

Remerciement



Je tiens à remercier respectivement tous ceux qui m'ont aidé, et encouragé pour la réalisation de ce modeste travail.

Monsieur BENMALEK ML pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mon père, pour son aide, et son soutien tout, au long de mon cursus universitaire.

Tous mes professeurs pour leurs enseignements et toute ma famille.

Tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de mon mémoire.

Espérant une suite de votre part, je vous prie de recevoir mes sincères remerciements.



Dédicaces

Je dédie ce mémoire de fin d'études

A

Mon encadreur Pr. BENMALEK ML

A

Mon très cher père et ma très chère mère

en témoignage de ma reconnaissance envers le soutien, les

sacrifices et tous les

efforts qu'ils ont fait pour mon éducation ainsi que ma

formation

A

Mon cher frère, et mes chères sœurs

pour leur affection, compréhension et patience

A

tous ceux qui ont une relation de proche ou de loin

avec la réalisation du présent rapport.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE 01

LES DECHETS OU SOUS- PRODUITS INDUSTRIELS DANS LE GENIE CIVIL

I-DEFINITION DU DECHETS.....	02
I-1-L'ORIGINE DU MOT DECHETS.....	02
II-QUELQUES TYPES DE DECHETS	03
II-1-LES DECHETS INDUSTRIELS.....	03
II-1-1-LES DECHETS INDUSTRIELS BANALS.....	04
II-1-2-LES DECHETS INDUSTRIELS INERTES.....	05
II-2-LES DECHETS DE HAUT FOURNEAU.....	06
II-3-LES DECHETS DE BRIQUES	07
II-4-LES DECHETS DE CARRIERES.....	08
II-5-LES DECHETS DE DEMOLITION.....	08
II-6-LES DECHETS DE BOIS.....	09
CONCLUSION.....	09

CHAPITRE 02

UTILISATION DES PNEUS USAGES

I-PROBLEME POSES PAR LES PNEUS UUSAGES.....	11
I-1-DEFINITION	11
I-2-ENVIRONNEMENT.....	11
I-3-QUANTITE (STOCKAGE).....	12
I-3-1-LA PRODUCTION DES PNEUS DANS LE MONDE	13
I-3-2-LA FILIERE DE RECYCLAGE DES PNEUMATIQUES USAGES EN FRANCE ..	13
I-3-3-LA VALORISATION DES DECHETS DE CAOUTCHOUC AU VIETNAM	14

I-3-4-PNEUS USAGES ET DECHETS DE PLASTIQUES EN ALGERIE	14
I-3-5-LA QUANTITE EN ALGERIE.....	15
II-COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DES PNEUMATIQUES	16
II-1-LE CAOUTCHOUC NATUREL	17
A-LA RECOLTE ET LES PRODUITS DERIVES.....	17
B-LA VULCANISATION.....	19
II-2-LE CAOUTCHOUC SYNTHETIQUE(ARTIFICIEL).....	19
II-2-1-HISTORIQUE.....	19
II-2-2-PRINCIPAUX CAOUTCHOUCS SYNTHETIQUES.....	20
- LE POLYISOPRENE SYNTHETIQUE.....	20
- LE COPOLYMERE STATIQUE STYRENE-BUTADIENE(SBR).....	20
- LE POLYPUTADIENE (PB).....	20
- LE CAOUTCHOUC BUTYLE.....	21
- LE CHLOROPRENE OU NEOPRENE.....	21
- LE CAOUTCHOUC NITRILE.....	21
- LES ELASTOMERES THERMOPLASTIQUES.....	22
- PREPARATION/ BROYAGE.....	22
REUTILISATION.....	22
II-2-3-CAOUTCHOUC NATUREL OU SYNTHETIQUE : AVANTAGE ET INCONVENIENTS.....	22
III-VALORISATION.....	23
III-1-LA VALORISATION ENERGITIQUE	24
III-2-LA VALORISATION MATIERE.....	25
III-2-1-LA VALORISATION MECANIQUE.....	25
A-PNEUS ENTIERS	25
B-PNEUS DECOUPES.....	26
C-PNEUS DECHIQUETES.....	26
D-POUDRETTES.....	27
E-LES GRANULES.....	27
III-2-2-LA VALORISATION CHIMIQUE.....	27
IV-LES CARACTERISTIQUES DES PNEUS.....	28

IV-1-DEFINITION DU PUNR.....	28
IV-2-PRINCIPAUX CONSTITUANTS D'UN PNEU.....	28
IV-3-CARACTERISTIQUES MECANQUES DES PUNR.....	29
IV-4-CRITERES DE DUREE DE SERVICE DES PUNR.....	30
*LA LUMIERE ET LA CHALEUR	30
A-L'OZONE.....	30
B-L'ACIDITE DU SOL.....	30
C-L'EAU.....	31
V-PRINCIPALE UTILISATION.....	31
V-1-SURFACES POUR LA PRATIQUE DES SPORTS FABRIQUEES A PARTIR DE PNEUS RECYCLES.....	31
V-2-INDUSTRIE AUTOMOBILE FABRIQUES A PARTIR DE PNEUS RECYCLES.....	31
V-3-CONSTRUCTIONS SONT FABRIQUES A PARTIR DE PNEUS RECYCLES.....	32
V-4-LES APPLICATIONS GEOTECHNIQUES A L'ASPHALTE SONT FABRIQUES A PARTIR DE PNEUS RECYCLES.....	32
V-5-ADHESIFS ET PRODUITS DE SCHELLEMENT FABRIQUES A PARTIR DE PNEUS RECYCLES.....	32
V-6-LES PRODUITS D'AMORTISSEMENT ET DE SECURITE FABRIQUES A PARTIR DE PNEUS RECYCLES.....	33
V-7-LES PRODUITS DE CAOUTCHOUC ET DE PLASTIQUE FABRIQUES A PARTIR DE PNEUS RECYCLES	33
CONCLUSION	33

CHAPITRE 3

FORMULATION DES COMPOSITES CIMENTAIRES A BASE DE GRANULATS DE CAOUTCHOUC

I-PROCEDURE D'OBTENTION DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC.....	34
I-1-OBTENTION DES GRANULATS A PARTIR DE PNEUS DE CAOUTCHOUC.....	34
I-2-PROGRAMME EXPERIMENTAL	35

I-2-1-LES MATERIAUX.....	35
I-2-2-COMPOSITION.....	35
I-2-3-PREPARATION DES ECHANTILLONS.....	36
I-2-4-ESSAIS REALISES.....	37
I-2-5-RESULTAS ET DISCUTION.....	39
A-PROPRIETES DES MATERIAUX A L'ETAT FRAIS.....	39
B-PROPRIETES A L'ETAT DURCI.....	40
C-PROPRIETES MECANQUES.....	41
C-1-ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE.....	41
C-2-ESSAIS DE FLEXION QUATRE POINTS.....	43
C-3- PERSPECTIVES.....	45
I-2-TYPE DE GRANULATS DE CAOUTCHOUC.....	48
A-POUDRETTES.....	49
B-GRANULATS.....	49
II-COMPOSITION DES COMPOSITES CIMENTAIRES.....	51
II-1-COMPOSITION DU BETON.....	51
II-1-1-CHOIX DES CONSTITUANTS	51
A-LES CIMENTS.....	51
B-LES GRANULATS.....	51
C-L'EAU DE GACHAGE	51
D-LES ADJUVANTS	51
E-LES PIGEMENTS DE COLORATION.....	52
F-FILLERS.....	52
G-ULTRA FINES	52
II-2-COMPOSITION DES MORTIERS	52
A-LES LIANTS.....	52
B-LES SABLES.....	53

C-LES ADJUVANTS	53
D-LES AJOUTS.....	54
CONCLUSION.....	54

CHAPITRE 04

PROPRIETES MECANIQUES, PHYSIQUE DES COMPOSITES CIMENTAIRES ELABORES AVEC LES GRANULATS DE PNEUS USAGES

I-INTRODUCTION	55
II-LES PROPRIETES MECANIQUES	56
II-1-EVOLUTION DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION	56
II-1-1-RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	56
II-1-2-DEVELOPPEMENT DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION EN FONCTION DU TEMPS.....	57
II-2-MODULE D'ELASTICITE EN COMPRESSION.....	58
II-2-1-DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	58
II-2-2-RESULTATS ET DISSCUSSION	59
II-3-EVOLUTION DE LA RESISTANCE EN TRACTION	60
II-3-1-DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	60
II-3-2-RESULTATS ET DISCUSSION.....	61
II-4-COMPORTEMENT EN FLEXION QUATRE-POINT.....	62
II-4-1-DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	62
III-LES PROPRIETES PHYSIQUES.....	64
III-1-L'ABSORPTION ACOUSTIQUE.....	64
III-1-1-DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	65
III-1-2-RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	67
III-2-CONDUCTIVITE THERMIQUE.....	71

III-2-1-DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....72
III-2-2-RESULTATS ET DISCUSSION..... 74
CONCLUSION.....76

CHAPITRE 05

CONCLUSION GENERALE.....77
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....78

LISTE DES FIGURES

Numéro de figures	Titre de la figure	Numéro de pages
Figure 01	Malgré une valorisation énergétique les stocks de pneus usagés et le risque qu'ils représentent restent élevés.	12
Figure 02	Répartition des voies de valorisation des pneus usagés.	13
Figure 03	Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail Tipaza.	15
Figure 04	Coupe transversale d'un pneu.	28
Figure 05	Essais de flexion quatre point, configuration expérimentale.	38
Figure 06	Teneur en air occlus en fonction du taux d'incorporation des granulats en caoutchouc.	40
Figure 07	Effet de l'incorporation des granulats en caoutchouc sur la résistance en compression.	41
Figure 08	Effet de l'incorporation des granulats en caoutchouc sur le module d'élasticité en compression.	42
Figure 09	Module d'élasticité en fonction de la résistance en compression .	43
Figure 10	Courbe Force – Flèche en flexion quatre points – effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc.	44
Figure 11	Force normalisée en fonction de la Flèche – effet des granulats en caoutchouc sur la capacité de déformation.	44
Figure 12	Propagation des ondes ultrasonores dans les BAP - Montage expérimental.	46
	Vitesse de propagation de l'onde en fonction du taux d'incorporation des granulats.	46
Figure 13	Effet des granulats en caoutchouc sur l'atténuation de l'onde .	47
	Effet des granulats en caoutchouc sur la conductivité thermique d'un mortier à base de ciment.	47

Figure 14	Effet des granulats en caoutchouc sur l'atténuation de l'onde (par rapport au BAP de référence.	47
Figure 15	Effet des granulats en caoutchouc sur la conductivité thermique d'un mortier à base de ciment.	48
Figure 16	Effet des G.C. sur la résistance en compression à 28 jours.	56
Figure 17	Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au vidéo-microscope.	57
Figure 18	Cage extensométrique utilisée pour la détermination du module d'élasticité.	58
Figure 19	Influence du dosage en G.C. sur le module d'élasticité à 28 jours.	59
Figure 20	Eprouvette cylindrique reposant sur le support dédié après l'essai de traction indirecte par fendage.	60
Figure 21	Influence du dosage en G.C. sur la fct à l'âge 28 jours.	61
Figure 22	Essai de flexion quatre – points : dispositif expérimental.	63
Figure 23	Paramètres caractéristiques mesurés lors d'un essai de flexion quatre-points.	64
Figure 24	L'appareil à ondes stationnaires Type 4002 (tube de Kundt) avec les deux types de tube utilisés, le générateur GX 245 ainsi que l'amplificateur 2610.	66
Figure 25	Mise en place des supports avec le petit et le grand échantillon à l'extrémité des tubes.	67
Figure 26	Comportement d'un son incident à la surface d'un matériau.	68
Figure 27	Influence du dosage en G.C. sur le coefficient d'absorption acoustique.	69
Figure 28	Evaluation du rapport de surface d'absorption du son (SAA).	70
Figure 29	Influence du dosage en G.C. sur le SAA.	70
Figure 30	Dispositif expérimental de l'essai de la mesure de conductivité thermique.	73
Figure 31	Illustration des matériels de l'essai de la mesure de conductivité thermique.	73
Figure 32	Influence du dosage en G.C. sur la conductivité thermique.	74

Résumé:

Le but de ce travail est une recherche bibliographique sur les composites à base de granulats de caoutchouc. Nous nous sommes basés sur les mortiers et les bétons contenant différents dosages en granulats de caoutchouc.

L'étude expérimentale menée par différents auteurs a montré la chute des résistances à la compression et de la masse volumique des composites. la conductivité thermique chute également avec l'augmentation du dosage en granulats de caoutchouc.

les granulats de caoutchouc utilisées ont les dimensions :

0-4mm pour les mortiers.

4-10mm pour les bétons.

Beaucoup d'application sont proposées ce type de composite, notamment la fabrication des murs légers non porteurs.

Mots clés:

valorisation-déchets-granulats de caoutchouc-pneus usagés

ABSTRACT:

The aim of this study is a literature on composites of rubber granules. We relied on mortars and concretes containing different doses in rubber granules.

The experimental study conducted by different authors showed the fall in compressive strength and density of composites. the thermal conductivity also drops with increasing dosage of aggregates caoutchouc. the rubber granules used have dimensions 0-4mm for mortars.

4-10mm for concrete.

Many applications are offered this type of composite, including the Manufacture of lightweight non-load bearing walls.

Keywords:

Value, waste, tire, rubber, granules used.

ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو البحث ببيليوغرافي القائم على مركبات حبيبات المطاط، قمنا بالتركيز على الميلاط و الخرسانة المكونة من مختلف مقادير حبيبات المطاط. إن الدراسة التجريبية التي قام بها عدة مختصين في الميدان تناولت على انخفاض في مقاومة الضغط والكثافة الحجمية لهذه المكونات.

تتخفف الموصلية الحرارية مع تزايد مقادير حبيبات المطاط، إن حبيبات المطاط المستعملة لها القياسات التالية :

في الميلاط من 0 إلى 4 مم

في الخرسانة من 4 إلى 10 مم

عدة تطبيقات مطروحة لهذا النوع من المركب خاصة لبناء جدران خفيفة غير حاملة.

الكلمات المفتاحية :

تقييم، فضلات ، حبيبات المطاط ، المطاط المستعمل

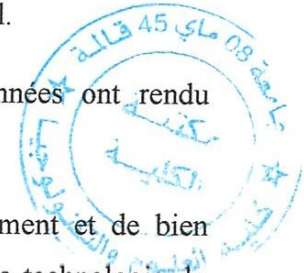
Introduction générale

Devant les besoins croissant des ressources en matériaux et aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous produits industriels notamment dans le domaine de génie civil.

Les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaire la valorisation et le recyclage des déchets.

Le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, on accordera beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sousproduits pour la fabrication du ciment et du béton.

L'objectif de cette étude est de contribuer à la l'utilisation des déchets de pneus et de caoutchouc dans le béton. Cela permet d'éliminer les déchets par recyclage et utilisation d'où la protection de l'environnement, et aide à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats.



CHAPITRE 1

Les déchets (ou sous-produits) industriels dans le génie civil

I-DEFINITION DU DECHET

Pour comprendre de manière plus juste le problème de la gestion des déchets solides industriels et leurs influences, il est nécessaire d'examiner tout d'abord les caractéristiques qui définissent les déchets industriels.

Le rôle de définition (et du vocabulaire) est particulièrement critique dans le secteur des déchets :

- elles orientent vers la filière d'élimination, et par conséquent le coût de traitement par unité de poids.
- elles favorisent ou limitent le phénomène de rejets par les unités de traitement correspondantes disposées dans leur voisinage.
- elles fixent les limites des domaines (matières premières, matières premières secondaires, recyclage, déchets) et les réglementaires à respectives qui s'appliquent.
- elles définissent la réglementation à respecter pour les transferts de déchets.[4]

I-1-L'origine du mot déchet

Les déchets tirent leurs origines du bas latin *déchie*, forme irrégulière de participe passé du verbe *déchoir*, le mot *déchie* évoque un bien déchu. de ce mot, dérivent la *dèche*, la *déchéance*, la *décrépidité*, ...etc. aujourd'hui, lourd de ce passé conceptuel, le *déchets* désigne, dans le langage courant, la perte qu'une chose éprouve dans son volume, sa valeur ou dans quelque-une de ses qualités, les définitions du déchets insistent sur cette notion de perte.

Pour *LE PETIT LAROUSSE*(1989), le déchets renvoie à tout ce qui est perdu dans l'emploi d'une matière, *LE GRAND LAROUSSE UNIVERSEL*(1983) englobe sous le vocable déchets les matériaux qui sont, soit rejetés comme n'ayant pas une valeur immédiate, soit laissés comme résidus d'un processus ou d'une opération. *LE PETIT ROBERT* (1987) reprend cette idée de rebut et définit le déchet comme "ce qui tombe d'une matière qu'on travaille, comme un résidu inutilisable. les déchets sont synonymes de résidus, rebuts, chutes, copeaux, ordures, immondices, le déchet est rejeté, après production ou utilisation, parce qu'il n'est plus utilisable ou consommable (c'est la perte de compétence), parce qu'il n'a plus de valeur le Dictionnaire des synonymes de la langue française (Larousse, 1973) propose une définition qui se distingue des autres au sens où elle n'assimile pas le déchet à des restes dénués de toute valeur, mais s'ouvre sur possible réutilisation déchets, en désignant ce dernier par 'tout ce qui tombe de une matière qu'on travaille ou qu'on débite et dont on peut quelques fois encore tirer partie'. [4]

II- QUELQUES TYPES DE DECHETS

II-1- les déchets industriels

On range sous l'appellation générale *déchets industriels* (DI) les déchets qui ne peuvent être ni admis en décharge ni ramassés avec les ordures ménagères (OM) en raison de leur toxicité. Leur diversité n'a d'égale que la variété de leurs caractéristiques, puisqu'ils dépendent étroitement des produits finis et des modes de fabrication.

Les déchets industriels se différencient des déchets des ménages par la variation plus rapide de leur composition et des quantités produites et également par la grande variation de leur caractère toxique en fonction du type d'activités.

On peut dire qu'un déchet industriel est un déchet généré par une activité industrielle. En l'absence de définition légale du déchet industriels, ce dernier peut être défini par référence à la notion d'industrie si l'on se reporte à la nomenclature « activité et produits » (1976) établie par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (**INSEE**), l'industrie au sens large doit également englober les activités liées à l'armement, au bâtiment et au génie civil, à la production d'énergie et au secteur agro-alimentaire. Si l'on rapproche la définition de l'industrie proposée par l'**INSEE** de l'actuelle acception de la notion de déchet industriel, l'on constate que la notion de déchet industriel ne recouvre pas l'ensemble de ces activités, par exemple, les déchets organiques des industries agro-alimentaires n'appartiennent

pas à la catégories des déchets industriels .ils sont ,en raison de leurs spécificités (composition ,filières d'élimination) ,comptabilises dans une catégorie des déchets de l'agriculture et des industries agro-alimentaires.

Les déchets industriels sont traditionnellement classés, selon leur caractère plus ou mois polluant, en trois grandes catégories, à savoir les déchets industriels inertes, les déchets industriels banals et les déchets industriels spéciaux.[4]

II-1-1- les Déchets Industriels Banals (DIB) :

Le DIB regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industries et les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, de la plasturgie, de la peinture, de la chimie et de la pétrochimie, ce sont des déchets d'emballage, des refus de fabrication non polluant (chutes, rebus), des déchets d'entretien et des matériels en fin de vie.

Constitues de matériaux tels que le bois ,les papiers cartons, les plastiques, les métaux,les pneus, le verre, le textile, le cuir ou encore les matériaux organiques,ils peuvent être éliminés avec les ordures ménagères (OM) ou dans les installations spécifiques ,car rien na contraint les municipalités à accepter de traiter les DIB produits dans la commune .,les DIB se définissent comme non inertes et par opposition aux déchets industriels spéciaux :ils ne présentent pas le caractère toxiques DIS.[4]

Les déchets industriels banals sont les déchets proviennent :

1. de l'exploration, de l'extraction minière et des carrières, de la préparation et du traitement ultérieur de minerais,
2. de la production primaire de l'agriculture, de l'horticulture, de la chasse, de la pêche, de l'aquaculture, de la préparation et de la transformation des aliments,
3. de la transformation du bois, de la production de papier, de carton, de pâte à papier, de panneaux et de meubles,
4. des industries du cuir et du textile,
5. du raffinage du pétrole, de la purification du gaz naturel et du traitement pyrolytique du charbon ,
6. des procédés de la chimie minérale ,
7. des procédés de la chimie organique ,
8. de la fabrication, de la formulation, de la distribution et de l'utilisation de produits de revêtement, mastics et encres d'impression ,

9. de l'industrie photographique,
10. des procédés thermiques,
11. du traitement et du revêtement des métaux, et de l'hydrométallurgie des métaux non ferreux,
12. de la mise en forme et du traitement mécanique de surface des métaux et matières plastiques,
13. des emballages, absorbants chiffrent d'essuyage, matériaux filtrants et vêtement de protection,
14. des déchets non décrits dans le catalogue (refus de broyage ; piles, accumulateurs, explosifs),
15. de construction et de démolition,
16. des soins médicaux ou vétérinaires et recherche associée,
17. des installations de traitement de déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de l'industrie de l'eau,
18. des déchets municipaux ou assimilés,

II-1-2- les déchets industriels inertes :

Ces déchets ne subissent aucune modification physique, chimique, ou biologique importante, les déchets inertes ne décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact.

La production totale de lixiviat et la teneur des déchets en polluants ainsi que l'écotoxicité des lixiviats doivent être négligeables et, en particulier, ne doivent pas porter atteinte à la qualité des eaux de surface et les eaux souterraines; la seule pollution est la pollution visuelle.

Ces déchets proviennent des activités de construction, de réhabilitation (rénovation) et de démolition liées au secteur du bâtiment ainsi que des activités liées à la réalisation et à l'entretien d'ouvrages publics (routes, ponts, réseaux ...) et les déchets minéraux des installations extractives et métallurgiques.[4]

- les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve : Les déblais et gravats de chantier : béton, les briques, les céramiques, les carrelages, les matériaux à base de gypse, parpaing, pierres ...

- Les déchets inertes de secteur des travaux publics : Il s'agit principalement de cailloux, de terres et de déblais ainsi que des déchets minéraux de démolition d'ouvrages d'art et de génie civil.
- Les déchets inertes issus des travaux de VRD (Voie et Réseaux Divers) sont les déblais de tranchées, de bordures de trottoirs, de pavés ...

II-2-déchets de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de «laitier expansé».

Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et de calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant. Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications. La quantité de laitier expansé produit est bien plus faible que celle de laitier refroidi à l'air. Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/m³.

Les blocs de béton de laitier expansé sont utilisés pour la construction de murs porteurs et de murs non porteurs. Le béton de laitier expansé a une excellente résistance au feu et une conductivité thermique d'environ 75% de celle des autres bétons légers.

Le laitier expansé réduit en boulettes a été mis au point au Canada. On prétend que ce procédé de fabrication pollue moins l'air que le procédé normal de fabrication.[1]

* en Algérie

Le secteur de la sidérurgie produit annuellement 600.000 tonnes de laitiers sous forme de déchets de la production des hauts fourneaux. Ces déchets peuvent remplacer le clinker dans la composition du ciment à 60%, ce qui induirait des gains sur le plan économique et écologique. Très abondante en Algérie, cette ressource demeure sous-exploitée, observe l'universitaire algérien Mohammed Nadir Toudjit. « Seuls 20% de ces résidus sont utilisés par les industriels du ciment », regrette-t-il.

Les laitiers des hauts fourneaux, des résidus issus de la fabrication de la fonte dans les hauts-fourneaux du complexe sidérurgique d'El Hadjar, peuvent entrer dans la fabrication des ciments mais ils sont sous-exploités, constate Mohammed Nadir Toudjit, du Laboratoire Bâti dans l'Environnement (LBE), de la faculté de génie civil de l'USTHB (Université des sciences et des technologies Houari Boumediene, Alger).

Rencontré en marge du 8^{ème} séminaire international sur les technologies organisé par LaFarge à Alger, cet universitaire estime que l'utilisation des ajouts minéraux dans la fabrication du ciment a un double avantage écologique et économique. Ces sous-produits de la sidérurgie sont produits en quantités importantes dans le complexe sidérurgique d'El Hadjar. « Malheureusement, seuls 20% de ces résidus sont utilisés par les industriels du ciment ».

Chaque année 600.000 tonnes de laitiers sont produites par l'industrie sidérurgique, indiquent les chiffres officiels. « Seulement 120.000 tonnes sont utilisées annuellement dans l'industrie du ciment. Le reste ne trouve pas preneur chez les cimentiers, encore réticents à employer ce

minéral de substitution », a regretté Mohammed Nadir Toudjit. « Pourtant, en récupérant 60% de ces déchets pour les intégrer à des taux d'addition au niveau des ciments, en termes de substitution on peut aller jusqu'à 30% d'économie sur la production d'une tonne de ciment », a-t-il expliqué.

II-3-Les Déchets de brique

Dans plusieurs pays européens, le recyclage de la brique est systématique. Elles sont intégrées dans des bâtiments neufs afin de leur donner la même patine que les bâtiments plus anciens. Mais l'utilisation de ce matériau dans la construction est risquée parce qu'il est difficile de s'assurer de la qualité et de la résistance de la brique usagée. De plus, le nettoyage des briques usagées est difficile. Pour enlever le vieux mortier, vous devez vous équiper d'un marteau de maçon et de lunettes protectrices. Des heures de plaisir. Les entreprises en rénovation hésitent à construire avec de la brique usagée parce que le coût de la main-d'œuvre professionnelle relié au nettoyage des briques fait que le coût de la brique usagée est souvent plus élevé que la brique neuve. C'est pourquoi les gens préfèrent donner leurs briques usagées plutôt que de la réutiliser.[11]

II-4-Les déchets de carrières

Les déchets de carrières sont des résidus provenant de l'exploitation des carrières de marbre, granit etc.

Les déchets de carrière appartiennent à la catégorie des déchets Industriels Inertes : en effet il s'agit des déchets qui n'évoluent pas avec le temps (on dit qu'ils sont stables) et qui ne polluent pas le sol ou les eaux d'infiltration .

Les déchets provenant des carrières sont utilisés pour la réalisation decarrelages typepalladiana.

Ce crible, à deux séries de doigts autonettoyants et ayant une grande capacité de production, est conçu spécialement pour les matériaux les plus difficiles à traiter tels que les déchets de C&D, les résidus de bois, les sols contaminés, les agrégats, les résidus miniers et les déchets de carrière.[1]

II-5-Les déchets de démolition

Les chantiers de démolition produisent plus de 17 millions de tonnes de déchets par an (27 millions de tonnes avec la dépose issue de la réhabilitation), d'après les estimations résultant de l'étude de quantification nationale réalisée par la FNB et l'ADEME en 1995.

Actuellement, ces déchets sont majoritairement éliminés en centre de stockage de "classe "III ou en dépôts sauvages. Ils représentent ainsi plus de 20% des déchets acceptés par ces centres. Ces derniers sont réservés aux déchets dits inertes, et contrairement aux centres de stockage de "classe "I et de "classe "II, ne relèvent que du code de l'urbanisme pour leur implantation et leur exploitation (autorisation municipale) et de la police du maire pour ce qui concerne les contrôles. Les déchets sont ainsi le plus souvent destinés à un stockage mal contrôlé.

Or les évolutions réglementaires – notamment celles relatives à la sévérité accrue des critères d'acceptation des déchets mis en centres de stockage ainsi que celles organisant la lutte contre les dépôts sauvages – obligent à développer une autre approche de la gestion des déchets.

En outre, les lois sur les déchets (loi du 13 juillet 1992 en France en particulier), édictées notamment en application de directives européennes, donnent la priorité à la valorisation en général et au recyclage en particulier.

Pour cela, il est nécessaire de trier les déchets. Dans le cas des chantiers de démolition, cela signifie qu'il faut développer et encourager les techniques de déconstruction des bâtiments. Celles-ci peuvent en effet s'avérer plus performantes, plus simples et globalement moins coûteuses que d'effectuer un tri complet après démolition traditionnelle dans un centre de tri

adapté. Elles peuvent cependant n'être que partielles et venir en complément à un tri hors chantier.[10]

II-6-Les déchets de bois

Les déchets de bois proviennent :

de l'exploitation forestière : houppiers, branchages, écorces, souches, sciures des industries de première transformation (scieries) qui produisent des dosses et délignures, des écorces, des sciures, des copeaux et des chutes courtes des industries de deuxième transformation (menuiseries, fabriques de meubles, de parquets, de charpentes...) qui produisent des sciures, des chutes, des copeaux d'usinage, des poussières de ponçage.

Des objets mis au rebut : bois de chantier et de démolition, caissettes, palettes, bois de coffrage, charpentes, meubles, traverses de chemin de fer, bois de veine...

Les déchets de bois sont classés en trois catégories :

- la biomasse : bois exempt de toute contamination
- les bois faiblement adjuvantés : palettes, panneaux, bois d'ameublement
- les bois traités à la créosote, aux CCA (cuivre, chrome et arsenic) et les bois ignifugés.

Les bois de rebut souillés ou traités sont, en fonction de leur teneur en substances dangereuses, considérés comme des déchets dangereux. Ils doivent donc être éliminés par les filières de traitement adaptées .[9]

CONCLUSION

Un déchet industriel est un déchets généré par une activité industrielle, il se différencie de déchets ménagers, ils sont classés selon leurs caractères polluants en deux catégories à savoir, les déchets industriels banals, déchets industriels inertes.

Les déchets industriels banals ne peuvent pas présenter de caractère dangereux outoxique vis-à-vis de l'environnement ou de la santé humaine, ils doivent diriger vers les circuits de réemploi, recyclage, valorisation matière ou d'énergie.

Les déchets inertes sont les déchets qui ne subissent aucune modification importantesusceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Les déchets industriels risquent non seulement de dégrader les paysages, mais aussi de polluer l'environnement (air, sol, eau) et d'exposer l'homme à des nuisances et des dangers, dont certains peuvent être très graves et particulièrement les déchets spéciaux qu'ils présentent les caractères de danger (combustibles, inflammables, irritants, toxiques...)

CHAPITRE 2

UTILISATION DES PNEUS USAGES

I-PROBLEMES POSES PAR LES PNEUS USAGES

I-1-définition

Même si la problématique concerne tous les pays sans exception, les données fiables disponibles ne concernent que les pays développés. Dans ce dernier cas, elles montrent que les pneus en caoutchouc représentent 60% de la production industrielle en caoutchouc.

Compte tenu du risque exposé dans l'introduction de ce manuscrit, on comprend aisément que la valorisation du pneu usagé est une préoccupation majeure.

Le caoutchouc est un élément indispensable dans la constitution d'un pneumatique : il représente environ 48% de son poids. En plus du latex, matière de base du caoutchouc naturel, les caoutchoucs synthétiques, dérivés de pétrole, ont permis d'améliorer les caractéristiques des pneumatiques. Les pneumatiques sont également renforcés d'armatures métalliques (15% de poids) afin d'augmenter le niveau de leur performance, mais aussi de fibres textiles (5% de poids) afin d'alléger leur poids tout en conservant leurs propriétés d'endurance.[3]

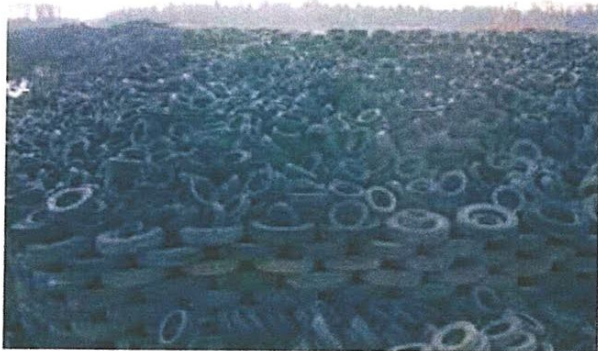
I-2-environnement

Le caoutchouc naturel est rendu plus rigide, stable aux ultraviolets, résistant au sel de déneigement par des additifs parfois toxiques. Les vieux pneus sont source potentielle d'incendies toxiques, de fournir des zones de ponte à des moustiques susceptibles de véhiculer de virus tels que le Chikungunya. Brûler des pneus produits beaucoup d'énergie, mais

également une forte pollution. Le rechapage est possible et courant dans certains pays depuis longtemps pour les pneus de camions et gros engins de chantier public (Il produit des pneus 40 % moins cher). Mais le recyclage intégral de la ferraille et du caoutchouc nécessite des filières organisées et des matériels sophistiqués. Le brûlage des pneus à l'air libre ou ailleurs qu'en incinérateur spécialisé est interdit dans la plupart des pays. Le pneu broyé est parfois brûlé dans les fours de cimenterie. Il existe de par le monde de nombreuses décharges de pneus. Une nouvelle technique perçoit actuellement dans la réutilisation des pneus usagés. Ils sont transformés en granulats et servent dans les pelouses synthétiques sur des terrains de football par exemple. Des récifs artificiels à base de pneus ont été essayés, sans succès en raison de la toxicité des matériaux, et du fait qu'il est facilement balayé lors des tempêtes. Ils peuvent par contre trouver une application de protection, comme c'est le cas du procédé « Pneusol », mis en place pour protéger des chutes de pierres la station d'épuration Amphitria. Les pneus s'usent et perdent peu à peu de leur matière sur les routes. Le cadmium qu'ils contiennent et d'autres composants concourent à la pollution routière.[3]

I-3-quantités (stockage)

Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations graves pour l'environnement à travers le monde. Des centaines de millions de pneus hors d'usage, sont générés et cumulés dans les États-Unis et de nombreux autres pays à travers le monde, chaque année figure 1.



Stock de pneus usagés à Campsas, Tarn-et-Garonne en 2007



Incendie sur le site de stockage de pneus usagés. Stanislaus county, CA.

Figure 1 : Malgré une valorisation énergétique les stocks de pneus usagés et le risque qu'ils représentent restent élevés.

I-3-1-la production des pneus dans le monde

Il y avait 75 sites de production dans le monde, 42 en Europe (iconographie) et 18 rien qu'en France.

La production mondiale est de 900 millions d'unités par jours. Chaque année c'est 200 millions de pneus usés en Europe et plus de 42 000 000 de tonnes de pneus finissent chaque année, en France, en décharge publique, sans compter les milliers de tonnes qui sont jetés, dans les décharges sauvages.

Quand on sait qu'un pneu met 400 ans avant de commencer à se dégrader.[8]

I-3-2- la filière de recyclage des pneumatiques usagés en france

Les Pneus Usagés proviennent du démontage des pneumatiques sur les points de vente, les distributeurs ou les garagistes. Ils sont ensuite collectés, puis triés par des collecteurs qui revendent les Pneus Usagés Réutilisables (P.U.R) aux sociétés de rechapage ou sur le marché de l'occasion. Une partie des Pneus Usagés Non Réutilisables (P.U.N.R) est envoyée en cimenterie, en centrales thermiques, en site de broyage et de fabrication de poudrette ou en application de Travaux Publics. La part de chacune de ces voies de valorisation a été illustrée par la Figure 2.

Les plus importants producteurs de pneumatiques (Michelin, Dunlop, Bridgestone, Firestone, Goodyear, Continental, Kléber et Pirelli) ont choisi de confier la collecte et la valorisation des pneus en fin de vie à un organisme tiers. Ils ont donc créé une société (année 1993) pour assurer leur devoir de collecte et le traitement de tonnages de pneumatiques usagés équivalents à leur vente de l'année précédente. Le pneu n'étant plus considéré comme un simple déchet mais plutôt comme un matériau ayant un fort potentiel de valorisation, la recherche de filières d'élimination, de réutilisation ou de nouvelles voies de valorisation est devenue ainsi un enjeu majeur.[3]

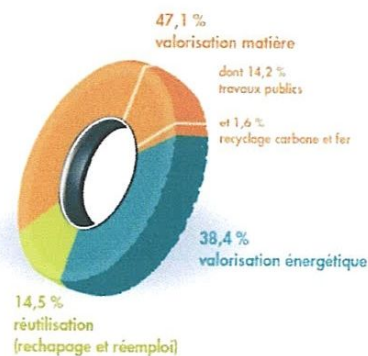


Figure 2: Répartition des voies de valorisation des pneus usagés,

I-3-3- la valorisation des déchets de caoutchouc au vietnam

Dans les années 80, compte tenu d'une faible ressource de caoutchouc, le Vietnam a cherché des méthodes de collecte de matériaux polymère en général et déchet de caoutchouc en particulier. Pour les déchets de caoutchouc, il a été collecté pour rechapeter les pneus de vélo, motorcycle, etc. Pour les pneus de voiture, après plusieurs rechapages ils ont été recyclés pour produire des bassins ou des seaux. Mais dans les vingt dernières années, le Vietnam a pu produire de plus en plus de matières premières en caoutchouc et on n'a donc pas continué à rechercher des voies de valorisation de pneus usagés.

En 1995, une première recherche réalisée par Do et al. permet de tirer la sonnette d'alarme sur l'augmentation du stock de déchet de caoutchouc et sur l'insuffisance des voies de valorisation. Nguyen et al. évaluent des propriétés du composite incorporant du caoutchouc naturel et de la poudre de caoutchouc de 0,4 mm de diamètre issus du déchet de caoutchouc.[3]

I-3-4-Pneus usagés et déchets plastiques (en Algérie)

En Algérie le secteur d'activité oeuvre en effet à renforcer ses actions en matière de valorisation des déchets et sous produits industriels notamment les pneus usagés dans les travaux routiers et de génie civil. Cette démarche consiste évidemment à développer et appuyer l'utilisation de ce déchet industriel dans les divers travaux de Génie civil ce qui contribuera d'une part, à la préservation de l'environnement, et d'autre part, à la réduction des coûts induits par l'utilisation des matériaux de plus en plus rares notamment dans certaines régions du pays.

En effet, les pneumatiques usagés constituent un gisement de matières premières secondaires, leur récupération et leur valorisation constituent pour notre pays un impératif économique. La valorisation de ce déchet industriel est à ses premiers balbutiements. Un premier chantier expérimental a été initié par le département ministériel, concernant l'utilisation des pneus réformés en tant que soutènement d'un talus de remblai dans un projet routier (contournement de Bou ISmail). figure 3 « Les travaux déjà finalisés ont permis de mettre en oeuvre 3500 pneus mis à disposition par Michelin Algérie .[6]



Figure 3 : Chantier expérimental Pneu sol à Bou-Ismaïl Tipaza

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la biophysicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter.

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont déjà exploités commercialement.

L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Dans cette étude on s'intéresse aux déchets de marbre et pour l'utiliser en tant que granulats pour béton.[6]

I- 3-5- la quantité en Algérie

Depuis 2004, chaque année, l'Algérie importe en moyenne 49,62 milliers de tonnes de pneumatiques encaoutchouc, selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur. Sachant que chaque pneu neufvendu génère un pneu usagé, et tenant compte de la perte de masse due à l'usure du pneu une fois usé, on se retrouve avec environ 45,65 milliers de tonnes de pneus usagés, chaque année.

Les filières classiques de valorisation des pneus usagés qui nécessitent souvent une technologie avancée, sont généralement concentrées dans les pays riches. Le développement de nouvelles filières de valorisation des pneus usagés, reste cependant toujours en grande demande partout dans le monde. Nous proposons dans cet article, une enquête sur les pneus usagés en Algérie. Après la présentation du PUNR, nous donnons un modèle d'estimation du gisement des pneus usés en fonction du parc automobile de notre pays. Une lecture de la réglementation algérienne, concernant la gestion des déchets, est ensuite proposée. Une enquête sur les différentes filières de valorisation de ces déchets, est alors présentée. Cette enquête fait ressortir que la technique Pneusol est la principale filière de valorisation des pneus usés en Algérie. [6]

II – COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DES PNEUMATIQUES

Après la découverte de la vulcanisation par l'américain Goodyear en 1844, Robert William Thomson invente une première roue pneumatique en 1845, qui tombe rapidement dans l'oubli. L'utilisation des pneus pleins en caoutchouc pour vélocipèdes s'est généralisée en 1868. En 1888, à Belfast, le vétérinaire écossais John Boyd Dunlop, qui fabriquait lui-même ses gants chirurgicaux, imagine et dépose le brevet d'un tube souple gonflé pour remplacer les pneus pleins. Ensuite en 1891 le pneu à tringle inventé par C.K. Welch marque une importante percée dans l'histoire du pneumatique. Cette même année, les frères Michelin brevetèrent des pneus qui pouvaient être montés ou démontés manuellement. En 1904, Firestone et la société Goodyear mirent au point des pneus à tringles à flancs droits. Presque tous les fabricants de pneus aux Etats-Unis suivirent leur technique de fabrication avant 1908.

Les pneus étaient fabriqués en caoutchouc naturel mais le développement de l'industrie chimique a autorisé la première synthèse de caoutchouc en 1909. Actuellement des centaines de composants entrent dans la formulation du caoutchouc utilisée pour fabriquer les pneumatiques : accélérateurs, antioxydants, antiozone, charges, agents de vulcanisation, pigments, plastifiants, agents de renforcements et résines. Un pneumatique est composé de différentes couches de caoutchoucs naturels et synthétiques, qui présentent chacun des propriétés particulières. La composition d'un pneu varie peu entre les pneus de tourisme et les pneus de poids lourds Tableau 1 à l'exception de la nature chimique des élastomères (NR utilisé en majorité dans les pneus poids lourds). [2]

Tableau 1 : Constitution moyenne en masse des pneus

matériaux	Pneu tourisme	Pneu poids lourd
élastomère	47%	43%
Noir de carbone	21.5%	21%
acier	16.5%	27%
textile	5.5%	-
Oxyde de zinc	1%	2%
soufre	1%	1%
autre	7.5%	6%

Les caoutchoucs naturels (NR) et synthétiques (SR) sont des matériaux qui ont contribué à l'essor industriel que nous connaissons aujourd'hui. Le caoutchouc ou plus généralement l'élastomère a un rôle irremplaçable.

Le terme élastomère regroupe les polymères réticulés qui possèdent, outre d'excellentes caractéristiques isolantes, une propriété très intéressante dite « élasticité caoutchoutique » qui leur permet après étirement, de reprendre leur forme initiale à peu près instantanément et complètement. Tout ensemble de pièces en mouvement nécessite l'utilisation d'élastomère à un niveau plus ou moins élevé selon son degré de technicité :

transmission de l'énergie par courroie ou liaison élastique, pièces pour l'amortissement des vibrations, revêtement pour l'isolation, joint pour garantir l'étanchéité, tubes, durites, tuyaux pour le transport des fluides, les articles chirurgicaux, les gants, les tétines, les membranes élastiques etc.... [2]

II -1 - le caoutchouc naturel

a- La récolte et les produits dérivés

Le caoutchouc naturel (NR) constitué de cis-1,4-polyisoprène dont la formule générale est $(C_5H_8)_n$, est un matériau biosourcé produit par des centaines d'espèces d'arbres et de plantes dans de nombreuses parties du monde, y compris les régions équatoriales de l'Afrique et de l'Asie de Sud-Est et de l'Amérique du Sud. Il fait partie de la famille des polydiènes.

Le liquide laiteux ou latex extrait à partir de l'arbre à caoutchouc l'*Hévéa brasiliensis* fournit la quasi-totalité (plus de 99%) du caoutchouc naturel récolté dans le monde. Le reste provient notamment de *Ficus elastica* et d'autres plantes africaines cultivées dans des pays comme la côte d'Ivoire, Madagascar, le Sénégal et la Sierra Leone. Le trans-1,4-polyisoprène, connu sous le nom de gutta-percha ou de balata, provient d'arbres présents en Amérique du Sud et en Indonésie. Le caoutchouc naturel commercial peut être produit aussi à partir de l'arbuste dit

guayule (*Partheniumargentatum*) qui croit dans des régions chaudes et arides comme le Sud-ouest des Etats-Unis⁴. Le type et la provenance de l'arbre conditionnent la masse molaire des chaînes de caoutchouc, la configuration des chaînes et les « défauts de motif ».

Le latex est récolté habituellement en pratiquant une incision en spirale de l'écorce tous les deux jours. La récolte s'effectue dans un récipient suspendu sous l'incision. Puis, après l'ajout d'un agent anticoagulant qui est le plus souvent l'ammoniaque, le caoutchouc est transporté jusqu'aux stations de transformation.

Pour certains types de plantes comme le Guayule, l'arbuste doit être coupé pour extraire le caoutchouc qui se trouve dans les tiges et les racines. La microstructure du caoutchouc obtenu est identique à celle du caoutchouc de l'hévéa mais les chaînes macromoléculaires sont plus courtes.

Plusieurs types de matériaux issus du caoutchouc naturel sont produits actuellement, les plus connus sont les feuilles nervurées et fumées, le caoutchouc technique, les crêpes, le latex, le caoutchouc naturel époxydé et le caoutchouc naturel thermoplastique:

- La Thaïlande est le plus grand fournisseur de **feuilles nervurées et fumées, RSS** (RibbedSmokedSheet), qui représentent environ la moitié de la production mondiale du caoutchouc naturel.
- L'Indonésie, La Malaisie et la Thaïlande sont les principaux fournisseurs du **caoutchouc technique** nommés respectivement **SIR** (Standard IndonesianRubber), **SMR** (Standard MalaysianRubber) et **STR** (Standard Thai Rubber).

Ce caoutchouc est caractérisé par sa qualité qui est déterminée par des normes techniques, notamment sa pureté et son élasticité et non par des caractéristiques visuelles classiques.

- **Les crêpes** occupent une petite place sur le marché mondial du caoutchouc naturel.
- **Le concentré du latex** est utilisé pour produire des adhésifs, des doublures de moquette, de la mousse et d'autres produits tels que ballons, gants ...
- **Le caoutchouc naturel époxydé** résulte d'un traitement avec les peracides. Il est utilisé en remplacement de certains caoutchoucs synthétiques.
- **Le caoutchouc naturel thermoplastique** est obtenu par vulcanisation dynamique partielle d'un mélange de polyoléfines et de caoutchouc naturel.

Les propriétés physico-chimiques de ce matériau sont une conséquence directe de la conformation spatiale des molécules. L'unité constitutive de cette macromolécule, le polyisoprène, présente une double liaison carbone-carbone réactive. De fait, la réactivité de

ces insaturations permet la vulcanisation, et des modifications chimiques, mais elle peut entraîner aussi la détérioration de ses propriétés mécaniques par oxydation.[2]

b- La vulcanisation

Le problème majeur associé au caoutchouc naturel est le fluage qui se produit inévitablement lors d'une contrainte. Ce problème a été résolu en 1939 par Charles Goodyear qui a découvert que lorsqu'on additionne du soufre à du caoutchouc naturel et que le mélange est chauffé, le caoutchouc garde son élasticité mais il est beaucoup plus résistant et ne colle plus. Ce processus est nommé vulcanisation. Le principe de son mécanisme est la création de liaisons chimiques établissant des « ponts » entre les chaînes macromoléculaires, constituant ainsi un réseau tridimensionnel qui limite le glissement des macromolécules les unes par rapport aux autres et assure la permanence des caractéristiques d'élasticité et de stabilité de forme. Le soufre est l'agent vulcanisant le plus couramment utilisé.

Cependant, dans certains cas, des donneurs de soufre ou des peroxydes organiques, parfois des rayonnements ionisants, sont utilisés.

Parmi les différents systèmes de vulcanisation testés, ce sont les systèmes contenant du soufre qui donnent la meilleure résistance mécanique. Dans les élastomères, le squelette de la chaîne est formé d'atomes de carbone simplement ou doublement liés, l'énergie de ces liaisons est supérieure à celle d'une liaison entre deux atomes de soufre. Si la chaîne subit une surtension locale la liaison pontale cède sans provoquer la rupture de la chaîne de polymère.

Certains caoutchoucs synthétiques ne sont pas vulcanisés par le soufre mais avec d'autres agents de vulcanisation comme les peroxydes. [2]

II-2- le caoutchouc synthétique (Artificiel)

II-2-1-historique

le premier caoutchouc synthétique américain, le chloroprène polymérisé ou Néoprène[®], a été fabriqué et commercialisé par la société Dupont de Nemours. C'est un élastomère qui coûte vingt fois plus cher que le caoutchouc naturel. L'annonce de ce polymère a été faite à Akron le 12 novembre 1931 dans le congrès de l'American Chemical Society.

La fin de la seconde guerre mondiale permet le retour du commerce du caoutchouc naturel avec le Sud-Est asiatique en général, et avec la Malaisie en particulier.

En 1980, le caoutchouc synthétique, essentiellement le « SBR » redevient le premier caoutchouc consommé dans le monde.[2]

II-2-2-principaux caoutchoucs synthétiques

Parmi les caoutchoucs synthétiques les plus utilisés pour la fabrication des pneumatiques, on peut citer quelques caoutchoucs d'usage général:

Le polyisoprène synthétique

est directement comparable au caoutchouc naturel, même s'il ne contient que 92% de configuration cis au lieu de 99,8% pour le caoutchouc naturel. Le polyisoprène supporte bien la contrainte de traction, a une bonne tenue à l'abrasion, résiste au déchirement, absorbe les chocs et permet l'atténuation des vibrations. Mais comme le caoutchouc naturel, il résiste mal à la lumière, à l'ozone et à la chaleur. Il n'a aucune résistance aux huiles et fuels. Ce caoutchouc peut être synthétisé par le procédé de polymérisation Ziegler-Natta, à partir d'un hydrocarbure insaturé, l'isoprène.[2]

Le copolymère statistique styrène-butadiène (SBR)

mélangé à des huiles minérales, des hydrocarbures aliphatiques, aromatiques ou chlorés, il garde sa stabilité dans une gamme de températures allant de -40 °C à +100 °C. Il est principalement utilisé dans les bandes de roulement des véhicules automobiles légers, seul ou en mélange avec le caoutchouc naturel grâce à sa grande résistance à l'abrasion, au vieillissement et à l'ozone.[2]

Le polybutadiène (PB)

le 1,4-cis-polybutadiène est le principal concurrent du caoutchouc naturel car il lui est très similaire, par sa haute résistance à l'abrasion, sa bonne absorption des chocs et la capacité qu'il a de diminuer les vibrations. En outre, il a une excellente tenue à froid, c'est le meilleur des caoutchoucs d'usage général. Il a en revanche une moins bonne tenue à la contrainte que le caoutchouc naturel. Le 1,4-trans-polybutadiène (PB) est un thermoplastique dont la température de fusion est 140°C et la résistance à la lumière, à l'ozone et à la chaleur est mauvaise à cause de son oxydation. Il présente une mauvaise adhérence sur sol mouillé, d'où le phénomène observé d'« aquaplaning ». C'est pourquoi il est employé en mélange avec le SBR ou le caoutchouc naturel. Ce caoutchouc est utilisé également pour les ceintures, durites, joints. On retrouve aussi dans les pneumatiques des caoutchoucs de spécialité comme :

Le caoutchouc butyle

est un copolymère de butadiène avec 2% environ d'isoprène. Il présente une très bonne résistance aux intempéries, à la chaleur, au froid, aux bases et aux acides forts, aux diélectriques. Cet élastomère est peu élastique, et ne résiste ni aux huiles ni aux fuels. Mais son principal intérêt est sa très bonne imperméabilité aux gaz. Son usage principal réside dans la fabrication de chambres à air. Le caoutchouc butyle est souvent utilisé comme matériau isolant dans les câbles et ses autres applications concernent les tuyaux pour vapeur, eau chaude et pour gaz.[2]

Le chloroprène ou néoprène

inventé en 1931, il a de bonnes propriétés dynamiques (élasticité et flexion), et mécaniques; il supporte bien le vieillissement (ozone, chaleur). C'est un matériau ininflammable, apprécié pour sa grande stabilité. Ses points négatifs sont une mauvaise résistance aux solvants aromatiques et aux cétones et son prix très élevé. Il est utilisé pour des applications mécaniques : bandes transporteuses, rouleaux, courroies trapézoïdales, joints, profilés d'étanchéité (bâtiment - fenêtres).[2]

Le caoutchouc nitrile

copolymère butadiène-acrylonitrile (75% en masse de butadiène) est surtout utilisé pour son excellente résistance aux huiles et aux solvants aromatiques. Il est toutefois difficile à mettre en oeuvre.

Les copolymères d'**Ethylène-Propylène-Diène Monomère** (EPDM) sont des élastomères spéciaux, introduits sur le marché en 1963. Ces terpolymères amorphes sont obtenus en copolymérisant dans des proportions variables l'éthylène (le terpolymère contient de 60 à 85 % de motifs éthylène) et le propylène, avec un faible taux de diène non conjugué. La polymérisation n'utilise qu'une double liaison du diène. La seconde, latérale à la chaîne moléculaire, permet de réaliser une vulcanisation conventionnelle au soufre. Un taux d'insaturation élevé (par exemple 10 %) augmente la vitesse de vulcanisation au soufre, mais aussi la sensibilité au vieillissement du matériau. Ces élastomères sont de couleur blanche, ils sont caractérisés par une excellente résistance à l'oxydation (ozone, air), aux intempéries, à la lumière, au froid, une très bonne résistance aux acides, des propriétés mécaniques moyennes mais ils sont sensibles à l'huile ou l'essence.[2]

Les élastomères thermoplastiques

sont des copolymères triblocs styrène-butadiène-styrène ou styrène-isoprène-styrène. Ces matériaux ont des propriétés d'élastomères, mais peuvent être mis en oeuvre comme des thermoplastiques sans vulcanisation.[2]

Préparation/Broyage

Cette catégorie correspond aux tonnages acheminés vers des plateformes de préparation, broyage, ou découpage de pneumatiques. Ces tonnages pourront ensuite être éliminés suivant les différentes filières existantes. En 2007, 207 Kt ont fait l'objet de préparation/broyage, ce chiffre a atteint 223 Kt en 2008.[2]

Réutilisation

44 et 47 Kt, respectivement en 2007 et 2008, ont été réutilisés, soit directement (vente d'occasion), soit après rechapage. Moins de 0,4 % en 2007 et environ 1,7 % en 2008 de la masse totale des pneumatiques usagés ont été utilisés pour le maintien des bâches d'ensilage agricole ou incinérés sans récupération d'énergie.

De 1994 à 2003, la mise au rebut est passée de 62% à 18%. Le recyclage passant de 6% à 28%, et la récupération d'énergie de 11% à 30% sont à présent les principales voies de récupération des pneus usagés.[2]

II-2-3-caoutchouc naturel ou synthétique : avantages et inconvénients

Le choix entre caoutchouc naturel, synthétique ou mélange des deux, résulte d'un compromis où interviennent des considérations économiques et techniques.

En effet, la concurrence réelle entre caoutchouc naturel et caoutchouc synthétique a commencé dans les années 1955. Le premier Caoutchouc synthétique est le copolymère de butadiène et de styrène nommé « Buna-S » par les allemands, « GR-S » par les américains, et « SBR » (styrenebutadienerubber) par les anglo-saxons. Le principal avantage du caoutchouc synthétique est qu'il peut être fabriqué dans une usine voisine de celle qui l'utilise, en quantité quasi-illimitée avec des délais de livraison faibles. En plus sa mise en oeuvre a fait l'objet de recherches étatiques poussées, ce qui n'est pas le cas du caoutchouc naturel qui ne peut pas être amélioré à volonté.

- Une excellente résistance intrinsèque : bonnes propriétés mécaniques du mélange non Vulcanisé.

- En revanche le caoutchouc naturel a des propriétés très intéressantes comme :
Un excellent collant de confection qui facilite l'assemblage des divers éléments d'une pièce complexe comme le pneumatique.
- Une excellente résistance à la propagation d'entailles : une déchirure amorcée se propageant plus difficilement sous des contraintes répétées.
- Un faible échauffement interne : une pièce soumise à des sollicitations haute fréquence (pneumatique en roulement) s'échauffant moins,
- De bonnes propriétés d'amortissement.

Mais il présente aussi des points faibles comme :

- Sa mauvaise résistance aux huiles et solvants pétroliers. Cette résistance peut cependant être améliorée en réalisant, si nécessaire, un coupage modéré avec des élastomères plus résistants, nitrile polyacrylique, polychloroprène,
- Sa moindre résistance au vieillissement et à l'ozone qui nécessite une amélioration par une formulation appropriée et par coupage avec du polychloroprène ou parfois de l'EPDM, copolymère d'éthylène, de propylène et de monomère diénique,
- Sa tendance à la réversion qui disparaît en utilisant des systèmes de vulcanisation à faible taux de soufre.

La consommation mondiale de caoutchoucs s'est élevée à 22,3 millions de tonnes en 2008, contre 9,0 millions de tonnes en 1970. Cette consommation présente un relatif équilibre entre le naturel (44 % des volumes) et les synthétiques (56 %).

Les qualités intrinsèques du caoutchouc en font aujourd'hui encore un matériau indispensable à l'industrie du pneumatique qui consomme près de 75% de la production mondiale du caoutchouc naturel et 60 % du caoutchouc synthétique. [2]

III - VALORISATION

Les plus grandes voies de valorisation que ce soit pour les déchets de pneumatiques ou pour les déchets de caoutchoucs industriels sont la valorisation énergétique et la valorisation matière, qui constituent de nouvelles perspectives et qui peuvent constituer une solution efficace aux problèmes cités préalablement.

III-1- La valorisation énergétique

Le pneumatique, par sa structure chimique polymère, possède un excellent pouvoir calorifique :

3 tonnes de pneus = 2 tonnes de fuel

Sa composition homogène en fait par ailleurs un combustible de substitution stable. La valorisation énergétique a démarré en France en 1993, elle est cependant limitée, puisque seulement 18% des pneus usagés y sont valorisés contre 63% au Japon, 44% en Allemagne et 29% en Grande Bretagne. Elle repose quasi essentiellement sur l'utilisation en cimenteries.

Cette méthode permet aux cimentiers de diminuer leurs factures énergétiques, de diversifier leurs sources d'approvisionnement et de diminuer la consommation d'énergie fossile.

L'industrie cimentière a commencé à utiliser des pneus usagés en substitution partielle des combustibles traditionnels en 1992 – 1993. Ces pneus sont le plus souvent utilisés broyés, plus rarement entiers. En 1998, 26 000 tonnes de pneus usagés ont été valorisées en cimenterie ; les quantités pourraient progresser, mais d'autres matières premières plus rémunératrices les concurrencent, comme les farines animales, dont la destruction peut présenter un caractère prioritaire pour la collectivité.

Notons que si les incinérateurs sont aux normes, l'incinération ne cause pas de pollution atmosphérique. Cependant ce procédé conduit à l'obtention de mâchefers et de cendres qui concentrent l'essentiel des métaux lourds, qui sont des déchets ultimes dont l'inertage et le stockage dans des sites protégés et contrôlés sont très coûteux. Donc l'augmentation des coûts, les risques de pollution, les problèmes posés par les résidus et surtout l'opposition sociale peuvent freiner ce type de valorisation. Ces différents éléments peuvent se résumer dans le tableau suivant :

avantage	Inconvénient
Réduction du volume 90%	Cendre , résidus polluants
Rapidité du traitement	Problème des seuils de rentabilité pour les petites unités
Pas de prétraitement	Production d'énergie électrique peut efficace dans la plupart des cas
Adaptation aux gros gisements	Investissements élevés
Ne produit pas du méthane	Coût de fonctionnement en forte croissance
Récupération et valorisation de l'énergie (économie d'énergie)	Empêche toute inflexion de la politique des déchets
Garantie de long terme	Oppositions sociales croissantes

En 2006, les résultats de recherches concernant l'effet nocif de la co-incinération et les avantages du recyclage de pneus utilisés comme combustible alternatif dans les cimenteries ont été publiés. La diminution de la consommation de combustible à 35% en brûlant les pneus dans les fours, sans diminuer la qualité du ciment et nuire à l'environnement a été démontrée. En 2007, M.P. CUETA a décrit toutes les technologies disponibles pour la combustion des pneus dans les usines de ciments¹⁵. Par ailleurs, Il existe d'autres valorisations énergétiques qui sont actuellement peu utilisées en France. Ces recherches sont développées notamment par des rechapés soucieux de valoriser des pneumatiques ne pouvant être rechapés et des rebuts de rechapage afin de produire in situ de l'énergie nécessaire aux unités de production. Ces projets buttent sur des contraintes réglementaires les pneumatiques usagés sont considérés comme des "déchets", et non des "combustibles", et à ce titre ces projets sont soumis à une réglementation contraignante notamment en terme d'émissions dans l'atmosphère.[2]

III-2-la valorisation matière

III-2-1-La valorisation mécanique

Dans la valorisation mécanique, le pneu usagé est employé sous différentes formes. L'ETRA a classé les demi-produits obtenus dans la valorisation mécanique dans les catégories suivantes :

- _ pneus coupés: morceaux supérieurs à 300 mm;
- _ déchiquetas: pneus découpés en morceaux irréguliers de 15 à 300 mm;
- _ granulats: pneus réduits à une granulométrie comprise entre 1 et 15 mm par processus mécanique, cryogénique ou thermique;
- _ poudre: particule de granulométrie inférieure à 1 mm, obtenue par réduction mécanique, cryogénique ou thermique.

a-Pneus entiers

Le pneumatique usagé entier peut être utilisé dans les applications suivantes : remblais de route, ouvrages de soutènement, murs anti-bruit...L'une des techniques employées est le procédé "*Pneusol*", qui consiste à superposer des couches de pneus de poids lourds 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 de répartiteurs de contraintes au-dessus de conduites enterrées.

d-Poudrettes

Il s'agit de particules de caoutchoucs dont la dimension est inférieure à 1 mm. Leur coût d'obtention dépend de leur finesse, de leur origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées par exemple pour la fabrication de bandages et de roues pleines (« caddies », poubelles, tondeuses, brouettes...), pour la modification des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface).

Ces poudrettes peuvent être obtenues par plusieurs méthodes. En général les caoutchoucs sont fragmentés, pour donner des morceaux, de diamètre allant de 1 à 5 mm. Ces morceaux seront mélangés avec d'autres réactifs dans une extrudeuse bi-vis²² ou bien dans un mélangeur interne²³ pour obtenir à la fin les poudrettes de diamètre compris entre 300 et 500 µm. Il existe d'autres méthodes qui sont plus anciennes pour obtenir les poudrettes, soit en travaillant à haute température, soit à très basse température (méthodes cryogéniques).

e- Les granulés

Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent par moulage, de réaliser facilement des feuilles et des plaques. Ils peuvent être utilisés pour les aires de jeux qui doivent être amortissantes, les pavés anti-dérapants, les revêtements pour terrains de sport (surface souple, diminution des nuisances sonores). En 2002 l'utilisation des granulés de Caoutchouc vulcanisé en mélange avec l'asphalte pour les trottoirs a été brevetée²⁵. Cela a permis de baisser le coût de l'asphalte et d'augmenter la résistance des trottoirs.

Récemment en 2007, des études ont été faites²⁶, pour optimiser le pourcentage de granulés de caoutchoucs incorporés et leurs diamètres pour avoir les meilleures propriétés de l'asphalte. [2]

III-2-2- La valorisation chimique

C'est une valorisation matière aussi, puisque les produits générés peuvent remplacer des matières premières. Plusieurs voies existent, les plus importantes sont la pyrolyse-thermolyse, la dévulcanisation et la dégradation. [2]

IV- LES CARACTERISTIQUES DES PNEUS

IV-1-Définition du PUNR

Il convient de distinguer les pneus usagés (PU) et les pneus usagés non rechapables (PUNR). C'est ces derniers qui sont effectivement des déchets. En effet un pneu usagé et surtout celui du poids lourd, peut avoir une deuxième voire une troisième vie après rechapage. Des traces de vieillissement, peuvent apparaître sur les PUNR telles que l'usure de la bande de roulement, des craquelures ou des fissures. [2]

IV-2-Principaux constituants d'un pneu

Si on effectue une coupe, d'un pneumatique de type radial, dans le sens transversal Figure 4, sa complexité, par le nombre de constituants, apparaît avec beaucoup de netteté, on distingue alors

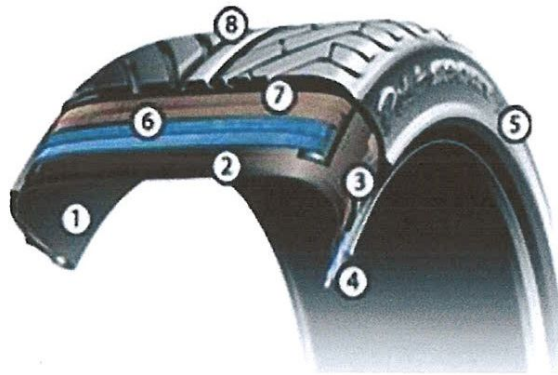


Figure 4 : Coupe transversale d'un pneu

Une feuille d'un caoutchouc synthétique

1-La nappe carcasse

2-Un bourrage zone basse

3-Les tringles

4-Les flancs

5-Les nappes sommets.

6-La bande de roulement.

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

Les caractéristiques des pneumatiques pour véhicule léger et poids lourds, sont présentées dans le tableau 1. Nous avons classé les pneus usagés en trois catégories.

Les pneus VL (Véhicules légers), les pneus PL (Poids lourds) et Autres. En plus de la différence en dimension entre les pneus VL et PL, la différence de structure est très importante, avec la présence de métal à un taux de 15 % et de 25 % respectivement.

Les pneus VL, équipent les véhicules de tourisme et camionnettes avec une moyenne de 4 pneus. Le type de pneus PL, équipe les camions, autocars et autobus, tracteurs routiers et les remorques. La moyenne est de 8 pneus pour les camions (un camion peut être équipé de 6 à 12 pneus selon le nombre de ponts), 6 pneus pour les autocars et autobus ainsi que les remorques et de 8 pneus pour les tracteurs routiers (un tracteur routier peut être équipé généralement de 6 à 10 pneus selon le nombre d'essieux). Les tracteurs agricoles, véhicules spéciaux et motos, sont équipés de type de pneu désigné par autres avec une moyenne de 2 pneus pour les motos et 4 pneus pour les véhicules spéciaux et tracteurs agricoles. [2]

Tableau 2 : Les caractéristiques du pneumatique

Caractéristique	(VL)	(PL)
Poid moyen	7kg	50kg
Densité moyenne	0.2 entier	0.4 déchiqueté
Diamètre intérieur	0.30m	0.55 à 0.66m
Diamètre extérieur	0.60m	1.10 à 1.20m
Nombre de pneus/m ³	20m	3

IV-3- caractéristiques mécaniques des PUNR

Un pneu usé non rechapable conserve encore de nombreuses qualités, ce qui en fait une véritable matière première. Mécaniquement, les armatures du pneu doivent être souples pour lui donner une bonne déformabilité.

Elles doivent par ailleurs supporter des efforts de traction importants et posséder une bonne adhérence avec le matériau de remblai.

Des essais mécaniques ont été effectués par des chercheurs dans le domaine du Pneusol sur une presse munie d'un enregistreur d'efforts de traction en fonction de la déformation sur des pneus usagés. A noter que toutes les marques de pneus, ont été testées, les résultats

obtenus sont les suivants :

La valeur moyenne de la résistance à la traction des bandes de roulement est de 65 kN, avec un écart type de 24 kN. La probabilité pour que toutes les bandes de roulement, aient une résistance supérieure à 26 kN est de 90 %. Elle n'est que de 80 % pour une résistance supérieure à 36 kN. Il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux flancs d'un même pneu. Les résistances des flancs varient de 17 à 25 kN, selon le taux d'armatures, avec un écart type de 10 kN. [2]

IV-4- critères de durée de service des punr

Les résultats des travaux de recherches, publiés par de très nombreux chercheurs, ont montré la complexité du phénomène de vieillissement du caoutchouc de pneumatique. Il apparaît que les paramètres influençant cette détérioration, sont nombreux, mais que finalement leurs actions restent négligeables. On peut néanmoins, en dénombrer quatre très importants. [2]

La lumière et la chaleur

(les rayons Ultra-Violets) ont pour effet de provoquer une décomposition superficielle qui se manifeste par un dessèchement du caoutchouc avec apparition de craquelures plus ou moins profondes. Un tel problème ne se pose pas si le pneumatique est complètement enterré car il serait totalement à l'abri de la lumière. En plus, dans un remblai, la température moyenne en profondeur varie dans une fourchette relativement étroite (3 à 4°C) suivant la teneur en eau du matériau. Près de la surface du sol, elle est beaucoup influencée par les variations saisonnières. Il reste néanmoins, que la température la plus grande qui serait de l'ordre de 15°C, est beaucoup plus faible que celle subie par le pneu lors de son utilisation. [2]

a-l'ozone

le caoutchouc est influencé par l'ozone, mais la présence de ce dernier est faible voire négligeable dans le sol.

b-l'acidité du sol

on sait qu'un acide fort (PH de l'ordre de 1) détruit le caoutchouc. Or pour l'eau extraite des remblais, le PH est généralement de l'ordre de 4 à 5, ce qui montre qu'en général les sols naturels sont relativement peu acides.

c-l'eau

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 par les Allemands pendant la seconde guerre mondiale. Quarante-deux ans après, toutes les armatures sont absolument intactes. Leurs caractéristiques mécaniques n'ont pas changé, seule la teneur en eau du caoutchouc, a légèrement changé en quelques points des pneus.

V-PRINCIPALES UTILISATIONS

Les pneus recyclés peuvent servir à toutes sortes de choses, comme le montre la liste des usages que l'on peut faire des vieux pneus récupérés et retraités :

V-1-surfaces pour la pratique des sports fabriquées à partir de pneus recyclés

- Terrains de jeux de maternelles et aires de loisir
- Aires scolaires de pratique des sports
- Pistes d'athlétisme
- Terrains de tennis et de basket-ball
- Aires de départ pour le golf
- Ceintures de piscine et allées de jardin
- Verts pour jeu de boules
- Surfaces de quais antidérapantes pour bateaux

V-2-industrie automobile fabriqués à partir de pneus recyclés

- Pare-chocs
- Matériaux de scellement et d'antirouille pour carrosseries d'auto
- Garde-boues et défenses
- Tapis pour autos et camions
- Garnitures de plancher pour camions et fourgonnettes
- Matériaux d'arrimage pour l'expédition
- Le rechapage

V-3-constructions sont fabriqués à partir de pneus recyclés

- Planchers d'hôpitaux, d'usines et de salles de bains
- Carreaux de sol
- Thibaudes (« sous-tapis »)
- Composés étanches à l'eau pour toitures et murs
- Imperméabilisation des fondations
- Garnitures pour barrages, silos et toitures

V-4-les applications géotechniques à l'asphalte sont fabriqués à partir de pneus recyclés

- Asphalte caoutchouté pour routes et allées de garage
 - Fondations pour pistes de course de chevaux
 - Drainage souterrain
 - Conduits d'évacuation
 - Conditionneurs de sol
 - Agent filtrant pour le mercure et les surfaces métalliques
 - Tuyaux d'irrigation poreux
 - Construction et réparation de routes
 - Enrobé d'assise
- meilleure répartition des efforts dus au trafic
- protection thermique du sol à basse température
- Enrobé de roulement
- drainage et protection de la chaussée
- plus d'adhérence
- moins de bruit lié au roulement des pneus (± 8 db)

V-5-adhésifs et produits de scellement fabriqués à partir de pneus recyclés

- Adhésifs et mastic d'étanchéité
- Peintures texturées et antidérapantes
- Ingrédient de mélange (mastic) pour moulures et profilés en caoutchouc
- Composés pour la réparation des courroies de convoyeurs
- Composés de joints de dilatation
- Enduits et matériaux d'étanchéité à l'eau pour toitures

V-6-les produits d'amortissement et de sécurité fabriqués à partir de pneus recyclés

- Tampons amortisseurs pour voies ferrées et machineries
- Murs de son pour routes
- Glissières de sécurité
- Garnitures d'abrasion dans l'équipement d'exploitation minière

V-7-les produits de caoutchouc et de plastique fabriqués à partir de pneus recyclés

- Isolant et garniture de tuyau
- Plinthes et plaques de protection

CONCLUSION

Le nombre de pneus usés est en augmentation, chaque année, par le simple fait de l'augmentation du parc automobile. Par l'instauration de la loi relative à la gestion des déchets, l'élimination écologique des déchets spéciaux est devenue obligatoire.

En Algérie, la valorisation des déchets pneumatiques, en génie civil, semble être la principale filière consommatrice des pneus usagés. Matériaux non biodégradables et non toxiques, une fois enterrés, les pneus usés associés au sol, peuvent solutionner plusieurs problèmes rencontrés par l'ingénieur en génie civil. La technique Pneusol peut s'avérer plus rentable que d'autres filières de valorisation, partant du fait qu'elle ne nécessite aucun matériel spécifique ni main d'œuvre qualifiée.

CHAPITRE 3

Formulation des composites cimentaires a base de granulats de Caoutchouc

I-PROCEDURE D'OBTENTION DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC

I-1-Obtention des granulats a partir de pneus de caoutchouc

Les mortiers et bétons à base cimentaire, matériaux de construction par excellence présentent une faible résistance à la traction ainsi qu'une faible capacité de déformation. Ils sont fragiles et très sensibles à la fissuration, notamment la fissuration de retrait qui affecte particulièrement les éléments à grande surface. En s'appuyant sur la plus simple et ancienne technique qui consiste à forer un trou à la pointe d'une fissure pour ralentir sa propagation dans les métaux, les auteurs montrent les avantages et inconvénients de l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un béton. Le support expérimental est un Béton Auto Plaçant (BAP).

Au delà des applications dans lesquelles la résistance à la fissuration due à une déformation imposée est une priorité, le faible module d'élasticité du BAP incorporant des granulats en caoutchouc constitue un atout dans la technique de renforcement de sol par les Colonnes à Module Contrôlé. Il s'agit aussi d'une nouvelle voie de valorisation des pneus usagés non réutilisables.[5]

I-2-Programme expérimental (Anacleto Turatsinze et Mathieu Garros)

I-2-1-Les matériaux

Les inclusions en caoutchouc utilisées sont obtenues par broyage de pneus usagés non réutilisables et la dimension du grain est comprise entre 4 et 10 mm. Ils ont une densité de 1.2 et la mesure de leur coefficient d'absorption d'eau a conduit à une valeur négligeable.

Comme liant, nous avons utilisé un ciment Portland de type CEM I 52.5 R. Pour limiter le dosage en ciment, sachant que le volume de pâte requis dans un BAP est toujours plus important en comparaison avec un béton classique vibré, nous avons utilisé un complément en filler calcaire comme addition minérale.

Un sable (0-4 mm) et un gravier (4-10 mm) siliceux et roulés de Garonne, ainsi qu'un gravier siliceux concassé (10-14 mm) ont aussi été utilisés comme granulats. Ils ont une densité de 2.6 et sont caractérisés par des coefficients d'absorption d'eau de 1.9, 1.1 et 0.9 % respectivement. Pour atteindre les propriétés d'un BAP à l'état frais, après une longue campagne d'essais, trois adjuvants ont été retenus.

*Un superplastifiant à base de diéther polycarboxylique (Glenium 27) qui a pour rôle d'améliorer le pouvoir dispersant sur le ciment lorsqu'une grande ouvrabilité est requise, ceci grâce à sa structure chimique qui agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique.

*Un agent de viscosité à base de polymères synthétiques à haut poids moléculaire (Rheomac 890 F) qui agit sur la texture de la pâte de ciment permettant une meilleure cohésion du mélange en garantissant un équilibre entre fluidité et résistance à la ségrégation. Le rôle de cet adjuvant a une importance capitale car il permet de piéger les granulats en caoutchouc pour les maintenir dispersés dans le mélange, alors que compte tenu de leur faible densité, ils ont une fâcheuse tendance à remonter en surface.

*Un entraîneur d'air (Micro-air 200 dilué) qui contribue aussi à diminuer la ségrégation et le stressage. [5]

I-2-2-Compositions

Dans le programme, les granulats en caoutchouc sont utilisés en remplacement volumique partiel des granulats naturels de classe 0-4 mm ou de classe 4-10. Seuls les résultats issus de ce dernier seront présentés dans cette contribution. Un BAP de référence (sans granulats en caoutchouc) ainsi que 4 formulations de BAP incorporant des granulats en caoutchouc ont été confrontés. Pour faciliter la lecture, les compositions seront identifiées par le taux de substitution des granulats naturels par des granulats en caoutchouc. A titre d'exemple un

BAP15C identifie la composition dont 15% du volume absolu du squelette granulaire est rempli par des granulats en caoutchouc. Pour toutes les compositions un rapport pondéral eau-liant de 0.4 a été maintenu.

Après une campagne de formulation visant les propriétés rhéologiques du BAP à l'état frais notamment en ajustant le dosage des adjuvants pour éviter la ségrégation et le ressuage qui sont récurrents en présence de granulats en caoutchouc, les compositions regroupées dans le tableau 3 ont été qualifiées de BAP et retenues dans la suite de l'étude. On remarquera que pour limiter le nombre de variables et faciliter la lecture des effets de l'incorporation des granulats en caoutchouc, seul le dosage du superplastifiant a été ajusté. [5]

Tableau 3- Compositions des BAP retenues

	BAP0C	BAP10C	BAP15C	BAP20C	BAP25C
Matériau	Quantité (kg/m³)				
Ciment	350.0				
Filler calcaire	120.1				
Sable (0-4 mm)	833.2				
Gravier (4-10 mm)	468.3	299.7	210.7	132.6	46.8
Granulats en caoutchouc (4-10 mm)	0	76.0	116.2	152.1	355.8
Gravier (10-14 mm)	355.8				
Superplastifiant	3.90	4.80	5.20	5.80	6.80
Agent de viscosité	1.20				
Entraîneur d'air	0.46				
Eau/Liant	0.40				

I-2-3-Préparation des échantillons

Pour fabriquer les BAP, nous avons utilisé un malaxeur de 100 litres de capacité. S'agissant de la séquence de malaxage, les composants solides sont d'abord introduits et malaxés pendant 30 secondes. Ensuite l'eau est mélangée avec un tiers du superplastifiant puis introduite. Après 90 minutes supplémentaires de malaxage, sont successivement introduits, le reste du superplastifiant, l'agent de viscosité et l'entraîneur d'air puis le malaxage se poursuit encore pendant 210 secondes.

Après les tests de caractérisation du matériau à l'état frais, ce dernier est coulé sans vibration dans des moules de différentes formes et dimensions en fonction des essais projetés.[5]

I-2-4-Essais réalisés

Les premiers essais ont eu pour objectif la caractérisation de la rhéologie du composite à l'état frais :

trois caractéristiques (a-c) spécifiques au BAP conformément aux recommandations de l'association Française de génie civil (AFPC-AFREM, 1997) ainsi que deux essais (d-e) classiques pour tout type de bétons.

- a. La mobilité en milieu non confiné qui traduit l'habileté du BAP à l'écoulement dans les dalles horizontales armées ou non armées. Elle sera quantifiée par un étalement (en mm).
- b. La mobilité en milieu confiné qui caractérise l'aptitude à l'écoulement sans vibration dans les coffrages ou dans les tuyaux de pompage. Elle sera quantifiée par un gradient de remplissage h (en mm).
- c. La stabilité au repos qui conditionne la non ségrégation dans les phases précédant la prise. Elle sera quantifiée par un taux de ségrégation au tamis (en %).
- d. La teneur en air occlus.
- e. La masse volumique.

A l'état durci, les composites ont été testés pour mesurer la résistance en compression, le module d'élasticité ainsi que pour évaluer la capacité de déformation en traction par flexion. La masse volumique ainsi que la porosité ont aussi été mesurées.

Pour chaque formulation, six éprouvettes cylindriques de 110 mm de diamètre et 220 mm de hauteur ainsi que trois éprouvettes prismatiques (100 × 100 × 500 mm) ont été confectionnées. Elles ont ensuite été conservées dans une ambiance contrôlée (à 20°C et une humidité relative de 100%). Trois cylindres ont été utilisés pour déterminer la résistance en compression et deux autres pour le module d'élasticité à 28 jours. Ces essais ont été réalisés conformément à la norme NF EN 12390-3 et aux recommandations de la RILEM (RILEM CPC8, 1972) respectivement. La sixième éprouvette cylindrique a été utilisée pour déterminer la masse volumique et la porosité conformément aux recommandations de l'AFPC-AFREM [5].

Des essais de traction par flexion ont aussi été réalisés suivant la configuration de la figure 5. Ces essais ont été aussi menés après 28 jours de cure (mêmes conditions que les éprouvettes

destinées aux essais de compression) grâce à une presse de 50 kN de capacité. La flèche vraie qui correspond au déplacement du point central de la fibre supérieure a été mesurée par un capteur de déplacement de type LVDT, de course 1 mm, supporté par une barre de référence elle-même reposant sur deux pointeaux solidaires de l'éprouvette à mi-hauteur et au droit des appuis. Ces essais sont asservis à la flèche à une vitesse de 10 μm par minute.

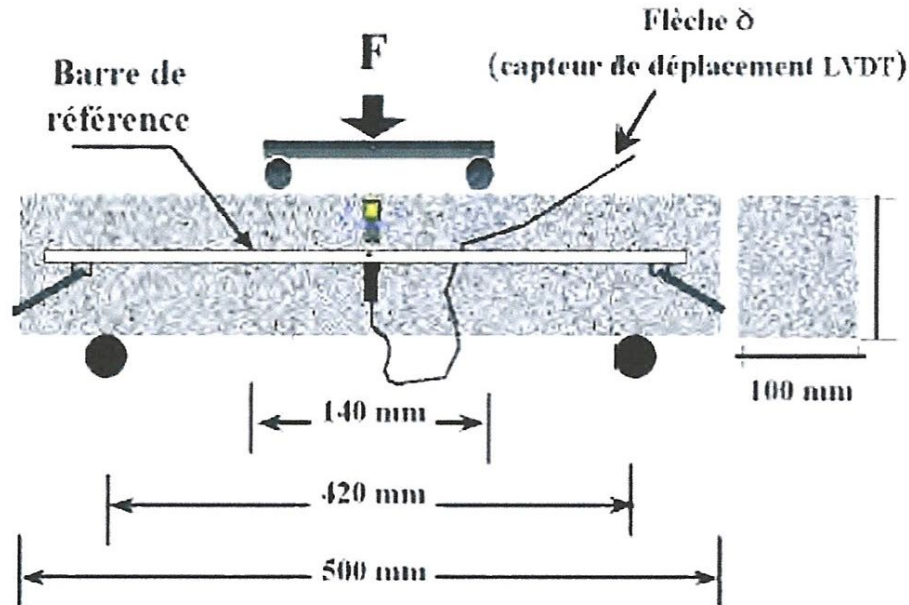


Figure 5 : Essais de flexion quatre point, configuration expérimentale

Les courbes Force – Flèche permettent de caractériser le composite par une capacité portante maximale F_{max} , ainsi que par une flèche F_{max} associée à ce pic de charge. Même si des travaux antérieurs ont permis de montrer, par des observations au microscope électronique à balayage, que dans une telle configuration la propagation des premières microfissures a bien lieu dans la phase ascendante de la courbe, à environ 60% du pic de charge, la coalescence des microfissures préalable à la localisation de la macrofissuration n'intervient pas avant de basculer dans le domaine post pic (Turatsinze et al., [5], Bascoul et al., [5]). Dans ces conditions, la flèche F_{max} correspondant au pic de charge F_{max} est un indicateur pertinent pour quantifier la capacité de déformation (Turatsinze et al. [5]). Nous avons complété cette caractérisation en calculant la rigidité K des composites en flexion quatre points. Cette rigidité correspond à la pente initiale dans la phase ascendante linéaire de chaque courbe Force-Flèche. [5]

I-2-5-Résultats et discussions

a- Propriétés des matériaux à l'état frais

L'étalement, le gradient de remplissage, le taux de ségrégation, la teneur en air occlus ainsi que la masse volumique des matériaux à l'état frais sont récapitulés dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Propriétés à l'état frais du BAP de référence et effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc

	BAP0C	BAP10C	BAP15C	BAP20C	BAP25C
Étalement (mm)	640	630	625	620	620
Gradient de remplissage (mm)	5	6	6	6	6
Taux de ségrégation (%)	4.9	5.6	6.3	5.9	6.1
Teneur en air occlus (%)	3.1	4.6	6.2	7.2	8.7
Masse volumique (kg/m ³)	2226	2143	2074	2014	1986

Avec un étalement supérieur à 600 mm, un gradient de remplissage h inférieur à 15 mm et un taux de ségrégation inférieur à 15%, la première partie du tableau 4 ci-dessus montre que les 5 compositions satisfont aux conditions requises pour être qualifiées de BAP.

Cependant l'analyse des résultats montre que l'adjonction de granulats en caoutchouc se fait au détriment des propriétés à l'état frais. En effet, le croisement des tableaux 4 et 5 démontre que lorsque le taux d'incorporation des granulats en caoutchouc augmente, il devient nécessaire d'accroître le dosage en superplastifiant pour maintenir un étalement requis.

Tableau 5: Dosage en superplastifiant pour maintenir un étalement de 630 mm +/- 30 mm pour des taux d'incorporation des granulats en caoutchouc variables

	BAP0C	BAP10C	BAP15C	BAP20C	BAP25C
Super plastifiant (kg/m ³)	3.50	7.45	8.26	8.96	9.32
Étalement ? (mm)	640	630	625	620	620

Cette constatation vient confirmer les résultats obtenus par Senouci et al. [5], à propos de l'influence des granulats en caoutchouc sur l'ouvrabilité des bétons vibrés. Les auteurs ont

expliqué cet effet en considérant que les granulats en caoutchouc constituent une structure auto-bloquant et donc résistante à l'écoulement. Pour RedaTaha et al.[5], la chute de l'ouvrabilité avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats en caoutchouc peut être attribuée à une friction plus élevée entre ce type de granulats et la pâte.

L'influence des granulats en caoutchouc sur la teneur en air occlus est illustrée sur la figure 6.

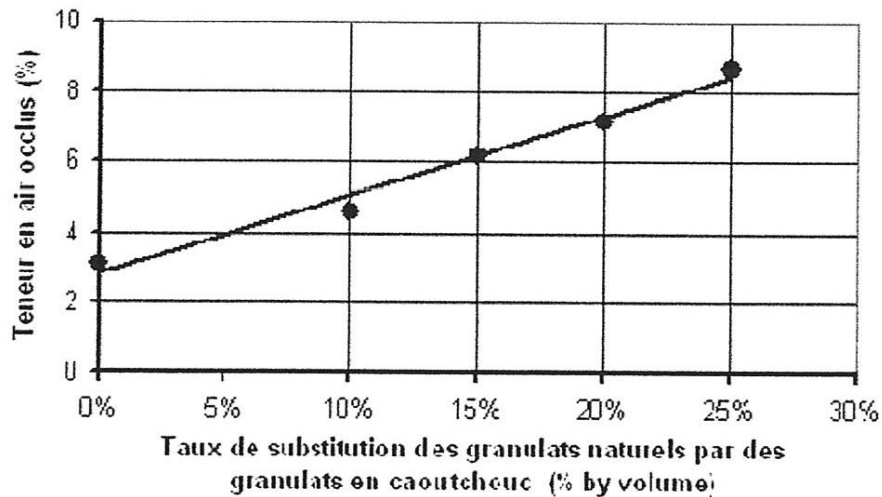


Figure 6: Teneur en air occlus en fonction du taux d'incorporation des granulats en caoutchouc.

Par comparaison avec le BAP de référence, on observe une augmentation de la teneur en air occlus de 48, 100, 132 et 181 % pour les BAP incorporant 10, 15, 20, et 25 % de granulats en caoutchouc, une évolution quasi linéaire. RedaTaha et al. [5] considère cette teneur en air occlus élevée comme une conséquence de la surface des granulats en caoutchouc qui est plus rugueuse. Pour ce qui nous concerne, nous pensons que c'est la nature hydrophobe du caoutchouc qui contribue à brasser de l'air pendant la phase de malaxage.

Pour ce qui est de la masse volumique, les BAP incorporant des granulats en caoutchouc, en fonction du taux de substitution, peuvent être classés parmi les bétons légers. La différence entre la densité des agrégats naturels (2.6) et celle du caoutchouc utilisé (1.2) se suffit pour expliquer les tendances observées. Quantitativement, il est nécessaire d'intégrer la différence de teneur en air occlus d'une composition à l'autre pour retrouver le compte.[5]

b-Propriétés à l'état durci

La porosité et la masse volumique des différentes compositions après 28 jours de cure sont indiquées dans tableau 6

Tableau 6 : Porosité et masse volumique des BAP – effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc

	BAP0C	BAP10C	BAP15C	BAP20C	BAP25C
Porosité(%)	13.02	14.12	15.34	16.03	17.42
Masse volumique (kg/m3)	2296	2052	2008	1973	1927

Les résultats montrent clairement une corrélation entre la porosité et le taux d'incorporation de granulats en caoutchouc. A titre d'exemple, un taux de substitution de 25% induit une augmentation de la porosité de 30% environ. Il s'agit d'une conséquence directe de la teneur en air occlus discutée dans la section précédente. Il est aussi inutile de revenir sur la variation de la masse volumique, les mêmes causes produisant les mêmes effets.[5]

c-Propriétés mécaniques

c-1-Essais de compression simple

La variation de la résistance en compression simple en fonction du taux de substitution est représentée à la figure 7 où chaque point est une moyenne sur trois essais.

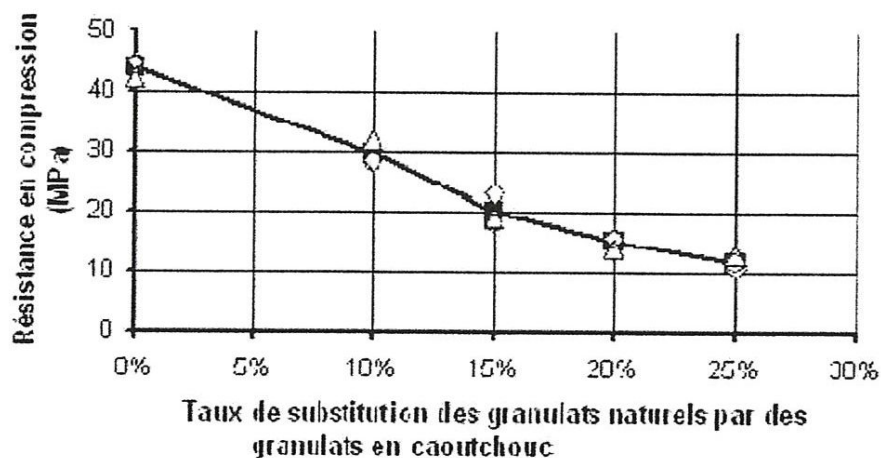


Figure 7 : Effet de l'incorporation des granulats en caoutchouc sur la résistance en compression

La figure 7 montre une chute drastique de la résistance en compression lorsque le taux d'incorporation des granulats en caoutchouc augmente. Si on prend comme repère le BAP de référence, la résistance à 28 jours diminue de 33, 54, 65 et 73 % pour les BAP incorporant 10,

15, 20 et 25 % de granulats encaoutchouc respectivement. On trouve ici la justification du taux maximum de 25 % utilisé dans cette étude.

L'effet préjudiciable des granulats en caoutchouc vis à vis de la résistance en compression a été largement discuté dans des contributions précédentes par Turatsinze et al. [5] dans le cas d'un mortier à base de ciment. On rappellera tout simplement qu'il est largement connu que la résistance en compression du béton dépend aussi de la rigidité des granulats utilisés. D'autres facteurs rentrent aussi en jeu et on peut citer le défaut d'adhérence manifeste entre le caoutchouc et la matrice cimentaire ainsi que la porosité élevée en présence de granulats en caoutchouc. Signalons aussi le coefficient de Poisson du caoutchouc très élevé (0.5) par rapport à celui de la matrice qui est plutôt de l'ordre de 0.2. Nous pensons que cette différence est à l'origine d'une fissuration prématurée lorsque les composites incorporant des granulats encaoutchouc sont soumis à un chargement extérieur.

La variation du module d'élasticité en fonction du taux de substitution des granulats naturels par des granulats en caoutchouc est illustrée par la figure 8.

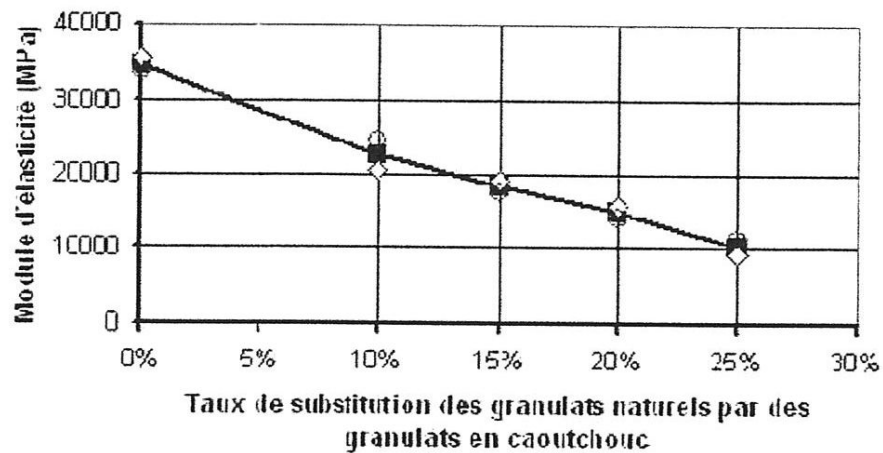


Figure 8 : Effet de l'incorporation des granulats en caoutchouc sur le module d'élasticité en compression

La chute du module d'élasticité s'explique aussi par une des lois établies depuis plusieurs décennies à adapter au cas particulier de granulats en caoutchouc. En effet la dépendance entre le module d'élasticité du béton et celui des granulats naturels utilisés ainsi que de leur proportion volumique dans le composite a été bien démontrée et largement décrite par Hobbs[5].

Par ailleurs, si on considère les relations empiriques permettant de prédire le module d'élasticité à partir de la résistance en compression, qualitativement l'allure de la figure 7 permet de prédire celle de la figure 8. Dès lors, il apparaît très clair que l'utilisation de

granulats en caoutchouc est un moyen efficace pour contrôler le module d'élasticité d'un BAP et c'est sur cette base que l'utilisation des granulats en caoutchouc est pertinente dans l'application Colonne à Module Contrôlé.

La figure 9 permet de confronter les modules d'élasticité obtenus expérimentalement et ceux prévus par la relation ci-dessus. S'il apparaît une bonne concordance pour le BAP de référence, il est aussi clair que les BAP incorporant des granulats en caoutchouc échappent aux lois qui gouvernent la rhéologie des bétons.

En effet, la figure 9 montre qu'à même résistance en compression un BAP incorporant des granulats en caoutchouc a un module d'élasticité inférieur à celui qui est normalement prévu.

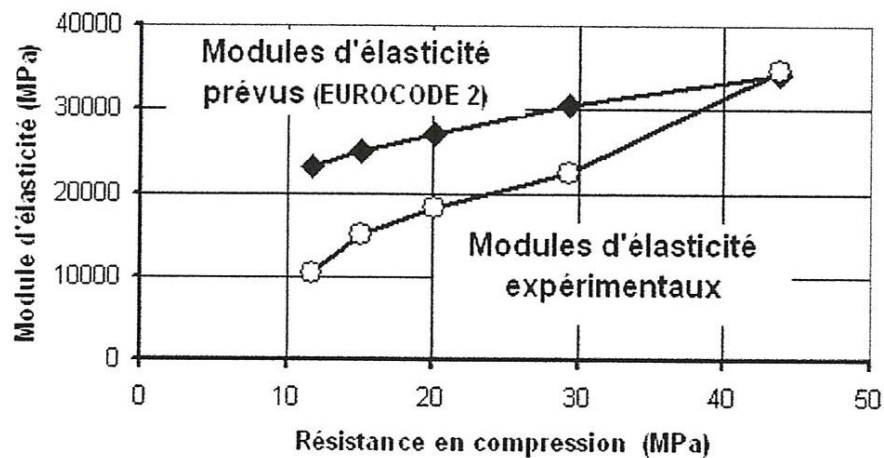


Figure 9 : Module d'élasticité en fonction de la résistance en compression.

Dans tous les cas, cette étude a permis de démontrer que l'incorporation de granulats en caoutchouc est un moyen efficace pour répondre au cahier des charges des Colonnes à Module Contrôlé. La présence de ces inclusions déformables permet de réduire le module d'élasticité pour le ramener dans les bornes préconisées dans cette application (entre 50 et 12000 MPa) en maintenant largement une résistance en compression supérieure à 1 MPa, le minimum requis.[5]

c-2 -Essais de flexion quatre points

De la synthèse des résultats présentés dans les sections précédentes, on est tenté de ne retenir que des effets préjudiciables des granulats en caoutchouc sur les propriétés mécaniques des BAP.

Cependant, comme formulé dans notre hypothèse de travail, il est aussi attendu de ces granulats un effet similaire à celui d'un forage en pointe d'une fissure ainsi que des conséquences qui en découlent en terme de relaxation des contraintes et de cinétique de la

fissuration. Pour valider cette hypothèse, nous avons réalisé des essais de traction par flexion quatre points conformément à la configuration. Pour faciliter la lecture, seules les courbes Force – Flèche de trois compositions (BAP0C, AP15C et BAP25C) sont illustrées par la figure 10.

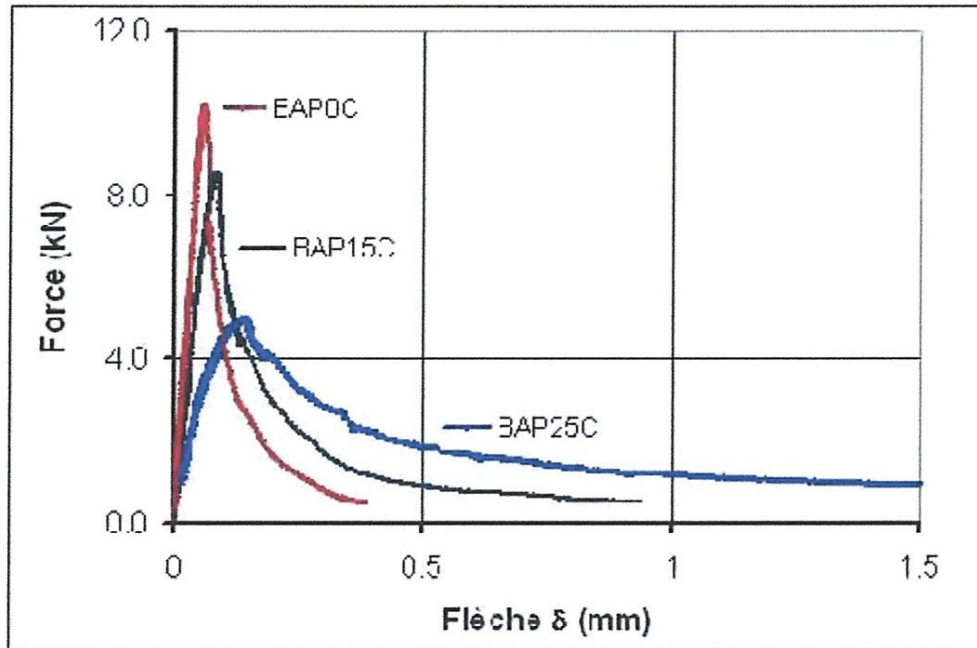


Figure 10 : Courbe Force – Flèche en flexion quatre points – effet de l’incorporation de granulats en caoutchouc

Pour mettre en exergue l’effet des granulats en caoutchouc sur la capacité de déformation, nous avons représenté la force normalisée (F/F_{max}) en fonction de la flèche. Les courbes ainsi obtenues sont illustrées à la figure 11.

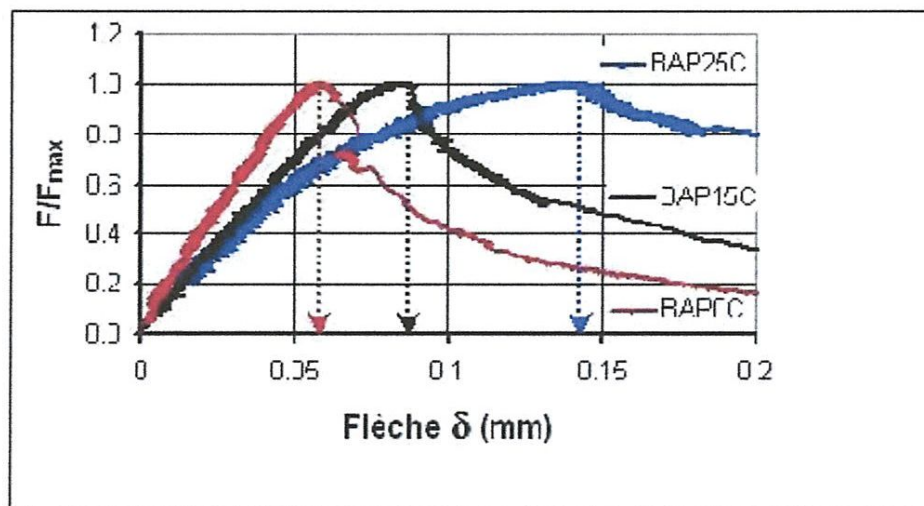


Figure 11 : Force normalisée en fonction de la Flèche – effet des granulats en caoutchouc sur la capacité de déformation

La capacité portante maximale et la capacité de déformation ainsi que la rigidité sont répertoriées dans le tableau 7.

Tableau 7: Capacité Portante, capacité de déformation et rigidité en flexion quatre points (moyenne sur trois essais)

	Bap0C	BAP15C	BAP25C
F_{MAX} (kn)	9.1	8.0	5.3
A_{Fmax} (mm)	0.06	0.08	0.12
$K= aF/$ (kn/mm)	220	114	69

Il apparaît clairement que la capacité de déformation diminue avec le taux d'incorporation des granulats en caoutchouc, un résultat guère surprenant car conforme à nos conclusions quant au comportement en compression.

Conformément à notre hypothèse de travail, ces résultats expérimentaux montrent qu'en présence de granulats en caoutchouc, l'éprouvette peut supporter une flèche nettement plus importante avant de rompre, l'incorporation de granulats en caoutchouc est incontestablement un moyen pour augmenter la capacité de déformation des matériaux à base cimentaire et en particulier des BAP. A titre d'exemple, par rapport au BAP de référence, un BAP incorporant 20% de granulats en caoutchouc offre une capacité de déformation deux fois plus élevée. On peut être tenté d'affirmer que la chute de la rigidité K permet d'expliquer cette amélioration de la capacité de déformation. En réalité cette chute de rigidité n'est pas suffisante comme explication car elle est systématiquement accompagnée d'une baisse de la capacité portante. On est donc obligé de tirer la seule conclusion qui s'impose : la présence de granulats en caoutchouc perturbe la cinétique de la fissuration et retarde la localisation de la fissuration au sens macroscopique du terme. C'est une propriété de premier ordre pour limiter la sensibilité à la fissuration de retrait, une fissuration à l'origine d'une pathologie qui limite la durabilité des applications, notamment celle des éléments à grande surface comme les chaussées et dallages en béton. [5]

c-3-Perspectives

Les propriétés spécifiques du caoutchouc et les lois des mélanges sont une invitation à attribuer aux composites cimentaires incorporant des granulats en caoutchouc des propriétés

physiques susceptibles de présenter un intérêt, notamment dans des applications antivibratoires (mécanique ou acoustique) ou thermique.

Des essais préliminaires ont été réalisés à l'aide d'un dispositif d'auscultation par ultrasons, constitué de transducteurs de 54 kHz. Le système d'émission-réception (générateur d'impulsion, mesure des temps de propagation de l'émetteur vers le récepteur) et les accessoires, notamment un oscilloscope pour visualiser le signal reçu, nous ont permis de mettre en évidence l'effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc sur la vitesse de propagation de l'onde et sur son atténuation par rapport au BAP de référence. Les essais ont été réalisés sur des cubes de 10 cm de côté découpés dans des prismes de dimension 10x10x50 cm.

Le dispositif expérimental est présenté à la figure 12 et les résultats obtenus sont illustrés par les figures 13 et 14. Ils montrent un intérêt qui reste à confirmer sur les bandes de fréquences fonction des applications ciblées.

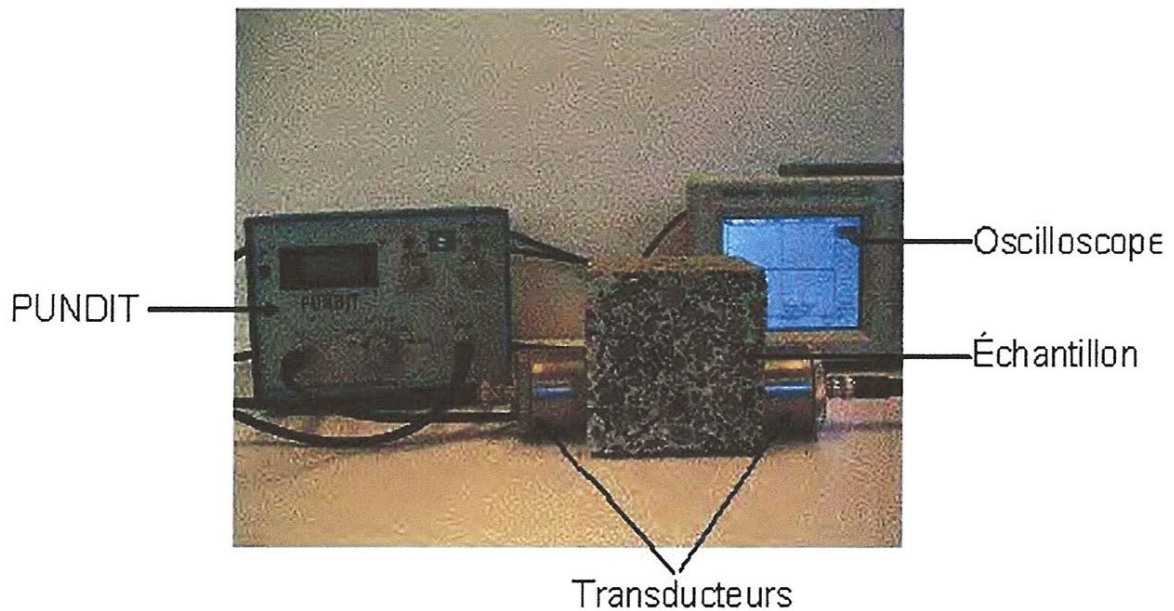


Figure 12 : Propagation des ondes ultrasonores dans les BAP - Montage expérimental

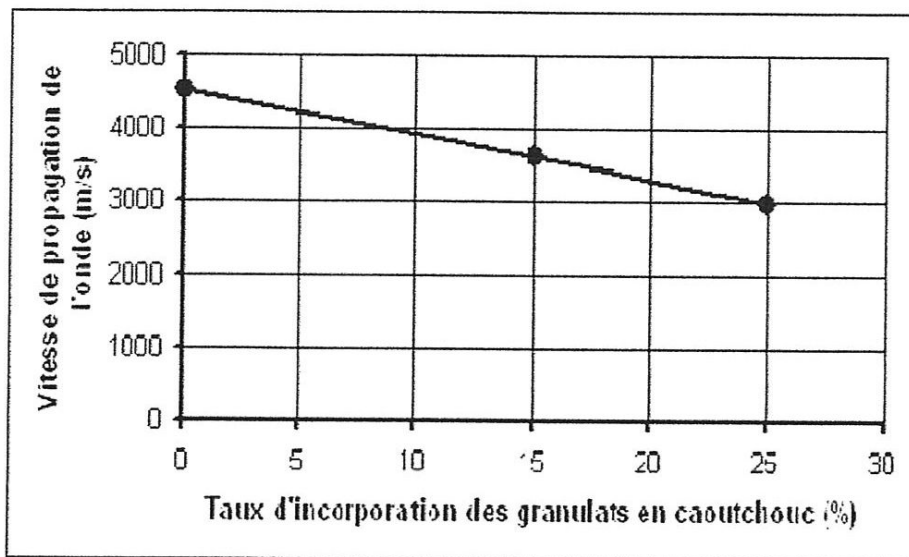


Figure 13 : Vitesse de propagation de l'onde en fonction du taux d'incorporation des granulats

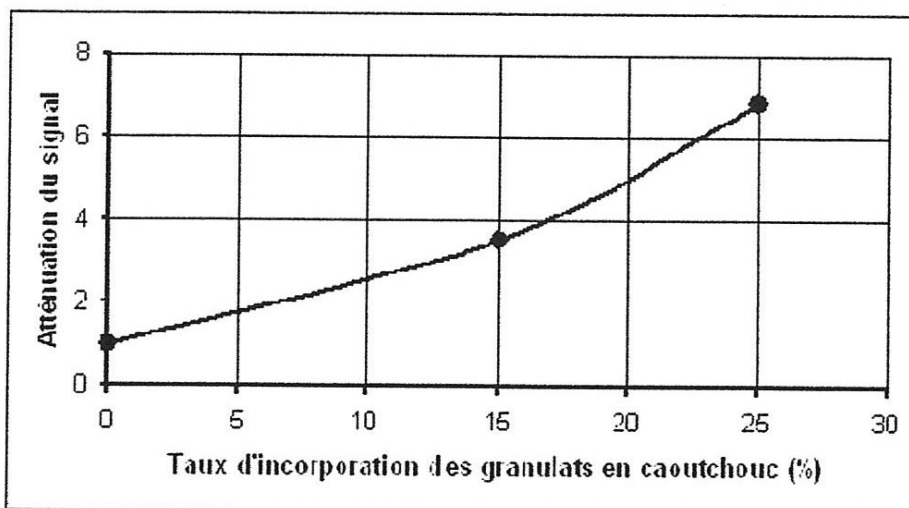


Figure 14 : Effet des granulats en caoutchouc sur l'atténuation de l'onde (par rapport au BAP de référence).

S'agissant des propriétés thermiques, l'éprouvette compatible avec le dispositif expérimental utilisé est un cylindre de 100 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur. Ces dimensions font craindre un effet d'échelle dans le cas des BAP étudiés pour lesquels la dimension du plus gros granulats est de 14 mm.

Nous avons donc décidé de réaliser des essais sur des éprouvettes en mortier (dimension du plus gros grain : 4 mm). Ces éprouvettes ont été extraites par carottage dans des dalles en mortier de dimension 840X840X50 mm fabriquées en 2003 dans le cadre de la thèse de BONNET [5] et depuis conservées hors d'eau au laboratoire. Nous avons mesuré la conductivité thermique en fonction du taux de substitution du sable par des granulats en caoutchouc (jusqu'à 80%) de même courbe granulométrique. Le résultat illustré par la figure 15 montre une baisse très significative de la conductivité thermique en fonction du taux d'incorporation de granulats en caoutchouc. C'est un volet qui mérite aussi d'être approfondi (matériau de remplissage pour isolation thermique).[5]

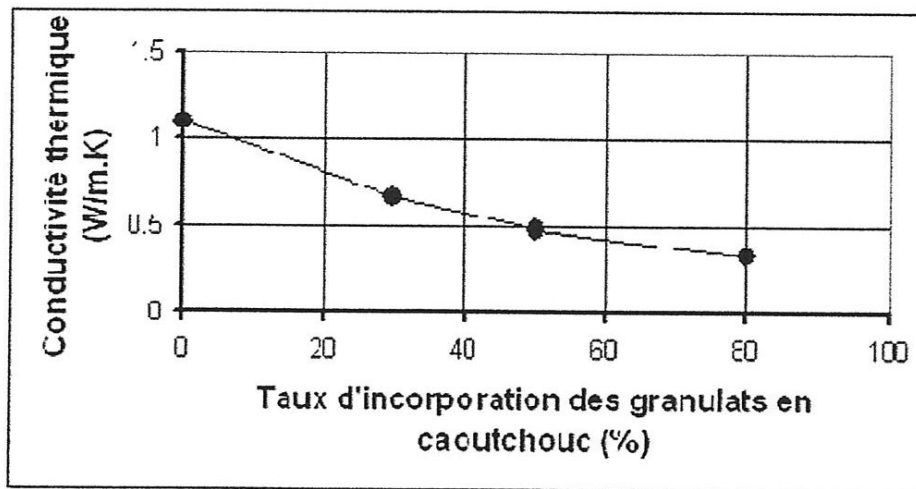


Figure 15 : Effet des granulats en caoutchouc sur la conductivité thermique d'un mortier à base de ciment .

I-2- Type de granulats de caoutchouc

Les granulats de pneus usagés non réutilisables (PUNR) sont obtenus par différents procédés de broyage de morceaux grossiers de pneumatiques. Leurs tailles se situent généralement entre 0,8 et 20 mm dans les différentes productions industrielles observées. Elles sont liées au

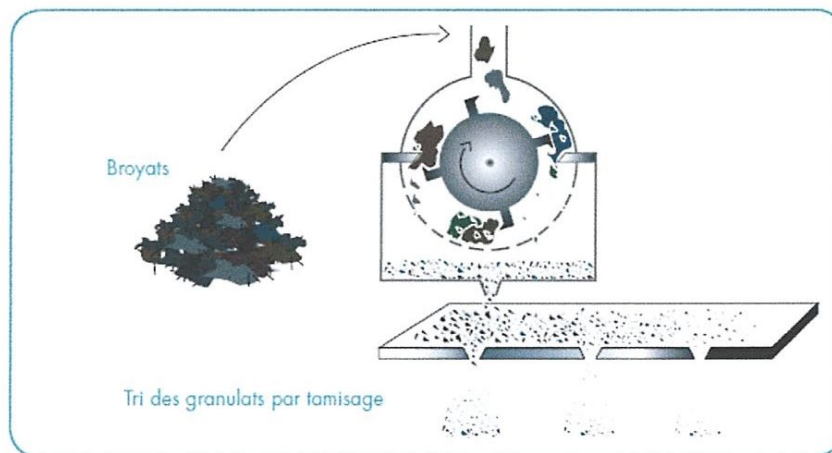
procédé utilisé par le granulateur. Par tamisages successifs, les principaux producteurs produisent a minima trois grands types de granulats :

de 0,5 à 2,5 mm pour être utilisés par exemple en sous-couche de gazons synthétiques ; de 1 à 4 mm notamment pour constituer les sous-couches amortissantes des aires de jeux ou des sols industriels ; de 2 à 8 mm pour entrer par exemple dans la composition de sols équestres ou de pistes d'athlétisme. Certains industriels produisent également de la « poudrette » comprise entre 0 et 1 mm. Cette dernière catégorie peut servir à produire des pièces moulées .

a- Poudrettes: lots de particules de pneus dont la taille est comprise entre 0 et 0,8 mm et débarrassées des fibres textiles et métalliques.

b-Granulats: lots de particules de pneus dont la taille est comprise entre 0,8 et 20 mm et débarrassées des fibres textiles et métalliques.

c-Tous les lots de particules au-dessus de 20 mm sont communément appelés des « broyats». Ils comportent en général des fibres textiles et métalliques.[7]





Les deux prototypes ont été installés en même temps sur le manège: le revêtement complexe en bordure de piste et le revêtement libre au centre

II-COMPOSITION DES COMPOSITES CIMENTAIRES

II-1-Composition du béton

La composition du béton dépend de la forme à réaliser et des traitements de surface envisagés. Les conditions environnementales d'utilisation sont également à considérer.

II-1-1-Choix des constituants

a -Les ciments

Utilisés peuvent être blancs ou gris, selon la teinte et l'effet de finition recherchés, les granulats et colorants utilisés. Ils sont conformes à la norme NF EN 197-1. Leur choix doit être adapté aux conditions d'environnement.

b-Les granulats

courants doivent satisfaire à la norme XP P 18-540. Le choix de leurs caractéristiques (roulés ou concassés, teinte, dimensions) est déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques. Pour les bétons polis, les granulats doivent avoir une texture et une porosité choisies en fonction du type de traitement (mat ou brillant) :

- granulats tendres (calcaires moyens et certains marbres) pour le polissage mat.
- granulats mi-durs (calcaires durs, marbres, granites, rhyolites) pour le polissage mat ou brillant.
- granulats durs (feldspaths, basaltes, granites, porphyres, silex et quartzites) pour le polissage brillant ; ceux-ci résistent très bien aux atmosphères agressives.



Extraits des carrières, les granulats sont stockés suivant leur classe granulaire. Ils offrent de grandes variétés de dimensions et de coloris.

c-L'eau de gâchage

Est conforme à la norme XP P 18-303. Elle est non polluée et contient une quantité limitée de sel dissous.

d-Les adjuvants

Incorporés au béton (plastifiants, entraîneurs d'air, hydrofuges de masse, etc.) permettent de faciliter sa mise en œuvre et d'améliorer, le cas échéant, sa durabilité. Ils sont pour la plupart

normalisés et certifiés NF. Les hydrofuges de masse permettent, en plus de leur fonction première, d'obtenir des teintes plus stables dans le temps.

e-Les pigments de coloration

Utilisés sont des oxydes métalliques naturels ou synthétiques, qui garantissent la grande stabilité de couleur dans le temps.

f-Fillers

Les fillers sont des matériaux obtenus par broyage ou pulvérisation de certaines roches : calcaires, kieselguhrs, bentonites. Ils ont une finesse comparable à celle du ciment.

g-Ultra fines

Les ultra fines sont des particules de très faibles dimensions qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10 p. 100 du poids de ciment, améliorent notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques. Les fumées de silice, ou microsílices, sont les plus utilisées ; ce sont des oxydes de silicium à structure amorphe en forme de microsphères de diamètre de l'ordre de 10 nm (1 nm = 10⁻⁹ m).

II-2- Composition des mortiers

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment; de l'eau; du sable; des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.

Les mortiers sont constitués par des mélanges de:

- liant (ciment ou chaux)
- eau
- sable
- adjuvants

a-Les liants

Généralement, on peut utiliser:

- les ciments normalisés (gris ou blanc).
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..)

- les liants à maçonner.
- les chaux hydrauliques naturelles.
- les chaux éteintes

b-Les sables

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide. Ils peuvent être:

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, . . .), de nature siliceuse ou silico-calcaire.
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- spéciaux (lourds, réfractaires, légers):
 - *sable de laitier.
 - *sable d'oxydes de fer, de chromite.
 - *corindon.
 - *sable de briques concassés;
 - *liège torréfié.
 - *polystyrène expansé.
 - *vermiculite, perlite.

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- extra-fins: jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire).
- fins: jusqu'à 1,6 mm.
- moyens: jusqu'à 3,15 mm.
- gros: jusqu'à 5 mm.

c-Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- les plastifiants (réducteurs d'eau).
- les entraîneurs d'air.
- les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs).
- les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

d-Les ajouts

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont:

- poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice..),fibres de différentes natures,colorants (naturels ou synthétiques),polymères.

CONCLUSION

Nous avons montré que l'incorporation de granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite un gain en capacité de déformation avant localisation de l'endommagement avec en contre partie, une chute importante des résistances en compression. Les résultats ont aussi montré que l'on peut cumuler les effets bénéfiques de l'incorporation des granulats caoutchouc et ceux d'un renfort par des fibres pour limiter la fragilité du composite.

CHAPITRE 4

Propriétés mécaniques, physiques des composites cimentaires élaborés avec les granulats de pneus usagés

I-INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'effet de l'adjonction de granulats en caoutchouc sur des propriétés du béton incorporant granulats de caoutchouc (BIGC) telles que les propriétés mécaniques : la réponse instantanée sous sollicitations mécaniques, les variations dimensionnelles de retrait et la sensibilité à la fissuration. Dans la mesure du possible l'influence de ces granulats sur quelques propriétés physiques sera aussi abordée.

Tout d'abord, nous caractériserons ces composites en compression. L'examen des résultats nous permettra de préciser l'impact du dosage des G.C. sur la résistance ainsi que sur le module d'élasticité en compression. Pour le comportement en traction, le programme sera complété par des essais de traction indirecte par fendage et par flexion. Les essais de flexion quatre-points ont été réalisés notamment pour évaluer la capacité de déformation maximale avant la localisation de la macrofissure ainsi que la résistance résiduelle post-fissuration.[3]

II- LES PROPRIETES MECANIQUES (M.HO ANH CUONG)

II-1- Evolution de la résistance en compression

II-1-1- Résultats et discussions

La composition des éprouvettes, le procédé de confection, le mode de conservation ainsi que les dispositions expérimentales pour déterminer la résistance en compression ont été présentés. La Figure 16 illustre l'influence des G.C. sur la résistance en compression (f_c) à 28 jours. Chaque valeur est une moyenne des résultats obtenus sur trois essais.

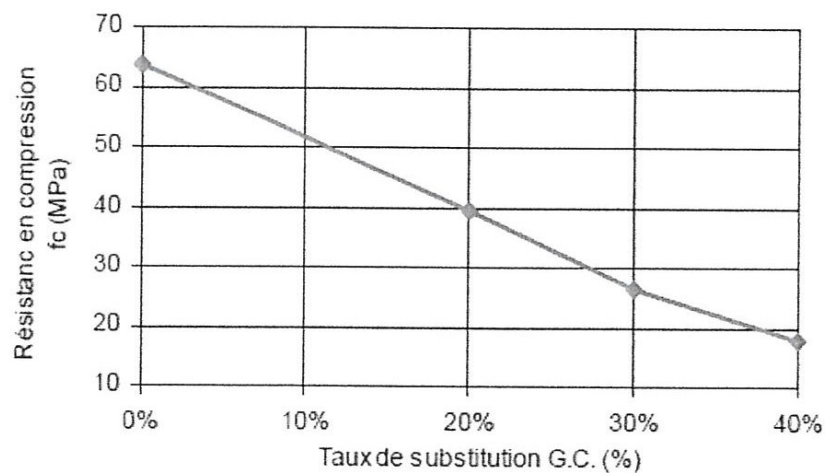


Figure 16 : Effet des G.C. sur la résistance en compression à 28 jours.

Les résultats indiquent clairement que l'incorporation de G.C. est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. A titre d'exemple, un taux de substitution en G.C. de 40% entraîne une chute de résistance de 72%, cette chute est de l'ordre de 38% pour un taux de 20% en G.C par rapport au béton de référence.

Pour expliquer la chute de résistance en compression, l'argument couramment avancé notamment par Li et al. [3] est la rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels.

La deuxième raison est inhérente aux défauts d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire ou à la mauvaise qualité de la zone de transition entre ces deux phases. Cet argument a été aussi avancé par Garros [3] qui montre que la zone de

transition entre la matrice et le granulat en caoutchouc est peu compacte et présente une porosité importante.

D'ailleurs, Lutz et al. [3] attribuent à cette zone un module d'élasticité beaucoup plus faible, 40% inférieur à celui de matrice cimentaire. Par conséquent, ces défauts d'adhérence constituent des points faibles d'où les fissures sous sollicitation mécanique pourront être initiées figure 17



Figure 17 : Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au vidéo-microscope,

II-1-2- Développement de la résistance en compression en fonction du temps

Nous avons évalué l'influence de la présence des G.C. sur le développement de la résistance en compression du béton en complétant les données par les résultats d'essais de compressions simple à l'âge de 3, 7 et 14 jours. Ils sont illustrés par la Figure 16 et le Tableau 8. Ils montrent que si cette cinétique du développement de la résistance en compression est affectée par la présence de G.C. la différenciation se produit essentiellement durant les premiers jours : en effet l'on peut constater que la différence de résistance en compression entre le béton de référence et le BIGC reste pratiquement constante à partir de 7 jours.[3]

Tableau 8 : Influence du dosage en G.C. sur le développement de la résistance en compression, D (%) est la dispersion des mesures.

Age (jour)	Résistance en Age compression (MPa)							
	B0GC	D (%)	B20GC	D (%)	B30GC	D (%)	B40GC	D (%)
3	43.1	9.1	24.4	2.2	18.5	4.3	14.5	3.3
7	53.5	2.4	27.8	2.1	20.7	2.8	15.8	1.4
14	57.1	1.9	29.9	1.2	24.3	2.8	17.2	3.4
28	63.7	0.9	39.4	7.7	26.3	1.8	17.9	7.3

II-2- Module d'élasticité en compression

II-2-1- Dispositif expérimental

Le module d'élasticité a été déterminé à l'âge de 28 jours à l'aide de la cage extensométrique illustrée sur la Figure 18 où les éprouvettes sont similaires avec celles utilisées pour la résistance en compression. Les avantages d'un tel outil ont été décrits par Boulay et Colson[3]. Dans cet objectif nous avons suivi les recommandations de la Rilem [3] qui préconisent de réaliser cinq cycles de charge et décharge, d'une amplitude égale à 30% de la charge de rupture Figure 18. Le module d'élasticité est alors calculé sur la dernière montée en charge (5ième cycle) d'après la formule suivante :

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_{a,n} - \varepsilon_{b,n}}$$

Où : σ_a : 30% de la résistance moyenne, σ_b : contrainte de base, (GPa) ;

$\varepsilon_{a,n}$ et $\varepsilon_{b,n}$: déformation mesurée pour les contraintes σ_a et σ_b pour le cycle n (n=5).[3]



Figure 18 : Cage extensométrique utilisée pour la détermination du module d'élasticité.

II-2-2- Résultats et discussions

Le module d'élasticité des différentes compositions est donné dans le Tableau 9. Son évolution en fonction du taux d'incorporation des G.C. est illustrée à la Figure 19. Chaque valeur correspond à une moyenne obtenue à partir de trois essais.

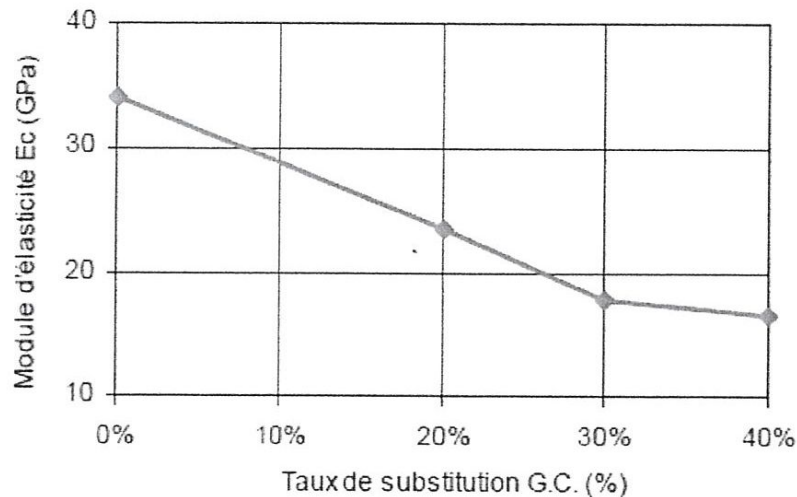


Figure 19 : Influence du dosage en G.C. sur le module d'élasticité à 28 jours.

Tableau 9 : Module d'élasticité à 28 jours en fonction du dosage en G.C.

Béton	B0GC	B20GC	B30GC	B40GC
Module d'élasticité (GPa)	34,1	23,5	17,8	16,7
Dispersion (%)	2,4	5,6	4,7	3,1

On peut constater que l'adjonction de G.C. induit une chute significative du module d'environ 51% pour un taux de substitution en G.C. de 40% et de l'ordre de 31% pour un taux de 20% par rapport à celui du béton de référence. Malgré l'importance de cette baisse, toute proportion gardée, elle est un peu limitée si on se réfère à celle qui est constatée sur la résistance à la compression précédemment présentée.

Les travaux assez anciens de Hobbs [3] permettent de justifier cette tendance par la faible rigidité des G.C. En effet, d'après cet auteur, le module d'élasticité d'un béton

dépend du module d'élasticité des granulats et de leur fraction volumique au sein du matériau. Par ailleurs, compte tenu de relations empiriques liant module d'élasticité et résistance à la compression, toutes les hypothèses émises pour justifier la chute de cette résistance sont aussi à verser sur le compte du module d'élasticité.[3]

II-3- Evolution de la résistance en traction

La résistance à la compression est une caractéristique mécanique de base d'un béton. Il s'agit d'un élément indispensable de sa carte d'identité. En général, il n'en est pas autant de sa résistance à la traction qui est souvent estimée à partir de la résistance en compression. Néanmoins on gardera en mémoire que dans des cas bien précis d'applications comme celles envisagées pour le composite cimentaire incorporant des G.C., la résistance à la traction devient aussi un élément important du dimensionnement qu'il convient de déterminer avec un grand soin.[3]

II-3-1- Dispositif expérimental

Les mêmes éprouvettes (118 mm de diamètre pour 236 mm de hauteur) que celles utilisées pour la résistance en compression et le module d'élasticité ont été utilisées dans un essai de traction par fendage. Un système d'appuis dédié et illustré sur la photographie de la Figure 20 intercalé entre les plateaux d'une presse permet de mener l'essai conformément à la norme [NF EN 12390-6, 01] et ceci à la vitesse de chargement de 0,05 MPa par seconde.[3]



Figure 20 : Eprouvette cylindrique reposant sur le support dédié après l'essai de traction indirecte par fendage.

La résistance en traction par fendage f_{ct} est alors calculée à partir de la relation suivante:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi LD}$$

Où :

F : est la charge maximale, en newtons ;

L : est la longueur de la ligne de contact de l'éprouvette, en millimètre ;

d : est le diamètre de l'éprouvette, en millimètre.

II-3-2- Résultats et discussions

Les résultats obtenus illustrés sur la Figure 21 et répertoriés dans le Tableau 10 montrent que la résistance en traction diminue avec le volume des G.C., une tendance logiquement attendue compte tenu des résultats précédemment présentés sur la résistance en compression.

Quantitativement, on peut noter que par rapport au béton de référence, un taux de substitution en G.C. de 40% entraîne une chute de 53% de résistance à la traction. Cette chute est de l'ordre de 27% pour un taux de 20%. [3]

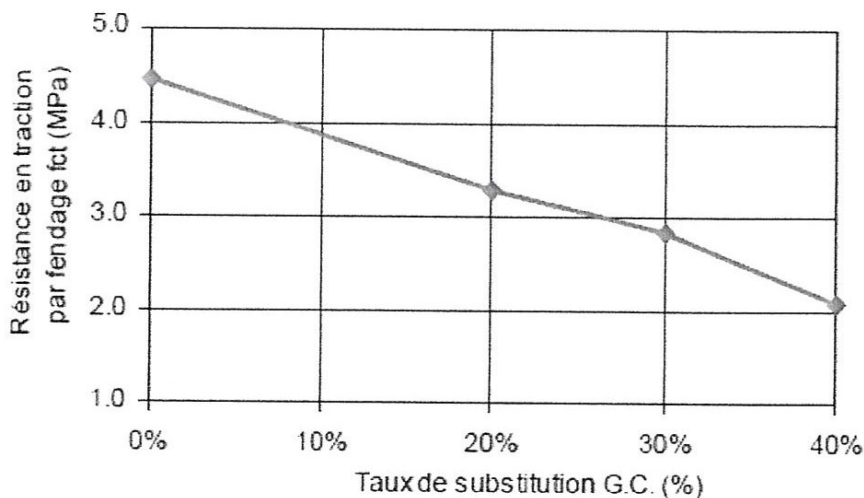


Figure 21: Influence du dosage en G.C. sur la f_{ct} à l'âge 28 jours.

Tableau 10 : Les résistances en traction par fendage à l'âge 28 jours des composites retenues.

Béton	B0GC	B20GC	B30GC	B40GC
Résistance en traction par fendage (MPa)	4,5	3,3	2,8	2,1
Dispersion	8,3%	8,1%	5,3%	7,8%

Les mêmes causes produisant les mêmes effets, les explications avancées pour justifier la chute de la résistance à la compression peuvent être reprises ici où, s'agissant de la traction, l'impact d'un défaut est plus visible. Garros [3] a proposé que la faiblesse de la zone de l'interface G.C.-matrice cimentaire (qui est estimée visuellement par l'observation des faciès de rupture des éprouvettes) est en grande partie responsable de la mauvaise résistance en traction du béton incorporant des granulats en caoutchouc.[3]

II-4- Comportement en flexion quatre - points

Les essais de traction par flexion sont généralement préférés aux essais de traction simple car ils sont plus aisés à réaliser avec un protocole expérimental plus souple. Par ailleurs, compte tenu du gradient de déformation le contrôle de la rupture est plus facile à réaliser. Dans cet essai, l'influence de la présence de granulat en caoutchouc sera recherchée dans la capacité maximale de déformation avant localisation de la microfissuration dénommée "capacité de déformation" et dans la capacité portante résiduelle post-fissuration.

Dans ce même but, nous avons confronté cette approche mécanique à l'approche énergétique en déterminant pour chaque composite un indice de fragilité BI (Brittleness Index). Enfin, la propagation d'une fissure dans le composite sera finement analysée par le biais d'une variable d'endommagement et par la technique d'émission acoustique.[3]

II-4-1- Dispositif expérimental

Les essais sont pratiqués sur des éprouvettes prismatiques de dimension 100x100x500 mm. Elles sont démoulées à 24 heures après la mise en place puis conservées dans une chambre à 20°C et à 100% d'humidité relative durant 27 jours.

Les essais de flexion sont réalisés suivant la norme [NF EN 12930-5, 01] grâce à une presse de 50 kN. Le dispositif expérimental est brièvement décrit par la Figure 22 et la Figure 22. Sous son poids propre, une barre de référence reposant sur deux supports fixés à mi-hauteur de l'éprouvette, au droit de chaque appui et sur laquelle est monté un capteur de déplacement (LVDT) de course maximale 2 mm permet de mesurer la flèche vraie de l'éprouvette. L'essai est asservi à cette flèche, à la vitesse de déplacement imposée de 0,05 mm/min. Afin d'accélérer l'essai cette vitesse est portée à 0,5 mm/min une fois le pic de charge passé. Les résultats bruts de l'essai, la force et la flèche, sont enregistrées par un système d'acquisition de données à raison d'un point par 0,1 seconde.[3]

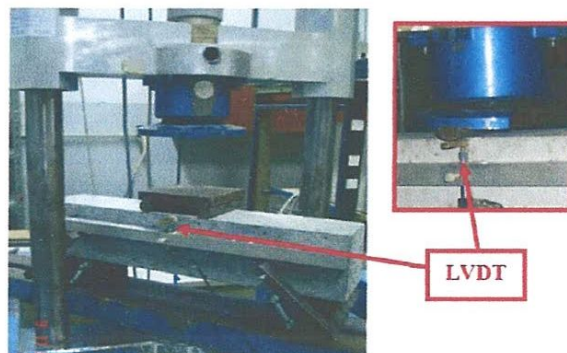


Figure 22 : Essai de flexion quatre – points : dispositif expérimental.

La courbe "Force - Flèche" de la Figure 23 est un modèle de courbe issue de ce genre d'essais. Elle permet d'évaluer la capacité portante (F_{max}) ainsi que la flèche maximale (dF_{max}) associée à la charge maximale. Cette flèche maximale a été définie par Turatsinze et al[3] comme étant un indicateur privilégié de la capacité de déformation du matériau. En effet en se basant sur leurs travaux antérieurs, Turatsinze et Bascoul Turatsinze[3] font remarquer que si le matériau est bien endommagé avant le pic de charge, la macrofissuration n'est pas localisée tant que l'on n'a pas basculé dans le domaine postfissuration. Nous avons aussi relevé la pente initiale K de la courbe à 50% de F_{max} , elle traduit la rigidité du matériau.[3]

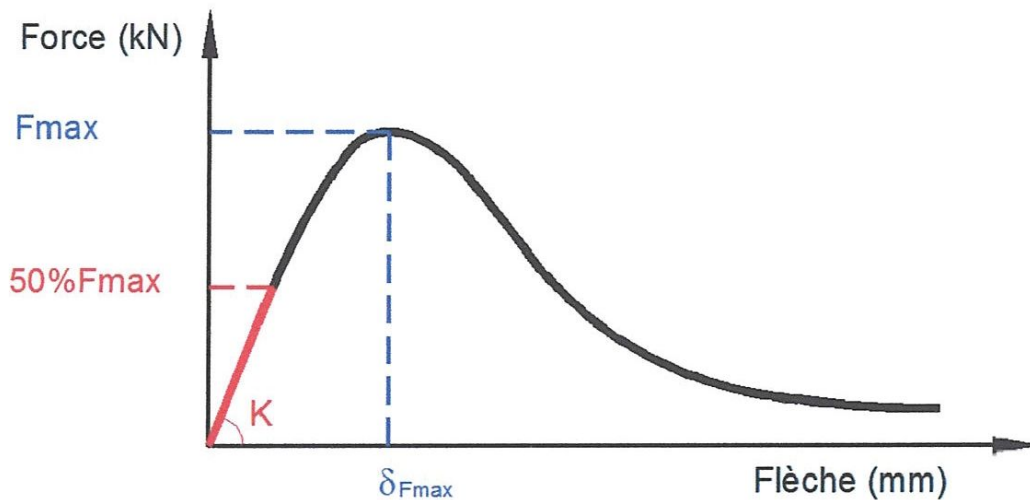


Figure 23 : Paramètres caractéristiques mesurés lors d'un essai de flexion quatre-points.

III- LES PROPRIETES PHYSIQUES

Au même titre que le liège et le feutre, le caoutchouc est un des matériaux les plus couramment utilisés pour l'isolation vibratoire. Par ailleurs, sa conductivité thermique est relativement faible (la conductivité thermique du caoutchouc vulcanisé est du même ordre que celle de la terre crue, soit 0,3 à 0,4 W/m.oC). Dès lors on comprend aisément que la tentation d'évaluer l'incidence des G.C. sur la conductivité thermique et sur le coefficient d'absorption acoustique du béton est légitime. Si cette incidence est significative, la liste en terme de potentiel d'applications est longue et inutile à rappeler ici. On notera cependant que certaines de ces applications nécessiteraient un complément pour évaluer le risque sanitaire si le bâti est concerné. S'agissant des applications routières, l'utilisation du béton incorporant des G.C. comme mur antibruit est souvent évoquée mais ses performances dans cette application n'ont pas encore été prouvées.[3]

III-1- L'absorption acoustique

Dans le chapitre dédié à la synthèse bibliographique, nous avons rapporté que le potentiel des bétons incorporant des G.C. pour amortir des ondes acoustiques est souvent évoqué avec comme application de prédilection des ouvrages antibruit. Malgré cela, la revue bibliographique révèle qu'il y a peu de certitude compte tenu de

résultats rares notamment sur l'influence des G.C. sur le coefficient d'absorption acoustique (α) du béton.

Dans ce programme nous proposons de comparer les coefficients d'absorption acoustique de 3 bétons : B0GC, B20GC et B40GC. Dans ce but, nous avons utilisé la méthode du tube d'impédance disponible dans notre laboratoire et ce coefficient a été déterminé conformément à la norme [NF EN ISO 10534-1, 03]. [3]

III-1-1- Dispositif expérimental

La figure 24 présente le dispositif expérimental mis en oeuvre pour mesurer le coefficient d'absorption acoustique. L'appareil à ondes stationnaires type 4002 avec deux types de tube de section constante de grand et petit diamètres (tube de Kundt) est conçu pour les mesures de coefficient d'absorption des échantillons cylindriques de matériaux absorbants.

L'échantillon à tester est mis dans un support rigide et cet ensemble est placé à l'une des extrémités du tube. A l'autre extrémité du conduit est placée la source (boîte contenant le haut-parleur) créant le champ plan de pression acoustique. Une sonde microphonique est introduite par un orifice aménagé dans l'axe du haut-parleur. La sonde microphonique est supportée à une extrémité (à l'intérieur du tube de mesure) par un petit dispositif à glissière et à l'autre extrémité par un chariot supportant le microphone. Ce chariot est guidé manuellement par des rails. Ce dispositif comporte un générateur de signaux sinusoïdaux GX245 et un amplificateur type 2610. Le haut-parleur est alimenté par le générateur de signaux qui génère une gamme couvrant une bande de fréquences de 350 Hz à 5.500 Hz.

L'amplificateur convertit la tension de sortie du microphone en pression acoustique maximale et minimale. Ces pressions sont mesurées sur une échelle logarithmique (en décibels) et elles sont utilisées pour le calcul du coefficient d'absorption acoustique.

D'après Herzog et al. [3] le domaine de fréquences perceptibles par l'oreille humaine est, chez l'adulte, de 16 Hz à 16.000 Hz. Cependant, le niveau de pression sonore est généralement exprimé par rapport à un niveau de référence correspondant au seuil de sensibilité maximum de l'oreille, appelé "seuil d'audibilité". Ce seuil est lié à la fréquence mais on considère qu'il varie peu entre 500 et 6.000 Hz. [3]

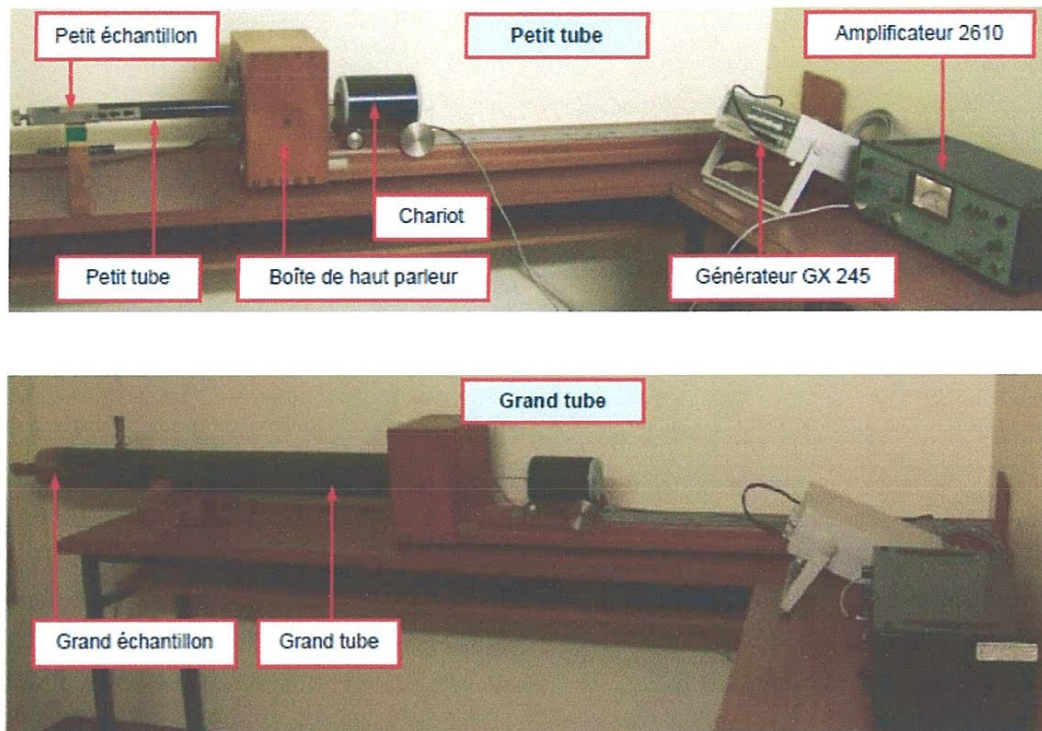


Figure 24: L'appareil à ondes stationnaires Type 4002 (tube de Kundt) avec les deux types de tube utilisés, le générateur GX 245 ainsi que l'amplificateur 2610.

D'après les recommandations de la norme [NF EN ISO 10534-1, 03], le domaine utile en fréquence $f_{inf} < f < f_{sup}$ (où f_{inf} , f_{sup} sont les fréquences limites inférieure et supérieure) d'un tube d'impédance est fonction de sa longueur L (distance entre la face avant de l'échantillon en essai et le haut-parleur) et de son diamètre intérieur (d). Ces bornes sont données par les relations suivantes :

$$f_{inf} \geq \frac{250}{L-3d} \text{ et } f_{sup} \leq \frac{200}{d}$$

Les longueurs (L) sont de 1,0 et 0,29 mètre et les diamètres (d) sont de 0,099 et 0,029 mètre pour le grand et le petit tube, respectivement. Les domaines de fréquence correspondants à ces deux types de tubes sont :

- + Grand tube: $355 < f < 2.020$ (Hz)
- + Petit tube: $1.230 < f < 6.896$ (Hz)

En conséquence, on peut constater que pour balayer la gamme de fréquences couvrant le "seuil d'audibilité" il est nécessaire d'utiliser les deux types de tubes. En réalité,

expérimentalement nous avons couvert la bande de fréquence allant de 500 à 5.000 Hz. Pour les essais, deux tailles d'échantillons ont été utilisées. Ils ont une même épaisseur de 25mm et un diamètre de 98 mm dans le cas du grand tube ou 27 mm lorsque le petit tube est utilisé. Les domaines de fréquences balayés sont donc répartis comme suit :

* Grand échantillon (grand tube) : $500 < f_G < 1.750$ (Hz)

* Petit échantillon (petit tube) : $1.750 < f_P < 5.000$ (Hz)

Les éprouvettes testées sont obtenues par sciage d'éprouvettes cylindriques âgées de 50 jours perpendiculairement à la génératrice par tranche de 25 mm et par carottage. Pour éviter les effets de la teneur en eau susceptible de varier d'un échantillon à un autre, les éprouvettes testées sont préalablement séchées dans une étuve à 40°C pendant dix jours. A l'issue de cette cure, la variation de la masse en 24 heures s'est avérée inférieure à 0,2%.

La mise en place des échantillons dans leurs supports à l'extrémité des tubes est illustrée à la Figure 25.[3]

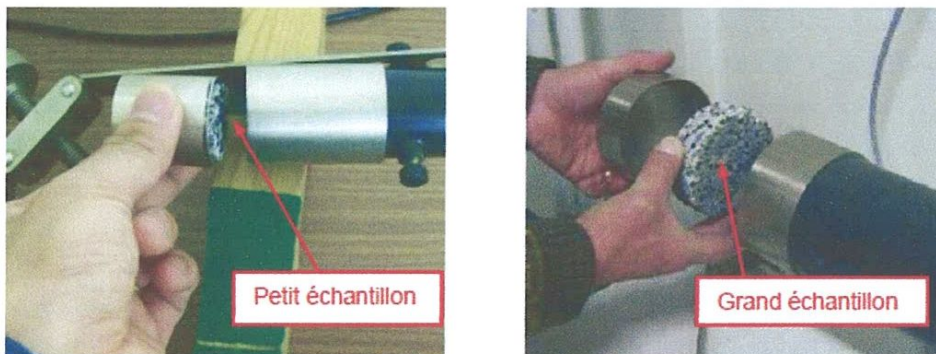


Figure 25: Mise en place des supports avec le petit et le grand échantillon à l'extrémité des tubes.

III-1-2- Résultats et discussions

Le coefficient d'absorption acoustique (α) est le rapport de la pression du son absorbée $P(ab)$ par le matériau et de la pression du son incidente ($P(in)$) figure 26. Ce coefficient est un facteur adimensionnel, variant entre 0 et 1. La valeur 0 correspond à un matériau totalement réfléchissant et la valeur 1 correspond à un matériau totalement absorbant.[3]

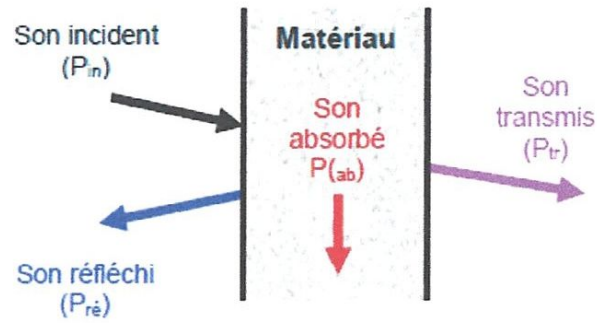


Figure 26 : Comportement d'un son incident à la surface d'un matériau.

La norme [NF EN ISO 10534-1, 03] prescrit la relation pour calculer le coefficient d'absorption acoustique (α) suivante où DL (exprimé en décibels) est la différence entre les niveaux de pression acoustique maximal et minimale:

$$\alpha = \frac{4 * 10^{\Delta L/20}}{(10^{\Delta L/20} + 1)^2}$$

La Figure 27 et le Tableau 11 présentent l'influence des G.C. sur le coefficient d'absorption acoustique. Chaque valeur est une moyenne des résultats obtenus sur trois essais.

Le coefficient d'absorption (α) varie fortement en fonction de la fréquence. Les courbes d'absorption présentent des pics d'amplitude et on peut constater que la position fréquentielle de ces pics dépend du taux de substitution en G.C. Les échantillons à base de B0GC, de B20GC et de B40GC présentent les pics d'absorption (α) au voisinage des fréquences de 1.500, 1.750 et 2.000 Hz, respectivement. On peut également noter que ce décalage vers les hautes fréquences s'accompagne d'une augmentation de l'amplitude de pic lorsque le taux d'incorporation des G.C. augmente. [3]

Plusieurs phénomènes concourent pour expliquer l'effet de la présence des G.C. sur l'absorption acoustique du béton :

*Tout d'abord, rappelons que les matériaux absorbants acoustiques sont des matériaux poreux et dont les pores sont interconnectés et ouverts. L'intérieur des pores est rempli d'air. Ils agissent en dissipant l'énergie acoustique de l'onde incidente en d'autres types d'énergies (chaleur, vibration, friction). En conséquence, le volume des pores important du BIGC augmente l'absorption acoustique. Cette observation est similaire à celle de Park et al. [3]. Ces auteurs indiquent que l'accroissement de la surface spécifique des pores dû aux granulats de recyclage augmente le coefficient d'absorption acoustique du matériau.[3]

* En ce qui concerne le décalage de la position fréquentielle du pic vers les hautes fréquences, Cerezo [3] indique que le changement du système de la porosité ouverte du matériau telle la dimension des pores ou l'inter-connectivité poreuse est une hypothèse pertinente. L'auréole de transition peu compacte et poreuse entre les G.C. et la matrice cimentaire, dont nous avons discuté précédemment, peut expliquer ce résultat. Cette hypothèse est à rapprocher des conclusions de Neithalath et al.[3] selon lesquelles des macronodules de 8 mm constitués de fibres de cellulose permettent d'augmenter le coefficient d'absorption acoustique du composite cimentaire dans lequel ils sont incorporés et ceci mieux que les autres fibres dispersées dans le même composite.

En conclusion, les granulats en caoutchouc augmentent l'amplitude de pic du coefficient d'absorption acoustique du béton et entraînent un décalage de la position fréquentielle de ce pic vers les hautes fréquences. [3]

III-2- Conductivité thermique

La conductivité thermique est un des paramètres thermo physiques les plus importants pour la description des propriétés de transport de chaleur d'un matériau ou d'un composant. Cette propriété de transfert thermique est directement liée aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et à la teneur en eau, donc des conditions de conservation dans le cas d'un béton.

La conductivité thermique est un élément clé du processus de transfert de la chaleur des matériaux. Elle est essentiellement utilisée pour la prédiction du profil de température ainsi que du flux de chaleur. La conductivité thermique du béton joue un rôle important dans cet aspect puisque le domaine d'application du béton est très vaste. Dans le cas des applications à grande surface, cette propriété peut avoir une incidence sur le gradient de température entre la surface libre exposée au rayonnement solaire et la face inférieure au contact du sol. Une dilatation thermique non uniforme conjuguée à une courbure de l'élément (face supérieure tendue) peut déclencher prématurément une fissuration aussi préjudiciable que celle due aux variations dimensionnelles de retrait.

Dans cette partie, nous avons comparé la conductivité thermique des trois bétons : le B0GC, le B20GC ainsi que le B40GC.[3]

III-2-1- Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour la mesure de conductivité thermique est présenté sur les Figure 30 et Figure 31. Les échantillons de 118 mm de diamètre (D) et d'épaisseur = 40 mm ont été utilisés. Ils sont obtenus par le débitage des éprouvettes cylindriques de diamètre 118 mm et de hauteur 236 mm. L'âge de toutes les éprouvettes au moment du débitage est de 60 jours. Les échantillons sont ensuite séchés grâce à une étuve à 40°C pendant 7 jours.

Pour l'essai proprement dit, la source chaude est stabilisée à 50°C, la source froide obtenue par une circulation d'eau courante. L'échantillon dont les deux bases sont équipées de 6 thermocouples (3 sur chaque face) est placé entre ces deux sources. On notera les fluxmètres intercalés dans la colonne des éléments. Pour limiter les pertes radiales de chaleur, les échantillons sont placés dans une chambre calorifugée. Une fois le régime permanent établi (normalement 30 minutes après la mise en place de l'échantillon entre les deux sources), les températures et les tensions de sortie du fluxmètre (U_{chaud} , U_{froid}) sont mesurées.[3]

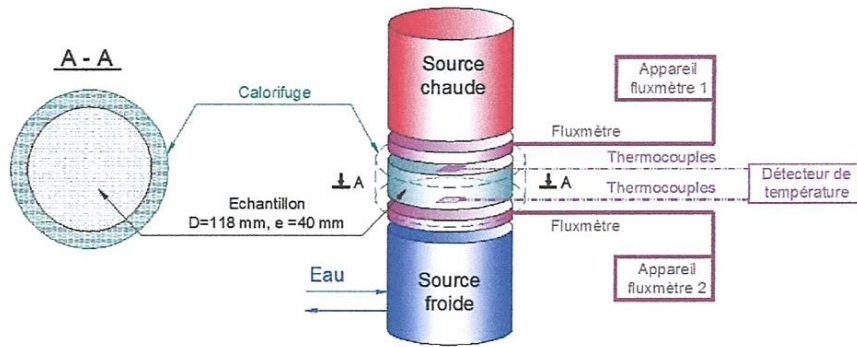


Figure 30 : Dispositif expérimental de l'essai de la mesure de conductivité thermique.

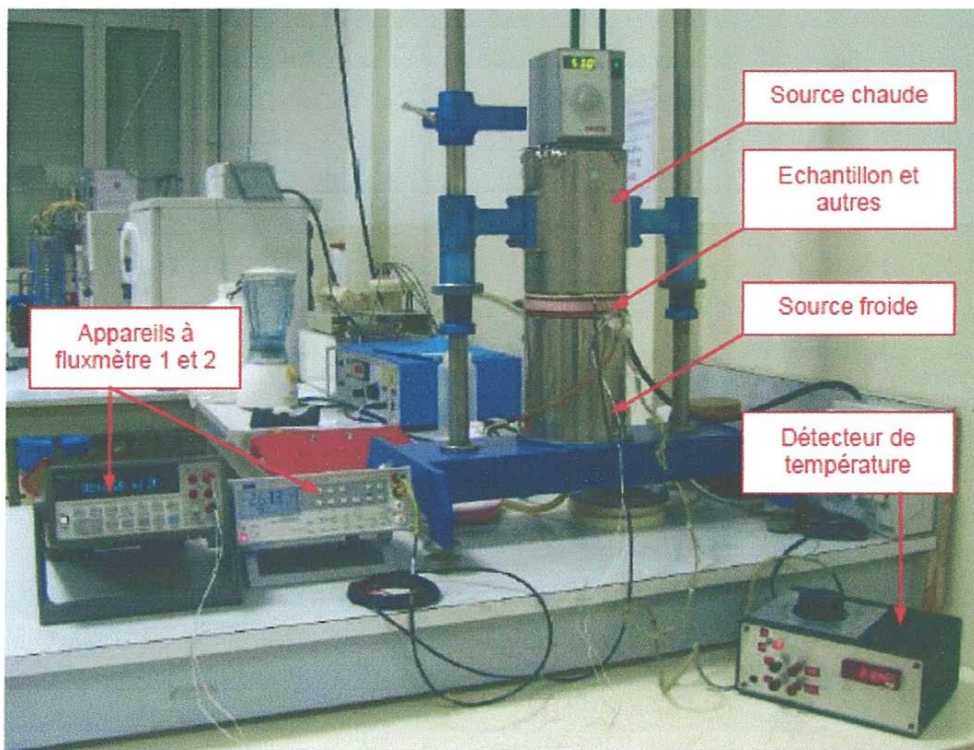


Figure 31 : Illustration des matériels de l'essai de la mesure de conductivité thermique.

Densité de flux thermique (Φ) :

$$\Phi = \frac{F_{chaude} + F_{froide}}{2} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Où : F_{chaude} , F_{froide} sont les densités de flux thermique en W/m² déterminées par les relations suivantes :

$$F_{chaude} = U_{chaud} * C1 \quad \text{(W/m}^2\text{)}$$

$$F_{froide} = U_{froid} * C2 \quad \text{(W/m}^2\text{)}$$

Uchaud, Ufroid sont les tensions de sortie du fluxmètre des sources chaude et froide mesurées par les fluxmètres 1 et 2 respectivement, en mV. C1, C2 sont les facteurs d'étalonnage propres à chaque fluxmètre, en W/(mV.m2).

Conductivité thermique (λ):

$$\lambda = \frac{\Phi.e}{T_{chaude} - T_{froide}} \quad (\text{W/m.}^\circ\text{C})$$

Où :

(e) est l'épaisseur d'échantillon, en mètre. Tchaude, Tfroide sont les températures moyennes obtenues par trois thermocouples de chaque côté (chaud et froid) de l'échantillon.

III-2-2- Résultats et discussions

Les résultats des mesures de la conductivité thermique à l'état sec des bétons B0GC, B20GC et B40GC sont donnés à la Figure 32 et dans le Tableau 12. Chaque valeur est une moyenne des résultats obtenus sur trois essais.

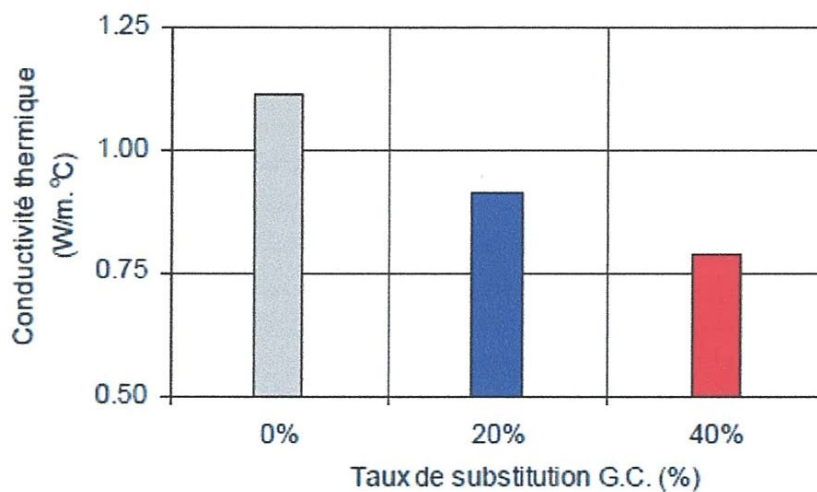


Figure 32 : Influence du dosage en G.C. sur la conductivité thermique.

Tableau 12: Influence du dosage en G.C. sur la conductivité thermique.

Béton	B0GC	B20GC	B40GC
Conductivité thermique (W/m.oC)	1.12	0.91	0.79
Dispersion (%)	1.2	3.4	0.7

Les résultats ci-dessus montrent que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du dosage de G.C. Par exemple, la présence de G.C. entraîne une réduction de la conductivité thermique de 30% lorsque l'on passe du béton de référence au béton incorporant 40% de G.C. Ce changement peut s'expliquer par l'influence concomitante de plusieurs facteurs :

* Dans un premier temps, on peut citer les caractéristiques des constituants du composite. Même avec les seuls granulats naturels, il est bien connu que leur nature minéralogique affecte grandement la conductivité thermique du béton [3].

Plus la conductivité thermique du granulat est faible, plus faible sera celle du béton confectionné avec. En effet, le caoutchouc représente une structure amorphe et sa conductivité thermique de l'ordre de 0,4 W/m.oC est faible devant celle des granulats naturels qui représentent une structure cristalline et une conductivité thermique généralement supérieure à 1,5 W/m.oC.

* Un autre facteur qui rentre en jeu est la porosité du béton et cette porosité est plus importante avec l'adjonction de G.C. L'air ayant une conductivité thermique beaucoup plus faible (0,023 W/m.oC) remplit les pores du béton et limite la conduction de la chaleur. Nous rappelons que ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Benazzouk [3]. D'après cet auteur, l'air entraîné lors du malaxage conduit à une porosité fermée dans la matrice cimentaire ce qui améliore encore les performances d'isolation du composite cimentaire incorporant des G.C.

* Une tendance générale relevée par de nombreux auteurs comme Gül et al. [3], Blanco et al. [3] ou Demirboğa et Gül [3] est que la conductivité thermique du béton diminue avec la réduction de sa densité. On peut tendre cette conclusion aux bétons incorporant des G.C. tout en gardant à l'esprit que dans ce dernier cas, la chute

Chapitre 5

CONCLUSION GENERALE

Malgré une domination indiscutable du marché de la construction moderne, les matériaux à base cimentaire ne sont pas parfaits. Leur principal handicap est une faible résistance en traction combinée à une faible capacité de déformation qui les rend fragiles. Il en résulte en particulier une forte propension à la fissuration due aux déformations imposées à l'origine de désordres particulièrement sévères et souvent rédhibitoires pour les éléments à grandes surfaces comme le dallage ou chaussée en béton. Améliorer la capacité de déformation du composite cimentaire est donc un enjeu majeur pour améliorer la durabilité des applications.

C'est l'objet de cette thèse. Le moyen mis en œuvre pour atteindre cet objectif est l'adjonction de granulats déformables : nous avons utilisé des granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés. Ces granulats en caoutchouc (G.C.) dont la dimension maximale est de 4 mm sont utilisés en remplacement volumique partiel du sable. La valorisation de ce sous produit industriel confère ainsi à ce travail un intérêt environnemental.

Références bibliographiques

- [1] :Saadani Sabrina ."mémoire de magister thème comportement des bétons a base de granulats recycles", Université Mentouri Constantine année 2000.
- [2] : Faten SADAKA "Thèse de doctorat thème Etude de la dégradation contrôlée de polydiènes : Application au recyclage des déchets pneumatiques" Université du Maine.année 23 novembre 2010
- [3] : M. HO Anh Cuong "Thèse de doctorat thème Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface" université de Toulouse année 20 Juillet 2010 .
- [4] : OUZIR Malika mémoire de magister "thème Gestion Ecologique des Déchets Solides Industriels" Université de M'sila année 2008.
- [5] : (Anaclet Turatsinze et Mathieu Garros)Thèse "Une nouvelle génération de matériaux à base cimentaire par incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés" INSA année 16 octobre 2007.
- [6] : (Habib Trouzinea,b, Aissa Asrouna, Nasser Asrouna, Farid Belabdelouhab, Nguyen Thanh Long "Problématique des pneumatiques usagés en Algérie" université de Djilali Liabes,et Ecole Nationale Supérieur des Travaux Publics,année 25 Avril 2011.
- [7] : www.aliapure.fr
- [8] : <http://www.planetoscope.com>
- [9] : <http://www.arecpc.com>
- [10] : <http://adatire.pagesperso-orange.fr>
- [11] : <http://www.tbe-euro.com>