N° d'ordre 93 ISAL 0118 Année 1993

THÈSE

présentée devant

L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES
APPLIQUÉES DE LYON

pour obtenir le grade de

Docteur en Génie Civil
Sols – matériaux – Structure et Physique du Batîment

Le Pneusol : Recherches – Réalisations – Perpectives

Nguyen Than Long
Ingénieur civil des ponts et chaussées

Soutenue le 22 décembre 1993 devant la Commission d'Éxamen

Table des matières

1 Technologie du Pneusol **13**

1.1 Introduction 13

1.2 Les utilisations des pneus usagés en France 14

1.2.1 Généralités 14

1.2.2 Valorisation sous forme de matières premières 15

1.2.3 Valorisation énergétique 16

1.2.4 Emploi dans les ouvrages de génie civil : un secteur en développement 17

1.2.5 Conclusions 17

1.3 Le Pneusol : Materiau et structure 18

1.3.1 Généralités 18

1.3.2 Massif de soutènement : parement, pneus et attaches . 19

1.3.3 Matériau de remblai 27

1.3.4 Mise en oeuvre du Pneusol 29

1.3.5 Durabilité 34

1.4 Conclusions 37

Avant-Propos

Thèse préparée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)

...à cette paysanne,
...à ce paysan,

...de la province de Longan du delta du Mékong chassés de leurs rizières par les grandes inondations de 1936.
"ce qui compte, c'est le bonheur de faire sortir quelque chose de soi, parce qu'alors, nos rêves deviennent expressions"
(Tao)

Jury

M. F. SCHLOSSER .... Rapporteur – Président du Jury
M. P. LAREAL .... Directeur de thèse
M. K. DANG VAN .... Rapporteur
M. J.F.COSTE .... Examinateur
M. J.L.DURVILLE .... Examinateur
M. R. KASTNER .... Examinateur
M. A. NAVARRO .... Examinateur

Remerciments

"Une connaissance qui n'est pas partagée n'existe pas"
(Dr.W.Rozenbaum)

Les remerciements que je voudrais formuler, après vingt années de recherches et développement sur le Pneusol, sont particulièrement nombreux. Ils touchent pratiquement tous les niveaux intéressés par le génie civil (diverses personnalités du Ministère de l'Equipement, du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, de l'Université, des Ecoles, des Entreprises...).

Chacun d'eux, à leur façon (et quelquefois non sans quelques appréhensions), ayant soutenu et partagé cette "connaissance", a permis à ce matériau, lancé dans les années 1974, d'atteindre actuellement plus de deux cent cinquante [1] ouvrages, d'être présent dans de nombreux pays, d'être parfois La solution technique (par exemple, Pneusol répartiteur de contraintes) et d'avoir bientôt des recommandations officielles.

Le démarrage des recherches sur la valorisation des pneumatiques usagés se fait dans le cadre du contrat n ° 77.7.0526 de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique dont j'ai assuré la responsabilité scientifique avec un soutien financier de 150KF. Les premiers résultats ont été présentés le 31 janvier 1978 à la Maison de la Chimie à Paris.

Ce développement n'était pas possible sans le soutien décisif de Monsieur Jean Bonitzer, Ingénieur général des Ponts et Chaussées, Président du Comité Conseils à l'Innovation Routière (CCIR) qui m'avait "donné" en 1984 une somme de 400 KF pour payer éventuellement la différence entre une solution classique et une solution Pneusol. Le Pneusol étant plus économique, cette somme m'avait alors permis d'effectuer les premières constatations sur les ouvrages ainsi réalisés.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur François Schlosser, Professeur à l'ENPC avec lequel j'avais l'occasion de travailler depuis de nombreuses années, d'avoir voulu, en acceptant de présider mon jury, d'être mon rapporteur, de témoigner ainsi de son amitié.

Je remercie vivement Monsieur Pierre Laréal, Professeur à l'INSA de Lyon, d'avoir accepté d'être mon Directeur de thèse et de croire suffisamment au Pneusol pour lancer les premières recherches sur le Pneusol réducteur de poussée dès 1987.

Je suis également reconnaissant à Monsieur Jean François Coste, Ingénieur général des Ponts et Chaussées, Directeur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de m'avoir soutenu avec discrétion et fermeté le développement de ce matériau, de m'avoir autorisé à présenter cette thèse et de participer à mon jury.

Je suis très honoré par la présence au jury de Monsieur DangvanKy, Ingénieur civil des Ponts et Chaussées (64), Directeur de recherches au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique, responsable des thèses à l'École Polytechnique qui a de plus accepté de se charger d'un rapport.

[1] Chiffre de 1993 car actuellement (août 2001) nous avons largement atteint le nombre mille

Je suis également reconnaissant envers :

* Monsieur J.L. Durville, Chef de la Division Mécanique des sols et Géologie de l'Ingénieur au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
* Monsieur R.Kastner, Directeur du Laboratoire de Géotechnique de l'INSA
* Monsieur A.Navarro Directeur du Laboratoire d'Environnement de l'INSA de Lyon

...qui ont, notamment accepté de participer au jury de soutenance et d'examiner ce travail.

Qu'il me soit aussi permis de remercier Messieurs J. Bonnot Directeur Technique au LCPC, chargé de superviser les travaux du GSC 36 sur la valorisation des Déchets et Sous produits industriels, J.C Valeux du Centre d'Expérimentations Routières de Rouen, P.Pouget du Laboratoire Régional de ClermontFerrand, P.Ursat du Laboratoire Régional de Strasbourg, E.Waschkowski du Laboratoire Régional de Blois, mes collègues de recherche du début du Pneusol, ces deux derniers avec J.L.Durand Directeur départemental du Bas-Rhin, B.Audéoud de la DDE du Haut-Rhin, J.C.Bailly de Scetauroute, P.A.Jean et J.C.Vautrin du Setra, P.Vézole de la Forézienne d'Entreprises, I.Modercin du CETE Méditerranée, J.Arnaud de la DDE du Var, ..., ayant largement contribué au développement de ce matériau dans leur région respectif et apportant ainsi ses premières lettres de noblesse.

Que ceux ou celles que j'ai pu momentanément oublier aujourd'hui, veuillent bien me pardonner. Ils me reviendront nécessairement à ma mémoire et me feront regretter mon ingratitude momentanée.

Résumé

Le Pneusol est formé de l'association de deux éléments : des pneus et du sol. Le mot "pneus" désigne tous les éléments des pneus usagés (deux flancs, une bande de roulement) ou les pneus en entier, associés linéairement ou en nappes et susceptibles de supporter des efforts de traction importants. Le mot "sol" englobe toutes les variétés de terrains naturels, artificiels ou déchets divers. Fin 1993, plus de deux cent cinquante ouvrages ont été construits en France, douze en Algérie, six aux États-Unis, et d'autres en Suisse, en Allemagne, en Roumanie, en Jordanie, au Brésil, au Rwanda...dans différents domaines du Génie Civil (mur de soutènement, remblai léger, absorbeur d'énergie, répartiteur de contraintes, protection de pentes et de berges...). Cette thèse présente l'ensemble des possibilités de ce matériau, sa technologie, son comportement, ses méthodes de dimensionnement ainsi que des

recommandations pour sa mise en oeuvre.

Summary

The Pneusol (Tyresoil) is formed by the association of two elements, used tyre and soil. The word "tyres" means here all parts of old tyres (two sidewalls and a tread) or entired tyres used together in chains or in tiers and capable of withstanding large tensile forces. The word "soil" covers both the whole range of natural grounds, and a variety of wastes. By the end of 1993, more than 250 structures have been built in France, 12 in Algeria, 6 in the United States of America, and others in Switzerland, in Germany, in Roumania, in Jordan, in Brazil, in Rwanda...covering a wide range of civil engineering applications (retaining walls, lightweight fill, energy absorber, stress repartitor, slope or river protection...). This thesis presents all the possibilities of this material, its technology, its behaviour, its methods and recommendations for its installation.

Introduction Générale

Les temps ont bien changé. La volonté d'améliorer l'environnement par le besoin d'un cadre de vie plus agréable, le poids de plus en plus important de l'écologie. . .ont amené les pouvoirs politiques nationaux et régionaux à définir une politique de valorisation des déchets, à resserrer leurs liens dans ce domaine, à coordonner leurs actions pour promouvoir cette politique. Le problème des déchets est aussi européen et préoccupe la Communauté Européenne, qui a proclamé en 1987 l'Année européenne de l'Environnement avec un budget important pour des projets de démonstration visant au développement de technologies nouvelles propres, à la mise au point de nouvelles techniques et méthodes de mesure et surveillance de la qualité de l'environnement naturel. Une démarche communautaire d'incitation était même envisagée en faveur des entreprises disposées à s'attaquer à la mise en oeuvre des résultats des recherches. L'Environnement est donc devenu un enjeu important. Déjà le Conseil Régional de Rhône-Alpes a appelé en 1990 les entreprises locales à lui proposer des "écostructures" et a promis la construction d'au moins de 20 "écotechniques" par an. Le phénomène ne peut que s'amplifier. Le Pneusol est formé de l'association de pneus (poids lourds ou de tourisme) entiers, partiellement découpés (enlèvement d'un flanc) ou totalement découpés (enlèvement de deux flancs) et de sols naturels ou artificiels (argile expansée, par exemple), pulvérulents ou légèrement cohérents, ou de déchets divers (mâchefers. . .). C'est à la fois un matériau de génie civil et une forme de valorisation des pneus usés, déchet encombrant et préjudiciable à l'environnement. Le développement actuel dont plus de 250 ouvrages ont été construits à ce jour en France, permet d'envisager son avenir avec optimiste, tant en France que dans d'autres pays d'Europe et en Amérique du Nord, pour plusieurs raisons :

∗ il est économique et donc compétitif vis à vis des matériaux traditionnels

∗ Il est facile à mettre en oeuvre, sans compétence particulière

∗ le pneu usagé est un déchet bien réparti sur tout le territoire et reste dans l'ensemble facile à trouver. Bien entendu, dans un avenir proche, ce déchet, comme en son temps le laitier des hauts fourneaux, sera vendu et aura donc un prix qui sera fonction de celui des produits ou procédés concurrents et aussi de la volonté politique des responsables

D'une manière générale le Pneusol est actuellement un matériau des pays du Nord, pays riches, mais il reste que pour tous les pays, le choix porte des techniques de construction se fait toujours sur des critères économiques et que le Pneusol peut se développer dans toutes les parties du monde. Déjà utilisé en Europe, il a abordé les États-Unis, le Canada, la Roumanie, l'Autriche, la Jordanie, l'Algérie, la Pologne, le Norvège, ...et même le Rwanda !

Utilisé dans de nombreux domaines du Génie-Civil (ouvrages de soutènement, raidissement des pentes, remblai léger, réducteur de poussée, absorbeur d'énergies, répartiteur de contraintes, protection des pentes et des berges...), il est certain que nous n'avons pas les moyens de bâtir pour chaque application un programme de recherches détaillé avec la construction d'ouvrages expérimentaux équipés d'appareils de mesure permettant de faire des constatations et un suivi dans le temps. De telles expérimentations sont cependant nécessaires pour la compréhension du comportement des ouvrages, pour la mise au point de leur dimensionnement et de leur mise en oeuvre.

D'une manière générale, les recherches relatives aux techniques de construction comportent quatre phases de recherches :

Phase 1 La définition, la conception, le comportement et le dimensionnement et éventuellement la bibliographie sommaire

Phase 2 Les essais de "faisabilité" en vraie grandeur, en modèle réduit, en centrifugeuse, aux éléments finis...(fonction des moyens et des partenaires)

Phase 3 La réalisation, les constatations, le suivi, d'un ouvrage ou d'une expérimentation

Phase 4 La rédaction de notes d'informations techniques, la diffusion des informations...

Les travaux de recherche sur chaque Pneusol ou chaque type d'ouvrage ont donc commencé par des essais préliminaires de faisabilité, des essais de caractérisation, essais en général peu coûteux pour avoir une idée des possibilités et obtenir un minimum de résultats probants pour pouvoir ensuite convaincre les maîtres d'œuvre, les maîtres d'ouvrage, de réaliser de tels ouvrages et aussi de payer les constatations et le suivi !

Par exemple, grâce aux résultats des essais du Centre d'Expérimentation Routière de Rouen (connaissance du module, et facilité de compactage), le Pneusol a été accepté comme répartiteur de contraintes sur une buse en béton armé à Monistrol sur Loire et comme remblai léger sur l'autoroute de A8 à l'échangeur de CannesMandelieu. L'expérimentation du premier coûtait 270 KF, financé par la DDE du Puy de Dôme, et celle du second 500 KF financé par ESCOTA.

Un maître d'œuvre ou d'ouvrage ne participe aux recherches que dans la mesure où le matériau lui apporte une solution économique intéressante à ses problèmes. Ce type de recherche, fonction des possibilités financières extérieures, ne permet pas toujours d'avoir des détails sur telle ou telle partie du dimensionnement ou du comportement. Il est cependant suffisant pour vérifier la stabilité des ouvrages ainsi expérimentés.

Chaque Pneusol n'a pas le même niveau de recherche et n'aboutit pas nécessairement à un même degré de diffusion. C'est pour pourquoi dans la présentation des résultats, on peut trouver pour certains ouvrages des développements plus importants que d'autres.

Le présent rapport passe en revue tous les travaux réalisés jusqu'à présent sur le Pneusol, qu'il s'agisse de recherches ou de réalisations d'ouvrages réels en évoquant les perspectives de développement de ce matériau. Il est divisé en trois chapitres, traitant respectivement des thèmes suivants :

– La technologie du Pneusol (Chapitre 1)
– Le comportement mécanique du Pneusol (Chapitre **??**)
– Et le dimensionnement et des exemples réels des ouvrages en Pneusol (Chapitre **??**)

Chapitre 1

Technologie du Pneusol

1.1 Introduction

Le Pneusol est formé de l'association de deux éléments : le pneu et le sol. Le mot “pneus” désigne tous les éléments du pneu usagé (deux flancs, une bande de roulement) ou les pneus entiers qui sont associés linéairement ou en nappes et susceptibles de supporter des efforts de traction importants. Le mot “sol” englobe toutes les variétés de terrains naturels, artificiels ou des déchets divers. La technologie est un élément essentiel du Pneusol car son principe, relativement simple, ne pouvait se développer et s'imposer dans le domaine du génie civil sans une étude technique très détaillée des éléments technologiques permettant d'aboutir à une standardisation du matériau.
D'une manière générale, il existe plusieurs sortes de Pneusol :

Un Pneusol formé de pneus poids lourds entiers, qui est un matériau léger de poids volumique compris entre 6 kN à 10 kN/m^3 : le remblai de remplissage, n'entrant pas à l'intérieur de la chambre à air, est surtout destiné au régalage de l'ensemble des pneus qui sont de dimensions, de tailles, et d'états différents. Dans ce cas, le Pneusol divise le poids volumique du remblai par deux. Dans certains cas, on pourrait aussi utiliser un matériau plus léger, par exemple des pouzzolanes, des cendres volantes, du mâchefer, ...sous réserve de leur compatibilité avec les pneus ($5kN/m^3$) et de leur bon comportement dans l'eau pour éviter des problèmes de pollution. De ce point de vue, il faut respecter scrupuleusement les recommandations du Ministère de l'Environnement

Un Pneusol formé d'éléments de pneus (enlèvement d'un flanc) ou de bandes de roulement sur chant ; il s'agit alors d'un assemblage de petits ou grands gabions selon la taille des pneus, c'est à dire selon les possibilités d'approvisionnement locales

Un Pneusol constitué de flancs de pneus disposés en nappe et qui ressemble alors à un ouvrage en sols renforcés

On peut rappeler, pour fixer les idées, les dimensions courantes des pneus :

Poids lourds	
Diamètre extérieur	1,10m à 1,20m
Diamètre intérieur	0,55m à 0,60m
Épaisseur	0,26m à 0,33m
Masse	40 à 70 kg
Poids volumique apparente du caoutchouc	$12,4kg/m^3$
Véhicules de tourisme	
Diamètre extérieur	0,60m
Diamètre intérieur	0,30m
Masse	5 à 6 kg

Ainsi qu'on l'a déjà noté, le Pneusol est une bonne forme de valorisation d'un déchet "le pneu usagé", tout en étant un matériau de construction à part entière. Cette dualité explique pourquoi ce chapitre comprend d'abord une description des utilisations des pneus usagés en France présentée en 1975 à une séance plénière de la DGRST et reprise plus tard par l'ANRED (1985), avant de rappeler l'état des connaissances sur la fabrication du Pneusol.

1.2 Les utilisations des pneus usagés en France

1.2.1 Généralités

A l'occasion de l'organisation des Journées techniques sur le Recyclage du Caoutchouc et Matières Plastiques (1985), l'Agence Nationale pour la Récupération et l'Emploi des Déchets avait effectué une enquête détaillée sur ces deux produits, leurs quantités, leurs répartitions et leurs différents types d'utilisation. Pour les déchets pneumatiques, qui nous intéressent ici, on peut en première approximation indiquer quatre origines :

1. les déchets de caoutchouc industriel (35.000 t/an)
2. les déchets de fabrication de pneumatique (15.000 t/an)
3. les pneumatiques usagés (400.000 t/an)
4. les déchets de rechapage (8.000 t/an)

Les pneumatiques usagés constituent à eux seuls la presque totalité des déchets de caoutchouc. Cependant avant d'être considérés comme des déchets et mis au rebut un bon nombre de pneumatiques usagés sont rechapés.

Lorsque le rechapage n'est plus possible, il y a d'autres formes de valorisation :

* la valorisation sous forme de matières premières
* la valorisation énergétique
* et une valorisation originale : ce sont toutes les réutilisations de pneus entiers ou parties de pneus pour la fabrication de divers produits en caoutchouc, mélangé ou non avec du sol

1.2.2 Valorisation sous forme de matières premières

Le rechapage

La technique du rechapage consiste à reconstituer la bande de roulement de l'enveloppe du pneumatique usagé. L'opération doit restituer au produit les qualités de base du pneu tel qu'il est conçu et fabriqué à l'origine. Le rechapage permet d'utiliser moins de caoutchouc que la fabrication d'un pneu neuf ; il en résulte un gain économique important sur l'importation des matières premières et sur l'utilisation de dérivés du pétrole. Le particulier a vis à vis des pneus rechapés certains préjugés de solidité, qui fait que moins de 10% des pneus de tourisme vendus sont des pneus rechapés. Pour l'année 1983, les statistiques étaient les suivants :

Tourisme	1.300.000 enveloppes
Camionnettes	200.000 enveloppes
Poids lourds	900.000 enveloppes

L'activité du rechapage génère à son tour des déchets dont la poudrette de caoutchouc.

La poudrette de caoutchouc

La production française est de l'ordre de 16.000t/an, dont la moitié est issue de l'industrie du rechapage. Elle est essentiellement utilisée :

* Dans les revêtements routiers. Les procédés d'entretien des couches de surface des chaussées faisant appel à des liants bitume caoutchouc se sont développés en France depuis les années 1978. Ce type de mélange permet d'améliorer les caractéristiques du bitume et d'augmenter la durée de service de la couche de surface, soit par enduisage traditionnel avec du matériel classique d'un mélange comportant 13% de poudrette de caoutchouc, soit par fabrication en usine d'une membrane gravillonnée qu'on vient poser ensuite sur les chaussées. Cette façon de

procéder a l'avantage de laisser contrôler de manière précise la qualité de la couche de surface. Plusieurs millions de mètres carrés de couches de chaussée ont déjà été posés avec ces deux produits et il est démontré que ces deux produits, utilisés en trop petite quantité, ne sont pas très économiques. Des tentatives ont été faites pour incorporer des granulats issus des pneumatiques dans les matériaux de chaussées, sur la base des recherches effectuées aux Laboratoires des Ponts et Chaussées ; toutefois, bien que les performances mécaniques soient bonnes, les difficultés de mise en oeuvre n'ont pas permis le développement espéré.

∗ Dans les revêtements de sols sportifs la poudrette de caoutchouc était essentiellement utilisée pour les revêtements de sols sportifs, soit sur des pistes d'athlétisme, soit en souscouche dans les salles de sport. Cependant, ce genre d'utilisation est sur le déclin, car le programme d'équipement sportif français est pratiquement fini. Plus récemment, on a assisté sur le marché français à une nouvelle application de la poudrette pour améliorer le confort du cheval(!) : le principe de base consiste à incorporer dans la masse de sable des granulats en caoutchouc compressibles et élastiques, rendant ainsi le mélange plus souple.

La régénération du caoutchouc

La régénération est un procédé qui consiste à scinder spécifiquement les ponts de réticulation des chaînes macromoléculaires constitutives du caoutchouc tout en préservant les structures de l'élastomère initial et, par conséquent, ses caractéristiques mécaniques. Le produit ainsi obtenu est cependant de qualité médiocre et son volume reste limité à 15000 t/an.

1.2.3 Valorisation énergétique

Le vieux pneumatique est un matériau combustible PCI :7200 thermies par tonne. Dans ce domaine, il existe plusieurs procédés concurrents :

∗ le procédé Pyralox (four d'incinération avec récupération d'énergie)

∗ le procédé UTCIFP de thermolyse des pneumatiques permettant d'obtenir un fuel combustible lourd

∗ l'incinération dans les fours de cimenteries

∗ l'incinération avec les ordures ménagères ou en cubilot de fonderie

L'inconvénient de ces procédés est l'utilisation d'installations fixes et de quantité de pneumatiques importante d'où la nécessité d'un approvisionnement régulier et de transport.

1.2.4 Emploi dans les ouvrages de génie civil : un secteur en développement

Le tapis de pneus antivibration

Le tapis de pneus, composé de deux lits croisés de bandes de roulement de pneumatiques, est intercalé entre le ballast et la couche de forme (ou posé sur les tabliers des ponts ferroviaires) pour atténuer les vibrations provoquées par diverses machines, les trains, les tramways, les rames du métro...

La construction de récifs artificiels

Immergés à des profondeurs de dix ou vingt mètres, assemblés et lestés à l'aide de blocs de ciment, les pneus peuvent former des récifs artificiels constituant des zones de calme pour la faune marine. Le Japon et les Etats-Unis ont développé une véritable industrie du récif artificiel ; par exemple, en Caroline du Nord, plus de 500.000 pneumatiques ont été immergés entre 1974 et 1977. En France, cinq récifs artificiels ont été construits à Palavas-les-Flots, à Langrune-sur-Mer, à Arcachon-sur-Mer, à Golfe-Juan et à Port-la-Nouvelle.

Mur antibruit ACIAL (1992)

L'ingénieur R.Beyler a proposé un mur antibruit dont la structure absorbante est réalisée avec des pneus usagés enfermés dans un caisson métallique dont une face est perforée de trous. Les essais effectués en 1992 selon les normes AFNOR S 31089 ont donné des résultats supérieurs aux valeurs maximales fixées dans la norme, ce qui classe ce mur antibruit parmi l'un des plus intéressants.

Le Pneusol (1974)

Classé par l'ANRED comme une valorisation originale, le Pneusol est un matériau inventé au Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées et constitué de pneus entiers ou d'éléments et sols naturels ou artificiels ou de déchets (!). Depuis 1974, plus de deux cent cinquante ouvrages en Pneusol ont été construits.

1.2.5 Conclusions

Le gisement français de pneumatiques usagés est important ; il est de l'ordre de 450.000 tonnes/an (35.millions de pneus). Tous les procédés de valorisation que nous avons passés en revue, plus les autres procédés non décrits tels que les utilisations agricoles ne consomment que de l'ordre de 100.000 t/an. Il reste donc 350.000 tonnes de pneus usagés qui sont jetées chaque année dans les décharges contrôlées ou sauvages. Le problème n'est pas spécifiquement français mais propre aux pays riches (pays du Nord). Ainsi, l'Europe jette chaque année de l'ordre de 2,5 millions de tonnes de pneus, ce qui constitue un gisement important pour la construction des ouvrages en Pneusol !

1.3 Le Pneusol : Materiau et structure

1.3.1 Généralités

Les premières recherches sur le matériau Pneusol ont été réalisées en 1974 avec l'aide de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique. Des essais d'adhérence solpneumatique ont été réalisés en collaboration avec le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de ClermontFerrand et le Centre Universitaire des Sciences et Techniques (CUST) de Clermont Ferrand. Un mur expérimental en vraie grandeur de 5 m de hauteur et de 10 m de longueur a été construit à Langres en 1982 avec la participation financière de l'ANRED et le soutien de SCETAUROUTE. Cette construction a démontré la facilité de mise en oeuvre des ouvrages de soutènement en Pneusol (LRPC Nancy). Une piste en Pneusol a été testée au Centre d'Éxpérimentations Routières de ROUEN (1982) mais n'a pas donné les résultats escomptés. Le premier ouvrage réel a été construit seulement en 1984, soit après deux ans d'observations (mur de Fertrupt : 54 m de longueur et 5m de hauteur). Viennent ensuite le paravalanche de la Grave (1984) (absorbeur d'énergie), le remblai léger de Cannes. Mandelieu, le répartiteur de contraintes de MonistrolsurLoire (1985), le réducteur de poussée de Mende, la protection des berges de Strasbourg (1986).
Le Pneusol est utilisé aujourd'hui :

* en soutènement
* en réducteur de poussée
* en raidissement de pentes
* en absorbeur d'énergies
* en remblai léger
* en protection des pentes et des berges
* en répartiteur de contraintes sur des conduits enterrés
* dans des ouvrages spéciaux (colonnes, rampes, antivibration)

D'une manière générale, le Pneusol présente l'avantage de pouvoir améliorer les propriétés mécaniques du sol, soit de manière anisotrope c'est à dire uniquement dans les directions où le matériau est le plus sollicité (nappes, bandes linéaires), soit de manière isotrope dans toutes les directions (chaîne continue d'éléments de pneus ou de pneus entiers vides ou remplis).

Différentes méthodes de dimensionnement seront exposées dans un chapitre **??**(3) selon le mode de fonctionnement du Pneusol.

Comme pour beaucoup de sols renforcés, la caractéristique essentielle du Pneusol est sa déformabilité (!) et les ouvrages construits avec celuici sont donc souples, capables de supporter sans dommage des tassements différentiels importants.

Une autre caractéristique est que la construction d'un ouvrage en Pneusol doit pouvoir s'effectuer rapidement, c'est à dire au même rythme qu'un remblai. De plus, on peut adapter pour le procédé une technique de réalisation par éléments préfabriqués, transportables et facilement assemblés sur place. Cela pourrait conduire à une possible standardisation des différents éléments et, par la suite, à une plus grande facilité de mise en oeuvre.

Les pneumatiques, qui constituent, en dehors du matériau de remblai l'élément essentiel du Pneusol, doivent être durables. Selon des spécialistes du caoutchouc (MICHELIN), des pneumatiques enterrés dans le sol pendant plus de quarante ans sont retrouvés absolument intacts et ne présentent aucune dégradation. *Les attaches, qui relient les éléments les uns aux autres, doivent être compatibles avec la durée de service de l'ouvrage.*

1.3.2 Massif de soutènement : parement, pneus et attaches

Un ouvrage de soutènement en Pneusol est composé :

* d'un parement en plaques de béton ou en pneus entiers ou en pneus dont un flanc a été enlevé
* de renforcements en pneus ou éléments de pneus, avec éventuellement des éléments d'acier ou en géotextiles
* de remblais en matériaux naturels ou artificiels ou en déchets

Le parement

Dans un ouvrage de soutènement en Pneusol, comme dans tout massif en sol renforcé, il est nécessaire de prévoir un parement pour empêcher les grains de sol de s'écouler entre les renforcements. Ce parement doit présenter les caractéristiques suivantes :

* il doit être résistant, car il supporte les efforts de poussée du sol au voisinage immédiat de la surface de l'ouvrage. Ces efforts sont d'autant plus grand que l'espacement des renforcements est important
* il doit être flexible pour conserver au Pneusol sa qualité de souplesse
* il doit être esthétique car l'aspect du parement d'un ouvrage constitue un élément architectural important
* il doit être constitué par éléments pour permettre une construction simple. C'est de loin la souplesse et la flexibilité qui sont les caractéristiques essentielles du Pneusol

Plaques de béton Le parement peut être constitué d'éléments préfabriqués de formes, de dimensions, de sections variées selon la volonté du concepteur, du maître d'œuvre ou du maître d'ouvrage et de la destination de la structure (Figure 1.1). Les éléments du parement peuvent être utilisés à des fins annexes (plantations, gradins, de stade ou de théâtre en plein air, etc...), sous réserve d'un dimensionnement adéquat.

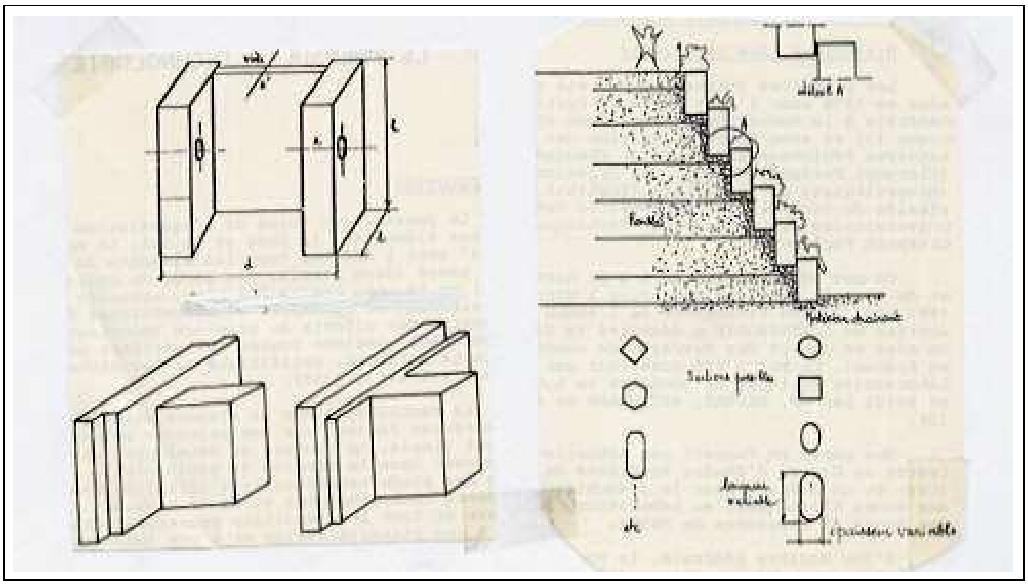

FIG. 1.1 – Différents types de parements en béton pour ouvrages en sol renforcé

Les plaques de béton utilisées en parement être carrées ou rectangulaires et être munies d'un ou deux renforts ou retours (section en T ou en U). La figure 2 montre un exemple de parement en plaque à renfort.

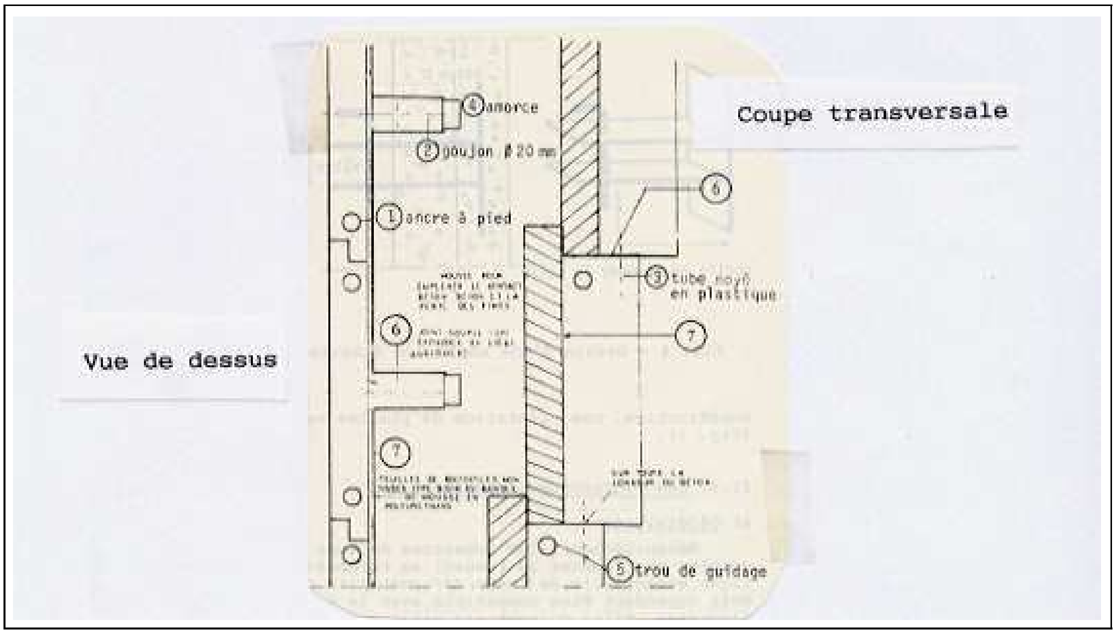

FIG. 1.2 – Système de montage d'un parement en plaque à béton

La plaque supérieure repose sur le sol ou sur le retour de la plaque inférieure. La face arrière du retour comporte des amorces (en générale deux) sur lesquelles viennent se fixer les renforcements. La forme des amorces dépend du type des renforcements . La figure 1.3 montre la fixation utilisée pour le cas d'une bande de roulement sur chant.

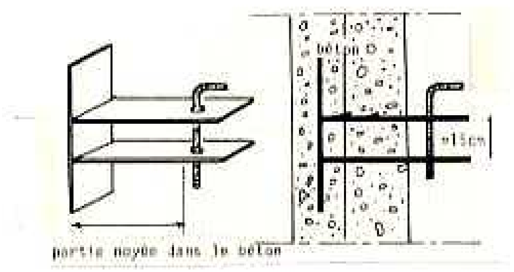

FIG. 1.3 – Amorce de fixation pour bande de roulement sur chant

L'épaisseur des plaques est souvent de 12 cm ou 14 cm, mais dépend essentiellement des efforts exercés. Leur poids est de l'ordre de 0,34 t à O,48 t. La face supérieure comporte deux douilles Vémo de diamètre 16 mm noyées dans le béton qui permettent le relevage, la manutention des plaques lors de la pose ainsi que leur maintien en position verticale. L'obturation des joints verticaux vis à vis du remblai pour éviter la perte de fines, peut être assurée par des bandes de mousse de polyuréthane ou par des feuilles de géotextiles.

Les "plaques" en béton sont préfabriquées en usine ou sur chantier. Elles sont en générale peu ferraillées.

L'un des gros avantages du parement en plaque, du point de vue esthétique, est de permettre des effets architecturaux variés. Si chaque rangée est décalée par rapport à la précédente , cette disposition permet une végétalisation aisée.

Le parement en Pneusol Le parement en Pneusol est utilisé notamment pour les murs absorbeurs de chocs et pour les murs antibruits (CARTIER et al.1981).

Dans un mur antiblocs, le parement est un élément important de l'ouvrage car c'est lui qui reçoit les blocs roulant ou tombant sur la pente. Il doit être résistant, flexible, élastique et stable pour pourvoir lors d'un choc encaisser une grande partie de l'énergie avant de solliciter la butée du remblai qui se trouve à l'arrière. Son aspect esthétique 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. Un tel parement sera constitué de pneus de poids lourds. Afin d'augmenter le poids du parement en le remplissant de remblai, on découpe et enlève le flanc supérieur de chaque pneu, l'élément restant se présentant comme un bac ayant un fond troué et un bord vertical fortement armé (bande de roulement).

Ces éléments sont empilés en quinconce (Figure 1.4), remplis de matériau compacté et facilement végétalisables.

FIG. 1.4 – Un parement en Pneusol

Les renforcements pneumatiques

Généralités Les armatures en pneus ou éléments de pneus doivent être souples pour donner au Pneusol sa caractéristique essentielle de bonne déformabilité, qui doit cependant être compatible avec la destination de l'ouvrage. Elles doivent par ailleurs supporter des efforts de traction importants et posséder une bonne adhérence avec le remblai utilisé.

Dans les ouvrages de soutènement, où les tractions dans le massif renforcé s'exercent perpendiculairement au parement, les renforcements dans un lit horizontal sont placés parallèlement les uns aux autres et perpendiculairement aux parements. Pour les nappes, la direction de la traction maximale doit être perpendiculaire au parement.

On attend d'autre part d'un renforcement qu'il ne subisse pas de rupture non fragile, qu'il soit durable et économique.

Caractéristiques des pneumatiques La coupe transversale d'un pneu radial montre l'existence d'un nombre élevé des constituants :

* Les profilés de gomme, qui sont des mélanges de caoutchouc naturel et de caoutchouc synthétique, matériaux de base du pneu, de noirs de carbone et d'agents de vulcanisation tels que le soufre ou l'oxyde de zinc
* Les nappes, qui sont de véritables tissus où des fils en acier ou en textile (coton, rayonne, nylon,.....), sont disposés parallèlement dans un calandrage de gomme
* Les tringles, qui sont des assemblages de fils métalliques

Quatre parties peuvent être distinguées dans un pneumatique :

* La ceinture intérieure ou la carcasse, qui donne au pneu sa forme, sa résistance à la flexion, son équilibre et son étanchéité
* Les accrochages sur la roue où des mélanges élastomériques très durs enserrent l'extrémité de la carcasse, enroulée autour des tringles
* les flancs
* le sommet, composé de nappes à plis obliques et d'une bande de roulement (la bande de gomme en contact avec le sol)

Dans le cas d'un pneu diagonal, le sommet ne présente pas une grande rigidité et la carcasse est formée de plusieurs nappes où les fils sont placés de biais et croisés (Figure 1.5). Les dimensions des pneus varient relativement peu d'une catégorie à une autre :

	Diamètre	Jante
Véhicules de tourisme	0,60m	0,30m
Poids lourds	1,20m	0,60m

Découpe des pneus D'une manière générale, l'utilisation de pneus entiers dans les travaux de terrassement n'est pas judicieuse, dans la mesure où elle rend difficile le compactage, notamment pour les pneus de tourisme.

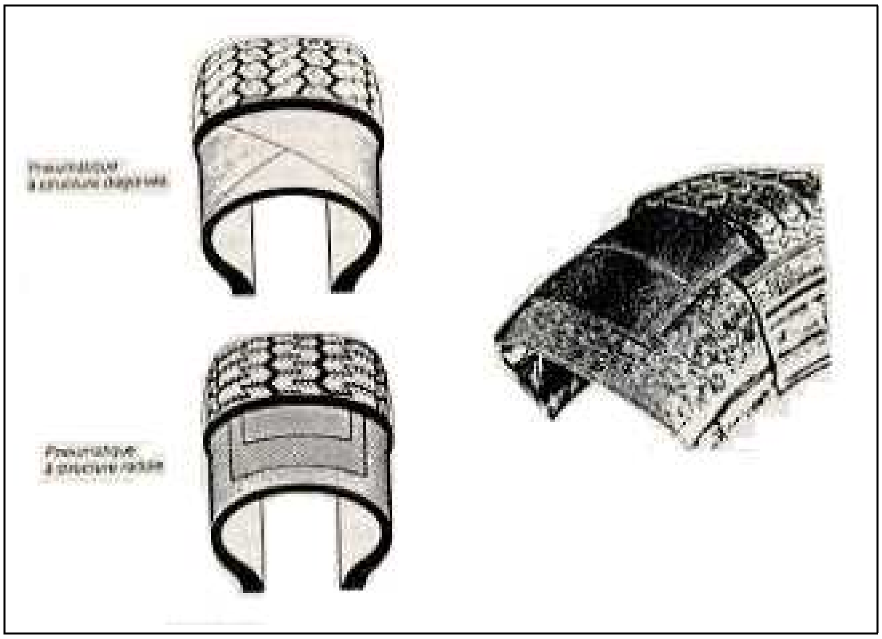

Fig. 1.5 – Coupes de pneus à structure radiale et diagonale

Il existe cependant des exceptions, comme par exemple le remblai léger ou le remblai absorbeur d'énergie, où les pneus utilisés sont des pneus de poids lourds possédant une certaine rigidité transversale à cause des armatures en acier de la bande de roulement. La présence de vides permet d'obtenir un poids volumique et un module de déformation plus faibles et de rendre plus difficile la propagation des ondes. Une disposition en nappe et en quinconce, intercalation d'un bon matériau de remblai et d'une couche de forme en surface pourrait donner à l'ensemble de l'ouvrage suffisamment de rigidité pour supporter, une route, une maison individuelle, etc...La découpe des pneus doit être simple, pour permettre une industrialisation du procédé, judicieuse pour utiliser au maximum les caractéristiques du pneu. Nous avons opté pour une découpe en trois éléments, au plus : deux flancs et une bande de roulement. Des essais mécaniques ont été effectués sur une presse munie d'un enregistreur d'effort de traction en fonction de la déformation. Toutes les marques de pneus de véhicules de tourisme ont été testées. Aucun essai n'a toutefois été effectué sur les pneus de poids lourds à cause des armatures importantes se trouvant dans la bande de roulement. On a obtenu les résultats suivants :

* La valeur moyenne de la résistance à la traction des bandes de roulement de tous les pneus testés est de 56 kN, avec un écart type de 24 kN. La probabilité pour que toutes les bandes de roulement aient une résistance supérieure 26 kN est de 90%. Elle n'est que de 80% pour une résistance supérieure à 36 kN.
* En ce qui concerne les flancs, il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux flancs d'un même pneu. Les résistances des flancs varient de 17 kN pour les pneumatiques peu armés à 52 kN pour les plus armés. La résistance moyenne est de 25 kN, avec un écart type de 10 kN.

Formes d'assemblage Les éléments résultant de la découpe du pneu peuvent être disposés de différentes façons :

* flanc posé à plat
* bande de roulement posée sur chant
* bande de roulement aplatie
* pneu de poids lourd posé à plat en entier
* pneu de tourisme posé à plat en entier

L'assemblage de ces différents éléments permet de réaliser des armatures linéaires et des nappes. Dans tous les cas, le montage des éléments doit rester simple pour pouvoir rendre le procédé technologiquement et économiquement valable au niveau de la mise en oeuvre. L'utilisation de la bande aplatie nécessite une opération supplémentaire, qui alourdit le coût du matériau.

Il convient aussi dans l'assemblage de tenir compte de la possibilité de moduler la résistance du renforcement dans les zones où les efforts de traction sont les importants. Nous avons opté pour l'utilisation de bandes de roulement sur chant dans l'état actuel du développement du Pneusol et au vu des résultats des essais d'adhérence solpneumatique.(Section **??**)

Attaches des pneumatiques Plusieurs sortes d'attaches sont possibles en fonction des besoins et de la structure de l'ouvrage. Nous en décrivons quelques exemples dans ce qui suit. Lors des essais préliminaires, nous avons utilisé un certain nombre d'attaches métalliques en acier doux de diamètre 16 mm (Figure **??**), ainsi que des pièces facilement usinables.

On peut aussi utiliser des agrafes en U pour les bandes de roulement, dont l'écartement est relativement faible (deux fois l'épaisseur de la bande) ;

l'agrafe est fichée dans le sol. Le caoutchouc étant particulièrement sensible au poinçonnement, les surfaces qui seront en contact avec lui seront aussi larges que possible pour éviter ce phénomène. Des crochets métalliques de l'ordre de 60 cm peuvent être utilisés pour accrocher entre eux les pneus de poids lourds dont le diamètre est voisin de 1.20m.

Des attaches spécifiques pourront être utilisés pour accrocher des armatures métalliques de type Terre Armée sur des parements en Pneusol.

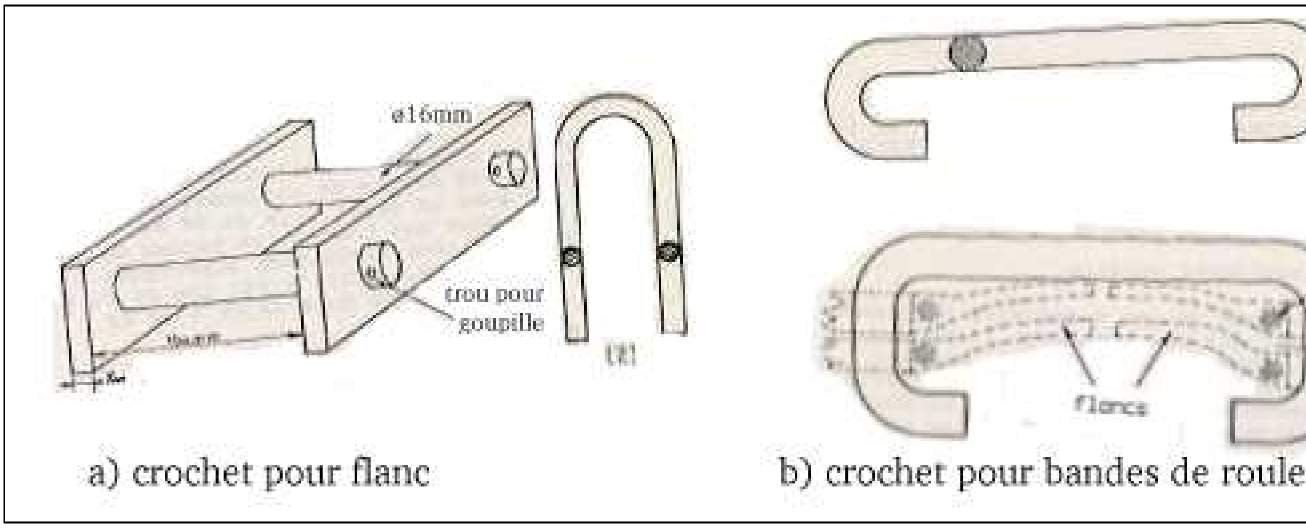

Fig. 1.6 – Attaches et crochets métalliques de liaison

La figure 1.7 montre un tel élément qui se présente sous la forme de deux crochets simples qu'on accroche sur les tringles des pneus de poids lourds. A l'une des extrémités du crochet est percé un trou, permettant la fixation de la lanière métallique.

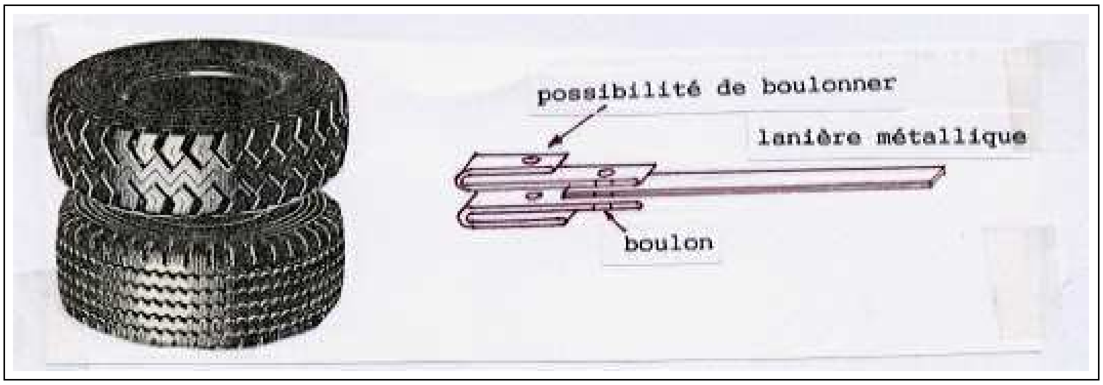

Fig. 1.7 – Crochet métallique pour lanières d'acier

Une deuxième possibilité est l'utilisation de cordes, de lanières, de bandes en géotextile (de préférence, tissé). Certaines cordes ou bandes ont des caractéristiques de traction élevées.

Des essais de nœuds effectués lors des expérimentations en vraie grandeur ont monté qu'un double nœud est largement suffisant. En effet, les nœuds ainsi réalisés sont entourés de remblai compacté et il est très difficile de les défaire. Nous avons opté finalement pour des nœuds avec des bandelettes en polyester.

Une autre façon de lier les pneus de poids lourds est de placer audessus de la couche de pneus un géotextile non tissé qui par sa déformation importante, permet au remblai de bien remplir les jantes. Le deuxième avantage de ce non tissé est aussi d'empêcher le sol de pénétrer dans le vide de la chambre à air.

1.3.3 Matériau de remblai

Les matériaux de remblai du Pneusol peuvent être soit des sols naturels, soit des matériaux artificiels, soit d'autres déchets.

La qualité des matériaux de remblai utilisables pour le Pneusol doit répondre en principe à des critères géotechniques et à des critères de durée de service.

Critères géotechniques

Les renforcements en pneumatiques n'imposent au sol aucun critère granulométrique particulier, l'interaction du pneu et du sol ne reposant pas essentiellement sur le frottement, à la différence des ouvrages en sols renforcés classiques.

Des essais d'adhérence solpneumatique en vraie grandeur d'éléments de pneumatiques noyés dans un remblai ont permis une bonne compréhension de ce phénomène.

Si l'adhérence de la bande de roulement aplatie et sol dépend de l'interaction solcaoutchouc du pneumatique, il n'en est pas de même pour les bandes de roulement sur chant et les flancs.

En effet, par exemple, l'effort de traction appliqué sur une bande de roulement sur chant est équilibré par : (Figure 1.8)

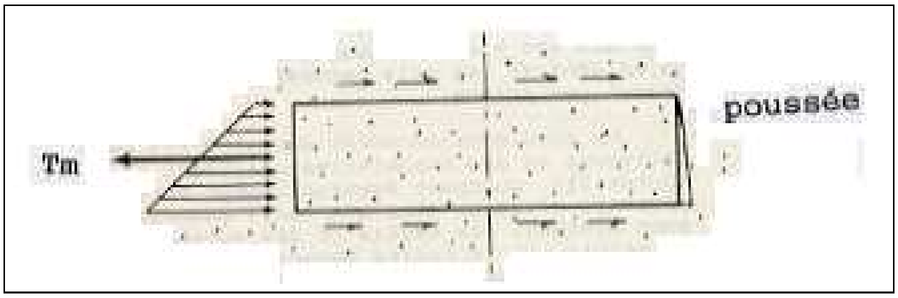

Fig. 1.8 – Hypothèse de calcul de l'effort développé (bande de roulement sur chant)

* le frottement solcaoutchouc sur la surface verticale de l'élément, c'estàdire sur toute la surface latérale. Cette surface peut varier en fonction de l'effort appliqué, puisque la déformation de l'élément est importante
* la butée exercée à l'avant de l'élément ; un effort de poussée, plus faible, s'exerce du côté opposé
* le frottement solsol exercé le long de deux surfaces de cisaillement délimités par les bords

Dans le cas d'une utilisation de flancs, les deux premiers effets peuvent être considérés comme relativement faibles car l'épaisseur du caoutchouc est faible. De plus, l'adhérence solcaoutchouc est ellemême faible. Le troisième effet est plus prépondérant et les surfaces de cisaillement augmentent sensiblement avec l'effort appliqué notamment dans le cas des bandes de roulement sur chant. Cette mobilisation directe du frottement solsol est la caractéristique essentielle du Pneusol. Elle permet l'utilisation de matériaux moins performants.

Néanmoins, dans la phase actuelle de notre recherche et développement du Pneusol, on s'en tient aux ***recommandations existantes pour la Terre Armée et les géotextiles utilisés dans les ouvrages de soutènements***. Lorsque les matériaux de remblai disponibles près du chantier ne satisfont pas à ces critères, il est nécessaire d'obtenir l'accord d'un laboratoire géotechnique compétent, accord subordonné éventuellement aux résultats d'essais complémentaires.

Critères de durée de service

Le vieillissement du caoutchouc des pneus est un phénomène complexe et dépendantde nombreux facteurs. Les plus importants en pratique sont :

La lumière et la chaleur (les rayons ultraviolets) : Ces paramètres provoquent une décomposition superficielle, qui se manifeste par un dessèchement du caoutchouc avec apparition de craquelures plus ou moins profondes. Ce phénomène ne se produit pas quand le pneumatique est complètement enterré. Si le pneu sert de parement et est exposé à la lumière, ces craquelures ne sont pas gênantes car le pneu sert seulement de bac à terre ou de gabion. D'autre part, dans un remblai, la température moyenne en profondeur varie dans une fourchette relativement étroite (3 à 4 degrés) suivant la teneur en eau du matériau. Près de la surface du sol, elle est beaucoup plus influencée par les variations saisonnières, mais la température la plus grande reste de l'ordre de 15°, température beaucoup plus basse que celle subie par le pneu lors de son utilisation et sans effet sur le caoutchouc. En cas d'incendie, des dégâts aux pneus de parement restent inévitables, la seule solution envisageable étant de construire un double parement, les pneus ne pouvant brûler dans le sol.

L'ozone : Le caoutchouc est détérioré par l'ozone dont la quantité est heureusement très faible voire négligeable dans le sol.

L'acidité du sol : On sait qu'un acide fort (pH de l'ordre de 1) détruit le caoutchouc. Le pH de l'eau extraite des remblais est assez souvent de l'ordre de 4 ou 5, ce qui montre qu'en général les sols naturels sont relativement peu acides. Mais ce paramètre doit être obligatoirement contrôlé pour les matériaux non courants et pour les déchets, qui doivent d'autre part satisfaire aux exigences de toutes les réglementations sur l'environnement.

K.AB.MALEK et A.STEVENSON ont mis en évidence le bon comportement des pneus dans l'eau de mer. Ils ont en effet effectué des analyses poussées sur des échantillons de pneus se trouvant dans un bateau coulé pendant la seconde guerre mondiale. Quarante deux ans après, toutes les armatures sont intactes. Leurs caractéristiques mécaniques n'ont pas bougé. Seule la teneur en eau du caoutchouc a légèrement changé en quelques points du pneu et sur quelques micromètres de profondeur.

1.3.4 Mise en oeuvre du Pneusol

Généralités

Le principe d'exécution d'un massif en Pneusol ne présente pas de différence fondamentale avec celui de la Terre armée ou des sols renforcés. Le montage peut être exécuté par toute entreprise de génie civil ou de terrassements sans qu'aucune compétence particulière relative au Pneusol ne soit nécessaire, sous réserve d'une assistance technique pendant le chantier par un organisme compétent.
Comme pour tout ouvrage de génie civil, il doit être obtenu du maître d'œuvre avant le début des travaux un agrément pour :

– Les matériaux de remblai

– Le matériel d'exécution
– L'aire de stockage des éléments préfabriqués
– L'organisation du contrôle.

La réception de la plateforme d'assise du massif doit être assurée en vérifiant que :

– La cote prévue sur les plans d'exécution a été atteinte
– On se trouve bien en présence des terrains prévus dans l'étude de sols et de stabilité générale de l'ouvrage
– L'assise est exempte de points durs non prévus ou de zones hétérogènes

Quelquefois, en site difficile, la présence du géotechnicien ayant réalisé l'étude de stabilité peut s'avérer utile pour conseiller le Maître d'œuvre sur la tenue des fouilles, les fondations ou le drainage.

Enfin, la base du parement repose en général sur une simple semelle de réglage en béton maigre ayant souvent une largeur de 0,40 m et une épaisseur de 0,15 m pour les parements constitués de plaques de béton et une couche de grave bien compactée (15cm) pour les parements en Pneusol, qui vient en supplément de la fiche ellemême et sert éventuellement de drain. Cette fiche de 0,30 m est prévue pour des raisons de bonnes règles de l'art.

Pose du parement

Plaques en béton armé L'utilisation des plaques en béton armé présente peu d'économie par rapport à une solution de parement en Pneusol ; nous en présentons cependant le principe de pose car, pour un Pneusol léger, il peutêtre intéressant de cacher les pneus par un parement en béton.

La pose des plaques s'effectue avec un fruit négatif (le parement est incliné vers le remblai) de l'ordre de 3 à 5%. La stabilité de la première rangée de plaques lors du remblaiement est assurée par des étais provisoires placés du côté extérieur du mur et pour la partie courante, par le blocage provisoire des possibilités de jeu du parement à l'aide de coins en bois et de serrejoints (Figure 1.9). Pour cette dernière, on peut solidariser toute la rangée en enfilant une tige à travers le trou préalablement prévu dans le renfort à l'arrière de la plaque.

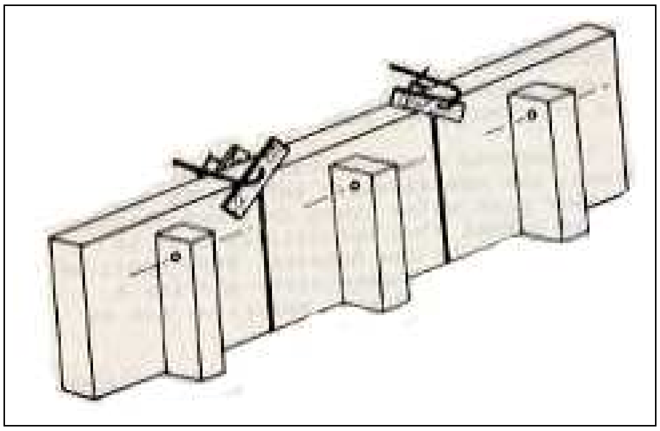

FIG. 1.9 – Plaques avec serrejoints

Il faut s'assurer que :

- Les plaques mises en oeuvre n'ont pas subi au cours de leur manipulation, de dégradations qui nécessitent leur remplacement
- Les joints entre les plaques sont mis en oeuvre. Dans les ouvrages où l'on craint un entraînement de fines du remblai à travers les joints du parement sous l'action de l'eau, les joints verticaux traditionnels en mousse sont renforcés par du nontissé appliqué contre le béton
- Le remblaiement devant la fiche du mur est effectué avant que l'ouvrage n'atteigne trois mètres de hauteur.

Parement en Pneusol Le parement en Pneusol, composé de pneus dont on a enlevé un flanc, se présente comme une juxtaposition de bacs remplis de sol. La pose de ces pneus commence par le montage d'un gabarit avec la pente théorique à suivre.

Mise en oeuvre des renforcements (Figure 1.10)

Il convient de contrôler que les renforcements prévus (Pneusol, treillis soudés, ...) dans le plan d'exécution sont mis en oeuvre et disposés à l'endroit indiqué et qu'aucun élément ne présente trop de défauts apparents (déchirures profondes pour les pneumatiques, perte de galvanisation pour les treillis soudés, ...).

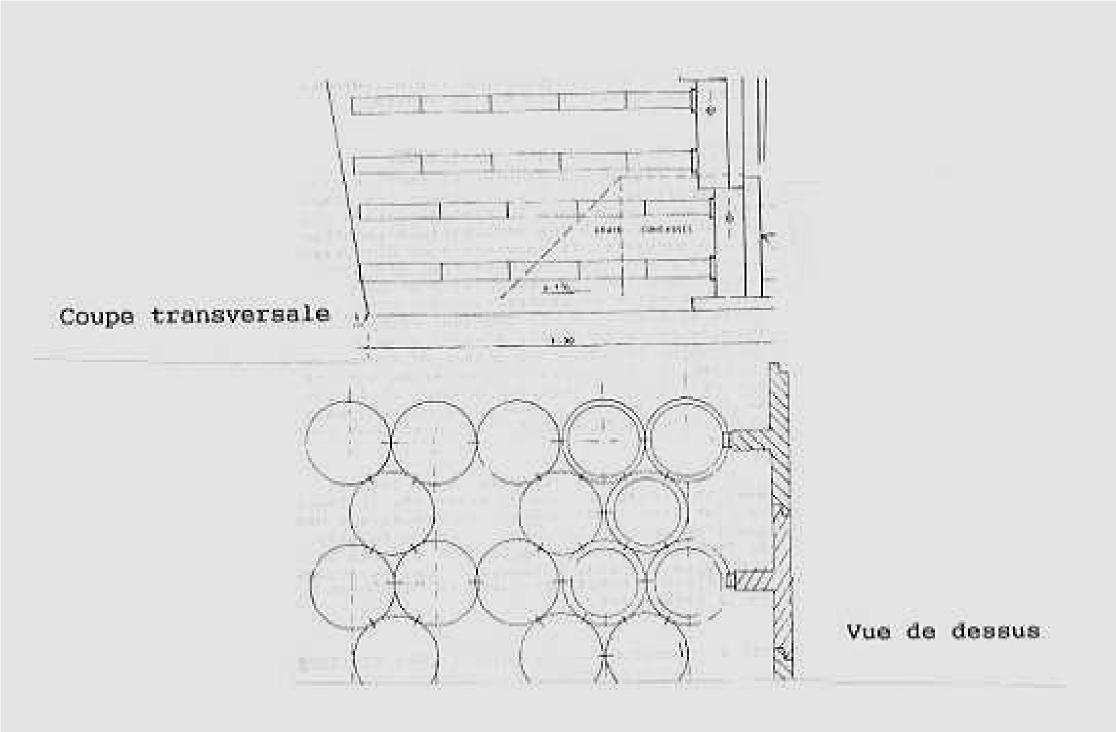

FIG. 1.10 – Disposition des renforcements

Les renforcements doivent être posés à plat sur le remblai compacté, bien tendus, de telle sorte qu'aucun jeu n'existe entre les éléments ou avec le parement.

Avant le remblaiement d'un lit, on vérifie que tous les éléments de pneumatiques sont bien attachés les aux autres, fixés sur le parement et légèrement tendus.

S'il s'agit d'autres types de renforcements, par exemple les treillis soudés, on doit vérifier que la qualité et le type des nappes sont bien corrects.

Dans le cas d'une utilisation de pneus de poids lourds entiers, on veille à ce que les pneus soient relativement homogènes en dimensions (on n'utilise pas de pneus d'engins de géniecivil car ils sont beaucoup trop gros).

Pour les remblais légers, la disposition orthorhombique (en quinconce) est adoptée, associée ou non avec un géotextile de type nontissé.

Mise en place et réglage du matériau de remblai

Le déchargement des matériaux de remblai doit être effectué à côté des premiers renforcements rencontrés. Le remblaiement des renforcements s'effectue de telle manière que ces derniers ne subissent pas de déplacements importants du fait de leur épaisseur et de leur légèreté. La meilleure technique à notre avis est l'utilisation d'une pelleteuse, qui déverse le remblai sur les renforcements (déversement du haut vers le bas).

Les engins de transport ne doivent pas, sans raison majeure, rouler directement sur les lits des renforcements.

On commence donc par remblayer tous les renforcements, ensuite on effectue le régalage, qui doit se faire par bandes sensiblement parallèles au parement en commençant par le parement et en progressant bande par bande vers l'arrière du massif. Il importe de ne jamais tolérer que le matériau soit poussé parallèlement aux parement en partant de l'intérieur du massif vers le parement.

Le régalage doit se faire en couches de 0,40 m. Il faut veiller de plus aux dispositifs suivants :

- Dans le cas où des engins à chenilles sont utilisés, il convient d'en interdire strictement la circulation directe sur les renforcements
- Le nivellement de chaque couche doit être tel que tous les renforcements puissent venir en contact direct avec le sol sur la totalité de leur “surface”.

Compactage du matériau de remblai

Le compactage dans un ouvrage en Pneusol a essentiellement pour but d'empêcher tout tassement ultérieur du matériau. Ce but doit être véritablement recherché pour les ouvrages supportant une superstructure (chaussée). Les ouvrages doivent être compactés en distinguant le cœur du massif, d'une part ; et la zone contiguë au parement sur deux mètres, d'autre part.

Cœur du massif Les règles de compactage figurant dans le Guide technique : Réalisation des remblais et couches de forme (LCPCSETRA 1994) s'appliquent. On rappelle que ces règles définissent les modalités d'utilisation des compacteurs à appliquer pour les différents matériaux pouvant être mis en oeuvre.

Zone de 2m contiguë au parement Les règles précédentes ne peuvent plus être appliquées car l'utilisation des compacteurs considérés dans le Guide technique risque de conduire à des déformations importantes du parement. Il convient d'utiliser, pour le compactage de cette zone, des compacteurs vibrants plus légers et dont le poids par centimètre de génératrice est compris entre 60 N et 80 N. Il convient cependant, lorsque cette zone sert d'appui à un ouvrage, de doubler le nombre de passes du compacteur utilisé. Si, de surcroît, le matériau utilisé est relativement argileux et sec, il faut non seulement doubler le nombre de passes, mais aussi réduire de moitié l'épaisseur des couches.

D'une manière générale, mais surtout pour les zones proches du parement ou du bord, il importe d'arrêter immédiatement le compactage dès que l'on observe l'apparition du phénomène de "matelassage", qui se produit sur les sols sensibles à l'eau, à teneur en eau relativement élevé, lorsqu'on les compacte jusqu'au voisinage de la saturation.

Contrôle

Les principes du contrôle du remblaiement des ouvrages en Pneusol sont les mêmes que ceux qui régissent le contrôle de la terre ou des remblais routiers.

Ce contrôle comporte deux volets :

1. Qualité des matériaux de remblai
2. Mise en oeuvre

Le premier contrôle a pour objet de s'assurer de la conformité des matériaux utilisés : il importe d'avoir, avant l'exécution des travaux, une connaissance suffisante des matériaux pour que, au cours de l'exécution, l 'examen visuel d'un spécialiste, dont le jugement peut le cas échéant être confirmé par des essais complémentaires suffise à identifier les différents matériaux mis en oeuvre. En cours de chantier, des essais d'identification peuvent être exécutés, si nécessaire.

Le second contrôle a pour but de s'assurer que le compactage des matériaux est réalisé conformément aux prescriptions. Il consiste également à vérifier visuellement que les quelques règles d'organisation de chantier relativement à l'évolution des engins de régalage et de compactage ainsi que les dispositions propres à protéger l'ouvrage des eaux de ruissellement sont respectées.

En ce qui concerne le contrôle du compactage, il convient de rappeler qu'il doit être régi par des spécifications définies dans le marché.

1.3.5 Durabilité

Vieillissement des pneus

Comme indiqué au paragraphe 1.3.5, le seul risque vraiment important provient de l'acidité du remblai au contact des pneus.

Pour les sols "non naturels", par exemple les déchets divers (mâchefers, cendres volantes, ...) il est nécessaire de vérifier leur compatibilité avec les pneus utilisés et aussi avec l'environnement (nappe phréatique...)

Un surdimensionnement des éléments non pneumatiques (attaches métalliques, bandelettes en géotextile, renforcements divers, ...) doivent être envisagé en tenant compte des recommandations et des normes existantes (normes sur les sols renforcés, sur les géotextiles, etc...).

Comportement des pneus dans l'eau

La circulaire n ° 2/73 du "Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie" (Association de l'Industrie allemande du Caoutchouc) a présenté en 1972 (4 décembre) les conclusions d'une expertise du Professeur SCHLEELE, de l'Université Technique de Hanovre, dont nous donnons cidessous les résultats.

Le caoutchouc naturel, ainsi que les produits caoutchouteux fabriqués par l'industrie chimique, à savoir les élastomères de la synthèse chimique, comme les caoutchoucs à base de styrène et de butadiène, les caoutchoucs à base de nitrile acrylique et de butadiène, le polyisobutylène et autres, sont des hydrocarbures de poids moléculaire élevé qui forment, seuls ou mélangés entre eux, l'élément principal de tous les articles techniques en gomme auquel appartiennent également les pneumatiques et les tapis transporteurs.

Les solvants organiques les font gonfler (liquides polaires) et les dissolvent (liquides apolaires tels que le benzène ou l'essence). Ils sont insolubles dans l'eau, les alcalis aqueux, ainsi que dans les eaux contenant des sels inorganiques. Ils ne sont en aucun cas toxiques. Même en cas de stockage en grande quantité (empilage), ils ne s'allument pas au contact avec l'air. Une inflammation spontanée est donc impossible. Ils sont difficiles à enflammer ; en cas d'accès modéré d'oxygène (air), ils se consument ou se carbonisent, tandis qu'un fort courant d'air et des températures élevées les font brûler à vives flammes. Leur comportement est donc comparable à celui du charbon ou du bois. Le caoutchouc naturel, et le caoutchouc synthétique sont très résistant aux microbes, ce qui signifie qu'ils peuvent être stockés pour une durée indéterminée sans se décomposer.

Afin de les rendre résistants à la déformation, de leur donner leurs qualités techniques (solidité, élasticité..), et de les rendre insensibles à l'oxygène qui est contenu dans l'air, le caoutchouc brut est mélangé , lors de son traitement, à un certain nombre de matières auxiliaires, à savoir :

1. Les charges : elles sont mélangées au caoutchouc en grandes quantités jusqu'à 40 à 50% pour les plus importantes. On utilise le noir (carbone en particules fines), la silice (Aerosil), les silicates de calcium, ainsi que la craie
2. Les agents de vulcanisation (agents de réticulation par exemple le soufre) : ils provoquent par une réaction chimique la transformation

du caoutchouc viscoélastique en un produit indéformable à grande contrainte

3. Les accélérateurs : la réaction relativement lente du caoutchouc avec le soufre peut être accélérée par un certain nombre de composés organiques
4. Les antioxydants : ils empêchent la corrosion des articles en gomme par l'oxygène qui est contenu dans l'air, ou par l'ozone lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil
5. Les additifs divers : matières bitumineuses comme par exemple certains résidus de l'industrie du pétrole, qui règlent la fluidité des mélanges de caoutchouc lors de leur traitement

Tandis que les charges représentent une partie considérable des composants des produits en caoutchouc, les matières d'addition citées en 2) 3) et 4) ne représentent qu'un pourcentage insignifiant du poids total.

Les matières d'addition dont il est question dans les alinéas 2 à 4, ne sont pas non plus solubles dans l'eau sinon leur présence dans la gomme serait complètement inutile, parce c'est justement le fait que la gomme n'est pas soluble dans l'eau (résistance à l'eau) qui est exploité lors de la mise en service technique de la gomme (pneus sur chaussées humides, bateaux pneumatiques, ...).

Restent donc le grand nombre d'accélérateurs et d'antioxydants recommandés. Or tous ces éléments sont aussi utilisés dans les tuyaux souples d'eau potable, les fermetures de bouteilles, les biberons et quelquefois en médecine (les tuyaux souples en gomme pour les transfusions sanguines). L'effet physiologique des matières d'addition contenues dans la gomme ne peut donc jouer un rôle décisif.

En résumé, on peut dire que le caoutchouc brut, ainsi que la gomme ne sont solubles ni dans l'eau, ni dans les alcalis aqueux. C'est pourquoi les pneus et les autres déchets de gomme déposés dans les décharges conclut le rapport ne peuvent pas dégager des substances qui pourraient pénétrer dans l'eau de pluie pour polluer ainsi les eaux souterraines.

Notons cependant que l'usure des pneumatiques libère des hydrocarbures polycliques et les additifs du caoutchouc : du cadmiun sous forme de naphténate et d'octoate, des organostanniques, ajoutés également comme stabilisants du caoutchouc, du soufre, du zinc, remplacé aujourd'hui le plus souvent par des composés de cadmiun.

A cette évaporation s'ajoute le dépôt résultant de la friction des pneus sur les chaussées. Une étude du Ministère de l'Environnement (1983) montre que, pour une autoroute à deux fois deux voies supportant un trafic de 10.000 véhicules/jour, et si l'on fixe la durée de vie d'un train de pneus à 40.000 km, l'usure correspondrait à 2,5 kg/voiture, d'où une production de matière de 0,8 à 1,2kg/km/jour. Cette matière contenant de 1 à 2% d'oxyde de zinc, ce métal serait produit à raison de 6 à 24 g/km/jour.

Toutefois aucun de ces produits n'a été détecté dans la nappe proche des grands axes routiers. (HENENSAL et BENOIT 1987)

MALEK et STEVENSON (1986) ont, comme déjà indiqué mis en évidence le bon comportement des pneus dans l'eau de mer en analysant des pneus neufs immergés pendant 42 ans dans la Manche et qui se trouvent à l'intérieur d'un navire marchand (SS Breda) attaqué pendant la seconde guerre mondiale. Les auteurs ont analysé pour cela différents types de pneus, de camions, tourisme, motos, bicyclettes, en prélevant à différentes profondeurs des échantillons et en les soumettant à de nombreuses essais. De plus, aucune attaque microbienne n'a été décelée.

1.4 Conclusions

Les pneumatiques usagés sont considérés dans les pays développés comme un déchet encombrant et abondant. On peut les valoriser en matériau de construction aux propriétés originales et fort utiles, offrant un large éventail d'applications, sans doute encore insuffisamment exploré qu'on peut classer dans le domaine du Génie civil en trois grands groupes :

* Ouvrages de soutènement : murs et raidissement des pentes pouvant servir également de mur absorbeur d'énergie contre les chutes de blocs et éventuellement association avec d'autres types de renforcements (géotextiles tissés, treillis soudés, grilles...)
* Remblai léger sur sols mous, sur pentes instables, éventuellement en association avec les pouzzolanes, les cendres volantes, le mâchefer, et créateur d'effet de voûte audessus des conduits en béton enterrés sous de fortes hauteurs de remblai...
* Divers (protection des chaussées et des bâtiments contre le gel, atténuation de vibrations...)

Ces différentes applications n'ont pu se développer que grâce à un programme de recherche particulièrement important.

"La paresse de penser est considérée comme un signe de bonne santé"

(Thomas Bernhard)