

2

Valorisation de pneus usés : et La poudrette de caoutchouc

2.1. Introduction

La préoccupation de l'homme pour la protection de son environnement devant l'agressivité de l'effet de serre est un engagement important pour les générations futures puisque il est considéré comme une source importante d'alimentation des différents aspects de pollution. L'environnement est un enjeu très important, et sa préservation est une responsabilité commune. Les pneus matriques usagés représentent un déchet abondant et très préoccupant. Avant d'être considérés comme un déchet, un certain pourcentage des pneumatiques usagés peut faire l'objet d'une valorisation qui peut se présenter sous une des formes suivantes ; valorisation énergétique, rechapages, valorisation sous forme de matières premières, et procédés innovants dans le domaine du génie civil tel que le 'Pneu sol' ainsi que dans le domaine routier: l'Asphalte caoutchouté obtenu à partir de la poudrette de pneumatique (traitement des fissures des chaussées routières) ; le granulat issu de pneumatique broyé pour la lutte anti bruit routes situées en zone urbaine

2.2. Généralités

Un pneu est constitué principalement de caoutchouc et contient également de l'acier (de 16 à 27% en masse selon le type de véhicule). L'ensemble des Pneumatiques Usagés (PU) des véhicules comprend les Pneumatiques Usagés Réutilisables (PUR) et les Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR). Ce sont des déchets industriels non dangereux devant être éliminés. Le stockage aérien non contrôlé des pneus peut constituer une source de nuisances (esthétique, ou liée au développement de larves, de moustiques, de rongeurs...) et présente des risques potentiels d'incendie et donc de pollution et de sécurité. La première étape consiste, dans le cadre de la filière d'élimination des PU, à séparer Les PUR des PUNR. Le critère

technique de tri entre les PUR et les PUNR porte sur la profondeur de la sculpture et l'intégrité de la structure de l'enveloppe. Les PUNR sont valorisés entiers ou sous forme de demi-produits :

- **Pneus coupés** : morceaux supérieurs à 300 mm ;
 - **Déchetas** : pneus découpés en morceaux irréguliers de 50 à 300 mm ;
 - Granulats : pneus réduits à une granulométrie comprise entre 1 et 10 mm par processus mécanique, cryogénique ou thermique ;
 - **Poudrettes** : particules de granulométrie inférieure à 1 mm, obtenue par réduction mécanique, cryogénique ou thermique...
- DEFINITION LCPC [DEF]

2.2.1 Définition

L'ensemble des pneumatiques usagés des véhicules (PU) comprend les Pneumatiques Usagés Réutilisables (PUR) et les Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR). Les PUR sont destinés au rechapage ou au marché des pneus d'occasion (Les PUNR doivent être éliminés. Les pneumatiques PUNR sont des déchets non dangereux .Un pneumatique est déclaré non réutilisable lorsqu'il ne remplit plus sa fonction initiale définie par « la mobilité en toute sécurité ».

2.2.2 Principaux constituants et catégories d'un pneu

Si on effectue la coupe d'un pneumatique de type radial dans le sens transversal (fig.2. 1), sa complexité par le nombre de constituants apparaît avec beaucoup de netteté, on distingue alors :(www.michelin.fr).

1- Une feuille d'un caoutchouc synthétique : Très étanche à l'air. Cette feuille va se trouver à l'intérieur du pneu et fera fonction de chambre à air.

2- La nappe carcasse : Cette carcasse est composée de minces câbles en fibres textiles disposés en arceaux droits et collés au caoutchouc. Ces câbles sont un élément clé de la structure du pneu

et vont lui permettre de résister à la pression. Dans une nappe de pneu automobile, il y a environ 1400 câbles qui peuvent chacun résisté à une force de 15 kgf.

3- *Un bourrage zone basse* : Son rôle est de transmettre les couples moteurs et freineur de la jante vers l'aire de contact au sol.

4- *Les tringles* : Servent à serrer le pneu sur la jante. Elles peuvent supporter jusqu'à 1800 kg sans risque de rupture.

5- *Les flancs* : En gomme souple vont protéger le pneu des chocs qui pourraient endommager la carcasse, comme les chocs contre les trottoirs, par exemple. Une gomme dure assure la liaison entre le pneu et la jante

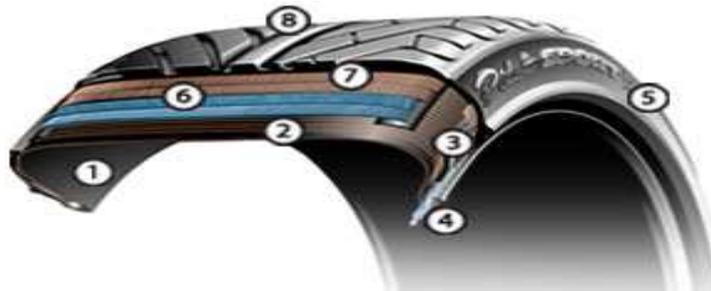


Fig. 2.1. Coupe transversale d'un pneu Michelin (www.michelin.com)

6- *Les nappes sommets* : Armées de câbles en acier très fins mais très résistants, elles sont croisées obliquement et collées l'une sur l'autre. Le croisement de leur fils avec ceux de la carcasse forme des triangles indéformables. Dénommée triangulation, cette disposition assure la rigidifiassions du sommet. Ces nappes, qui ceinturent tout le sommet du pneu, ont un rôle très complexe : Elles doivent être suffisamment rigides dans le sens circonférentiel du pneu pour ne pas s'étirer sous l'effet de la centrifugation, et maîtriser ainsi parfaitement le diamètre du pneu, quelles que soient les conditions d'utilisation.

Elles doivent aussi être rigides dans le sens transversal pour résister aux efforts de dérive. Mais elles doivent également être

souples dans le sens vertical pour "boire l'obstacle". Pour obtenir ces nappes, il faut coller l'acier à la gomme. Très difficile à obtenir, la cohésion parfaite entre ces matériaux dissemblables est indispensable.

7- *La bande de roulement* : Est posée par-dessus les nappes sommets. Cette partie du pneu, qui recevra les sculptures, sera en contact avec la route. Dans l'aire de contact au sol, la bande de roulement doit pouvoir résister à des efforts très importants. Le mélange qui la constitue doit être adhérent sur tous types de sols, résisté à l'usure, à l'abrasion et doit s'échauffer faiblement.

8- Il reste ensuite à réaliser les sculptures et à vulcaniser l'ensemble pour rendre tout cet assemblage parfaitement solidaire.

En 2004, ALIAPUR (filiale de valorisation des pneus usage) a défini quatre catégories de pneus PU en fonction de leur poids :

Catégorie A – Poids moyen : 6,5 kg (Tourisme dont 4x4 tous terrains, enveloppes de secours spéciales ou galettes, camionnettes dont 4x4 tous terrains, petit agricole-agraires roues directrices, motos routières-non routières-trial)

Catégorie B – Poids moyen : 53 kg (Manutention inférieure à 60 kg, poids lourds, remorque agricole)

Catégorie C – Poids moyen : 77 kg (Pneumatiques agraires roues motrices, travaux publics, manutention comprise entre 60 et 200 kg)

Catégorie D – Poids moyen : 365 kg (Génie civil, manutention supérieures à 200 kg)

2.2.3 Composition chimique d'un pneu

C'est un mélange à base de caoutchouc naturel ou synthétique dont les proportions varient selon le type de pneu et un certain nombre de matières auxiliaires

Tableau 2.1. *Composition des pneus tourisme et poids lourd*

(BLIC BRUXELLES and BUSEL convention séries N°00/33)

| Matériaux | Pneus tourisme (%) | Poids lourds (%) |
|---------------------------|--------------------|------------------|
| Caoutchouc/élasto mètre | 48 | 43 |
| Noir de carbone et silice | 21.5 | 21 |
| Métaux | 16.5 | 27 |
| Textiles | 5.5 | - |
| Oxyde de zinc | 1 | 2 |
| Soufre | 1 | 1 |
| Autre produit chimique | 7.5 | 6 |

2.3. Valorisation du pneumatique usagé

Aujourd'hui, les nombreuses possibilités de transformation ou d'élimination offerte par le pneu usagé non réutilisable en font un matériau à fort potentiel. Les chercheurs et les industriels découvrent ses nombreuses qualités: la résistance de sa structure lorsqu'il est conservé en entier, sa souplesse lorsqu'il est transformé en granulat, ou son pouvoir calorifique lorsqu'il est utilisé comme combustible. Enfin a noté aussi que le critère économique nous oblige à nous orienter vers l'utilisation d'un déchet particulièrement abondant, qu'est le pneumatique usagé, qui cause actuellement des problèmes d'environnement (Stockage et Protection de la couche d'ozone).

La valorisation concerne principalement les opérations suivantes:.....

.....BELABDELOUAHAB F, TROUZINE H [BEL11].

- ✓ Le réemploi
- ✓ Le rechapage
- ✓ Le recyclage
- ✓ L'utilisation comme combustible
- ✓ L'incinération avec récupération d'énergie
- ✓ L'utilisation pour ensilage par des agriculteurs

- ✓ Le broyage ou le découpage uniquement en vue de valorisation.
- ✓ L'utilisation dans le domaine des Travaux Publics (ou de génie civil)

Les pneumatiques usagés constituent à eux seuls la presque totalité des déchets de caoutchouc, Cependant avant d'être considérés comme des déchets, un nombre de pneumatiques usagés font l'objet d'une valorisation qui peut se présenter sous l'une des formes suivantes :

2.3.1. Valorisation Energétique

Cette valorisation consiste à produire de l'énergie par combustion des vieux pneus jetés dans les décharges et qui créent un problème de stockage.

La valorisation énergétique est rendue possible grâce au pouvoir calorifique du pneu (24-28Mj/kg). Il est proche de celui du charbon et peut être utilisé comme combustible alternatif dans les cas suivants :

- ✓ Fours de cimenterie
- ✓ Centrales thermiques
- ✓ Chaudières industrielles
- ✓ Unités d'incinération

En effet, le pneumatique, de par son origine polymérique, il a un excellent pouvoir calorifique.

3 tonnes de pneus = 2 tonnes de fuel.

Sa composition homogène en fait par ailleurs un combustible de substitution stable.

En Algérie le problème reste posé, la réglementation n'est pas encore claire sur la valorisation énergétique. Les cimenteries Algériennes préfèrent utiliser du gaz naturel qui est nettement moins coûteux, que de la poudrette de caoutchouc

2.3.2. Valorisation matière

Cette valorisation repose principalement sur trois cas;

- ✓ Par rechapage
- ✓ Valorisation par transformation mécanique (Poudrettes, Granulés)
- ✓ Valorisation par transformation chimique



Fig. 2.2. Valorisation en Poudrette de caoutchouc

Les pneumatiques usagés sont utilisés sous forme de poudrette pour la fabrication des enrobés routiers (l'Asphalte caoutchouté). La poudrette est incorporée dans le mélange lors de la fabrication de l'enrobé. Cette application vise à améliorer les caractéristiques acoustiques de l'enrobé, sa résistance à la fissuration, et l'adhérence, ce qui donne généralement une plus longue vie avant que l'entretien ne soit exigé (réduction d'entretiens).

2.3.3 Valorisation originale des pneus usagés

Dans le processus de valorisation matière, le pneu usagé est employé sous différentes formes

a - Pneus entiers

- ✓ **Pneu sol** qui consiste à superposer des couches de pneus reliés entre eux et remplis de matériaux de remblai. Cette technique permet la réalisation d'ouvrages de soutènement, de remblais légers, d'ouvrages absorbant l'énergie comme protection contre les chutes de blocs, et les répartiteurs de contraintes au dessus des conduites enterrées.

- ✓ **Arma pneu sol** associe pneus, remblai et armatures en nappes de treillis soudés.
- ✓ **Pneu tex** associe pneus et membranes en géotextile.
- ✓ **Pneu résil** consiste à empiler des pneus de poids lourds en colonnes et à empêcher le sol courant de remplir les
- ✓ vides créés à l'intérieur et entre les pneus; cette structure, a une masse volumique très faible et peut être utilisée comme soubassement de routes ou comme remblai derrière les culées de pont ou les murs de soutènement.
- ✓ **'Drainage'** l'utilisation de pneus ligaturés entre eux et mis en place sous forme de tube, permet le drainage de fossés et de parcelles.
- ✓ **'Protection de quai'** des pneus entiers sont couramment utilisés comme absorbeurs de chocs le long de quais et de jetées.
- ✓ **'Ensilage'** certaines techniques agricoles utilisent des pneus pour le maintien des bâches d'ensilage.

b - Pneus découpés

La bande roulement peut être utilisée comme tapis support de voie ferrée pour réduire les bruits et les vibrations.

c - Pneus déchiquetés

Les propriétés drainantes, la compressibilité, la masse volumique faible du produit permettent aux déchiquetés de pneus d'être utilisé comme remblai léger dans la construction de routes ou comme sous couches drainantes de centres d'enfouissement technique.

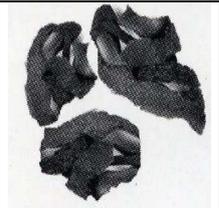
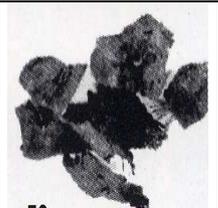
| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| Pneus entiers | Pneus déchiquetés Dimension > 50 mm | Pneus déchiquetés Dimension > 50 mm | Granulats 7/15 mm |
|  |  |  |  |
| Granulats 2/7 mm | Granulats 0,5/2 mm | Poudrettes 0/0,5 mm | Poudre < 50 µm |

Fig.2.3. Schéma d'une filière de valorisation matière (Interstate 880/Dixon Landing Road, 2001)

2.4 Valorisation et réalisations en Algérie par le technique pneu sol

Plusieurs réalisations en Pneu sol ont été effectuées dans le monde et en Algérie, nous citons dans ce qui suit quelques réalisations importantes :

Le problème des pneus usagés est non seulement Mondial mais aussi Maghrébin et Africain; des millions de tonnes sont jetés chaque année dans le monde (déchet encombrant et abondant).

L'Algérie comme certain d'autre pays a compris que la technologie est la clé de l'évolution, sur des méthodes et des techniques nouvelles, tout en pensant à la protection et la conservation de l'environnement dans le cadre du développement durable.

Le problème des pneus usagés est non seulement Mondial mais aussi Maghrébin et Africain; des millions de tonnes sont jetés chaque année dans le monde (déchet encombrant et abondant).

L'Algérie comme certain d'autre pays a compris que la technologie est la clé de l'évolution, sur des méthodes et des techniques nouvelles, tout en pensant à la protection et la conservation de l'environnement dans le cadre du développement durable.

1ier ouvrage [2005]

Projet pilote ; réalisation d'une planche expérimentale, qui a consisté à l'exécution d'un remblai par la technique 'Pneu sol'. Ce remblai a été mis en place au pied d'un grand talus d'une hauteur de 13m, exécuté dans le cadre des travaux de réalisation de l'évitement de la ville de Bousmail dans la wilaya de Tipaza. Ce projet qui est le premier dans son genre en Algérie, a comme rôle principal d'augmenter stabilité du talus de la route, et de raidir sa pente et enfin alléger les charges sur le coté aval d'un dalot.

- ✓ Nombre de Pneus utilisés : 5353 Pneus [Michelin Algérie].
- ✓ Inauguration et mise en circulation 12 mai 2005



Fig. 2.4.*Pose des nappes de pneus Projet pilote – Route de Bousmail*

Les différents contrôles et vérifications de la stabilité d'ensemble de cet ouvrage, pour la mesure des déformations dans le temps, en particulier les déplacements en tête de l'ouvrage, ont montrés un comportement et une stabilité parfaite jusqu'à l'heure actuelle.

2ième ouvrage [2006]

Ce cas est similaire au glissement de grande masse. C'est un ouvrage réalisé en Algérie par les propres moyens d'un particulier, suivie particulièrement par l'expert de l'E.N.S.T.P. Les pneus fournis par Michelin Algérie sont des pneus poids lourds entiers, le sol utilisé pour le remblai «pneu sol» étant le même sol existant sur site.

- ✓ Nombre de Pneus utilisés : 1000 Pneus.
- ✓ Réalisation et finalisation en 2006



Fig. 2.5. *Stabilité d'un glissement de terrain - Cas de Tizi Ghenif – Wilaya de Tizi Ouzou Algérie*

De même, les différents contrôles et vérifications de la stabilité d'ensemble de cet ouvrage, en particulier les déplacements en grande masse, ont montrés une stabilité parfaite jusqu'à l'heure actuelle.

2.5. Comportement du Pneu sol

Utiliser des inclusions résistantes à la traction pour améliorer les caractéristiques mécaniques d'un sol, coûte souvent très cher. Une solution très économique consiste à utiliser le Pneu sol, qui est constitué de l'association de sol avec des pneumatiques usagés (ou des parties de pneumatiques) de camions ou de véhicules de tourisme Cette utilisation de pneumatiques comme matériaux de renfort est très intéressante, de part leur disponibilité, et au niveau du comportement mécanique. Dans cette association, le rôle des pneus est d'apporter une cohésion au sol et éventuellement d'alléger le massif. On peut utiliser des pneus entiers (Figure 2.6) ou bien des pneus avec un ou sans flancs (Figures 2.7 et 2.8



Fig.2.6. *Pneus entiers avec flancs*



Fig.2.7. *Pneus avec un seul flanc*



Fig.2.8. *Pneus sans flanc*

2.5.1 Comportement général du Pneu sol

Le Pneu sol est un matériau composite constitué de deux éléments ayant des modules de déformation très différents; d'une part le pneu et d'autre part le sol.

Le comportement global d'un tel matériau résulte des caractéristiques mécaniques des deux composants de base et de leurs proportions relatives.

Comme pour beaucoup de sols renforcés, la caractéristique essentielle du Pneu sol est sa déformabilité et les ouvrages construits avec celui ci sont donc souples, capables de supporter sans dommage des tassements différentiels importants. Une autre caractéristique est que la construction d'un ouvrage en Pneu sol 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 conduirait à une standardisation possible des différents éléments et par suite, à une facilité de mise en œuvre. Les pneumatiques, qui constituent en dehors du matériau de remblai l'élément essentiel du Pneu sol, 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 et en plus ils n'affectent pas le sol..... R&D Aliapur2011 [ALI11].

2.5.2 Comportement mécanique du Pneu sol Cas statique

Les renforcements en pneumatique n'exigent avec le sol aucun critère granulométrique particulier, l'interaction du pneu et du sol ne reposant pas essentiellement sur le frottement comme pour la terre armée. Le Pneu sol présente l'avantage de pouvoir améliorer les propriétés mécaniques du sol soit de manière anisotrope, c'est-à-dire uniquement dans les directions où les matériaux sont le plus sollicités (nappes, bandes, linéaires...) soit de manière isotrope dans toutes les directions (chaînes continues d'éléments mélangées au sol de remblai). La principale caractéristique appréciée du procédé pneu sol est le fait qu'il procure une souplesse au sol renforcé et une stabilité aux ouvrages en supportant des grands tassements même s'ils sont différentiels.

Généralement, afin de simplifier le comportement mécanique du pneu sol, on adopte des hypothèses simplificatrices. On notera que :

- ✓ les armatures et le sol ont des comportements élastiques linéaires dans chaque nappe de matériau renforcé,
- ✓ la liaison au niveau de l'interface entre l'armature et le sol est parfaite,
- ✓ le comportement du sol est élastoplastique entre chaque nappe.

L'utilisation d'une méthode d'homogénéisation pour l'analyse de problèmes du pneu sol permet de déterminer un comportement équivalent du matériau. Généralement on adopte deux méthodes d'homogénéisation: l'une numérique et l'autre analytique.

2.5.3 Adhérence Terre-Pneumatiques

Les matériaux de remblais peuvent être soit des sols naturels soit des matériaux utilisables et doivent répondre aux critères géotechniques. Des essais en vraie grandeur de traction d'éléments pneumatiques noyés dans le remblai ont permis une bonne compréhension du phénomène d'interaction

sol-pneu mantique .D'après ces essais, l'adhérence bande aplatie dépend essentiellement de l'interaction sol-caoutchouc du pneumatique, il n'en est pas de même de celle des bandes de roulements sur chant et des flancs. En effet, l'effort de traction appliqué sur une bande de roulement sur chant est équilibré par:

- ✓ Le frottement sol-caoutchouc sur la surface peut varier en fonction de l'effort exercé puisque la déformation de l'élément est importante.
- ✓ Le frottement sol-sol le long de deux surfaces de cisaillements délimités par le bord

2.6. Problèmes liés de disposition de pneu de chute

Les décharges massives des pneus de chute est commune dans beaucoup de villes des modernises comme environ 1 pneu de chute est produit par personne chaque année. Les pneus utilisés stockés dégradent lentement sous les effets du rayonnement solaire comme le rouillèrent de l'acier à lieu. Le matériel dégradé souillerait lentement le sol et l'eau souterraine sur des années. Les décharges attendant sous le soleil des périodes prolongées pourraient se propager le feu accidentellement ou en raison des bouteilles ou de la lumière du soleil de focalisation en verre cassé. Les pneus brûlent avec de la fumée noire épaisse et la chaleur, répartissent rapidement le secteur entier de disposition, et laissent le résidu huileux contamination du sol. De tels feux sont difficiles à mettre au loin et produisent de la quantité significative de pollution de l'air.

Un des problèmes surveillés des yards de disposition de pneu de chute est que ces secteurs deviennent des lieux de reproduction pour des rongeurs et des moustiques. L'eau stagnante qui rassemble les pneus intérieurs est un lieu de reproduction approprié pour des moustiques. L'élimination des décharges de pneu de chute par la réutilisation appropriée aurait également l'avantage secondaire éliminé des problèmes liés de disposition

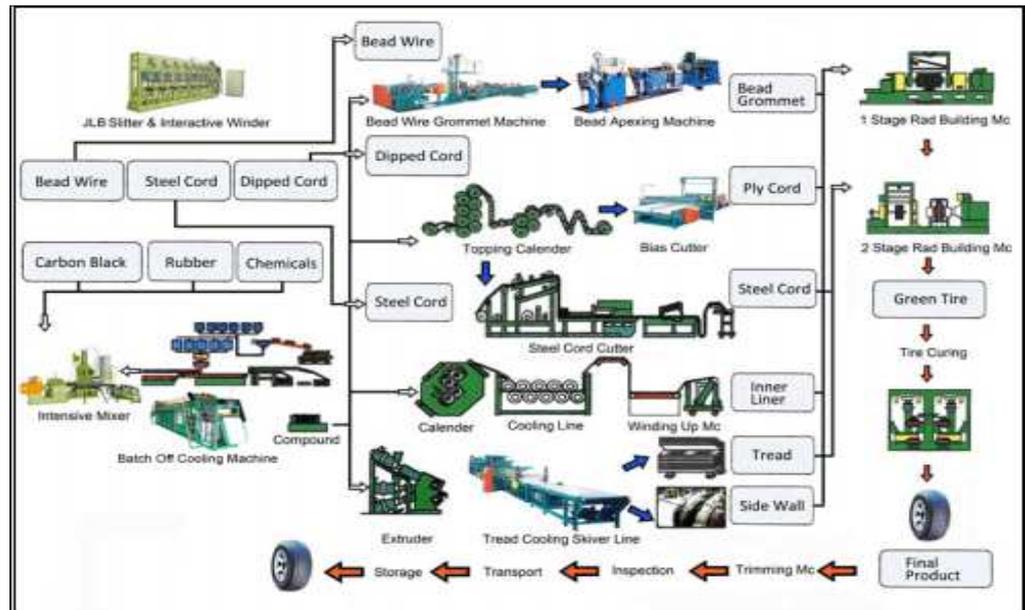


Fig.2.9. Ligne de production de pneu (courtoisie de PHT, Pam Hsiang Trading Co., Ltd.).

2.7. La Poudrette de caoutchouc

Afin d'assimiler les termes utilisés dans l'industrie du pneu, voici un bref historique sur le développement des caoutchoucs naturels et synthétiques. Le caoutchouc naturel provient de plantes diverses, la source la plus importante étant l'arbre à gomme (*Hevea brasiliensis*). Le caoutchouc synthétique, quant à lui, est produit chimiquement à partir de produits pétrochimiques. Les matériaux bruts utilisés dans la fabrication des caoutchoucs synthétiques sont les suivants:

- ✓ Isobutylène.
- ✓ Isoprène.
- ✓ Styrène.
- ✓ Butadiène.

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR) ou de déchets de rechapage. (Fig. 2.10)

Le broyage peut être mécanique ou cryogénique (fragilisation du caoutchouc à froid). S'il est cryogénique, la poudrette obtenue est de

meilleure qualité mais présente un coût plus élevé. La poudrette est utilisée dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes anti fissures à usage routier ou de membranes anti vibrations destinées aux plates-formes ferroviaires, de roulettes...

Elle est également employée comme liant dans les bitumes. L'enrobé possède ainsi un pouvoir drainant important évitant le phénomène d'aquaplaning, le bruit de roulage s'en trouve réduit et le processus de vieillissement ralenti.



Fig.2.10. Aspect des poudrettes de caoutchouc (www.aliapur.com).

2.7.1. Les caractéristiques des granulats de caoutchouc

D'une manière générale, il est possible de caractériser un granulat de caoutchouc par un certain nombre de propriétés :

- Taille de la particule.
- Distribution de taille des particules.
- Morphologie des particules.
- Composition chimique des particules.
- Energie de surface des particules

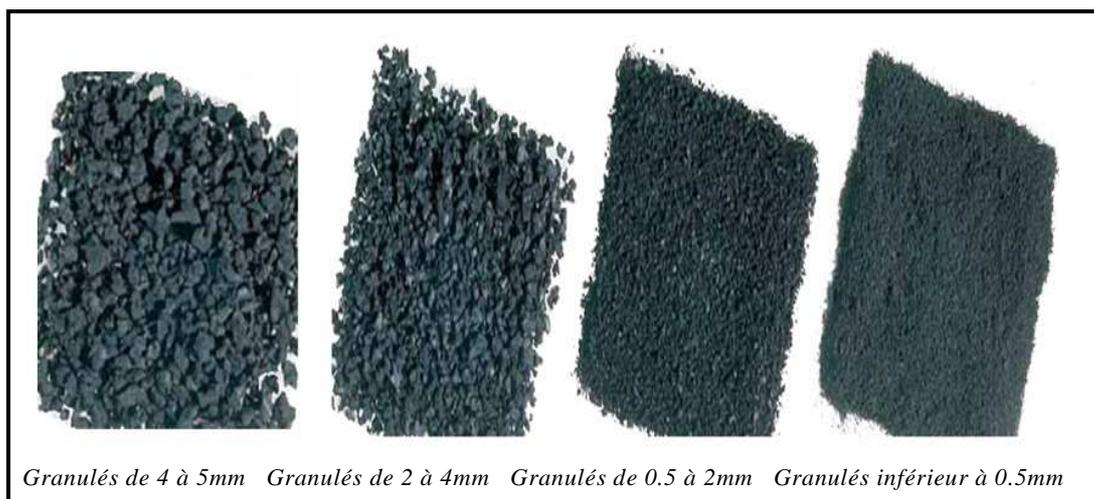


Fig.2.11. Le différent diamètre des granulats des pneus usés après broyage. (Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés).

Tableau .2.2. Distribution granulométrique pour les trous de filière de \varnothing 20 mm et \varnothing 16 mm (Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés).

| | | | |
|---------------------|----------------|----------------|----------------------|
| \varnothing 20 mm | 4 à 6 mm ~ 25% | 2 à 4 mm ~ 25% | 0 à 2 mm ~ 45% à 50% |
| \varnothing 16 mm | 4 à 6 mm ~ 20% | 2 à 4 mm ~ 20% | 0 à 2 mm ~ 55% à 60% |

2.7.2. Transformation de la poudrette de caoutchouc :

Aujourd'hui, la recherche technologique dans le domaine du traitement des pneus hors d'usage tend vers une standardisation des méthodes. Les technologies performantes permettant d'effectuer la transformation du pneu au moindre coût seront préconisées. Actuellement, d'études d'impacts environnementaux ont été réalisées au sujet des technologies employées lors du traitement des pneus hors d'usage.

Le processus de transformation du pneu en poudrette jusqu'au produit fini se divise en 2 étapes.

Elles sont illustrées comme suit :

- Déchiquetage primaire (grossier) pneu, morceaux, séparation de l'acier et de la fibre.

- Déchiquetage secondaire (fin) : Morceaux, poudrette, séparation de l'acier et de la fibre.

La transformation primaire consiste à déchiqueter les pneus par des procédés mécaniques. La transformation débute avec un pneu auquel on a préalablement retiré la ceinture d'acier pour ensuite lui faire subir une série d'opérations servant à produire des morceaux de caoutchouc.

2.7.2.1. Déchiquetage primaire

Durant le déchiquetage primaire, les pneus sont broyés en morceaux d'environ 1 pouce x 1 Pouce. Il s'agit de l'étape la plus problématique car le pneu peut contaminer par des pierres, du sable ou des morceaux de métal qui nuiront au bon déroulement de sa transformation. De plus, en raison de sa forme circulaire évidée, le pneu est très flexible et résiste aux coupures infligées par les couteaux. Les méthodes d'extraction des contaminants du pneu sont expliquées dans le tableau suivant :

Tableau.2.3. Les méthodes d'extraction des contaminants du pneu (ADEM, 2001).

| contaminant | moyens | %de libérations des contaminants durant le déchiquetage |
|-------------|--|---|
| acier | Enlevé par un séparateur électromagnétique durant le procédé de déchiquetage | Libération de 50% à 70% de l'acier lorsque le déchiquetage du caoutchouc est réduit à environ 1 pouce. |
| fibre | Enlevé avec de l'air sous pression durant le procédé de déchiquetage | Libération de fibre de 0.5 à 0.75 pouce de long lorsque le caoutchouc arrive à une dimension de 0.375 pouce |
| Saletés | Enlevé par un lavage à l'eau | ----- |

Les deux technologies les plus performantes pour effectuer le déchiquetage primaire sont le déchiquetage à température ambiante, et le déchiquetage par cryogénie.

✓ **Déchiquetage à température ambiante :**

Le déchiquetage à température ambiante produit des morceaux de caoutchouc pouvant contenir un certain pourcentage d'acier et de fibre. Aussi, la friction occasionnée par le déchiquetage contribue à augmenter la température des pneus, ce qui a pour effet de ramollir le caoutchouc qui colle davantage aux couteaux. Conséquences de ces transformations : Une usure prématurée de l'équipement, une demande en puissance accrue et un coût d'opération et d'entretien élevé. La poudrette résultant de ce procédé de découpage sera plutôt de forme allongée et présentera une surface plus régulière. Cette caractéristique contribue à diminuer ses propriétés d'adhérence car moins de facettes sont disponibles pour l'encrage du liant sur la particule de caoutchouc. D'un autre côté, les avantages de cette technologie se trouvent dans la simplicité d'opération du système et dans un coût d'opération relativement moindre.

✓ **Cryogénie :**

Ce procédé consiste à amener le pneu hors d'usage à une température très basse afin qu'il devienne fragile et friable : Le pneu peut atteindre une température oscillant autour de -196°C.

Les substances cryogéniques utilisées pour atteindre ces températures sont principalement l'azote liquide et le nitrogène liquide. La cryogénie peut être utilisée à chacune des étapes de réduction des morceaux et des particules de caoutchouc en poudrette. Les pneus entiers sont disposés dans un échangeur d'air, pour ensuite être refroidis au contact de la substance cryogénique.

Les quantités requises pour une réfrigération efficace sont d'environ 250 grammes de substance cryogénique pour 500 grammes de caoutchouc. Cette étape provoque une diminution de l'élasticité du pneu, favorisant ainsi sa fragmentation en petits morceaux. On retrouve 3 étapes majeures durant cette transformation :

✓ **Refroidissement dans un convoyeur (vis ou réservoir).**

✓ **Déchiquetage mécanique.**

✓ **Séparation des sous-produits (fibre, acier, résidus).**

Les technologies cryogéniques demeurent encore en développement et sont encore peu utilisées comparativement au déchiquetage à température ambiante. Des recherches sont en cours afin d'utiliser l'air ambiant comme substance cryogénique qui serait refroidi par d'énormes compresseurs. Cette technologie est encore en développement et ne peut actuellement être utilisée dans un contexte industriel.

2.7.2.2. Déchiquetage secondaire

Le déchiquetage secondaire consiste à transformer les morceaux de caoutchouc provenant du déchiquetage primaire. Cette étape permet de diminuer davantage la dimension des morceaux obtenus par le premier déchiquetage afin d'ajuster précisément la granulométrie de la poudrette.

- Déchiquetage à température ambiante :

Il s'agit du même procédé utilisé lors du déchiquetage primaire, c'est-à-dire au moyen de couteaux, d'où il est possible d'obtenir des morceaux de caoutchouc ayant une granulométrie plus petite.

✓ **Cryogénie**

Il s'agit du même procédé que pour le déchiquetage primaire, la seule différence étant que les morceaux de caoutchouc résultant de l'étape précédente sont réduits à une plus petite granulométrie. La poudrette issue du procédé de cryogénie contient un taux d'humidité plus élevé, ce qui peut causer des problèmes lors de son utilisation pour le moulage. Un système de contrôle de l'humidité est donc essentiel afin d'assurer une certaine qualité. La capacité de production de ce procédé est d'environ 1000 kilogrammes /heure pour une poudrette de 10 à 20 mailles, et de 600 kilogrammes/heure pour une poudrette de 30 à 40 mailles.

2.8. Valorisation de poudrette de caoutchouc

La poudrette de caoutchouc peut être utilisée en plusieurs activités, entre par exemple dans la fabrication de revêtements de sécurité et de revêtements amortissant pour les aires de jeu, les manèges et les pistes

garantissent une grande sécurité pour les aires de jeux. Cette sécurité est conforme à la norme européenne EN 1177 relative aux aires de jeux et qui impose des sols sachant amortir les chutes des enfants (www.aliapur.com).

✓ Bassins d'infiltration

Le pneu usagé broyé est couramment utilisé pour l'aménagement de bassins d'infiltration. Il retient des volumes d'eau importants, tout en conservant la solidité suffisante pour supporter une route sans déformation sous de lourdes charges



Fig. 2.13. Bassin d'infiltration (www.aliapur.com)

✓ Bétons

Des études sont en cours afin d'étudier les opportunités résultant de l'incorporation de granulats issus du broyage de pneus usagés dans des mortiers et bétons à base cimentaire. Par cette incorporation, il s'agit à la fois d'alléger le béton et d'en augmenter les performances (accroissement de la résistance à la fissuration et de la capacité de déformation de ces matériaux). Ces différentes utilisations des granulats ou de fibres textiles de pneus usagés dans des matériaux à base cimentaire représentent de voies de valorisation à exploiter. (www.aliapur.com).

Depuis dix ans, l'industrie cimentière s'est engagée à réduire sa consommation d'énergie fossile tout en garantissant le maintien de la

qualité des ciments. Avec l'utilisation de broyats de pneus ou de pneus usagés entiers comme combustible de substitution, les cimenteries participent à la préservation des ressources naturelles et au recyclage des produits en fin de vie. Cette solution permet d'économiser du coke de pétrole, du charbon et du fioul lourd. Bien entendu, le recours à des pneus s'effectue dans des conditions d'utilisation particulièrement strictes et encadrées.

✓ **Drainage**

Une étude de faisabilité sur la valorisation de broyats de pneus dans la fonction de drainage. Les broyats de pneumatiques usagés possèdent en effet une conductivité hydraulique élevée, équivalente à celle des granulats naturels que sont les graviers. Ainsi, le recours aux broyats pourrait être une opportunité intéressante, notamment dans les installations de stockage de déchets.

L'étude actuellement menée vise à établir des préconisations et des recommandations d'utilisation de broyats de pneus issus de poids lourds et de véhicules légers en couche drainante. Cette étude porte également sur les prescriptions techniques minimales pour assurer la pérennité technique et l'innocuité environnementale.



Fig. 2.14. *La valorisation de broyats de pneus dans la fonction de drainage (www.aliapur.com).*

✓ **La recherche en Algérie sur l'utilisation Poudrette de caoutchouc dans les chaussées routières.**

En 2007, une étude particulière a été lancée au niveau de l'ENTP sur l'utilisation de la poudrette de caoutchouc dans les chaussées routières (revêtement des chaussées). Cette recherche s'effectue au laboratoire de l'école, elle s'axe sur les procédés innovants dans le traitement de la fissuration des chaussées routières, principalement dans les zones à haute température et en parallèle avec le Ministère des Travaux Publics des planches d'expérimentation par inclusion d'un pourcentage de poudrette dans l'asphalte sont prévues au sud Algérien, ceci permettra de donner une souplesse aux enrobés afin d'éviter le phénomène de fissuration et en même temps réduire la nuisance sonore. Pour la réalisation de l'asphalte caoutchouté, les pneus sont utilisés sous forme de granulats ou de poudrette pour la fabrication des enrobés destinés aux couches de roulement des routes. Les différentes fractions granulométriques utilisées sont : 0/0,5 mm, 0,5/2 mm, 2/7 mm et 7/15 mm. La poudrette est incorporée comme granulats dans le mélange à la fabrication de l'enrobé (en moyenne 15%). Cette application vise à améliorer les caractéristiques acoustiques de l'enrobé. Le dosage est de l'ordre de quelques pourcents. Les poudrettes rentrent également dans la fabrication des enrobés drainant...
BELABDELOUAHAB F, TROUZINE H [BEL11]



Fig.2.15. *Technique de l'asphalt caoutchouté*

✓ Gazon synthétique

Le gazon synthétique est composé d'un tapis d'herbe synthétique dans lequel a généralement été ajouté un lit de lestage en sable recouvert d'une couche de granulats libres. Cette technologie permet une utilisation du stade par tous les temps et en toute saison, puisque ce revêtement ne craint ni le gel en hiver, ni la sécheresse en été, ni les inondations dues aux pluies. Il exige un entretien très limité et ne requiert pas d'arrosage. Surtout, ce terrain permet des sensations de jeu très proches d'une pelouse naturelle. De nombreuses communes ont aménagé des stades municipaux avec ce gazon synthétique. De même, plusieurs clubs se sont dotés de ce type de terrain ; c'est notamment le cas de l'un des terrains de l'équipe de France de football à Clairefontaine et d'un autre à Marcoussis pour l'équipe de France de rugby. En 2005, Aliapur a engagé, notamment avec l'Ademe et le groupement d'intérêt scientifique EEDEMS, un programme d'études scientifiques évaluant les risques environnementaux et sanitaires des matériaux de remplissage des gazons synthétiques. Il en ressort que ces revêtements n'ont aucun impact sur la santé des utilisateurs ou sur l'équilibre environnemental.

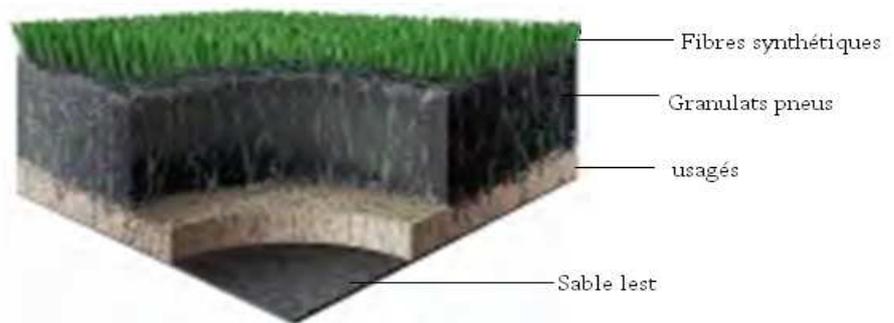


Fig.2.16. Coupe schématique verticale d'un sol sportif de 3ème génération (www.aliapur.com)

✓ **Autres domaines d'application**

La poudrette de caoutchouc peut réduire les vibrations induites par les plates-formes (tramway) en utilisant les granulats comme couche anti-vibratile. Les premiers résultats sont prometteurs et devraient déboucher sur une expérimentation. Comme elle peut être un mode d'isolation et pour réduire les bruits pour les toitures, les granulats peuvent être mélangés à des liants ou des résines, pour l'application dans les objets moulés, en particulier dans le domaine du mobilier urbain. Ils peuvent ainsi devenir des ralentisseurs, des plots de signalisation, des accessoires d'aménagement sur voie cyclable et même la fabrication des chaussures

2.9. Conditions de mise en œuvre

En préalable à toute utilisation en matériaux de substitution, il est indispensable de respecter les points suivants :

- ✓ Identification des flux / traçabilité

Les livraisons de broyats de PUNR doivent faire l'objet de l'établissement préalable d'un document de suivi. Ce document, précisera la provenance, la destination et les quantités de broyats de PUNR.

- ✓ Réception de la marchandise

Le déchargement des broyats de PUNR doit se faire sur une zone imperméabilisée de type béton ou enrobés. Dans tous les cas, un contrôle visuel des broyats de PUNR doit être réalisé lors du déchargement du camion et lors de la mise en place des broyats afin de vérifier l'absence d'autres déchets.

2.10. L'intérêt de poudrette de caoutchouc

- ✓ Amélioration de la cohésion.
- ✓ Diminution de la susceptibilité thermique.
- ✓ Augmentation des capacités d'allongement.
- ✓ Amélioration des caractéristiques viscoélastiques.

- ✓ Amélioration de l'adhésivité passive (meilleure résistance aux dés enrobage sur la chaussée)

Les propriétés physiques de la poudrette de caoutchouc qui les rendent moins susceptibles aux températures élevées et moins fragiles aux basses températures se traduisent aussi par des cohésions élevés, des retours élastiques, une bonne résistance en traction et aux essais de cisaillement. Ces propriétés ont des effets intéressants sur les performances

- ✓ Résistance à l'orniérage est améliorée par l'utilisation des polymères qui augmentent la cohésion à haute température et élève la recouvrance élastique lorsque la contrainte disparaît, ce qui est surtout valable pour les poudrettes de caoutchouc.
- ✓ Rigidité : La réduction de la susceptibilité thermique permet d'augmenter la rigidité d'un mélange à température élevée.
- ✓ Résistance à la fatigue : L'augmentation de la rigidité aux températures élevées et la diminution de la fragilité du liant aux basses températures permettent d'améliorer la tenue en fatigue des mélanges.
- ✓ Résistance à la fissuration à basse température : La poudrette de caoutchouc permet d'obtenir un mélange plus souple qui diminuera le risque de fissuration.
- ✓ Résistance à la propagation des fissures ; Cette propriété requise pour les couches surmontant des couches d'assises traitées aux liants modifiés aux élastomères employés à des taux relativement élevés, mais des combinaisons liants modifiés-fibres ont donné aussi des résultats positifs en laboratoire.
- ✓ Durabilité : l'adhésivité de la poudrette de caoutchouc sur le granulat est un facteur important.
- ✓ Résistance au vieillissement : La possibilité d'augmenter l'épaisseur de la poudrette de caoutchouc contribue à

améliorer cette propriété même s'il n'y pas d'essai pour la mesure clairement.

Toutes les propriétés sont particulièrement intéressantes dans les techniques d'enrobés ou les sollicitations mécaniques et métrologiques sont particulièrement agressives

2.11. CONCLUSION

La préoccupation de l'homme pour la protection de son environnement devant l'agressivité de son appareil industriel, ainsi que l'orientation de ses idées vers l'optimisation des coûts et délais de réalisation de ses projets ont poussées les chercheurs dans le domaine du Génie Civil, le lancement de plusieurs travaux de recherche visant à proposer de nouvelles technologies de réalisations. L'idée de la valorisation des pneumatiques usagés constitue actuellement la priorité principale. En effet le pneu usagé est un déchet encombrant, mais qui peut devenir très utiles, en conséquence le génie civil offre de nombreuses possibilités d'utilisation des pneumatiques usagés, en les valorisant en matériau de construction aux propriétés originales et très utiles.

D'une manière générale, le 'Pneu sol' présente l'avantage, outre celui d'aider à la résorption des décharges de vieux pneus, de pouvoir améliorer les propriétés mécaniques du sol. L'une des qualités du Pneu sol est sa souplesse qui lui permet de supporter des tassements différentiels importants.

Le but d'incorporer des dans une matrice est de transférer la charge du matériau le plus faible au matériau le plus fort. La poudrette recyclée a été mélangée avec un ou plusieurs liants afin de fabriquer de nouveaux matériaux. L'influence du type de thermoplastique (liant) utilisé, du pourcentage de poudrette de pneu recyclé ainsi que les paramètres de mise en œuvre sur les propriétés physiques du produit résultant, ont été étudiés. Des agents chimiques sont utilisés pour modifier l'interface charge – matrice et augmenter l'adhérence.