



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Télidji- Laghouat

FACULTÉ : GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT : GENIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : RAMDANI Fatima & MEKADEM Roukia

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Thème

COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE D'UN BETON A BASE DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
ZIREGUE Ahmed	MCB	Président
BELMECHERI Oum Habiba	MAA	Examineur
GOUAL Idriss	Professeur	Rapporteur
FERHAT Ahmida	MAA	Co-rapporteur

Promotion : Juin - 2019

قال عز وجل: [وَقَضَىٰ رَبُّكَ أَلَّا تَعْبُدُوا إِلَّا إِيَّاهُ وَبِالْوَالِدَيْنِ إِحْسَانًا إِمَّا يَبُلُغَنَّ عِنْدَكَ الْكِبَرَ أَحَدُهُمَا أَوْ كِلَاهُمَا فَلَا تَقُلْ لَهُمَا أُفٍّ وَلَا تَنْهَرْهُمَا وَقُلْ لَهُمَا قَوْلًا كَرِيمًا وَخَفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا] صدق الله العظيم

إلى نور العيون...ورمش الجفون والسر المكنون والحب المجنون في القلب المفتون والعقل الموزون والصدر الحنون، إلى البلسم الشافي والقلب الدافئ والحنان الكافي، إلى التي أحاطتني بسياج حبها إلى أروع أم في الوجود

أمي الحبيبة

إلى الذي تاهت الكلمات في وصفه وعجز اللسان في ذكر مآثره إلى سندي وعوني وقدوتي إلى النور الوضاء مصدر فخري وذخري إلى ذلك الينبوع الذي اغترفت منه الحنان إلى الذي يعجز القلم واللسان على خطه في كلمات إلى من جعل نفسه شمعة تحترق من أجل أن ينير دربي وإلى من تعب وشقي من أجل راحتي وسعادتي إليك يا أبي الغالي

• إلى العزيزة والحبيبة الغائبة الحاضرة في قلبي دائما جدتي رحمة الله عليها

إلى من ساندوني في السراء و الضراء إخوتي إخوتي فضيلة, احمد ,كريمة ,عبدور ,فاطمة و زوجها مسعود و اختي فتيحة وزوجها علي الى ورود حديقتنا بشرى , خضرة ,خديجة , مريـة و البرعمة الصغيرة رهف اروي .

• إلى أصدقاء دربي فاطنة صيافة و فاطمة رمضاني سمية لبيـض شيماء هراوة

و إهداء خاص إلى من قاسمتني جهد البحث فكانت نعم المعينة و الشريكة و كانت سنداً و دعماً لي فاطمة.

وإلى من ساهم من بعيد أو قريب في إنجاح هذا الجهد المتواضع

رقية مقدم

قال عز وجل: [وَقَضَىٰ رَبُّكَ أَلَّا تَعْبُدُوا إِلَّا إِيَّاهُ وَبِالْوَالِدَيْنِ إِحْسَانًا إِمَّا يَبُلُغَنَّ عِندَكَ الْكِبَرَ أَحَدُهُمَا أَوْ كِلَاهُمَا فَلَا تَقُلْ لَهُمَا أَفْ وَلَا تَنْهَرْهُمَا وَقُلْ لَهُمَا قَوْلًا كَرِيمًا وَاخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا] صدق الله العظيم

إلى نور العيون...ورمش الجفون والسر المكنون والحب المجنون في القلب المفتون والعقل
الموزون والصدر الحنون، إلى البلسم الشافي والقلب الدافئ والحنان الكافي، إلى التي أحاطتني
بسياج حبها إلى أروع أم في الوجود

أمي الحبيبة

إلى الذي تاهت الكلمات في وصفه وعجز اللسان في ذكر مآثره إلى سندي وعوني وقدوتي

إلى النور الوضاء مصدر فخري وذخري إلى ذلك الينبوع الذي اغترفت منه الحنان إلى الذي
يعجز القلم واللسان على خطه في كلمات إلى من جعل نفسه شمعة تحترق من أجل أن ينير
دربي وإلى من تعب وشقي من أجل راحتي وسعادتي إليك يا أبي الغالي

إلى من ساندوني في السراء و الضراء إخوتي هشام , حمزة , اشواق , عائشة وابنتها هزار طيبة
وزوجها وكل عائلتي من قريب وبعيد وبالأخص بنات خالي الغاليات

إلى أصدقاء دربي رقية مقدم نور الهدى طرباقو وسمية لبيض وفقهم الله في مشوارهم
وسدد خطاهم

وإهداء خاص إلى من قاسمتني جهد البحث فكانت نعم المعينة و الشريكة و كانت سنداً و
دعماً لي رقية

و إلى من ساهم من بعيد أو قريب في إنجاح هذا الجهد المتواضع

رمضاني فاطمة

Remerciement

Au terme de ce long moment de durs sacrifices et labeur, qu'il me soit permis de rendre hommage et de remercier toutes les personnes physique et morale sans lesquelles l'accomplissement de ce travail ne serait qu'une expérience mélancolique.

Que Monsieur **Idriss GOUAL**, Professeur à la faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'université Amar Téliidji de Laghouat et encadreur de notre mémoire trouve ici l'expression de toute nos profondes gratitude pour les longues heures de travail qu'il nous a consacrées. Sa compétence, sa disponibilité et sa gentillesse m'ont été d'un soutien de tous les instants, sans lequel nous n'y serions pas arrivées. Il nous a fait l'honneur en acceptant et en permettant de travailler sous sa direction.

Que Monsieur **Ahmida FERHAT**, enseignant à la faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'université Amar Téliidji de Laghouat et Co-promoteur de notre mémoire daigne accepter nos gratitude pour son encadrement et le temps qu'il a consacrés avec nous pour la réalisation des essais expérimentaux.

Nous voudrions remercier M. **Ahmed ZIREGUE** docteur à la faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'université Amar Téliidji d'avoir accepté de présider ce mémoire, et Mm. **Oum Habiba BELMECHRI** enseignante à la faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'université Amar Téliidji de Laghouat qui a eu le temps d'examiner notre travail, et qui ont honorés ce mémoire. Trouvent ici l'expression de nos profonds respects.

Egalement, nous tenons à remercier tous les enseignants du département de Génie Civil et tous les membres du laboratoire de Génie Civil à l'université à Amar Téliidji de Laghouat.

Nous remercions aussi M. **Ali CHATTI**, technicien supérieure au laboratoire pédagogique du département de Génie Mécanique à l'université à Amar Téliidji de Laghouat, et M. **Boudali SAHRAOUI**, le chef labo au Contrôle Technique de Construction, sans oublier M. **Walid OUBATI** technicien au laboratoire physique pour leurs aides et leurs disponibilités.

Nos remerciements à tous ceux qui nous ont soutenus et encouragés, de près ou de loin, durant la réalisation de ce mémoire et pour leur contribution inestimable, trouvent ici tous nos respects.

ملخص

يهدف هذا العمل لدراسة إمكانية تجميع حبيبات المطاط في تصنيع الخرسانة وذلك من خلال الاستبدال الكتلي لكمية من الرمل بحبيبات المطاط وذلك بنسب تتراوح من 0 إلى 100%. تمت دراسة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانات المستحدثة، ومقارنتها نسبة للخرسانة المعتادة. أظهرت النتائج المخبرية، أنه بالرغم من أن الاستبدال الكتلي للرمل بنسبة 100% حبيبات المطاط يؤدي إلى التقليل من مقاومة الخرسانة للضغط إلا أن القيم المتحصل عليها تبقى مطابقة لاستخدام الخرسانة المستحدثة في ميدان البناء باستعمال الخرسانة خفيفة الوزن "الصف II". وبالإضافة أن الزيادة في حبيبات المطاط في الخرسانة المستحدثة يؤدي إلى الزيادة في الليونة والعزل الحراري.

الكلمات المفتاحية: حبيبات المطاط - الخصائص الفيزيائية والميكانيكية - الخرسانة خفيفة الوزن

Résumé

Ce travail a pour but d'étudier la faisabilité de valorisation des granulats de caoutchouc dans la fabrication de béton par substitution massique de 0 à 100% dans la classe du sable. Les propriétés physico-mécaniques des différents bétons élaborés sont analysées et comparées au béton ordinaire témoin. Les résultats expérimentaux, ont révélé que la substitution massique du sable jusqu'à 100% des granulats de caoutchoucs baisse significativement la résistance à la compression, mais les valeurs restent compatibles avec l'utilisation du composite dans le domaine des bétons légers de construction de "classe II". En plus, en fonction de la teneur en caoutchouc, le béton devient plus ductile et thermiquement isolant.

Mots clés : Granulats de caoutchouc - Propriétés physico-mécaniques - Bétons légers

Abstract

This work aims to study the feasibility of reuse of rubber aggregates in concrete manufacturing as sand substitution with amounts varying from 0% to 100% by mass of sand. The physical and mechanical properties of the various concretes produced are analysed and compared to those of ordinary concrete. Experimental results have shown that the mass substitution of sand with 100% of rubber aggregates reduces significantly the compressive strength, but the values remain compatible with the use of the composite in the field of lightweight concrete "Class II". In addition, the concrete becomes more ductile and thermally insulating with the rubber aggregates content incorporated.

Key words: Rubber aggregates - Physical and mechanical properties - Lightweight concrete

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

<i>Tableau I.1. La teneur des constituants du béton en poids et en volume.</i>	<i>1</i>
<i>Tableau I.2. Différents types des bétons.</i>	<i>3</i>
<i>Tableau I.3. Les différents types de déchets utilisés en Génie Civil.....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau I.4. Substances contenues dans les pneus usagés de voiture</i>	<i>12</i>
<i>Tableau I.5. Composition chimique des pneus usagés</i>	<i>13</i>

Chapitre II

<i>Tableau II.1. Récapitulatif des résultats de la caractérisation physiques des matériaux de base.....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau II.2. Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats Dmax.</i>	<i>29</i>
<i>Tableau II.3. Dosages des différents matériaux.</i>	<i>32</i>
<i>Tableau II.4. Les dosages de superplastifiant pour les différents bétons élaborés</i>	<i>33</i>
<i>Tableau II.5. La composition de 15 éprouvettes 7×7×28 cm³ pour chaque Bétons</i>	<i>33</i>

Chapitre III

<i>Tableau III.1. Coefficients d'absorption par capillarité obtenue pour la totalité des échantillons.</i>	<i>46</i>
<i>Tableau III.2. Résultats de mesure de la porosité pour les différents bétons étudiés</i>	<i>47</i>

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

<i>Figure I.1.fumée toxique qui se dégage en brulant des pneus.....</i>	<i>12</i>
<i>FigureI 2. Aspect des déchets de caoutchouc</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.3. Copeaux de pneus déchiquetés.</i>	<i>16</i>
<i>Figure I.4.Chantier expérimentale Pneu sol à Bou-Smail.....</i>	<i>17</i>
<i>FigureI 5.Effet de la teneur en caoutchouc sur la masse volumique sèche.....</i>	<i>18</i>
<i>FigureI. 6.Effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la compression.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure I.7. Effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la flexion</i>	<i>19</i>
<i>Figure I.8. Effet de la teneur en caoutchouc sur le module d'élasticité.....</i>	<i>19</i>

Chapitre II

<i>Figure II .1 .Méthode de récipient.</i>	<i>21</i>
<i>Figure II. 2.Méthode l'éprouvette graduée.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II. 3.Analyse granulométrique de sable, granultas de caoutchouc et graviers.</i>	<i>23</i>
<i>Figure II .4Courbe granulométrique des matériaux utilisée.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II. 5.Méthode de l'équivalent de sable.</i>	<i>25</i>
<i>Figure II. 6.Méthode de l'essai d'absorptions.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure II. 7. Abaque permettent la détermination de C</i>	<i>29</i>
<i>Figure II 8.Courbe granulométrique des matériaux utilisée (caoutchouc, sable, graviers)31</i>	
<i>.Figure II. 9. Essai de l'affaissement au cône d'Abrams</i>	<i>32</i>
<i>Figure II .10.Malaxeur de type batteur à axe vertical</i>	<i>34</i>
<i>Figure II. 11.Le démoulage et conservation des éprouvettes.</i>	<i>35</i>

Chapitre III

<i>Figure III 1.Schéma de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III .2.Schéma présenté le dispositif de l'essai de mesure de la porosité</i>	<i>38</i>
<i>Figure III. 3. Etape de mesure de la porosité accessible à l'eau.</i>	<i>39</i>
<i>Figure III. 4.Schéma du dispositif en flexion simple en 3 points.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure III. 5 .Eprouvette après rupture en flexion simple.</i>	<i>40</i>
<i>Figure III. 6 .Essais de compression</i>	<i>41</i>
<i>Figure III.7.Presse de compression simple.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure III.8 Technique de mesure le module élasticité.</i>	<i>42</i>
<i>Figure III. 9.Appareil de mesure ultra son</i>	<i>42</i>
<i>Figure III.10.Le schéma du dispositif de l'Essai de résistance au feu.</i>	<i>43</i>
<i>Figure III.11. Essai de résistance au feu.....</i>	<i>43</i>

<i>Figure III. 12. La variation de la masse volumique sèche du composite, en fonction de la teneur en particules de caoutchouc.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III.13. Résultats de l'essai d'absorption par capillarité pour les mortiers.</i>	<i>45</i>
<i>Figure III.14.Variation de la porosité en fonction de la teneur en caoutchouc.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure III.15. Etat de surface des éprouvettes de bétons élaborés.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure III.16. Evolution de la résistance à la flexion simple en fonction de l'âge pour les six bétons confectionnés (B0-B5).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III.17. Etat de l'éprouvette en cours de l'essai de flexion simple.</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.18. Variation de la résistance à la flexion simple en fonction de la teneur en caoutchouc.</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.19. Etat des éprouvettes de bétons à base de granulats de caoutchouc après l'écrasement</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.20. Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge pour les six bétons confectionnés (B0-B5).</i>	<i>50</i>
<i>Figure III.21.Variation de la résistance à la compression simple en fonction de la teneur en caoutchouc.</i>	<i>51</i>
<i>Figure III. 22.Variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la teneur en caoutchouc.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure III.23.Variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la porosité.</i>	<i>52</i>
<i>Figure III. 24.Variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la masse volumique sèche</i>	<i>53</i>
<i>Figure III. 25. Courbes contraintes-déformations (a) pour les formulations B0-B2, (b) pour les formulations B3-B5.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure III. 26 .Variation du module d'élasticité en fonction de la teneur en caoutchouc.</i>	<i>55</i>
<i>Figure III 27.Variation du module d'élasticité en fonction de la teneur en caoutchouc</i>	<i>56</i>
<i>Figure III.28. Combustion d'échantillon pendant l'essai de la résistance au feu.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure III.29. Variation du poids volumique apparent en fonction de la durée de feu pour les six bétons étudié.....</i>	<i>58</i>

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans une vision de développement durable et vu les besoins croissants des ressources en matériaux et aux exigences liées aux conditions de préservation de l'environnement, il est nécessaire d'étudier toutes les opportunités de réutilisation et valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de Génie Civil. Parmi ces produits, les déchets pneumatiques, qui sont considérés comme des déchets encombrants et polluants à cause de son effet potentiel sur l'environnement et conséquemment la santé humaine.

L'emploi des déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats ainsi qu'à l'obligation de limiter la mise en décharge aux seuls déchets ultimes.

L'Algérie importe en moyenne 49,62 milliers de tonnes de pneumatiques en caoutchouc, selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur (2004). L'accumulation de déchets des pneus hors d'usage, constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. Il convient de valoriser ces déchets lorsque le recyclage provoque une pollution de l'environnement moindre qu'un autre mode d'élimination. Afin de mieux préserver l'environnement, plusieurs actions de valorisation ont été entreprises, notamment dans le domaine des matériaux de construction. A ce sujet, plusieurs travaux concernant l'emploi de granulats de caoutchouc ont été réalisés. Ces derniers ont montré l'intérêt de l'association ciment/caoutchouc dans l'élaboration de composites cimentaires à haute déformabilité [1],[2],[4],[3]. D'autres travaux sur la durabilité de ces composites ont également montré l'importance du type de caoutchouc sur leur comportement en conditions climatiques sévères, notamment les cycles de gel/dégel [4]. Une étude récente sur l'élaboration de composites cimentaires, à base de particules de caoutchouc, a mis en évidence des propriétés compatibles avec l'utilisation en isolant porteur du matériau [6],[7].

Toutefois, la plupart des études précédentes se sont intéressées à la valorisation de granulats de caoutchouc, issus de pneus usagés ou de caoutchouc modifié,

débarrassés des parties métalliques et textiles. Ces études sont basées sur la méthode de substitution volumique de ces granulats de caoutchoucs dans la matrice de béton. Par ailleurs, la méthode de substitution massique de ces granulations des déchets de caoutchouc demande des quantités importantes de ces déchets ce qui conduit plus de valorisation et par conséquent moins de stockage à l'air libre qui constitue une gêne environnementale.

Le présent travail a pour but de contribuer à leur valorisation par leur incorporation dans une matrice de béton, en vue de l'utilisation du composite élaboré dans le domaine d'application des bétons légers. Le composite élaboré est un béton dans lequel le sable alluvionnaire a été substitué par les particules de caoutchouc à des teneurs massiques de 0, 20, 40, 60, 80 et 100%. Il s'agit d'évaluer les propriétés à l'état durci tels que l'allègement, la porosité, les modules d'élasticités statique et dynamique, les résistances mécaniques en compression et en flexion et la résistance au feu.

Ce travail comporte, après une introduction générale, trois chapitres. Le premier chapitre concerne une étude bibliographique. Dans ce chapitre on a présentés des définitions des différents bétons, leurs avantages et inconvénients et les méthodes de formulations, ainsi qu'un petit état de l'art sur la valorisation et recyclage des déchets dans le domaine de génie civil. Le deuxième chapitre, est consacré à la caractérisation des matériaux de base intervenant dans ce travail. Puis à la formulation, basé sur la méthode Dreux Gorisse, des différents bétons à base de granulats de caoutchoucs. Le dernier chapitre, intitulé essais expérimentaux, résultats et discussion. Après la description des essais expérimentaux réalisés sur les bétons élaborés, on a présentés et analysé les résultats de cette partie expérimentale. En fin, ce travail est clôturé par une conclusion générale et des recommandations.

DEDICACES

REMERCIEMENT

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION.....	1
2. GENERALITE SUR LES BETONS	1
3. PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU BETON.....	1
4. LES DIFFERENTS TYPES DU BETON.....	2
5. APPROCHE DE FORMULATION D'UN BETON.....	4
6. VALORISATION ET RECYCLAGE DES DECHETS DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL	5
7. VALORISATION DES DECHETS PNEUMATIQUES	9
7.1. Introduction.....	9
7.2. Définition du caoutchouc	10
7.3. Impact environnemental des déchets pneumatiques	11
7.4. Composition des pneus usagés	12
7.5. Valorisation des pneus usagés en Génie Civil	13
7.6. Filières de valorisation	14
7.7. Déchets pneumatiques broyés.....	15
7.8. Utilisations des pneus usagés en Algérie.....	16
7.9. Valorisation des déchets pneumatiques dans les bétons et les mortiers ..	17
8. CONCLUSION.....	19

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET FORMULATION DES BETONS

1. INTRODUCTION.....	20
2. MATERIAUX DE BASE.....	20
3. CARACTERISATION DES MATERIAUX.....	20
3.1. Masses volumiques.....	20
3.2. Analyse granulométrique.....	23
3.3. Equivalent de sable.....	24
3.4. Coefficient de l'absorption des granulats.....	25
4. FORMULATION DES BETONS.....	27
4.1. Préparation des mélanges.....	27
4.2. Compositions des bétons.....	27
4.3. Essai de l'affaissement au cône d'Abrams.....	32
4.4. Confection des éprouvettes.....	33
5. CONCLUSION.....	35

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE

1. INTRODUCTION.....	36
2. ESSAIS EXPERIMENTAUX.....	36
2.1. Propriétés physique.....	36
2.1.1. Masse volumique apparente.....	36
2.1.2. Absorption capillaire.....	36
2.1.3. La porosité.....	37
2.2. Comportement mécanique.....	39
2.2.1. Essai de rupture par flexion simple.....	39
2.2.2. Résistance à la compression simple.....	40
2.2.3. Module d'élasticité.....	41
2.3. Résistance au feu.....	43
3. RESULTATS ET DISCUSSION.....	44
3.1. Propriétés physique.....	44
3.1.1. Allègement du matériau.....	44
3.1.2. Absorption.....	45

3.1.3.Porosité	46
3.2. Comportement mécanique	47
3.2.1.Résistance à la flexion simple.....	47
3.2.2.Résistance à la compression simple	49
3.2.3.Module d'élasticité.....	53
3.3. Comportement thermique	56
4. CONCLUSION.....	58

CONCLUSION GENERALE

REFERNCE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION.....	1
2. GENERALITE SUR LES BETONS	1
3. PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU BETON.....	1
4. LES DIFFERENTS TYPES DU BETON.....	2
5. APPROCHE DE FORMULATION D'UN BETON.....	4
6. VALORISATION ET RECYCLAGE DES DECHETS DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL	5
7. VALORISATION DES DECHETS PNEUMATIQUES	9
7.1. Introduction.....	9
7.2. Définition du caoutchouc	10
7.3. Impact environnemental des déchets pneumatiques	111
7.4. Composition des pneus usagés	122
7.5. Valorisation des pneus usagés en Génie Civil	133
7.6. Filières de valorisation	144
7.7. Déchets pneumatiques broyés.....	155
7.8. Utilisations des pneus usagés en Algérie	166
7.9. Valorisation des déchets pneumatiques dans les bétons et les mortiers 177	
8. CONCLUSION.....	199

1. INTRODUCTION

Ce chapitre est structure en deux volets. Le premier est consacré aux définitions des bétons, les avantages et inconvénients de ces matériaux, aux méthodes de formulations. Pour le deuxième volet on a donné une présentation générale sur la valorisation et recyclage des déchets dans le domaine de génie civil.

2. GENERALITE SUR LES BETONS

Le béton est le matériau de construction par excellence depuis presque un siècle. C'est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement, un ciment portland (tableau.I.1). Les composants sont très différents : leur masse volumique vont, dans les bétons courants de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³. Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile, etc.

Tableau I.1. La teneur des constituants du béton en poids et en volume [8].

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14 – 22	1 - 6	7 – 14	60 - 78
Poids (%)	5 – 9	-	9 – 18	63 - 85

3. PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU BETON

➤ Avantages du béton

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien ;
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer ;
- Il devient solide comme la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles ;

- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint) ;
- Il convient aux constructions similaires. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas du béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité ;
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées ;
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication [9].

➤ Inconvénients du béton

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toute façon, il reste les inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de bétons légers d'isolation) ;
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux) ;
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage [10].

4. LES DIFFERENTS TYPES DU BETON

Le matériau béton, est devenu irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques, il existe plusieurs types notamment sont :

Tableau I.2. Différents types des bétons.

types du béton	Définition et Propriétés	Utilisation
Béton auto-plaçant (BAP) [11]	Un béton auto plaçant est un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration. Ils se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Les propriétés générales d'un BAP sont : Le remplissage ; La résistance à la ségrégation ; La capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage.	bétonnage dans des zones fortement ferraillées ou à géométrie complexe et obtention d'une meilleure qualité du parement.
Béton de hautes performances (BHP) [12]	Un rapport pondéral E/C inférieur à 0.40. Leur propriété essentielle est leur grande résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires 50 à 100 MPa.	Ponts centrales nucléaires, ouvrages de grande ampleur
Béton de fibres [13]	L'utilisation fibres synthétiques ou naturelles dans les bétons, permet suivant l'ouvrage, de supprimer le treillis soudé traditionnel.	Dalles, sols industriels, poutres, tuyaux
Béton compacte au rouleau (BCR) [14]	Ayant une apparence très sèche et raide et un affaissement nul, constitué d'une proportion importante de granulats avec une faible quantité de ciment d'où l'ajout des minéraux (cendres volantes, fibres calcaires, résidus miniers etc....).	construction des barrages et dans la construction des routes et les zone d estockage.
Béton à durcissement rapide [15]	Le durcissement est accéléré, ou la mise en précontrainte le plus rapidement en préfabrication. Le durcissement rapide est obtenu soit par des adjuvants accélérateurs de durcissement, des ciments à durcissement rapide, la diminution du rapport E/C ou bien par le traitement thermique. Pas besoin de suspendre le chantier par temps froid.	Pour les petits ouvrages de réparation ou des éléments d'ouvrages demandant une remise en service rapide.
Béton léger [16]	Les bétons légers ayant une masse volumique entre 800 et 2100 kg/m ³ . Ces densités sont obtenues par l'ajout d'un agent expansif ou de granulats légers. Ils possèdent une bonne isolation thermique et peut être utilisé même comme éléments porteurs (Rc > 15MPa).	Hourdis .cloisons, réhabilitation de bâtiment anciens, remplissages
Béton lourd [17]	Béton dont la masse volumique apparente est supérieure à 2600 kg/m ³ , les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celle des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau.	Protection contre les radiations, réalisation de contrepoids
Béton réfractaire [20 ,21]	Ces bétons résistent à des températures élevées pouvant atteindre 1300°C, obtenue par le mélange de ciment Alumineux et de granulats réfractaires (chamottes, corindon), ou granulats isolants (Pouzzolane,vermiculite,argile expansée).	la construction de cheminées et de sols d'usines sidérurgiques
Béton de poudre réactive (BPR)	Le BPR possède des résistances en traction et en compression très élevées voir mêmes supérieures à celles des aciers (350) MPA, et une bonne durabilité. La ductilité que l'ajout de fibres métalliques confère au BPR le rend apte à être utilisé dans de nombreuses applications sans aucune armature passive.	poutres et poutrelles légères ; poteaux confinés ; dalles de ponts mixtes ; panneaux de façade ; voussoirs de tunnels.

Béton ordinaire	Homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulat, eau. Un rapport E/C qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée $20 \text{ MPa} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ MPa}$.	Dalles. Poteaux ; Poutres ; Voiles Fondations
Béton préfabriqué	Sert à la fabrication, généralement en usine et en milieu contrôlé, de diverses composantes allant de l'élément standardisé comme le bloc jusqu'aux éléments de structure ou des panneaux de façades multifonction [16].	bloc jusqu'aux éléments de structure ou des panneaux de façades multifonction
Béton de terre	C'est un assemblage de granulats divers (cailloux, graviers, sables, limons ou silts), il doit sa cohésion à une colle qui n'est pas le ciment mais l'argile, la fraction la plus fine du sol.	utilisé pour réparer certains murs de pierre ou boucher des trous trop importants pour le torchis.

5. APPROCHE DE FORMULATION D'UN BETON

La Formulation d'un béton consiste à déterminer un mélange optimal des granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en fines (ciment, addition) et en eau afin d'obtenir les qualités recherchées pour la construction de l'ouvrage. De nombreuses méthodes ont été élaborées en fonction de l'évaluation des connaissances relatives aux constituants et de leur rôle, des technologies et de l'expérience acquise sur les chantiers. Un point commun à toutes les études de composition consiste à rechercher conjointement deux qualités essentielles : l'ouvrabilité et la résistance. Nous verrons que les aspects relatifs à la notion de la durabilité sont abordés de façon normalisée dépendamment de l'environnement d'exposition. Nous avons vu qu'un béton d'abord une suspension fortement concentrée de grains (gravillon, sable, ciment, addition) dans de l'eau. Bien que, l'approche de compacité optimale puisse être faible de façon globale, il est en pratique, commode de distinguer le squelette granulaire inerte d'une part et la pâte d'autre part (mélange fines et l'eau). Par suite, une notion de dosage optimal en fines, résultant du concept de compacité, existe et ne dépend que de la dimension maximale des granulats (D) et de la granulométrie de ces fines. La courbe granulométrique optimale des granulats est alors indépendante du liant si le dosage en fines est d'optimal [22].

La formulation d'un béton se résume alors en quatre étapes majeures :

- Détermination de la dimension maximale des granulats ;
- Détermination de la courbe granulométrique optimale des granulats ;
- Détermination du dosage en eau et air, en fonction de l'objectif d'ouvrabilité ;
- détermination du dosage optimales en fines, qui sera en fractionner en ciment et addition, en fonction des objectifs de résistances, et en respectant les prescriptions relatives à la durabilité.

Les différentes méthodes de composition des bétons :

- Méthodes de BOLOMY
- Méthodes d'ABRAMS
- Méthodes de FAURY
- Méthodes de VALETTE
- Méthodes de JOISELE
- Méthodes de DREUX GORISSE

6. VALORISATION ET RECYCLAGE DES DECHETS DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

6.1. Définition des déchets

Le déchet est défini comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon. ».

D'après la loi française du 15 juillet 1975 : « Est ultime un déchet résultant ou non du traitement des déchets et qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » [23].

On peut classer les déchets selon quatre grandes catégories représentant l'essentiel de la production et rendant compte de leur diversité [24] :

- Les déchets organiques
- Les déchets inertes
- Les déchets banals
- Les déchets spéciaux

6.2.Valorisation des déchets

La valorisation est définie comme "L'élimination des déchets comportant 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 " [24]. Il existe trois méthodes de la valorisation des déchets :

- Valorisation matière
- Valorisation énergétique
- Valorisation chimique

6.3.Différents déchets utilisés en génie civil

En général les déchets sont classés en trois 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 [25]. Le tableau 3 suivant récapitule les différents types de déchets.

Tableau I.3. *Les différents types de déchets utilisés en Génie Civil [23].*

Types de déchets	Définition
Déchets inertes	Tout déchet qui ne produit pas de réaction physique ou chimique tels les déchets provenant de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation et qui ne sont pas constitués ou contaminés par des substances dangereuses ou par d'autres éléments.
Déchets ménagers	Les déchets ménagers englobent tous les déchets produits par les ménages et assimilés (certaines collectivités et certains commerçants). Ce sont donc les déchets que tout particulier produit dans sa vie quotidienne. Les déchets ménagers regroupent les ordures ménagères (non recyclables ou pas encore recyclées), les déchets recyclables secs (journaux, papiers, carton, magazines, verre, aluminium, plastique) et les recyclables dits humides, organiques ou fermentescibles (déchets alimentaires, herbes, bois...)
Déchets industriels banals (D.I.B.)	Ensemble des déchets non inertes et non dangereux générés par les entreprises, industriels, commerçants, artisans et prestataires de services ; ferrailles, métaux non ferreux, papiers cartons, verre, textiles, bois, plastiques, etc.

6.4.L'activité du recyclage des déchets en construction

6.4.1. Recyclage des déchets

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents. Le recyclage permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R : Réduire, Réutiliser, Recycler. Ce sont trois réponses au problème de la gestion des déchets. La règle des 3 R peut permettre de produire moins de déchets ou de valoriser ses déchets par :

- La réduction de la production de déchets (choix de matériaux recyclables non polluants, choix de produits à emballage limité) ;
- La réutilisation des déchets ;
- Le recyclage des déchets (compostage, transformations...).

Le principe des 3 R permet de réduire la production d'ordures ménagères nécessitant un traitement collectif. Or la réduction du volume de déchets signifie automatiquement la réduction du nombre de camions poubelle sur nos routes, la réduction de déchets incinérés ou mis en décharge [26].

6.4.2. Type de recyclage

Il existe trois types de recyclage [27] :

- ***Recyclage in situ*** : 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.
En revanche, la possibilité de retrait de certaines impuretés est réduite et la qualité des granulats est irrégulière. De ce fait, le champ d'utilisation des granulats ainsi fabriqués reste limité.
- ***Recyclage sélectif*** : Il est choisi lorsque les matériaux de démolition sont homogènes ; il nécessite que les quantités stockées soient suffisantes.
- ***Recyclage en site fixe*** : Les matériaux de démolition sont acheminés vers des installations montées en permanence sur un même site. Il s'effectue dans des conditions industrielles.

6.4.3. Impacts du recyclage sur l'environnement

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables :

- il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les 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 1 L d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois [28].

7. VALORISATION DES DECHETS PNEUMATIQUES

7.1.Introduction

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

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

Depuis 2004, chaque année, l'Algérie importe en moyenne 49,62 milliers de tonnes de pneumatiques en caoutchouc, selon l'Agence Nationale de Promotion du commerce Extérieur. Sachant que chaque pneu neuf vendu génère un pneu usagé, et tenant compte de la perte de masse due à l'usure du pneu une fois usé, on se retrouve avec environ 45,65 milliers de tonnes de pneus usagés, chaque année [29].

Les filières classiques de valorisation des pneus usagés qui nécessitent souvent une technologie avancée, sont généralement concentrées dans les pays riches. Le développement de nouvelles filières de valorisation de pneus usagés, reste cependant toujours en grande demande partout dans le monde [29].

Il y a quatre origines de déchets pneumatiques être signalées [30] :

- Les déchets de caoutchouc industriel.
- Les déchets de fabrication de pneumatique.
- Les pneumatiques usagés.
- Les déchets de rechapage.

7.2. Définition du caoutchouc

Les élastomères, comme les matières plastiques, font partie de la famille des polymères. Le terme « élastomère » est utilisé aujourd'hui pour désigner d'une façon générale tous les caoutchoucs, c'est –à-dire les substances macromoléculaires, naturelles ou synthétiques, possédant l'élasticité caoutchouteuse.

Le terme « caoutchouc » vient du mot indien caoutchouc (bois qui pleure) et rappelle ainsi l'origine du caoutchouc naturel, précurseur des élastomères

d'aujourd'hui .Le caoutchouc à l'état naturel, se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex secrétée par les plantes à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont l'Hévéa basiliens, arbre de la famille des euphorbiacées et d'autre espèces du même genre.

Les caoutchoucs synthétiques sont obtenus par polymérisation (création de macromolécules à partir de molécules de base) et par transformation physiques en présence de catalyseurs.

Les caoutchoucs possèdent de très nombreuses propriétés .Ils sont notamment élastiques, étanches et antivibratoires. La combinaison de ces trois propriétés leur assure un spectre d'utilisation extrêmement large [31].

7.3.Impact environnemental des déchets pneumatiques

La priorité de l'homme pour la protection de son environnement devant l'agressivité de l'effet de serre est un engagement important pour les générations futures, puisque il est considéré comme une source importante d'alimentation des différents aspects de pollution. Malgré tous les inconvénients que les pneumatiques usagés possèdent, ils ne sont pas catégorisés comme déchets toxiques ou dangereux, car ils ne sont pas biodégradables, mais sont nuisibles pour l'environnement et santé en cas d'incendie. Ces derniers une fois bruler, dégagent des fumées hautement dangereuses, par sa teneur en gaz toxique sont composés par des hydrocarbures chlorés et des pléromatiques, et des dioxines, causant ainsi chaque année des maladies et des allergies ; tel que l'allergie cutanée. Ils produisent aussi une vapeur toxique (possédant des composants de silice de carbone). Les épaisses fumées se répandant dans l'atmosphère en cas d'incendie peuvent causer beaucoup de maladie respiratoire [32].



Figure I.1. *Fumée toxique dégagée en brûlant des pneus.*

7.4.Composition des pneus usagés

Les pneus usagés se composent essentiellement de caoutchouc synthétique ou naturel, de noire de carbone et d'oxyde de silicium, ainsi que d'acier et de tissu (Tableau 4). Les additifs qu'ils recèlent, tels que Zinc, plomb ou soufre (Tableau 05), revêtent une importance cruciale lorsqu'il s'agit d'apprécier l'impact d'une filière de valorisation sur l'environnement. Selon l'usage qui en est fait, les produits recyclés ou le mode de traitement risquent d'être incompatibles avec l'environnement, du fait de ces polluants .Il est donc opportun que les fabricants de pneus minimisent à titre préventif la teneur des additifs polluants dans leurs produits. On évite ainsi que la valorisation ultérieure des pneus usagés provoque des atteintes indésirables à l'environnement [33]

Tableau I.4. *Substances contenues dans les pneus usagés de voiture [30]*

Substance	Proportion pondérale [%]
Hydrocarbures polymérisés	47,0
Noire de carbone	21,5
Acier	16,5
Tissu	5,5
Oxyde de zinc	1,0
Soufre	1,0
Autres	7,5
Total	100

Tableau I.5. Composition chimique des pneus usagés [30]

Elément	Teneur
Carbone Environ	70 %
Fer	16 %
Hydrogène	7 %
Oxygène	4 %
Oxyde de zinc	1 %
Soufre	1 %
Azote	0 ,5 %
Acide stéarique	0 ,3 %
Halogène	0,1 %
Liaisons cuprifères	200 mg/kg
Cadmium	10 mg/kg
Chrome	90 mg/kg
Nickel	80 mg /kg
plomb	50 mg /kg

7.5. Valorisation des pneus usagés en Génie Civil

a. Le tapis de pneus anti vibration

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

b. La construction de récifs artificiels

Immergés à des profondeurs de dix ou vingt mètres, assemblés et lestés à l'aide de blocs de ciment, les pneus peuvent former des récifs artificiels constituant des zones de calme pour la faune marine. Le Japon et les Etats-Unis ont développé une véritable industrie du récif artificiel ; par exemple, en Caroline du Nord, plus de 500,000 pneumatiques ont été immergés entre 1974 et 1977. En France,

cinq récifs artificiels ont été construits à Palavas – les -Flots, à Lang rune-Sur-Mer, à Arcachon-Sur-Mer, à Golfe-Juan et à Port-la-Nouvelle.

c. Mur antibruit ACIAL (1992)

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

d. Le pneu sol (1974)

Classé comme une valorisation originale, le pneu sol est un matériau inventé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et constitué de pneus entiers ou d'éléments et sols naturels ou artificiels ou de déchets. Depuis 1974, plus de deux cent cinquante ouvrages en pneu sol ont été construits (en France).

7.6.Filières de valorisation

Le cheminement des pneus usagés est organisé comme suit : Après le démontage des pneus usagés ; ils sont stockés par les garagistes puis collectés par les collecteurs qui trient les pneus pour sélectionner les pneus pouvant être réutilisés ou faire l'objet d'un rechapage. Les pneus usagés non réutilisables sont, soit stockés entiers ou déchiquetés ou broyés, afin de les livrer aux vaporisateurs. La valorisation des pneus usagés, peut se présenter sous l'une des formes suivantes [29].

a. Le rechapage

Permettant d'allonger considérablement la vie du pneu, le rechapage est la première solution de recyclage. Cette technique consiste à changer les bandes de roulement des pneus usagés, en les remplaçant par des bandes de roulement neuves. Cette technique a pour cible les pneumatiques usagés dont les carcasses ont gardé intacte l'ensemble de leurs qualités intrinsèques et notamment leurs

endurances .Cette activité génère à son tour des déchets, dont la poudrette de caoutchouc.

b. La valorisation énergétique

Le pneumatique, de par son origine polymérique, a un excellent pouvoir calorifique (3 tonnes de pneus = 2 tonnes de fuel).

c. La valorisation sous forme de matières premières

Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux pour diverses applications.

7.7.Déchets pneumatiques broyés

7.7.1 Poudrettes

Il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2 mm (Figure I 2). Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Comme exemple d'utilisation, on a la fabrication de bandages et de roues pleines (caddie, poubelles, tondeuses, brouettes ...), la modification des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface) ... etc.



Figure I.2. Aspect des déchets de caoutchouc [34]

7.7.2 Granulés

Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes (Figure I3). Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques. Comme exemple d'utilisation, on a : aires de jeux, les pavés antidérapants, les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores ...).

Les produits issus de cette décomposition, sont des huiles combustibles lourdes et légères, du carbone ... etc. Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre.



Figure I.3. Copeaux de pneus déchiquetés.

7.8. Utilisations des pneus usagés en Algérie

Le gisement Algérien de pneumatiques usagés est important ; il est de l'ordre pour les véhicules poids lourds de 200000 tonnes /an (19 millions de pneus). Mais les quantités valorisées sont très limitées, nous notons quelque types d'utilisation [30] :

- Utilisées en agriculture pour renforcer les petits barrages et comme siège dans les jardins traditionnelles.
- Applications de résidus de copeaux de pneus en structure sous chaussée.
- Pour la Stabilité d'un talus.

- Rechapage pneus usagés à El Eulma.
- Utilisation pour couvrir les conducteurs électriques.
- Pneu sol, déjà utilisé dernièrement à Alger par une société Italienne.

(Fig.I.4)

- Stabilité d'un glissement de terrain.



Figure I.4. Chantier expérimentale Pneu sol à Bou-Smail [29].

7.9.Valorisation des déchets pneumatiques dans les bétons et les mortiers

La possibilité de valorisation des déchets pneumatiques dans le béton sous d'agrégats a été l'objet de nombreuses recherches expérimentales. Ces recherches ont avaient pour finalité que l'incorporation des déchets pneumatiques dans les bétons effectuent leurs proportions physico-mécanique aussi bien à l'état durci.

Les principales conclusions tirées à parti de ces études sont présentés dans les figures I.5. L'examen du comportement physico-mécanique a montré un allègement du composite allant jusqu'à 42,5%. Malgré une baisse significative de la résistance à la compression, les valeurs restent compatibles avec l'utilisation du composite dans le domaine des bétons légers de construction de "classe II". Par ailleurs, la baisse de la résistance à la flexion est moins importante que celle à la compression. De plus, les mesures du module d'élasticité dynamique ont mis en évidence des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que

l'amortissement des vibrations de ce composite et l'augmentation de la ductilité de ces matériaux.

D'autres résultats ont également montré que l'ajout de particules de caoutchouc, permettait de réduire les variations dimensionnelles du matériau. La limitation de ces variations dimensionnelles est une caractéristique importante pour la durabilité des matériaux, notamment le contact accidentel avec l'eau qui génère des contraintes pouvant conduire à la fissuration. Ceci peut avoir des conséquences sur l'impact d'un environnement agressif, puisque la résistance vis-à-vis de la carbonatation, la diffusion des ions et l'action du gel dépendent de l'état de la structure du matériau.

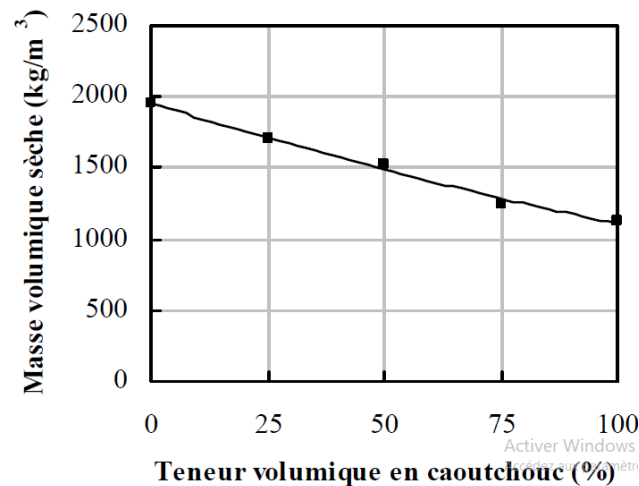


Figure I.5. Effet de la teneur en caoutchouc sur la masse volumique sèche [34]

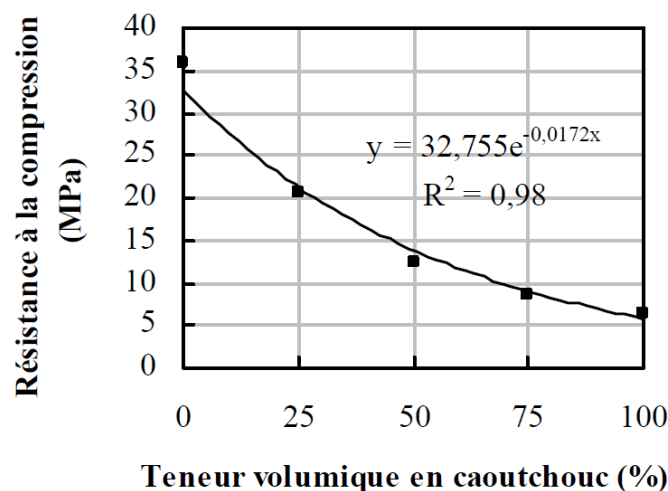
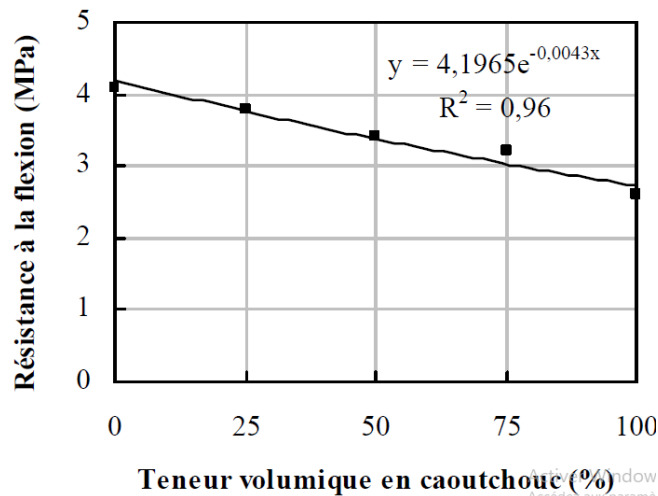
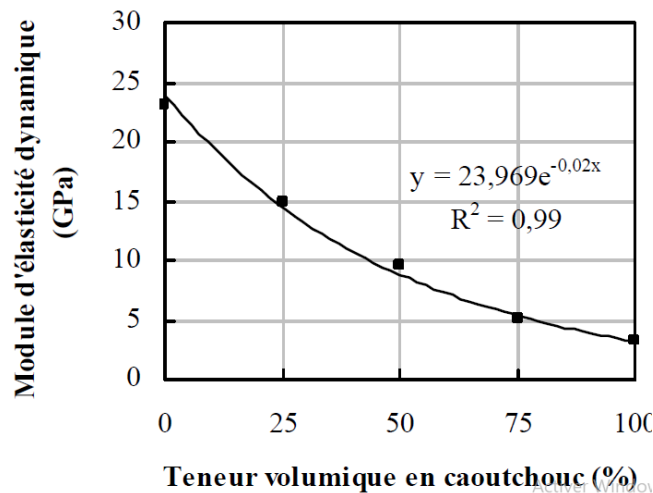


Figure I.6. Effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la compression

[34]

**Figure I.7.** Effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la flexion [34]**Figure I.8.** Effet de la teneur en caoutchouc sur le module d'élasticité [34]

8. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a essayé de définir le caoutchouc ; leur origine, leur propriétés et leur classification. On a vu aussi comment fabriquer des granules de caoutchouc et de pneus usés, et quelque recherche sur l'utilisation de ces produits dans la composition d'un béton. Grâce à la fragilité de béton (faible capacité de déformation, résistance à la traction limitée).

L'idée de la valorisation des pneumatiques usagés constitue actuellement une priorité très motivante sur le plan environnemental qu'économique. En effet le pneu usagé est un déchet encombrant, mais qui peut devenir très utiles, en conséquence le Génie Civil offre de nombreuses possibilités d'utilisation des

pneumatiques usagés, en les valorisant en matériau de construction aux propriétés originales et très utiles.

CHAPITRE II : CARACTERISATION DE MATERIAUX ET FORMULATION DES BETONS

1. INTRODUCTION.....	200
2. MATERIAUX DE BASE.....	200
3. CARACTERISATION DES MATERIAUX.....	200
3.1. Masses volumiques.....	200
3.1.1. <i>Masse volumique apparente</i>	211
3.1.2. <i>Masse volumique absolue</i>	211
3.1.3. <i>Compacité et porosité</i>	222
3.2. Analyse granulométrique	233
3.3. Equivalent de sable	244
3.4. Coefficient de l'absorption des granulats.....	255
4. FORMULATION DES BETONS	277
4.1. Préparation des mélanges	277
4.2. Compositions des bétons.....	277
4.3. Essai de l'affaissement au cône d'Abrams	322
4.4. Confection des éprouvettes.....	334
5. CONCLUSION.....	355

1. INTRODUCTION

Ce chapitre expérimental concerne la caractérisation des matériaux de base utilisés dans ce travail et la formulation des compositions des différents bétons à base de granulats de caoutchouc. Les essais de caractérisations sont réalisés selon la norme française au niveau du laboratoire du département de Génie Civil l'université de Laghouat.

2. MATERIAUX DE BASE

2.1. Localisation des Matériaux

Les matériaux de base intervenant dans cette étude sont :

Sable : Le sable alluvionnaire issu de carrière d'Oued M'zi située au Nord-Est de la commune de Laghouat. En effet ; ce sable est généralement utilisé dans la Composition des bétons dans tous les projets de construction de la région.

Gravier : Les graviers utilisés sont de classe granulaire 3/8 issus de concassage des roches calcaires de la région de Laghouat.

Ciment : Pour la confection des bétons un seul type de ciment est utilisé, c'est ciment portland CPA CEM II 42.5, fabriqué par la cimenterie de LAFARGE.

Granulats de caoutchouc : Les granulats de caoutchouc sont obtenus par le déchiquetage et le broyage ($\leq 2\text{mm}$) des pneus usagés non réutilisables (voir §7.7 chapitre I). Ces granulats sont utilisés fréquemment comme sol dans les terrains artificiels de football.

3. CARACTERISATION DES MATERIAUX

3.1. Masses volumiques

Pour étudier la formulation d'un béton, il est indispensable de connaître la masse volumique absolue et apparente des granulats. Elles sont exprimées en kg/m^3 , la masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui

constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les essais sont réalisés selon la norme française NF P18-555.

3.1.1. Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume (compris les vides), elle est notée ρ_a et donnée par :

$$\rho_a = \frac{M}{V}$$

Avec : M : masse du matériau

V : volume totale de l'échantillon.

Il s'agit de remplir un volume de 1dm³ et on détermine la masse totale M_T, la masse de l'échantillon sera :

$$M = M_T - M_R. \text{ (} M_R \text{ : est la masse du récipient)}$$



Figure II 1 .Méthode de récipient.

3.1.2. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue est la masse de l'unité de volume absolue du sable. Pour la détermination de cette propriété physique, il existe plusieurs méthodes parmi ces derniers la méthode l'éprouvette graduée et celle du pycnomètre qui fréquemment utilisée car elle simple, le principe consiste à remplir une

éprouvette graduée avec un volume V d'eau, ensuite à peser un échantillon M_s presque égale à 300g et à l'introduire dans l'éprouvette en éliminant toutes les bulles d'air, le liquide monte dans l'éprouvette jusqu'au nouveau volume absolue est alors déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{ab} = \frac{M_s}{V_2 - V_1}$$

Avec : M_s : Masse des grains solides.

V_1 : Volume de l'eau.

V_2 : Volume total (eau + grains solides).



Figure II 2. Méthode l'éprouvette graduée

Les masses volumiques apparentes et absolues du sable, des granulats de caoutchouc et le gravier 3/8 sont récapitulés au tableau 1.

3.1.3. Compacité et porosité

La compacité est le rapport de la masse volumique apparente sur la masse volumique absolue. La porosité c'est le complément de la partie dense qui définit le pourcentage de volume des vides par rapport le volume total :

$$C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \cdot 100 \quad \text{et} \quad P = 100 - C(\%)$$

Le tableau II.1 récapitule les valeurs de la compacité et de la porosité des trois matériaux de base sable, granulats de caoutchouc et le gravier 3/8.

3.2. Analyse granulométrique

L'essai de l'analyse granulométrique est réalisé selon la norme française NF P94-056. L'analyse granulométrique permet de classer et de définir la granulométrie des matériaux employés dans la construction, d'après la grosseur des grains et la forme de la courbe granulométrique.



Figure II .3. Analyse granulométrique de sable, granules de caoutchouc et graviers.

Le coefficient d'uniformité noté C_u et défini comme suit : $C_u = D_{60} / D_{10}$.

Le coefficient de courbure, notée C_c et défini comme suite : $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$

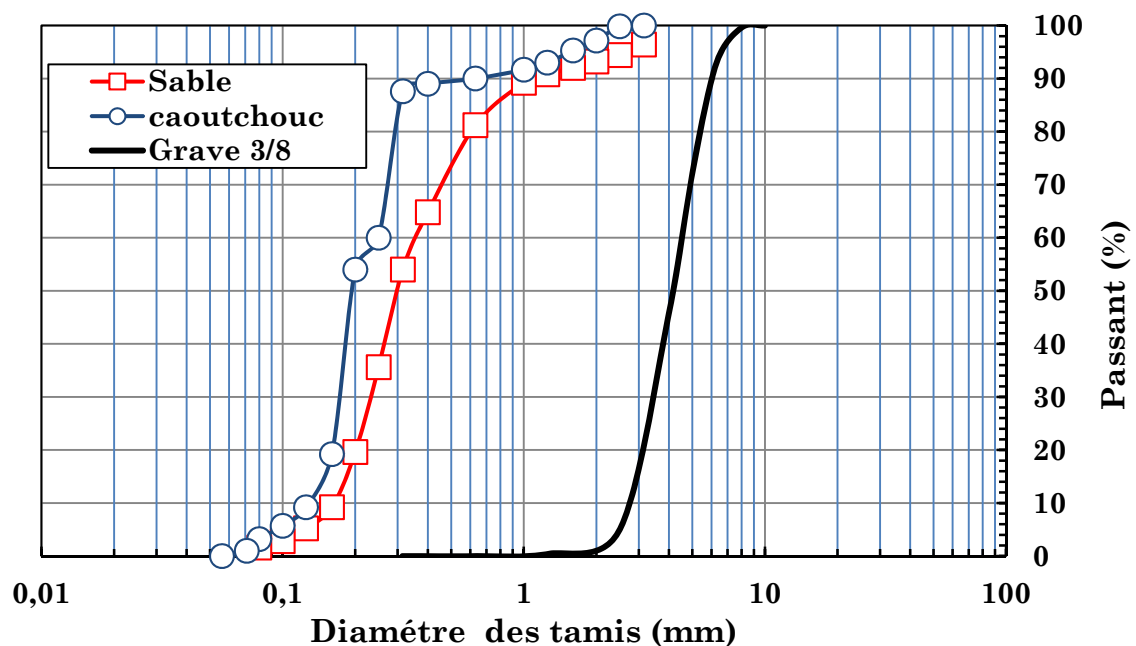


Figure II .4 Courbe granulométrique des matériaux utilisés

Le tableau II.1 récapitule les résultats de l'analyse granulométrique des trois matériaux de base sable, granules de caoutchouc et le gravier 3/8.

3.1.2. Module de finesse (M_f)

Le module de finesse des sable est défini comme étant le centième de la somme des refus (exprime en % de poids) aux tamis : (0,63 ; 1 ; 1,25 ; 1,6 ; 3,15 ; 5).

$$M_f = \frac{\sum \text{refus (0,16 au 5mm)}}{100}$$

Les valeurs des modules de finesse du sable et des granulats de caoutchouc sont présentées au tableau II.1.

3.3. Equivalent de sable

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables. L'essai consiste à séparer les flocules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

L'essai est effectué sur la fraction 0/1 mm du sable alluvionnaire selon la norme française NF P18-597. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

Hauteur h_1 : sable propre + éléments fins (hauteur total des grains solide)

Hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention est (figure II-5).

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \cdot 100$$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ES (équivalent de sable au piston)

Les résultats de l'équivalent de sable sont donnés au tableau II.1.



Figure II .5.*Méthode de l'équivalent de sable.*

3.4. Coefficient de l'absorption des granulats

La plupart des granulats stockés dans une atmosphère sèche pendant un certain temps, peuvent par la suite absorber de l'eau. Le processus par lequel le liquide pénètre dans la roche et l'augmentation de poids qui en résulte est appelé absorption. L'essai est réalisé selon la norme NF P 18-555.

L'absorption peut varier dans de très larges mesures suivant la nature du granulat. Elle peut varier de 0 à plus de 30% du poids sec pur granulat léger.

En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau lorsqu'ils sont gâchés avec le ciment et l'eau. Chaque résultat de matériaux représente la moyenne de trois essais.

$$ABS = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100$$

Avec : M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve 109° (24 heures).

M_h : masse de l'échantillon imbibé.

Les valeurs de l'absorption du sable et des granulats de caoutchoucs sont données au tableau II.1.



Figure II. 6. Méthode de l'essai d'absorption.

Tableau II.1. Récapitulatif des résultats de la caractérisation physiques des matériaux de base.

Essais de caractérisations		Sable	Granulats de caoutchouc	Gravier 3/8
Masse volumique NF P18-555	ρ_{app} (g/cm ³)	01,54	00,50	01,38
	ρ_{abs} (g/cm ³)	02,56	02,00	02,60
Compacité	C(%)	60,00	25,00	53,00
Porosité	P(%)	40,00	75,00	47,00
Analyse Granulométrie NF P94-056	Dmax (mm)	03,15	03,15	08,00
	Cu	01,96	02,00	-
	Cc	00,79	00,82	-
Module de finesse NF P18-360	M _f	02,12	01,92	-
Absorption NF P18-555	ABS (%)	00,70	00,36	-
Equivalent de sable NF P18-597	Es (visuel) (%)	78,62	-	-
	Es (piston) (%)	84,53	-	-

4. FORMULATION DES BETONS

4.1. Préparation des mélanges

Pour le choix du dosage en granulats de caoutchouc on a substitué une fraction massique de $x\%$ de sable alluvionnaire par ajout de granulats de caoutchouc avec x variant de 0 (matériau témoin) à 100, avec un pas de 20. De ce fait, six mélanges ont été préparés :

Mélange 1 : 100% sable alluvionnaire

Mélange 2 : 80% sable alluvionnaire + 20% granulats de caoutchouc

Mélange 3 : 60% sable alluvionnaire + 40% granulats de caoutchouc

Mélange 4 : 40% sable alluvionnaire + 60% granulats de caoutchouc

Mélange 5 : 20% sable alluvionnaire + 80% granulats de caoutchouc

Mélange 6 : 100% granulats de caoutchouc

La préparation de tous les mélanges est respectée, comme décrit ci-dessous :

- Préparation des proportions des granulats de caoutchouc à mélanger avec le sable alluvionnaire ;
- Homogénéisation du mélange manuellement pendant 3 minutes ;
- Introduction du mélange homogénéisé dans un sac.

4.2. Compositions des bétons

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, ainsi que le dosage de ciment et d'eau. La méthode de formulation utilisée est celle généralement pratiquée dans les laboratoires ou sur chantiers Algériens dite méthode "Dreux-Gorisse".

L'eau de gâchage utilisée c'est l'eau potable (eau du robinet) distribuée par le réseau du service public de la Wilaya de Laghouat.

Les étapes de la composition des six bétons, à base de granulats de caoutchouc B0 à B5, élaborés sont décrites comme suite :

4.2.1. Résistance visée

Par sécurité, la résistance visée est majorée de 15% par rapport à la résistance que nous souhaitons obtenir. Ainsi, la résistance visée est obtenue comme suit :

- La résistance désirée pour le béton à 28 jours est : $\sigma_{28j} = 30 \text{ MPa}$
- La résistance visée vaut alors : $\sigma'_{28j} = 1,15 \sigma_{28j} = 1,15 \times 25 = 34,5 \text{ MPa}$

4.2.2. consistance désirée

Bien que le but soit l'étude d'un béton ordinaire de structures de bâtiments, on a opté pour un béton plastique avec un affaissement au cône d'Abrams de 8 cm. Avec son vibration

4.2.3. Dimensions maximales des granulats

D'après l'analyse granulométrique des différents matériaux utilisés : sable, granulats de caoutchouc et du gravier, la dimension maximale choisie pour les différents mélanges est $D_{\max} = 8 \text{ mm}$.

4.2.4. Détermination du rapport C/E

Le rapport C/E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$\sigma'_{28j} = G \cdot \sigma'_c \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

- σ'_{28j} = résistance visée à 28 jours donc égale 34,5 MPa
- σ'_c = classe varie du ciment à 28 jours en MPa
- C = dosage en ciment en kg/m^3
- G = coefficient granulaire fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats (tableau II.2)
- E = dosage en eau totale sur matériaux secs en l/m^3

Pour G = 34 on a le rapport $C/E = 1,89 \rightarrow E/C = 0,53$

Tableau II.2. Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats $D_{\max}$ [35].

Qualité des granulats	Dimension $D_{\max}$ des granulats		
	Fine $D_{\max} < 12.5 \text{ mm}$	Moyen $20 < D_{\max} < 31.5$	Gros $D_{\max} > 50 \text{ mm}$
Excellent	0.55	0.6	0.65
Bonne, courante	0.45	0.5	0.55
Passable	0.35	0.4	0.45

4.2.5. Dosage en ciment « C » pour un mètre cube de béton

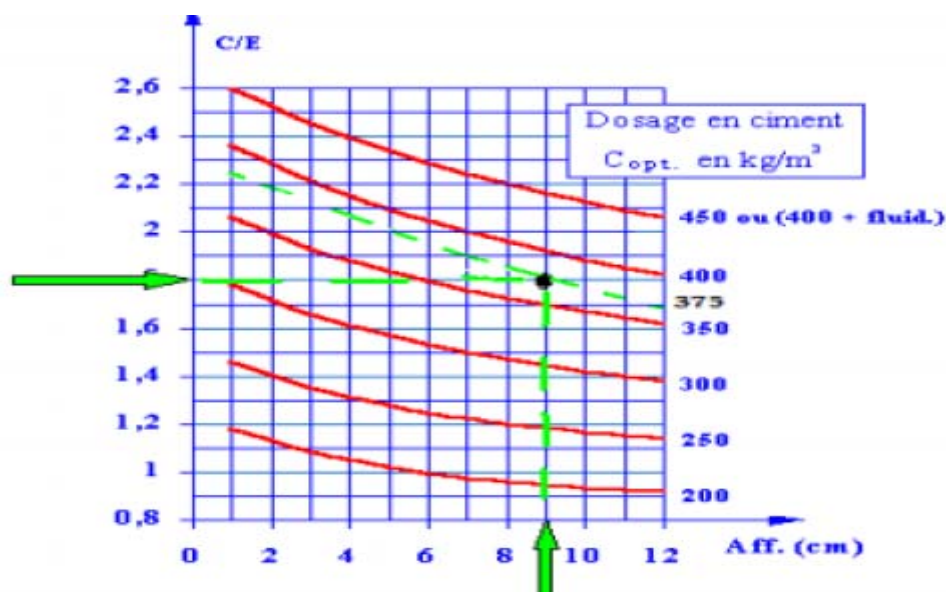
D'après l'abaque, de la figure II.7, utilisé pour la détermination de la quantité de ciment en fonction de l'affaissement désiré et le rapport C/E. Le dosage en ciment choisi pour notre étude est 390 kg/m^3 .

4.2.6. Détermination de la quantité d'eau « E »

La quantité d'eau nécessaire à la confection du béton est calculée grâce à la valeur du rapport E/C et du dosage de ciment C. La quantité d'eau sera estimée comme suit :

$$\frac{C}{E} = 0,53 \text{ et } C = \frac{390 \text{ kg}}{\text{m}^3} \Rightarrow E = 206,34 \text{ l}$$

La quantité d'eau de gâchage est corrigée selon la dimension maximale des granulats. La quantité d'eau après correction $E_c = 224 \text{ l}$

**Figure II. 7.** Abaque permettant la détermination de C

4.2.7. Courbe granulaire de référence

Sur le même graphique granulométrique, on trace une composition granulaire de référence OAB. Le pont B à l'ordonnée 100 (correspond à la dimension D des plus gros granulats. Le point de brisure A à des ordonnées ainsi définies

- En abscisse (à partir de la dimension D tamis) :

Si $D_{\max} \leq 20\text{mm}$ l'abscisse est $x = D_{\max}/2$

Si $D_{\max} > 20\text{mm}$ l'abscisse x est située au milieu du (segment gravier) limitée par le module 38 (5mm) et le module correspondant à D.

- En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K$$

K : Terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés, pour notre cas de gravier concassé le dosage en ciment $C=390 \text{ kg/m}^3$ on aura d'après le tableau $K= +2$, donc $Y = 49,17$

4.2.8. Coefficient de compacité

C'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en œuvre Pour notre cas, avec une consistance plastique et piquage, la compacité retenue est $\gamma_0 = 0,79$.

Cette valeur est convenable pour des granulats roulés. D'où il faut apporter une correction de l'ordre de $- 0,01$ à la compacité car notre sable est roulé et le gravier et concassé. Donc : $\gamma_1 = 0,78$

4.2.9. Dosage des granulats

Les lignes de partage de 95% et 5% d'ordonnée sont tracées sur la figure suivante :

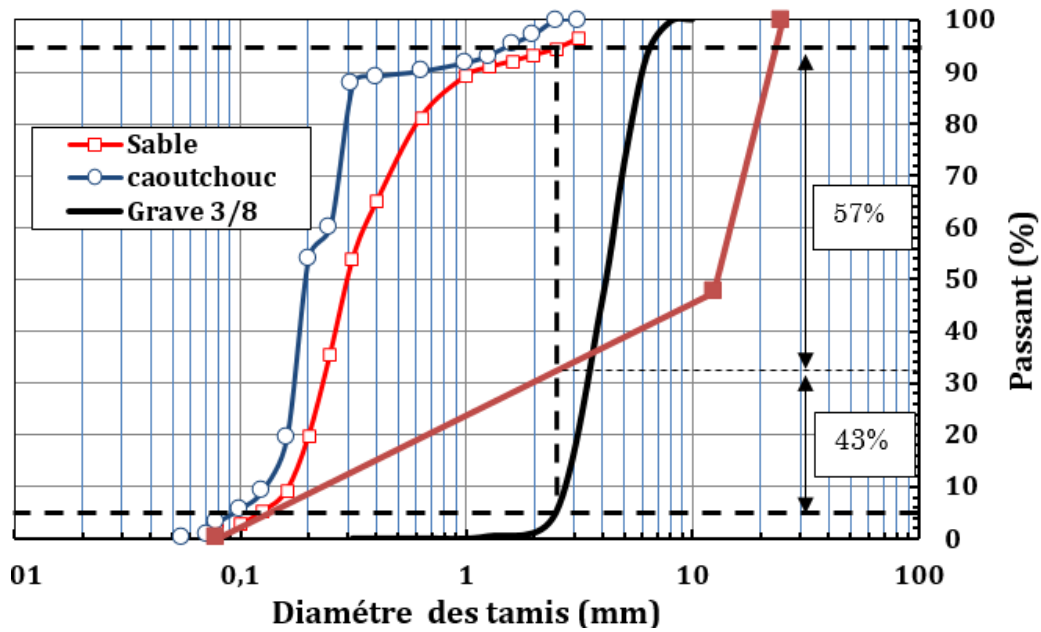


Figure II. 8 Courbe granulométrique des matériaux utilisée (caoutchouc, sable, graviers)

On lit sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacune des granulats G_1 pour le sable et G_2 pour le gravier 3/8. $G_1 = 32.5\%$ et $G_2 = 57.5\%$

- Le volume absolu des grains de ciment : $V_c = C/\gamma_c$

Avec γ_c est la masse volumique absolue des grains de ciment = $3,1 \text{ g/cm}^3$.

Donc : $V_c = 125,8 \text{ l}$

- Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000 \times \gamma_1 - V_c = 1000(0,78) - 125,8 = 654,2 \text{ cm}^3$$

D'où, les volumes absolus de chacun des granulats sont :

$$\text{Pour le sable : } V_s = G_1.V = 43\% \times 654,2 = 281 \text{ l}$$

$$\text{Pour le gravier 3/8 : } V_g = G_2.V = 57\% \times 654,2 = 373 \text{ l}$$

Si ρ_1 et ρ_2 se sont les masses volumiques absolue du sable et du gravier 3/8 respectivement, donc la masse de chacun deux sera :

$$M_1 = V_1. \rho_1 = 281.10^3 \times 2,56 = 719,4 \text{ kg pour } 1\text{m}^3 \text{ de béton}$$

$$M_2 = V_2 \cdot \rho_2 = 373.10^3 \times 2,6 = 970 \text{ kg pour } 1\text{m}^3 \text{ de béton}$$

Alors les dosages des différents matériaux secs pour les différents bétons formulés sont donnés par le tableau suivant.

Tableau II.3. Dosages des différents matériaux.

Composants	Compositions pour 1 m ³ de bétons					
	B0	B1	B2	B3	B4	B5
Sable (kg)	719,4	575,8	431,8	287,8	144,0	0
Caoutchouc (kg)	0	144,0	287,8	431,8	575,8	719,4
Gravier 3/8 (kg)	970					
Ciment (kg)	390					
Eau (kg)	224					

4.3. Essai de l'affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est un essai réalisé sur le béton de ciment frais peu fluide pour déterminer sa consistance l'affaissement est aussi connu sous la norme française NEP 18-451.

Après cet essai nous avons obtenu l'ouvrabilité requise mais avec un rapport E/C = 0,6. Ce rapport est grand et il influe négativement sur la résistance. Pour remédier ce problème, nous avons pris un rapport E/C constant pour toutes les formulations égale 0,5 et on a ajouté un superplastifiants jusqu' à obtenir l'ouvrabilité requise.



.Figure II. 9. Essai de l'affaissement au cône d'Abrams

La composition optimale pour chaque type de béton est obtenue pour un rapport SP produise un affaissement entre 8 à 15 cm. Les rapports SP pour chaque composition sont présentés dans le tableau II.3. D'après ce tableau nous constatons que le dosage en SP pour les bétons B4 et B5 avec une forte teneur en caoutchouc est très élevé par rapport au béton témoin. Cela, est causé par la quantité élevée de granulats de caoutchouc présent dans ces deux bétons.

Tableau II.4. Les dosages de superplastifiant pour les différents bétons élaborés

Compositions	SP%	Affaissement (cm)
B0	1,5	11,00
B1	1,5	08,00
B2	2,0	08,50
B3	2,5	09,00
B4	3,0	15,00
B5	4,0	14,00

Le tableau III.4 présente les dosages requis pour la confection de 15 éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour chaque béton élaboré.

Tableau II.5. La composition de 15 éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour chaque Bétons

Les bétons	Le sable (kg)		Ciment (kg)	Gravier 3/8 (kg)	Eau (kg)	Total (Kg)
	SA	Caoutchouc				
B0	16,69	00,00	08,80	22,50	5,26	53,52
B1	13,35	03,36				
B2	10,02	06,67				
B3	06,67	10,02				
B4	03,36	13,35				
B5	00,00	16,69				

4.4. Confection des éprouvettes

4.4.1. Malaxage

Le malaxage des matériaux se fait, en général, à l'aide d'appareils mécaniques tels que malaxeurs ou bétonnières. Leur choix est fonction de la capacité de production des appareils compte tenu de l'importance du chantier et des cadences

de production ainsi que des possibilités d'obtenir des mélanges homogènes avec les bétons envisagés.

Pour notre étude on a utilisé un malaxeur de type batteur à axe vertical permettant de couler une gâchée de plusieurs éprouvettes mélangées dont la durée de malaxage totale est de 3 minutes



Figure II 10. Malaxeur de type batteur à axe vertical

4.4.2. Coulage et démoulage

Après le malaxage des composants, les bétons sont mis en place dans différents moules en trois couches. Pour chaque couche un simple piquage à l'aide d'une tige est effectué afin d'assurer un bon coulage. Cette procédure est effectuée du fait que le poids des grains de caoutchouc est léger et que l'utilisation de vibrations entraîne une remontée des granules à la surface qui peut causer l'apparition de ségrégation du béton.

Les éprouvettes sont démoulées après différentes périodes, afin d'éviter la détérioration des éprouvettes en cours de démoulage, surtout pour les cas des bétons avec une forte teneur en caoutchouc. A titre d'exemple pour le B4 et B5 le démoulage est effectué après 72 heures).



Figure II 11. *Le démoulage et conservation des éprouvettes.*

Après démoulage les éprouvettes sont conservées à l'air libre à l'intérieur du laboratoire, afin de minimiser au maximum la variation dans les conditions environnantes, tout en sachant que dans ce mode de conservation les paramètres climatiques ne sont pas constants et surtout que la durée de conservation des éprouvettes a été étalée, jusqu'à 28 jours, du 20 janvier jusqu'au 25 mars. Après ce délai, les éprouvettes seront préparées pour être testées aux essais de compression simple, de flexion simple, d'auscultation dynamique et résistance au feu.

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence toutes les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans ce travail par des expériences bien connues, et nous avons également identifié la méthode utilisée pour déterminer les quantités des mélanges.

A travers ce chapitre nous avons remarqué à travers l'essai de l'affaissement pour les bétons B4 et B5 ne nous permettait pas d'obtenir des bétons plastiques dans l'intervalle 8 à 12. Cela, est causé par le choix de la méthode de substitution massique, du sable alluvionnaire par de granulats de caoutchouc, qui a engendré un volume important de granulats de caoutchouc qui de part de son forme angulés freine l'écoulement des particules entre eux et par conséquent diminue l'affaissement.

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE

1. INTRODUCTION.....	366
2. ESSAIS EXPERIMENTAUX	366
2.1. Propriétés physique	366
2.1.1. Masse volumique apparente	366
2.1.2. Absorption capillaire	366
2.1.3. La porosité	377
2.2. Comportement mécanique.....	39
2.2.1. Essai de rupture par flexion simple	390
2.2.2. Résistance à la compression simple	400
2.2.3. Module d'élasticité.....	411
2.3. Résistance au feu	433
3. RESULTATS ET DISCUSSION	444
3.1. Propriétés physique	444
3.1.1. Allègement du matériau	444
3.1.2. Absorption.....	455
3.1.3. Porosité	466
3.2. Comportement mécanique.....	478
3.2.1. Résistance à la flexion simple	47
3.2.2. Résistance à la compression simple	490
3.2.3. Module d'élasticité.....	534
3.3. Comportement thermique.....	568
4. CONCLUSION	580

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la présentation des essais expérimentaux réalisés sur les différentes formulations de mortiers et de bétons à base granulats de caoutchouc élaborés. En premier lieu on a présenté les essais concernant les propriétés physiques. Puis en deuxième lieu on a entamé les essais mécaniques. Par la suite, les analyses et les discussions des résultats obtenus sont présentées, dont l'objectif de tirer certaines conclusions sur l'utilisation de ce type de bétons dans le domaine de la construction en Bâtiment.

2. ESSAIS EXPERIMENTAUX

2.1. Propriétés physique

2.1.1. Masse volumique apparente

Pour l'étude d'allègement, on a confectionné deux séries de mortiers par deux types de substitution, de granulats de caoutchouc, massique et volumique, dont l'objectif de voir la différence entre ces deux types de substitution. L'effet de la teneur en eau de caoutchouc sur la densité sèche, est obtenu par la mesure de la masse volumique des mortiers après 28 jours de conservation aux conditions du laboratoire.

2.1.2. Absorption capillaire

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons moulées ou carottées, non saturées, mises en contact avec l'eau sans pression hydraulique. Avant les mesures de la sorptivité, les éprouvettes sont pré-conditionnées, selon les recommandations de la procédure AFRE, qui a également fait l'objet de recommandations dans la synthèse des travaux du projet.

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes de (4x4x16 cm). Le protocole de cet essai consiste à sécher des éprouvettes prismatiques à l'étuve à 105 ± 50 C° pendant 24 heures. Les surfaces latérales des éprouvettes sont ensuite imperméabilisées à

l'aide d'une matière plastique étanche, et ce pour assurer la remontée unidirectionnelle d'eau par capillarité. Les éprouvettes sont ensuite pesées sont M_0 . Ensuite, les éprouvettes sont mises verticalement dans un récipient rempli en eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient partiellement immergées (environ 5 mm). Il faut noter que le niveau d'eau doit rester constant tout au long de l'essai.

Les éprouvettes sont retirées et pesées (M_1) régulièrement selon la norme NF P 10-502.

La figure III.1 schématise le protocole de cet essai.

$$C_{ac} = \frac{\Delta M}{A \cdot \sqrt{t}} \cdot 100$$

C_{ac} : coefficient d'absorption par capillarité

ΔM : masse d'eau absorbée ($\Delta M = M_1 - M_0$)

A : section de la base de l'éprouvette en mm^2

T : temps d'absorption en minutes.

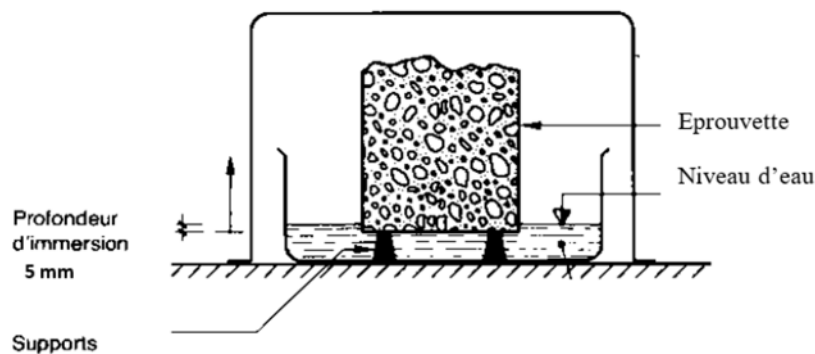


Figure III 1. Schéma de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.

2.1.3. La porosité

La porosité d'un béton est par définition le pourcentage du volume des vides V_v par rapport au volume total V_T :

$$p (\%) = \frac{V_v}{V_T} \cdot 100$$

Pour l'évaluation du volume des vides de l'échantillon on a suivi les étapes suivant :

- Découpage de l'éprouvette $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ en forme de cube $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$;
- Séchage de l'échantillon $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ dans une étuve à 105°C pendant 24h ;
- Peser de l'échantillon à sec M_s sur une balance au centième de gramme près ;
- L'échantillon est placé dans une enceinte fermée dans laquelle on établit le vide. L'échantillon est mis en dépression à l'air pendant une certaine durée (24 heures) environ dans le but de le saturer sous vide ;
- La mise à la saturation de l'échantillon par l'eau déminéralisée dans l'enceinte jusqu'à remplissage (pendant 24h).
- La pesé de l'échantillon après saturation M_{sat} .

Le schéma présenté par la Figure III.2 illustre les différentes étapes.

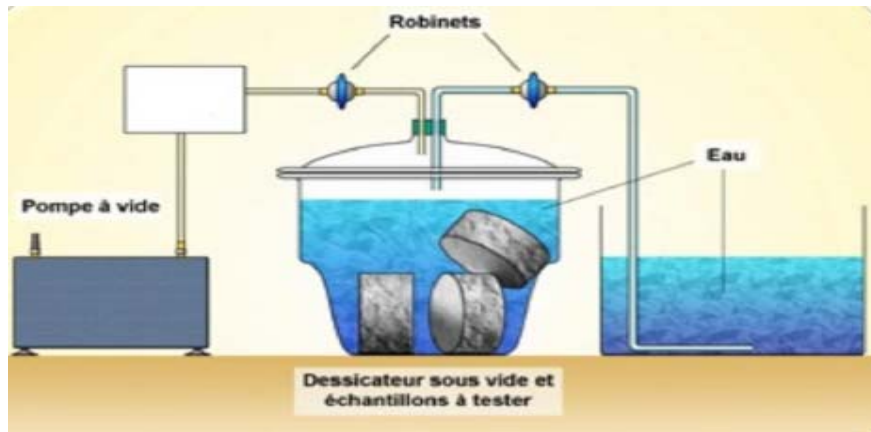


Figure III .2. Schéma présenté le dispositif de l'essai de mesure de la porosité

Par la technique de saturation totale de l'échantillon, on mesure donc la porosité ouverte accessible à l'eau. Le volume des pores accessibles à l'eau V_v sous vide est égal au volume d'eau V_e absorbé par l'échantillon à la saturation, autrement dit $V_v = V_e$. La porosité accessible est estimée par la formule suivante :

$$p (\%) = \frac{V_v}{V_T} \cdot 100 = \frac{V_e}{V_T} \cdot 100 = \frac{M_e}{V_T} \cdot 100 = \frac{M_{sat} - M_s}{V_T} \cdot 100$$

Avec : $M_e = V_e / \rho_{\text{eau}}$ représente la masse volumique de l'eau, estimée à $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ g} / \text{cm}^3$.

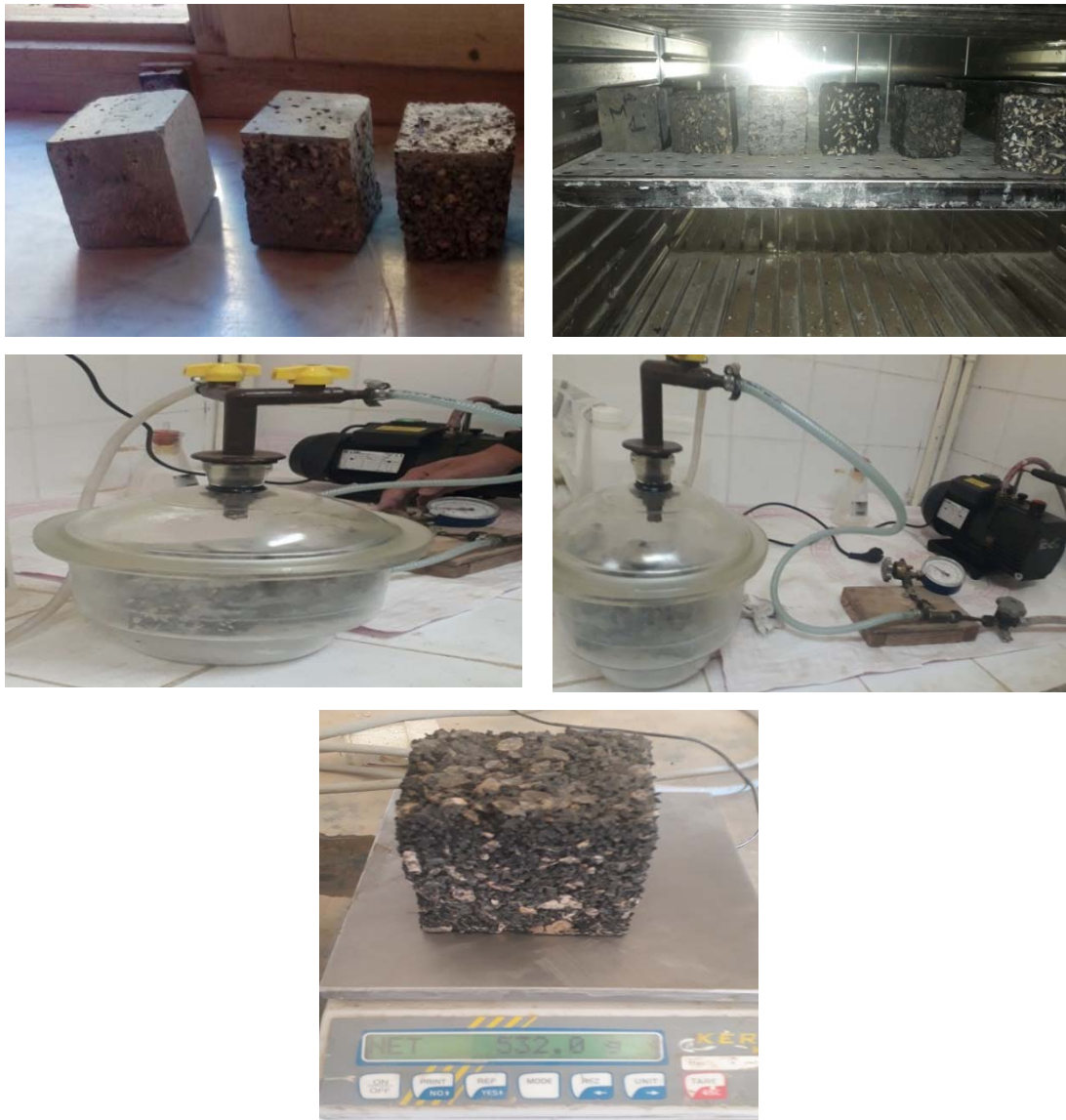


Figure III. 3. Etape de mesure de la porosité accessible à l'eau.

2.2. Comportement mécanique

Les essais mécaniques que nous avons menés sur les différents bétons à base de caoutchouc élaborés sont :

- Essais de flexion simple ;
- Essais de compression simple ;

2.2.1. Essai de rupture par flexion simple

L'essai s'effectue conformément à la norme NFP 18-407. L'essai est relatif à l'essai d'écrasement en traction par flexion sollicitant l'éprouvette en trois points.

L'essai consiste à faire centrer la charge progressivement jusqu'à rupture à une vitesse de 5kN/sec, et enregistrer la charge maximale supportée par l'éprouvette.

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$, à raison de trois éprouvettes pour chaque âge et chaque composition de béton.

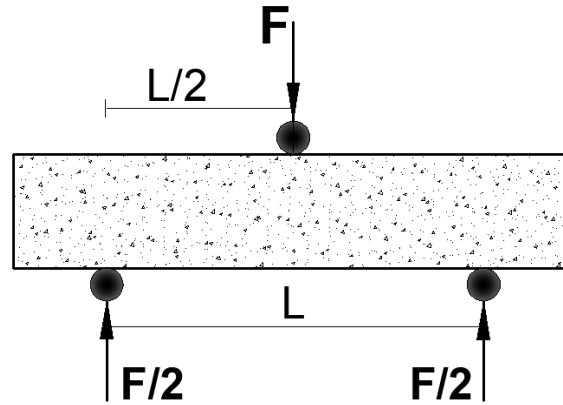


Figure III. 4. Schéma du dispositif en flexion simple en 3 points.



Figure III. 5. Eprouvette après rupture en flexion simple.

2.2.2. Résistance à la compression simple

L'essai a été effectué selon la norme NFP 18-406, Les éprouvettes étudiées sont, les deux parties de gauche et de droite de l'essai de flexion, soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture par l'appareil de compression.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. Les demi-prismes d'éprouvettes obtenues après la rupture en flexion seront rompus en compression..

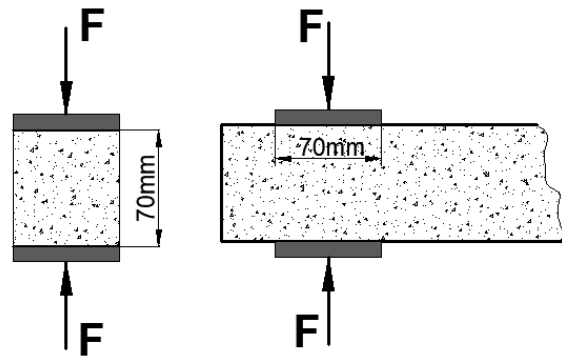


Figure III. 6.Essais de compression



Figure III.7.Presse de compression simple.

2.2.3. Module d'élasticité

Pour l'estimation du module d'élasticité on a utilisé deux types d'essais destructif en cours de l'essai de compression simple et non destructif par l'essai d'auscultation dynamique (ultra son).

2.2.3.1. Essai destructif

En cours de l'essai de compression simple, on a essayé, pour les différents bétons, de mesuré la variation de la résistance à la compression en fonction de la déformation axiale par le biais de l'enregistrement en vidéo à partir de l'interface du PC utilisé pour l'acquisition de la machine de traction (voir FigurIII.8).

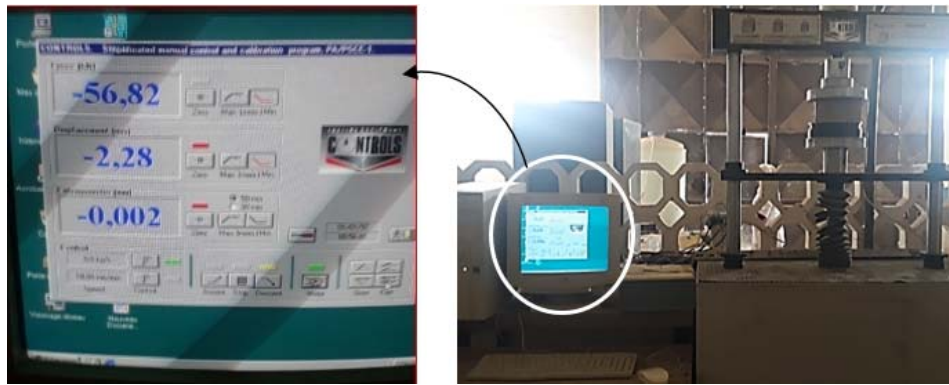


Figure III.8 Technique de mesure le module élasticité.

2.2.3.2. Essai non destructif

L'essai non destructif utilisé pour l'estimation du module d'élasticité c'est l'essai d'auscultation dynamique ou Ultra son. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur JONS.R ET FACAOARU (1969).

La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.



Figure III.9 Appareil de mesure ultra son

2.3. Résistance au feu

Pour déterminer la résistance au feu des différents bétons à base des agrégats de caoutchouc, nous avons exposé la surface des éprouvettes au feu avec une distance et une durée bien déterminés.

Nous avons installé la source du feu à une distance de 19 cm de l'éprouvette testée à condition que la flamme soit près de 2 cm de l'éprouvette. L'éprouvette est exposé au feu pendant un duré de 15 minutes, et les temps de peser sont : 30", 1', 1'30", 3', 5', 7'30", 10'30" et 15'. Le schéma du dispositif utilisé est présenté par la figure III.10

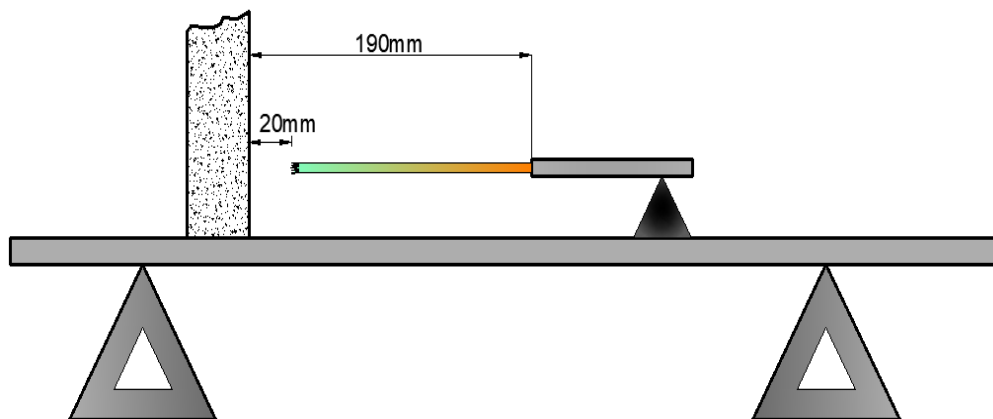


Figure III.10. Le schéma du dispositif de l'Essai de résistance au feu.



Figure III.11. Essai de résistance au feu.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Propriétés physique

3.1.1. Allègement du matériau

Pour l'étude d'allègement, on a confectionné deux séries de mortiers par deux types de substitution, de granulats de caoutchouc, massique et volumique, dont l'objectif de voir la différence entre ces deux types de substitution.

La variation de la masse volumique sèche du composite, en fonction de la teneur en particules de caoutchouc que ce soit volumique ou massique, est présenté par la figure III.12. Celle-ci diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc pour les deux cas de substitution. La masse volumique sèche varie de 2078 à 672 kg/m^3 et de 2078 à 1129 kg/m^3 pour une teneur en particules de caoutchouc massique et volumique respectivement allant de 0 % (mortier de référence) à 100% ; Ce qui correspond à un allègement de l'ordre de 67% et de 45%, particulièrement utile dans les travaux de réhabilitation et l'allègement des structures. Cela, est dû à la quantité élevée de caoutchouc présente dans le cas de la substitution massique. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par certains auteurs concernant les bétons à base de caoutchouc [1] ;[2] .

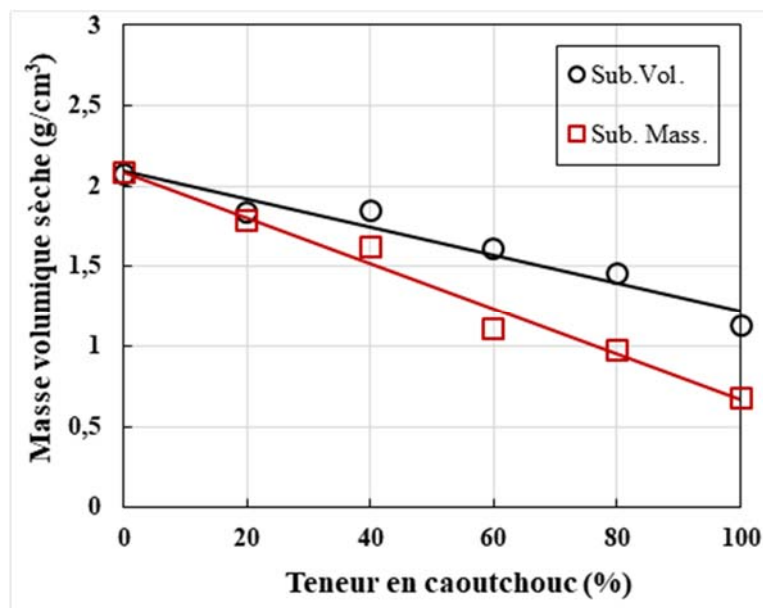
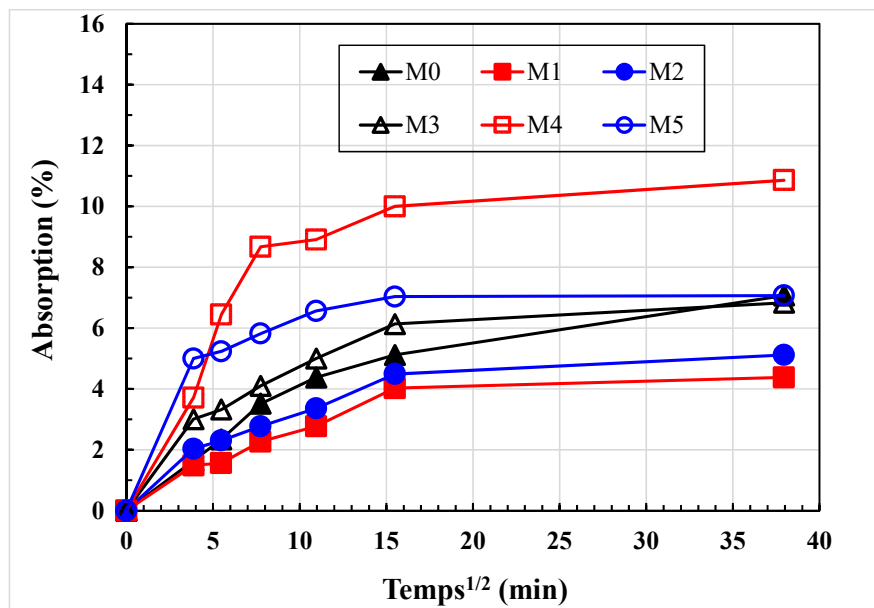


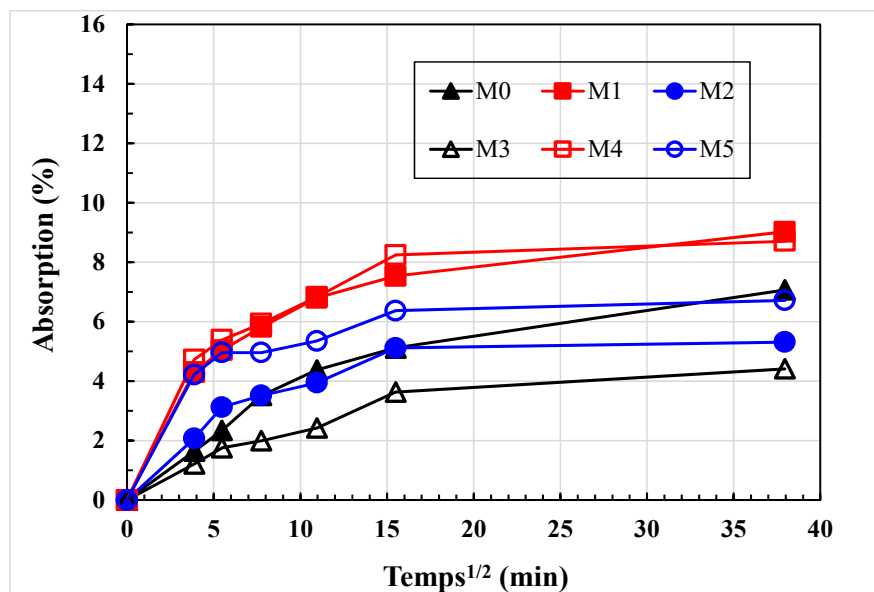
Figure III. 12. La variation de la masse volumique sèche du composite, en fonction de la teneur en particules de caoutchouc

3.1.2. Absorption

L'évolution de l'absorption massique par unité de surface du mortier, à différentes teneurs en caoutchouc, en fonction de la durée est donnée par Figure III.13. Les résultats montrent que l'absorption dépend de la formulation du mortier, avec une cinétique très rapide dans les premières heures. Les absorptions initiales se produisent principalement durant 120 minutes puis elles se ralentissent progressivement.



a- Substitution massique



b- Substitution volumique

Figure III.13. Résultats de l'essai d'absorption par capillarité pour les mortiers.

Les valeurs des coefficients d'absorption par capillarité en fonction de la teneur en caoutchouc sont données par le tableau III.1.

Tableau III. 1. Coefficients d'absorption par capillarité obtenue pour la totalité des échantillons.

Teneur en caoutchouc	Coefficients d'absorption par capillarité	
	Substitution volumique	Substitution massique
0%	41	41
20%	60,06	24,95
40%	36,35	29,63
60%	21,97	44,08
80%	59,97	86,97
100%	46,14	56,37

3.1.3. Porosité

Figure III.14.présente la variation de la porosité accessible en fonction de la teneur en caoutchouc. Nous constatons une augmentation de la porosité, de plus de 4 fois par rapport à celle du béton témoin, jusqu'à une teneur en caoutchouc de 40% au-delà de cette teneur les valeurs de la porosité de tous les bétons à base de granulats de caoutchouc sont presque identique au à l'entour d'une valeur moyenne de 17%.

Le tableau 2 récapitule les résultats de l'essai de mesure de la porosité.

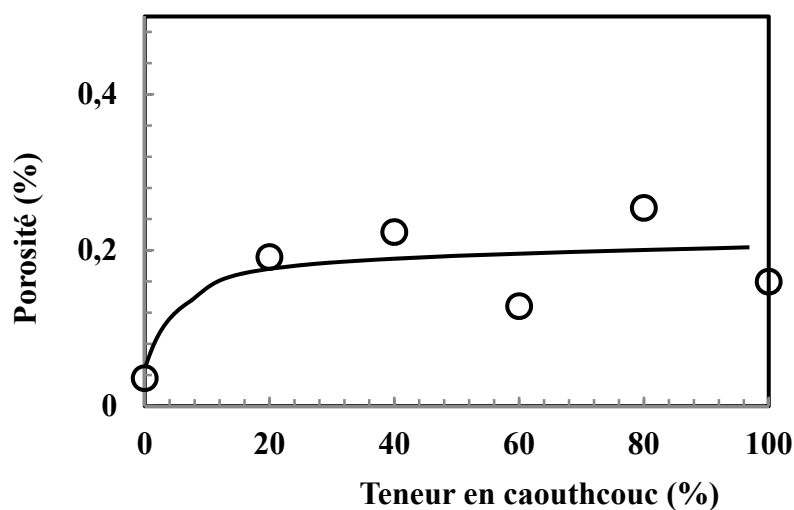


Figure III.14. Variation de la porosité en fonction de la teneur en caoutchouc

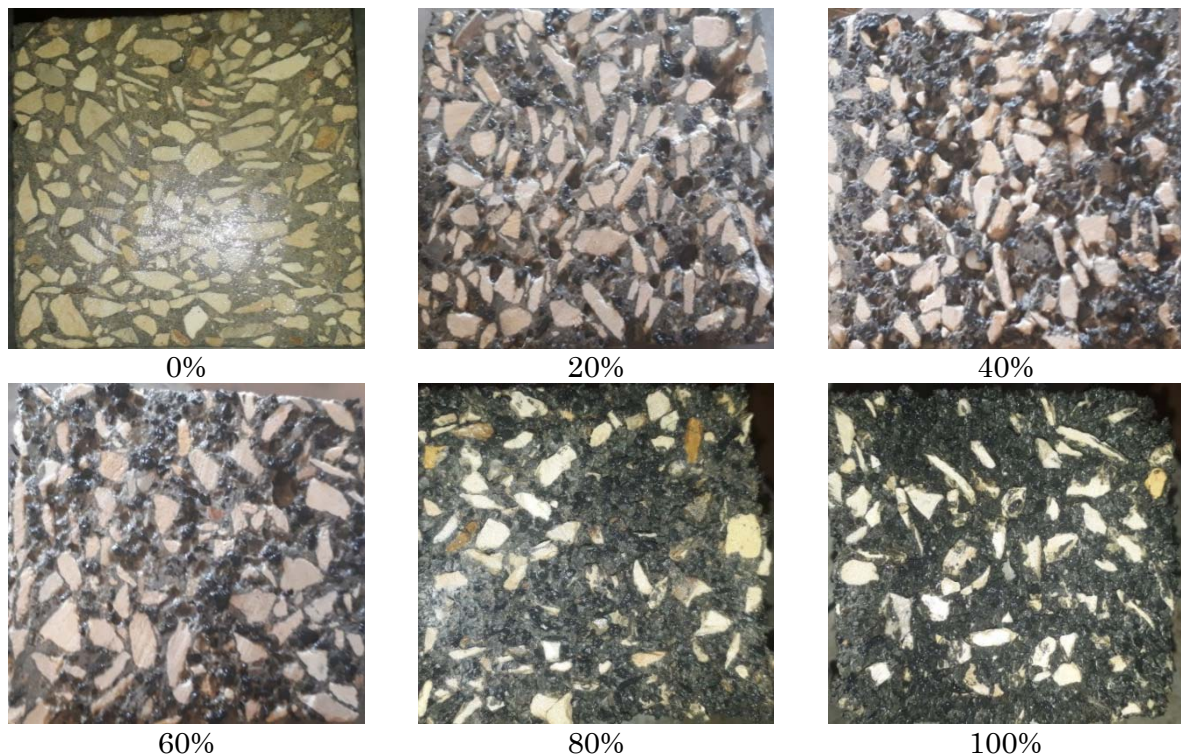


Figure III.15. Etat de surface des éprouvettes de bétons élaborés.

Tableau III.2. Résultats de mesure de la porosité pour les différents bétons étudiés

Teneur en caoutchouc	ρ_{appr} (g/cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	P acc. (%)	P. totale (%)	P. fermé (%)	Pac/Pt
0%	2,32	2,68	4	13	10	0,27
20%	1,82	2,89	19	37	18	0,52
40%	1,71	2,58	22	34	11	0,66
60%	1,76	2,02	13	13	00	1,00
80%	1,34	2,69	25	50	25	0,51
100%	1,26	1,73	16	27	11	0,59

3.2. Comportement mécanique

Les essais mécaniques que nous avons menés sur les différents bétons de caoutchouc, élaborés par substitution massive, sont des essais de flexion simple en trois points, et des essais de compression simple.

3.2.1. Résistance à la flexion simple

Figure III. 16 présente la variation de la résistance à la flexion simple en fonction de la durée de conservation. Ces résultats montrent que la résistance à la flexion simple de six bétons augmente rapidement du plus jeune âge (moins de 3 jours)

au plus lent. Nous remarquons que le béton témoin B0 présente les meilleures résistances à la flexion que les cinq bétons contenant du caoutchouc et que sa résistance à la flexion était de 5,09MPa en 28 jours, suivie du B1 avec une valeur de 3,27 MPa, et diminution jusqu'à la fin B5 avec une valeur de 0,82 MPa.

Une autre présentation de la variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en caoutchouc pour les différents âges de conservation (Figure III.18), montre que la résistance à la flexion décroît avec le taux de substitution de granulats de caoutchouc. Nous remarquons une forte chute de la résistance jusqu'à une teneur en caoutchouc de 40% au-delà de cette teneur la décroissance est faible.

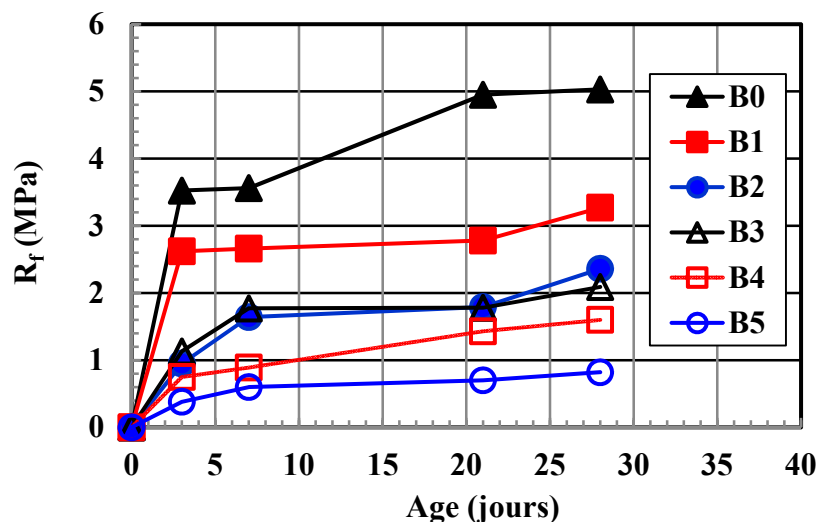
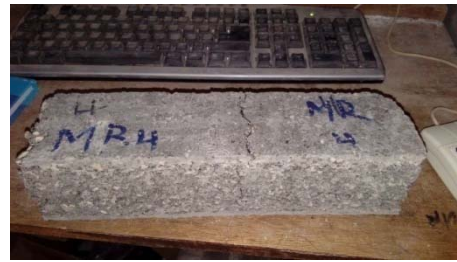


Figure III.16. Evolution de la résistance à la flexion simple en fonction de l'âge pour les six bétons confectionnés (B0-B5)

Nous signalons que lors de la réalisation des essais de la flexion en trois points, pour les éprouvettes des bétons B3, B4 et B5, qui contient des teneurs en caoutchouc très élevée (60%-100%) et qui présentent des faibles résistances à la flexion, on a remarqué que ces éprouvettes sont fléchies sans se détruire pas comme celle du béton ordinaire mais ils restent intacts et présentent seulement une simple fissure au milieu de l'éprouvette. Cela, est peut-être dû essentiellement au comportement élastique du caoutchouc qui a absorbé le maximum de déformation.



En cours de l'écrasement



Après écrasement

Figure III.17. Etat de l'éprouvette en cours de l'essai de flexion simple.

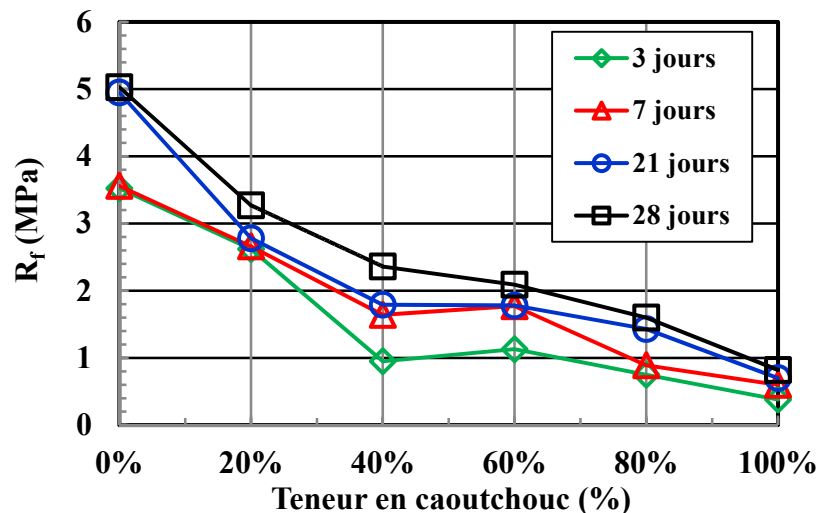


Figure III.18. Variation de la résistance à la flexion simple en fonction de la teneur en caoutchouc.

3.2.2. Résistance à la compression simple

Nous signalons que lors de l'écrasement des éprouvettes à base de granulats de caoutchouc on n'a pas constaté des éclats de bétons comme le cas général des bétons ordinaires (Figure III.19).



Figure III.19. Etat des éprouvettes de bétons à base de granulats de caoutchouc après l'écrasement

L'évolution de la résistance à la compression en fonction de la durée de conservation pour les six bétons confectionnés est représentée par Fig III.20. Ces

résultats montrent que les résistances mécanique, des différents bétons, croît d'une manière rapide au jeune âge (< 3 jours), ceci s'explique par diminution rapide de la quantité d'eau de gâchage qui favorise la réaction d'hydratation de ciment. Après l'âge de trois jours, le départ de l'eau du au séchage provoque une perturbation dans les réactions d'hydratation et par conséquent l'évolution de la résistance devient de plus en plus lente. Nous notons également que le béton ordinaire présente une résistance largement supérieure à celle des autres bétons à base de granulats de caoutchouc.

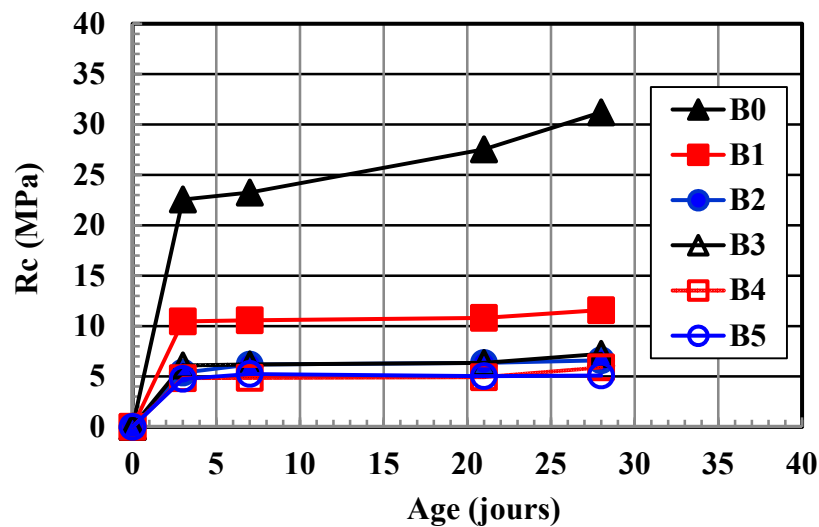


Figure III.20. Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge pour les six bétons confectionnés (B0-B5).

La variation de la résistance à la compression simple en fonction de la teneur en caoutchouc pour les différents âges de conservation est présentée dans figure III.21. D'après cette figure nous remarquons que la résistance à la compression simple décroît avec le taux de substitution de granulats de caoutchouc. Nous constatons une forte chute de la résistance jusqu'à une teneur en caoutchouc de 40% au-delà de cette teneur les valeurs de la résistance à la compression simple de tous les bétons sont presque identiques.

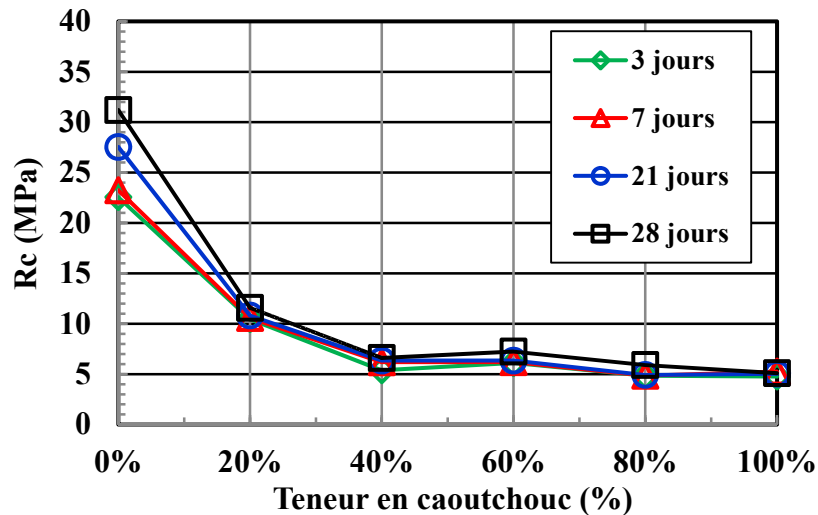


Figure III.21. Variation de la résistance à la compression simple en fonction de la teneur en caoutchouc.

La variation de la résistance à la compression des composites à 28 jours en fonction de la teneur en caoutchouc, est donnée par la figure III.22. La résistance diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Pour une composition allant de 0 à 100%, la résistance à la compression varie de 31 MPa, pour le béton témoin B0, à 5 MPa pour le B5 ; soit une réduction de l'ordre de 84%. La perte de résistance est liée, d'une part, à la nature élastique des particules de caoutchouc et d'autre part, à l'augmentation de la porosité en raison d'une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau en fonction de la composition en caoutchouc (figure III.23). Pour une composition allant de 0 à 100% la porosité a été multipliée de plus de 3 fois. Cette eau excédentaire est caractérisée par l'augmentation de l'affaissement (voir partie formulation chapitre II). L'évaporation de cette eau, au cours du durcissement, engendre une porosité supplémentaire dans la matrice. Le phénomène est accentué en raison de l'entraînement d'air. D'après la figure 9b, la résistance à la compression σ (MPa) varie en fonction de la masse volumique du matériau ρ (kg / m^3) suivant l'expression : $\sigma = 0,43 e^{(0,002\rho)}$, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,9$. Cette évolution est similaire à celles obtenues avec d'autres chercheurs [1] et [36]. L'examinations de la variation de la résistance en fonction de la masse volumique apparente (figure III.24) montre une baisse significative de la

résistance à la compression en fonction de la masse volumique apparente. Malgré ça la valeur obtenue pour une composition à 100% en caoutchouc, reste compatible avec l'utilisation du matériau dans le domaine d'application des bétons légers de construction de "classe II" (masse volumique inférieure à 1500 kg/m³ et une résistance à la compression supérieure à 3,5 MPa), suivant la classification fonctionnelle de la RILEM (RILEM LC2, 1978).

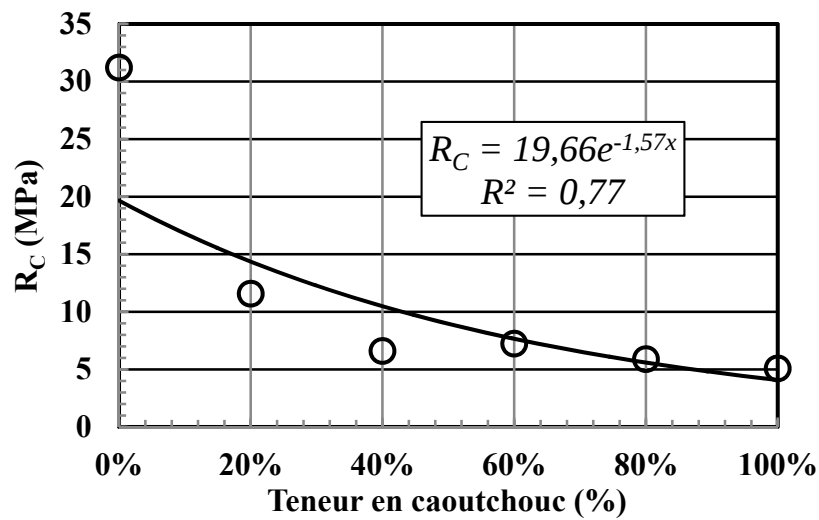


Figure 14.

Figure III. 22. Variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la teneur en caoutchouc.

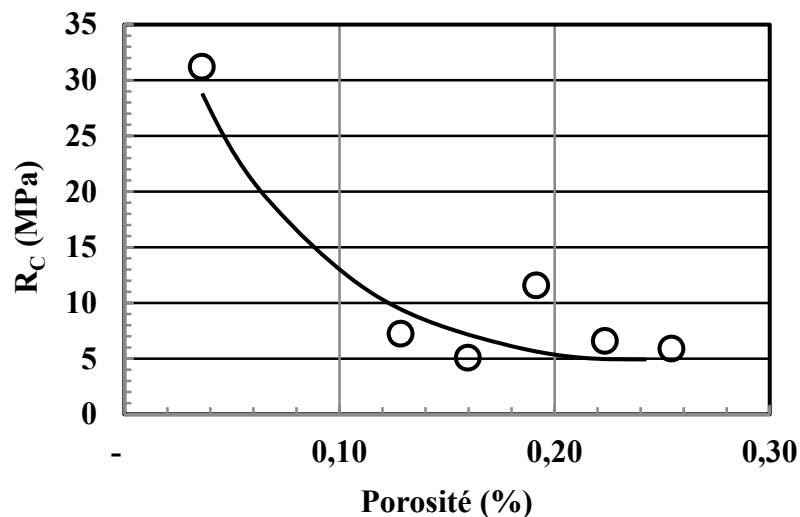


Figure III.23. Variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la porosité.

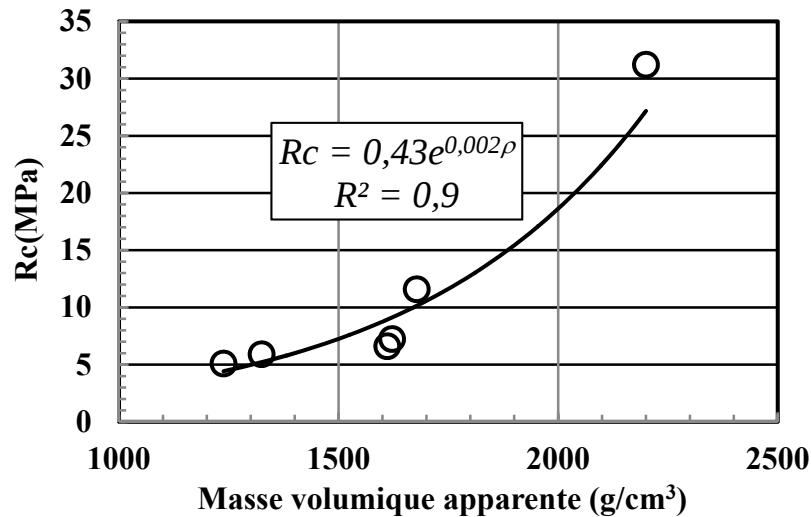


Figure III. 24. Variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la masse volumique sèche

3.2.3. Module d'élasticité

Pour l'estimation du module d'élasticité on a utilisé deux types d'essais destructif en cours de l'essai de compression simple et non destructif par l'essai d'auscultation dynamique (ultra son).

3.2.3.1. Essai destructif

Les figures III.25.a et III.25.b présentent les courbes contraintes-déformations obtenus pour les différents bétons élaborés. D'après les courbes nous remarquons que les courbes contraintes-déformations présentent généralement des paliers de ductilité francs à l'exception les courbes correspondants aux deux bétons B0 et B2. Cette exception est causée par le fait que les résistances maximales à la compression des deux bétons dépassent la capacité de l'appareil utilisé.

Nous remarquons qu'avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc que les courbes présentent des faibles résistances avec un grand domaine de déformation. Cette baisse des résistances des bétons est probablement liée à la différence d'élasticité entre la matrice et les granulats de caoutchouc. Par ailleurs, le module d'élasticité statique des granulats de caoutchouc, mesuré sur des échantillons avant l'opération de déchiquetage, et celui du mortier sont de 68 MPa et 15 GPa, respectivement [34].

A partir de la branche linéaire de chaque courbe présentée dans ces deux figures, on a pu estimer les valeurs des modules d'élasticité en appliquant la loi de Hooke : $R_C = E \cdot \varepsilon$.

La figure III.26 présente la variation du module d'élasticité en fonction de la teneur en caoutchouc. Nous remarquons que les valeurs du module d'élasticité décroît en fonction de la teneur en caoutchouc. Entre les teneurs de 40% à 60% de caoutchouc, nous constatons que les valeurs du module d'élasticité chute d'une valeur de 252 MPa jusqu'à 43 MPa. Cette forte chute peut être expliquée par le nature frottement élastique des granulats de caoutchouc. Noté bien que la valeur trouvée pour le béton témoin B0 est largement inférieure à celle trouvée généralement pour les bétons ordinaires.

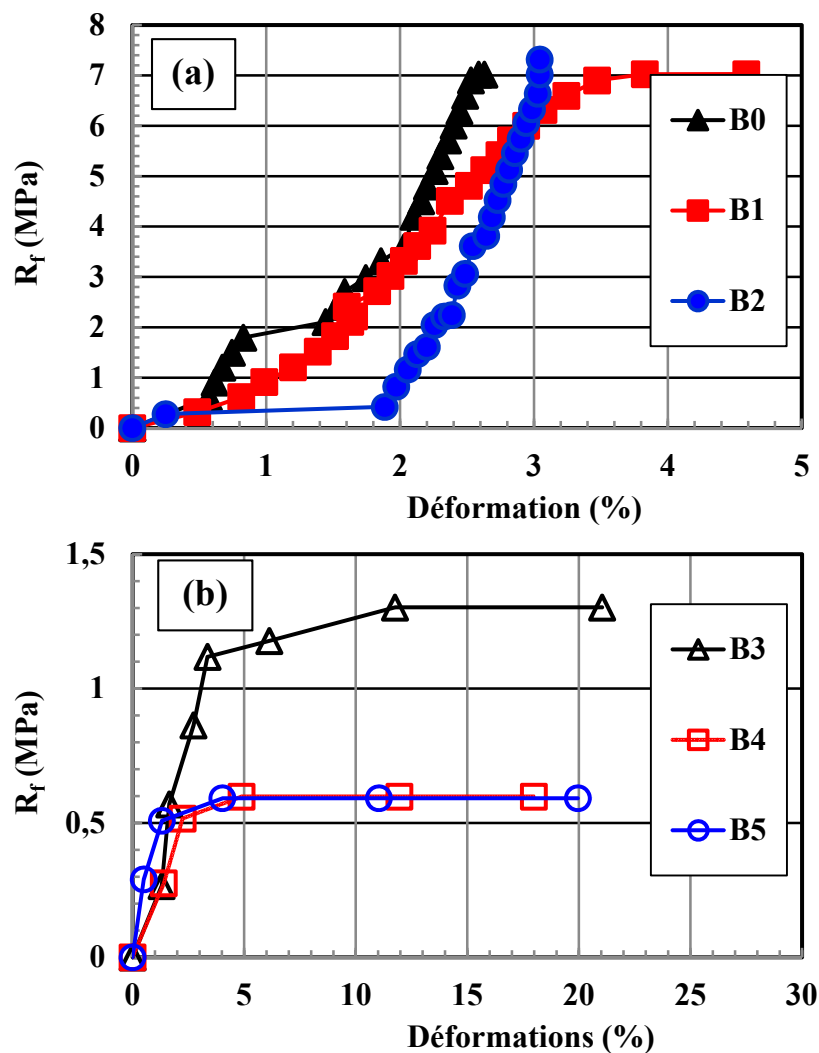


Figure III. 25. Courbes contraintes-déformations (a) pour les formulations B0-B2, (b) pour les formulations B3-B5.

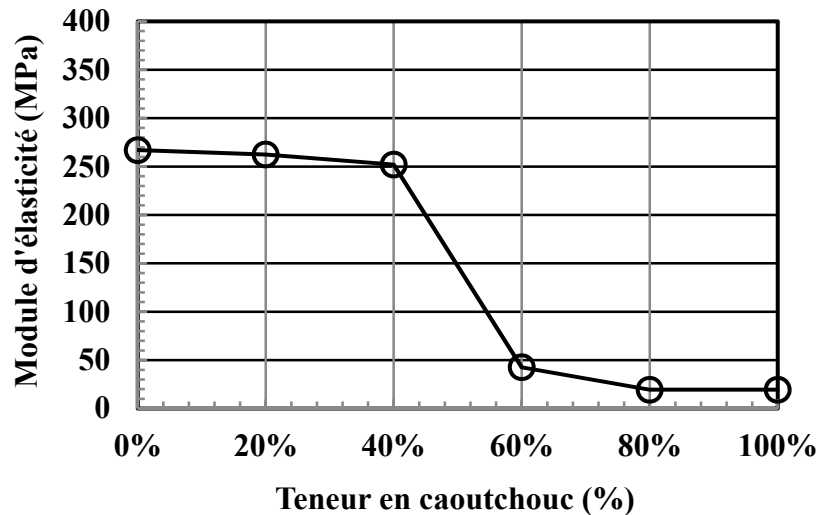


Figure III. 26. Variation du module d'élasticité en fonction de la teneur en caoutchouc.

3.2.3.2. Essai non destructif

L'essai d'auscultation dynamique ou ultra son est utilisé pour estimer les valeurs du module d'élasticité statique et dynamique. Les valeurs des modules d'élasticité des différents bétons étudiés sont estimées à partir des deux formules basées sur la vitesse de propagation :

- Le module d'élasticité statique donné en fonction de la constante (K) :

$$Es(V) = k \cdot V^2$$

Avec : $k = 1.68$ pour $t \geq 180$ jours ;

$k = t \cdot 0.1$ pour $t < 180$ jours ; t : âge du béton en jours

- Le module d'élasticité dynamique :

$$E_d = \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \cdot \gamma_v \cdot V^2$$

Où γ_v : masse volumique apparente du béton en (t/m^3) estimée selon l'équation suivante:

$$\gamma_v = 1,67 + 0,155 \cdot V^2$$

ν : Coefficient de Poisson, pris égale 0,3,

V : vitesse du son mesuré après 28 jours de conservation [km/s]

Les résultats, donnés par le la figureIII.27, montrent que l'ajout de particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire, réduit le module d'élasticité dynamique de 24 à 2 GPa, pour une teneur en caoutchouc allant de 0 (béton de référence) à 100%. Cette diminution est due à la nature du caoutchouc qui absorbe les ondes ultrasonores.

En effet, les mesures de la célérité dans le caoutchouc ont donné lieu à une valeur de l'ordre 175 m/s [34], alors que celle mesurée dans le béton de référence est de 3800 m/s. Le phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans la matrice. Les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la pâte de ciment. Ce qui augmente le temps de propagation de l'onde ultrasonore et réduit ainsi sa vitesse de propagation. Ces résultats montrent que le composite à base de caoutchouc présente des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations. Ces résultats sont en concordances avec ceux trouvés par d'autres chercheurs [34].

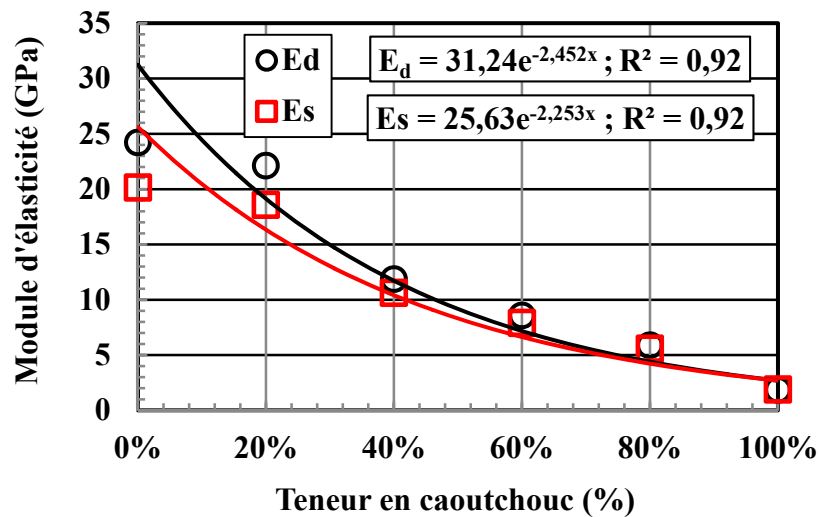


Figure III 27. Variation du module d'élasticité en fonction de la teneur en caoutchouc

3.3. Comportement thermique

Le comportement mécanique des bétons à base de caoutchouc est étudié par le biais de l'essai de la résistance au feu. Ce comportement thermique est interprété

par la perte en masse causé par l'exposition des éprouvettes des différents bétons à une flamme pendant un quart heure (15min).

Après avoir effectué le test de résistance au feu, on a constaté que :

- La résistance au feu du béton ordinaire était plus durable que celle des cinq autres.
- Plus la quantité de caoutchouc dans le béton est importante, plus flamme est importante.
- Le feu ne se propage pas sur toute la surface de l'éprouvette, ce qui prouve que la nature du caoutchouc utilisé ne conduit pas à la combustion globale de l'élément (figureIII.28).
- En fonction de la teneur en caoutchouc les autres faces de l'éprouvette présentant des températures très faibles par rapport la face exposée à la flamme .Ce qui traduit que la nature du caoutchouc utilisé confèrent une isolation thermique.
- L'augmentation de la proportion de caoutchouc entraîne une augmentation du pourcentage de perte de masse.



Figure III.28. Combustion d'échantillon pendant l'essai de la résistance au feu.

La figure III.29 présente la perte en masse en fonction du temps pour les différents bétons à base de caoutchouc élaborés .On constate que la perte de masse a base de caoutchouc est toujours plus importante que celle du béton temion B0.Pour une composition allant de 0 à 100%, la perte en masse varie de

0,56%, pour le béton témoin B0, à 3,75% pour le B5. [34] ont trouvé les mêmes résultats pour son étude sur l'effet de l'élévation de la température sur les caractéristiques du béton de sable à base de déchets plastiques.

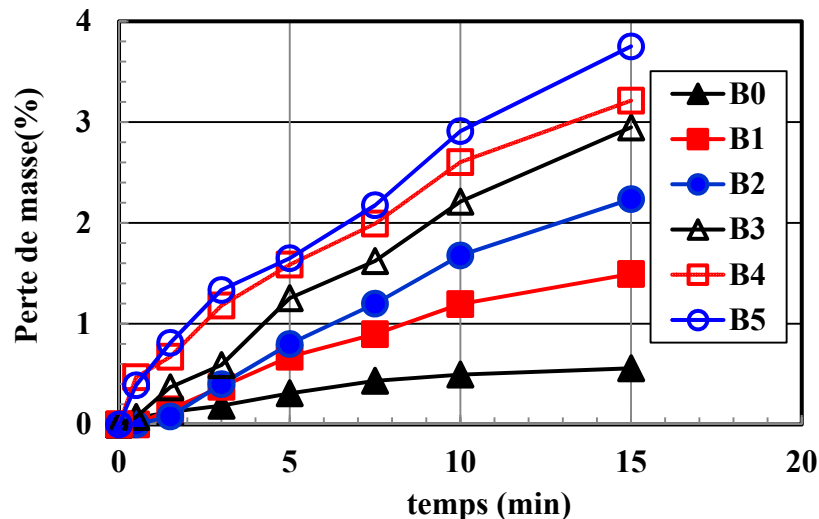


Figure III.29. Variation du poids volumique apparent en fonction de la durée de feu pour les six bétons étudiés.

4. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté et discuté les résultats expérimentaux réalisés sur les différentes formulations de mortiers et de bétons à base de granulats de caoutchouc élaborés. D'après l'analyse de ces résultats on a pu tirer les conclusions suivantes :

- La masse volumique sèche du composite, en fonction de la teneur en particules de caoutchouc que ce soit volumique ou massique diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc pour les deux cas de substitution ;
- La cinétique de l'absorption est très rapide pour tous les mortiers à base de granulats de caoutchouc élaborés ;
- La porosité augmente en fonction de la teneur en caoutchouc jusqu'à une teneur en caoutchouc de 40% puis se stabilise au-delà de cette teneur à une valeur moyenne de 17% pour les autres bétons ;

- Malgré la baisse significative des résistances mécaniques obtenues avec la substitution des granulats de caoutchoucs, les valeurs obtenues même avec une composition à 100% en caoutchouc restent compatible avec l'utilisation du matériau dans le domaine d'application des bétons légers de construction de classe II ;
- En fonction de l'augmentation de la teneur en caoutchouc, les bétons élaborés présentent des faibles résistances avec un grand domaine de déformation. Ce qui traduit que l'utilisation des granulats de caoutchouc augmente le domaine de ductilité des bétons ;
- Le composite à base de caoutchouc présente des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations ;
- L'utilisation des granulats de caoutchouc provoque une grande dégradation au niveau des éléments exposés en cas d'incendie.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'idée de la valorisation des pneumatiques usagés constitue actuellement une priorité très motivante sur le plan environnemental qu'économique. En effet le pneu usagé est un déchet encombrant, mais qui peut devenir très utiles, en conséquence le Génie Civil offre de nombreuses possibilités d'utilisation des pneumatiques usagés, en les valorisant en matériau de construction aux propriétés originales et très utiles.

Dans ce mémoire on a étudié la possibilité de valoriser de ces déchets dans un béton sous forme de sable dans le but d'élaborer des bétons à base de granulats de caoutchoucs. Cette étude, est inscrit dans l'objectif d'absorber des grandes quantités de ces déchets par une substitution massique du sable alluvionnaire par des particules en caoutchouc dans la matrice de béton. L'étude de l'effet de la teneur massique en caoutchouc sur les propriétés physico-mécaniques est menée à travers : la densité, la porosité, la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la vitesse propagation d'onde ultrasonique.

Suite à cette étude, l'examen du comportement physico-mécanique a montré un allègement du composite allant jusqu'à 67% en substitution massique contre 45% en substitution volumique. Cet allègement est traduit par une augmentation de la porosité de plus de 4 fois, pour une teneur de 40% de granulats de caoutchouc, par rapport le béton témoin. Malgré une baisse significative de la résistance à la compression, les valeurs restent compatibles avec l'utilisation du composite dans le domaine des bétons légers de construction de "classe II". Par ailleurs, la baisse de la résistance à la flexion est moins importante que celle à la compression. Concernant le

module d'élasticité, les résultats ont montré une baisse des valeurs du module en fonction de la teneur en caoutchouc. Par ailleurs, le matériau devient plus ductile. Les bétons élaborés ont montrés une bonne tenue au feu et la nature du caoutchouc utilisé confère une isolation thermique.

En fin, et d'après ces résultats expérimentaux qui a présenté le terme d'énergie dans les déchets de caoutchouc et son aptitude d'utilisation dans la fabrication des bétons, alors on espérant qu'on a apporté un plus dans le domaine de recherche de nouveau matériaux performant avec le moindre cout, qui pourrait résoudre un problème environnementale, économique et technique dans la construction.

Cette recherche dans le laboratoire a été limitée à l'étude du comportement physico-mécanique des bétons élaborés. D'autres aspects restent élucider et par conséquent, nous recommandons, pour de futurs travaux, ce qui suit :

- Essais de Durabilité :
 - Attaque sulfatique
 - Gel dégel
- Essais thermique (mesure de la conductivité)

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Topçu U.B., "The properties of rubberized concrete". *Cement & Concrete Research*, vol. 25, N°2, 1995, p. 304-310
- [2] Eldin N.N., Senouci A.B., "Rubber tire particles as concrete aggregate". *Journal .of Material in Civil Engineering*, vol.5, N°4, 1993, p. 478-496.
- [3] Benazzouk A., Douzane O., Quéneudec M., Transport of fluids in cement-rubber composites. *Cement &.Concrete Composites*, vol. 26, 2004, p. 21-29
- [4] Benazzouk A., Queneudec M., "Durability of cement-rubber composites under freeze thaw cycles". *Proceeding of International congress of Sustainable Concrete Construction*, Dundee- Scotland, September 2002, p. 355-362.
- [5] Benazzouk A., Mezreb K., Doyen G., Goullieux A., Quéneudec 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*, vol. 25, 2003, p. 711-720
- [6] Benazzouk A., Douzane O., Mezreb K., Quéneudec M., "Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste". *Cement &.Concrete Composites*, vol. 28, 2006, p. 650-657
- [7] Benazzouk A., Douzane O., Mezreb K., Laidoudi B., Quéneudec M., "Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling". *Construction and Building Materials*, vol. 22, 2008, p. 573-579.
- [8] L. J. Vicat, *Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments et gangues a pouzzolanes et de leur emploi dans toutes sortes de travaux.*

- [9] J. M. Sganzi, Programme ou résumé des leçons d'un cours de constructions: avec des applications tirées spécialement de l'art de l'Ingénieur des ponts et chaussé
- [10] R. Vittone, Bâtir : manuel de la construction, PPUR Presses polytechniques, 2010.
- [11] Baron.J et Sauterey.R, 1982 .Le béton hydraulique Connaissances et Pratique, Presses de l'école des ponts et chaussées, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey.
- [12] Chanvillard. G, 1999. Connaissances générale sur le matériau béton, Ed. Aléa
- [13] CIM béton, 2000. Construire avec les bétons, Ed du Moniteur.
- [14] Dreux.G et Festa.J.1998. Nouveaux guide du béton et de ces constituants,
- [15] BaCaRa Projet Français, 1996.Le béton compacté au rouleau, Presses de l'Ecole-, Nationale des Ponts et Chaussées, Ed.Eyrolles France.
- [16] Aitcin .P.C, 2001 Ed. Eyrolles. Bétons haute performance.
- [17] Bresson.J,1980. Prévision des résistances, facteur de maturité, temps équivalent,Journée d'étude ITBTP du 15 novembre 1979 ;durcissement accéléré des bétons,Paris ,AnnInst.Tech. Batim.Trav.publics, 1980,387, 106-111.
- [18] Poitrat.E ,2004: Biocarburants, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, BE 8550.
- [19] Cormon.P 1973. Bétons légers d'aujourd'hui, Ed. Eyrolles,Paris.
- [20] CIM béton ,2000.Le ciment et ses applications, Fiches techniques.
- [21] Habib trouzine et al. « Problématique des pneumatique usagés en algérie » Dupain.R, Lanchon.R et Saint-Arromain.J.C, 1995.Granulats, sols, ciments et bétons, Ed Educalivre, 276p Paris
- [22] Dreux G, « Nouveau guide du béton et e ses constituants ».2000.

- [23] MICHEL M." Valorisations des déchets et des sous-produits industriels
"Ed
Massion, Paris (1981).
- [24] LANGUEDOC R. "Guide pratique des déchets" (site Internet google.fr),
2001.
- [25] 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.
- [26] SAHRAOUI Mohamed, NEBIH Islam .Le béton de sable à base de
déchets de caoutchouc, JUIN 2015. Université Dr. YAHIA FARES DE
MEDEA.
- [27] 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.
- [28] Recyclage " Encyclo-ecolo.com " l'encyclopédie écologique, 2014.
- [29] Habib trouzine et al. « Problématique des pneumatique usagés en algérie
»
- [30] moussai boubaker, seghiri mohamed, « béton compacté avec des ajouts
granulats caoutchoucs » mémoire de fin d'étude, juin 2009.
- [31] ministère de l'industrie de la petit et moyenne entreprise et de la
promotion de l'investissement « Etude d'un Projet Industriel de
Fabrication d'articles en caoutchouc pour automobiles ».
- [32] F. Abdelouahab, z. djidjeli « recherche-valorisation des pneumatique-
usages dans la protection de l'environnement ».
- [33] moussai boubaker, seghiri mohamed, « béton compacté avec des ajouts
granulat caoutchoucs » mémoire de fin d'étude, juin 2009.
- [34] Ammar Benazzouk, Omar Douzane « Effet des granulats de caoutchouc
sur les propriétés d'un mortier de ciment ».

- [35] Dreux G, « Nouveau guide du béton et e ses constituants ».2000.
- [36] Khedari J., Suttisonk B., pratinthong N., Hirunlabh J., "New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity" Cement &.Concrete Composites, Vol. 23, 2001, p. 65-70