

VALORISATION DES DECHETS DE PNEUS ET INFLUENCE DES GRANULES OU DES POUDRETTES DE CAOUTCHOUC SUR LA RESISTANCE DES MORTIERS DE CIMENT

MEZGHANI Sihem REMADI

(Ingénieur principal, enseignante agrégée en génie civil à l'Institut supérieur des études technologiques de Nabeul)

RESUME :: Parmi les domaines de valorisation des pneus usés non réutilisables, le broyage représente la voie la plus prometteuse permettant de réduire les pneus usagés en copeaux, de séparer l'acier qui peut être recyclé de son côté. Les poudrettes ou les granulés obtenu pourraient être utilisés en combinaison avec d'autres matériaux comme les bétons, les mortiers et les enrobés.

L'étude expérimentale réalisée est limitée au cas de mortier. L'influence de l'incorporation d'une petite fraction (3,7 % de la masse du sable) de ces poudrettes ou de ces granulés dans un mortier normal est considérable. En effet, nous avons enregistré une importante chute de résistance à la traction et à la compression par rapport au mortier de référence mais par contre, nous avons constaté que l'apparition des fissurations est plus tardive. La fraction de déchet pneumatique ajoutée a permis de multiplier la capacité de déformation avant la rupture.

L'amélioration de la capacité de déformation des matériaux cimentaire est un enjeu majeur, il est ainsi nécessaire par la suite de procéder à des essais et des investigations plus poussés.

ABSTRACT : Among fields valorisation of the no reusable used tires, crushing represents the most promising way making it possible to reduce the worn tires in chips, to separate the steel which can be recycled on its side. Fine powders or the pellets obtained could be used in combination with other materials like concrete, mortar and the bituminous mix.

The experimental study carried out is limited to the case of mortar. Influence of incorporation of a small fraction (3,7 % of mass of sand) of these fine powders or pellets in a normal mortar is considerable. In deed, we recorded an important fall of tensile and compression strength compared to the mortar of reference but on the other hand, we noted that the appearance of fissures is delayed. Added pneumatic waste fraction permitted to multiply the capacity of deformation before the rupture. The improvement of capacity deformation of cementing materials is a major stake, thus it is necessary afterward to carry out more tests and investigations.

ملخص : من بين الحلول المطروحة لتثمين نفايات الإطارات المطاطية هو الرحي . يعتبر من بين الوسائل الأنجع التي تمكننا من التحصل على مساحيق مطاطية و عزل المعدن الموجود بالإطارات الذي يمكن تثمينه من جهة أخرى. إن هذه المساحيق يمكن استعمالها مع تركيبات أخرى كالخراسانة والطلاوة و ركام البيتومين. إن التجارب الأولية أفرزت تقلص كبير في خصائص المقاومة بينما لاحظنا تأخر ظهور التشققات مقارنة بالطلاوة المرجعية بالنسبة للطلاوة التي تحتوي على مساحيق مطاطية (3,7 من وزن الرمل). هذا المجال يفتح أفق كبير في استعمال الطلاوة ذات خصوصيات أكبر بالنسبة لتأخر ظواهر الشقوق.

I - INTRODUCTION

La volonté d'améliorer l'environnement par le besoin d'un cadre de vie plus agréable, le poids de plus en plus important de l'écologie ont amené les pouvoirs nationaux et régionaux à définir une politique de valorisation des déchets, à resserrer leurs liens dans ce domaine, à coordonner leurs actions pour promouvoir cette politique. Plusieurs textes réglementaires ont été élaborés afin de gérer les déchets en Tunisie comme *la Loi n°96-41 du 10 juin 1996* relative aux déchets et au contrôle de leur gestion et élimination, *la loi du 28 Février 2001* relative aux déchets non dangereux et *le Décret n°2000-2339 du 10 octobre 2000* fixant la liste des déchets dangereux, leur provenance et leurs caractéristiques de danger.

La Tunisie est confrontée à divers problèmes environnementaux causés entre autre par les déchets solides ou cette masse ne cesse d'augmenter. Parmi ces déchets les pneus usagés non réutilisables constituent un déchet encombrant, préjudiciable à l'environnement et prennent environ 900 années à se dégrader. Les pneus usagés à base de caoutchouc sont classés parmi les déchets ménagers et assimilés qui comprennent les déchets organiques, le plastique, le métal, les textiles, le papier, le cuir et le Caoutchouc. Les pneus usagés représentent un déchet encombrant, bien réparti sur tout le territoire et reste facile à trouver.

Depuis ces dernières années les pneus en Tunisie sont en augmentation suite aux flux croissant de véhicules. Les intervenants qui produisent, importent à son état fini et semi fini ainsi que les opérations de rechapage des pneus ont provoqué une évolution du bilan du gisement National en matière de pneumatique. Par conséquent le bilan de déchets pneumatiques est ainsi en perpétuelle augmentation.

II - BILAN DU GISEMENT NATIONAL EN PNEUS

L'estimation du gisement national et des déchets pneumatiques à l'horizon 2010 a été établie en considérant les valeurs et les statistiques trouvées dans les différents rapports de la Société Tunisienne de l'Industrie Pneumatique « STIP », de l'institut National des Statistiques « INS » et de l'Agence National de Protection de l'Environnement « ANPE ».

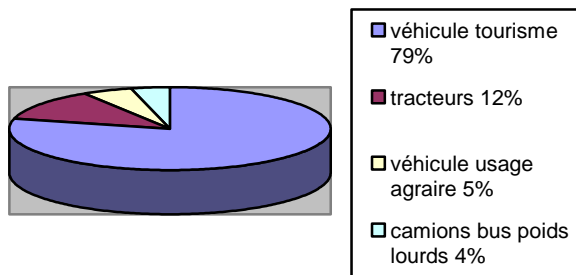
Tableau 1 : estimations du gisement national en pneumatiques

	production	importation	importation	importation	rechapage	gisement partiel	gisement national en pneus	gisement national en tonnes
	STIP	pneus neuf	pneus rechapés	pneus montés	pneus			
		taux d'	accroissement	en %				
	-4,53	5,7	0,23	23,8	0			
2001							5 453 661	92 712
2002	249 887	319 580	15 946	713 709	36 000	1 335 122	6 788 783	115 409
2003	238 567	337 796	15 983	883 572	36 000	1 511 918	8 300 701	141 112
2004	227 760	357 050	16 019	1 093 862	36 000	1 730 692	10 031 392	170 534
2005	217 442	377 402	16 056	1 354 201	36 000	2 001 102	12 032 494	204 552
2006	207 592	398 914	16 093	1 676 501	36 000	2 335 101	14 367 595	244 249
2007	198 188	421 652	16 130	2 075 508	36 000	2 747 479	17 115 074	290 956
2008	189 210	445 687	16 167	2 569 479	36 000	3 256 543	20 371 617	346 317
2009	180 639	471 091	16 205	3 181 015	36 000	3 884 949	24 256 566	412 362
2010	172 456	497 943	16 242	3 938 096	36 000	4 660 737	28 917 303	491 594

A l'horizon 2010, le gisement national de pneus est de l'ordre de 29 million de pneus ce qui correspond à l'équivalent de 492 mille tonnes de pneus. Cette quantité regroupe les pneus en exploitation, les pneus neufs stockés et les pneus usagés abandonnés,

III - BILAN DES DECHETS PNEUMATIQUES

Le bilan des déchets pneumatique est établi en se basant sur le bilan de gisement national en pneus, du taux de rechapage des poids lourds et de bus retenu à 3 fois par an et enfin sur le taux de rechange annuel « T » fournie par « STIP » Sachant que le parc national est constitué de :

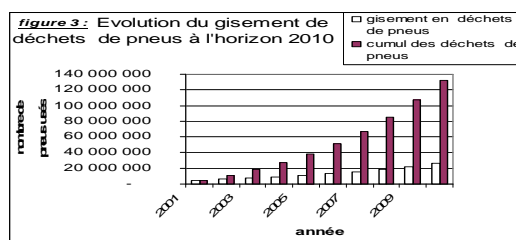


Le taux de rechange moyen du parc national est d'environ $(0,79*0,8 + 0,12*0,5 + 0,05*1,3 + 0,04*3,5)$. Soit $T_m = 0,9$

Le gisement en déchets de pneus de l'année n = gisement annuel en pneus x T_m
 Le cumul des déchets de pneus par an = Cumul des déchets de pneus de l'année (n-1) + gisement en déchets de pneus de l'année n

Tableau 2 : estimation des déchets de pneus en Tunisie à l'horizon 2010

année	gisement national en pneus	gisement en déchets de pneus	cumul des déchets de pneus (en pneus)	cumul des déchets de pneus (en tonnes)
		tx de rechange $T_m=0,9$		
2001	5 453 661	4 908 295	4 908 295	83 441
2002	6 788 783	6 109 905	11 018 200	187 309
2003	8 300 701	7 470 631	18 488 830	314 310
2004	10 031 392	9 028 253	27 517 083	467 790
2005	12 032 494	10 829 245	38 346 328	651 888
2006	14 367 595	12 930 835	51 277 164	871 712
2007	17 115 074	15 403 566	66 680 730	1 133 572
2008	20 371 617	18 334 455	85 015 185	1 445 258
2009	24 256 566	21 830 910	106 846 095	1 816 384
2010	28 917 303	26 025 573	132 871 668	2 258 818



Le gisement national en pneus usagés enregistre avec les années, une évolution spectaculaire qui se traduit par l'évolution des écarts représentés dans la figure3 entre le gisement en pneus usagés d'une année considérée et le cumul des pneus usagés de la même année. A l'horizon 2010, le gisement national de déchets de pneus est de l'ordre de 133 million de pneus ce qui correspond à l'équivalent de 2 million de tonnes de pneus.

IV - IDENTIFICATION DES PNEUS

Un pneu est un mélange à base de caoutchouc synthétique ou naturel dans lequel sont ajoutés des éléments améliorant les qualités de résistance et de sécurité.

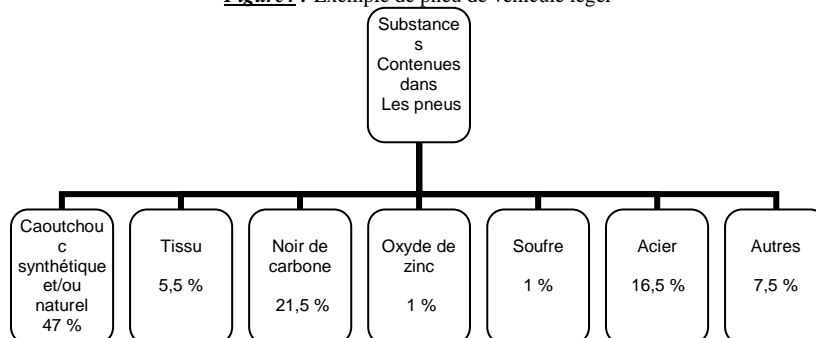
Caractéristiques physiques des pneus

- La carcasse ou le squelette du pneu supportant la charge et composée de couches de câbles de différents types (nylon, acier, polyester, aramide...) enrobées de gommés.
- Le talon est l'élément rigide de la liaison entre la jante et le pneu
- La bande de roulement est composée d'un mélange de caoutchouc devant résister aux chocs, aux coupures, aux échauffements et à l'abrasion
- Le flanc constitué de plusieurs types de caoutchouc.

Composition chimique d'un pneu

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

Figure4 : Exemple de pneu de véhicule léger



La composition réelle des pneus est cependant gardée secrète par les manufacturiers, rendant leur recyclage plus difficile.

V - IMPACTE DES PNEUS USAGES NON REUTILISABLES SUR L'ENVIRONNEMENT

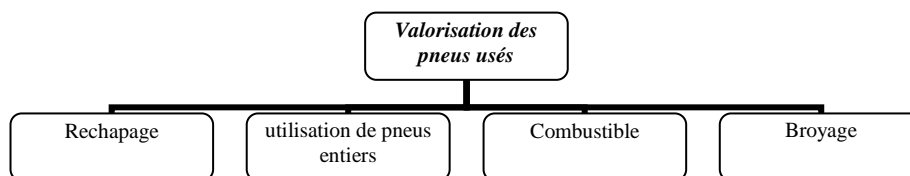
L'augmentation considérable des pneumatiques usagés en Tunisie qui ne cesse de croître jour après jour pourrait provoqué de sérieuses nuisances à la nature à cause de leurs abondance et leurs rejet incontrôlable.

- Pollution visuelle : Incompressibles, en forme de tore, difficiles à enfouir car ils ont la fâcheuse manie de ressurgir de terre au bout de quelques années, le stockage des pneus usagés a engendré un souci pour les détenteurs de ces déchets.
- Impacte de l'industrie chimique : Lors de la vulcanisation, le caoutchouc est chauffé en présence de soufre dans le but de le rendre plus résistant. Le composé ainsi obtenu est un composé stable par conséquent non biodégradable.
- Risque de propagation des feux d'incendie : Une faible étincelles peut se transformer en énorme incendie qui devient non maîtrisable en procurant des émissions des fumées toxiques..
- Pollution de l'air et de la terre : Le brûlage des pneus à l'air libre, dans les décharges, est une combustion incomplète qui produit des émanassions de fumée noire épaisse et nocive de CO₂, de SO₂ et d'autres polycycliques aromatiques qui nuisent à l'atmosphères..
- Risque de prolifération des moustiques dangereuses : L'eau de pluie qui s'accumule dans la forme concave des pneus est une source de prolifération des moustiques dangereuses. .
- Comportement des pneus avec l'eau de mer : En 1986 le Pr. MALEK et le Pr. 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 la Manche et qui se trouvent à l'intérieur d'un navire marchand (SS BREDA) coulé pendant la seconde guerre mondiale. Quarante deux ans après, les essais ont montré que, les caractéristiques mécaniques des pneus n'ont pas bougé ,seule la teneur en eau du caoutchouc a légèrement changée *et que* les armatures étaient intactes.
- Comportement des pneus avec les nappes sous terraines : Suite à la construction d'un remblai armé utilisant 10 000 pneus usés, des échantillons d'eau prélevés dans un système de drainage installé sous le remblai ont été analysés du point de vue de la qualité chimique et ont indiqué qu'il n'y a eu aucun effet indésirable sur la qualité de l'eau sur une période de deux ans..

Suite à ce contexte, il est primordial de réfléchir et chercher des solutions techniques et écologiques valorisant les pneus usagés non réutilisables.

VI - SOLUTIONS DE VALORISATION

Actuellement en Tunisie, il existe une très forte volonté encourageant à trouver des solutions durables aux problèmes des déchets solides en général et aux déchets pneumatiques en particulier. Les différents domaines de valorisation peuvent être illustrés selon l'organigramme de la figure 5.

Figure 5 : organigramme de valorisation des pneus usés non réutilisables

Une démarche incitant la valorisation et l'exploitation de ces déchets pneumatiques s'opposant aux sérieux problèmes induits suite à l'augmentation considérable de ces déchets pneumatiques, est en cours. Il s'agit d'un projet de valorisation par broyage de pneus usés non réutilisables.

- 1) Le rechapage s'effectue par la vulcanisation à chaud et la vulcanisation à froid :
- 2) *Pneus entiers* En génie civil, des pneus usagés entiers ou déchiquetés, surtout de poids lourds, ont été utilisés dans plusieurs pays, pour former un matériau structurel dans le sol. Cette technique dite « pneu sol » permet de renforcer et d'alléger le sol, de répartir les contraintes, d'absorber les vibrations et d'amortir les chocs.
- 3) *Combustible* Les pneus usés non réutilisables pourront être utilisés comme une source d'énergie, exploitant au maximum les possibilités de valorisation de substances solides dans les domaines des combustibles recyclés. Un kilogramme de pneus (un pneu de voiture pèse en moyenne 8 Kg) fournit environ 29Mj d'énergie. A titre de comparaison 1 Kg de charbon renferme entre 25 à 29 MJ d'énergie.

L'incinération de déchets de pneus dans les cimenteries par exemple, pourrait couvrir une partie des besoins en énergie.

- 4) *Le broyage* : c'est la voie la plus prometteuse permettant de réduire les pneus usagés en copeaux et de séparer l'acier qui peut être recyclé de son côté. Ces particules de caoutchouc sont de dimension inférieure à 2mm, à caractéristiques chimiques et physiques semblables à celles du caoutchouc vierge mais ayant des propriétés mécaniques inférieures.

VII - USAGE DES POUDRETTES ET DES GRANULES CAOUTCHOUC DANS LA CONSTRUCTION

Le broyage poussé permet d'obtenir un matériau de granulométrie inférieur à 1,2mm, utilisable en technique routière. Il a été estimé par Trivalor que son utilisation sur les chantiers routiers entraîne un surcoût de 10 % par rapport à l'emploi d'un bitume non modifié. Cette différence est compensée par la durée de vie supérieure du bitume traité et par les propriétés thermiques meilleures.

Les bitumes mélangés avec poudrettes de caoutchouc permettent également de :

- limiter les nuisances sonores
- d'améliorer la sécurité des automobilistes sur routes mouillées
- de limiter les nuisances à l'environnement par une limitation du salage en hiver pour les pays froids, du fait d'une meilleure tenue de route à hautes et à basses températures

Les pneus finement broyés entre aussi dans:

- la confection des roues de chariots
- les revêtements de sols de salles de sports, de terrains de jeux assurant un amortissement de chocs

Les poudrettes ou les granulés pourraient être utilisés en combinaison avec d'autres matériaux comme les bétons et les mortiers.

VIII - ETUDE EXPERIMENTALE

Cette étude est limitée au cas de mortier, nous avons ajouté le déchet de caoutchouc issu du broyage des pneus usés non réutilisables avec un pourcentage très faible de 3,7 % de la masse du sable. Ces compositions seront reprises en utilisant différents taux de substitution volumique du sable par ces déchets. Nous ne présenterons ici que les résultats des résistances à la traction et compression permettant de comparer un mortier de référence et un mortier incorporant 3,7% de déchet de caoutchouc par rapport à la masse du sable.

1) Les matériaux utilisés

*Sable normalisé de masse volumique $\gamma_s = 2000kg / m^3$

*Ciment CPA de masse volumique $\gamma_c = 3100kg / m^3$

*eau de masse volumique $\gamma_E = 1000kg / m^3$

***Granulat de caoutchouc**
Figure 6 : Granulat de caoutchouc
 Granulométrie (1/2 mm)
 Masse volumique $\gamma_{GC} = 440kg / m^3$

***Poudre de caoutchouc**
Figure 7 : Poudre de caoutchouc
 Granulométrie (0.1/1 mm)
 Masse volumique $\gamma_{PC} = 280kg / m^3$



2) Nomenclature adoptée

- Mortier Normal : échantillon de référence MN
- Mortier incorporant des Granulats de Caoutchouc : MGC
- Mortier incorporant de la Poudre de Caoutchouc : MPC

3) Compositions des différents mortiers

Tableau 3 : composition des mortiers utilisés

composition	MN		MGC		MPC	
	Masse (g)	Volume (cm ³)	Masse (g)	Volume (cm ³)	Masse (g)	Volume (cm ³)
Granulats caoutchouc	0	0	50	113,63	0	0
Poudre caoutchouc	0	0	0	0	50	178,57
Agent colloïdal	0	0	0	0	0	0
Ciment	450	145,16	450	145,16	450	145,16
Sable	1350	675	1123	561,37	993	496,43
Eau	225	225	225	225	225	225
Total	2025	1045,16	1848	1045,16	1718	1045,16

Tableau 4 : masses volumiques apparentes des mortiers utilisés

mortier	MN	MGC	MPC
Masse volumique (g / cm^3)	1,93	1,77	1,64
Masse volumique(kg / m^3)	1930	1770	1640

Les moules préparés ont été conservés dans un endroit humide ou la température a été maintenue à $(20 \pm 1) ^\circ C$ et une humidité relative supérieure à 90 %. Pour cela chaque moule était enveloppé d'une toile de jute bien humidifiée. Le démoulage a été effectué 24 heures après et les éprouvettes marquées ont été immergées sans retard dans un bac à eau à $(20 \pm 1 ^\circ C)$.

4) Caractéristiques mécaniques

Déterminer la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression des 3 types de mortier MN, MGC, MPC et étudier l'influence de l'incorporation d'une petite fraction de déchet sur le mortier. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'une machine d'essai universelle ou de traction par flexion sur six éprouvettes (4cm x 4cm x 16cm) pour chaque type de mortier.

- Essai de traction par flexion d'un mortier

On applique la charge verticale par le rouleau de chargement en augmentant à de $50 N/s \pm 10 N/s$ jusqu'à la rupture « P ».

La résistance à la traction du mortier est :

$$R_t = \frac{1,5PL}{a^3} \text{ Avec } R_t : \text{ Résistance à la traction en MPa}$$

P : Charge de rupture en MN

L : distance entre appuis inférieurs en m (L= 0,10m)

a : coté de l'éprouvette en m (a = 0,04m)

Résultats

Tableau 5 : valeurs des résistances moyennes à la traction en MP

résistances à la traction enMP	MN	MGC	MPC
7 jours	7,36	5,37	2,53
14 jours	8,54	6,33	4,20

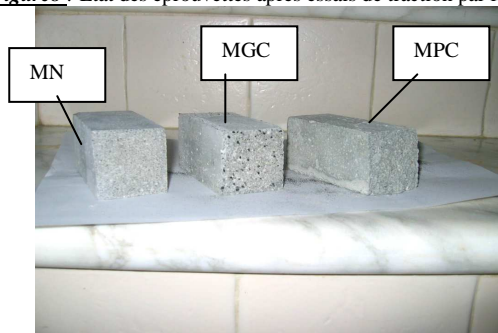
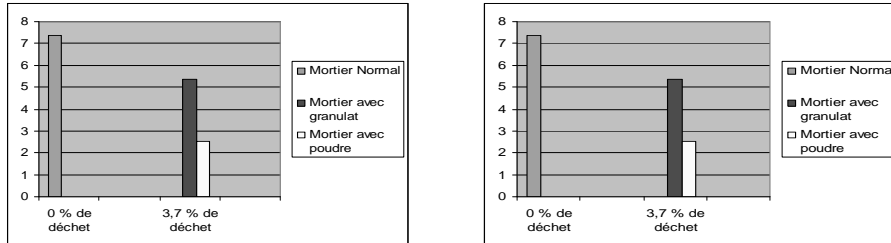
Figure8 : Etat des éprouvettes après essais de traction par flexion

Figure8 : Résistance à la traction à 7 jours **Figure9** : Résistance à la traction à 14 jours



Suite à l'incorporation d'une fraction de déchet de pneus usés de 3,7 % seulement, nous avons enregistré une chute de résistance à la traction par rapport au mortier de référence de :

- 27% à 7 jours et 26% à 14 jours pour MGC
- 66% à 7 jours et 51% à 14 jours pour MPC

- Essai de compression

La résistance à la compression pour chaque type de mortier est :

$$R_c = \frac{P}{S} \quad \text{Avec} \quad R_c : \text{Résistance à la compression}$$

P : charge de rupture en MN et S : section de l'éprouvette en m^2

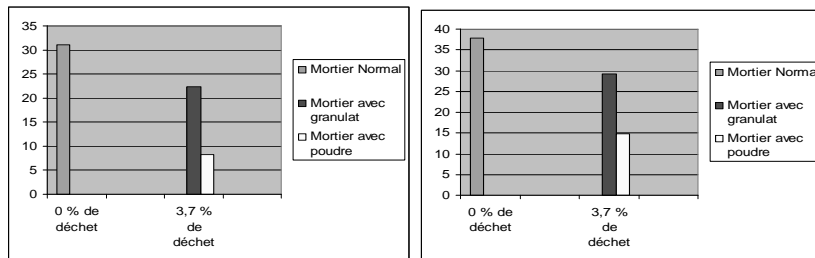
Résultats

Tableau 5 : valeurs des résistances moyennes à la traction en MP

résistances à la compression en MP	MN	MGC	MPC
7 jours	30,99	22,48	8,23
14 jours	37,9	29,27	14,83

Les variations de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de déchet de caoutchouc sont représentées par les diagrammes suivants :

Figure10 : Résistance à la compression à 7 jours **Figure10** : Résistance à la compression à 14 jours



Suite à l'incorporation d'une fraction de déchet de pneus usés de 3,7 % seulement, nous avons enregistré une chute de résistance à la compression par rapport au mortier de référence de :

- 28% à 7 jours et 23% à 14 jours pour MGC
- 73% à 7 jours et 61% à 14 jours pour MPC

IX - CONCLUSION

Les résultats obtenus montrent une chute considérable dans la résistance à la compression et à la traction à 7 et 14 jours des mortiers incorporant des poudrettes de caoutchouc. Cette chute est moins importante pour le cas du mortier avec incorporant des granulés. L'utilisation de déchets en granulés semblerait être la plus intéressante.

Néanmoins, nous avons remarqué que l'apparition des fissurations est plus tardive dans le cas des mortiers caoutchoutés. La fraction de 3,7 % de déchet pneumatique ajoutée pourrait être la cause et a permis de multiplier la capacité de déformation avant la rupture.

Deux causes pourraient être à l'origine pour expliquer cette réponse :

- La faible rigidité des composites des granulats caoutchouc
- La cinétique de la fissuration, différée lors de l'incorporation de déchet de pneus usés

On peut expliquer en grande partie le comportement observé par une redistribution des contraintes qui freinent le processus de propagation de la fissuration pour remédier aux chutes de résistances enregistrées on pourrait envisager l'incorporation de fibres de polyprépilène.

La capacité de déformation des matériaux cimentaires est très limitée. Leur faible résistance à la traction les rend sensible à la fissuration qui peut être préjudiciable au fonctionnement même de la structure. L'amélioration de la capacité de déformation des matériaux cimentaire est donc un enjeu majeur.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Granulats, sols, ciment et bétons : 2^{ème} édition conforme aux normes européennes Casteilla 2000
2. Annales du bâtiment et des travaux publics N°6 : Editions- ESKA
3. Mémoire de mastère spécialisé en éco technologie : Elaboration d'un plan national de gestion des pneus usagés. Novembre 2003
4. Rapport d'activité STIP 2003 + rapport STIP3
5. Statistiques 2001,2002,2003 : Institut National des Statistiques « INS »
6. Rapport de l'Agence National de Protection de l'Environnement : Avril 2000