REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département du Génie de la matière

Filière Génie Civil

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : construction et matériaux

Thème

Étude de la faisabilité d'ajout des déchets de semelles de chaussures usagées dans le béton

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

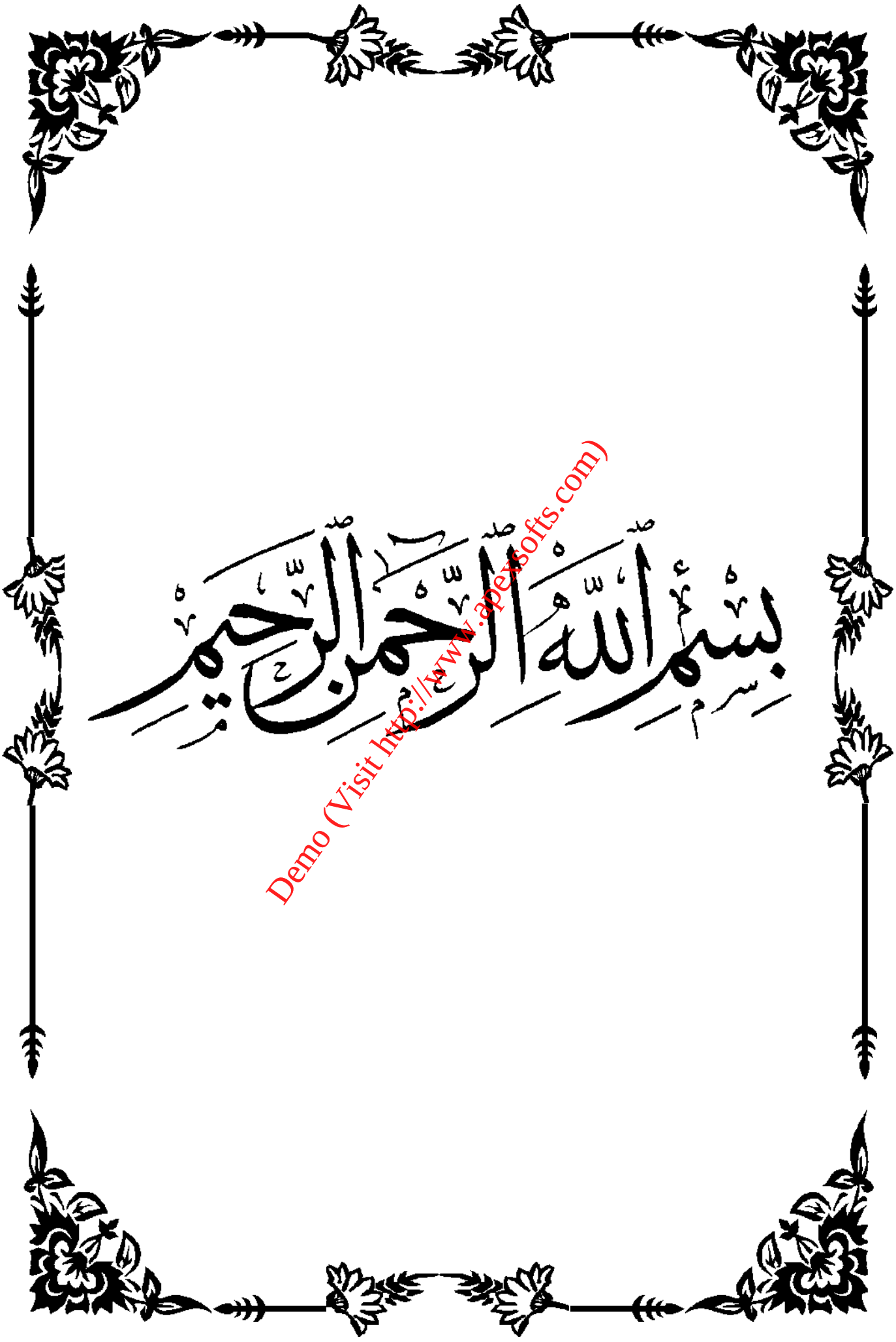
Réalisé Par :

Mr. MANSOUR Younes
Mr. AZIZANE Hamid

Encadré par :

Dr. DEBIEB Farid **promoteur**
Mr. GUENDOUZ Med **Co- promoteur**

JUIN 2014



Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

بسم الله الرحمن الرحيم

الله لا إله إلا هو الحي القيوم لا تأخذه

سنة ولا نوم له ما في السموات وما في

الأرض من ذا الذي يشفع عنده

إلا بإذنه يعلم ما بين أيديهم وما خلفهم

ولا يحيطون بشيء من علمه إلا بما شاء

وسع كرسيه السموات والأرض ولا

يؤوده حفظهما وهو العلي العظيم

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Remerciements

Nous tenons à présenter les incommensurables louanges au tout puissant qui nous à guidé dans notre humble effort, comme nous présentons ensuite vivement nos remerciements les plus remarquables en particulier :
A tous les enseignants de l'université de Médèa et spécialement ceux du département du génie civil, on cite notamment notre promoteur Mr DEBEIB Farid, qui nous ont tous soutenu durant nos études et, ont considérablement participé à nous procurer leurs conseils les plus enrichissants.

Un grand merci aux ingénieurs du laboratoire HALL DE TECHNOLOGIE DE MEDEA sans exceptions, particulièrement Mr GUENDOUZ Med et Mlle BOUKHLKHAL Djamila .

Egalement à Mr ZOUBIR Mounir et d'autres.
Enfin à tous ceux qui ont

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Au premier lieu, nous tenons à remercier « Allah » qui nous a donnée le courage et la Volonté pour terminer ce travail.

Mes chers parents que dieu les protège, pour leurs soutien durant la période de ma formation, pour leurs bienveillance.

Ma sœur et mes frères et toute ma famille.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Tous mes amis surtout : Younes, Djamel, Moussa, Nasser, hamza et Khathir.

Je remercie mon binôme y qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Mes enseignants qui mon contribuer durant ma formation.

A Tout mes collègues de 5ème année promotion génie civil 2009/2010, Et de 2éme année master matériaux et construction.

HAMID

AZIZANE

Abdelatif
Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Dédicace

J’ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A ma très chère mère, qui me donne toujours l’espoir de vivre et qui n’a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, et son sacrifice afin que rien n’entrave le déroulement de mes études.

A mes frères et mes sœurs.

A notre regretté mon oncle : MANSOUR MOHAMED.

A toutes les petites filles : HADIL ROUNEK ET ALLAE

A toute ma famille MANSOUR.

A tous mes amis surtout ISHAK,AMINE , RABEH, KHALED ZAKARIA et CHOUIB.

A Tout mes collègues de 5ème année génie civil promotion 2011, Et de 2ème année master matériaux et construction.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

A tous mes collègues de BET BENADDA et ARCHIPLUS.

A mon binôme AZIZANE HAMID.

A Tous ceux que me connais.

A Tous ceux que j'aime et je respecte.

YOUNES

MANSOUR

Abdelatif
Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

RESUME

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

ملخص

تشكل النفايات المطاطية مجمعات من البقايا بسبب الحجم الذي تحتويه، مشوهة بذلك للطبيعة مع تواجدها لسنين طويلة.ولهذا وجب تشجيع إعادة تصنيعها.

ولهذا يهدف مشروعنا إلى استعمال النفايات المطاطية (نعال الأحذية) المعادة في تصنيع الخرسانة. نوعان اثنان من نفايات نعال الأحذية أضيفت إلى الخرسانة و ذلك بتعويضها بنسب تتغير من 10 إلى 40 % من كتلة الرمل ، و مقارنة خصائصها مع خرسانة طبيعية، كما أن خصائص الخرسانة قد تم تحليلها و مقارنتها في الحالة الرطبة و الصلبة . من النتائج التجريبية يمكن أن نستخلص أن إضافة هذا النوع من النفايات إلى الخرسانة يؤدي إلى النقص في النتائج القياسية للخرسانة.

كلمات مفتاح البحث : الخرسانة، المطاط، نعال الأحذية، الرسكلة.

RESUME

Les matières caoutchoutiques génèrent des déchets volumineux par rapport à leur poids, leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car leur biodégradabilité est, dans la plupart des cas, faible. Il y a donc lieu d'encourager leur recyclage.

Ce projet à pour but d'étudier la faisabilité de valorisation des déchets de caoutchouc en général (semelles des chaussures en particulier) dans le béton ; deux types des déchets de semelles des chaussures sont ajoutés dans le béton avec des pourcentages varient de 10 à 40% par rapport à la masse du sable, les propriétés à l'état frais (ouvrabilité, air occlus et densité) et durci (résistance à la compression, résistance à la traction, retrait) des différents bétons réalisés sont analysées et comparées, d'après les résultats expérimentaux, on peut conclure que l'ajout de ce type de déchet mène à une diminution des performances du béton.

Mots clés : Béton, caoutchouc, semelles des chaussures, recyclage.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Abstract

the rubber wastes generate bulky waste compared to their weight, their dissemination in nature is durable and unaesthetic because their biodeterioration is, in the majority of the case, weak. It is necessary thus to encourage their recycling.

This project with for goal of studies the valorization the rubber generally (boots insoles specially) waste recycling in the concrete. Two types of boots insoles waste are added in the concrete mass with percentages vary from 10 to 40% compared to the masses of sand. The properties in a fresh state (workability, air entrained, density) and hardened (compressive strength, tensile strength,) of the various concretes carried out are analyzed and compared. According to the experimental results we can conclude that the addition of this type of waste leads to a decrease in the concrete's performances.

Key words: concrete, rubber, boots insoles, recycling .

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

LISTE DES TABLEAUX

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Remerciement
Dédicaces
Résumés
Liste des tableaux
Liste des figures
Symboles et Abréviations

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1- Valorisation des déchets et activité de recyclage en construction.....3
I.1.1- Introduction.....3
I.1.2- Valorisation des déchets et sous produits industriels dans le génie civil.....3
I.1.2.1- Les déchets 3
A- Définition 3
B- valorisation.....4
C- Méthodes de valorisation.....3
I.1.2.2- Origine de la production de déchets.....4
I.1.2.3- Constitution chimique du déchet.....4
I.1.2.4- Types de déchets.....5
A. Les déchets biodégradables.....5
B. Les déchets ultimes.....5
C. Les déchets spéciaux et déchets industriels spéciaux.....5
D. Les déchets recyclables.....5
E. Déchets organiques.....6
I.1.2.5- Différents déchets utilisés en génie civil.....7
A. Déchets industriels dangereux mais non toxiques.....7
B. Déchets inertes.....7
C. Déchets toxiques.....8
D. Déchets industriels dans des conditions spécifiques.....8
E. Déchets ménager et assimilés.....8
F. Les déchets industriels banals 8
I.1.3- Activité du recyclage des déchets en construction.....9
I.1.3.1- Recyclage des déchets.....9
I.1.3.2- Technique de recyclage.....9
I.1.3.3- Type de recyclage.....10
I.1.3.4- Impacts du recyclage sur l'environnement.....11
I.2- Caoutchouc et déchets de caoutchouc.....12
I.2.1- Caoutchouc.....12
I.2.1.1- Définition.....12
I.2.1.2- Composition chimique d'un caoutchouc.....15
I.2.1.3- les types de caoutchouc.....19
A- les semelles des chaussures.....19
B- Pneumatique.....19

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

I.2.1.4- Propriétés matériels de caoutchouc.....20
A/ Propriétés physiques.....20
B/ Propriétiés mécaniques.....23
C/ Propriétés optiques.....24
I.2.2- les déchets de caoutchouc.....25
A/ Recyclage d'un caoutchouc.....26
B/ La valorisation d'un caoutchouc.....28
B.1/valorisation énergétique.....29
B.2/ La valorisation (chimique) : pyrolyse et dévulcanisation.....31
C- La filière de recyclage des pneumatiques usagés en France.....35
I.3- Le béton de déchets.....37
I.3.1- Matériau béton.....37
I.3.2- Bétons spéciaux.....39
I.3.2.1- Béton a haute performance.....39
I.3.2.2 Bétons auto-plaçant.....39
I .3.2.3- béton de déchets de caoutchouc.....40
I.3.2.3.1- Propriétés des bétons de déchets caoutchoucs.....40
A- Béton frais.....40
A.1- L'ouvrabilité.....40
A.2- La densité.....41
A.3- L'air occlus.....41
B- Béton durci.....42
B.1- Resistance à la compression.....42
B.2- Résistance à la traction par flexion.....45
B.3- Module d'élasticité.....46
B.4- Capacité de déformation.....47
B.5- Retrait.....48
B.6- Fragilité.....50
B.7- Propriétés de transfert.....51
B.7.1- Perméabilité.....51
B.7.2- Absorption d'eau.....53
B.8- Résistance au gel et dégel.....54
B.9- Résistance au feu.....55
II.4- Conclusion.....57

CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS

II.1- Introduction.....58
II.2- caractérisation des matériaux utilisés.....58
II.2.1- ciment.....59
II.2.2- granulats.....62
II.2.2.1- sable.....62
II.2.2.2- gravier 64
II.2. 3- Déchets de semelles des chaussures.....65
II.2.4- Eau de gâchage.....67
II.2.5- Adjuvant.....67

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

II.3- Formulation du béton.....67
II.4- Techniques expérimentales.....69
II.4.1- Mise en œuvre 69
II.4.2- Béton frais 70
A. L'Ouvrabilité 70
B. L'air occlus 70
C. La densité 71
D. Coulage et vibration 72
E. Mode de conservation 72
II.4.3- Béton durcis.....73
A. Résistance a la compression 74
B. Résistance à la traction par flexion 75
C. Retrait.....75
II.4.4- Variables étudiées 78

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATION

III.1- Introduction.....79
III.2- Béton frais..... 79
III.2.1- Ouvrabilité 79
III.2.2- Air occlus 82
III.2.3- Densité.....83
III.3- Béton durci.....84
- Les résistances mécaniques.....84
III.4-Approche de durabilité.....88
- Retrait.....88
III.5-Conclusion…….....89
Conclusion et recommandation……..90
Références bibliographique
Annexe.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

LISTE DES TABLEAUX

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1 : Valorisation de pneus usagés des pays développés.....**25**
Tableau I.2 : Filières de traitement et d'élimination des pneus usagés.....**26**
Tableau I.3: Pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI, de différents combustibles).....**29**
Tableau I.4: Deux exemples de produits obtenus après pyrolyse de pneumatiques.....**30**
Tableau I.5: Deux exemples de dévulcanisation de caoutchoucs vulcanisés au soufre.....**32**

CHAPITRE II : Matériaux et essais

Tableau II.1 : l'Analyse chimique du ciment et composition du clinker **60**
Tableau II.2 : Essai physiques sur ciment **61**
Tableau II.3 : Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge **61**
Tableau II.4: Propriétés physiques d'identification des sables utilisés.....**63**
Tableau II.5 : Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés **64**
Tableau II.6: composition des bétons **68**
Tableau II.7 : Essais de caractérisation sur bétons frais.....**70**
Tableau II.8 : Essais de caractérisation sur bétons durcis.....**73**

CHAPITRE III : Résultats et interprétations.

Tableau III.1 : les pourcentages de chute de la résistance de compression en fonction de pourcentage de l'ajout de déchets de semelles **87**

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

LISTE DES FIGURES

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Composition de base des déchets de démolition en Europe **7**
Figure I.2 : Récolte de latex…….....**13**
Figure I.3 : Hévéa…….....**13**
Figure I.4 : structure des monomères……......**16**
Figure I.5 : polymère linéaires.....**17**
Figure I.6 : chaine ramifiés.....**17**
Figure I.7 : polymère réticulés.....**17**
Figure I.8 : déchet de semelles des chaussures.....**19**
Figure I.9: Malgré une valorisation énergétique les stocks de pneus usagés et le risque qu'ils représentent restent élevés.....**20**
Figure I.10 : Formation d'un polymère plastique.....**21**
Figure I.11 : Les principaux groupes de polymères **22**
Figure I.12 : Différentes sollicitations mécaniques **23**
Figure I.13 : Comportement d'un matériau soumis à une contrainte mécanique.....**24**
Figure I.14 : Répartition des voies de valorisation des pneus usagés.....**35**
Figure I.15 : Réhabilitation de carrière par l'utilisation de pneus usagés.....**36**
Figure I.16: Le chantier Cannes-Mandelieu en 1988 avec la technique de Pneusol.....**37**
Figure I.17: Influence de G.C. sur l'affaissement.....**40**
Figure I.18 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des G.C.....**41**
Figure I.19 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus.....**42**
Figure I.20: Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des G.C. 0-4mm) **43**
Figure I.21 : Influence de l'adjonction de G.C. sur la résistance en compression.....**44**
Figure I.22 : Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au vidéo microscope, (grossissement x100) **45**
Figure I-23 : Variation du module d'élasticité du béton incorporant G.C. et de la fumée de silice.....**46**
Figure I.24 : Influence des G.C. sur le module d'élasticité.....**47**
Figure I.25 : Influence de l'incorporation de G.C. sur la capacité de déformation en traction directe.....**48**
Figure I.26: Evolution du retrait total des mortiers en fonctions du taux de substitution en G.C.....**49**
Figure I.28 : Evaluation de l'indice de fragilité.....**50**
Figure I.29 : Influence de G.C. sur l'indice de fragilité.....**51**
Figure I.30 : Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des G.C.....**52**
Figure I.31 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en G.C.....**53**
Figure I.32 : Evolution de l'absorption capillaire en fonction du taux d'incorporation et de la taille des G.C.....**53**
Figure I.33: Effet des G.C. sur la résistance au gel-dégel des matériaux à base cimentaire état des éprouvettes après 300 cycles de gel –dégel.....**54**

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Figure I.34 : Ecaillages à la surface des éprouvettes incorporant 0% et 3% du volume de G.C. après l'essai de résistance au feu.....**56**
Figure I.35 : Silhouette des éprouvettes après l'essai de résistance au feu.....**56**

CHAPITRE II : Matériaux et essais

Figure II.1 : Le ciment utilisé **62**
Figure II.2 : Sable roulé de BOUGHAZOULE.....**62**
Figure II.3 : Courbe granulométrique des sables utilisées **63**
Figure. II.4 : Gravier de Mont Guorno 3/8.....**64**
Figure II.5 : Gravier de Mont Guorno 8/15.....**64**
Figure II.6: Analyse granulométrie du gravier 3/8 et 8/15.....**65**
Figure. II.7: Les déchets de semelles des chaussures dures.....**66**
Figure. II.8: Les déchets de semelles des chaussures souples.....**66**
Figure. II.9: Courbes granulométriques du sable et du G.S.C.de classe (0/5) mm.....**67**
Figure II.10 Courbe de référence **68**
Figure II.11 : Malaxage du béton.....**69**
Figure II.12 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....**70**
Figure II.13: Aéromètre à béton frais **71**
Figure II.14 : Essai de L'air occlus **71**
Figure II.15 : Mesure de la densité du béton.....**71**
Figure II.16 : Fabrication des éprouvettes.....**72**
Figure II.17 : Conservation des éprouvettes à l'air libre.....**73**
Figure II.18 : Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20°C ± 2°C.....**73**
Figure II.19 : Presse hydraulique (2000 kN) **74**
Figure II.20 : Essai de compression.....**74**
Figure II.21 : Essai de traction par flexion **75**
Figure II.22: Réctractomètre.....**75**
Figure II.23 : Etalonnage de l'appareil.....**76**
Figure II.24 : Appareillage pour la mesure du retrait.....**77**
Figure II.25 : Variables étudiées.....**78**

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATION

Figure III.1 :L'affaissement des bétons BDSS avant de l'ajout de l'adjuvant…….....**79**
Figure.III.2 : L'affaissement des bétons BDSD avant de l'ajout de l'adjuvant……**80**
Figure III.3 :L'affaissement des bétons BDSS …….....**81**
Figure.III.4 :L'affaissement des bétons BDSD…….....**81**
Figure III.5: Air occlus des bétons BDSS.....**82**
Figure III.6: Air occlus des bétons BDSD.....**82**
Figure III.7 : Densité des bétons BDSS.....**83**
Figure III.8 : Densité des bétons BDSD.....**83**
Figure III.9 : Résistance à la compression des bétons BDSS **84**
Figure III.10: Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'ajout de déchets des semelles souples.....**84**
Figure III.11 : Résistance à la compression des bétons BDSD.....**85**

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Figure III.12 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'ajout de déchets des semelles dures.....**85**
Figure III.13 : Résistance à la compression des bétons BDSS.....**85**
Figure III.14: Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'ajout de déchets des semelles souples.....**86**
Figure III.15 Résistance à la traction des bétons à base des déchets de semelles dures (BDSD).....**86**
Figure III.16 : Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'ajout de déchets des semelles dures.....**86**
Figure III.17 : Effet des déchets de semelles souples (DSS) sur le retrait en air libre.....**88**
Figure III.18 : Effet des déchets de semelles dures (DSD) sur le retrait en air libre.....**88**

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Symboles et Abreviations

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

DIS Déchets industriels spéciaux

DMS Déchets ménagers spéciaux

D.I.B Déchets industriels banals

PE Le polyéthylène

PVC chlorure de polyvinyle

PEhd polyéthylène haute densité

PEbd polyéthylène basse densité

PP le polypropylène

PS le polystyrène

PET le polyéthylène téréphtalate

CaO La chaux

SiO_2 La silice

Al_2O_3 L'alumine

Fe_2O_3 L'oxyde de fer

$3CaO\ SiO_2$ (C_3S) Le silicate tricalcique impur (Alite)

$2CaO\ SiO_2$ (C_2S) Le silicate bi-calcique impur (Bélite)

$3CaO\ Al_2O_3$, (C_3A) L'aluminate tricalcique (Célite) :

$4CaO\ Al_2O_3\ Fe_2O_3$ (C4AF) L'alumino-ferrite tétra-calcique

(F) Les fillers

(P) Pouzzolanes naturelles

(D) Les fumées de silice

CPA Le ciment portland artificiel

CHF Ciment de haut fourneau

CPJ Le ciment portland composé

f_{c28} Résistance souhaitée du béton a 28 jours;

f_{mc} Résistance nominale du ciment;

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

C Dosage du ciment exprimé en Kg/m^3 ;

S sable

$\mathbf{R_t}$ La résistance a la traction

$\mathbf{R_C}$ La résistance a compression

K Coef ;

d Diamètre des fibres

P Pourcentage en volume des fibres

$\Delta\mathbf{L}$ Variation de longueur par apport à la longueur origine,

$\mathbf{L_0}$ Longueur de base, prise égale à 280mm.

$\Delta\mathbf{M}$ Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

M Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

M Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge

I Moment d'inertie de la section transversale

BT Béton témoin (sans déchets)

BDSS 10% Béton de déchets de semelles souples a 10%
BDSS 20% Béton de déchets de semelles souples a 20%

BDSS 30% Béton de déchets de semelles souples a 30%

BDSS 40% Béton de déchets de semelles souples a 40%

BDSD 10% Béton de déchets de semelles dures a 10%

BDSD 20% Béton de déchets de semelles dures a 20%

BDSD 30% Béton de déchets de semelles dures a 30%

BDSD 40% Béton de déchets de semelles dures a 40%

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)



INTRODUCTION GENERALE

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

L'évolution des mentalités et de la technique, avec les exigences en termes de protection de l'environnement de plus en plus contraignantes ainsi que la révision des repères économiques inspirés du développement durable font que le recyclage et la valorisation de sous produits industriels constituent désormais un souci qui s'impose de plus en plus à l'homme.

Partout dans le monde, le marché de la chaussure est un marché porteur. L'Algérie importe annuellement une moyenne de 70 millions des paires de chaussures et ne produit qu'un million de paires. Ces produits ayant une durée de vie très variable, dépendant de leur utilisation, mais aussi en grande partie des effets de mode, représentent en fin de vie un gisement annuel de déchets potentiel énorme qui reste à ce jour un chiffre inconnu. Actuellement une petite quantité des semelles des chaussures sont collectées par des particulières et recyclés dans la fabrication de nouvelles semelles mais la grande diversité de modèles et de matériaux utilisés dans la conception des chaussures rend leur recyclage difficile à mettre en œuvre. Cependant, le recyclage des chaussures usagées représente un réel enjeu sur la minimisation de leur impact en fin de vie ainsi que sur le plan économique, du fait de la valeur des matières contenues dans ces produits.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Composés de mélanges de caoutchoucs de semelles des chaussures, de textiles divers, les semelles usagées ne sont pas des déchets dangereux mais ils présentent un danger pour l'environnement et la santé en cas d'incendie sur le site de stockage (émissions de fumées toxiques et éventuellement d'un liquide huileux). L'expérience montre que l'incendie des pneumatiques devient rapidement non maîtrisable. Ainsi, les sites de stockage constituent un risque pour l'eau en surface, ainsi que pour l'eau souterraine. Ils représentent aussi un danger sanitaire car ils constituent un habitat privilégié des insectes.

En général, la moins chère et la plus simple des solutions pour décomposer les déchets ou les semelles de chaussures usagées est de les brûler. Cependant, la pollution et la quantité énorme de fumée produites par cette méthode est inacceptable et, dans certains pays il est interdit par des lois de procéder ainsi.

En conséquence, la valorisation de caoutchouc (semelles des chaussures) usagés est un sujet important pour la planète entière. Les voies de valorisation choisies sont largement diversifiées : la réutilisation, la granulation, la valorisation énergétique notamment comme combustible dans les cimenteries et l'utilisation en travaux publics se sont partagés les stocks de caoutchouc.

Par ailleurs, les matériaux cimentaires présentent, en général, une faible résistance à la traction ainsi qu'une grande fragilité. Leur faible capacité de déformation les rend très sensibles à la fissuration résultant de variations dimensionnelles. Dans le cas des grandes surfaces, ces variations dimensionnelles sont essentiellement dues au retrait. Afin de localiser la fissuration et de limiter le désordre apparent, il est alors nécessaire de mettre en place des joints de retrait qui constituent une réponse partielle au problème dans le cas des dalles de béton. Leur mise en œuvre est contraignante et ils constituent également des points d'amorce de futures dégradations (infiltration, tuilage, rupture, etc.).

Il y a une décennie qu'une équipe des chercheurs tente de développer un matériau cimentaire suffisamment déformable pour ne pas se rompre sous les effets du retrait.

Ce composite cimentaire contient des particules, morceaux ou granulats en caoutchouc issus du broyage des pneus usagés. Les granulats en caoutchouc sont utilisés en remplacement partiel des granulats naturels. La présence des granulats en caoutchouc induit une relaxation des contraintes, confère au composite une capacité d'absorber l'énergie accompagnant la fissuration et une plus grande capacité de déformation du béton, réduisant ainsi fortement le risque de fissuration des dalles. En contrepartie, il a été observé une baisse des performances mécaniques comme les résistances en compression, en traction, etc. du matériau cimentaire.

Ce matériau est particulièrement intéressant pour les grandes surfaces tel que les dallages et chaussées en béton dans les travaux publics car il permet de limiter le nombre de joints de dilatation, de simplifier la mise en œuvre, tout en augmentant la durabilité de l'ouvrage. Nous nous proposons donc d'en évaluer l'intérêt technique en complétant leurs compositions et caractéristiques.

Enfin, ce projet vise à valoriser ce type de déchets par l'incorporation des granulats et poudres issus de son broyage dans le béton. Un protocole expérimental sera dégagé pour pousser d'avantage d'investigations dans ce sens.

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)



Chapitre I

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Référence bibliographique

I.1- Valorisation des déchets et activité de recyclage en construction :

I.1.1- Introduction :

Le recyclage n'est pas un luxe ou une mode mais une nécessité, qui provient d'une constatation forte simple : nous vivons dans un monde limité.

S'il n'est pas possible de supprimer la production de déchets, sous produits ou résidus industriels ou urbains, il convient alors de définir les meilleures conditions de valorisation.

Presque toutes l'activité industrielle portant atteinte aux ressources naturelles et dégradant l'environnement, le recyclage et la valorisation des déchets est un devoir autant qu'une nécessité **[1].**

En effet, pour des raisons économiques, règlementaires, commerciales et environnementales, la valorisation des déchets (industriels, municipaux et de l'industrie de construction) dans le béton, est en cours de développement ces dernières années dans plusieurs pays développés.

I.1.2- Valorisation des déchets et sous produits industriels dans le génie civil :

I.1.2.1- Les déchets :

A – Définition :

Un **déchet** se définit simplement par un objet en fin de vie ou une substance issue d'un processus, jugés devenus inutiles, dangereux ou encombrants, et dont on veut se débarrasser.

Tout objet qui doit être jeté car il est cassé, usé, contaminé, ou abimé d'une manière ou d'une autre, pour certains, sera qualifié de déchet, mais ne sera pas nécessairement considéré comme tel par les autres **[1]**.

B - Valorisation :

La **valorisation** est définie comme "L'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances."**[2]**.

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traitabilité. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir».

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

C- Méthodes de valorisation :

C.1- Valorisation matière :

Elle est appelée également, recyclage mécanique, il s'agit de l'opération globale consistant à la production d'une nouvelle matière à partir d'un déchet **[2]**.

C. 2-Valorisation énergétique :

Elle est appelée également, recyclage énergétique, elle vise la production d'énergie calorifique Plusieurs techniques permettent d'atteindre cet objectif dont les plus connus sont l'incinération, la pyrolyse ou la thermolyse. Cette énergie calorifique peut être utilisée sur place ou transformée par la suite en énergie électrique, en fonction des besoins du moment ou du lieu de traitement **[2].**

C.3- Valorisation chimique :

Il s'agit de tout processus chimique permettant la transformation d'un déchet en des produits chimiques utilisables comme intermédiaires réactionnels dans l'industrie chimique.

Demo (visit http://www.apexsofts.com)

I.1.2.2- Origine de la production de déchets :

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

• **biologiques** : tout cycle de vie produit des métabolites ;

• **chimiques** : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;

• **technologiques** : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;

• **économiques** : les produits en une durée de vie limitée ;

• **écologiques** : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;

•**accidentelles** : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

I.1.2.3- Constitution chimique du déchet :

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est

pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux **[3]**.

I.1.2.4- Types de déchets :

On distingue plusieurs types des déchets :

A- Les déchets biodégradables :

Résidus verts, boues d'épuration des eaux, restes alimentaires…, qui s'assimilent en première approche à la biomasse. Ces déchets sont au moins pour partie détruits naturellement, plus ou moins rapidement, en général par les bactéries, champignons et autres micro-organismes et/ou par des réactions chimiques (oxydation, minéralisation), laissant des produits de dégradation identiques ou proches de ceux qu'on peut trouver dans la nature, parfois néanmoins contaminés par des résidus de pesticides, de métaux, dioxines, etc. ,selon leur origine. Ils peuvent être revalorisés par différentes filières (bioénergie, biocarburants, Compostage / amendements / engrais…)

B- Les déchets ultimes :

Tout déchet ménager et assimilé brut issu du ramassage parallèle à la collecte sélective, le refus de tri, le déchet industriel banal issu des ménages et des déchetteries ainsi que les boues de stations d'épuration.

Outre les déchets ultimes : « ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment». Eux seuls devraient encore pouvoir être mis en décharge **[1].**

C- Les déchets spéciaux et déchets industriels spéciaux :

À la différence du déchet banal peuvent entrer dans la catégorie des déchets dangereux, dont font partie les déchets toxiques et les déchets radioactifs qui doivent faire l'objet d'un traitement tout à fait particulier en raison de leur nocivité particulière liée à la radioactivité. Parmi les déchets nucléaires, on distingue les déchets radioactifs ultimes **[1]**.

D- Les déchets recyclables :

Matériaux de construction, métaux, matières plastiques : ces matériaux peuvent être réutilisés tels quels dans d'autres domaines ou recyclés : par exemple, les métaux sont refondus et réintégrés dans de nouvelles pièces, les plastiques sont hachés et servent de rembourrage ou de combustible …

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

On s'intéresse sur les déchets de métaux (fer, aluminium, plomb,…) qui possèdent une valeur marchande et qui se présentent sous 3 formes:

1- les objets métalliques en fin de vie (moteurs, outils, canalisations, câblages...)

2- les composés métalliques destinés à être traités pour en extraire le métal contenu catalyseurs de pots d'échappement,…).

D.1- Déchets usuels inertes :

Les déchets usuels inertes sont produits par les ménages et les industries. Ils forment la part la plus large des déchets recyclables. Ils sont souvent simples à collecter et à transformer. Ils sont peut dangereux. En revanche, ils représentent des volumes importants à transporter et à stocker.

D.2- Déchets usuels non inertes :

Les plus connus de ces déchets sont les huiles et les peintures. L'incinération avec valorisation énergétique est un des procédés employés pour les recycler. Elle permet la production d'énergie et la destruction des déchets peu combustibles **[1]**.

D.3- Déchets industriels dangereux :

L'industrie produit une grande quantité de déchets dangereux. Ce sont pour la plupart des produits comprenant des substances chimiques toxiques ou instables. Les déchets toxiques sont dangereux pour la santé et pour l'environnement. La manipulation de déchets instables entraîne des risques d'accidents graves **[1]**.

D.4- Déchets toxiques en quantités dispersées :

Certains déchets toxiques sont mélangés en faible quantité à des produits non polluants. Il est alors impossible de recycler ces produits sans les avoir débarrassés des déchets toxiques.

E- Déchets organiques :

Les termes suivants recouvrent la même notion : bio déchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères). Il s'agit de :

- déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts).
- déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc.…

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

I.1.2.5- Différents déchets utilisés en génie civil :

En général les déchets sont classés en cinq catégories comme illustrés ci –dessous ; bien que les déchets utilisables en génie civil soient les déchets inertes, les déchets ménagers et les déchets en sous produits industriels dans des conditions spécifiques **[2]**.

A- Déchets industriels dangereux mais non toxiques :

Ce type de déchets regroupe généralement ;

• Des déchets de fer, de cuivre, de plomb,

• Des déchets contenant des fibres d'amiante,

• Des produits de préservation du bois,

• Des déchets solides dangereux de construction et de démolition de bâtiment à caractère industriel.

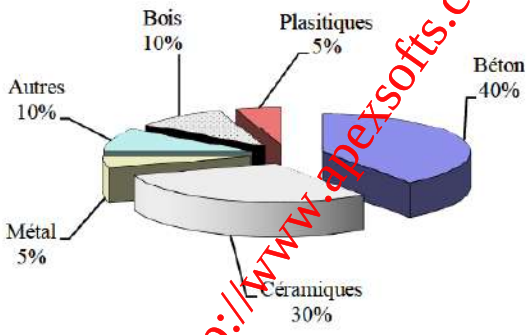


Figure I.1 : Composition de base des déchets de démolition en Europe (2004) **[4]**.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

B- Déchets inertes :

Ce sont des déchets non susceptibles d'évolution physique, chimique ou biologique importante. Ils sont essentiellement constitués de déblais et gravats et ne doivent pas être mélangés avec d'autres déchets. Les dépôts de déchets inertes sont souvent à l'origine de décharges sauvages **[1].**

Ce type de déchets regroupe :

• Des déchets solides de construction et de démolition des bâtiments à caractère d'habitation situé ou non sur un site industriel.

• Des déchets solides et inertes de travaux routiers,

• Des éléments en béton, mortier de ciment et béton,

• Des terres de déblais non contaminées.

C- Déchets toxiques :

Ils sont à caractère industriel et obtenus en général après traitement chimique des matériaux synthétiques.

Certains déchets toxiques sont mélangés en faible quantité à des produits non polluants. Il est alors impossible de recycler ces produits sans les avoir débarrassés des déchets toxiques **[2]**.

D- Déchets industriels dans des conditions spécifiques :

Ils proviennent d'industries générant de très grandes quantités de déchets en sous produits industriels, dont les caractéristiques sont bonnes et relativement stables (cendres volantes les scories d'aciéries, le laitier, les cendre volante, etc.) **[2]**.

E- Déchets ménager et assimilés :

Ce type de déchets regroupe **[3]** :

• Des déchets en matériaux de synthèse,

• Des déchets solides non dangereux de construction ou de démolition de bâtiment à caractère industriel.

• Déchets volumineux ou "encombrants" soit collectés en porte à porte, soit réceptionnés dans une installation mise à la disposition des ménages.

• Déblais et gravats produits par les ménages réceptionnés dans des déchetteries ou des dépôts réservés aux seuls déchets inertes.

• Déchets ménagers spéciaux (DMS) ne pouvant en raison de leur danger être éliminés sans risques avec les déchets ménagers. Ils sont réceptionnés dans des déchetteries équipées à cet effet.

• Déchets végétaux issus de l'habitat pavillonnaire.

• Déchets de l'automobile (huiles, épaves, batteries, pneus, …).

• Des déchets commerciaux, emballages et autres résidus générés par les activités commerciales comme les déchets plastiques, **déchet de semelles des chaussures.**

F- Les déchets industriels banals (D.I.B.) :

Appelés quelquefois déchets industriels assimilés aux déchets ménagers, sont constitués de déchets non dangereux et non inertes. Ils contiennent effectivement les mêmes composants que les déchets ménagers mais en proportions différent **[4]**.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

I.1.3- Activité du recyclage des déchets en construction :

I.1.3.1- Recyclage des déchets :

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent.

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient.

Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés **[5]**.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

I.1.3.2- Technique de recyclage :

A- Procédés du recyclage :

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- Le recyclage dit « **chimique** » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets,par exemple pour séparer certains composants.
- Le recyclage dit « **mécanique** » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.
- Le recyclage dit« **organique** » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

B- La chaîne du recyclage :

a- Collecte de déchets :

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets.
Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement technique.
Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même.
À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations **[6]**.

b- Transformation :

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

c- Commercialisation et consommation :

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés.
Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

I.1.3.3- Type de recyclage :

On peut distinguer trois types de recyclage **[7]**:

A- **Le recyclage in situ** : les installations de recyclage sont mobiles et il s'effectue sur le chantier de démolition ;

B- **Le recyclage sélectif** : il est choisi lorsque les matériaux de démolition sont homogènes

C- **Le recyclage en site fixe** : les matériaux de démolition sont acheminés vers des installations montées en permanence sur un même site. L'avantage du premier type de recyclage consiste en la réutilisation immédiate des déchets. De plus, le transport n'intervient pas dans le coût des granulats. Dans le domaine routier, par exemple la nouvelle chaussée est réalisée à partir du matériau de recyclage de l'ancienne chaussée. L'Allemagne et l'Angleterre possèdent plus d'installations mobiles que fixes.

Demo (Visit http://www.apxsofts.com)

Le deuxième type de recyclage nécessite que les quantités stockées soient suffisantes.

Le troisième type de recyclage s'effectue dans des conditions industrielles.

La nature spécifique des matériaux de démolition et de construction, un certain nombre d'opérations sont ajoutées aux fonctions traditionnelles de concassage-criblage :

· Stockage sélectif des matériaux réceptionnés ;

· Prétraitement : réduction des gros éléments, cisaillage des ferraillages ;

· Dé ferraillage (magnétique) : il peut être effectué en deux phases, l'une à la sortie du premier broyeur et la seconde après le criblage ;

· Des tris manuels et mécaniques pour la récupération des papiers, des bois, des plastiques, etc. : il existe différents systèmes de séparation et de tri, en fonction des éléments à retirer (épuration par flottaison, tables densimétriques, séparation au moyen d'un courant d'air, etc.)

I.1.3.4- Impacts du recyclage sur l'environnement :

La récupération des déchets touche deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande **[7]**.

Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

• l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;

• chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;

• le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;

• l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).

• chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;

• chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois.

Demo (Visit http://www.anexsoft.com)

I.2- Caoutchouc et déchets de caoutchouc :

I.2.1- Les caoutchouc :

I.2.1.1- Définition :

Avant de se pencher sur les problèmes liés au recyclage des déchets de caoutchouc, la définition du terme ’’caoutchouc’’ permet de mieux appréhender les difficultés liées à la nature même de ces matériaux.

Est considéré comme « caoutchouc » un matériau souple (faible rigidité), hautement déformable (pouvant atteindre de grands allongements avant rupture) et élastique (récupération de la forme initiale). Ce caoutchouc appartient à la famille des polymères, comme les matières plastiques ou certains produits naturels tels que le coton, la laine, la soie ou le bois. Chaque molécule de polymère est constituée d'une longue chaîne de monomères, tous identiques. Dans le cas du caoutchouc, les chaînons monomères peuvent s'articuler librement les uns avec les autres, à la température ambiante : la chaîne est alors très flexible ; elle bouge constamment de façon désordonnée et tend spontanément à se pelotonner au cours de ses mouvements. Il faut alors exercer une certaine force à ses extrémités pour l'étirer : elle se comporte comme un ressort. Un morceau de caoutchouc brut est constitué par un très grand nombre de chaînes enchevêtrées les unes dans les autres. Si l'on étire légèrement un morceau de caoutchouc brut, chaque ressort, chaque chaîne s'allonge. Après relâchement, le matériau retrouve pratiquement sa forme initiale ; il est donc élastique. Si ce même morceau de caoutchouc est soumis à une élongation plus importante et s'il est maintenu ainsi un certain temps, les chaînes, en dépit de l'enchevêtrement, auront tendance à glisser les unes par rapport aux autres ; après cessation de la contrainte, le morceau de caoutchouc ne reprendra pas sa forme initiale : il a donc aussi un certain comportement plastique. Pour obtenir un matériau vraiment élastique, c'est-à-dire qui retrouve intégralement sa forme originelle après déformation, il faut empêcher les chaînes de glisser les unes par rapport aux autres en les reliant entre elles par des nœuds, des ponts, constituant ainsi une sorte de filet, un réseau. La vulcanisation, cuisson à chaud, est l'opération qui consiste à créer des liaisons chimiques en ponts de sorte que l'enchevêtrement de chaînes séparées devienne un réseau tridimensionnel unique. Le caoutchouc reste alors élastique tout en conservant une certaine plasticité.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

A / Le caoutchouc naturel:



Figure I.2 :récolte de latex

Le caoutchouc naturel provient du latex d'un arbre d'origine amazonienne, l'Hevea brasiliensis. Ce latex est contenu dans un réseau de fins canaux reliés entre eux, logés dans l'écorce de l'arbre, le manteau laticifère. Le latex coule de l'arbre après saignée, c'est-à-dire à la suite d'une incision faite en enlevant au moyen d'un couteau ou d'une gouge un fin ruban d'écorce suivant une spirale descendante couvrant généralement une demi-circonférence du tronc. Il s'écoule pendant 2 à 4 heures dans un récipient. C'est un liquide blanc, laiteux qui contient 1/3 environ de cis-polyisoprène, 10 % d'éléments minéraux et organiques, le reste étant de l'eau. Produit très instable s'il n'est pas préservé par des produits chimiques appropriés, il coagule spontanément. Quelle que soit sa présentation, solide ou liquide, il est transporté en usine, où il subit un traitement chimique, mécanique et thermique.

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)

Liquide, il est soit conservé sous forme de latex et centrifugé jusqu'à élever sa teneur en caoutchouc à 60 %, soit coagulé artificiellement au moyen d'acide formique ou d'acide acétique dilué. Dans ce cas, on obtient un coagulum, sorte de fromage blanc élastique, gorgé d'eau, qui est découpé en feuilles ou en granulés et lavé avant d'être séché et parfois fumé. Après pressage, le produit sec est livré sous forme de balles. S'il résulte de la coagulation naturelle du latex, il est découpé en granulés, lavé énergiquement, séché et pressé en balles.



Figure I.3 : Hévéa

Une plantation d'un hectare d'hévéas sélectionnés peut produire actuellement 2 000 kg par an, soit 5 à 7 kg par arbre suivant l'âge et la densité. L'exploitation d'un arbre commence 5 à 7 ans après sa plantation et dure 25 à 30 ans.

Si le caoutchouc naturel subit aujourd'hui la concurrence, parfois âpre, des élastomères de synthèse, il conserve une place privilégiée (1/3 du marché du caoutchouc) grâce à un ensemble de propriétés spécifiques : faible échauffement interne au roulement (pneus d'avion et de poids lourds) ; haute qualité d'amortissement des vibrations et du bruit ; haute résistance au déchirement et à la propagation d'entaille ; aptitude au collage et résistance à cru élevées ; adhésivité. Les points faibles du caoutchouc naturel sont une résistance médiocre aux huiles, aux carburants ainsi qu'au vieillissement par la chaleur, l'air, l'oxygène et l'ozone.

B / Les élastomères de synthèse [8] :

L'industrie chimique est capable aujourd'hui de produire une grande diversité de monomères dérivés du pétrole et de synthétiser des molécules en chaîne par addition ou condensation d'un, de deux, de trois ou de séquences de ces monomères : polymères, copolymères, terpolymères, polymères séquencés. Les caoutchoucs synthétiques, ou élastomères de synthèse, appartiennent à de nombreux types chimiques. L'ingénieur dispose d'une palette étendue d'élastomères, dont chacun a ses avantages, ses inconvénients et son domaine particulier d'utilisation. On a l'habitude de répartir les élastomères de synthèse en deux classes : pour usage général ou pour usages spéciaux.

Les élastomères à usage général ont des propriétés suffisamment équilibrées et ils sont en même temps assez bon marché pour être utilisés en tonnages importants dans leurs domaines d'application. Le copolymère de styrène et de butadiène SBR est l'élastomère le plus répandu dans le monde ; il sert à la fabrication de certaines parties des pneumatiques, des courroies, des tuyaux, des dallages « en caoutchouc », des envers de tapis et moquettes. Le polyisoprène de synthèse IR est la réplique chimique du caoutchouc naturel. Il en possède presque toutes les propriétés mais son prix est plus élevé. Le polybutadiène BR, en mélange avec d'autres élastomères, entre dans la confection de certaines parties des pneumatiques (flancs, bandes de roulement) car il confère une bonne résistance à l'abrasion et à la fatigue. Le polychloroprène CR, résistant bien à la corrosion, est utilisé en câblerie, pour la confection de certains joints et la réalisation de feuilles étanches (toitures, réservoirs d'eau). Le copolymère d'éthylène et de propylène sert à la fabrication, entre autres, des joints de pare-brise et de portières d'automobile car il résiste à l'ozone et à la lumière.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

Dans les élastomères à usages spéciaux, des propriétés spécifiques ont été développées au détriment de l'équilibre général et souvent sans tenir compte du prix. Ils sont réservés aux applications de haute technologie, dans les transports, l'air et l'espace. Il en est ainsi des caoutchoucs butyl IIR et butyl halogénés, imperméables aux gaz et résistants à la chaleur ; des copolymères d'acrylonitrile et de butadiène, du caoutchouc nitrile NBR et des caoutchoucs nitriles hydrogénés, des caoutchoucs de polysulfure, des élastomères fluorés, résistants aux huiles et aux carburants à moyenne et haute températures ; des élastomères silicones SI, résistant à des températures comprises entre − 100 et + 300 °C.

Enfin, il existe des élastomères thermoplastiques, solides et élastiques à température ambiante, plastiques à température élevée. Leur mise en œuvre est réversible alors que la vulcanisation est un phénomène irréversible. Ils sont utilisés pour des applications très spécialisées, à la limite d'emploi des matières plastiques.

I.2.1.2- Composition chimique d'un caoutchouc [9]:

La principale étape dans la mise en œuvre de ces matériaux consiste à effectuer des pontages entre les macromolécules afin de former un réseau tridimensionnel stable, nécessaire pour limiter le fluage et obtenir des propriétés physiques intéressantes. Cette étape, appelée vulcanisation ou réticulation, est une réaction chimique irréversible qui rend complexe le recyclage des caoutchoucs et les différencie des matériaux dits (thermoplastiques) qui peuvent être refondus et retransformés avec peu d'altérations.

Les élastomères apportent les propriétés de base à un matériau mais ne sont jamais utilisés seuls, il est nécessaire d'y adjoindre des additifs pour obtenir des propriétés optimales: on parle de formulation. De façon générale, on peut classer les différents ingrédients d'une formulation en neuf catégories :

- 1'élastomère: c'est l'élément principal, il peut s'agir d'un polymère élastomère seul ou d'un mélange avec d'autres polymères élastomères ou thermoplastiques,
- les agents de vulcanisation sont des réactifs permettant la réaction de vulcanisation, les plus courants sont le soufre et les peroxydes organiques,
- les accélérateurs de vulcanisation permettent d'augmenter la vitesse de vulcanisation ; la durée de la réaction étant réduite, les propriétés physiques sont, en général, améliorées,
- les activateurs de vulcanisation forment un complexe avec les accélérateurs et favorisent ainsi la réaction. Ces trois derniers ingrédients, dont le choix dépend de la nature de l'élastomère, sont souvent réunis sous le terme de < système de vulcanisation >,
- les charges sont utilisées pour renforcer ou modifier les propriétés physiques, ou encore pour réduire les coûts. Les plus courantes sont le noir d€ carbone et la silice,
- les agents de protection (antidégradants : antioxydants, antiozonants...) limitent le vieillissement des vulcanisats,

-les agents de mise en œuvre: comme leur nom l'indique, ils facilitent les différentes étapes de la mise en œuvre (mélangeage, extrusion, calandrage, moulage),

-les plastifiants facilitent le mélangeage et permettent d'ajuster les propriétés des vulcanisats,

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)

- d'autres ingrédients peuvent être utiles : retardateurs de vulcanisation, colorants ou pigments, agents ignifugeants, odorants, gonflants (caoutchoucs alvéolaires), agents d'adhérisation (métaux, tissus, fibres...).

L'élastomère et les charges représentent couramment 80 à 90Vo en masse de la formulation.

On cite que :

Les matières de caoutchouc sont composées en générale en trois composants qui sont :

- Résine de base (polymères).
- Adjuvants.
- Additifs.

Matière de caoutchouc = résine de base + adjuvants + additifs

A-résine de base

Les résines de base qui formé les matières plastiques sont le **polymère.**

✓ ***Polymère***

Enchainement répété d'un même motif que l'on appelle le **monomère.**

- **Monomère**

Molécules de faible masse atomique constituées généralement d'atomes de carbone (ex : C_2H_4)

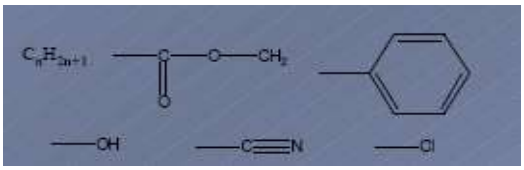


Figure I.4 : Structure des monomères

✓ ***Structure des polymères (macromolécules)***

La soudure des groupes moléculaires du monomère peut donner naissance à trois types principaux de macromolécules :

- Polymères linéaires.
- Polymères ramifiés.
- Polymères réticulées

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

- **Polymères linéaires**

Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliés les uns à la suite des autres par des liaisons chimiques. Dans certains cas, les monomères sont en outre organisés régulièrement dans l'espace, et le composé obtenu est partiellement cristallisé : on dit qu'il est semi-cristallin **[8]** .

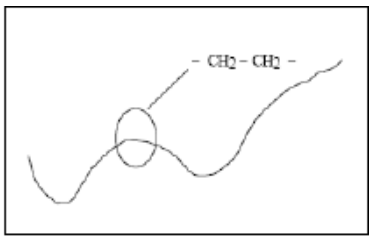


Figure I.5 : polymère linéaires

Exemples : Le polyéthylène (PE), l'alcool polyvinylique et le chlorure de polyvinyle (PVC)

- **Polymères ramifiés**

Un polymère linéaire qui, dans certains cas, présente des « accidents » de polymérisation conduisant à des branchements, est qualifié de **ramifié**.

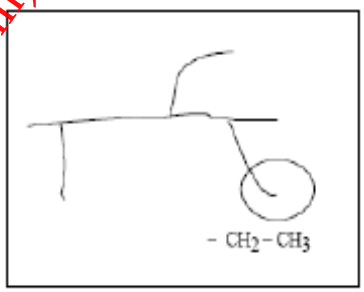


Figure I.6: Chaine ramifiés

- **Polymères réticulés (tridimensionnels)**

Certaines molécules peuvent se lier entre elles, elles se nomment alors **réticulées**.

Il s'agit d'un pontage entre les chaînes.

Le plus souvent, ces liaisons sont tridimensionnelles,

C'est-à-dire qu'elles se développent dans les trois directions de l'espace, donnant une structure en volume (parfois bidimensionnelles, ne se développant que dans un plan). Il arrive que la totalité de la masse, une pièce entière par exemple, ne forme qu'une seule macromolécule **[8]** .

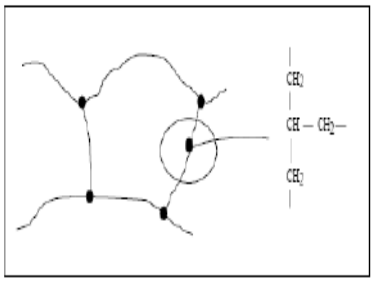


Figure I.7 : Polymères réticulés.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

B. Adjuvants

B.1 Anti-oxygène

Ils sont utilisés dans la plupart des polymères hydrocarbonés, en particulier PE, PP, caoutchoucs et copolymères divers. Ils sont utilises en concentration généralement inférieure à 1 % (sauf le noir de carbone) et dans ces conditions, ne modifient pas sensiblement la couleur et les propriétés physiques des polymères. Leur but est de retarder l'oxydation thermique au cours de la transformation et de l'utilisation **[8]** .

B.2 Plastifiants

Ils diminuent la rigidité. Ils permettent la mise en forme à des températures inférieures à la température de décomposition de certains polymères linéaires.

B.3 Stabilisants

Ces produits permettent de réduire les phénomènes de vieillissement dus à la chaleur, les UV, etc.

C -Les additifs aux résines

Ce sont en général des produits organiques qui, ajoutés aux polymères, modifient leurs propriétés chimiques et physiques :

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

C.1 Pigments et colorants

Selon que l'on désire colorer un produit opaque ou transparent, on utilise un pigment insoluble ou soluble.

C.2 Lubrifiants

Ils améliorent l'écoulement des polymères lors de leur mise en forme.

C.3 Ignifugeants

Ils améliorent la résistance au feu.

I.2.1.3- Les types de caoutchouc :

A- Les semelles des chaussures :

Le marché de la chaussure dans le monde est un marché porteur. la consommation de chaussures par les ménages français atteignait 350 millions de paires, soit une moyenne de plus de 5 paires de chaussures par an et par habitant, Par contre. L'Algérie importe annuellement une moyenne de 70 millions des paires de chaussures et ne produit qu'un million de paires. Ces produits ayant une durée de vie très variable, dépendant de leur utilisation, mais aussi en grande partie des effets de mode, représentent en fin de vie un gisement annuel de déchets potentiel énorme qui reste à ce jour un chiffre inconnu. Actuellement une petite quantité des semelles des chaussures sont collectées par des particulières et recyclés dans la fabrication de nouvelles semelles, mais la grande diversité de modèles et de matériaux utilisés dans la conception des chaussures rend leur recyclage difficile à mettre en œuvre. Cependant, Les temps ont bien changé. La volonté d'améliorer l'environnement par le besoin d'un cadre de vie plus agréable, le poids de plus en plus important de l'écologie. ont amené les pouvoirs publiques 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.. [9]

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)



Figure I.8 : déchet de semelles des chaussures**. [9]**

B- Pneumatique :

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.

Comme le montre les statistiques **[9],** c'est en grande partie comme combustible (valorisation énergétique), essentiellement dans les fours des cimenteries que le pneu usagé termine sa course. De l'autre côté, la **Figure** I.9 montre que le stockage est important ce qui peut entraîner les risques associés (incendie, etc.).



Stock de pneus usagés à Campsas, Tarn-et-Garonne en 2007 [10].



Incendie sur le site de stockage de pneus usagés, Stanislaus county, CA. [11].

Figure I.9 : Malgré une valorisation énergétique les stocks de pneus usagés et le risque qu'ils représentent restent élevés. **[9]**

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

I.2.1.4- Propriétés matière de caoutchouc [12]:

A / Propriétés physiques :

En fonction de la structure physique des polymères, on peut les classer en quatre types d'état :

* **l'état amorphe**, dans lequel les arrangements moléculaires n'ont pas d'ordre prédéfini. Les macromolécules ont enchevêtrées en pelotes. Cette absence d'ordre engendre une absence de point de fusion, l'existence d'une température de transition vitreuse qui marque le passage d'un état vitreux (où le matériau se comporte comme un verre, c'est-à-dire dur et cassant) à un état caoutchoutique (où les chaînes peuvent glisser plus facilement), ainsi qu'une transparence dans le visible comme cela est le cas du polystyrène « cristal » ou du poly (chlorure de vinyle) « cristal » qui sont tous deux amorphes.

* **l'état amorphe orienté**, où les arrangements moléculaires sont tous orientés dans la même direction.

- l'état cristallin, caractérisé par un arrangement organisé des molécules. Les chaînes s'organisent de façon ordonnée et compacte. Le cristal polymère est décrit par son réseau et son motif. Le réseau caractérise la périodicité dans les trois directions de l'espace. Les principales caractéristiques de l'état cristallin sont une compacité supérieure à celle de la phase amorphe, l'existence d'un point de fusion et l'absence de transition vitreuse, une rigidité supérieure à celle de la phase amorphe.

* **l'état semi cristallin**, qui associe à la fois un arrangement organisé et des zones amorphes **Figure** 1.10.

On rencontre généralement soit des polymères amorphes, soir des polymères semicristallins.

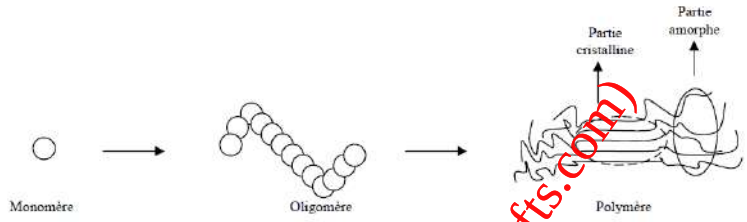


Figure I.10 : Formation d'un polymère **[9].**

On distingue deux groupes de polymères synthétiques **Figure** I.11 en fonction de leurs structures et de leurs comportements à température ambiante :

* **les thermoplastiques**, qui sont des composés formés par addition et fondent lorsqu'on les chauffe. Ce sont des matières transformables à l'état fondu. Dans la plupart des procédés de fabrication, les thermoplastiques sont chauffés, puis formés par moulage, injection, extrusion ou thermoformage, avant d'être refroidis afin que le produit fini conserve sa forme. On trouve aujourd'hui de nombreux types de thermoplastiques offrant une vaste gamme de propriétés intéressantes. On peut les rendre aussi souples que le caoutchouc, aussi rigides que le métal et le béton, ou aussi transparents que le verre, pour un usage dans de nombreux produits de tuyauterie et autres composants. Certains d'entre eux peuvent supporter des températures atteignant 315 °C. D'autres conservent leurs propriétés jusqu'à -73 °C. Ils ne s'oxydent pas, ont une haute résistance à la corrosion et sont d'excellents isolants thermiques et électriques. De par leur légèreté, leur haute résistance mécanique et leur résistance aux effets de l'environnement, les thermoplastiques constituent un matériau idéal pour de très nombreuses applications. Dans cette catégorie de polymères, on distingue entre autres le polyéthylène basse et haute densité (PE), le polystyrène (PS), le polychlorure de vinyle (PVC), le polypropylène (PP), le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), le polyamide (PA), le polycarbonate (PC), les polyesters saturés, …

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

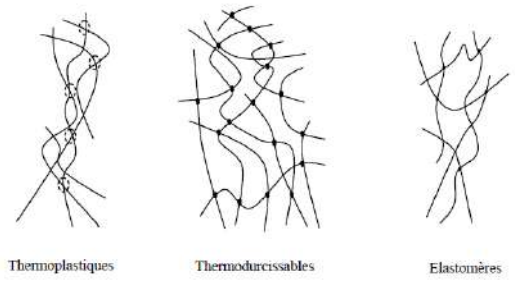


Figure I.11 : Les principaux groupes de polymères **[9].**

- les polymères réticulés à structure tridimensionnelle, subdivisés en deux catégories : les thermodurcissables à haut degré de réticulation et les élastomères. Les thermodurcissables durcissent quand on les chauffe. Ils sont très employés comme pièces de structure thermostable. On les met en forme lorsqu'ils sont encore à l'état mou. Les réticulations et pontages ont lieu dans toutes les directions, empêchant tout ordre d'orientation, provoquant l'isotropie du matériau. Cela ressemble à un enchevêtrement de lianes s'accrochant les unes aux autres par des tentacules en de multiples points. Ils sont généralement utilisés dans l'automobile, l'aéronautique, l'aéronavale, les équipements de ski, … On distingue les polyesters insaturés, les résines phénoliques ou les résines époxy. Les élastomères, quant à eux, sont aussi appelés caoutchouc. Ils peuvent être étirés de plusieurs fois leur longueur d'origine, et reprennent leur forme initiale sans déformation permanente. Les molécules de ces polymères sont désordonnées. Les élastomères possèdent une excellente capacité d'absorption des chocs. Ils sont utilisés dans la fabrication des pneumatiques, des matelas, des semelles de chaussures.

Beaucoup de polymères thermoplastiques ont une structure amorphe. On peut citer le polystyrène atactique, le poly (méthacrylate de méthyle), le polychlorure de vinyle ou le polyéthylène base densité. D'autres comme le polyéthylène haute densité, le polypropylène ou le polyamide, par contre, sont semi-cristallins. Les thermodurcissables sont généralement amorphes car les réticulations et pontages ont lieu dans toutes les directions empêchant tout ordre d'orientation, ce qui provoque l'isotropie du matériau. Une autre catégorie d'amorphes est constituée par les élastomères. Ce sont des caoutchoucs tels que le polyisoprène (caoutchouc naturel et synthétique) et le polybutadiène.

Demo (Visit http://www.pevsofts.com)

B / Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques décrivent le comportement des matériaux soumis à des sollicitations mécaniques telles que des pressions, des étirements, des torsions, des frottements, des cisaillements, des chocs ou sous l'effet de la pesanteur **Figure** 1.12. Elles dépendent fortement du type de contrainte appliquée.

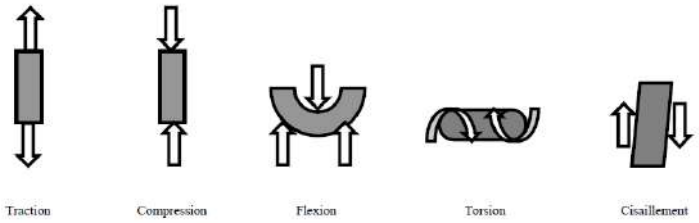


Figure I.12 : Différentes sollicitations mécaniques **[9].**

C'est la structure du réseau résultant de l'enchevêtrement des chaînes qui confère aux polymères leurs propriétés mécaniques les plus importantes, à savoir l'élasticité caoutchoutique et le comportement viscoélastique à l'état fondu d'une part, et un comportement à la fois vitreux et ductile à l'état solide d'autre part. La **Figure** 1.13 présente un exemple de comportement d'un matériau soumis à une contrainte de traction. On y distingue trois zones :

- la zone 1 de la courbe contrainte – élongation est linéaire et correspond à une déformation élastique. Le matériau s'allonge sous l'action de la traction et reprend sa forme et ses dimensions initiales lorsque la contrainte est interrompue. Le coefficient de proportionnalité du droit est appelé module de Young ou module d'élasticité.

Celui-ci est d'environ 10-3 GPa pour un caoutchouc, contre quelques unités pour le polystyrène, quelques dizaines pour les métaux et 10 000 pour le diamant.

- La zone 2 est appelée zone de déformation plastique. La déformation est toujours élastique, mais la variation contrainte-déformation n'est plus linéaire. Cette zone présente un maximum au-delà duquel le matériau subit une déformation irréversible.

A l'arrêt de la contrainte, le matériau ne retrouve pas sa forme initiale : il existe une déformation résiduelle permanente.

- Au-delà d'une déformation critique, une contraction du matériau s'opère en un point donné jusqu'à rupture. On aborde alors la zone 3 de la courbe, dite zone de rupture.

Si un matériau se casse dans son domaine élastique, c'est-à-dire sans subir de déformation plastique avant sa rupture, il est considéré comme fragile. Par contre, il sera considéré comme

Demo (visit http://www.apexsoft.com)

Ductile si il peut subir de grandes déformations plastiques avant sa rupture.

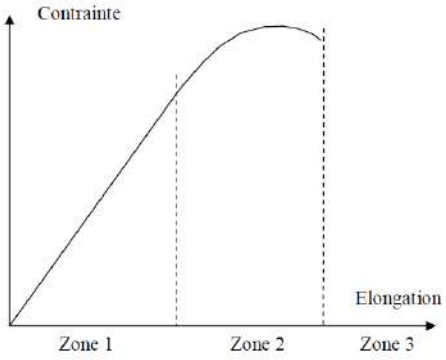


Figure I.13 : Comportement d'un matériau soumis à une contrainte mécanique **[9].**

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Différents paramètres peuvent influencer les propriétés mécaniques des polymères :

- la température : il est à noter que lorsque la température de travail est inférieure à la température de transition vitreuse du matériau, la partie de la courbe à droite du maximum est courte, voire inexistante. Les chaînes se déforment peu. Au-dessus de la température de transition vitreuse, le mouvement des chaînes est possible dans les zones amorphes du matériau. Les déformations sont plus aisées. Le polymère perd de sa ténacité et le module d'élasticité diminue fortement

- la cristallinité : dans un polymère semi-cristallin, les cristallites jouent le rôle de renfort. La valeur du module d'Young est alors plus élevée que celle d'un polymère amorphe.

- la masse molaire : une valeur élevée de celle-ci signifie une longueur importante des chaînes, ce qui favorise leurs enchevêtrements dans les zones amorphes et de meilleures liaisons entre zones cristallines. Il existe ainsi une valeur seuil de la masse molaire à partir de laquelle la résistance à la rupture augmente fortement.

C / Propriétés optiques :

Les plastiques diffèrent par leur capacité à transmettre la lumière. Certains plastiques sont transparents, proposant des propriétés optiques similaires à celles du verre. D'autres sont opaques et ne laissent passer aucune lumière. Les plastiques translucides laissent passer un peu de lumière, mais les images sont floues. Enfin, certains pastiques sont semi-opaques, c'est-à-dire qu'il laisse passer une quantité de lumière suffisante pour pouvoir voir des ombres et des formes. Comme les valeurs de transmission de lumière correspondant à ces différentes catégories ne sont pas clairement définies, quelques règles ont été établies. Si un journal est

placé de l'autre côté du plastique et est facilement lisible, le plastique est transparent. Si l'image est floue et qu'on ne peut rien lire, mais que les formes générales peuvent être distinguées, le plastique est translucide. Si seulement de vagues ombres peuvent être discernées, le plastique est semi-opaque. Si aucune lumière n'est transmise, le plastique est opaque. Certains plastiques sont utilisés pour leur transparence : le polycarbonate, le polystyrène. Ils sont utilisés pour fabriquer des lentilles pour les yeux, des vitres pare-balle, des éclairages de voiture. Contrairement au verre, une exposition prolongée aux U.V. dégrade les polymères qui deviennent jaunes et perdent de leur transparence.

Les propriétés optiques d'un polymère sont déterminées par sa structure chimique. En effet, un polymère semi-cristallin dont les cristallites ont au moins une dimension voisine de celle de la longueur d'onde de la lumière va la diffuser. Le matériau sera alors opaque ou translucide. Par contre, un polymère amorphe, isotrope à la lumière visible, est en général transparent. L'ajout de renforts ou d'additifs conduit bien souvent à une réduction de la transmission de lumière.

I.2.2- Les déchets de caoutchouc :

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. **[9]**

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Tableau I.1 : Valorisation de caoutchouc usagé des pays développés, [IST 04]. **[9]**

	Combustible (pour ciment)	Matières premières	Rechapage	Export	Décharge
Japon	35%	22%	15%	17%	11%
Allemagne	37%	11%	22%	-	30%
Etats-Unis	7%	2%	12%	4%	75%

A / Recyclage d'un caoutchouc [9]:

Les difficultés liées au recyclage des caoutchoucs sont nombreuses, à la fois économiques et techniques. La consommation apparente de produits finis vulcanisés s'établit à 700000 Van, ils sont répartis en deux grandes catégories : les déchets de pneumatiques (60%) et les déchets de caoutchoucs industriels (40%) Dans une optique de valorisation, il est essentiel de considérer le gisement disponible, c'est-à-dire celui qui peut être récupéré et traité dans des conditions économiquement viables : en France, le gisement disponible de déchets industriels banals (DIB) à base de caoutchouc industriel a été estimée par I'ADEME à 188 000 tonnes en 1997. Ces déchets ne représentent qu'un pourcentage très faible du total des déchets produits (environ 0,13%) mais les tonnages ne sont pas négligeables. La quantité de déchets de fabrication à base de caoutchouc a, quant à elle, été estimée à environ 50 000 tonnes par an, par le SNCP (Syndicat National des Caoutchoucs et Plastiques).

Tableau I.2 : Filières de traitement et d'élimination des caoutchouc usagés **[8]**.

Pays	année	Quantités de déchets	Rechapage (%)	Recyclage (%)	Valorisation énergétique (%)	Mise en décharge (%)	Export (%)	Autre (%)
France [13]	1996	354 100t 100%	20	16	15	45	4	-
Allemagne [13]	1996	603 000t 100%	17.5	11.5	46.5	4	16	4.5
Grande Bretagne [13]	1996	378 000t 100%	31	16	27	23	2.5	0.5
Union Européenne [14]	1998	2 540 000t 100%	12	18	20	39	11	-
Etats-Unis [15]	1992	2 800 000t 100%	-	10	23	63	3	1
Japon [15]	1992	840000t 100%	9	12	43	8	25	3

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

Le problème économique du recyclage des caoutchoucs est chronique: les coûts de collecte, traitement et élimination sont supérieurs aux recettes de valorisation, la filière de valorisation est donc coûteuse, contrairement à ce qui est observé dans le cas des piles et accumulateurs par exemple, pour lesquels la valeur des métaux récupérés permet de couvrir les dépenses Ainsi, la compétition entre les coûts des matières vierges, de mise en décharge et de valorisation entre enjeu. Pour illustrer l'importance des coûts des matières premières, il est intéressant de signaler que dans les années 1960-1970, les coûts élevés des matières vierges (chocs pétroliers)

Avaient entraîné le développement du recyclage des caoutchoucs, L'influence des coûts de mise en décharge sur la proportion de déchets valorisés est mise en évidence par la situation allemande : le tableau I.2 (lignes I et 2) montre qu'en Allemagne, cette alternative ne représente qu'environ 5% du devenir des pneus usagés alors qu'en France la proportion est égale à 45%. Ceci est à rapprocher des coûts de mise en décharge qui sont très différents : 350 F/t en France contre 600 à 800 F/t en Allemagne; dans ce dernier cas, la valorisation énergétique (600 F/t) devient compétitive et se développe.

Cette analyse permet de montrer que les aspects économiques constituent le point clé du développement du recyclage et qu'ils sont directement liés à la réglementation : par le biais législatif, il est possible de favoriser cette voie, en jouant sur les taxes de mise en décharges ou en prenant des mesures d'incitation à la réalisation du recyclage ou à l'utilisation des matériaux recyclés .

A l'heure actuelle, en France, les faibles coûts de mise en décharge et des matières premières n'incitent pas les producteurs de déchets à les valoriser. Néanmoins, la situation évolue :

récemment (circulaire du 28 avril 1998) la taxe de mise en décharge est passée de 40 à 60 F/t, alors que le taux de TVA sur les opérations de valorisation matière est passé de 20,6 à 5,5 %.

En ce qui concerne les déchets de pneumatiques, l'organisation de la filière de valorisation est en cours et la parution prochaine d'un décret spécifique à l'élimination de ces déchets va permettre d'accélérer le processus, en réglant notamment le problème du financement.

La majorité des articles traitent de ce type de déchets et les données économiques concernant les déchets à base de caoutchouc ne renferment souvent que les chiffres correspondant aux déchets de pneumatiques usagés. A titre d'exemple, le tableau I.2 indique le devenir des pneumatiques usagés dans différents pays.

Dans le cas des déchets de caoutchoucs industriels, la situation est beaucoup plus complexe: la multiplicité des articles fabriqués entraîne une grande difficulté de localisation des produits en fin de vie. Les enquêtes statistiques relatives à ces gisements de déchets ne peuvent être

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)

réalisées puisque ces produits se retrouvent aussi bien dans les ordures ménagères (**semelles de chaussures**, gants de ménage...) qu'à l'intérieur de machines industrielles, en très faible quantité (oints...).

Comme pour les pneumatiques, cette diversité s'exprime également dans la nature des articles : de nombreuses pièces sont des articles composites renfermant des caoutchoucs et des inserts métalliques, plastiques ou textiles. Même pour les pièces composées uniquement de caoutchouc, les formulations utilisées sont complexes et ne renferment en général que 50% d'élastomère, le reste étant constitué de charges (noir de carbone, silice) et d'agents de vulcanisation et de mise en œuvre.

D'autre part, contrairement à ce qui est observé dans le cas des pneumatiques-, ici les types d'élastomères utilisés peuvent être de natures très différentes (environ 15 familles), certains d'entre eux n'étant pas compatibles. Pour ajouter à ces difficultés, les caoutchoucs techniques en fin de vie sont souvent contaminés par des substances toxiques avec lesquelles ils ont été en contact.

Actuellement, en France, une réflexion est menée afin d'identifier les voies et les moyens à mettre en œuvre pour permettre une meilleure valorisation de ces déchets (action commune entre le Syndicat National des Caoutchoucs et Plastiques, l'Aderne et certains industriels : groupe < déchets >).

Pour conclure, il est important de spécifier que les déchets de production de caoutchoucs industriels ne présentent pas la majeure partie des inconvénients décrits ci-dessus puisqu'ils peuvent être séparés à la source et ne sont ni usagés ni souillés. Cette relative facilité commence à inciter les producteurs à réaliser leur valorisation matière soit sur le site industriel, soit via un intemédiairel [16], [17].

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)

B / La valorisation d'un caoutchouc [9]:

Les trois grandes voies de valorisation, que ce soit pour les déchets de pneumatiques ou pour les déchets de caoutchoucs industriels sont la valorisation énergétique (incinération), la valorisation < chimique > (pyrolyse, dévulcanisation) et la transformation mécanique (production de poudrettes ou granulés).

Tableau I.3: Pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI, de différents combustibles) **[14]**.

matière	PCI (MJ/kg)
Ordures ménagères	<10
Papiers/cartons	17
Caoutchoucs (moyenne)	40
Fuel	44

Signalons cependant que les pneumatiques usagés peuvent faire l'objet de valorisations particulières (réutilisation des pneus entiers: technique du < pneusol[14] >, murs antibruit [18]), qui ne seront pas détaillées dans cette étude.

B.1 valorisation énergétique :

- **Incinération :**

L'incinération est une technique très répandue au plan international: son principal avantage est la réduction importante de la masse et du volume des déchets puisque 60% du produit sont transformés en eau et en gaz carbonique. Le cas particulier des caoutchoucs est intéressant puisque ces matériaux ont en moyenne un pouvoir calorifique inférieur'(PC! élevé -équivalent à celui du fuel- et peuvent être utilisés comme combustible de substitution (tableau L2). Cette solution permet d'envisager l'utilisation des matières fossiles pour la fabrication de pièces puis, dans rn second temps seulement et de façon indirecte, pour la production d'énergie par incinération des déchets de caoutchoucs [18].

L'incinération est très répandue dans les cimenteries puisqu'elle permet aux cimentiers de diminuer leur facture énergétique (reprise des déchets à coût négatif: 80 à 120 F/t), de diversifier leurs sources d'approvisionnement et de diminuer la consommation d'énergie fossile [9]. Le Syndicat Français de l'Industrie Cimentière estime cette capacité d'accueil à 32000 tonnes par an, c'est-à-dire environ 1/10" de la production annuelle des déchets à base de caoutchouc [13].

De façon générale, si elle est conduite dans des incinérateurs aux normes, l'incinérateur ne provoque pas de pollution atmosphérique, les fumées étant filtrées [14]. Cependant les inconvénients ne sont pas négligeables puisque ce procédé conduit à l'obtention de mâchefers (mélange vitreux et cristallisé, utilisable comme sous-revêtement routier - environ 30% de la masse initiale de déchets) et surtout à des cendres (résidus d'épuration des fumées

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

d'incinération) qui concentrent l'essentiel des métaux lourds (essentiellement du zinc dans le cas des caoutchoucs). Ces dernières ne représentent que 40% de la masse initiale des déchets mais constituent un point sensible ; ce sont en effet des déchets ultimes, dont l'élimination est coûteuse puisqu'elle nécessite l'inertage et le stockage dans des sites protégés et contrôlés. De nombreuses études fondamentales sont en cours pour tenter de comprendre et de maîtriser les phénomènes chimiques et physicochimiques mis en jeu, notamment au sein de l'équipe de Giltes Flamant (Institut de science et du génie des matériaux et des procédés : IMP-UPR 8521) dont

Tableau I.4: Deux exemples de produits obtenus après pyrolyse de pneumatiques.

Référence et type de déchet	Réaction, installation	Produits obtenus
Pneus usagés entiers (20kg maximum par pneu) [19]	Pyrolyse en lit fluidise 4500kgpar expérience 1,5 à 4 min 650°C	**Gaz**: 15-20%: méthane, éthane,. éthylène, utilises comme source d'énergie pour l'installation **huiles** : 20-30%, **Charges**: 30-40%, dont noir de carbone réutilisable, **Métaux** : 5-20%
Pneus usagés entiers, lavés et déchiquetés [20]	- Pyrolyse en continu (RTP : Rotary Thermal processing), à une température supérieure à 500°C. - Echelle industrielle (75000t/an)	**Gaz**: 20% (15000t/an) transformés sur le site en électricité, **huiles** : 30% (22500t/an) distillées et vendues, **noir de carbone** : 40% (30000t/an), efforts de purification et de traitements en cours pour s'approcher du N774 (voir 2.3.l), **Métaux** : 10% (7500t/an), exportés.

Demo(Visit http://www.apexsoft.com)

Le souhait est (d'intervenir sur les conditions de l'incinération pour orienter certains métaux plutôt vers les mâchefers ou plutôt vers les cendres, et d'agir sur la forme chimique des

métaux présents dans les cendres, ce qui constitue un paramètre important en matière de toxicité) [21].

Une étude prospective (programme Ecodev [21]) estimait récemment qu'en 2004, l'incinération annuelle des déchets (de tout type) produirait 4 à 5 Millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) et on peut dire que cette voie est prometteuse pour les déchets ne pouvant pas être valorisés d'une façon différente [22].

B.2 - La valorisation (chimique) : pyrolyse et dévulcanisation :

Est une valorisation matière puisque les produits générés peuvent être réutilisés en remplacement de matières premières ; la pyrolyse = thermolyse.

La pyrolyse des polymères consiste à dégrader les macromolécules par chauffage, en atmosphère exempte ou appauvrie en oxygène, ce qui différencie cette technique de l'incinération. Les produits obtenus constituent des < matières secondaires > [23], pouvant être utilisées, dans certaines applications, en remplacement des matières premières. En général, les gaz produits sont utilisés sur le site pour chauffer le four: la pyrolyse permet ainsi d'associer valorisation énergétique et valorisation matière.

L'analyse des produits issus de la pyrolyse de caoutchouc usagé a fait l'objet de plusieurs études. Par exemple, le tableau I.5 rassemble deux approches différentes, celle de Kaminsky conduite par une équipe de chercheurs universitaires, et celle de Ketteringham conduite au niveau industriel, moins détaillée quant à la nature des produits obtenus. Ce tableau montre une bonne concordance des rendements en différents types de produits.

Kaminsky [19 ; 24] a montré que les pneus entiers (20 kg maximum par pneu) peuvent être pyrolysés à 650°C en un temps court (1,5 à 4 min). Les produits obtenus sont des charges (30 à40 %) dont le noir de carbone, des huiles (20 à 30 %) dont la distillation conduit à des dérivés aromatiques (benzène, toluène), des gaz (15 à20%) des métaux (5 à20%) et de l'eau (5 à 10 %). [25]

Ont effectué une analyse plus précise des produits obtenus lors de la pyrolyse de pneus broyés et débarrassés des composants métalliques et textiles.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Tableau I.5: Deux exemples de dévulcanisation de caoutchoucs vulcanisés au soufre.

Dévulcanisation sous ultrasons [26]	Procédé (De-Link) [27]
Elastomères vulcanisés au soufre, exemple : pneus broyés	Elastomères vulcanisés au soufre, chargés ou non
-Dévulcanisation sous ultrasons (20kHz) de forte puissance (3kV) dans une extrudeuse de laboratoire (I/D=4) pendant 0,1 à10 secondes. **-Taille des particules : de 100Pm à quelques mm** **-Caoutchouc dévulcanisé reformulé avec un système de vulcanisation complet (soufre + accélérateur) puis revulcanisé.**	-Procédé mécano-chimique : mastication (mélangeur à cylindres à forte friction) pendant l0 min à 70'C de caoutchouc pulvérulent mélangé à des sels de zinc, jouant le rôle d'agent de dévulcanisation. -Taille des particules : inferieure à 1,5 mm ➢ Recirculation sans addition d'agent de vulcanisation Vulcanisation contenant uniquement du caoutchouc recyclé ou en mélange avec de la gomme vierge de même nature.
Analyse des produits dévulcanisés par mesure de la viscosité (suivi de la dévulcanisation) et mesure de la masse molaire (suivi du clivage des liaisons C-C).	Vulcanisat final : contrainte en traction égale à 50-85% de la valeur correspondant au produit vierge, la finesse des particules joue un rôle primordial.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

Ils ont montré que le rendement en gaz et la récupération d'énergie sont optimum pour une concentration en oxygène égale à 6,5% et ont également mis en évidence l'importance de la température de réaction (l'augmentation de la température de 700 à 880°C provoque une augmentation du rendement en gaz et de la récupération d'énergie ainsi qu'une diminution du rendement en huile et de la capacité calorifique des gaz obtenus et n'implique pas de variation du rendement en noir de carbone).

Ketteringham et coll. [20] de la société (City Energy Ltd) ont réalisé la pyrolyse dans une installation industrielle pouvant traiter 75 000 tonnes de pneus usages déchiquetés par an. Dans cette unité, les gaz produits (20%) sont transformés sur le site en électricité ; les huiles (30 %) sont distillées et revendues, de même que les métaux (10%) et le noir de carbone (40

%=30 000 t par an). Il faut signaler que les noirs de carbone ainsi produits possèdent des qualités inférieures à celles des noirs de carbone utilisés pour le renforcement des élastomères [8] mais peuvent être utilisés pour d'autres application (ex : traitement des eaux usées)[28].
Pour B.Mortgat [29], (les débouchés potentiels de cette filière sont bien identifiés, cependant l'importance des investissements mis en jeu incite à la prudence quant à son développement massif).

- la dévulcanisation :

Le procédé de dévulcanisation est une autre voie de valorisation matière. Dans le cas des caoutchoucs vulcanisés au soufre, cette technique consiste à détruire partiellement le réseau tridimensionnel créé par l'opération de vulcanisation en cassant les liaisons carbone-soufre ou soufre-soufre. Etudiée depuis longtemps, cette technique fait encore l'objet de développements à l'heure actuelle. Les deux exemples les plus significatifs sont présentés dans le tableau I.5,
Isayev et coll. [29, 30, 31] décrivent un procédé breveté de dévulcanisation sous ultrasons (forte puissance : 3 kW) dans une extrudeuse (forte pression) et à chaud. Ce procédé mécanique permet d'obtenir, à partir de pneus broyés, un caoutchouc partiellement dévulcanisé qui peut être remis en œuvre après addition d'un système de vulcanisation classique. L'analyse des structures obtenues montre qu'il y a dégradation simultanée du squelette hydrocarboné ; d'autres études sont en cours pour améliorer la sélectivité du clivage des ponts soufre. D'autre part, les caractéristiques du caoutchouc régénéré (vitesse de vulcanisation, propriétés mécaniques) dépendent de nombreux facteurs (géométrie de la filière, fréquence des ultrasons, pression, température, et surtout temps de séjour dans l'extrudeuse) qu'il convient d'optimiser avant d'envisager un développement.
Le procédé malais (DE LINK) est un processus (mécano-chimique) qui fait l'objet d'un développement industriel (STI-K Polymers Ltd) [32], [27], [13]. Il consiste à additionner au déchet de caoutchouc pulvérulent un agent breveté de dévulcanisation (sels de zinc : thiocarbamate, dibutyldithiophosphates..., en combinaison avec des activateurs, par exemple l'oxyde de zinc) qui casse sélectivement les liaisons carbone-soufre et soufre-soufre, les chaînes polyrnères étant peu affectées.
Le mélange est alors mastiqué à 70°C pendant 10 minutes en présence de caoutchouc vierge et d'un plastifiant. Le matériau ainsi obtenu peut être vulcanisé sans agent de vulcanisation supplémentaire. Les études réalisées consistent à comparer les propriétés physiques et dynamiques des mélanges ainsi obtenus à celles des mélanges à base de gomme vierge ; les

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

auteurs affirment que la valeur de la contrainte en traction du composé final, renfermant le matériau recyclé, représente 50 à 80 % de celle du matériau vierge, les valeurs dépendant de la proportion (matériau recyclé/gomme vierge) utilisée, généralement, ce rapport est voisin de 20/80.

De nombreuses autres méthodes de dévulcanisation ont été décrites. [33] a notamment fait un bilan des processus impliquant des réactions chimiques développées dans le but de proposer des mécanismes pour la réaction de vulcanisation, dont certains aspects demeurent mal connus.

Un certain nombre de procédés a donné lieu à des dépôts de brevets, parmi lesquels :

- la dévulcanisation - sous l'effet de la température - de poudrettes issues de pneus usagés dans le but de fabriquer un (asphalte modifié) montrant une bonne résistance au gel [34],
- la dévulcanisation de caoutchoucs vulcanisés au soufre par action combinée d'huile, de vapeur d'eau, d'un dérivé de type < disulfure aromatique >, d'une forte température (175-195°C) et d'une forte pression (= 1,6 MPa) pendant 1 à 4 heures. Le mélange est distillé avant utilisation pour éliminer un dérivé volatil de type mercaptan, source d'une odeur gênante [35],
- la dévulcanisation par action d'hydroperoxydes organiques, en présence de sels de cuivre ou de cobalt et de dérivés fortement alcalins (LiOH, NaOH, KOH), de caoutchoucs gonflés par une solution organique (contenant au moins un solvant halogéné), la température pouvant varier entre 0 et 100°C [36].

Les difficultés liées au recyclage des caoutchoucs sont nombreuses, à la fois économiques et techniques. La consommation apparente de produits finis vulcanisés s'établit à 700000 t/an, ils sont répartis en deux grandes catégories : les déchets de pneumatiques (60%) et les déchets de caoutchoucs industriels (40%). Dans une optique de valorisation, il est essentiel de considérer le gisement disponible, c'est-à-dire celui qui peut être récupéré et traité dans des conditions économiquement viables : en France, le gisement disponible de déchets industriels banals (DIB) à base de caoutchouc industriel a été estimée par l'ADEME à 188 000 tonnes en 1997. Ces déchets ne représentent qu'un pourcentage très faible du total des déchets produits (environ 0,13%) mais les tonnages ne sont pas négligeables. La quantité de déchets de fabrication à base de caoutchouc a, quant à elle, été estimée à environ 50 000 tonnes par an, par le SNCP (Syndicat National des Caoutchoucs et Plastiques).

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)

C- La filière de recyclage des pneumatiques usagés en France [9]:

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** I.14.

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 retraitement 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.

La filière de recyclage se structure en quatre étapes :

(1) Collecte primaire sur les points de vente ;

(2) Tri et revente des pneus réutilisables ;

(3) Transformation du produit ;

(4) Valorisation finale.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

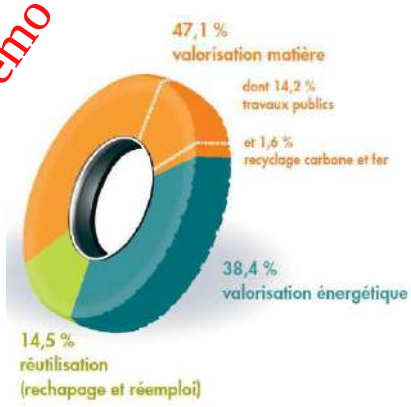


Figure I.14: Répartition des voies de valorisation des pneus usagés, **[37].**

C.1- Les voies de valorisation des pneus usagés [9]:

Les voies de valorisation des pneus usagés sont de plus en plus objets de projets diversifiés, de recherche et développement. A titre d'exemples non exhaustifs on peut citer les axes suivants :

A / Sous forme de matières premières [9] :

On a déjà utilisé essentiellement la poudrette de caoutchouc dans les revêtements de sols sportifs (pistes d'athlétisme ou sous couche dans les salles de sport). Actuellement, on a une nouvelle application de la poudrette : le sol équestre à base de granulats de pneus usagés. Ce revêtement de nouvelle génération est composé d'une couche de base de granulats liés par une résine, recouverte d'une couche de granulats libres.

B / Réhabilitation de carrière [9] :

La méthode de comblement - qui fait l'objet d'un agrément pour les carrières en fin d'exploitation, consiste à alterner des couches de terre et des couches de pneus usagés de grande taille (génie civil et agraires) comme illustré à la **Figure** I.15. Cette procédure de réhabilitation du site doit faire l'objet d'une surveillance scientifique sanitaire et environnementale. Sur la base de cette surveillance, il a été confirmé que l'utilisation des pneus en comblement de carrière est une application qui a toute sa place dans la valorisation des pneus usagés dès lors que cette technique est bien maîtrisée.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)



Figure I.15 : Réhabilitation de carrière par l'utilisation de pneus usagés, **[37]**.

C / Emploi dans les ouvrages de génie civil : Le Pneusol [9]

L'Agence Nationale pour la Récupération et l'Elimination des Déchets (ANRED) classe le Pneusol - une technique mise au point au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en 1974 comme une valorisation originale. Cette technique consiste à utiliser des pneus usagés entiers dans des applications géotechniques. Actuellement, plus de deux cent cinquante ouvrages en Pneusol ont été construits en France et dans d'autres pays comme l'Algérie, les Etats-Unis, la

Jordanie ou le Brésil, etc. dans différents domaines du Génie Civil (remblai léger, mur de soutènement, protection de pente et de berges, etc.). La **Figure** I.16, [38] , présente un chantier d'élargissement de la route Nationale No7 à Cannes- Mandelieu – un résultat typique de l'application du Pneusol.



Figure I.16: Le chantier Cannes-Mandelieu en 1988 avec la technique de Pneusol, [38]

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

I.3- Le béton de déchets :

I.3.1- Matériau béton :

L'histoire du béton remonte à 2000 ans avant J.C. Ce sont les romains, qui les premiers ont inventes une pate ≪ dure comme la pierre ≫, a base de chaux vive. Plus tard (19eme siècle), les véritables recherches approfondies sur les propriétés de la chaux furent entrepris par SMEATON, VICAT et ASPDIN qui montrèrent dans un premier temps que le clinker issu de la calcination du mélange ≪ calcaire – argile ≫ (particules anhydres) fournissait une meilleure hydraulicité au liant. En 1855, du gypse (SO3) en petite quantité ajoutée au clinker, permit d'obtenir au contact de l'eau, une étrangéité (mélange formant une étreinte des constituants par une réaction chimique), homogène et maniable pendant un laps de temps.

Ce mélange original ≪ gypse – clinker ≫ fut brevète et possède encore aujourd'hui l'appellation Ciment Portland Artificiel. Puis rapidement les mortiers et les bétons furent mis en œuvre en introduisant dans la pate de ciment respectivement du sable ou des granulats. En parallèle à de nombreuses recherches sur leur composition et leur comportement ces ≪ nouveaux matériaux composites ≫ furent rapidement employés dans la construction.

Les résultats d'analyse des différentes phases (ciment – granulat – eau) précisent L'influence de chacun des constituants. Classiquement, le ciment Portland se compose d'environ 50% de silicate tri calcique (C3S), 20% de silicate bi calcique (C2S), 5% d'alumino- ferrite tetra calcique (C4AF) et 15% d'aluminate tri calcique (C3A). [C = CaO; S = SiO2; A = Al2; F = FeO2].

Lors de l'hydratation du ciment, une forte teneur du compose C3S contribue a l'augmentation rapide de la résistance au jeune âge avec un fort dégagement de chaleur.

Cette réaction exothermique est accentuée par la présence de C3A qui constitue un élément chimique essentiel dans la fabrication du ciment et pour l'obtention d'une etringite homogène en combinaison avec le compose C4AF **[39]**.

Cependant ces gradients thermiques sont la source de fissuration au sein de l'élément de béton car la température peut atteindre 70°C. Le pourcentage de C3A doit alors être le plus faible possible car il est également plus vulnérable aux sulfates et sa forte teneur implique un dosage plus important en gypse.

Même si l'action du gypse peut entrainer un fluage plus important du béton a court terme (du a la finesse du liant), il ne possède aucune influence a long terme. Seul le compose C2S agit sur le comportement à long terme du béton car sa réaction est plus lente.

L'hydratation du ciment n'est jamais complète (60 a 70% des particules sont hydratées).

Isolées de tout contact avec l'extérieur, les particules anhydres peuvent attendre des années avant d'être enfin en contact avec un compose permettant l'hydratation.

Le béton généralement caractérise par des essais à 28 jours, présente en vieillissant une configuration thermo dynamiquement instable compte tenu des réactions encore possibles a long terme **[39]**. Au-delà d'une consistance plastique initiale au moment de la mise en œuvre (viscosité importante), le béton développe tout au long de sa vie, une fragilité accrue caractérisée par une rupture plus brutale **[40]**.

Les propriétés des bétons tentent d'être améliorées en fonction de leur utilisation (structures, réparation). C'est pourquoi, de plus amples recherches s'attachent à déterminer l'effet d'ajouts cimentaires (cendres volantes, laitiers, fumée de silice..) qui apportent des propriétés intéressantes au béton (ouvrabilité, résistance, porosité, facilite de mise en œuvre) et celui d'additifs chimiques tels que les plastifiants qui agissent sur l'ouvrabilité des bétons.

Cependant leurs effets nécessitent des études approfondies sur le comportement diffère a court et a long terme des bétons.

A cette étape on peut définir alors la notion des bétons spéciaux, donc quelles sont les bétons spéciaux, et quelles sont leurs propriétés.

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)

I.3.2- Bétons spéciaux :

I.3.2.1- Béton a haute performance (BHP) :

Les bétons de hautes performances ≪ BHP ≫ ont d'abord été appelés ≪ bétons de hautes résistances≫, car c'est cette caractéristique facilement mesurable qui a fait des progrès spectaculaires. Elle est passée de 30 a 35 MPa il y a quelques années, a plus de 100 MPa pour les bétons a très hautes performances (≪ BTHP ≫), voire plus de 200 pour des bétons de laboratoire.

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés d'une forte réduction de leur porosité. Ils sont également plus résistants aux agents agressifs, aux phénomènes de gel-dégel et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Les bétons HP permettent de réaliser des structures soumises a des contraintes élevées ou des ouvrages subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel). Ils apportent aussi des résistances précoces élevées au béton, ce qui permet d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

I.3.2.2- Bétons auto-plaçant (BAP) :

Les maitres d'ouvrages, architectes, ingénieurs, entreprises, fabricants de béton et préfabricants ont toujours recherche un béton ayant :

• une mise en place aisée,
• un bon remplissage des coffrages,
• un parfait enrobage des armatures,
• une forte compacité.

Les bétons sont devenus de plus en plus fluides, malgré la réduction de la quantité d'eau de gâchage, à tel point que la vibration n'est plus devenue nécessaire. Le béton auto-plaçant était né...

Cette hyper fluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée sur le marche des dernières générations d'adjuvants ≪ superplastifiants ≫. La base de ces adjuvants est une molécule complexe qui retarde l'hydratation du ciment et augmente considérablement la dispersion des grains de ciment.

I .3.2.3- béton de déchets de caoutchouc :

Le béton de déchets de caoutchouc est obtenu en incorporant dans la masse de béton des éléments qui sont les déchets de caoutchouc composante de forme et de nature diverses **[08].**

I.3.2.3.1- Propriétés des bétons de déchets caoutchouc :

A- Béton frais :

A.1- L'ouvrabilité :

Güneyisi et al. [41] ont étudié des propriétés mécaniques des bétons de caoutchouc dont de 0% à 20% de la masse du ciment est remplacée par la masse de fumée de silice (SF).

La Figure I-31 illustre l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en G.C. et du dosage X% de la fumée de silice SF. Ces auteurs observent que l'affaissement du béton est diminué avec l'augmentation de caoutchouc. Pour le dosage de 50% de G.C., l'affaissement est presque nul.

L'étude réalisée par Khaloo et al. [42] a indiqué une conclusion un peu différente par rapport à d'autres auteurs. En effet, d'après cette étude le béton incorporant des G.C. a une maniabilité acceptable en termes de facilité de manipulation, de placement et de finition (cf. **Figure** I.17. Néanmoins, leurs résultats montrent que la procédure ordinaire pour évaluer l'affaissement n'est pas appropriée à ce composite cimentaire. Ils ont donc suggéré qu'il fallait chercher d'autres méthodes pour mesurer correctement l'affaissement du béton incorporant des granulats en caoutchouc.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

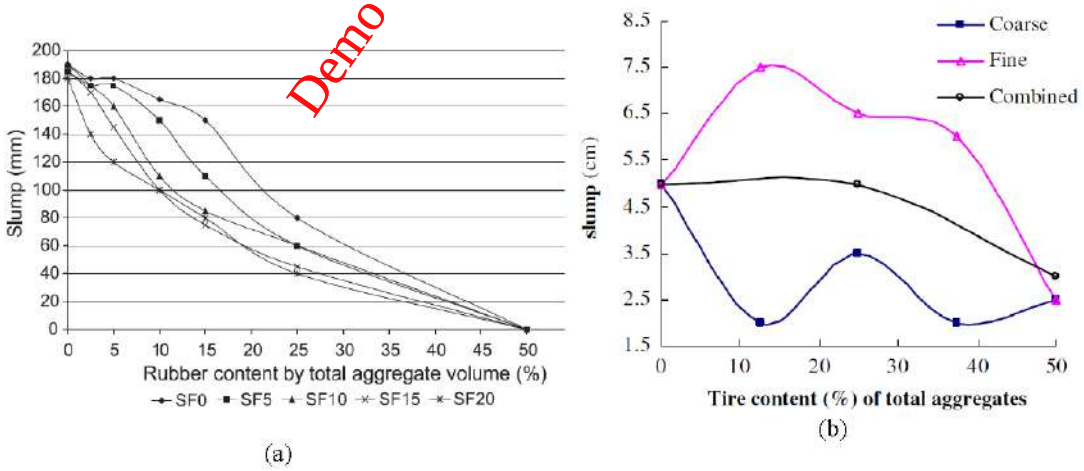


Figure I.17: Influence de G.C. sur l'affaissement, [41]-a, [42]-b.

L'incorporation de ces granulats conduit à des mélanges plus visqueux et présentant des seuils de cisaillement plus importants.

A.2- La densité :

L'utilisation de déchets caoutchouc pour chaque âge mène à une réduction de la densité sèche de tous les mélanges avec l'augmentation du rapport en déchets caoutchouc parce que la densité du caoutchouc est inférieure à celle du sable **[9]**.

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des G.C. en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Si on se réfère à la classification des bétons légers établie par l'ACI Committee 213 [213], avec l'incorporation de G.C. on peut envisager la production de bétons légers de structure. Comme le montre la Figure I-14, Güneyisi et al. [41] ont observé une chute de 25% de la masse volumique avec un taux de substitution de 50% de G.C. par rapport au béton de référence (la légende étant celle utilisée précédemment à la **Figure** I-18(a). Kaloush et al. [44] ont aussi indiqué que le masse volumique diminue approximativement de 102

kg/m3 pour chaque 22,7 kg de G.C. ajouté, une tendance illustrée par la **Figure** I-18(b).

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

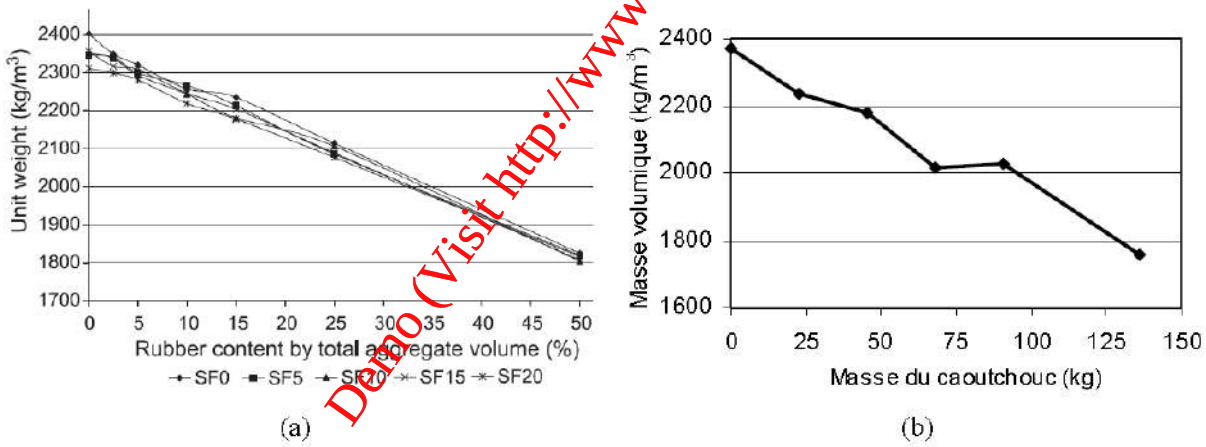


Figure I.18 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des G.C., [41]-a, [44]-b.

A.3- L'air occlus :

S'agissant de la teneur en air occlus, Khatib et al. [45] ont noté qu'elle augmente avec le volume de caoutchouc. C'est ce qui est illustré par la **Figure** I.19 où le groupe A correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par des G.C. fins, le gravier a été remplacé par de gros G.C. dans le cas du groupe B tandis qu'ils ont substitué le sable et le gravier par des

G.C. fins et gros dans le cas du groupe C. Ces auteurs ont observé que la teneur en air occlus du groupe B est inférieure à celle du groupe A lorsque le volume de caoutchouc dépasse 30%

du volume total des granulats. Cette diminution peut être expliquée par la compacité plus élevée pour le groupe B à même volume de G.C. **[9]**.

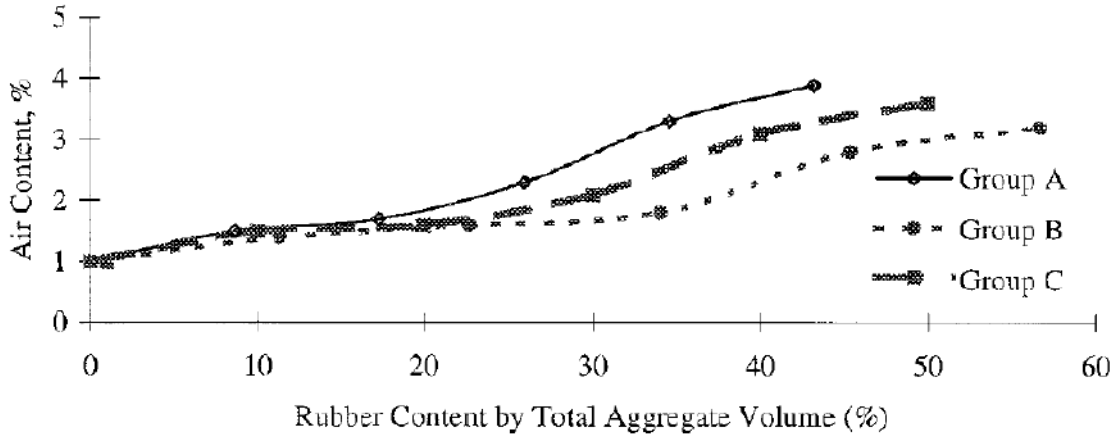


Figure I.19 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [45].

Fedroff et al. [46] ont aussi rapporté que la teneur en air occlus dans les bétons de caoutchouc est plus importante que celle des bétons ordinaires même sans agent entraîneur d'air.

Ces chercheurs pensent que la granulométrie ouverte et surtout la surface rugueuse des particules de caoutchouc sont les principales causes de l'augmentation de la teneur en air occlus du béton incorporant des G.C.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

B- Béton durci :

B.1- Resistance à la compression :

La caractéristique essentielle des matériaux cimentaires durcis est la résistance en compression à un âge donné. Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance des propriétés mécaniques est indispensable pour le dimensionnement des ouvrages. Ainsi, l'étude de cette résistance en compression peut permettre d'avoir une idée globale sur la qualité du béton. On verra que la résistance en compression du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et dosage des matériaux utilisés, la nature des granulats, la porosité, la condition de réalisation et de cure, etc.

Dans les matériaux cimentaires, dont une partie des granulats naturels est remplacée par des G.C. de nature, de forme, de densité et en général de propriétés physiques tellement différentes de celles des granulats naturels, de toute évidence il est attendu que ces propriétés du caoutchouc vont influencer la résistance en compression des composites obtenus.

Les chercheurs qui ont travaillé récemment sur les matériaux cimentaires incorporant des

G.C. ont tous relevé que la substitution de granulats naturels par des G.C. entraînait inévitablement une chute de la résistance en compression.

L'examen des résultats obtenus par Garros [43] lui a permis de préciser l'impact du dosage et de la taille des G.C. sur ce paramètre dans le cas de BAP. Ses résultats illustrés par la **Figure** I.20 ont confirmé que la présence de G.C. est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. Une chute jusqu'à 86% de la résistance est observée pour les composites les plus dosés en G.C. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 5 MPa lui a imposé un taux maximal de substitution de 25%.

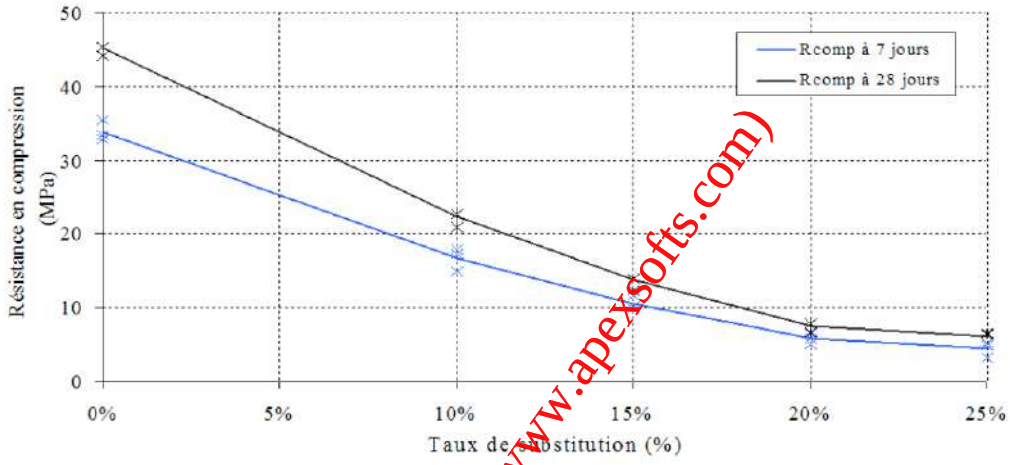


Figure I.20: Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des G.C. 0-4mm), [43].

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Eldin et Senouci [47] ont montré une chute d'environ 85% de la résistance en compression et de 65% lorsqu'on substitue totalement le gravier et le sable respectivement par des G.C. de granulométrie équivalente. Khatib et al. [45] ont confirmé qu'il y a une chute de la résistance en compression de 90% entre un béton de référence et un béton incorporant plus de 60% de G.C. A partir de cette étude, dont les résultats sont illustrés à la **Figure** I.21, les auteurs ont conseillé de ne pas dépasser un taux de substitution de 20% du volume total de la phase granulaire.

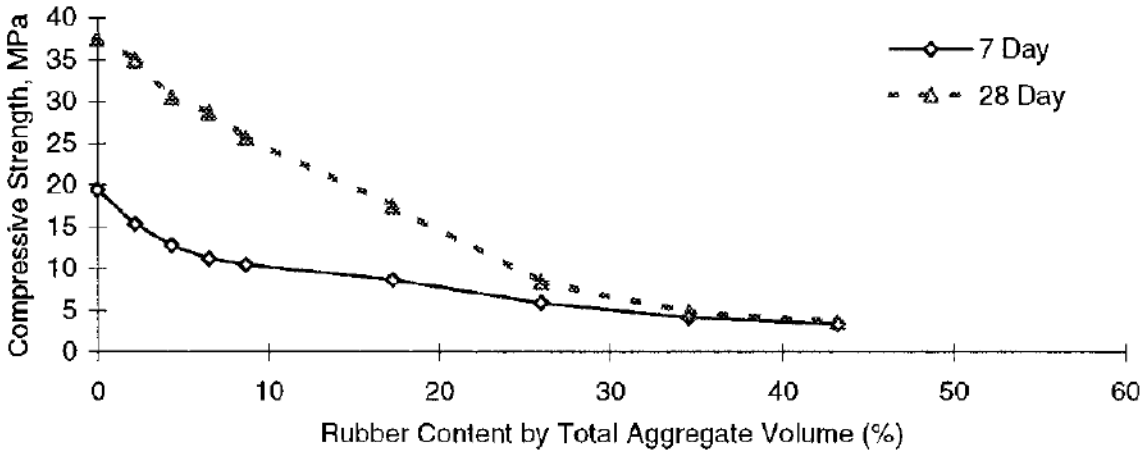


Figure I.21 : Influence de l'adjonction de G.C. sur la résistance en compression, [45].

Lorsque le pourcentage de grains des déchets est faible et une diminution pour de forts pourcentages.

Les résultats de **M. HO Anh Cuong [9]** 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. 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 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. 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.

Enfin, la dernière raison et non des moindres est liée à la porosité du béton incorporant des granulats en caoutchouc qui est réputée plus élevée que celle du béton de référence. D'autres auteurs comme Khatib ou Eldin et Senouci [47] ont franchi le pas en considérant tout simplement les granulats en caoutchouc comme de simples trous. Si cette hypothèse est difficile à défendre, des observations au vidéo microscope montrent un défaut d'adhérence manifeste et une auréole de transition plus étendue entre la matrice cimentaire et les grains de

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

caoutchouc. La photographie de la **Figure** I.22 montre cet état qui contribue sans doute aussi à l'augmentation de la porosité globale du composite et à la chute de la résistance en compression.



Figure I.22 : Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au vidéo microscope, (grossissement x100).

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

B.2- Résistance à la traction par flexion :

Par rapport à la résistance à la compression, la résistance à la traction du béton est relativement faible mais on a parfois besoin de la connaître. Elle est généralement indirectement déterminée par le biais d'essais de traction par flexion ou de traction par fendage dit brésilien. Quant à l'essai de traction directe, il est certainement le plus noble en la matière, mais il demeure délicat à réaliser car il nécessite le collage de têtes de traction parfaitement centrées et doit être réalisé sans effort de flexion parasite.

Kaloush et al. [44] ont montré que l'augmentation du contenu en G.C. dans le béton entraîne une réduction de la résistance à la traction par fendage. Les échantillons testés sont obtenus par sciage d'éprouvettes cylindriques de diamètre (D) 102 mm perpendiculairement à la génératrice par tranche d'épaisseur (E) comprise entre 22 et 26 mm. Cependant, ils ont observé aussi un bénéfice de l'incorporation de G.C. : malgré la chute de la résistance en traction, la déformation à la rupture est augmentée. Cette capacité de déformation à la rupture montre que le béton incorporant des G.C. est plus ductile.

Biel et Lee [50] ont signalé que le type de ciment affecte la résistance en traction du béton incorporant des G.C. Ils ont utilisé deux types de ciment : ciment portland et ciment magnésium oxychlorure. Leurs résultats montrent que des éprouvettes de béton à base de

ciment Portland avec 25% de G.C. (du volume total) se sont maintenues à 20% de la résistance du béton de référence. Tandis que pour le cas du béton à base de ciment d'oxychlorure de magnésium avec le même taux de G.C., les éprouvettes gardent 34% de la résistance du béton de référence.

B.3- Module d'élasticité :

Au même titre que les résistances en compression et en traction, de nombreux travaux confirment que l'incorporation de G.C. induit une chute importante du module d'élasticité.

Cela est par ailleurs prévisible compte tenu des relations empiriques existantes permettant d'estimer le module d'élasticité à partir de la résistance en compression.

L'effet défavorable de l'incorporation de G.C. sur le module d'élasticité a été présenté par Güneyisi et al. [41] dont les résultats illustrés par la **Figure** I.23 (où les légendes ont été présentées précédemment) montrent une baisse de 83% du module d'élasticité lorsque la moitié du volume granulaire est remplacé par des granulats en caoutchouc.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

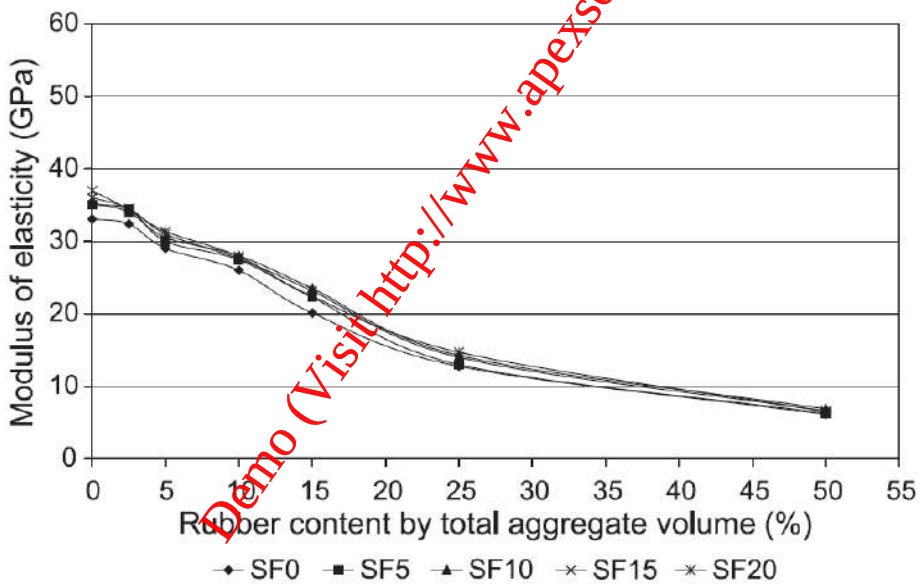


Figure I.23 : Variation du module d'élasticité du béton incorporant G.C. et de la fumée de silice, [41].

Dans une étude récente réalisée par Ganjian et al. [52], les granulats en caoutchouc dont la dimension maximale est de 25 mm remplacent 5 ; 7,5 et 10% en masse des gros granulats naturels. Les auteurs montrent à la **Figure** I.24 une réduction de 30% du module d'élasticité lorsqu'on passe du béton de référence au béton incorporant 10% de G.C.

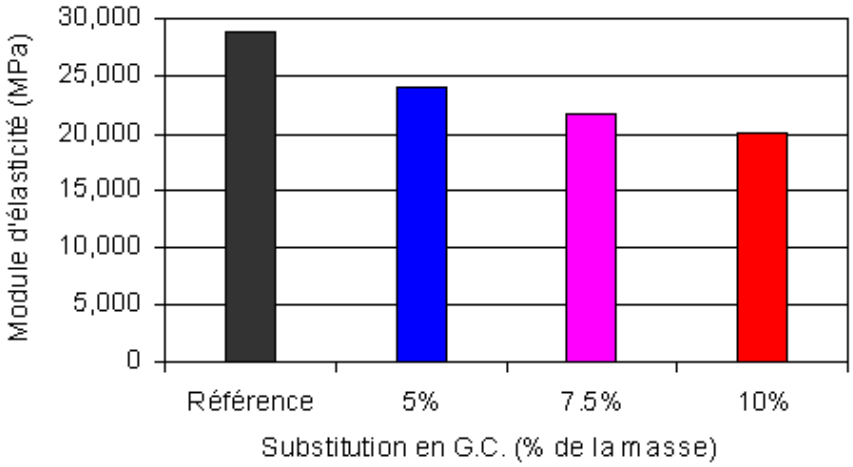


Figure I.24 : Influence des G.C. sur le module d'élasticité, [52].

B.4-Capacité de déformation :

Si on se contente d'analyser les effets de l'incorporation des G.C. sur les seules résistances en compression et en traction, la conclusion est sans équivoque : cette incorporation est défavorable à la capacité portante et ne présente que des inconvénients.

Turatsinze et al. [53] ont présenté une autre facette des effets de l'adjonction des G.C. Sachant que le module d'élasticité de ces inclusions est nettement plus faible que celui de la matrice cimentaire, ces auteurs ont fait l'hypothèse que les granulats en caoutchouc se comportent comme des trous lorsqu'une fissure débouche à leur interface avec la matrice cimentaire. Dans ce cas il en résulterait une relaxation des contraintes, retardant la coalescence des microfissures et leur localisation en macrofissure. D'après ces auteurs ce mécanisme doit permettre d'atteindre une capacité de déformation améliorée. Dans cet esprit la capacité de déformation a été définie comme la déformation atteinte avant de basculer dans le domaine post-pic et ceci que l'on soit en traction (directe ou non) ou en compression.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Pour cette hypothèse, les auteurs se sont inspirés d'une ancienne technique qui, pour ralentir la propagation d'une fissure dans le métal, préconise le perçage d'un trou à la pointe de la fissure. Cette hypothèse a été rapidement validée avec un support de mortier à base de ciment dans lequel le sable a été remplacé par des granulats en caoutchouc dans des proportions volumiques de 20 et 30% (mortier M20 et M30 respectivement). Les réponses de ces composites en traction directe sont illustrées par la **Figure** I.25 où les mortiers incorporant des G.C. sont comparés au mortier de référence M0 sur un diagramme force-allongement. Si on retrouve l'effet des G.C. sur le module d'élasticité (pente initiale plus faible) et sur la

résistance en traction, on constate bien que l'on atteint des niveaux d'allongement nettement plus importants avant le domaine post-pic. Les auteurs relèvent un plateau important précédent ce domaine post-pic en présence de G.C. Ce plateau est alors interprété comme une phase de multiplication de microfissures régulièrement stoppées aux interfaces des G.C. et retardant la localisation de la macrofissure suivant le mécanisme précédemment décrit.

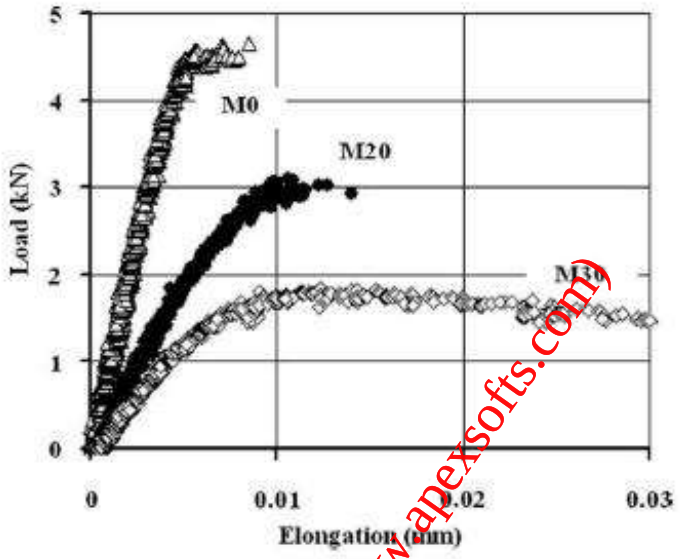


Figure I.25 : Influence de l'incorporation de G.C. sur la capacité de déformation en traction directe, [53].

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)

B.5- Retrait :

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique. Il correspond à des Dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant et après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par le ferraillage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles entraînent souvent l'apparition de fissures précoces, d'ouverture conséquente ce qui peut nuire à la durabilité du béton.

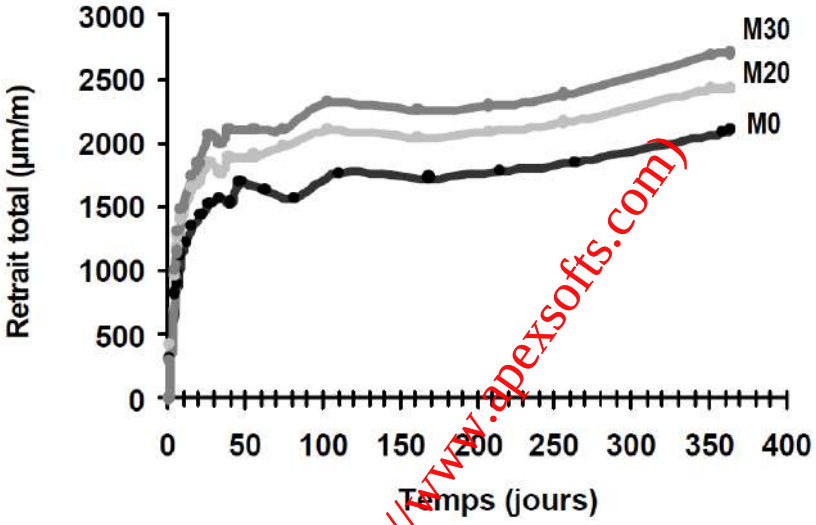
Nous n'allons pas nous étendre sur le retrait des matériaux à base cimentaire, un phénomène largement documenté par ailleurs, mais plutôt sur l'incidence des inclusions en caoutchouc sur son amplitude et les conséquences qui en découlent.

Certains auteurs ont étudié l'influence des G.C. sur le retrait du béton et leurs résultats montrent que le retrait du béton caoutchouc est plus élevé que celui du béton de référence.

Turatsinze et al. [53] confirment à la **Figure** I.26 que les variations dimensionnelles des mortiers incorporant des G.C. sont plus élevées que celles du mortier de référence (les légendes M0, M20 et M30 ont été expliquées dans les pages précédentes). C'est

essentiellement par la relation entre la rigidité des granulats et l'amplitude des variations dimensionnelles de retrait [55] et [56] que les auteurs interprètent les résultats obtenus.

Concernant le BAP, Garros [43] a évalué l'influence de la présence de G.C. sur la cinétique de retrait. Comme attendu, la présence des G.C. entraîne dans ce cas aussi une augmentation du retrait. Plus le dosage en G.C. est important, plus le retrait est élevé. En revanche à même taux de substitution l'auteur n'a pas mis en évidence l'effet de la taille des G.C.



Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Figure I.26: Evolution du retrait total des mortiers en fonctions du taux de substitution en G.C, [53].

A partir des observations de l'amplitude de retrait avec la présence de granulats en caoutchouc, ces auteurs se retrouvent en face de deux phénomènes en compétition et dont les effets sont en opposition vis-à-vis de la fissuration de retrait : d'une part la présence de G.C. permet d'augmenter la capacité de déformation avant localisation de la fissuration, et d'autre part cette présence de G.C. entraîne une augmentation des variations dimensionnelles de retrait.

B.6- Fragilité :

On peut évaluer la fragilité du matériau en s'appuyant sur l'énergie absorbée dans le processus de rupture d'une éprouvette. Topçu [59] évalue l'indice de fragilité (Brittleness Index-BI) du BIGC en se basant sur la définition du BI par Erkan [60] et Wu K. and Zhou J [61] présentée à la **Figure** I.28. L'énergie plastique (non restituée) et l'énergie restituée sont obtenues pendant la rupture d'une éprouvette en compression comme illustré par les aires A1 et A2. Le BI est identifié au rapport A2/A1. Pour un matériau quasi fragile tel que le béton, ce rapport est élevé et la valeur du BI est plus grande que celle d'un matériau ductile. Comme le montre la **Figure** I.29 (a) où le groupe FC correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par des G.C. fins, le gravier a été remplacé par des gros G.C. dans le cas du groupe CC, Topçu [59] observe que les bétons qui présentent les BI les plus élevés sont ceux dont environ 15% du volume granulaire est constitué des G.C. D'après cet auteur cette limite de 15% définirait une transition d'un matériau fragile vers un matériau plus ductile. Il conclut donc que l'incorporation de granulats en caoutchouc est une solution pour lutter contre la fragilité des bétons.

Les résultats de Benazzouk et al. [62] présentés à la **Figure** I.29 (b) vont dans le même sens que ceux décrits ci-dessus. Les nomenclatures GRA 1-4, 4-8 et 8-12 désignent des composites cimentaires incorporant des G.C. de classe granulaire i-j. Comme on peut le constater, les auteurs concluent que l'indice de fragilité du composite diminue significativement à partir d'un taux d'incorporation en granulats en caoutchouc de 10%, et ceci quelle que soit la classe granulométrique dans les limites du champ d'investigation.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

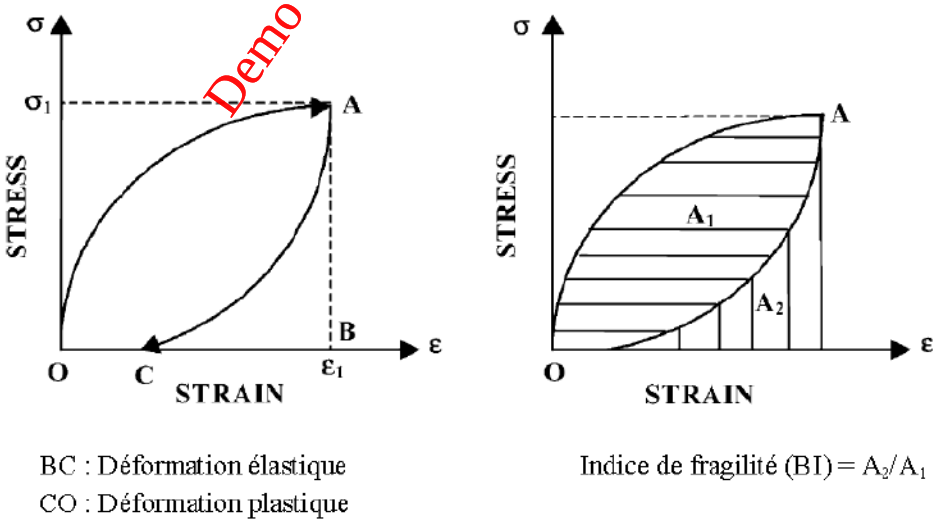


Figure I.28 : Evaluation de l'indice de fragilité (BI), [60] et [61].

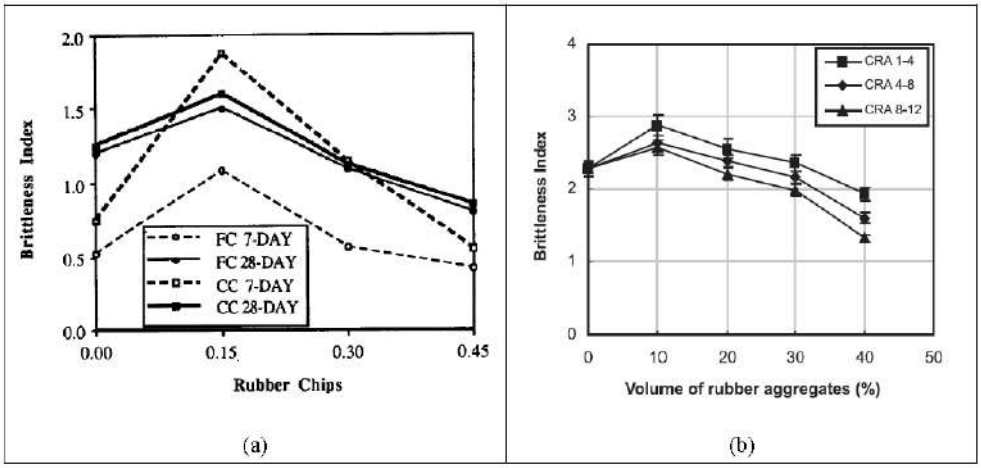


Figure I.29 : Influence de G.C. sur l'indice de fragilité, [59]-a et [62]-b.

B.7- Propriétés de transfert :

Les propriétés de transfert comme la perméabilité aux fluides ou l'absorption d'eau sont des indicateurs de durabilité des matériaux à base cimentaire. Une étude réalisée par Benazzouk et al. [63] a permis d'examiner l'influence de deux types de G.C., le caoutchouc expansif et le caoutchouc compact, sur des indicateurs de durabilité du composite ciment caoutchouc. Le volume incorporé de chaque type de granulats en caoutchouc est compris entre 0 et 40%. Ces composites sont nommés ERAC et CRAC, respectivement.

B.7.1- Perméabilité

D'après ces auteurs, dont les résultats sont présentés dans le Tableau I.6, le coefficient de perméabilité à l'air diminue avec l'augmentation du taux de G.C. alors que la porosité augmente. Ils justifient ces constatations a priori contradictoires par le fait que le réseau poreux du composite incorporant des granulats en caoutchouc est plus discontinu. Cette conclusion de Benazzouk [63] peut être rapprochée des observations de Kerasley et Wainwright [64] qui, en étudiant des bétons mousses incorporant de cendres volantes, ont aussi constaté que malgré une porosité élevée, le réseau des pores plus discontinu entraîne une perméabilité à l'air nettement plus faible.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Tableau I.6 : Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment-caoutchouc, [63].

Volume du G.C. (%)	Coefficient de perméabilité à l'air, K (10^{-17} m^2)		
	CRAC		ERAC
0	12,56		
10	10,25		9,85
20	4,38		2,95
30	3,24		2,23
40	2,36		1,74

Toujours au sujet de la perméabilité au gaz et comme le montre la Figure I.30, Garros [43] qui a travaillé sur les propriétés des BAP incorporant des G.C. en arrive à une conclusion opposée à celle de Benazzouk et al. : La perméabilité à l'oxygène du BAP augmente avec le taux d'incorporation en G.C. Pour justifier cette évolution, Garros mentionne deux hypothèses. Le premier élément est l'augmentation de la porosité avec la présence des G.C., le deuxième élément, qui à y regarder de près est inclus dans le premier, est l'auréole de transition plus étendue et de qualité médiocre conjuguée avec un défaut d'adhérence du granulat en caoutchouc à la matrice cimentaire. De plus, à même taux d'incorporation, ce travail montre qu'avec des granulats en caoutchouc de plus petites dimensions (0-4 mm dit BAPX-4) cette perméabilité est plus élevée que celle enregistrée avec des grains de caoutchouc plus gros (4-10 mm dit BAPX-10).

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

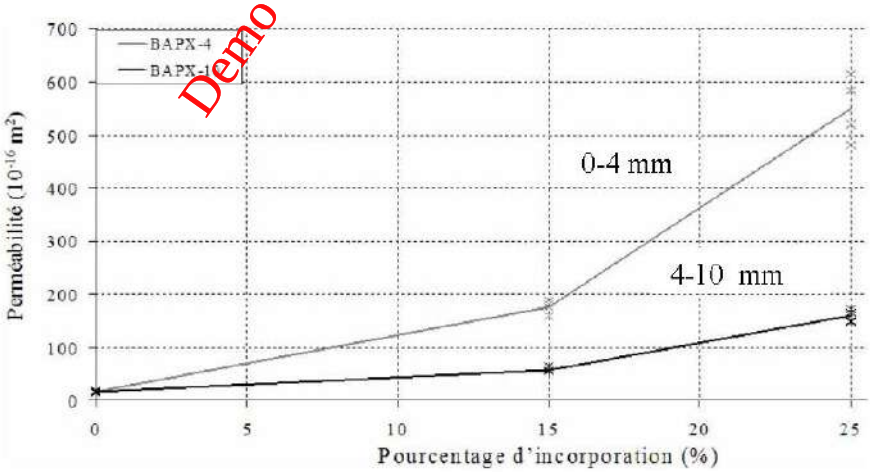


Figure I.30 : Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des G.C., [43].

B.7.2- Absorption d'eau :

S'agissant de l'absorption d'eau, on trouve une convergence entre les résultats de Benazzouk et al. [63] et ceux de Garros [43] mais avec des explications partiellement communes.

Leurs résultats sont illustrés sur les **Figure** I.31 (a) et (b) respectivement. Les légendes dans la **Figure** I.32 sont celles précisées dans la section dédiée à l'étude du retrait. Dans les deux cas la capacité d'absorption d'eau diminue avec le taux d'incorporation des G.C., ce que les premiers auteurs expliquent par le fait que le caoutchouc n'absorbe pas l'eau et qu'elle doit par ailleurs contourner un réseau poreux plus dense symbolisant ainsi une plus grande difficulté à se propager à l'intérieur du composite cimentaire. Quand à Garros, il évoque aussi la nature hydrophobe du caoutchouc et la dimension de l'auréole de transition qui n'est pas de taille à favoriser l'ascension capillaire.

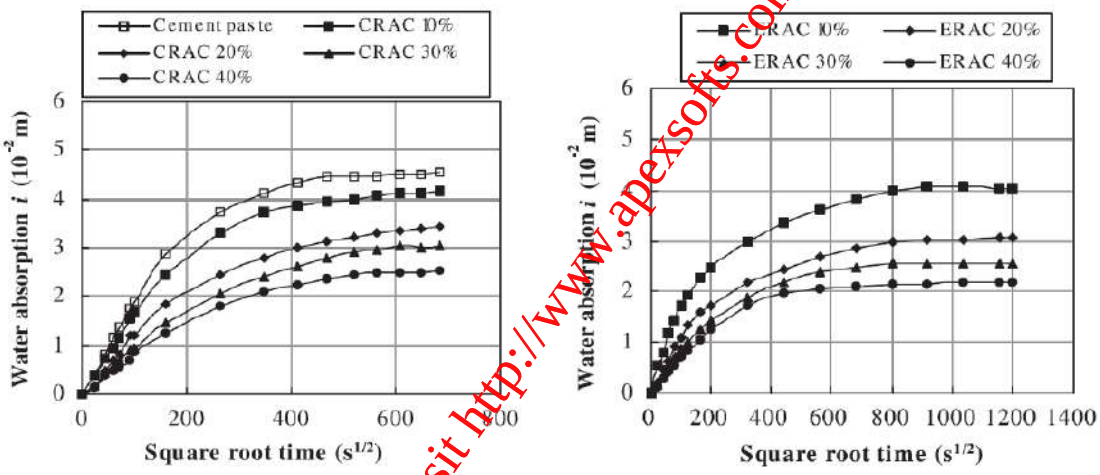


Figure I.31 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en G.C., [63].

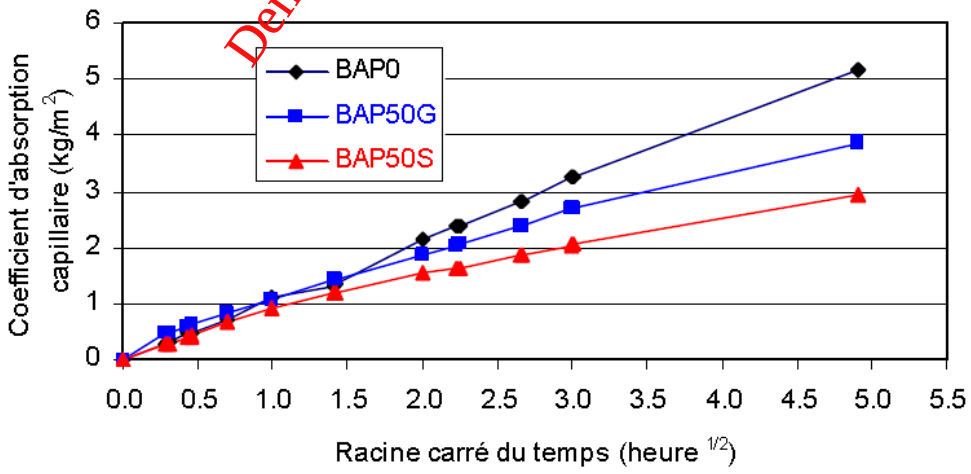


Figure I.32 : Evolution de l'absorption capillaire en fonction du taux d'incorporation et de la taille des G.C.,[43].

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

B.8- Résistance au gel et dégel :

La résistance au gel et dégel est aussi souvent utilisée comme un indicateur de durabilité des matériaux à base cimentaire. Quand la température descend sous le point de congélation, l'eau dans les pores et les capillaires, en se cristallisant, tend à occuper un volume plus important. Cette expansion peut générer des contraintes telles qu'une fissuration peut se développer dans le composite.

En ce qui concerne la résistance au gel et dégel du composite à base cimentaire, le peu d'études réalisées semblent démontrer que la présence des G.C., directement ou indirectement par le biais du réseau poreux induit, limite les effets préjudiciables généralement observés. Garros [43] rapporte les résultats de Savas et al. [65] selon lesquels les bétons contenant 10% et 15% en masse de G.C. dont la dimension est de 2 à 6 mm ont un facteur de durabilité 60% plus élevé que celui du béton normal après 300 cycles de gel-dégel. Dans une autre étude, Benazzouk [66] confirme que les granulats en caoutchouc améliorent la résistance au gel-dégel des composites cimentaires. Pour illustrer cette conclusion on peut s'appuyer sur l'état des éprouvettes de référence et celui des composites ciment-caoutchouc après 300 cycles de gel-dégel présentés à la **Figure** I.33.



Pâte de ciment de référence. Composite ciment-caoutchouc de 40% G.C.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

Figure I.33: Effet des G.C. sur la résistance au gel-dégel des matériaux à base cimentaire : état des éprouvettes après 300 cycles de gel -dégel, [66].

B.9- Résistance au feu :

Le peu d'études réalisées sur cette propriété laisse penser que l'incorporation de granulats en caoutchouc est favorable à la résistance au feu du composite incorporant des G.C. En effet, Hernández-Olivares et Barluenga [67] réalisent des essais pour évaluer la résistance au feu du BHP incorporant des G.C. La température des éprouvettes placées dans un fourneau est montée à plus de 1.000oC. Les auteurs observent que les éprouvettes de BHP de référence présentent plus d'écailles à leur surface exposée au feu et présentent une silhouette manifestement déformée par rapport à celle des éprouvettes en BHP incorporant des G.C. La **Figure** I-34 présente les images (vues globale et détaillée) de l'écaillage à la surface des éprouvettes du BHP à 0% et 3% du volume de G.C. Les silhouettes des éprouvettes à la sortie du fourneau sont présentées à la **Figure** I.35. Hernández-Olivares et Barluenga attribuent les différentes constatations au fait que les G.C. au sein du composite sont brulés et entrainent la formation de trous servant de vases de décompression à la vapeur d'eau interne. Par conséquent, la contrainte due à la pression de vapeur est diminuée. On notera par ailleurs que ces auteurs ont observé qu'à même profondeur à l'intérieur des éprouvettes la température est plus faible si on augmente le dosage des G.C. Cette observation indique que l'épaisseur demandée de la couche d'enrobage des colonnes en BHP de référence est plus importante par rapport à celle en BHP de caoutchouc en vue de garantir l'intégrité structurale.

Fattuhi et Clark [68] réalisent un test simple pour vérifier le risque de l'inflammabilité des G.C. incorporés dans le composite à base cimentaire. Dans cet essai, les cubes de béton sont soumis à un feu d'un chalumeau pendant trois minutes. Sans surprise, ils observent que les G.C. qui se trouvent à la surface des cubes sont brûlés. Toutefois, dès que l'on écarte le chalumeau, tous les feus s'éteignent au bout de 4 à 5 secondes. Ces essais simples indiquent que l'inflammabilité des G.C. est réduite par leur enrobage dans le béton.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

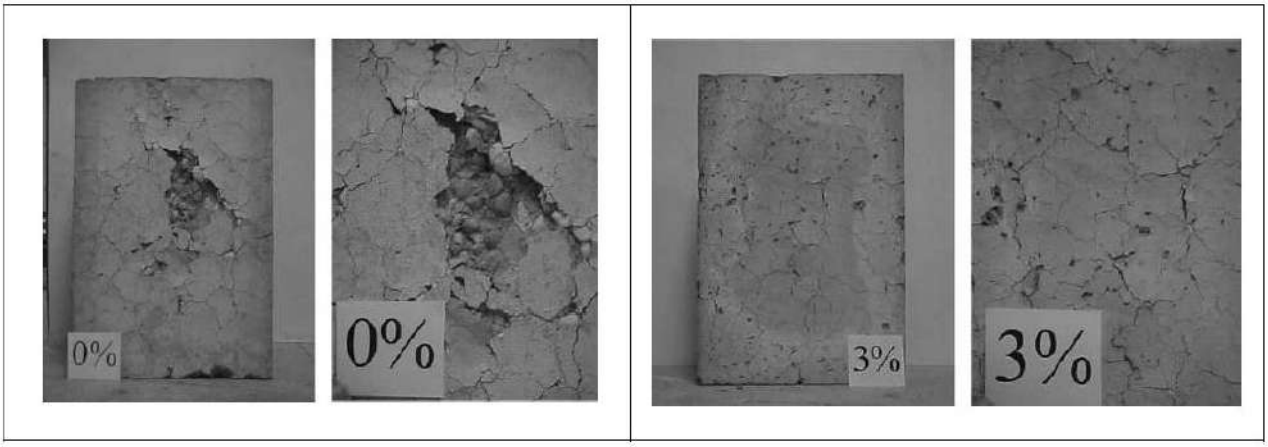
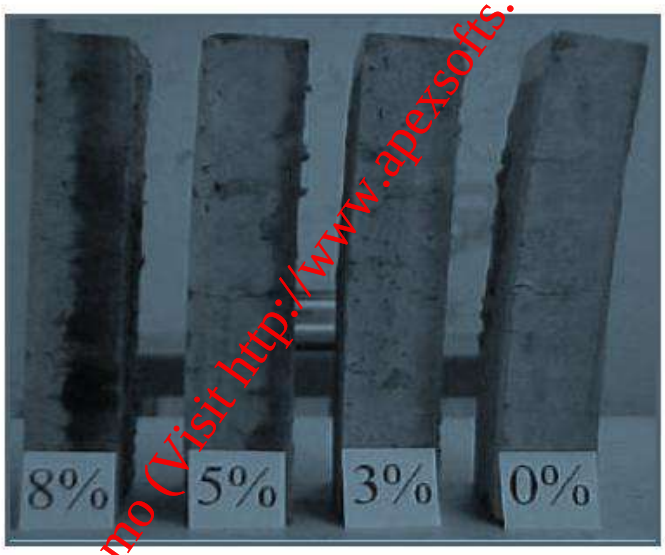


Figure I.34: Ecaillages à la surface des éprouvettes incorporant 0% et 3% du volume de G.C. après l'essai de résistance au feu, [67].



Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Figure I.35 : Silhouette des éprouvettes après l'essai de résistance au feu, [67].

I.4- Conclusion :

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 bio physicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter.

Cette matière n'est pas banale. Elle à une vie, elle a souvent muté au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour atténuer les capacités de nuisances.

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.

Suivre les conclusions peut être fait baser sur les études effectuées par divers chercheurs :

1- les déchets caoutchoucs peuvent être employés pour remplacer certaine quantité de sable dans un béton. Ceci contribue à réduire le poids spécifique du béton. C'est utile dans les applications exigeant le béton léger non roulement, tel que les panneaux utilisés dans les façades.

2. Les déchets caoutchoucs présentent une meilleure résistance au cycle gel dégel, et au feu.

3. l'effet du rapport d'eau-ciment du développement de résistance n'est pas en avant dans le cas du béton en caoutchoucs. C'est en raison du fait que les déchets en caoutchoucs réduisent le lien force de béton. Par conséquent, l'échec du béton se produit en raison de l'échec du lien entre la pâte de ciment et les déchets de caoutchouc.

4-utilisation de déchets en caoutchouc aidés en gardant le refroidisseur intérieur, quand l'extérieur. la température est augmentée, par rapport au béton correspondant de commande.

Demo (Visit http://www.anesofts.com)



Chapitre II

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Matériaux et essais

II.1- Introduction :

Dans ce chapitre on présente les matériaux de construction utilisés pour la confection des bétons avec leurs caractéristiques et les essais faites au laboratoire, comme pour tous les bétons, la formulation doit être définie avec le plus grand soin et les grandeurs caractéristiques sont classiques et bien connues à savoir :

- la granularité ou le fuseau granulaire du squelette.

- les dosages en sable, gravier, ciment, eau.

La caractérisation des bétons de déchets de semelles des chaussures (BDS), à l'état frais et à l'état durci, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai. Les différents essais faits au cours de ce travail sont :

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Sur béton frais :

- Ouvrabilité NF EN 12350-2 **[69], NA 431 [70]**, ASTM C 143-78 **[71].**
- Air occlus NF EN 12350-7 **[73].**
- Densité NF EN 12350-6 **[74], NA 436 [75].**

Sur béton durci :

- Compression sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm. NF EN 2390-3 **[78],** NA427 **[79]**.
- Traction par flexion sur éprouvette prismatique 7×7×28 NF P 18-407 **[80]**, NA428 **[81].**
- ASTM C293 **[82]**.
- Retrait NF P 15-404 **[84].**

II. 2- Caractérisation des matériaux utilisés :

Pour la confection des bétons, des matériaux locaux de la wilaya de Médéa sont utilisés et caractérisés expérimentalement au laboratoire de génie civil du Hall de Technologie de l'université de Médéa et suivant les normes en vigueur. Le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leur disponibilité dans la région (Médéa) et surtout pour fabriquer un béton comparable à celui utilisé dans les chantiers.

II.2.1- Ciment :

Un seul type de ciment est utilisé au cours de cette étude expérimentale **[85]**. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, produit par la cimenterie de (Chlef) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme NA 442 **[86]**.

A-Définition :

Ciment de « CHLEF » est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'aluminium (Al_2O3) et le fer (Fe_2O3). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 °C et 1500°C.

En présence d'eau à lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

Ciment de CHLEF présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico chimiques conforment à la norme NA 442.**[86]**, et à la norme NF P 15-301 **[87]**.

B- Analyse et caractérisation :

-Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker :

Le tableau **II.1** résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment (Annexes).

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Tableau II.1 : L'Analyse chimique du ciment et composition du clinker.

Analyse chimique du ciment	**Perte au feu (%)**	**7.00-9.50**
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	**1.50-3.00**
	Teneur en sulfates SO_3 (%) (NA 5042)	**2.00-3.50**
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	**1.90-2.30**
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	**0.005-0.01**
Composition hypothétique du clinker	Silicates tricalciques C_3S (%)	**58.00-64.00**
	Aluminates tricalciques C_3A (%)	**6.00-8.00**

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

-Essais physiques :

-La finesse :

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme [NF P 15-476] **[88]**.

•La consistance normale :

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme [NF P 15-431] **[89]**.

•Le temps de prise :

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme NF P 15-473 **[90]**.

Le tableau **II.2** résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Tableau II.2 : Essai physiques sur ciment

Essais	Norme
Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25.50-28.00
Retrait à 28 jours (mm/m)	< 1.00
Expansion (mm)	0.50 – 2.50
Début de prise (min)	120 – 180
Fin de prise (min)	210-280

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

•Essais mécaniques sur le ciment :

Selon la fiche technique les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément à la norme NF P 15-471 **[91]** sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier normalisé:

450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau. Les résultats obtenus par cet essai sont acceptables pour la confection d'un béton et sont résumés dans le tableau **II.3**.

Tableau II.3 : Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge

Ages (jour)	Résistance à la compression (MPa)
2	>20
28	42.5 et 62.5



Figure II.1 : Le ciment utilisé.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

II.2.2- Granulats :

II.2.2.1- Sable :

Le sable roulé utilisé dans cette étude est BOUGHAZOULE de la région de MEDEA, située à 170 km au sud d'Alger, sa classe granulaire est 0/0,5.

La **Figure II.2** suivante donne un aperçu sur la nature du sable utilisé.



Figure II.2: Sable roulé de BOUGHAZOULE.

Tableau II.4: Propriétés physiques d'identification de sable utilisé.

Caractéristique	Sable de Boughazoule	Normes
Classe granulaire	0/5	**NF EN 933-1 [92]**
Module de finesse	1.86	
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.55	**NF EN 1097-6 [93]**
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.49	**NF EN 1097-3 [94]**
Equivalent de sable (%)	62,5	**NF EN 933-8 [95]**
Taux d'absorption d'eau (%)	**0. 015**	**NF EN 1097-6 [57]**

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

L'analyse granulométrique du sable utilisé est présentée sur la **Figure II.3** suivante :



Figure II.3: Courbe granulométrique de sable utilisé.

II.2.2.2- Gravier :

Le gravier utilisé est un gravier concassé à deux classes granulaires (3/8 & 8/15) (Figure. **II.4** et **II.5**) provenant de la carrière de Mont Guorno de la région de Berrouaguia (Médéa) dont les propriétés physiques et mécaniques sont présentées au tableau **II.5** et l'analyse granulométrique est présentée dans la **Figure II.6**.



Figure II.4: Gravier de Mont Guorno 3/8.



Figure II.5: Gravier de Mont Guorno 8/15.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Tableau II.5 : Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés.

caractéristiques	Fraction 3/8	Fraction 8/15	Normes
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.5	2.53	NF EN 1097-6 [93]
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.29	1.27	NF EN 1097-3 [94]
Taux d'absorption d'eau (%)	0.598	0.795	NF EN 1097-6 [93]
Résistance aux chocs (Los-Angeles)	24.10	26.18	NF EN 1097-2 [96]

D'après les résultats du tableau **II.5**, il parait que les gros granulats sont de bonne qualité et peuvent être utilisés pour un béton.

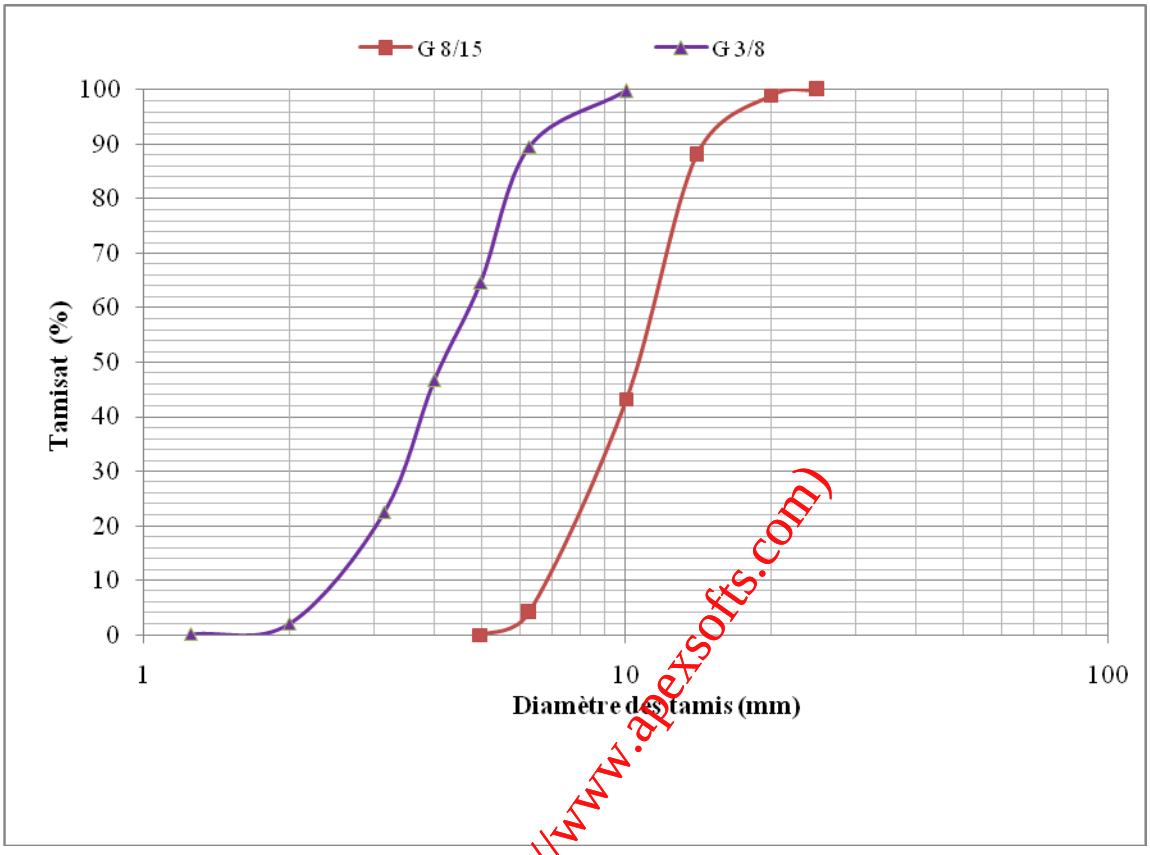


Figure II.6: Analyse granulométrie du gravier 3/8 et 8/15.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

II.2. 3- Déchets de semelles des chaussures :

Les granulats en semelles issus du broyage de semelles des chaussures usagés ont été utilisés en remplacement volumique partiel du sable. Ces granulats dont la dimension du plus gros grain est la même que celle du sable. On utilise deux types de déchets (durs et souples) Nous avons incorporé ces déchets dans le béton par substitution par rapport à la masse du sable avec des pourcentages de 10 % ,20%,30% et 40%.

A.1- Déchets de semelles des chaussures dures :

Ce sont des déchets de forme grains non compressibles **Figure**. **II.7** obtenus par le recyclage des semelles dures (polyéthylène haute densité).La densité est inférieure à celle de l'eau, et ils présentent une bonne résistance chimique.

On pose :

BDSD: Béton en déchets de semelles des chaussures dures.



Figures II.7 : Les déchets de semelles des chaussures dures.

A.2- Déchets de semelles des chaussures souples :

Ce sont des déchets de forme grains compressibles **Figure**. **II.8** obtenus par le recyclage des semelles souples (polyéthylène bas densité).La densité est inférieure à celle de l'eau, et ils présentent une bonne résistance chimique.

On pose :

BDSS: Béton en déchets de semelles des chaussures souples.



Figures II.8 : Les déchets de semelles des chaussures souples.

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)

Leurs courbes granulométriques sont présentées à la **Figure** II-9 et celle du sable est rappelée sur la même figure pour faciliter la comparaison des trois distributions granulaires.

On peut constater que les G.S.C. ont une répartition granulaire légèrement différente de celle du sable.

On notera aussi que les G.S.C, en comparaison du sable, ont une teneur en fine moins importante et comme nous le verrons plus tard, ce facteur va jouer un rôle important notamment vis-à-vis de l'affaissement et de la teneur en air occlus à l'état frais.

Enfin, signalons que la densité des G.S.C est de 1,11 pour G.S.C.D. et 1.00 G.S.C.D. pour donc très inférieure à celle des granulats naturels ici mis en œuvre et que leurs coefficients d'absorption d'eau sont négligeables.

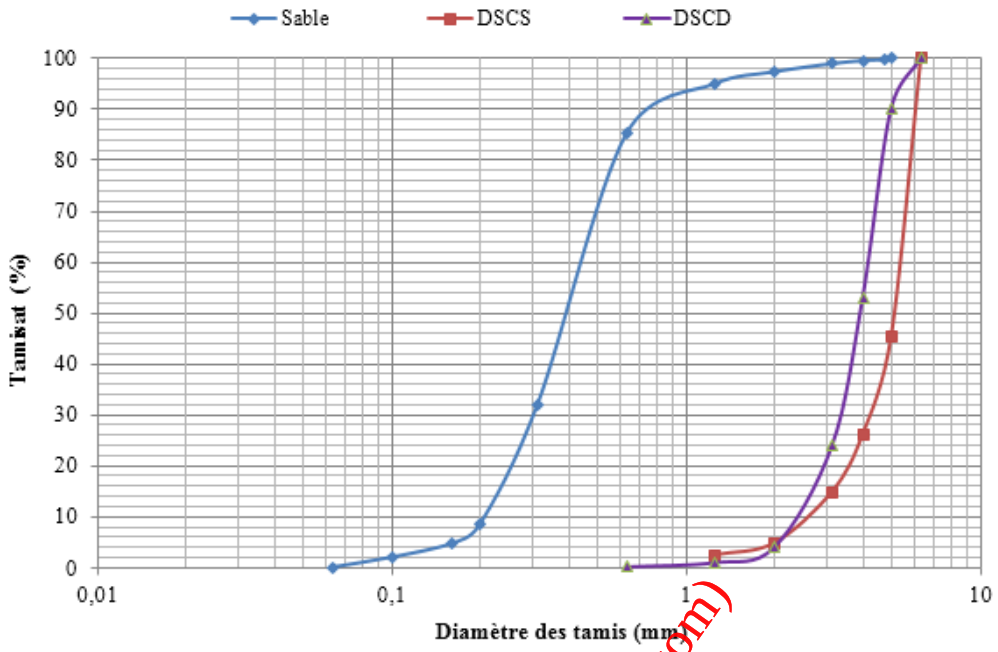


Figure II.9: Courbes granulométriques du sable et du G.S.C.de classe (0/5) mm.

II.2.4- Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la fabrication du béton est celle du robinet considérée comme potable, exempte de toute impureté nuisible au béton et conforme à la norme NF EN 1008**[97]**.

II.2.5- Adjuvant :

Pour assurer que l'affaissement reste constant pour tout les mélanges de bétons, on a chercher un adjuvant qui diminuer l'ouvrabilité et ne pas augmenter la résistance de béton. on a trouve un plastifiant (MEDAFLOW 104) selon la fiche technique du ciment (Annexes).

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

Plastifiants :

Ils diminuent la rigidité. Ils permettent la mise en forme à des températures inférieures à la température de décomposition de certains polymères linéaires.

II.3- Formulation du béton :

La méthode utilisée pour formuler notre béton est celle de Dreux – Gorisse, qui se base sur l'utilisation de courbes granulaires de référence **Figure II.10 [98]**.cette méthode est retenue pour sa simplicité à déterminer les différents composants du béton.

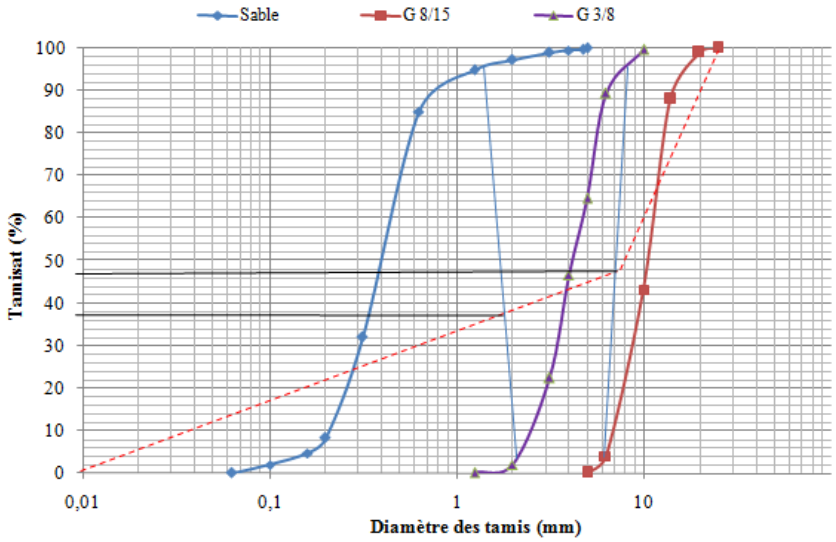


Figure II.10 : courbe de référence.

Le tableau suivant résume les différant compositions pour 1 m³ de chaque béton :

Tableau II.6: composition des bétons (pour 1 m³).

	B T	BDSS				BDSD			
		10%	20%	30%	40%	10%	20%	30%	40%
Ciment (kg)	350								
Sable BOUGH (kg)	680	653.33	626.66	600	573.33	650.4	620.8	590.66	561.33
Gravier 3/8(Kg)	182,52								
Gravier 8/15(Kg)	956,3								
Eau (kg)	217,73								
E/C	0.62								
Déchets (kg)	0	26.66	53.33	79.98	106.64	29.6	59.2	88.8	118.4
Assurer que l'affaissement sera constant = 8 ± 2cm									

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Avec : **BDSS :** béton de déchets de semelles souples

BDSD : béton de déchets de semelles dures

II.4- Techniques expérimentales :

Nous allons exposer la méthodologie des expériences menées sur les différents échantillons confectionnés. Ces techniques expérimentales seront menées conformément aux normes en vigueur.

II.4.1- Mise en œuvre :

Trois étapes constituent le mode de fabrication de béton de déchets plastiques.

- l'homogénéisation du mélange à sec (ciment et sable) pendant deux minutes environ à vitesse lente.

- introduction de l'eau de gâchage au cours du malaxage, ce qui a pour but de mouiller le mélange et de faciliter la mise en place, ceci pendant deux minutes à vitesse rapide.

- Les déchets de semelles progressivement en pluie au mélange lors de la première phase de malaxage à grande vitesse. Cette étape prendra deux minutes aussi.

L'homogénéisation est réalisée à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 15 litres, pour les essais de formulation et de caractérisation (Figure. **II.14**).

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)



Figure. II.11: Malaxage du béton.

II.4.2- Béton frais :

Les essais de caractérisation sur béton frais sont résumes dans le tableau **II.7** Suivant :

Tableau II.7 : Essais de caractérisation sur bétons frais.

Réf.	Mélanges	Essais	Appareil	Nombre de gâchées
1	BT	Ouvrabilité	Cône d'abrams	**09**
2	BDSD			
3	BDSS			
1	BT	Air occlus	Aéromètre	**09**
2	BDSD			
3	BDSS			
1	BT	Densité		**09**
2	BDSD			
3	**BDSS**			

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

A. L'Ouvrabilité :

• L'ouvrabilité a été mesurée selon la norme NF EN 12350-2 **[69],** NA 431 **[70]** ASTM C 143-78 **[71]** en utilisant le cône d'Abrams (**Figure. II.12).**



Figure II.12: Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

B. L'air occlus NF EN 12350-7 **[73]**

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre. Pour réaliser un béton le plus compact possible, il faut diminuer le volume

d'eau sans augmenter le volume d'air occlus et par conséquent sans diminuer la maniabilité du mélange. Il est possible d'évaluer la quantité d'air enfermée lors de remplissage d'un volume en exploitant un volume de référence cylindrique.

Nous avons utilisé pour cela un aéromètre de huit litres modèle« CONTROLS » (Figure. **II. 13**).



Figure II.13: Aéromètre à béton frais

On commence par remplir la chambre inférieure de l'appareil, sur trois couches égales tout en vibrant à chaque fois. On fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau à l'aide d'un tube dans le premier robinet. Le deuxième est ouvert. Quand l'eau commence à sortir par ce dernier, on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0 ?. On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieure et inférieure), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.



Figure II.14: Essai de L'air occlus

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

C. La densité :

• La masse volumique du béton a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[74],** NA436 **[75],**



Figure II.15: Mesure de la densité du béton.

D. Coulage et vibration :

Les différents types de bétons sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire.

Le béton a été coulé dans des moules métalliques de forme cubique de 15 cm d'arrête conformément à la norme NF EN 12390-2 **[99]**.

Le serrage des éprouvettes a été réalisé par piquage ensuite par une légère vibration manuelle comme présenté sur la Figure **II.16** suivante.



Figure II.16 : Fabrication des éprouvettes.

Demo(Visit http://www.apexsofts.com)

E. Mode de conservation :

Nous avons conservé les éprouvettes dans leurs moules pendant les premières 24 heures dans une ambiance à 20°C {2 de température pour une hygrométrie de 55%}.

Après démoulage, elles sont conservées dans la même chambre de conservation jusqu'au moment de la réalisation des essais. Ces derniers se font à 7 jours et à 28 jours.

Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. Après 24 heures de la confection, les éprouvettes ont été démoulées et conservées selon deux modes différents :

A l'air libre d'un climat moyen (laboratoire) **Figure**. II.17 et dans l'eau à 20°C ± 2°C **Figure**. II.18.



Figure II.17 : Conservation des éprouvettes à l'air libre.



Figure II.18: Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20°C ± 2°C.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés à l'atmosphère de laboratoire pendant environ 24 heures avant l'âge d'essai et jusqu'à poids constant.

II.4.3- Béton durcis :

Les essais de caractérisation sur béton durci sont résumes dans le tableau **II.8** suivant :

Tableau II.8 : Essais de caractérisation sur bétons durcis.

Réf.	Mélanges	Nombre d'éprouvette	Dimension (m^3)	Age	Types d'essai
1	BT	27	10x10x10	7et 28 Jours	**Compression**
2	BDSD				
3	BDSS				
5	BT	27	7x7x28		**Traction + Retrait**
5	BDSD				
6	**BDSS**				

A. Résistance à la compression :

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cubique normalisées de 15 cm d'arrête (norme NF EN 12390-3 **[78]**, NA 427**[79]**) ASTM C39/C39M. La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 2000 KN conforme à la norme NF P 18-412**[100] Figure II.19**.



Figure II.19 : Presse hydraulique (2000 kN).

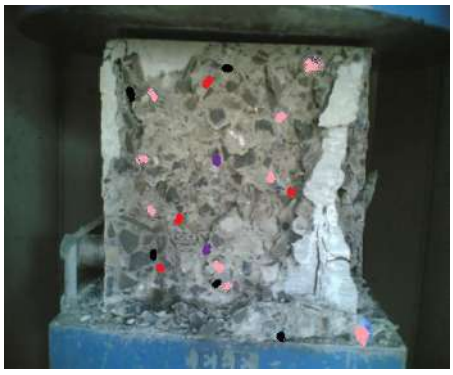
Les éprouvettes sont conservées sans être déplacée pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées jusqu'à réalisation des essais dans le même milieu ambiant.

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La conduite de l'essai est la suivante :

L'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de {0.2 MPa. Pour des éprouvettes de 10x10x10 cm, cela signifie une montée en charge de 10 KN /s} 4 KN / s. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)





L'éprouvette avant l'écrasement **L'éprouvette après l'écrasement**

Figure II.20 : Essai de compression.

B. Résistance à la traction par flexion :

Des éprouvettes prismatiques normalisées, de dimensions 7x7x28 cm ont été utilisés pour la détermination de la résistance à la traction. Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-407 **[80]** munie d'un banc de flexion 3 points (Figure. **II.27**).

Cet essai est homologué de norme NF P 18-407 **[80], (**NA 428) **[81],** ASTM C293 **[82]**, et permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du béton étudié. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté a et de longueur 4a (7 x 7 x 28). Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

M = Pa /3 et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est ftj = 3,6M / a



a/ L'éprouvette avant l'essai.



b/ L'éprouvette après l'essai.

Figure II.21 : Essai de traction par flexion.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

C-Retrait :

En l'absence de toute charge, le béton se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en béton.

Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du béton. Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28cm) conformément à la norme NF P 15-404 **[84].**



Figure II.22:Réctractomètre.

Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un réctractomètre **Figure II.22** munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait à tout moment à cours terme et moyenne terme (du 1j jusqu'a 28 jours) La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C.



Figure II.23 : Etalonnage de l'appareil.

C.1 Mesure des variations de longueur :

La mesure a lieu, l'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. Si, d'une mesure à l'autre, la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de0.03mm celle de l'éprouvette ayant la variation la plus voisine, il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact de scellement des plots, etc.) Et si e peut être éliminée, l'éprouvette doit être rebutée.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de metal de 280 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar ou protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations).même métal que l'appareil **Figure. II.23**.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

C.2 Mesure des variations de masse :

Si, en plus de retrait, on désire mesurer la variation de masse, pesé à 0.1g prés l'éprouvette à chacun des temps ou est effectuée une mesure de longueur.

C.3 Expression des résultats :

Pour chaque éprouvette ; sont calculés les rapports:

ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine,

L0 : Longueur de base, prise égale à 280mm.

ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon(éventuellement, de la variation de masse).

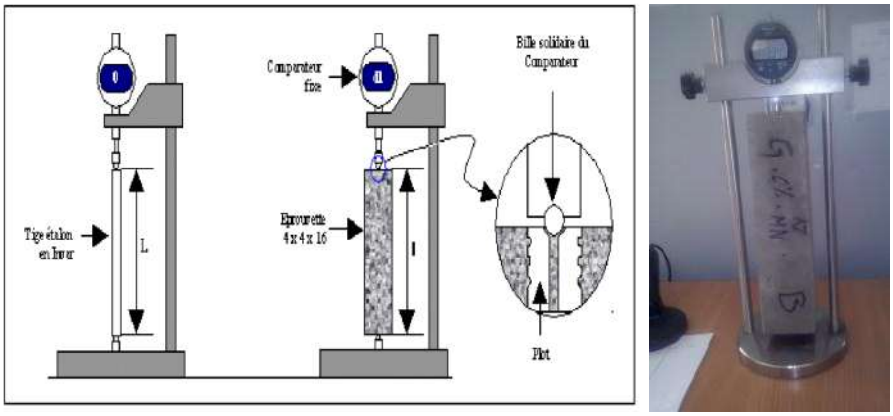


Figure II.24 : Appareillage pour la mesure du retrait.

C.4 Conduite de l'essai :

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 280 mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps t; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

Soit l (t0) la longueur de l'éprouvette au temps to choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l\,(t) = l(t) - l(to) = d(t) - dl(to)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par εet a pour expression:

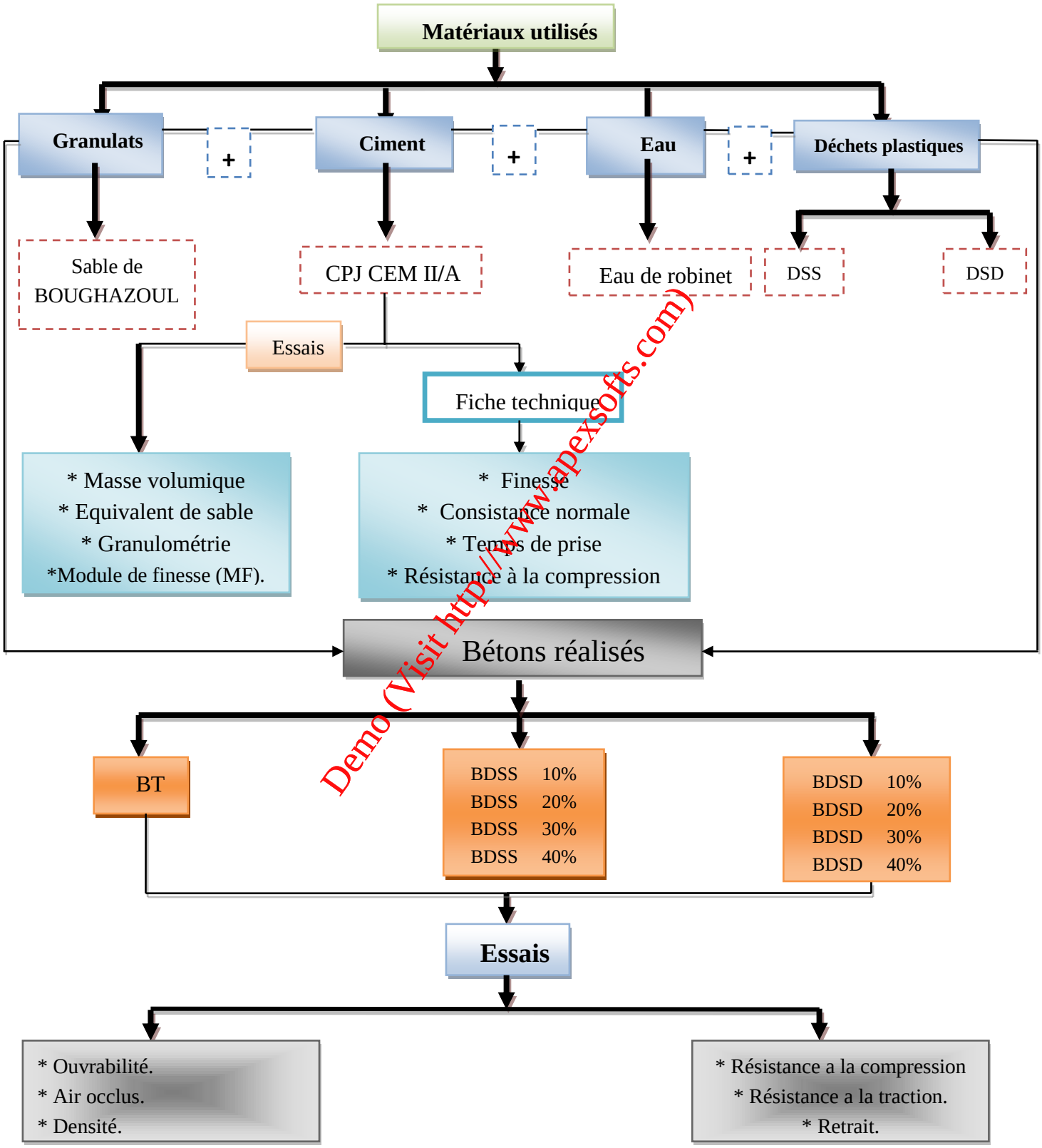
$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(to)}{L}$$

Δ L (t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air ΔL (t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, Δl(t) peut être positif: il y a alors gonflement).

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

II.4.4-Variables étudiées :

Les variables d'étude utilisés au cours de ce travail sont résumés dans la **Figure II.25** suivante :



Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Figure II.25 : Variables étudiées.

Chapitre III

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Résultats et interprétations

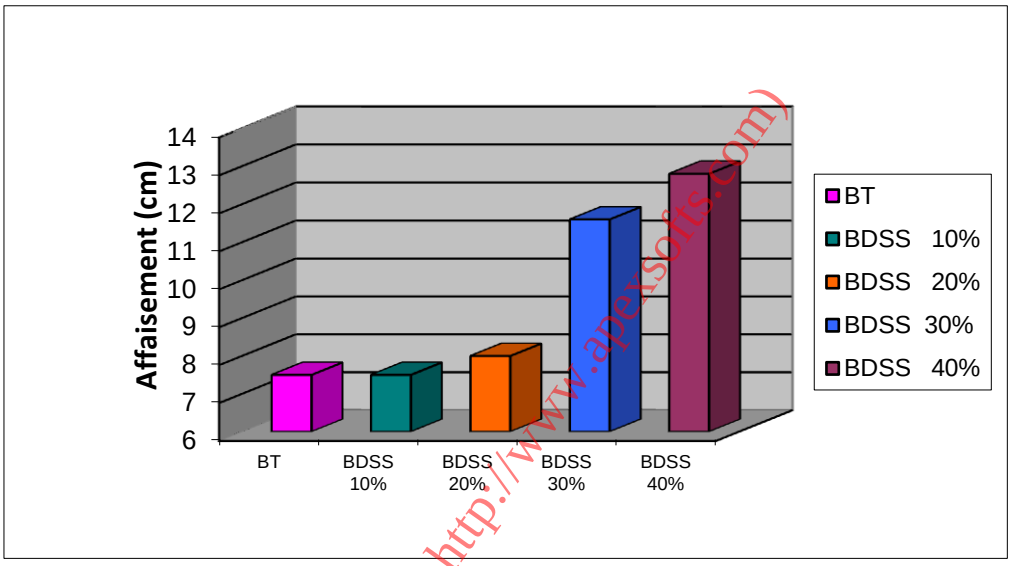
III.1- Introduction :

Les résultats des différents essais faits sur béton frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

III.2- Béton frais :

III.2.1- Ouvrabilité :

L'affaissement est un des critères que nous avons cherché à satisfaire dans notre processus d'optimisation.



Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Figure III.1 : L'affaissement des bétons BDSS avant l'ajout de l'adjuvant.

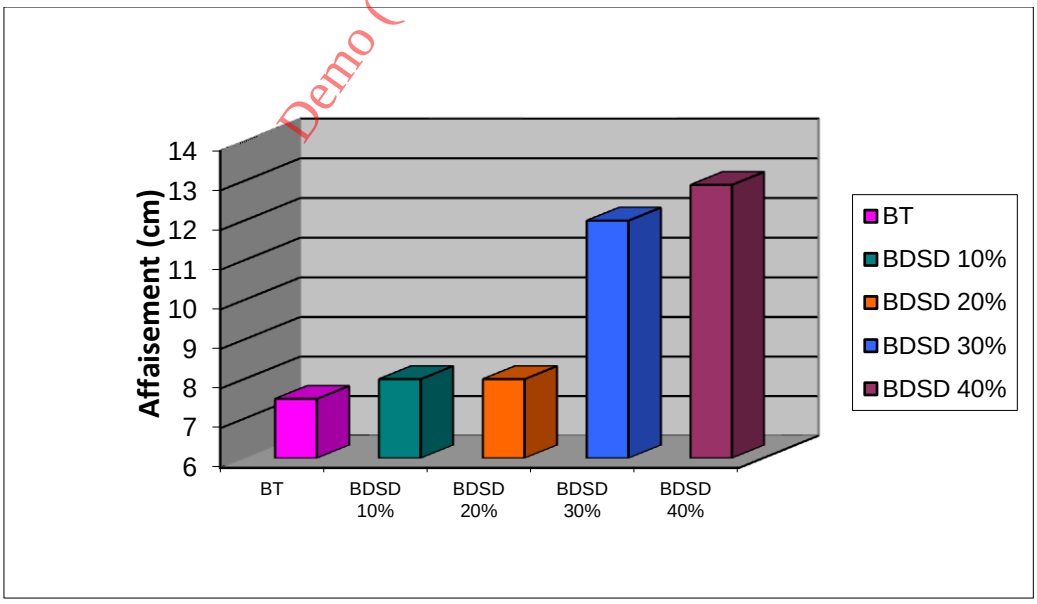
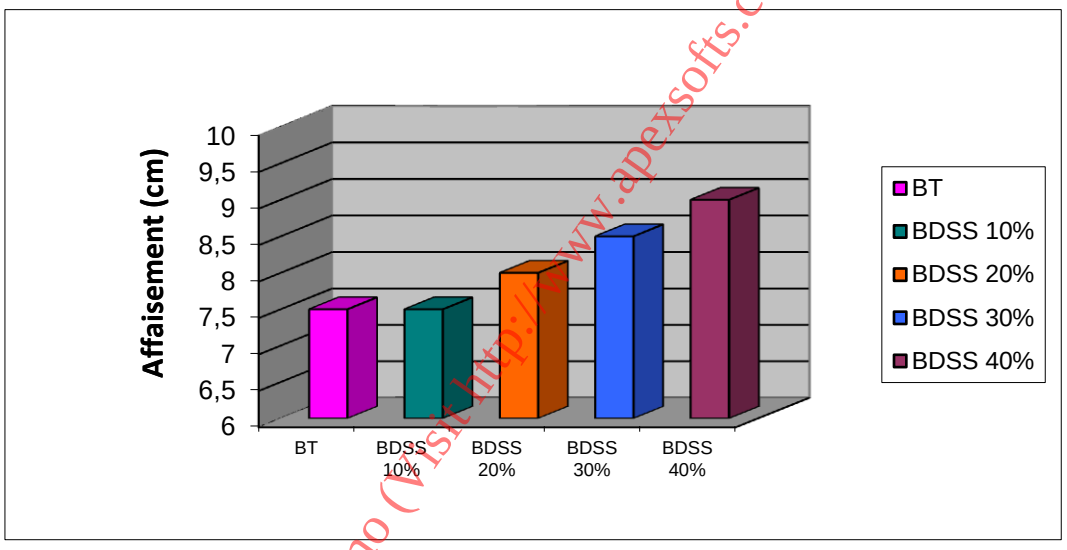


Figure III.2 : L'affaissement des bétons BDSD avant l'ajout de l'adjuvant.

D'après la Figure **III.1 et III.2,** On remarque que l'ouvrabilité de béton varie en fonction de pourcentage des déchets utilisé, et on constate que plus le pourcentage de déchets augmente plus l'affaissement augmente, et cela due a la présence d'eau libre dans le mélange qui contient les déchets de semelles par ce que les déchets ne peut pas absorber l'eau pendant le mélange[4]. Pour pouvoir comparer les résultats à l'état durci il faut que tout les mélanges ont la même plasticité on a donc utilisée différents pourcentages d'adjuvant (plastifiant) pour avoir le même affaissement qui est entre le 08 $\pm$ 2 cm dans tout les mélanges.

Les résultats sont présentés sur un histogramme **(Figure**. III.3 et III.4**)** qui permettent de comparer les valeurs d'une catégorie à l'autre avec l'ajout de l'adjuvant dans ce cas on a utilisé l'adjuvant juste pour BDSS 30 et 40% et BDSD 30 et 40%.



Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Figure III.3 : L'affaissement des bétons BDSS.

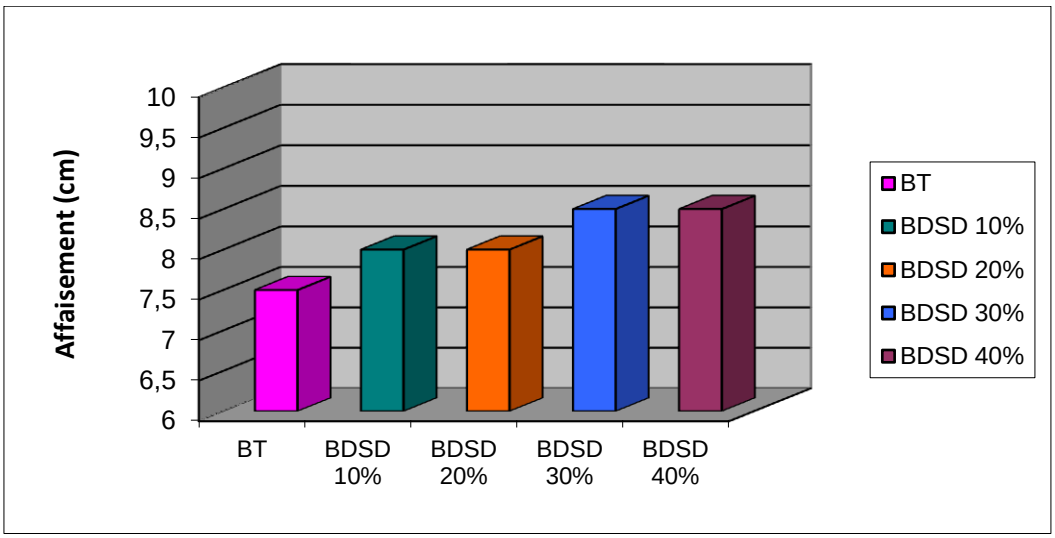


Figure III.4 : L'affaissement des bétons BDSD

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

III.2.2- Air occlus :

Dans cet essai on a mesuré l'air occlus (en (%)) pour chaque gâché de béton réalisé, et les résultats obtenus sont résumés dans les **Figures** III.5,III.6 suivantes. Ces résultats sont représentés sur un histogramme qui permet de comparer des valeurs d'une catégorie à l'autre.

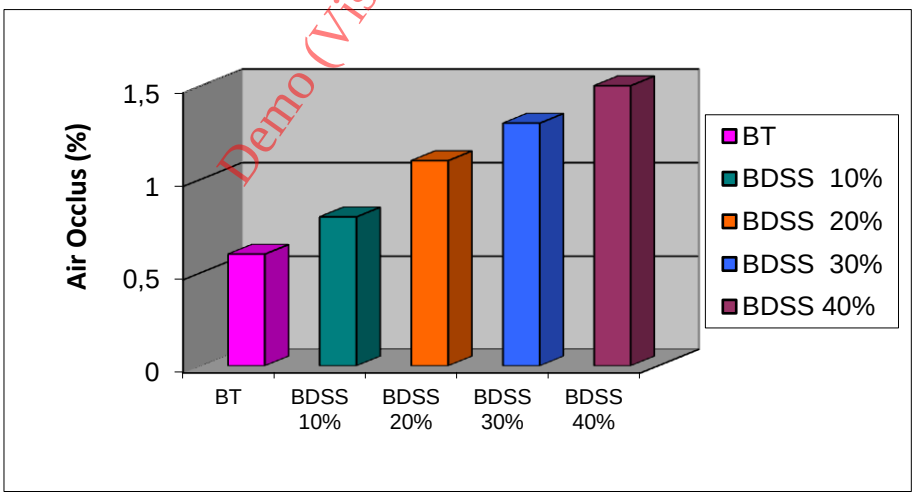


Figure III.5: Air occlus des bétons BDSS.

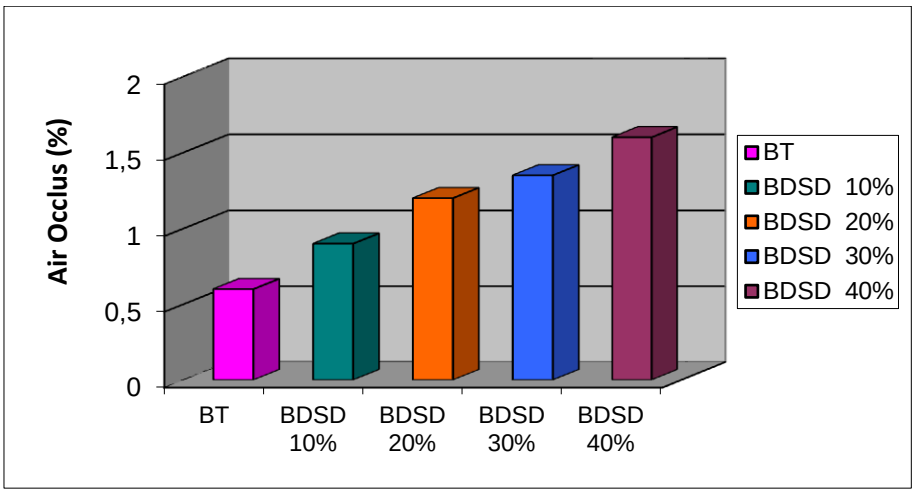


Figure III.6: Air occlus des bétons BDSD.

D'après les **Figures** III. 5 et III.6, on remarque que les grains de déchets de semelles des chaussures causent plus d'air occlus dans le béton. Cela explique que le béton à base de ce type de déchets est moins compact, et par conséquence plus poreux par rapport béton témoin les grains de semelles ont une capacité à piéger de l'air dans la rugosité de leur surface augmentant ainsi significativement le volume d'air dans le béton.

Enfin et nous y reviendrons le moment venu, l'accroissement de la teneur en air occlus dans le béton à l'état frais est pratiquement synonyme d'une augmentation de la porosité du même béton à l'état durci, en défaveur de la résistance mécanique et, en général, de la durabilité du composite.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

III.2.3- Densité :

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans les deux **Figures** suivantes III.7 et III.8.

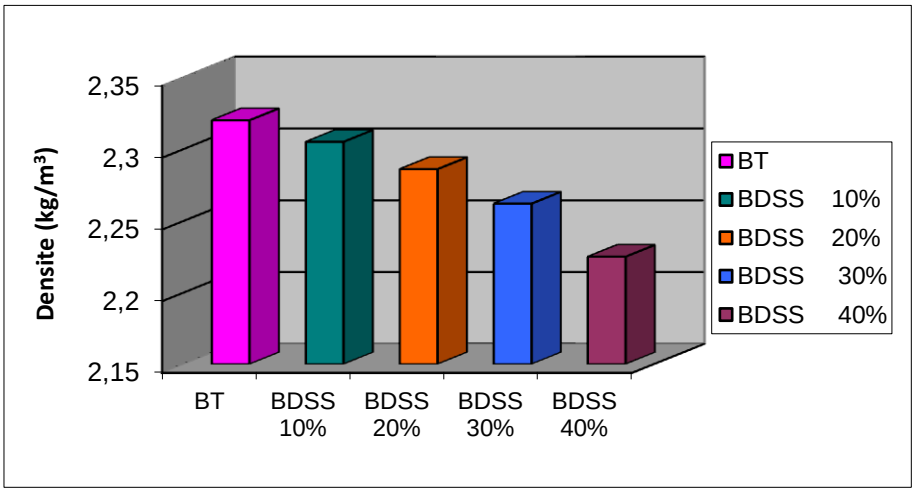


Figure III.7: Densité des bétons BDSS.

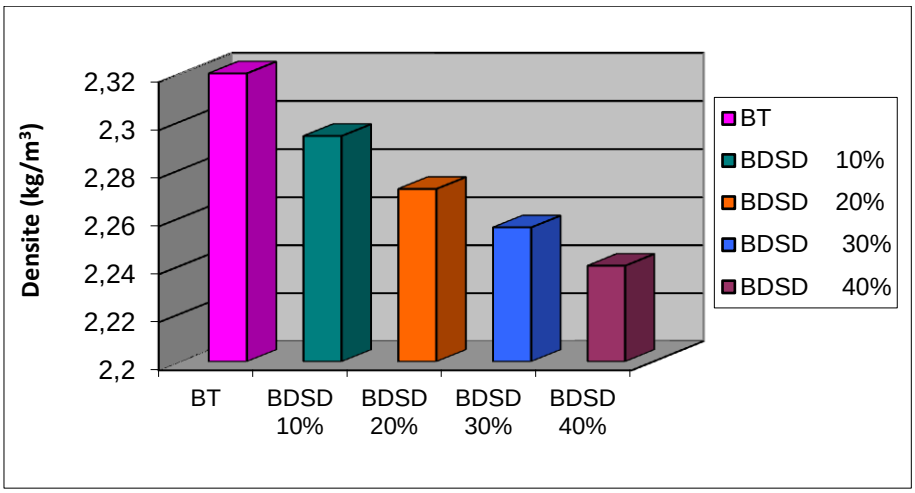


Figure III.8: Densité des bétons BDSD.

D'après les **Figures** précédentes (III.7, III.8), on remarque que la densité de béton à base des déchets de semelles est plus faible que le béton témoin, ce résultat est logique et attendu, puisque la densité du caoutchouc est plus faible que celle du béton.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

III.3 Béton durci :

De la même façon que le béton frais, les résultats des différents essais réalisés sur béton durci sont résumés comme suit :

- Les Résistances mécaniques :

Pour chaque essai, les résultats est la moyenne de 3 mesures prisent sur 27 éprouvettes cubiques à l'âge de 7et 28j avec des dosages en déchets de 10% ,20% ,30 % ,40% pour des bétons réalisé avec des déchets de semelles dures et souples :(BDSD) (BDSS).

Comme nous avons eu l'occasion de le signaler, dans l'application cible, en plus d'un affaissement de 8± 2 cm, une résistance en compression à l'âge 28 jours de 20,0 MPa selon RPA article 7.2.1 est aussi un critère d'optimisation de nos composites.

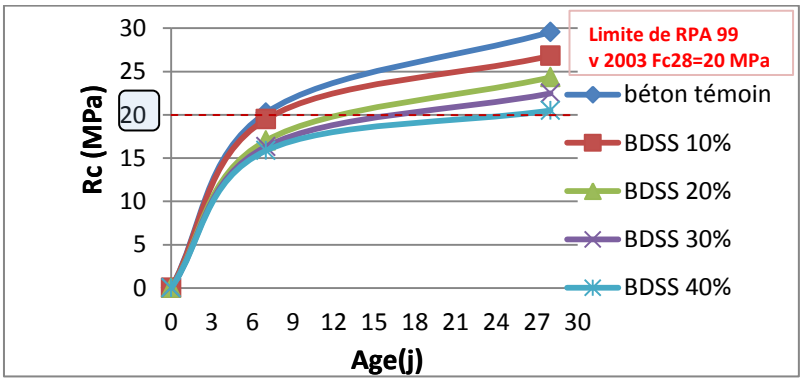


Figure III.9 : Résistance à la compression des bétons BDSS.

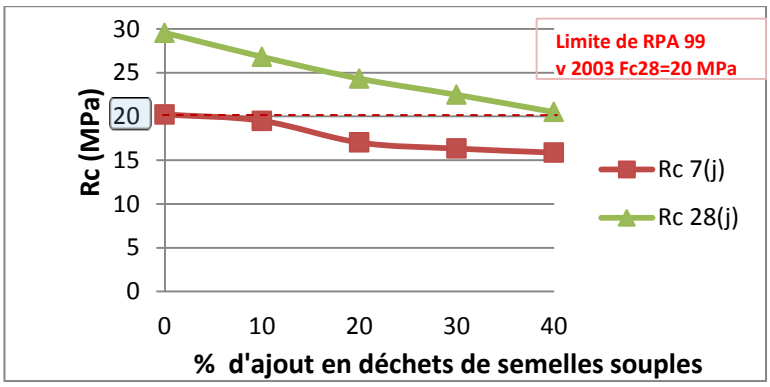
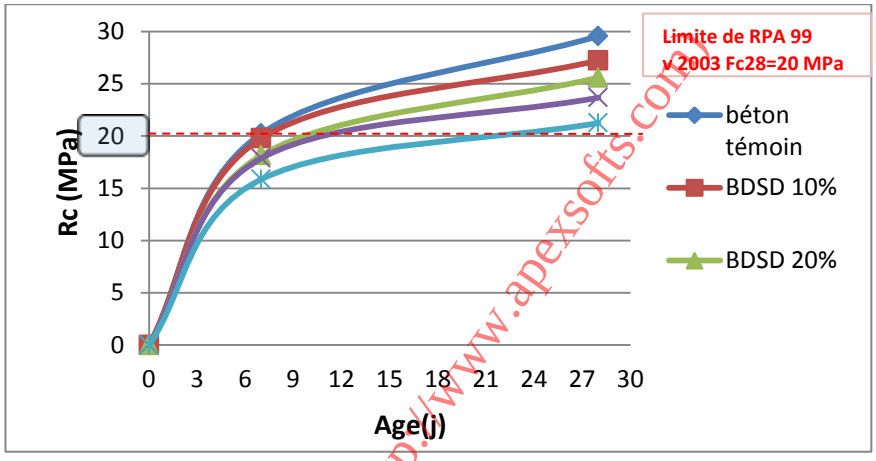


Figure III.10: Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'ajout de déchets des semelles souples.



Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Figure III.11 : Résistance à la compression des bétons BDSD.

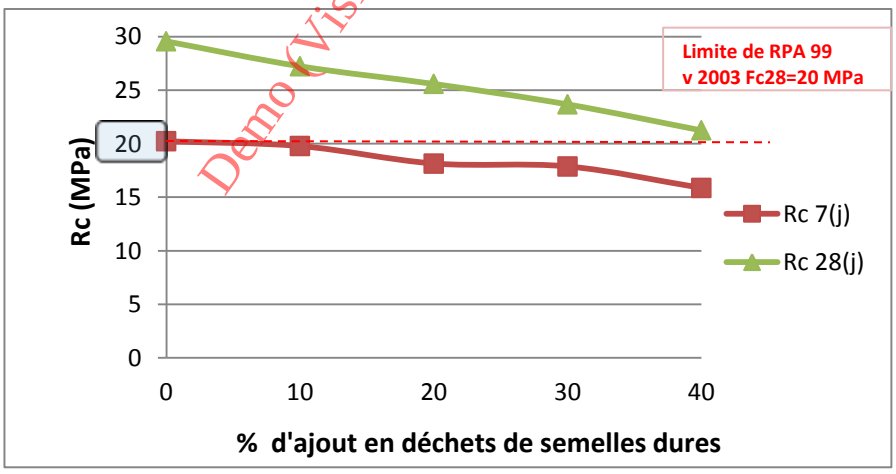


Figure III.12: Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'ajout de déchets des semelles dures.

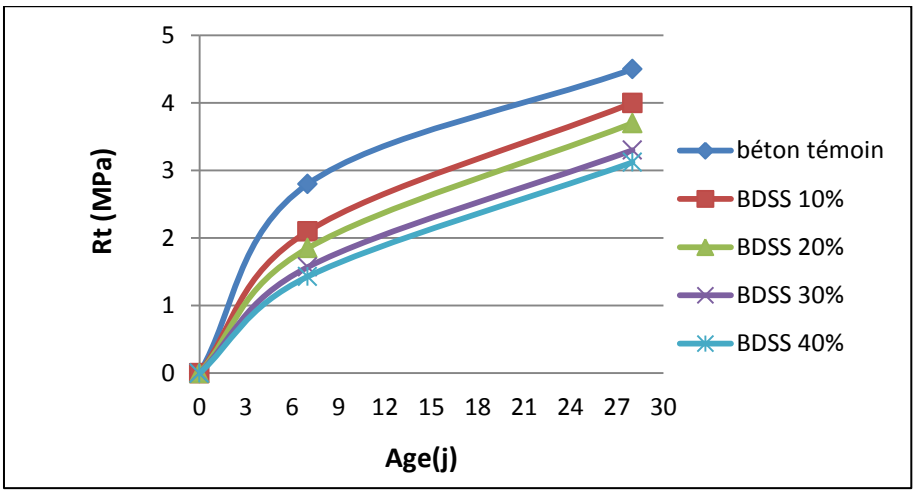
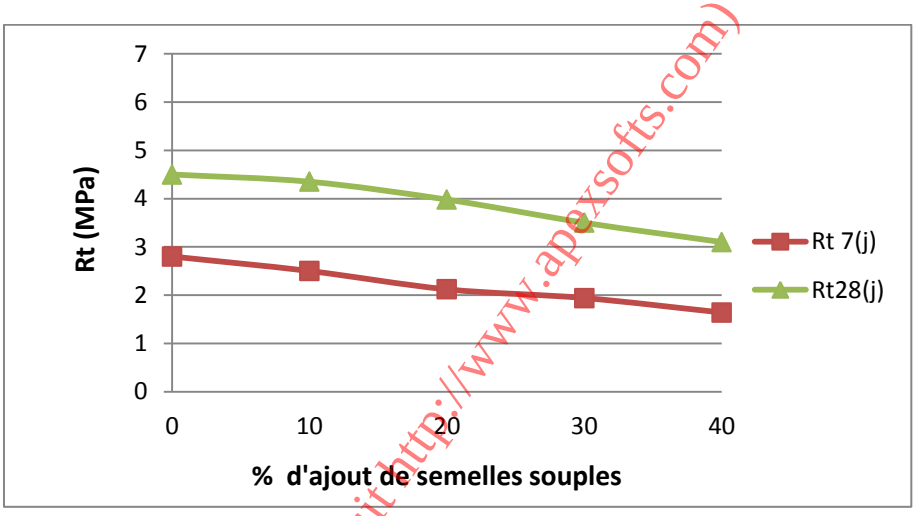


Figure III.13 : Résistance à la traction des BDSS.



Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Figure III.14: Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'ajout de déchets des semelles souples.

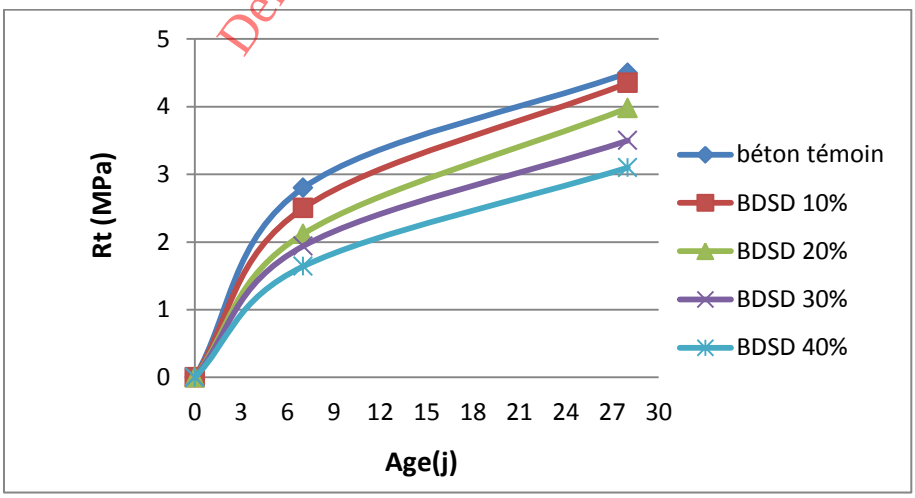


Figure III.15 : Résistance à la traction des BDSD.

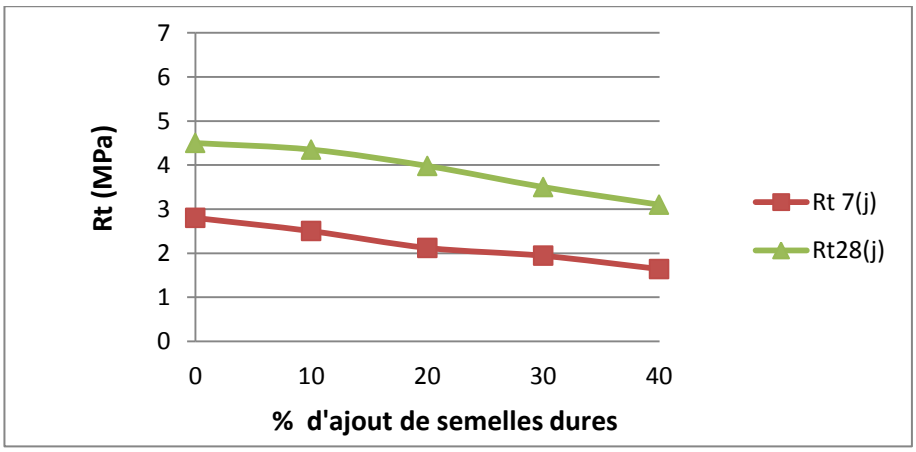


Figure III.16: Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'ajout de déchets des semelles dures.

Les résultats montrés dans le tableau III.1 indiquent clairement que l'incorporation de D.S (les deux types de grains) est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. A titre d'exemple, un taux de substitution en D.S.S et D.S.D de 40% entraîne une chute de résistance de 31%, et 28% successives, cette chute est de l'ordre de 18% et 13% successives pour un taux de 20% en D.S par rapport au béton de référence.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

Tableau III.1 : les pourcentages de chute de la résistance de compression en fonction de pourcentage de l'ajout de déchets de semelles.

% d'ajout / $\Delta Rc/Rc$	0%	10%	20%	30%	40%
BDSS	0%	7%	14%	21%	31%
BDSD	0%	8%	17%	19%	28%

Pour expliquer la chute de résistance en compression, l'argument couramment avancé notamment par Li et al. [101] 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 [43] 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. [102] 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.

Enfin, la dernière raison et non des moindres est liée à la porosité du béton incorporant des granulats en caoutchouc qui est réputée plus élevée que celle du béton de référence Bonnet [103], Garros [43].

III.4- Approche de durabilité :

- Retrait :

Les **Figures** III-17 et Figure III-18 permettent de mettre en lumière l'influence du dosage en déchets semelles sur le retrait en l'air libre du béton incorporant des D.S. L'augmentation du retrait est d'autant plus importante que le taux de substitution en D.S. est élevé. Quant aux résultats du suivi de masse, ils sont illustrés par les courbes des **Figure** III-16 et **Figure** III-17. En particulier ces dernières figures montre qu'à même perte de masse le retrait des composites incorporant des D.S. est plus élevé.

Demo (Visit http://www.pevsofts.com)

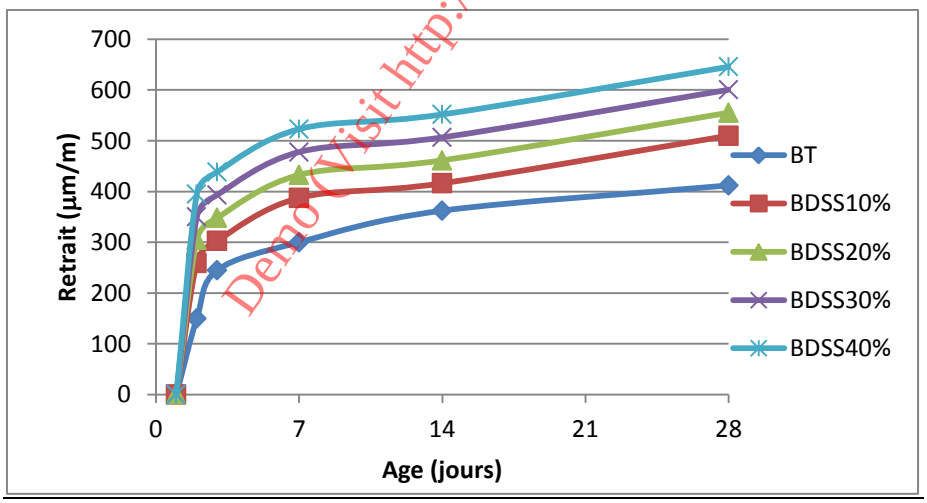


Figure III.17 : Effet des déchets de semelles souples (DSS) sur le retrait en air libre.

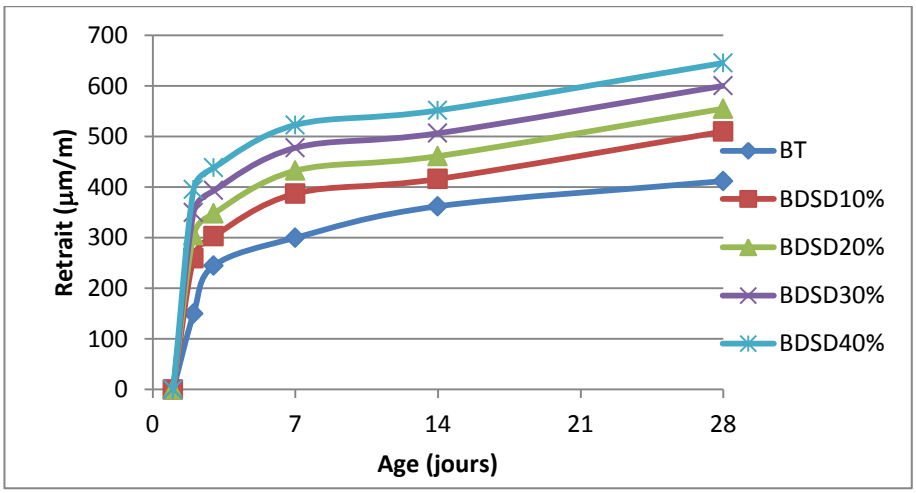


Figure III.18 : Effet des déchets de semelles dures (DSD) sur le retrait en air libre.

D'après les deux figures ci-dessus, on remarque en général que le retrait en air libre du béton à base des déchets de semelles (BDSS, BDSD) est nettement plus important que celui du béton témoin (BT), et en remarque aussi que le retrait augmente en fonction du pourcentage de substitution en déchets.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

III.5- Conclusion :

Dans le cadre de cette partie d'étude, l'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes:

1-Tous les types de déchets de semelles contribuent à l'amélioration d'ouvrabilité du béton.

2-Les déchets de semelles causent plus d'air dans la masse du béton.

3-La densité du béton est diminuée en fonction d'augmentation de pourcentage des déchets

Références bibliographiques

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

CONCLUSIONS

L'objectif de ce travail était de déterminer l'effet de substitution des déchets de semelles des chaussures sur les performances du béton à l'état frais et durci. La synthèse bibliographique et l'analyse des résultats expérimentaux nous ont permet de tirer les conclusions suivantes :

1- Les déchets de semelles des chaussures recyclés présentent un intérêt particulier car leur valorisation permet de réduire les volumes de déchets mis en décharges et protéger l'environnent;
2- - Les performances mécaniques du béton à base ce type de déchets diminuent (chute de 31% max de Rc) en fonction du pourcentage d'ajout en déchets mais restent acceptables vis-à-vis la limite exigée par le RPA99 version 2003, sur cette base ce type de béton est recommandé à l'utilisation dans les éléments en béton non structuraux n'ayant pas un effet sur la stabilité de structure (pavé en béton, buse de l'assainissement, caniveaux, regards...etc)

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

RECOMMANDATIONS

Les observations et les analyses que nous avons effectuées dans le cadre de cette recherche pourraient mener à des développements futurs dans le domaine du recyclage des déchets de semelles des chaussures. Pour cela on recommande les étudiants d'approfondir dans ces recherches et surtout d'étudier :

- La durabilité de ce type de béton.
- L'effet de ce type de déchets sur la santé humaine.
- l'incorporation d'autres dimensions de déchets de semelles des chaussures dans le béton (fibres).
- l'incorporation d'autres types de déchets de semelles des chaussures dans le béton.
- l'influence des adjuvants sur les bétons des déchets de semelles des chaussures.
- l'effet de l'orientation des fibres de semelles des chaussures sur la performance du béton.
- la durabilité de béton a base de déchets de semelles des chaussures.
- le pompage du béton à base des déchets de semelles des chaussures.
- autre type de bétons (béton spéciaux) à base de déchets de semelles des chaussures.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Références bibliographiques

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

[1] Debieb F. Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et sulfates. Thèse PhD, Departement génie civil, Université Houari Boumediene Algies ; 2007.
[2] Courard L., 'Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil', Notes de cours (Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Service des Matériaux de Construction, 1998), 195 p.
[3] Pimienta. p et remond. ''Bétons de déchets : prévenir les risques'', CSTB magazine, n° 109, novembre 1997, pp. 28-30
[4]Symboles pour la désignation abrégée des matières de base des compositions plastique,Norme NF T 50-050 ,octobre 1974.
[5] Caractérisation de la longévité des briques brutes et très bien écrasées réutilisées d'employer de bétons et des agrégats, des matériaux et du RILEM concrets (2011). http ://www.rilem.net/ms.php.
[6] Propriétés mécaniques et de longévité des agrégats réutilisés souillés employant béton.Ciment et composé concret, 32(2010) 421-426.Elsevier, la science directe.
[7] Quebaud M., 'Caractérisation des granulats recyclés - Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats', Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.
[8] Mr. GUENDOUZ Mohamed, 2012 Valorisation et recyclage des déchets plastiques dans le béton.
[9] M. HO Anh Cuong, Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface, 2010.
[10] Rapport d'activité 2007.
[11] Sukontasukkul P. and Chaikaew C., Properties of concrete pedestrian block mixed with crum rubber. Construction and Building Materials, 20: 450–457, 2006. Lefaux r.-chimie et toxicologie des matières plastiques, paris, compagnie française d'édition ,1990.
[10] Dossier Enseignant. « VOYAGE EN INDUSTRIE » CAP SCIENCES 2006.
[11] Guide des matières plastiques en mécanique, centime batelle, 1976.
[12] Abdoulaye SEYNI, Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage ,2008.
[13] D. Shaw, Eur. Rubber J., 6' 14 (1995)
[14]V.L.Shulman.LerecyclagedespneÙmatiquesdanslesétatsmembresdel'unioneuropéenne nouveauxdéfis'nouvellesréponses,ADEME'Ed.'Pneumatiquesusagés:mettezlagommesurlaValorisation' Paris (1999).
[15] H. Schnecko, Ma cromol.Symp.,l35' 327 (1998)
[16] K.F. Kelly, et al. Improved method for the re-utilizing rubber materials from factory scrap and their consequent remolding characteristics., Rubber division, ACS, Cleveland (ohio) (I 997)
[17] R. Burlet, Rubber Technol. Int. 171(1996)
[18] V.L. Shulman, brochure éditée par I'ETRA' (1999)
[19] W. Kaminsky,Angew. MakromoL. Chem',232' l5l (1995)
[20] K. Ketteringham, D. Herd, I. McCubbin' Progress in tire recycling, Rubber in the environmental age

Demo Version (Visit http://www.apexsoft.com)

progress in recYcling, UK (1996)
[21] P. Ltma. Le journal du CNRS, 10' l2 (1998)
[22] R. Feurrer, La position de I'industrie cimentière, ADEME, Ed., Pneumatiques usagés : mettez la gomme sur la valorisation, Paris (1999)
[23] C.G. Jung, La valorisation énergétique : les technologies émergentes de valorisation thermique' ADEMEEd.,Pneumatiquesusagés:mettezlagommesurlavalorisation'Paris (1999)
[24] W. Kaminsky. J.Phvs.lV,2' 1543 (1993)
[25] J.M. Lee. J.S. Lee, J.R Kim' S D. Kim, Energy' 20'969 (1995)
[26] A.I. Isayev, J. Chen, A. Tukachinsky, Rubb' Chem' Technol" 516' 26'7 (1995)
[27] R. Newell. The De-Link process - a technological breakthrough in rubber recycling. Rubber in the
environmental age - Progress in recycling, UK (1996)
[28] A. Jervis. Is pyrolysis economic?, Rubber in the environmental age - Progress in recycling, UK (1996)
[29] B. Mortgat, Environnement et Technique, 181' 32 (1998)
[30] A. Isayev, US.5,258, 413 (1993)
[31] A. Isayev. US,5,284, 625 (1994)
[32] B.C. Sekhar. V.A. Kormer, E.N. Sotnikova, US,5,770,632 (1998)
[33] W.C. Warner, ACS Stmp. Ser., 609.245 (1995)
[34] S.A.M. Hesp, US,5,683,498 (1997)
[35] E. Anderson, US,4,544,675 (1985)
[36] Y. Watabe et coll., US,4,211,676 (1980) el4,426,459 (1984)
[37] Rapport d'activité 2007.
[38] Nguyen Thanh L., Thèse de doctorat : Le Pneusol : Recherches –
Réalisations – Perspectives. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, le 22 décembre 1993.
[39] Wittmann f.h. « Propriétés de la pâte de ciment durcie. » Septième congrès international de la chimie des ciments : rapports principaux, Paris. 1980, Vol. I, Sous thème VI-2, 16 pages
[40] BerrAa M.., CastEellani **A.** "Toughness of old plain concretes." In : Wittmann Eds.Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS – 2, Zurich. Freiburg:Aedificato publishers. 1995, Vol. I, p. 85 – 94.
[41] Güneyisi E., Gesoğlu M and Özturan T., Properties of rubberized concretes containing silica fume. Cement and Concrete Research 34, 2309–2317, 2004.
[42] Khaloo A. R., Dehestani M. and Rahmatabadi P., Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles. Waste Management 28, 2472– 2482, 2008.
[43]Garros M., Thèse de doctorat : Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation. Université Paul Sabatier de Toulouse, 2007.
[44]Kaloush K. E., Way G. B. and Zhu H., Properties of Crumb Rubber Concrete. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board, Volume 1914, 2005.
[45] Khatib Z. K. and Bayomy F. M., Rubberized portland cement concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 206-213.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

[46] Fedroff D., Ahmad S., and Savas B. Z., Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber. Transportation Research Board, No. 1532, pp.66-72, 1996.
[47] Eldin ,N.N. and Senouci A.B., Observations on Rubberized Concrete Behavior. Journal of Cement, Concrete and Aggregates. Volume 15, Issue 1, July 1993.
[50] Biel T.D. and Lee H., Magnesium oxychloride cement concrete with recycled. Transportation Research Record No. 1561, pp. 6-12, 1996.
[51]Papakonstantinou C.G. and Matthew J.T., Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. Cement and Concrete Research 36, 1686–1691, 2006.
[52]Ganjian E., Khorami M and Maghsoudi A. A., Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. Construction and Building Materials 23, 1828–1836, 2009.
[53]Turatsinze A. and Bascoul A., Restrained Crack Widening in Mode I Crack Propagation for Mortar and Concrete. Advn Cem Bas Mat, 4:77-92, 1996.
[54]Sukontasukkul P. and Chaikaew C., Properties of concrete pedestrian block mixed with crum rubber. Construction and Building Materials, 20: 450–457, 2006.
[55]Hobbs D.W., The dependence of the bulk modulus, Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration. Mat. Struct. 4: 107-114, 1971.
[56]Neville A.M., Propriétés des bétons. Quatrième édition. Edition française par CRIB, Editions Eyrolles, 2000.
[57] Modulus of elasticity of concrete in compression. Materials and structure. Vol. 6, No. 30, 507-512, Recommandations RILEM CPC8, Nov.-Dec. 1972.
[58] Segre N., Joekes I., Use of tire rubber particles as addition to cement paste. Cement and Concrete Research 30, 1421-1425, 2000.
[59] Topçu I.B., Assessement of the brittleness idex of rubberized concretes. Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 2, pp. 177-183, 1997.
[60] Il. Erkan A.I., BS Thésis: Determination of brittleness index of rubberized
[61] Wu K. and Zhou J., The Influence of the matrix-aggregate bond on the strength and brittleness of concrete, Bonding in Cementitious Composites, S. Mindess and S. P. Shah (eds.), Materials Research Society, Pittsburgh, pp. 29-34, 1998.
[62] Benazzouk A., Mezreb K, Doyen G., Goullieux A. and Quéneudec. t'Kint M., Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement–rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates. Cement & Concrete Composites 25, pp 711–720, 2003.
[63] Benazzouk A., Douzane O. and Quéneudec. t'Kint M., Transport of fluids in cement–rubber composites. Cement & Concrete Composites 26, 21–29, 2004.
[64] Kerasley E. P. and Wainwright P.J., Porosity and permeability of foamed concrete. Cement Concr Res, 31: 805–12, 2001.
[65]Savas B.Z., Ahmad S. and Fedroff D., Freeze-thaw durability of concrete with ground waste tire rubber. Transportation Research Record No. 1574, Transportation Research Board, Washington DC, 80-88, 1996.
[66]Benazzouk A. and Quéneudec M., Effet du caractère cellulaire des granulats sur le comportement d'un composite ciment-caoutchouc aux cycles de gel/dégel. Proceeding of CNR IUT Roanne, publication de l'Université de St-Etienne, ISBN 2 86272 2200, Tome 2, pp. 477–87, 2001.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

[67] Hernández-Olivares F. and Barluenga G., Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. Cement and Concrete Research 34, 109– 117, 2004.
[68] Fattuhi N. I. and Clark L. A., Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 4, pp. 229-236, 1996.
[69] NF EN 12350-2, 1999, « Essai pour béton frais. Partie 2 : Essai d'affaissement », AFNOR.
[70] NA 431, 1989, «béton frais, détermination de la consistance-essais d'affaissement » Norme algérienne.
[71] ASTM C 143-78 Standard test method for slump-test .USA: ASTM; 2005.
[72] NF P 15-452, 1988, «Essai pour béton frais, Mesure du temps d'écoulement des béton et de mortier aux maniablimètre, AFNOR.
[73] NF EN 12350-7, 1999, « Essai pour béton frais. Partie 7 : Teneur en air occlus », AFNOR.
[74] NF EN 12350-6, 1999, « Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique », AFNOR.
[75] NA 436 ,1992-08-20 « béton frais, détermination de la consistance-essais d'affaissement ».Norme algérienne.
[76] NF EN 12504-4 2005, « Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son », AFNOR.
[77] NA 5027, 1997, béton auscultation sonique-mesure du temps de propagation d'onde Soniques dans le béton.
[78] NF EN 12390-3, 2003, « Essai pour béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes », AFNOR.
[79] NA427 ,1989 «Détermination de la résistance a la compression des éprouvettes» Norme algérienne.
[80] NF P 18-407,2003 «Essai pour béton durci. Partie 4 : Résistance à la traction des éprouvettes », AFNOR
[81] NA428 ,1992-08-20, «béton –détermination de la résistance a la flexion des éprouvettes» Norme algérienne.
[82] ASTM C293. "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam With Center-Point Loading." Annual book of ASTM standards.
[83] NF 13057 NBN NE 13057, Normes Belge, « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire », Octobre 1997, Mai 2002.
[84] NF P 15-404, Normes AFNOR : « Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules »1989.

[85] Fiche technique : « Ciment de chlef CEM II/A 42.5 », chlef 2009.
[86] NA 442, Normes Algérienne : « Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », 1994, 2000.
[87] NF 15-301, Normes Européenne : « Ciments courants »,1994
[88] NF P 15-476, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments- Détermination de la finesse », Aout 1990.
[89]NF P 15-431, Normes AFNOR : « Liants hydrauliques – technique des,essaisdétermination du temps de prise sur mortier normal », Février 1994.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)

[90] NF P 15-473, Normes AFNOR : « Méthodes d'essai des ciments-partie 3 : détermination du temps du prise et de la stabilité », Aout 1995.
[91] NF P 15-471, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques », Aout 1995.j,
[92] NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.
[93] NF EN 1097-6, 2001, « Esais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.
[94] NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire », AFNOR.
[95] NF EN 933-8, 1999, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable », AFNOR.
[96] NF EN 1097-2, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2: Méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation », AFNOR
[97] NF EN 1008, 2003, « Eau de gâchage pour bétons: spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton », AFNOR.
[98] Dreux G. & Festa J., 1998, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », huitième édition, Éditions Eyrolles, Paris, France.
[99] NF EN 12390-2, 2001, « Essai pour béton durci. Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes », AFNOR.
[100] NF P 18-412, 1981, «caractéristiques particulière des machines hydrauliques pour essais de compression.
[101] Li Z., Li F. and Li. J. S. L., Properties of concrete incorporating rubber tyre particles. Magazine of Concrete Researche, 50, No4, 297-304, Dec.1998.
[102] Lutz M. P., Monteiro P.J.M. and Zimmerman R.W., Inhomogeneous interfacial
[103] Bonnet S., Thèse de doctorat : Matériaux cimentaires à haute déformabilité par incorporation de granulats issus du broyage de pneus usagés. Université Paul Sabatier, Toulouse, 2004.
[104] Reichard T.W., Creep and drying shrinkage of lightweight and normal weight concretes, National Bureau Standing Monograph, 74, Washington DC, march 1964.

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)



ANNEXES

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)



CIMENT PORTLAND COMPOSE
CPJ-CEM II/A 42.5

NORME ALGERIENNE NA 442-2000

Conforme à l'arrêté interministériel du 04 juin 2003 portant sur les spécifications techniques et les règles applicables aux ciments

Notre ciment

L'activité principale de l'entreprise est la fabrication et la commercialisation du ciment portland composé CPJ CEM II/A 42.5.
ECDE produit à la commande d'autres types de ciments tels que : Le CPJ CEM II/A 52.5 et le CPJ CEM II/A 32.5

Aperçu d'un sac de ciment (50 Kg)

Présentation

Le ciment CPJ-CEM II/A 42,5 est un ciment Portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts.
Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Composition

Le ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 est constitué de:

- 80 à 94% de clinker Portland.
- 6 à 20% maximum d'ajouts (calcaire pur).
- Constituants secondaires (0 à 5% sulfate de calcium comme régulateur de prise).

Spécification

Le CPJ-CEM II/A 42,5 de l'ECDE répond aux exigences de la norme NA 442- 2000

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

Norme NA 442	Ciment ECDE
Sulfates SO3 ≤ 3.5 %	SO3 ≤ 2.00 %
Chlorures Cl- ≤ 0.1 %	Cl- ≤ 0.08 %

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Norme NA 442	Ciment ECDE
Début de prise ≥ 60 mn	Début de prise> 60 mn
Stabilité à chaud ≤ 10mm	Stabilité à chaud < 7mm
Retrait 28j ≤ 1000 µm/m	Retrait 28j < 650 µm/m

EVOLUTION DES RESISTANCES A LA COMPRESSION

Les résistances mécaniques à la compression, mesurées sur éprouvettes de mortier normal à 28 jours d'âge conformément à la norme NA 234 donnent les résultats suivants:

- Limite inférieure (Li) : ≥ 42.5 Newtons/mm2
- Limite supérieure (Ls) : ≤ 62.5 Newtons/mm2

Valeurs limites garanties:

- A 02 jours d'âge : 10.0 Newtons/mm2
- A 28 jours d'âge : 40.0 Newtons/mm2

Domaine d'utilisation

- Béton courant (non armé ou faiblement armé: fondations, portées réduites, décoffrage différé).
- Produits préfabriqués en béton non armé (blocs, hourdis ...)
- Maçonnerie.
- Stabilisation des sols.
- Travaux en grande masse (barrages etc ...)
- Béton routier.
- Béton fortement sollicité.

Précautions et recommandations pour l'emploi

- Il est recommandé de stocker le ciment dans les endroits étanches secs pour éviter l'hydratation du produits.
- Pendant le durcissement et en saison chaude, maintenir le béton humide en l'arrosant régulièrement ou en utilisant des produits de cure afin d'éviter la dessiccation des parties superficielles.
- Eviter les décoffrages prématurés pour préserver les résistances à long terme.
- Utiliser les agrégats propres (sable, gravier ...).
- Respecter le dosage ciment – eau – agrégats.
- Utiliser tout moyen (vibreur ...) pour assurer une compacité maximale du béton, facteur important pour la garantie de résistance mécanique optimums.
- Eviter un surdosage de ciment qui provoquerait une tendance à la fissuration du béton et donc une perte de résistance.

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)

Figure 01 : fiche technique ciment de chlef



Figure 02 : Tamiseuse électrique



Figure03 : Essais d'équivalent de sable

Demo (Visit http://www.apexsoft.com)



Figure 04 : Le malaxage du béton



Figure 05 : Essais de l'air occlus



Figure 06 : Les éprouvettes après décoffrage

Demo (Visit http://www.apexsofts.com)