempéries. Les travaux ont coûté environ 200.000 F.

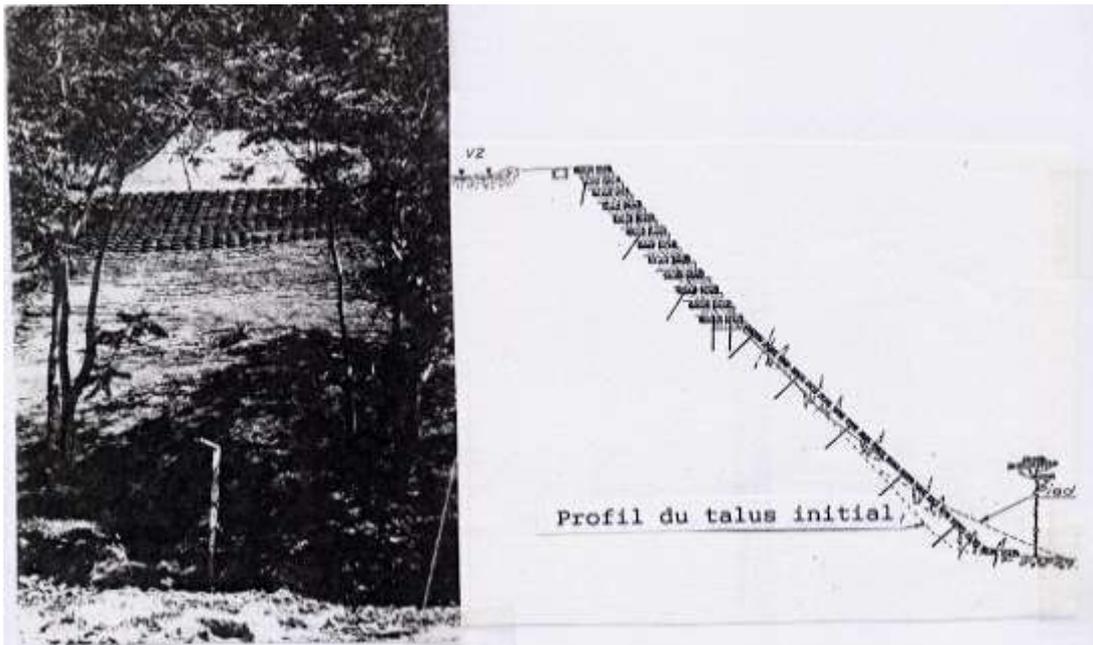


Figure 104 : Protection des pentes à Beaulieu sur Mer

3.7. DOMAINES POTENTIELS D'APPLICATION DU PNEUSOL

Nous avons lors des réparations de glissements utilisé du Pneusol comme matériau léger mais l'observation de leur comportement dans le temps nous amène à envisager d'autres applications possibles et qui nécessitent certainement quelques recherches spécifiques.

3.7.1. Chaussée "antigel"

a) Formation du gel

Pour transformer de l'eau en glace, il faut un double apport de frigories; le premier sert à amener l'eau à la température de zéro degré centigrade, le second à effectuer le changement d'état proprement dit qui est une réaction exothermique c'est-à-dire qu'elle consomme des frigories. Ces dernières, en provenant de l'atmosphère, provoquent le refroidissement de la zone de sol proche de l'isotherme zéro degré centigrade et l'amènent à la température de congélation. Le changement d'état de l'eau en glace débute par une nouvelle consommation de frigories en provenant de la surface; l'isotherme zéro se stabilise. Au voisinage des premiers cristaux de glace qui se forment, apparaît une dépression de l'eau interstitielle, ce qui se traduit par l'établissement d'un gradient de pression dans la partie non gelée et d'un écoulement d'eau vers la zone de congélation. L'eau issue de cet écoulement se répartit sur le front de congélation, se transforme en glace et donne lieu à une ségrégation sous forme de lentilles, en général horizontales. Pendant la formation de la lentille, les zones de sol environnantes perdent ainsi progressivement leur eau, qui vient alimenter la lentille. On voit donc à ce niveau d'explication du phénomène de gel, l'importance primordiale de facteurs tels que l'intensité et la durée du froid auquel le sol est soumis, et les possibilités d'alimentation en eau du front de gel.

Si, l'alimentation en eau se tarit, la lentille ne grossit plus et le phénomène recommence ailleurs en créant une autre lentille à partir des frigories en provenant de la surface. La transformation de l'eau en glace s'accompagne d'un gonflement.

b) Etude du sol au dégel

Lorsque survient le dégel, les sols non gélifs retrouvent pratiquement leur teneur en eau initiale. Toutefois, pour certains sols réputés non gélifs, tels certains sables, la teneur en eau peut presque doubler au dégel sans gonfler.

Par contre, les sols gélifs se retrouvent à une teneur en eau beaucoup plus élevée, et qui peut parfois dépasser la limite de liquidité. En tant que sol de fondation, un sol gélif peut donc au dégel perdre totalement ses qualités de portance.

Notons que la gélivité d'un sol se manifestera d'autant moins, toutes égales par ailleurs, que le drainage est efficace. Les spécialistes du gel pensent qu'à la limite un sol très gélif placé dans des conditions telles que sa teneur en eau initiale soit faible et que les migrations d'eau aient été rendues impossibles (enveloppe étanche, par exemple) se comportera pratiquement comme un sol non gélif. Les possibilités d'alimentation en eau du front de gel, qui dépendent de la teneur en eau des zones non gelées avoisinantes et de la distance à laquelle on trouve l'eau mobilisable pour réalimenter à leur tour les zones non gelées, sont importantes. C'est dans cette optique que le Pneusol pourrait jouer un rôle important en empêchant les arrivées d'eau.

c) Comportement mécanique des sols

Compte tenu de ce qui d'être rappelé, les caractéristiques intrinsèques du sol au dégel s'apparentent souvent à celles un liquide. La capacité portante d'un tel sol est voisine de zéro. Il n'est donc pas surprenant qu'il ait des déformations locales (fissures, affaissements...) sur les chaussées, qui se comportent comme si elles reposaient sur un coussin liquide enfermé dans une enveloppe très peu perméable. La figure 105 présente un exemple d'évolution saisonnière de la portance du sol.

Le gonflement d'un sol gélif (que le front de gel soit stationnaire ou qu'il progresse lentement dans le matériau) est une fonction linéaire de la racine carrée de l'indice du gel, une fois que le processus de gonflement a démarré. (CANIARD et ROUQUES, 1975).

Si, dans l'ensemble, le comportement des sols gelés est relativement bien connu, par contre la valeur de la pression exercée par le remblai au cours du gel est très peu connue. Elle varie bien entendu en fonction de la nature du sol, de la température, de la durée du gel et de la possibilité d'approvisionnement en l'eau. On estime que si la variation de volume est complètement empêchée, cette pression peut atteindre des valeurs très élevées. Les essais effectués sont plutôt rares. Il existe une étude très intéressante de HOEKSTRA et KEUNE (1960) pour estimer expérimentalement la pression d'un sol confiné soumis au gel.

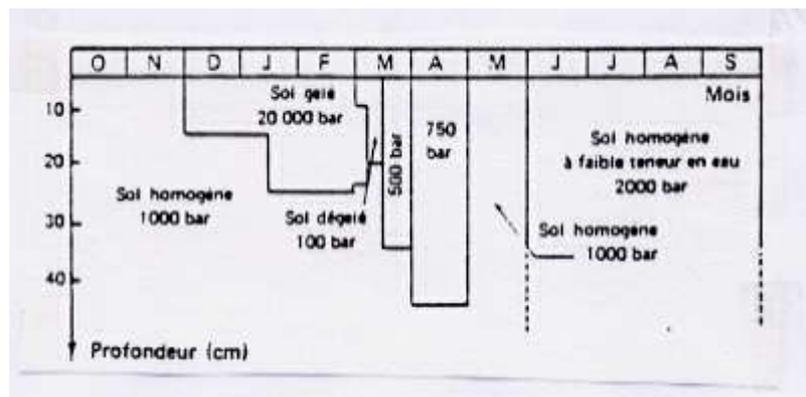


Figure 105 : Exemple d'évolution saisonnière de la portance du sol (CANIARD et ROUQUES, 1975)

La figure 106 montre le dispositif d'essai utilisé. L'échantillon de sol est disposé dans un cylindre de 2,54 cm de diamètre. Une plaque refroidissante est située au fond du cylindre, où un bain froid permet de maintenir la plaque à une température donnée.

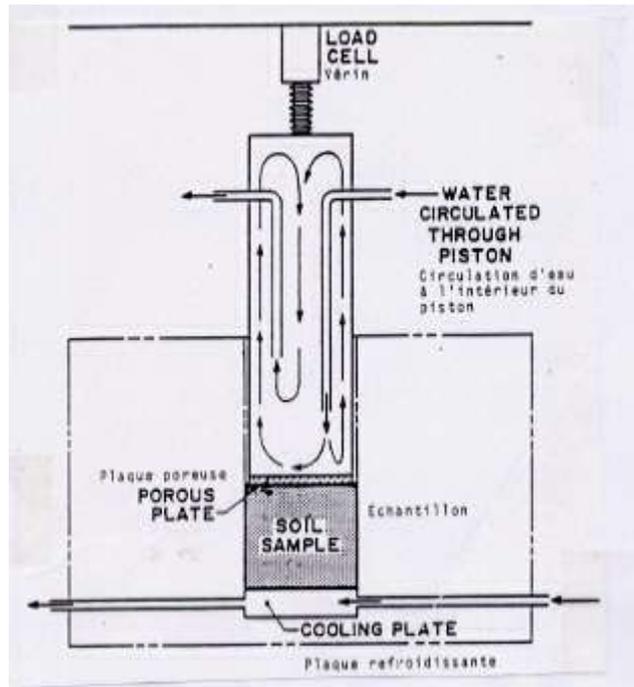


Figure 106 : Schéma de l'appareil

Au sommet de l'échantillon se trouve un piston creux où l'eau à une température constante circule et entre en contact avec l'échantillon à travers une plaque poreuse munie d'un papier filtre. Les auteurs ont fait des essais sur l'argile "Frederick" (Fig.107).

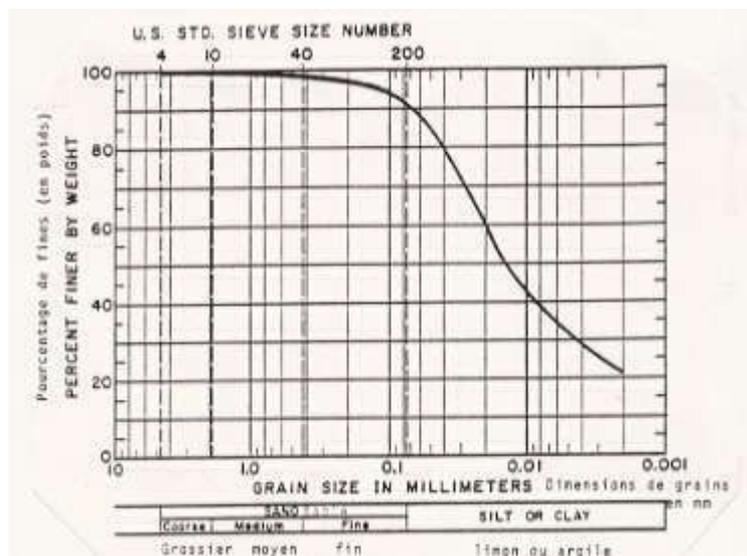


Figure 107 : Courbe granulométrique de l'argile "Frederick" (HOEKSTRA et KEUNE, 1960)

Le piston et la paroi de la cavité cylindrique sont enduits de silicone pour empêcher la fuite de l'eau et pour réduire le frottement piston - paroi. Pendant l'expérimentation, le piston est verrouillé

à une position donnée. Des thermo-couples permettent d'enregistrer la température de la plaque refroidissante et de l'eau d'approvisionnement. La température du froid varie de $-1,2^{\circ}\text{C}$ à $-14,4^{\circ}\text{C}$. Des essais préliminaires ont montré que, lorsque la température de la plaque refroidissante reste constante, la pression exercée atteint une valeur asymptotique.

La figure 108 montre les résultats des essais. On constate que :

- lorsque la température de la plaque est maintenue à $-1,2^{\circ}\text{C}$, la pression maximale atteint 315 kPa au bout de 40 heures. On voit se former des lentilles de glace à environ 0,6 cm de la plaque ;

- lorsque la température descend à $-3,1^{\circ}\text{C}$, les lentilles de glace continuent à se former et la pression atteint 546 kPa.

- à $-6,6^{\circ}\text{C}$, la pression maximale est de l'ordre de 2520 kPa ce qui est très élevé.

Ces quelques résultats montrent que les pressions dans une argile confinée, correctement alimentée en eau, peuvent au cours du gel atteindre des valeurs élevées. Le phénomène de gel mérite d'être étudié notamment dans les murs de soutènement et les fondations de chaussées et de maisons. Les dommages causés par la congélation d'un sol gélif sur une fondation superficielle sont toujours dus à l'accumulation de la glace au voisinage de la structure. Lors du gel, les gonflements du sol qui résultent de la croissance des lentilles de glace induisent des efforts ou des déplacements parfois inadmissibles dans les éléments structuraux. Au cours du dégel, la portance des sols où l'eau s'était accumulée à l'état de glace, si un drainage suffisant ne peut être assuré, décroît de façon importante et peut entraîner des tassements de la fondation.

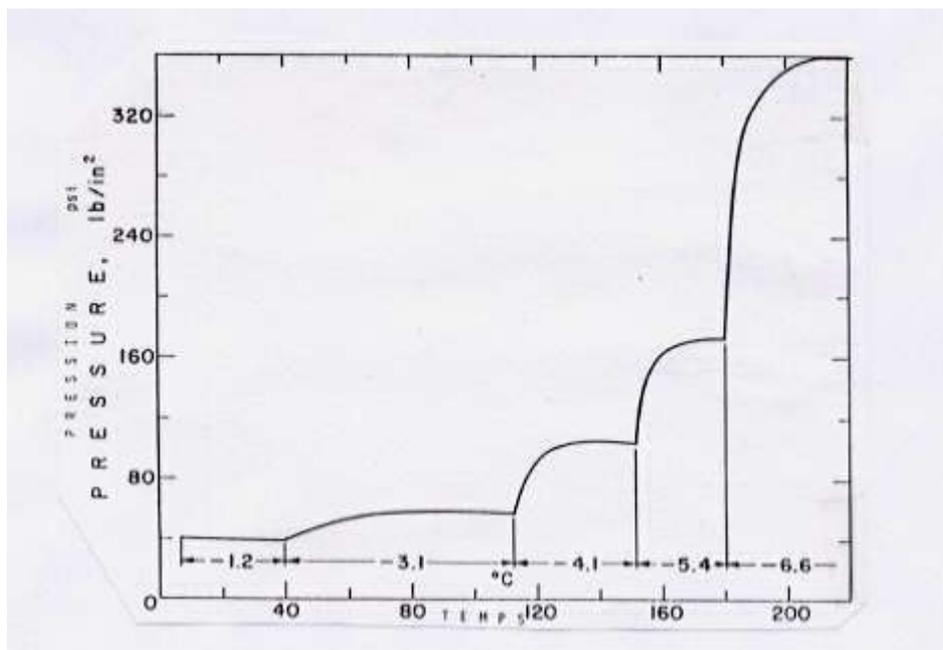


Figure 108 : Pression due au gel en fonction du temps

Les différents modes de transfert des déplacements et contraintes du sol gelant sont résumés sur la figure 109.

- géli-adhérence,
- poussée latérale,
- soulèvement basal par le front de gel.

Sur ce schéma, si l'on ajoute à l'extérieur du bâtiment une couche de Pneusol léger qui descend jusqu'au niveau des semelles, on déplace et réduit le front de gel, la poussée latérale due au gonflement et éventuellement l'effet de géli-adhérence. Une autre couche sous le dallage joue le rôle d'isolant thermique. Ces considérations méritent d'être testées sur site réel. Les solutions proposées ont le mérite d'être économiques et faciles à mettre en œuvre.

d) Le Pneusol léger

L'utilisation des pneus de poids lourds disposés en nappe et de manière orthorhombique, remblayés par un bon matériau drainant (en grave par exemple) permet au bout de trois couches de couper toute alimentation possible en eau à condition que la couche suivante soit espacée de la précédente d'un demi-diamètre. Ce Pneusol contenant beaucoup de vides, puisque les chambres à air ne sont pas remplies, empêche les remontées d'eau (Fig.110).

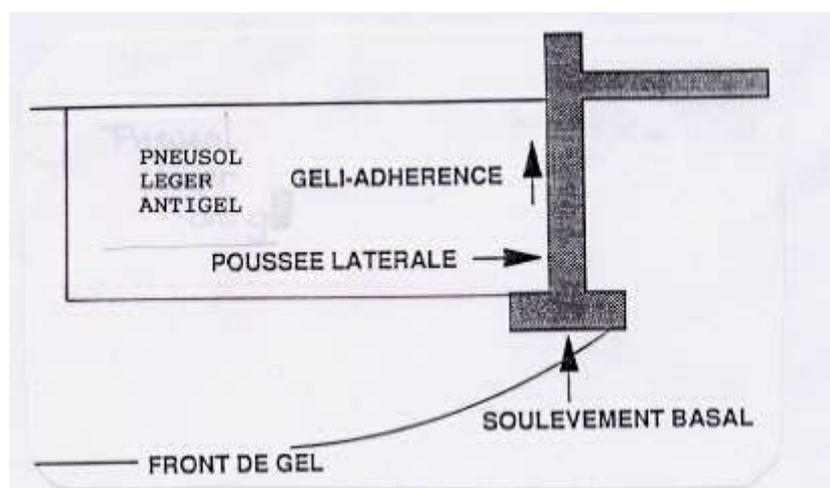


Figure 109 : Actions du sol gelé sur une fondation superficielle

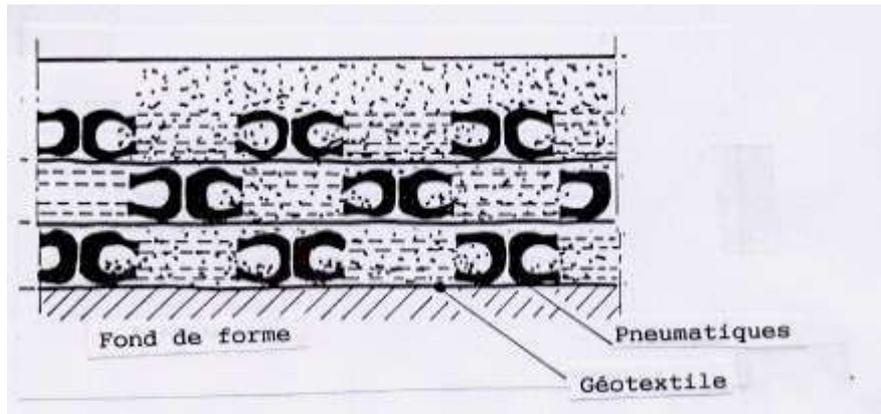


Figure 110 : Vue en coupe d'un massif de Pneusol léger

Utilisé en couche de fondation, avec une bonne couche de forme, le Pneusol pourrait résoudre le problème de la perte des caractéristiques intrinsèques au dégel. Les barrières de dégel ne seraient plus nécessaires.

La mise en œuvre de ce matériau derrière les murs de soutènement, outre qu'il améliore la stabilité de l'ouvrage (réducteur de poussée), permet aussi un bon drainage près du voile par les nombreuses vides qu'il contient, une bonne isolation du matériau de remblai et éventuellement une bonne absorption d'un gonflement éventuel dû au gel ou à la qualité du sol, grâce à sa souplesse.

Utilisé comme isolant thermique, le Pneusol léger pourrait limiter les pertes thermiques au cours de la saison de chauffage. Un calcul de performance pourrait être entrepris, selon la méthodologie définie par DUQUENNOI (1992).

3.7.2. Fondations sur sols gonflants

La saturation accidentelle ou naturelle des sols présentant des aptitudes au gonflement peut être à l'origine de désordres importants pour des structures diverses.

Lors de la saturation, l'amplitude du gonflement et les forces qu'il engendre vont dépendre d'un grand nombre de facteurs, tels que la quantité et la nature minéralogique des argiles présentes dans le sol, la nature des cations fixés et de ceux présents dans la phase liquide, la texture et les propriétés macroscopiques définies principalement par la densité sèche et la teneur en eau initiale.

La connaissance de la pression de gonflement est indispensable pour calculer les poussées actives limites que peuvent exercer, à la suite d'une hydratation, les argiles gonflantes au voisinage de revêtements ou de soutènements (routes, canaux, tunnels, fondations de bâtiments...). Par ailleurs, la connaissance de la loi de variation du gonflement en fonction de l'état de contrainte est plus adaptée à définir des structures légères (bâtiments de faible hauteur, chaussées...).

Mais on peut réfléchir à des solutions qui permettent le gonflement des sols, qui présente quelques similitudes avec le gel, notamment au niveau des efforts.

Les essais de chargement in-situ ainsi que les réalisations dans le domaine routier ont montré que la capacité portante, les déformations et le comportement du Pneusol permettent d'envisager son utilisation comme couche de fondation de maisons individuelles. Outre qu'il répartit les charges, il absorbe les gonflements du sol et aussi les vibrations (circulation ou séismes). Une telle structure pourrait être testée en vraie ou semi-grandeur et en modèle réduit.

3.7.3. Efficacité acoustique du Pneusol

Des essais préliminaires ont été réalisés au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, pour évaluer globalement et rapidement le comportement acoustique d'un parement en Pneusol (BEAUMONT et al., 1987)

Différentes surfaces ont été testées enfin de connaître leur coefficient local d'absorption acoustique, par référence à la norme NFS 31.089, méthode impulsive, actuellement en vigueur.

Par ailleurs, l'indice d'affaiblissement n'a pas fait l'objet de tests dans cette première phase, car la masse de cet écran est telle que les valeurs seront largement au-dessus des exigences en la matière.

Deux types de mesures ont été effectués :

a) en incidence normale (Fig.111)

La source est placée à deux mètres de l'écran et le microphone à 0,50 de ce dernier, tous deux se trouvant sur une même perpendiculaire à l'écran.

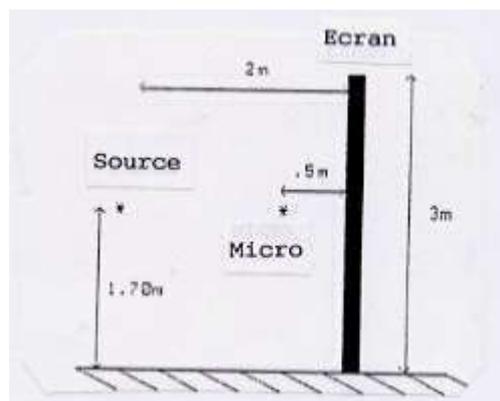


Figure 111 : Principe de la mesure avec incidence normale

b) en incidence oblique (30°)

Les distances sont identiques au schéma précédent, mais les positions sont différentes pour permettre les mesures des ondes réfléchies à 30° (Fig.112).

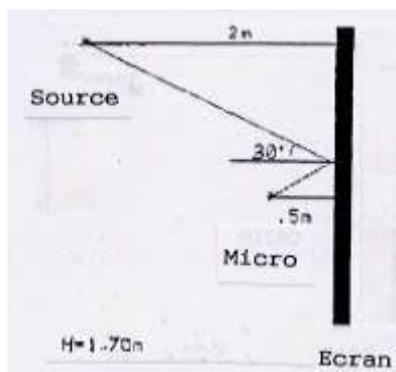


Figure 112 : Principe de la mesure avec incidence " oblique "

c) Méthode de calcul

Le microphone M1 capte le signal incident et le signal réfléchi par l'écran. Ces signaux sont isolés temporellement par deux fenêtres transitoires ajustables. Un catalyseur FFT bicanal associé à un ordinateur permet de déterminer le coefficient de réflexion "r" et le coefficient d'absorption qui sont reliés par la relation suivante:

$$\alpha = 1 - r^2 \quad \text{et} \quad r = W_r / W_i$$

Par ailleurs, nous avons déterminé le facteur d'absorption global par rapport à un spectre routier:

$$\alpha_{GL \text{ route}} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{\sum_i S_i}$$

avec α_i = coefficient d'absorption local de l'ième octave,

S_i = valeur du spectre de référence routier de l'ième octave

Le massif en Pneusol testé est constitué d'empilement de pneus de poids lourds disposés les uns sur les autres, le temps nous ayant manqué pour tester d'autres types de dispositions. Ce type de parement n'est certainement pas le plus efficace car il ne présente pas beaucoup de pièges à sons, comme pour le mur du col de Bussang (Fig.113).

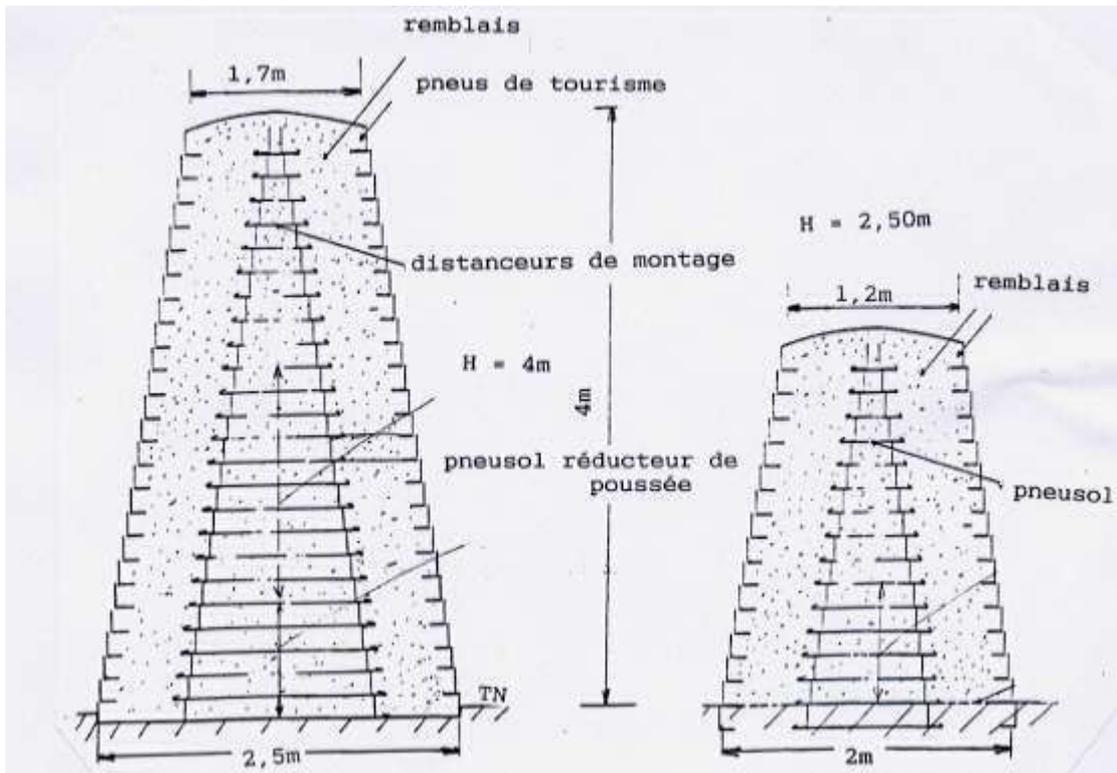


Figure 113 : Mur acoustique avec des pneus de tourisme

Les différents points de mesure sont indiqués sur la figure suivante (Fig.114).

L'ensemble des résultats montrent

- la qualité absorbante d'un tel mur acoustique, sauf pour la bande de fréquence de 1000 Hz,

- la dispersion des résultats, assez élevée, a priori liée principalement à la difficulté d'application de la norme expérimentale NF S-310.89. La figure 115 met en évidence cette dispersion.



Figure 114 : Points de mesure acoustique testés sur le parement de Pneusol par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg.

Elle montre aussi la variation du facteur local d'absorption acoustique en bandes de tiers d'octaves pour les incidences normale et oblique en fonction des fréquences. Ce facteur est plus faible pour certaines fréquences (500 ; 1600-2000 Hz, par exemple).

En bandes d'octaves, pour l'incidence normale, le parement de Pneusol testé est très absorbant pour 125, 250, 2000 et 4000 Hz, moyennement et faiblement pour 500 et 1000 Hz (Fig.115, 116).

Par contre, pour l'incidence oblique, il est faiblement absorbant pour 500, 1000, 2000 Hz.

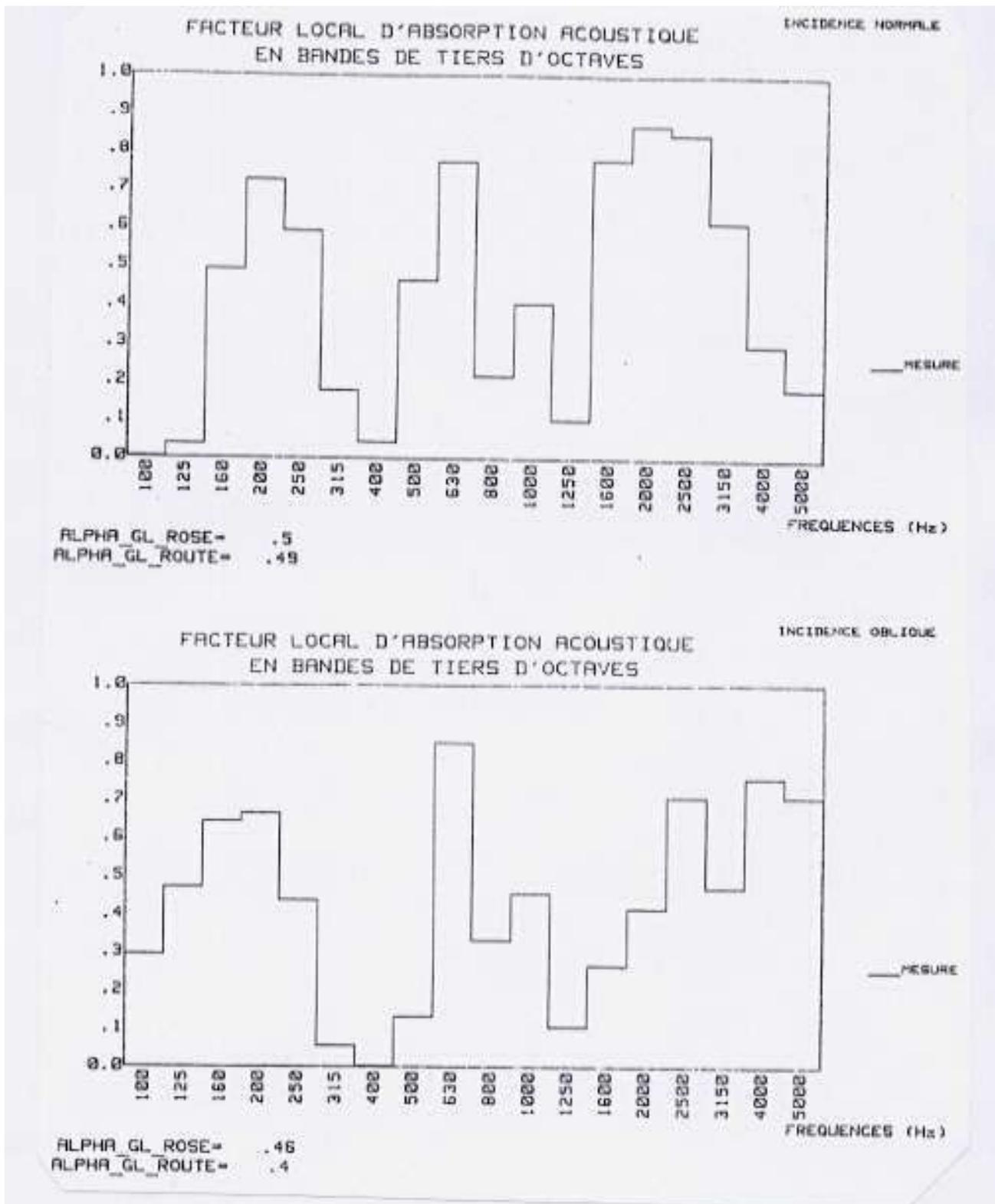


Figure 115 : Facteur local d'absorption acoustique en bandes de tiers d'octave

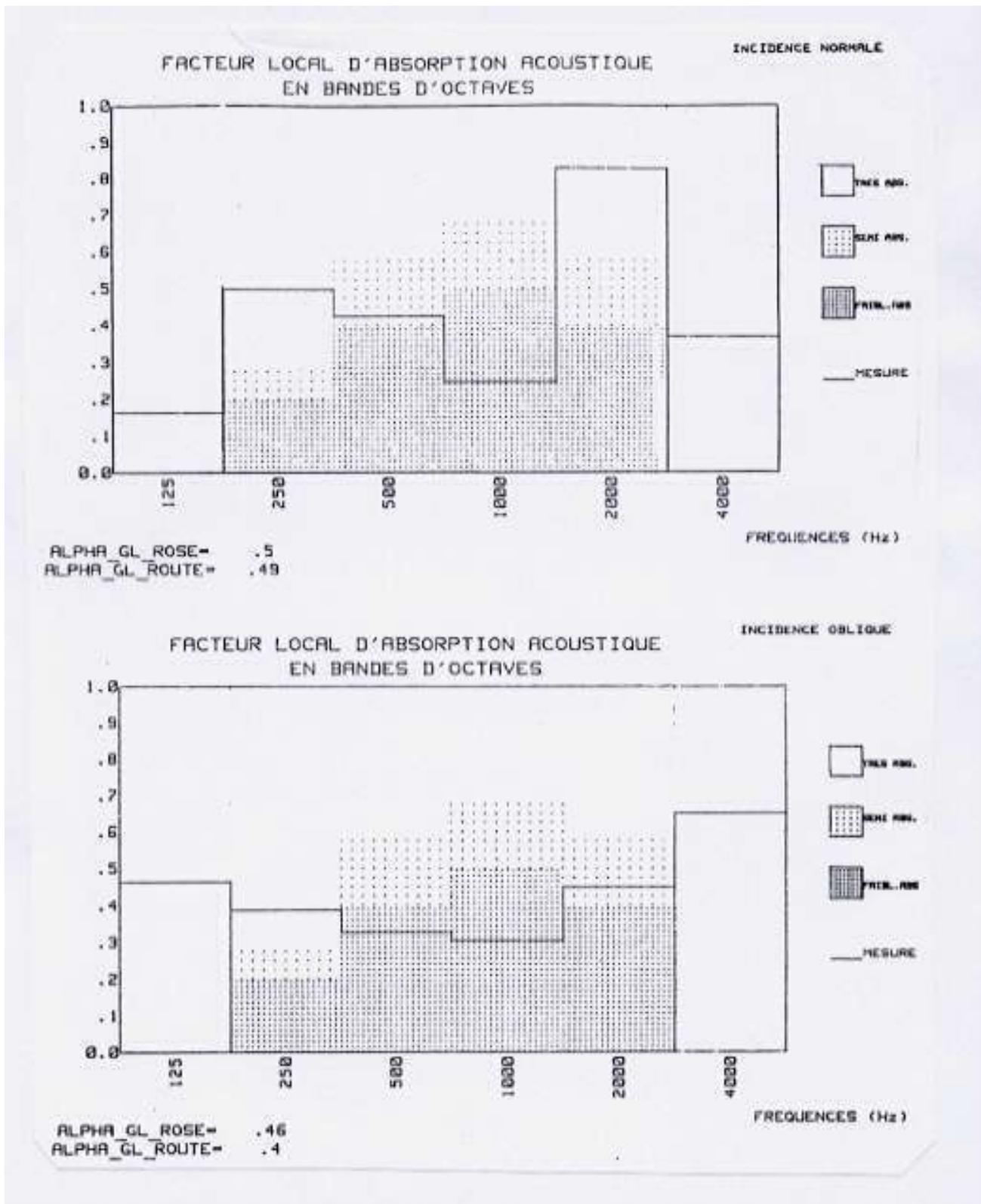


Figure 116 : Facteur local d'absorption acoustique en bandes d'octaves

3.7.4. Chaussée en grave traitée ou Pneusol "anti-fissure"

Un groupe de travail animé par MM.COLOMBIER (LRPC d'Autun) et VAUTRIN (SETRA) avait été mis en place dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées pour faire la synthèse des connaissances dans le domaine de la fissuration des chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques. De ce rapport très complet, nous pouvons constater la complexité de ces phénomènes de fissurations et la multiplicité des remèdes possibles. Parmi ces dernières, notons deux procédés "les joints actifs de chaussées" et la technique de la préfissuration, avec ou sans émulsion de bitume, qui semblent donner de très bons résultats car, en provoquant la fissuration, on peut en maîtriser le pas. Dans ces conditions, en multipliant le nombre des fissures, les sollicitations thermiques vont être réparties de manière telle que, le souffle de chaque fissure étant réduit, les conséquences dommageables qui en découlent vont être limitées.

La préfissuration pourrait être faite en incorporant des bandes de roulement associées en nappes à l'intérieur de la couche de grave traitée, soit sur l'ensemble de la couche de forme, soit à des intervalles données. On ne change rien à la couche de surface. Se pose la question de la transmission des charges des essieux d'une plaque à une autre et du dispositif pour assurer la continuité de l'ensemble.

Outre ces objections d'ordre technique qui pourraient d'ailleurs être levées par des essais en vraie grandeur (planches expérimentales), la question économique de ce Pneusol traité est posée.

3.7.5. Divers

Dans ce paragraphe, nous passons en revue les différentes solutions en Pneusol qui peuvent (ou pourraient) être appliquées à la résolution d'un certain nombre de problèmes de génie civil, mais dont l'étude précise, tant économique que technique, reste à faire.

a) Absorbeur d'énergie - Séparateur de trafic

Les séparateurs en béton de type New Jersey habituellement disposés entre les chaussées d'autoroutes et le long des voies urbaines à terre-plein central réduit sont utilisés avec succès en bordure de voie comme écran d'arrêt de pierres et de blocs roulant sur une pente. Son équivalence en Pneusol est un empilement de pneus de tourisme (ou de poids lourds suivant la hauteur souhaitée) remplis de remblais et encastrés dans le sol à l'aide d'une tige métallique (Fig.117).

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

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

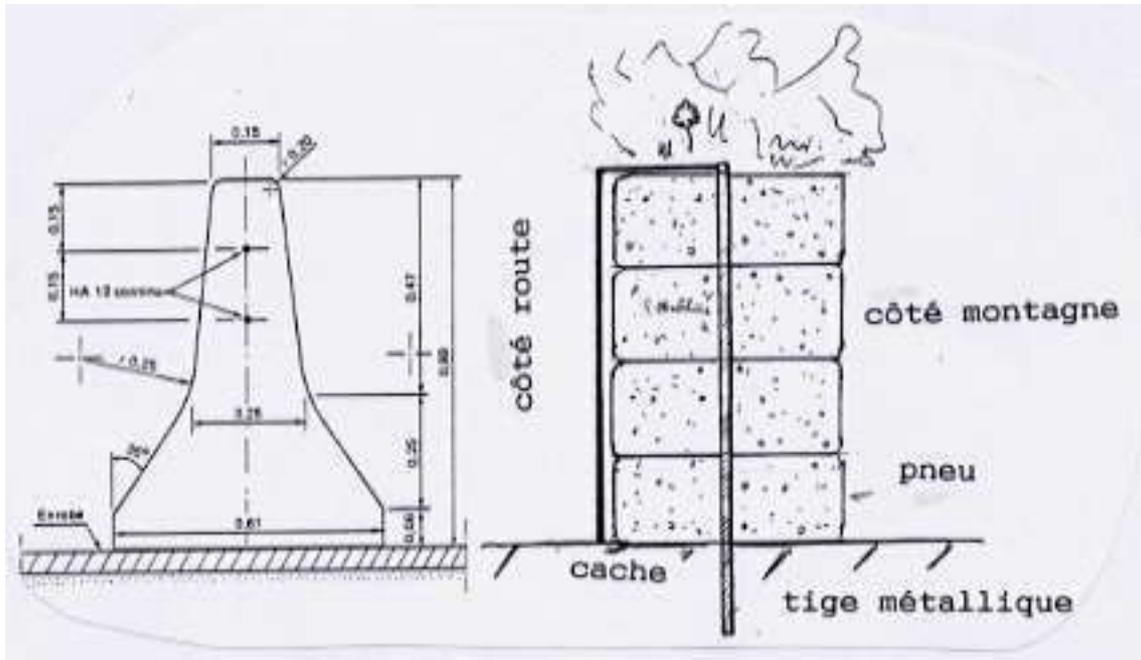


Figure 117 : Séparateurs en béton et en Pneusol

Un écran grillagé peut être adapté sur ce dispositif pour améliorer son efficacité. Il suffit pour cela d'allonger la tige métallique.

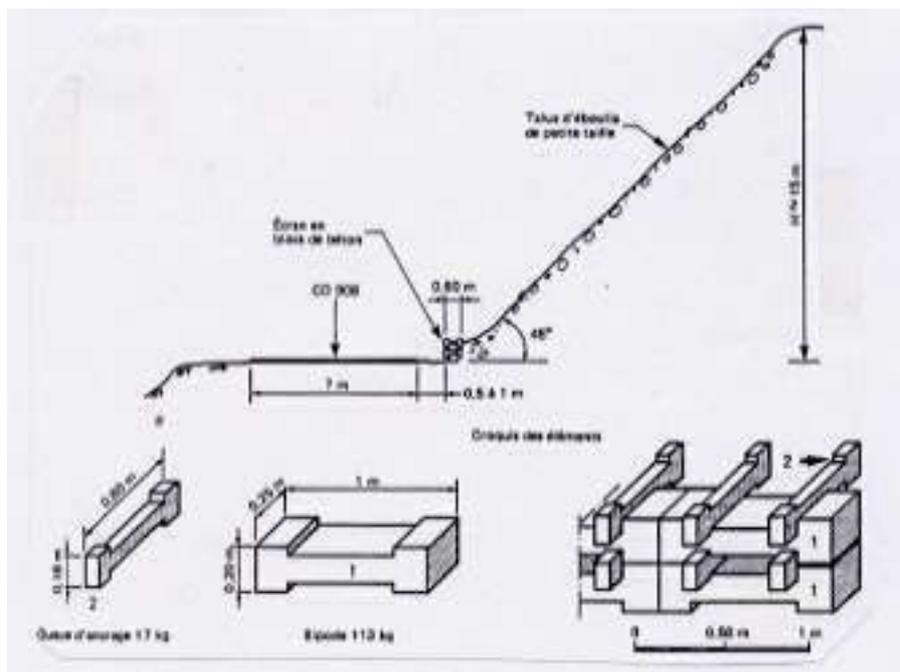


Figure 118 : Dispositif de protection en pied de talus

Ce dispositif peut aussi remplacer d'autres solutions classiques à base de béton comme, par exemple :

- l'écran constitué de poutres en béton entrecroisées en pied de talus (Fig.118),
- l'écran constitué par des blocs de béton préfabriqués empilés les uns sur les autres et disposés à une distance suffisante du pied du talus pour constituer un écran et un piège à cailloux (Fig.119),

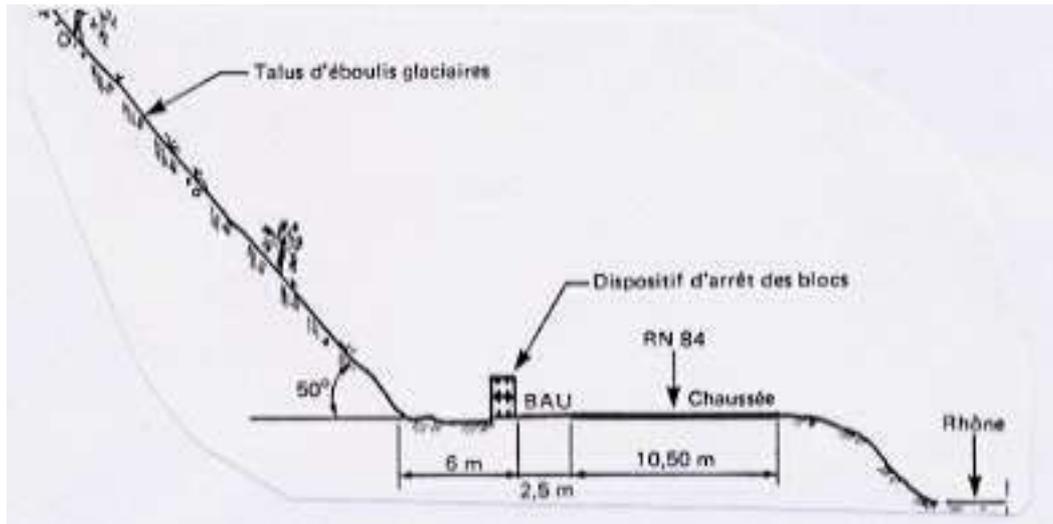


Figure 119 : Mur en blocs de béton

- barrière de protection en pied de talus constituée par des rails de chemin de fer et un grillage à gabion (Fig.120).

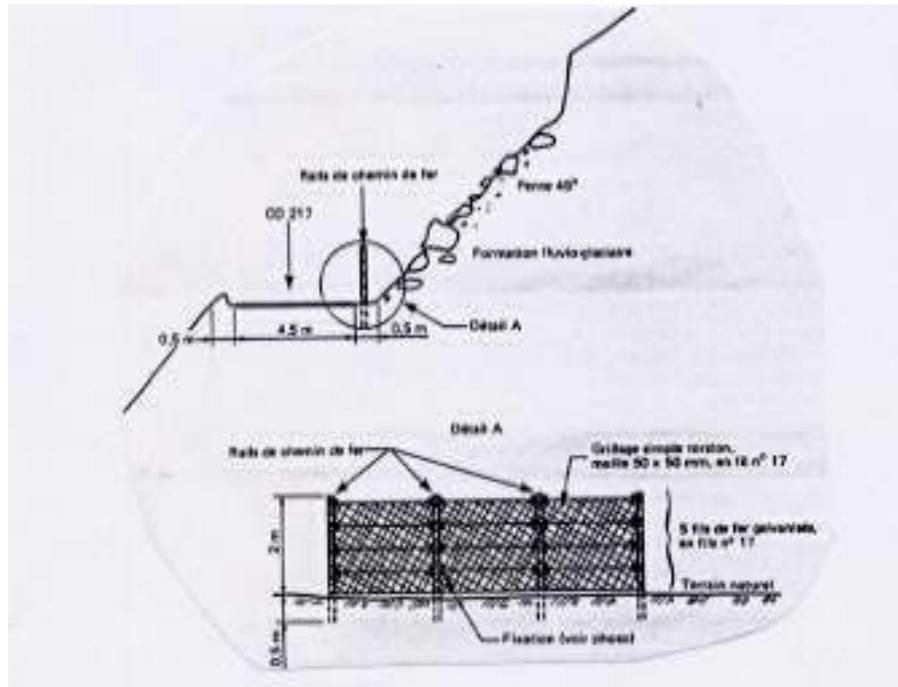


Figure 120 : Mur à base de rails de chemin de fer.

- merlon de terre (pour mémoire)

Il s'agit d'une levée de terre constituant un relief capable d'arrêter un bloc en mouvement, généralement roulant sur une pente en amont. Ce dispositif permet la création d'une chambre d'éboulis où viendront se stocker les blocs et les pierres en provenance de la pente. Ce procédé très efficace paraît en fait peu, utilisé peut-être à cause d'une emprise au sol trop importante. Cette emprise peut être diminuée par l'utilisation d'un mur "absorbeur d'énergie", déjà présenté précédemment (Fig.121).

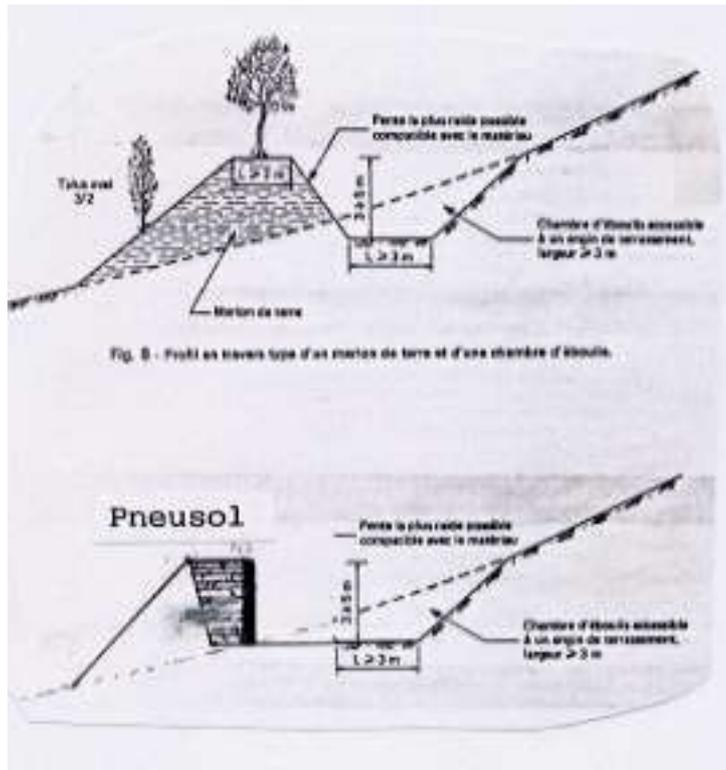


Figure 121 : Amélioration du merlon de terre.

Notons enfin qu'il peut être utilisé comme barrière de sécurité (provisoire) en construisant un petit muret de l'ordre de trois ou quatre rangées de pneus de poids lourds. Des essais réels ont déjà été effectués par la Subdivision de Thann lors de la construction de l'élargissement de la route nationale menant au Col de Bussang. Il s'agissait en l'occurrence de construire des barrières provisoires.

L'essai consistait à lancer un R4 (vitesse de l'ordre de 50 km/h) perpendiculairement à un mur en Pneusol constitué de trois rangées de pneus de poids lourds remplis de remblai et liés les uns aux autres longitudinalement par des crochets métalliques. Le véhicule est monté sur la première rangée de pneus et a buté sur les deux suivantes. Le fait de monter sur la première rangée de pneus permet de transformer une partie de l'énergie cinétique de la voiture en énergie potentielle (Fig.122).



Figure 122 : Vue de l'essai avec le véhicule

b) Domaines des voies navigables

b.1. Généralités

Le passage des bateaux provoque des mouvements de l'eau susceptibles d'éroder les berges des rivières et des canaux. L'action de l'eau sur une berge est fonction de la vitesse moyenne et de l'agitation de l'eau à son contact ainsi que d'éventuelles sous-pressions.

Le premier paramètre dépend du courant naturel et du courant de retour provoqué par le passage des bateaux. En ce qui concerne le second, c'est le batillage qui est en général le phénomène le plus dangereux pour l'érosion des berges. En simplifiant, on peut distinguer deux phénomènes essentiels, les ondes et l'abaissement moyen du plan d'eau.

Les ondes, qui ont des directions variables, peuvent favoriser l'arrachement et l'entraînement des matériaux de la berge. L'abaissement moyen du plan d'eau a pour effet de créer des sous-pressions dans le sol et de déplacer la tranche intéressée par l'action des ondes sur la berge.

A cela, il faut ajouter les remous dus aux hélices, aux tuyères orientables des pousseurs, les vagues provoquées par le vent.

Ces divers éléments se composent pour provoquer une érosion des berges, établissent un nouveau profil de type " parabolique avec risberne", profil toujours instable et susceptible d'évolution (Fig.123).

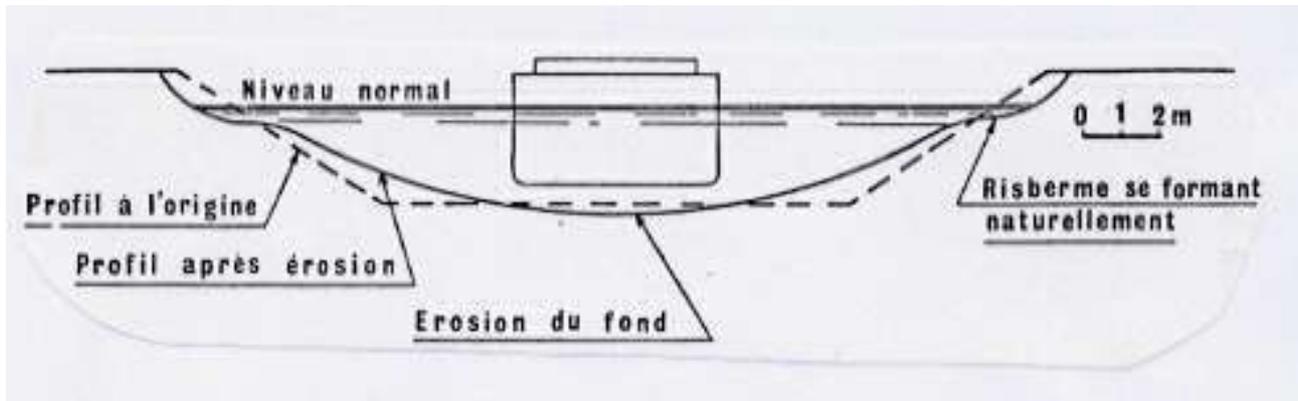


Figure 123 : Evolution type de la cuvette d'un canal avec risbernes non protégées

b.2. Défenses de berges

Les défenses de berges que l'on doit souvent mettre en place sur une grande longueur, constituent une part non négligeable dans les dépenses de construction d'une voie navigable. Leur coût est donc un facteur important pour la conception et le choix des types de ces ouvrages.

A l'exception de quelques cas particuliers où les contraintes de sécurité sont déterminantes, en général une défaillance localisée d'un revêtement ou d'une défense des berges n'aura pas de conséquences très dommageables. Aussi il ne faut pas chercher une sécurité maximale. Mais, en contrepartie, il faut que le système de protection conçu présente une dépense d'entretien modérée et acceptable.

La figure 124 montre le schéma type classique d'une défense contre le batillage avec risberne. Cette dernière, d'un à plusieurs mètres de largeur et de profondeur réduite, amortit l'onde de batillage et atténue l'effet du déferlement. Si, par contre, le niveau d'eau varie beaucoup, l'effet de la risberne devient très aléatoire.

La solution "Pneusol" est alors tout à fait indiquée à cause de son économie par rapport à une solution classique (béton, palplanche, gabion..), de sa facilité de mise en œuvre et de son faible coût d'entretien. Elle permet un raidissement des berges, de présenter une surface en pente et en fond de canal insensible au batillage, à l'action des remous de l'hélice, à la vitesse de l'eau.

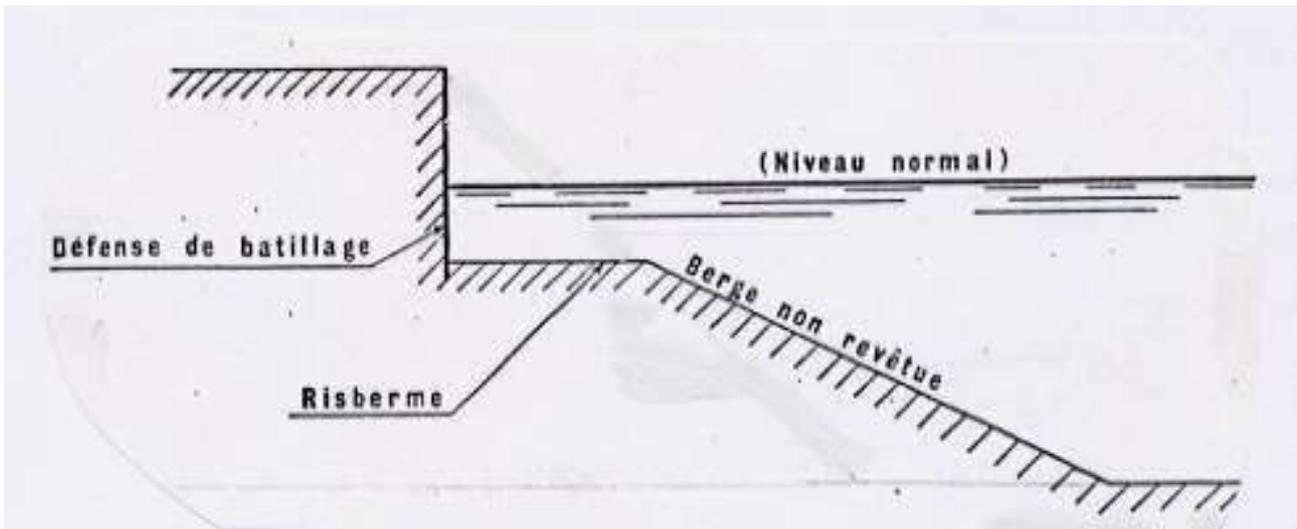


Figure 124 : Défense de batillage avec risberme

L'ouvrage en Pneusol est un raidissement de pente de type Kruth (Haut-Rhin). Les pneus utilisés sont de type tourisme si la hauteur n'est pas trop importante (inférieure à 6 m). Il s'agit d'associer les pneus (sur lesquels on a enlevé un flanc) par nappe horizontale en remblayant par des remblais de qualités diverses, par exemple (Fig.125) :

- de la grave ou du concassé sur 1 m pour amortir les ondes du batillage,
- 0,50 m de graviers ou de sable grossier et graviers servant de filtre si le remblai contient un fort pourcentage de fines,
- le remblai.

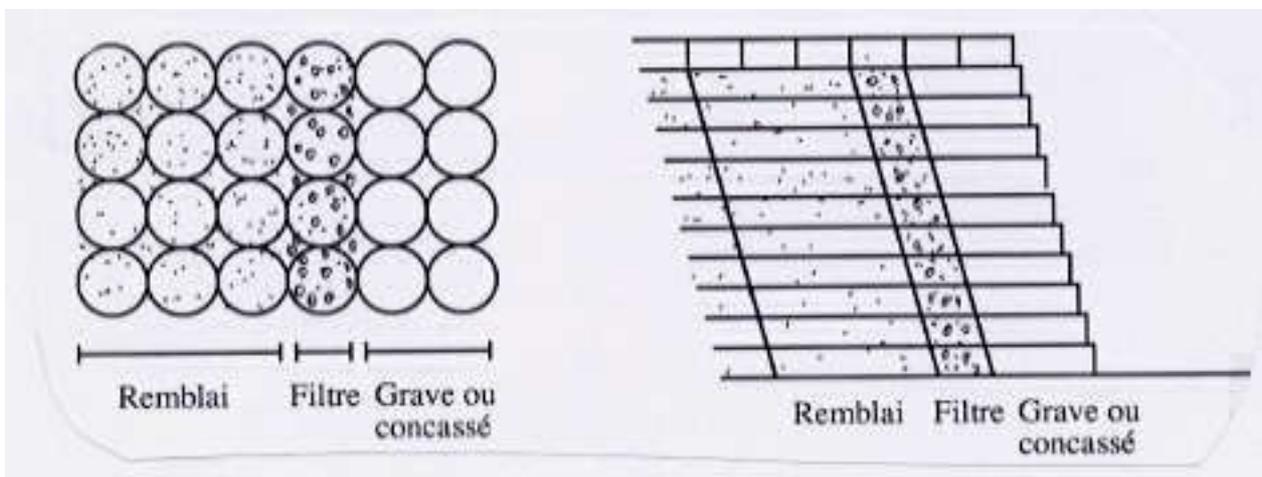


Figure 125 : Défense de berges en Pneusol

Lorsque la pente n'est pas trop importante, la pose directe du Pneusol sur le talus, associé éventuellement à un grillage en plastique à sa surface externe, peut rendre les mêmes services (Pneusol de type "Beaulieu-sur-Mer"). Le grillage externe empêche l'entraînement des gravillons et facilite le dépôt des matières en suspension. Ce dispositif pourrait également être utilisé en fond de canaux.

Son fonctionnement est identique à celui d'un matelas dont l'enveloppe est constituée par des bandes de roulement (avec un flanc ou deux flancs enlevés) et donc la pose sous l'eau ne présente pas de difficultés majeures. Une feuille de Bidim pourrait être intercalée entre le Pneusol et le remblai pour empêcher l'entraînement de fines.

Notons qu'on peut éventuellement lier les gravillons se trouvant à l'intérieur des bandes de roulement avec un mastic bitumineux (enduit bitumineux). Ce Pneusol bitumineux, presque imperméable, appliqué sur le talus aval d'une digue en terre ou d'un réservoir d'incendie submersible élimine l'érosion des pentes par l'eau en cas de crue imprévisible et de débordement.

Effectué in situ, il consiste (par exemple) à répandre les enrobés bitumineux amenés sur le site dans des camions chauffants et mis en place à l'aide de goulottes. Les figures 126 et 127 montrent quelques applications possibles.

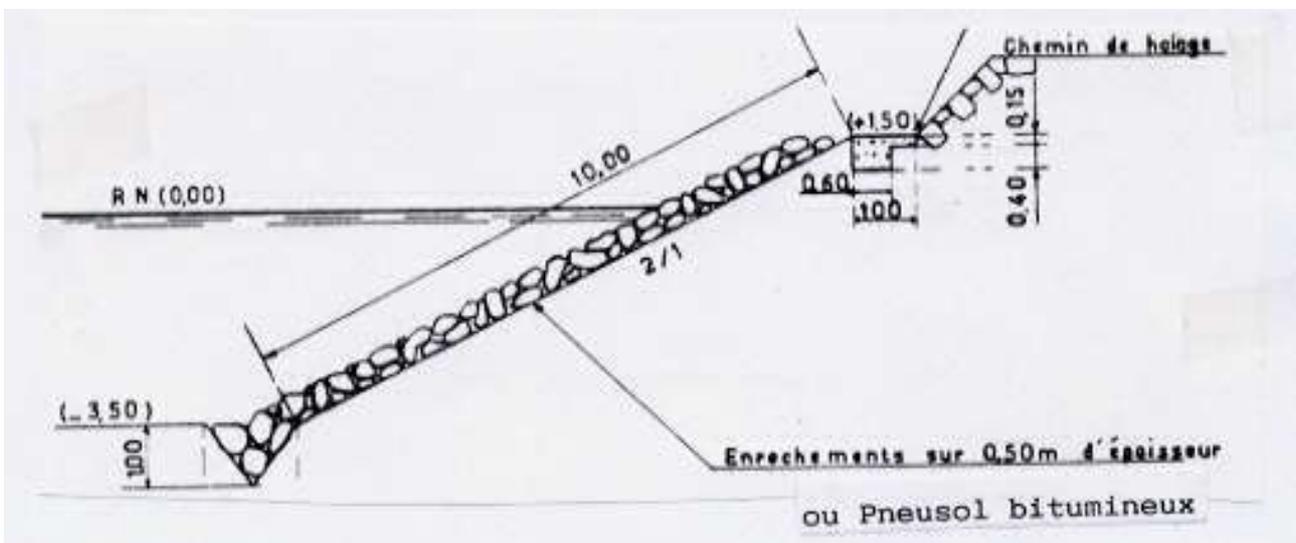


Figure 126 : "Enrochements" en Pneusol ou en Pneusol bitumineux

Une voie navigable présente des sections en déblais et d'autres en remblais, nécessitant la construction de digues. Selon que le niveau du plan du canal est situé en dessous ou au-dessus du niveau de la nappe phréatique environnante, des revêtements différents doivent être prévus.

Il faut, dans certains cas, rechercher des revêtements d'étanchéité pour limiter les fuites. Il n'en est pas toujours ainsi, notamment lorsque la dénivellation est faible et les terrains assez imperméables. Les fuites peuvent souvent être tolérées si elles sont faibles et n'entraînent pas de dommages (renards dans les digues,...).

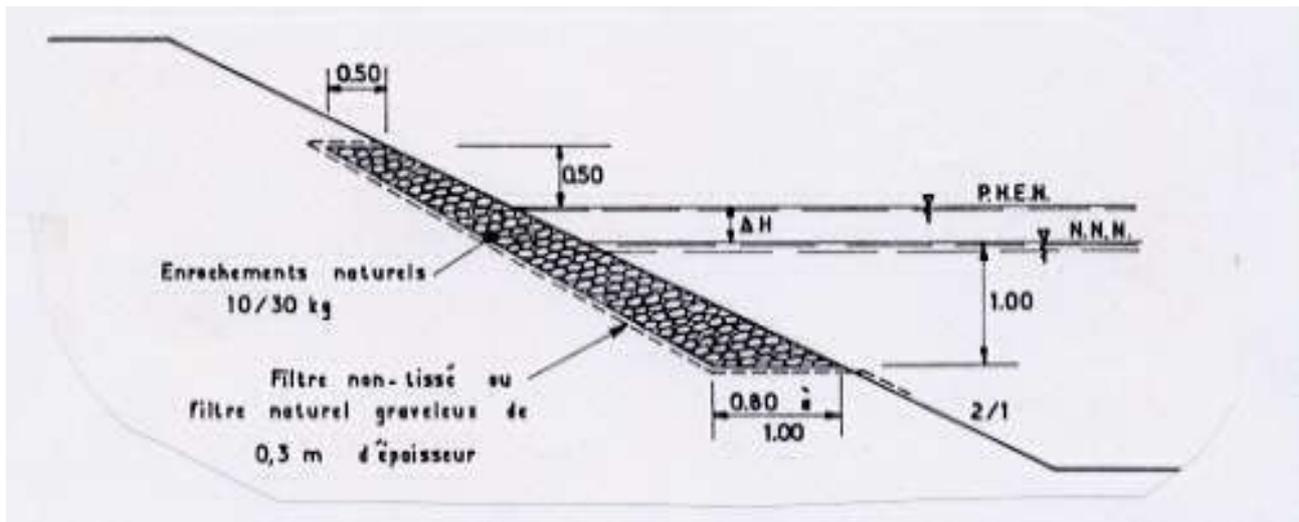


Figure 127 : Dispositif anti-batillage

Cependant, il est souvent indispensable de prévoir un revêtement d'étanchéité sur les berges, surtout s'il y a des digues en remblais.

La figure 128 montre deux solutions possibles en Pneusol avec parement en béton et étanchéité.

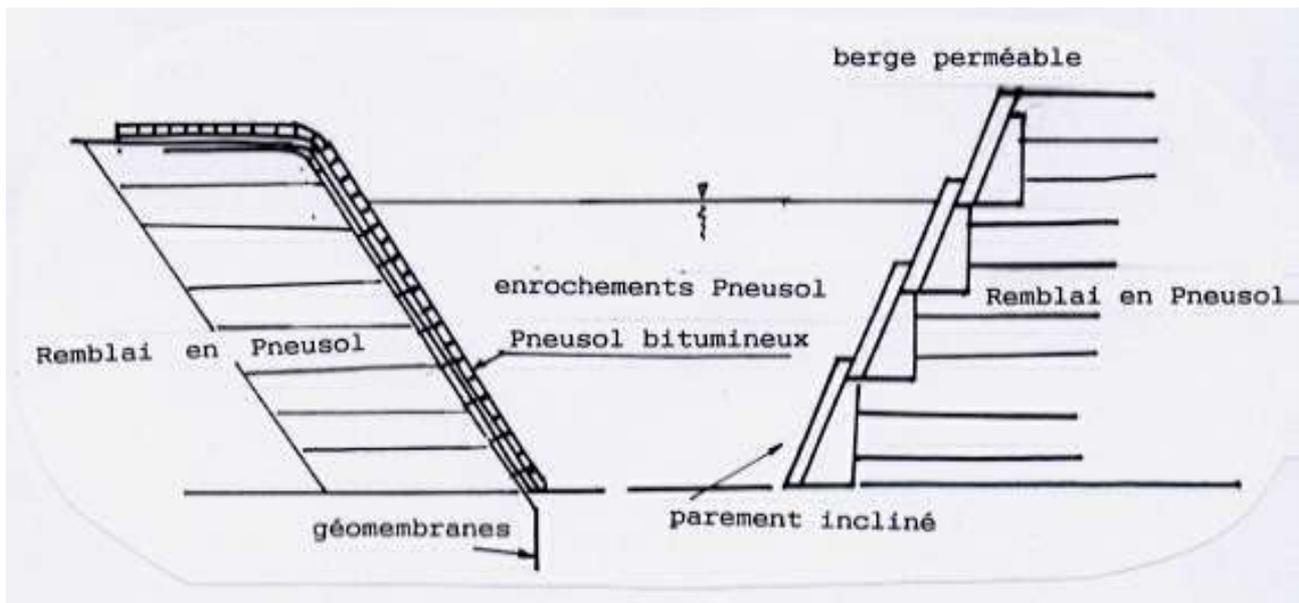


Figure 128 : Pneusol avec berges étanches et perméables
 En utilisant les qualités intrinsèques des pneus et du Pneusol à savoir,

- une grande capacité d'amortissement,
- la possibilité de construire des murs de soutènement,
- la facilité de mise en œuvre,

on pourrait envisager la construction de petits ports fluviaux (dans les pays en développement) à parois "absorbeuses de chocs", évitant ainsi de recourir à la construction de murs de quais munis de barbotages ou de défenses (pour petits bateaux) (Fig.129). A l'image d'un mur absorbant d'énergie en site terrestre, un quai absorbant est conçu de la même manière.

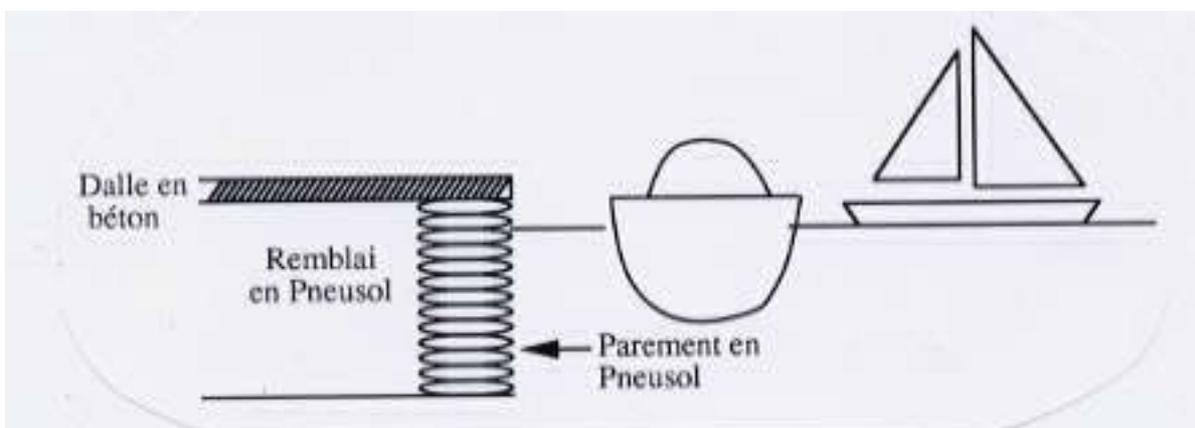


Figure 129 : Vue en profil d'un petit port fluvial

On pourrait même envisager la construction de tout l'ouvrage en Pneusol léger si le sol de fondation est de faible portance.

La solution anti-batillage a été utilisée pour la première fois en 1988 par la Subdivision maritime de Langres. Il s'agit de construire un mur de soutènement en Pneusol léger (pneus de poids lourds) de l'ordre d'un mètre à un mètre cinquante de hauteur.

Cette solution présente en outre l'avantage de ne pas surcharger les bords des canaux. Depuis cette date, plus de six kilomètres de protection ont été construits avec ce Pneusol et son coût est de l'ordre du quart de la solution classique la moins chère (le gabion métallique). Associé à une géomembrane, le Pneusol permet aussi d'étancher les digues des canaux . Cette solution d'étanchéité a aussi été utilisée sur le même site (Fig.130)

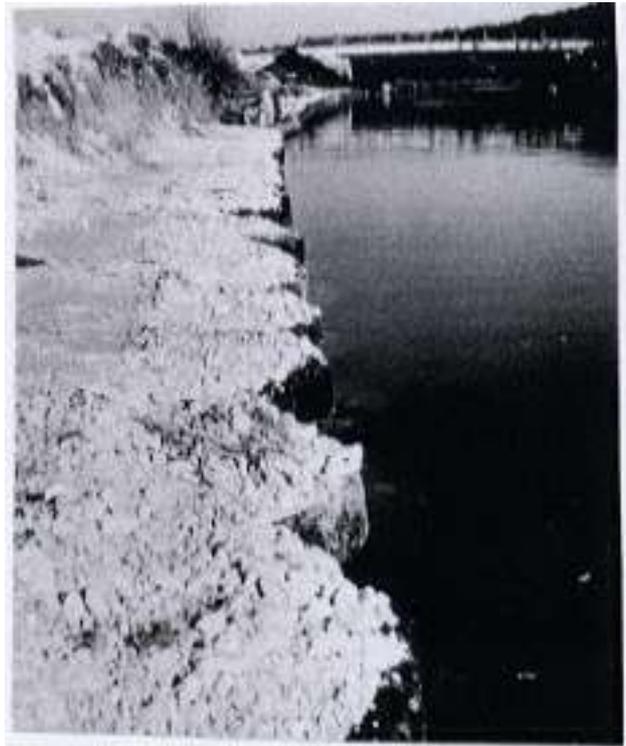


Figure 130 : Protection en Pneusol (pneus de poids lourds)

b.3. Réservoirs de crus en site urbain

Les événements de Nîmes et plus récemment ceux de Vaison la Romaine ont en évidence l'effet terrifiant de la non prise en compte du ruissellement et de l'écoulement des eaux pluviales dans les villes (entre autres). Actuellement, selon un rapport du Secrétariat chargé de la Prévention des risques technologiques et majeurs, plus de cinquante villes à risques dans les départements méditerranéens sont ainsi répertoriées (Libération du 21 Septembre 1992). Un des remèdes combiné avec d'autres, serait la construction en site urbain de réservoirs de crues souterrains, par exemple sous les routes, sous les parkings en terre-plein ou sous les terrains de sport.

Actuellement, on fait une excavation et on la remplit avec du ballast ou du Nidaplast. Ce dernier est relativement cher. Une solution possible pourrait venir de l'association du Pneusol léger construit avec du ballast, qui accentue ainsi le volume des vides.

*"Persévérez,"
"Appuyez sur des
principes,"
"Ils finiront à la longue par céder"
(B. Shaw)*

CONCLUSIONS GENERALES

Actuellement, plus de 250 ouvrages ont été construits en France dans de nombreux domaines du génie civil:

- murs de soutènement, y compris les raidissements des pentes et les murs absorbant l'énergie,
- remblais légers,
- répartiteur de contrainte au-dessus des conduits en béton,
- protection des pentes et des berges,
- réducteur de poussée.

Le décompte de chaque type d'ouvrage est relativement malaisé car nous n'avons pas une idée globale du développement de ce matériau, qui n'est pas breveté.

Si les premiers ouvrages construits sont des murs de soutènement (Fertrupt, Col du Bussang...), il semble que le Pneusol répartiteur de contraintes a pris une certaine avance sur les autres types à cause des économies très importantes qu'on peut tirer de son utilisation et de la facilité extrême de sa mise en œuvre. C'est aussi celui qui possède un calcul séduisant et simple et bien entendu très facile à exécuter. Certes ce calcul s'est d'ailleurs perfectionné récemment (LONG et VEZOLE, 1993), tout en restant simple.

Les murs de soutènement se développent régulièrement avec, pour seule précaution, de prendre en compte leur drainage. Comme pour tout ouvrage, cette précaution reste la règle d'or d'une bonne mise en œuvre. Dans ce domaine, l'utilisation des pneus de tourisme ou de poids lourds en entier est possible encore faudrait-il faire quelques essais plus pour convaincre les maîtres d'ouvrages que pour la connaissance de leur comportement proprement dit.

Le Pneusol absorbeur d'énergie a un certain handicap dans la mesure où son dimensionnement sous chocs n'est abordé que par comparaison avec celui d'un sol. Les résultats des essais effectués avec la société Campenon Bernard, la DDE du Var et le LCPC (chute d'un bloc de béton de 7 tonnes sur des structures de Pneusol équipées d'appareils de mesures) n'ont jamais été publiés faute de temps pour pouvoir les dépouiller intégralement!

Seule sa mise en œuvre permet de mettre en évidence ses qualités d'absorbeur d'énergie. En effet, il suffit de mettre au moins trois nappes de pneus de poids lourds pour espérer couvrir toute la surface à protéger.

Les Pneusol réducteur de poussée et de protection des pentes n'ont été proposés que très récemment. Si des ouvrages ont effectivement été construits, il reste que ces ouvrages sont peu connus, car leur publication a un peu tardé, ce qui ne facilite pas leur diffusion auprès des entreprises et des maîtres d'ouvrages.

Ces domaines sont très porteurs et leur développement ne fait aucun doute.

En ce qui concernent les domaines potentiels d'utilisation, les résultats obtenus lors des essais sont très prometteurs pour l'atténuation d'ondes, de bruits sonores. Un très important programme d'essais sur le comportement du premier est actuellement en cours de réalisation avec la DDE de l'Isère et l'ESRF, l'organisme qui gère le synchrotron de Grenoble. Le développement du second nécessite une végétalisation rapide permettant la mise sous verdure des pneus. Par ailleurs, un programme de coopération avec l'Ecole d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) a été mis en œuvre pour l'utilisation du Pneusol comme fondation antisismique. Des essais seront réalisés sur une table vibrante de cette école.

Le Pneusol antigel est actuellement testé par le Ministère des Transports du Québec et les résultats seront connus au cours de l'été 1994. On peut envisager avec confiance l'issue de ces essais, car la disposition en quinconce des pneus de poids lourds sur trois couches ne peut qu'empêcher le développement du front de gel du à l'arrivée des eaux.

Longtemps considéré comme théoriquement incalculable, c'est à dire impossible à homogénéiser, le Pneusol par son côté cyclique a rendu possible sa "mise en équation". Cette homogénéisation effectuée par BOUTIN et al permettra ultérieurement de vérifier l'ensemble des essais expérimentaux effectués et présentés dans ce rapport.

"Le dernier mot reste toujours à ceux qui ne se rendent jamais"
(Georges Clémenceau)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

E.T SELIG, K.E.Mc KEE "Static and dynamic behaviour of small footings" Journal Soils Mech. and Found. Eng., ASCE, 1961, vol. , n° , pp.

REESE, DAWSON, COYLE, BAKER, GHAZZALI et SMITH "Investigation of the effects of soil conditions on the landing of manned spacecraft" University of Texas, Mars 1964, 60p, report to the Nasa center of Houston.

POOR, COX, REESE "Behaviour of a sandy clay under vertical impact of geometric shapes" University of Texas, May 1965, 80p , report to the Nasa center of Hampton.

SCHLOSSER F.,VIDAL H. "La terre armée" Bull.Liaison Labo. des P.et Ch. Nov.1969, n°41, pp.101-144 .

- NGUYEN THANH LONG, GUEGAN Y., LEGEAY G. "Etude de la terre armée à l'appareil triaxial" Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Juillet 1972, 77p , Rapport de recherche LCPC n°17 .
- F.SCHLOSSER "La terre armée: Recherches et réalisations" Bulletin de liaison Labo.P.et Ch., Nov.Dec 1972, pp.79-91
- NGUYEN THANH LONG, GUEGAN Y.,LEGEAY G., SCHLOSSER F. "Etude de murs en terre armée en modèle bidimensionnels" Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1973, 63p, Rapport de recherche LCPC n°30.
- CANIARD L, ROUQUES G. NOTE D'INFORMATION TECHNIQUE LCPC : "GEL ET DEGEL DANS LES CHAUSSEES Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Janv. 1975, 15p.
- Pieter HOEKSTRA & Robert KEUNE "Freezing pressures of clays soils" Hanover (New Hampshire) US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 20p.
- SANTINI C., NGUYEN THANH LONG "La terre armée par modèles photoélastique" Bull.Liaison P. et Ch. 1978, n°97, pp.121-131.
- TONY AWAD "Etude de l'effet des chutes de blocs sur des ouvrages de protection en béton armé" Paris : Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, 1980, 75p, Travail fin d'études.
- NGUYEN THANH LONG "Terre Armée avec pneumatiques" Contrat n° 77.7.0526 Action concertée de la Délégation Générale de la Recherche Scientifique et Technique (DGRST) Maison de la Chimie Janvier 1978.
- NGUYEN-THANH-LONG,POUGET P. "Le renforcement des sols par des pneumatiques usagés", Paris: Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique, Sept. 1980, 116p, Rapport.
- CARTIER G.,NGUYEN THANH LONG, POUGET P., BARGILLAT R., CUDENNEC J.P.,"Déchets Urbains et pneumatiques usagés en Génie-Civil" 10è Congrès international de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Stockholm 1981, pages.
- NGUYEN THANH LONG, LEGEAY G., MADANI C. "Triaxial friction of reinforced sand" Congrès eur.de mec. sols et fond. , Helsinki 1982, pages.
- LASSAUCE P., ANTOINE R., MIEUSSENS C., TESSONNEAU D., FEUTRIER D., "Remblai en polystyrène dans l'Hérault" Revue générale des Routes et Aérodrômes, 1984, n°607 Avril pp.79-87.
- NGUYEN THANH LONG, DELMAS Ph, POUGET P., "Caractéristiques et domaines d'utilisation des pneumatiques usagés" Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1984, n° 129 Janv.Fév., pp.21-28.

- NGUYEN THANH LONG " Le Pneusol" Coll. International "Routes et Développement" Paris: Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement. Mai, Paris 1984, pp.859-866.
- NGUYEN THANH LONG " Le Pneusol: Réalisations" Colloque "Innovation dans les techniques de la Route" Paris, 1985, n°16/17, 6p.
- NGUYEN THANH LONG "Le Pneusol" Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Juil.1985, 36p, Rapport des Laboratoires n°7.
- NGUYEN THANH LONG "Les pneus en renforcement de terrains: Le Pneusol" - Le recyclage du caoutchouc et des matières plastiques- Journées ANRED, Angers, Juin 1985, pp.57-60.
- NGUYEN-THANH-LONG "Convention ANRED-LCPC" Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1985, 25p, Rapport interne.
- K.AB-MALEK, A.STEVENSON (1986) "The effect of 42 years immersion in sea water on natural rubber". Journal of Materials Sciences, 1986 , n°21, pp.147-154.
- B.AUDEOUD, NGUYEN THANH LONG, P.URSAT "Pneusol, Tyresoil and the Stabilization of slopes" 8eme Danube European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Nürnberg, Sept.1986, pp349-351.
- M.GUILLEMIN, NGUYEN-THANH-LONG, M.VIGNERON, E.WASCHKOWSKI "Pneusol sur l'étang du Puits" Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1986, 31p. Rapport interne.
- P.HENENSAL, O.BENOIT "Contribution des véhicules à moteur à la pollution atmosphérique acide" Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1987, 111p, Rapports des Laboratoires EG-3
- GAIOTTINO C., NGUYEN THANH LONG , URSAT P. "Le Pneusol et les ouvrages de soutènement" 9ème Conférence Régionale Africaine, Lagos Septembre 1987, pp. 655-662.
- DANTEC P., JEAN P.A., NGUYEN THANH LONG, POUGET P., SAPY M. "Le Pneusol et l'effet de voûte" Colloque International "Interactions Sols-Structures", ENPC, Paris, Mai 1987, pp.321-328.
- NGUYEN THANH LONG "Domaines d'utilisation du Pneusol" 4ème Colloque Franco-polonais, Grenoble, 1987, pp.505-517.
- P.LAREAL, NGUYEN THANH LONG "Le Pneusol réducteur de Poussée" 4ème Colloque Franco-polonais, Grenoble, 1987, pp.519-530.
- NGUYEN THANH LONG " Le Pneusol" Bulletin d'Information Route, CETE lyon, 1987, 6p.
- BEAUMONT J., N.T.LONG, I.PIONA, P.URSAT "Mur PNEUSOL: Efficacité acoustique" Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, 1987, 32p, Rapport interne.

- Y.CANEPA, D.DEPRESLE, J.LEPP, J.L.SMIRR "Fondations superficielles établies sur du sable de Fontainebleau mis en place dans une fosse" Laboratoire Régional de l'Est parisien, 1987, 35p. Rapport interne.
- NGUYEN THANH LONG, LEGEAY G. "Ouvrages en terre armée - Etudes en laboratoire" Rapports des Laboratoires, Jan.1988, n°27, 72p.
- AUDEOUD B., NGUYEN THANH LONG, URSAT P. "Une astuce à deux niveaux" Revue des TPE Janvier/Février n°89, 1988, pp 18-20.
- BAILLY J.C., BESCOND B. GUILLARD Y., NGUYEN THANH LONG, SCHMUTZ D., URSAT P., VALEUX J.C., WASCHKOWSKI E., "Le Pneusol: Recherches et réalisations" Congrès International de la Route de l'An 2000, Berlin Septembre, 1988, pages.
- COLOMBIER, VAUTRIN "Fissuration de retrait des chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques" Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, Oct.1988, 154p, Rapport de synthèse interne.
- HUMBERT P. "CESAR-LCPC Un code de calcul par éléments finis Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Fev.Mars1989, n°160, pp.112-115.
- NGUYEN THANH LONG, JEAN P.A., VAUTRIN J.C., URSAT P., WASCHKOWSKI E., BESCOND B., POUGET P. "Le Pneusol" SETRA., 1989, 6p, Note d'information technique du SETRA.
- NGUYEN THANH LONG, VALEUX J.C. "Le Pneusol léger" Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1989, 51p, Rapports des Laboratoires GT n°37.
- JEAN P.A., NGUYEN THANH LONG "Creation of arching (Pneusol and others technics)" Colloque International "Instrumentation in Geotechnical Engineering" Nottingham April, 1989, pp 17-24.
- NGUYEN THANH LONG, SCHMUTZ D., URSAT P. "Lutzehouse Landslide Repair using Pneusol" 2ème International Symposium on Environmental Geotechnicology Tongji University,Shangai May 1989,
- GUILLARD, NGUYEN THANH LONG, URSAT P.,VALEUX J.C. "Pneusol: Essais de vibrations". 2ème Colloque National AFPS "Génie parasismique et aspects vibratoires dans le Génie-Civil" Saint Remy les Chevreuses, Avril 1989, pp 40-49.
- NGUYEN THANH LONG "The Pneusol" Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1990, 76p, Rapport des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Série Géotechnique GT 44.
- ESBELIN G., NGUYEN THANH LONG, MODERCIN I., URSAT P. "Les possibilités du Pneusol" Congrès International "Innovation, Progrès Industriel et Environnement", Strasbourg, Juin 1991, pp.
- P.LAREAL, NGUYEN THANH LONG "Pressure reducing Pneusol:

Researchs and Applications".9è Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.1, Bangkok 1991, pp 501-504.

D.BRICOUT,J.L.DUPRESSOIR, NGUYEN THANH LONG "Réparation d'un glissement par le Pneusol léger".6è Symposium International sur les glissements de terrain, Christchurch Nouvelle-Zélande 1992, pp.

LAREAL P., NGUYEN THANH LONG, BENAMEUR F.,COLLAS P. "Active Earth Pressure Reducing Pneusol" 5ème International Conference on Retainig Structures, Cambridge, July 1992, pp.628-638.

DOAN TU HO, NGUYEN THANH LONG, PIAU J.M., VEZOLE P. "Pneusol répartiteur de contraintes" Colloque International "Geotechnique et Informatique", Paris, Septembre 1992, pp.

C.DUQUENNOI "Performance au gel des stratégies d'isolation thermique des fondations superficielles de bâtiments" Annales des Ponts et Chaussées, 2ème trim.1992, pp.3-19.

NGUYEN THANH LONG, P.VEZOLE "Ovrages sous remblai - Pneusol et maîtrise des charges verticales - Conception et Dimensionnement" Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux publics, Juillet-Août 1993, n°515, pp.2-35.

G.ESBELIN, NGUYEN-THANH-LONG, P.URSAT "Pneusol at the Bussang pass" Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St Louis Missouri, June 1993,

C.BOUTIN, P.JOUVE,P.LAREAL, NGUYEN-THANH-LONG "Essais d'homogénéisation du Pneusol" Rapport Scientifique GRECO-Geomatériaux Nov.1992, pp 311-317.

T.H.DOAN, NGUYEN-THANH-LONG, J.M.PIAU, P.VEZOLE "Pneusol for counteracting the Marston effect" Eleventh Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapour, May 1993, pp 703-707

NGUYEN-THANH-LONG "Used tyres in civil engineering: Pneusol at Bussang pass" REC'93 International Recycling Congress at the REC'93 - Tradefair, Geneva, Jan. 1993, 11p.

C.BOUTIN, A.BOULEBNANE, P.LAREAL, NGUYEN-THANH-LONG "Approche théorique et expérimentale du Pneusol léger" Journées franco-polonaises ,Douai, Sept.1993, pp.