

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par : AISSAOUI Walid

**Thème : Etude expérimentale des propriétés mécaniques
des bétons élaborés à base de granulats en caoutchouc**

Sous le direction de : Pr CHERAIT Yacine

Juin 2018

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par : AISSAOUI Walid

**Thème : Etude expérimentale des propriétés mécaniques
des bétons élaborés à base de granulats en caoutchouc**

Sous le direction de : Pr CHERAIT Yacine

Juin 2018

REMERCIEMENTS

Avant tout, je tiens particulièrement à remercier, mon créateur Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, et la volonté pour élaborer et finaliser ce modeste travail.

Mes remerciements à mon encadreur le Pr **CHERAIT Yacine** pour l'honneur qu'il m'a donné en acceptant de diriger ce travail, et qui a contribué avec son aide, ses efforts et sa disponibilité, durant l'élaboration de ce projet. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance, tant pour ses conseils, son intérêt et sa vaste culture que pour la confiance qu'il m'a accordée pendant ce projet de recherche, merci de m'avoir ouvert les portes du monde passionnant de la recherche expérimentale, et ce malgré tous ces aléas et difficultés.

Mes remerciements également pour les membres de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier également l'ensemble du corps enseignants département de génie civil et d'hydraulique de l'université 8 mai 1945 de Guelma, et pour l'exception je tiens de féliciter mademoiselle **KECHKAR Chiraz** qui m'a soutenu tout au long de mon travail à l'intérieur du laboratoire et lui a souhaité le succès dans ce qui restait d'elle.

Mes remerciements les plus profonds pour ma chère famille pour son soutien moral et ses encouragements.

Les essais expérimentaux de la présente étude se sont déroulés à travers plusieurs laboratoires, et principalement le laboratoire pédagogique du département et le Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université 8 Mai 45 de Guelma. Je remercie vivement le chef de département le Pr Belabed Lazher, et le directeur du LGCH le Pr Nouaouria M/Salah, de m'avoir accueilli au sein de ses deux laboratoires. Je remercie également le Directeur du Laboratoire des travaux publics d'Annaba ainsi que son personnel technique et administratif pour m'avoir accueilli pour mon stage pratique de fin de cycle.

J'exprime tous le bonheur du monde à mes collègues de la promotion sortante 2018 du Master Génie Civil (option structure).

Enfin, Je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce document.

DEDICASES

Ce modeste travail est dédié :

- ✚ A mon exemple éternel, mon soutien moral, source de joie et de bonheur, à celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir grandir et réussir, que dieu te garde et te protège mon **très cher Père**,
- ✚ A la lumière de mes jours, source de mes efforts, la flamme de mon cœur, de ma vie et de mon bonheur, **Maman que j'adore**,
- ✚ A toutes les personnes que j'aime et plus particulièrement, à mes frères et sœurs «**SAMI, NABIL, SABRINA, KARIMA, MOUNA et HADJER**», mes nièces et neveux "**LINA, MARIA et MOUHAMED IVED**". Dont le grand privilège leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, assistance, et encouragements,
- ✚ Je dédie particulièrement ce travail aux familles «**AISSAOUI et BOUDECHICHE**»,
- ✚ Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours là à mes côtés, et qui m'ont accompagnées durant mon cursus d'études supérieures (**HOUSSEM, SOUFIANE, HAMZA, TOUCHI**), et sans oublier mes cousines (**LOULOU, NANOU et MARWA**), mes aimables amis (**AHSEN, MOUHAMED CHERIF, SEIF**), collègues d'étude, et frères de cœur.

WIDOU

RESUMES

FRANÇAIS – ANGLAIS – ARABE.

Résumé

Le béton est actuellement le matériau de construction le plus utilisé à causes de ses nombreux avantages. Initialement il est composé de ciment, d'eau, de gravier et de sable. Par ailleurs le développement industriel de ces dernières décennies s'est souvent accompagné par des produits secondaires ou des déchets qui ont une incidence directe et néfaste sur notre environnement. Raison pour laquelle des études scientifiques ont été entreprise afin de valoriser ces recyclât dans différents domaines dont celui du béton. Ainsi, des sous-produits comme le laitier de haut fourneau, les déchets de briques, les déchets de verres, la poudrette de caoutchouc, etc. Sont actuellement utilisés pour la confection des bétons et des mortiers.

Ces nouveaux produits sont de plus en plus utilisés et cette utilisation massive de produits recyclés dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet de fin d'études. Il vise à étudier le comportement mécanique, à travers des essais en compression, de fendage et de traction par flexion, de quatre bétons dans lesquels une partie du sable a été substitué par de la poudre de caoutchouc issues de pneus recyclés. Les taux de substitution étudiés varient entre 10 et 25%, et qui correspond aux taux standards retrouvés au niveau de la littérature spécialisée.

Les résultats obtenus montrent que le comportement rhéologique de ces bétons à l'état frais est pratiquement similaire au comportement des bétons ordinaires, et que cette substitution s'accompagne d'une baisse des performances mécaniques du béton en compression, en traction par flexion et en fendage. Cependant des mesures de résistances par scléromètre digital aboutissent aux contraires à des améliorations des résistances à 28 jours.

MOTS-CLES : Béton - Poudre de caoutchouc - comportement mécanique - Formulation - Scléromètre.

Abstract

Concrete is currently the most used building material because of its many advantages. Initially it is composed of cement, water, gravel and sand. Moreover, industrial development in recent decades has often been accompanied by secondary products or waste that have a direct and harmful impact on our environment. Reason for which scientific studies have been undertaken in order to valorize these recyclates in different fields including concrete. Thus, by-products such as blast furnace slag, brick waste, glass waste, rubber crumb, etc. are currently used for the manufacture of concretes and mortars.

These new products are increasingly used and this massive use of recycled products in the cement and concrete industries has technical, economic and ecological advantages. It is in this context that our end-of-studies project fits. It aims to study the mechanical behavior, through compression tests, splitting and bending tensile, of four concretes in which a portion of the sand was substituted by rubber powder from recycled tires. The substitution rates studied vary between 10 and 25%, which corresponds to the standard rates found in the specialized literature.

The results obtained show that the rheological behavior of these concretes in the fresh state is practically similar to the behavior of ordinary concretes, and that this substitution is accompanied by a decrease in the mechanical performances of the concrete in compression, in flexural traction and in splitting. However resistance measurements by digital sclerometer lead to opposites to resistance improvements at 28 days.

KEYWORDS: Concrete - Rubber powder - mechanical behavior - Formulation - Sclerometer.

ملخص

الخرسانة حاليا هي مواد البناء الأكثر استخداما بسبب مزاياها العديدة. في البداية تتكون من الأسمنت والماء والحصى والرمل. وعلاوة على ذلك، كثيرا ما كانت التنمية الصناعية في العقود الأخيرة مصحوبة بمنتجات ثانوية أو نفايات لها تأثير مباشر وضار على بيئتنا. سبب إجراء الدراسات العلمية من أجل تهمين هذه التدويرات في مجالات مختلفة بما في ذلك الخرسانة وبالتالي، فإن المنتجات الثانوية مثل خبث فرن الانفجار، نفايات الطوب، نفايات الزجاج، فتات المطاط، إلخ تستخدم حاليا لتصنيع الخرسانة والهاون.

وتستخدم هذه المنتجات الجديدة بشكل متزايد، وهذا الاستخدام الضخم للمنتجات المعاد تدويرها في صناعات الأسمنت والخرسانة له مزايا تقنية واقتصادية وبيئية.

في هذا السياق، يتناسب مشروع دراسات نهاية دراستنا وهي تهدف إلى دراسة السلوك الميكانيكي، من خلال اختبارات الضغط، وتقسيم والانحناء الشد من أربعة الخرسانة التي تم استبدال جزء من الرمال المطاط مسحوق من الإطارات المعاد تدويرها. وتتراوح معدلات الاستبدال التي تمت دراستها بين 10 و 25٪، وهو ما يتوافق مع المعدلات القياسية الموجودة في الأدبيات المتخصصة. وأظهرت النتائج أن سلوك الرابولوجية من الخرسانة في ولاية جديدة تماثل إلى حد كبير سلوك الخرسانة العادية، وهذا يترافق هذا الاستبدال من انخفاض في الأداء الميكانيكي للخرسانة ضغط، والانحناء والشد تقسيم. لكن قياسات المقاومة بواسطة مقياس الصلابة الرقمي تؤدي إلى الأضداد إلى تحسينات المقاومة في 28 يوما.

كلمات البحث: الخرسانة - مسحوق المطاط - السلوك الميكانيكي - صياغة - مقياس الصلابة.

TABLE DES MATIERES

<u>Remerciements.....</u>	<u>1</u>
<u>Dédicaces.....</u>	<u>2</u>
<u>Résumé.....</u>	<u>4</u>
<u>Abstract.....</u>	<u>5</u>
<u>ملخص.....</u>	<u>6</u>
<u>Liste des figures.....</u>	<u>11</u>
<u>Liste des tableaux.....</u>	<u>13</u>
<u>Introduction générale.....</u>	<u>15</u>

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BETONS

I. Introduction.....	19
II. Les constituants de base du béton.....	19
II.1. Le ciment.....	19
II.1.1. Définition d'un ciment selon la norme NA442.....	19
II.1.2. Classification normalisée des ciments.....	21
II.2. Les granulats.....	24
II.3. L'eau de gâchage.....	25
II.4. Les adjuvants.....	25
III. Différents recyclât.....	26
III.1. Laitier de haut fourneau.....	26
III.2. Sous-produits provenant des centrales thermiques.....	27
III.2.1. Mâchefer.....	27
III.2.2. Scories.....	27

III.2.3. Cendres volantes.....	28
III.3. Verre de récupération.....	28
III.4. Pneus usagés.....	28
III.5. Ciment durci.....	29
III.6. Résidus d'incinérateurs.....	29
III.7. Boues rouges.....	29
III.8. Les granulats recyclés.....	29
III.8.1. Granulats recyclés issus de déchets de démolition.....	29
III.8.2. Granulats de déchets de production de l'industrie du béton.....	30
III.8.3. Sables de fonderies.....	30
IV. Formulation.....	30
IV.1. Incorporation de granulats recyclés dans les bétons.....	31
IV.2. Influence de la granulométrie.....	32
IV.3. Influence de la forme des granulats.....	32
IV.4. Généralités sur la formulation des bétons.....	33
IV.5. Méthodes de formulations traditionnelles.....	33
V. Conclusions du premier chapitre.....	36
Références bibliographiques.....	38

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES CONSTITUANTS ET FORMULATION DES BETONS

PARTIE 1 : CARACTERISATION DES CONSTITUANTS

I. Introduction.....	42
II. Caractérisation des matériaux.....	42
II.1. Matériaux utilisés.....	42
II.2. Essais de caractérisation des constituants.....	43
II.2.1. Caractérisation des graviers utilisés.....	43
II.2.2. Essais de caractérisation du sable.....	48
II.2.3. Poudrette de caoutchouc.....	54
II.2.4. Eau de gâchage.....	58
II.2.5. Le ciment.....	58

PARTIE II : FORMULATION DES BETONS

I. Introduction.....	60
----------------------	----

I.1. Formulation du béton ordinaire.....	60
<i>I.1.1. Présentation de la Méthode de Dreux – Gorisse.....</i>	60
I.2. Formulation des bétons caoutchoutés.....	64
II. Préparation des bétons et conduite des essais.....	64
II.1. Malaxage et mise en place.....	64
II.2. Caractérisation des bétons à l'état frais.....	65
<i>II.2.1. Mesure de la température de coulage.....</i>	65
<i>II.2.2. Mesure de l'affaissement au cône d'Abram's.....</i>	66
<i>II.2.3. Mesure de la densité des bétons à l'état frais.....</i>	67
III. Conclusions du deuxième chapitre.....	69
Références bibliographiques.....	70

CHAPITRE III : CARACTERISATION MECANIQUE DES BETONS

I. Introduction.....	72
I.1. Propriétés étudiées.....	72
I.2. Conduite des essais.....	73
I.3. Cure et conservation des éprouvettes.....	73
II. Résultats des essais.....	73
II.1. Mesure de la masse volumique des bétons à l'état durci.....	73
II.2. Résistance à la compression simple.....	75
<i>II.2.1. Principe de l'essai.....</i>	75
<i>II.2.2. Expression des résultats.....</i>	75
<i>II.2.3. Résistances en compression à 28 jours.....</i>	75
<i>II.2.4. Influence de l'âge du béton sur sa résistance à la compression.....</i>	77
II.3. Résistance à la traction par flexion.....	79
<i>II.3.1. L'essai de flexion 3 points.....</i>	79
<i>II.3.2. Résistances des bétons en tractions par flexion à 28 jours.....</i>	79
<i>II.3.3. Relation entre résistance en compression et en traction.....</i>	81
II.4. Résistance au fendage (ou essai brésilien).....	81
<i>II.4.1. Résistances des bétons au fendage à 28 jours.....</i>	82
<i>II.4.2. Influence de l'âge du béton sur sa résistance au fendage.....</i>	84
II.5. Détermination des résistances par un essai non destructif.....	85
<i>II.5.1. Principe du scléromètre.....</i>	85
<i>II.5.2. Résistances en compression des bétons à 28 jours.....</i>	86

II.5.3 Etude comparative entre résistances réelles et résistances sclérométriques.....	87
III. Conclusion du troisième chapitre.....	88
Références bibliographiques.....	89
<u>Conclusions générale.....</u>	<u>90</u>
<u>Annexe.....</u>	<u>92</u>

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Photos de quelques granulats locaux.....	25
Figure I.2 : Courbe granulaire optimale d'un béton selon Bolomey.....	34
Figure I.3 : Exemple de courbe de référence optimale selon Dreux.....	36
Figure II.1 : Procédé utilisé pour la mesure de la masse volumique apparente des graviers.....	44
Figure II.2 : Mesure de la masse volumique absolue des graviers.....	44
Figure II.3 : Détermination de la teneur en eau des graviers.....	45
Figure II.4 : Mesure de la propreté des graviers.....	46
Figure II.5 : Analyse granulométrique des graviers.....	46
Figure II.6 : Courbes granulométriques des deux graviers utilisés.....	47
Figure II.7 : Mesure de la masse volumique apparente du sable.....	48
Figure II.8 : Mesure de la masse volumique absolue du sable.....	49
Figure II.9 : Mesure de la compacité du sable.....	50
Figure II.10 : Détermination de la teneur en eau par étuvage.....	50
Figure II.11 : Courbe granulométrique du sable.....	51
Figure II.12 : Mesure de la propreté du sable (ES).....	52
Figure II.13 : Coupe transversale d'un pneu Michelin.....	55
Figure II.14 : Fuseau granulaire de la poudre de caoutchouc.....	58
Figure II.15 : Courbes de référence du béton selon la méthode Dreux-Gorisse.....	61
Figure II.16 : Photo de la bétonnière utilisée.....	65
Figure II.17 : Thermomètre digital utilisé pour la mesure de la température.....	65
Figure II.18 : Photos du cône d'Abram's.....	66
Figure II.19 : Photos des affaissements au cône des quatre bétons étudiés.....	66
Figure II.20 : Affaissement au cône d'Abram's des quatre bétons confectionnés.....	67
Figure II.21 : Mesure de la densité des bétons à l'état frais.....	68

Figure II.22 : Masses volumiques des bétons à l'état frais.....	68
Figure III.1 : Corps d'épreuves utilisés.....	73
Figure III.2 : Mesure de la masse volumique des bétons à l'état durci.....	73
Figure III.3 : Masses volumiques des bétons à l'état durci.....	74
Figure III.4 : Essais d'écrasement en compression simple.....	75
Figure III.5 : Résistances en compression à 28 jours des bétons étudiés.....	76
Figure III.6 : Faciès des surfaces de rupture en compression.....	77
Figure III.7 : Evolution de la résistance à la compression des bétons étudiés dans le temps.....	78
Figure III.8 : Essai de flexion 3 points sur éprouvette prismatique (8.8.30) cm ³	79
Figure III.9 : Résistance en traction par flexion à 28 jours.....	80
Figure III.10 : Processus de rupture des éprouvettes en traction par flexion.....	80
Figure III.11 : Essai brésilien.....	81
Figure III.12 : Résistances par fendage à 28 jours des bétons étudiés.....	82
Figure III.13 : Faciées de rupture des éprouvettes sous fendage.....	83
Figure III.14 : Evolution de la résistance à la traction par fendage dans le temps.....	84
Figure III.15 : Photo du scléromètre utilisé.....	85
Figure III.16 : Conduite d'un essai sclérométrique sur éprouvette (16.32) cm ²	86
Figure III.17 : Résistances en compression par scléromètre à 28 jours des bétons étudiés.....	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Phases minéralogiques du ciment.....	21
Tableau I.2 : Exigences mécaniques garanties des ciments selon la norme NA442.....	23
Tableau II.1 : Analyse granulométrique du gravillon 3/8.....	46
Tableau II.2 : Analyse granulométrique du gravier 5/15.....	47
Tableau II.3 : Récapitulatif des résultats des essais sur les graviers.....	47
Tableau II.4 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable.....	51
Tableau II.5 : Résultat de l'équivalent de sable.....	53
Tableau II.6 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.....	53
Tableau II.7 : Résultats des essais sur le sable.....	53
Tableau II.8 : Analyse granulométrique de la poudrette de caoutchouc.....	57
Tableau II.9 : Composition chimique moyenne du ciment CPJ-CEM II/A utilisé.....	59
Tableau II.10 : Caractéristiques physiques du ciment.....	59
Tableau II.11 : Formulation du béton ordinaire.....	63
Tableau II.12 : Compositions des bétons caoutchoutés.....	64
Tableau II.13 : Température ambiante lors du coulage des bétons.....	65
Tableau II.14 : Récapitulatif des résultats des essais d'affaissement au cône.....	67
Tableau II.15 : Densité des bétons à l'état frais.....	68
Tableau II.16 : Formulations retenues des différents bétons.....	69
Tableau III.1 : Désignations et notations des bétons retenus.....	72
Tableau III.2 : Compositions des bétons étudiés pour 1m ³	72
Tableau III.3 : Masses volumiques des bétons à l'état durci.....	74
Tableau III.4 : Résistances en compression sur cylindre à 28 jours des bétons étudiés.....	76
Tableau III.5 : Evolution des résistances en compression dans le temps des bétons étudiés.....	77
Tableau III.6 : Comparaison entre résistances à la compression réelles et règlementaires.....	78

Tableau III.7 : Résistances à la traction par flexion, exprimées en MPa.....	80
Tableau III.8 : Comparaison entre résistances à la traction réelles et règlementaires.....	81
Tableau III.9 : Résistance à la traction par fendage, exprimées en MPa.....	82
Tableau III.10 : Evolution des résistances au fendage dans le temps des bétons étudiés.....	84
Tableau III.11 : Résistance en compression à 28 jours des bétons étudiés.....	86
Tableau III.12 : Résistances à 28 jours déduites à partir d'essai destructif et non destructif.....	87

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau de construction élaboré à partir de granulats, de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants pour modifier certaines de ses propriétés. Actuellement, il est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics à cause de ses nombreux avantages dont notamment sa bonne résistance à la compression, son faible coût de revient, sa durable avérée, sa capacité de façonné pratiquement toutes les formes imaginables. Pour améliorer sa résistance à la compression, des chercheurs ont, successivement mis au point des nouveaux types de bétons comme les bétons à hautes performances (BHP) (résistance en compression comprise entre 50 et 100MPa), les bétons à très hautes performances (BTHP) (résistance comprise entre 100 et 150MPa) et les bétons à poudres réactives (BRP). De même dans le but d'améliorer sa maniabilité des chercheurs de l'université de Tokyo dans les années 1980 ont mis au point des bétons très fluides qui peuvent être mis en oeuvre sans aucune vibration. Il s'agit des bétons autoplaçants (BAP).

Cette pression extrême sur la ressource "béton" génère une exploitation intensive des carrières de granulats (généralement concassées à partir de roches) qui a entraîné à la longue un épuisement de cette ressource naturelle et des problèmes environnementaux (destruction de la faune et flore, pollution de la nappe souterraine, etc.) dans tous les pays y compris l'Algérie. Pour y remédier le gouvernement Algérien a durci les conditions d'ouverture de nouvelles carrières et a voté des lois de plus en plus drastiques pour la protection de l'environnement. Celles-ci imposent de chercher une nouvelle source d'approvisionnement en granulats. Pour éviter aussi la création de décharge sauvage de déchets de l'industrie du béton, ses derniers et les déchets non biodégradables sont sollicités pour cette nouvelle source.

Ces dernières années, ces déchets ont fait l'objet de multitudes travaux de recherches afin de les recycler. Ainsi on a par exemple étudié la possibilité d'utiliser le caoutchouc comme granulat dans le béton ([1]; [2]). Certains travaux ont montré l'intérêt de l'association ciment/caoutchouc dans l'élaboration de composites cimentaires à haute déformabilité ([3]; [4]; [5]). D'autres travaux sur la durabilité de ces composites en conditions climatiques sévères, notamment les cycles de gel/dégel ont montré également l'intérêt du caoutchouc ([6]). Cette approche qui consiste à valoriser au maximum les sous-produits industriels et autres déchets participe au processus de développement durable, et fait l'objet des thématiques de recherche en cours de développement dans de nombreux laboratoires.

C'est dans ce contexte de développement durable que s'inscrit mon travail de fin d'études. Il traite de la faisabilité de substituer une partie des granulats par de la poudrette de caoutchouc (qui est

issue de l'industrie du recyclage des pneus usagés) pour élaborer des bétons pour structures. Le travail expérimental portera notamment sur l'étude comportement rhéologique (à l'état frais) et mécanique (état durci) de trois compositions de bétons dans lesquels une partie du sable a été remplacé par des granulats de caoutchouc récupérés auprès d'une entreprise spécialisée dans le recyclage.

Références bibliographiques

- [1] **Sérifou Mamery**. Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1 ; Décembre 2013.
- [2] **Benazzouk A., Douzane O. and Quéneudec M (2004)**. Transport of fluids in cement–rubber composites. *Cement & Concrete Composites* 26, 21–29. Cité dans (Ho, 2010).
- [3] **Eldin N.N., Senouci A.B (1993)**. "Rubber tire particles as concrete aggregate". *Journal of Materiel in civil Engineering*, vol.5, No4, p.478-496.
- [4] **Topçu I.B (1995)**. The properties of rubberised concretes, *Cem. Concr. Res.* 25 (2) 304–310.
Cité dans (Bignozzi et Sandrolini, 2006).
- [5] **Benazzouk A., Mezreb K., Doyen G., Goullieur A., Queneudec M. (2003)**. "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, p.711-720.
- [6] **Benazzouk A., Queneudec M (2002)**. "Durability of cement-rubber composites under freeze thaw cycles". *Proceeding of International congress of sustainable concrete construction, Dundee-Scotland*, p.355-362.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BETONS

I. Introduction

Le béton est un matériau artificiel obtenu par un mélange d'un liant (généralement du ciment), d'eau, de granulats (sable et graviers), et éventuellement d'adjuvant, le tout choisi de façon rationnelle.

Les granulats ou agrégats, qui suivant leurs dimensions, se classent en fillers, sable, gravillons et pierres, composent l'ossature du béton et jouent un rôle de remplissage. La pâte de ciment qui se forme après le gâchage à l'eau du mélange enrobe les grains de sable et de graviers, remplit les espaces entre eux et joue le rôle de lubrifiant des agrégats en communiquant au béton une certaine plasticité, nécessaire pour une mise en œuvre correcte. La pâte de ciment en durcissant, fixe les grains des granulats et donne au béton des propriétés intéressantes, notamment une bonne résistance à la compression.

Bien qu'il soit impossible de prédire avec exactitude les performances d'un béton, cependant, de nombreuses études effectuées ont permis de cerner et de quantifier le rôle des différents paramètres influents et il est possible aujourd'hui, moyennant un minimum d'études, d'obtenir des bétons de hautes qualités.

De nos jours, et grâce à ses nombreuses qualités parmi lesquels on peut citer, une bonne résistance à la compression, une bonne isolation phonique et thermique, un coût relativement bas, le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde, et cette tendance mondiale est largement vérifiée en Algérie où le béton reste le matériau de construction par excellence.

II. Les constituants de base du béton

II.1. Le ciment

II.1.1 Définition d'un ciment selon la norme NA442 [1]

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment conforme à la norme **NA442/2013 [1]**, appelé ciment CEM, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance prescrits et aussi présenter une stabilité de volume à long terme. Le durcissement hydraulique du ciment CEM est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, tel que, par exemple, les aluminates.

Dans les ciments CEM, la somme des quantités relatives d'oxyde de calcium (CaO) et de dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit représenter une proportion au moins égale à 50% en masse, lorsqu'elles sont déterminées selon la norme **NA5042 [2]**. Les ciments CEM sont constitués de différents matériaux et sont de composition statistiquement homogène du fait d'une assurance qualité couvrant les processus de production et de manutention. Les ciments à faible chaleur d'hydratation «LH» (**NA 442/2013 [1]**). La chaleur d'hydratation du ciment, exprimée en Joule [J] par gramme de ciment est la quantité de chaleur dégagée par son hydratation. En effet, les réactions d'hydratation des ciments sont des réactions exothermiques.

Dans les constructions massives, l'utilisation de ciments à faible chaleur d'hydratation réduit fortement l'échauffement de la masse de béton lors du durcissement et constitue par conséquent une précaution utile pour diminuer le retrait thermique ultérieur et le risque de fissuration engendré par ce retrait. Les ciments LH sont donc à prescrire pour les ouvrages de masse, généralement à partir de plus de 50cm d'épaisseur. Les ciments courants à faible chaleur d'hydratation sont des ciments dont la chaleur d'hydratation ne dépasse pas la valeur caractéristique de 270J/g. Ils sont identifiés par la notation LH.

Exigences de durabilité : dans de nombreuses applications, et notamment dans des conditions environnementales sévères, le choix du ciment a une influence sur la durabilité du béton, du mortier et des coulis, par exemple vis-à-vis de la résistance au gel, de la résistance à l'action de substances chimiques, et vis-à-vis de la protection des armatures. Les alcalins contenus dans le ciment ou dans d'autres constituants du béton peuvent provoquer des réactions chimiques avec certains granulats. Les exigences pertinentes sont données dans la norme **NA16002 [3]**.

Le choix du ciment à partir de la présente norme, en particulier le choix du type et de la classe de résistance, en fonction de l'utilisation et de la classe d'exposition, doit être effectué en appliquant les normes et/ou règlements relatifs au béton ou au mortier, en vigueur sur le lieu d'utilisation.

Des ciments courants à faible résistance à court terme auront une résistance à court terme plus faible que celle d'un autre ciment courant appartenant à la même classe de résistance courante et pourront nécessiter des précautions supplémentaires durant leur utilisation, telles que l'extension des temps de décoffrage et la protection contre les intempéries.

Les principaux composés du ciment portland sont exposés dans le tableau I.1 [4].

Tableau 1.I : Phases minéralogiques du ciment [4].

Phases minéralogiques		Notation simplifiée	(%)
Silicate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	50 à 75
Silicate bicalcique	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	10 à 30
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	2 à 15
Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 à 15

Les silicates de calcium (C_3S) et (C_2S) représentent environ 75% de la masse du ciment. Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par sa granulométrie et sa finesse de mouture. Cette finesse de mouture appelée aussi surface spécifique de Blaine.

II.1.2. Classification normalisée des ciments :

La classification des ciments est faite de deux manières : soit d'après leur composition chimique, soit d'après leur classe de résistance.

a- Classification suivant la composition :

Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme Algérienne **NA442 [1]** donne la classification suivante :

1. CEM I Ciment Portland Artificiel (CPA) ;
2. CEM II Ciment Portland Composé (CPJ) ;
3. CEM III Ciment de Haut Fourneau (CHF) ;
4. CEM IV Ciment Pouzzolanique ;
5. CEM V Ciment aux Laitiers et aux Cendres.

Ces ciments diffèrent par le type d'ajout et sa teneur, incorporé dans le but de modifier certaines de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques auquel ces ciments sont destinés. Les différents types d'ajouts normalisés sont :

Laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable. Selon les normes en

vigueur, le rapport massique $\left\{ \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{d\text{SiO}_2} \right\}$ doit être supérieur à 1.

Matériaux pouzzolaniques :

Ce sont des substances naturelles ou artificielles siliceuses ou silicoalumineuses, ou une combinaison de celles-ci contenant de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes mais la teneur en SiO_2 réactif doit être au moins égale à 25% en masse. Lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ dissous. On distingue :

- la pouzzolane naturelle (notée P) : matériau d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires ;
- la pouzzolane naturelle calcinée (notée Q) : matériau d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires, activés thermiquement.

Cendres volantes (V, W) :

Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. On distingue deux familles de cendres volantes :

- cendres volantes siliceuses (notée V) : ce sont principalement des particules sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont constituées essentiellement de silice (SiO_2) réactive et d'alumine (Al_2O_3) d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants. La teneur en oxyde de calcium (CaO) doit être inférieure à 10% en masse, la teneur en silice (SiO_2) réactive doit être supérieure à 25% en masse.
- cendres volantes calciques (notée W) : elles présentent des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques, contenant une teneur en oxyde de calcium (CaO) réactif supérieure à 10% en masse, le reste étant de la silice (SiO_2) réactive, d'alumine (Al_2O_3) , d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants.

Schiste calciné :

Il est produit dans un four spécial à une température avoisinant les 800°C , composé de silicate bicalcique et d'aluminate monocalcique, ainsi que de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques.

Filler calcaire (L, LL) :

C'est un matériau très finement broyé. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers, tout en présentant une certaine activité physico-chimique en favorisant l'hydratation des silicates tricalciques. Les fillers calcaires utilisés comme ajouts doivent contenir :

- la teneur en calcaire (CaCO_3) $\leq 75\%$ en masse ;

- la teneur en argile $\leq 1,20\text{g}/100\text{g}$;
- la teneur totale en carbone organique (TOC) $<0,2\%$ en masse pour le (LL) et $<0,50\%$ pour le (L).

Fumée de silice :

Elle provient de la réduction du quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique. Elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85% en masse en silice amorphe. Poudre d'une extrême finesse (de 15000 à 25000m²/kg), ce qui lui donne la capacité de se placer dans les interstices des grains de ciments en diminuant la demande en eau du mélange (effet filler). Son dosage est cependant limité à 10% de la masse du ciment pour protéger les armatures dans le béton (problème de PH).

b). Classification des ciments suivant les résistances à la compression :

La norme **NA442** [1] classe les ciments courant d'après leur résistance à la compression déterminée conformément à la norme **NA234** [5], mesurée à 28 jours, en six classes de résistance (tableau I.2).

Tableau I.2 : Exigences mécaniques garanties des ciments selon la norme NA442 [1].

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2jours	7jours	28jours	
32,5	-	-	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 13,5$	-		
42,5	$\geq 12,5$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	≥ 20	-		
52,5	≥ 20	-	$\geq 52,5$	-
52,5 R	≥ 30	-		

c). Classification des ciments suivant le type d'environnement :

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux, tels que :

Ciment PM : Résistant à l'eau de mer, c'est un ciment courant possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminates tricalciques) qui lui donne une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

Ciment ES : Résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

Ciments CP : Pour béton précontraint, on distingue deux types de ciments qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure SO_4^{2-} :

- ciments de la classe CP2 contenant moins de 0,2% d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par pré-tension,
- ciments de la classe CP1 contenant moins de 0,7% d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par post-tension.

Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques). C'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

II.2. Les granulats

C'est l'ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 et 125mm. Les granulats peuvent être d'origine naturelle (sables et graviers de mer et de rivières), artificiels (argile expansée) ou issue du recyclage de déchets de l'industrie (laitier de haut fourneaux). Ils constituent l'ossature du béton et occupent 70 à 80% environ du volume d'un béton. Ils sont en principe inertes mais peuvent, dans certains cas, favoriser certaines réactions d'hydratation de certains minéraux du clinker c'est l'exemple des silicates tricalciques C_3S en présence de filler d'origine calcaire.

Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût économique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange (*ciment/eau*). En effet, la nature, la quantité, la forme, la granulométrie, la propreté, l'état de surface et le type de granulats sont des facteurs ayant une influence sur les caractéristiques du béton, aussi bien à l'état durci qu'à l'état frais.

Les principales divisions granulométriques des granulats données par la norme **NA452 [6]** sont les suivantes :

- fillers 0/D où $D < 2\text{mm}$ avec au moins 70% de passant à 0,063mm ;
- sablons 0/D où $D \leq 1\text{mm}$ avec moins de 70% de passant à 0,063mm ;
- sables 0/D où $1 < D \leq 6,3\text{mm}$;
- graves 0/D où $D > 6,3\text{mm}$;
- gravillons d/D où $d \geq 1$ et $D \leq 125\text{mm}$;
- ballasts d/D où $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$.

Les photos suivantes présentent quelques échantillons de granulats locaux [7].



Figure I.1 : Photos de quelques granulats locaux.

II.3. L'eau de gâchage

L'eau est un ingrédient essentiel du béton. Il joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc. L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences aux normes en vigueur. Les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, les eaux d'origine souterraine, les eaux de rejet industriel, l'eau de mer et les eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire (essais chimiques, physiques, etc.). L'eau de gâchage doit répondre aux prescriptions de la norme [8].

II.4. Les adjuvants

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés généralement en faible quantité (moins de 5% de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution), avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci.

Les adjuvants sont classés par la norme algérienne **NA774** [9] suivant leurs actions principales, même s'ils ont plusieurs actions secondaires en :

- Plastifiant/réducteur d'eau ;
- Superplastifiant réducteur d'eau ;

- Rétenteur d'eau ;
- Entraîneur d'air ;
- Accélérateur de prise ;
- Accélérateur de durcissement ;
- Retardateur de prise ;
- Hydrofuge de masse ;
- Plastifiant/réducteur d'eau / retardateur de prise ;
- Superplastifiant / haut réducteur d'eau/retardateur de prise ;
- Plastifiant / réducteur d'eau / accélérateur de prise.

Il existe aussi d'autres adjuvants comme : les raidisseurs pour béton projeté, les adjuvants pour coulis d'injection, les adjuvants pour mortier stabilisé, les colorants, les inhibiteurs de corrosion, etc.

III. Différents recyclât

Le matériau béton était élaboré initialement élaboré à partir de ciment, de gravier, de sable et d'eau. Par la suite et devant le développement industriel qui s'est accompagné par une disponibilité d'une multitude de sous-produits souvent polluants, les constituants du béton ont été augmentés. Actuellement la tendance mondiale est la recherche à recycler le maximum de sous-produits industriels ou de déchets dans l'élaboration de bétons. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter en revue les différents recyclât recensés et utilisés dans le domaine de la construction et plus particulièrement celui du béton.

III.1. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air libre et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom «laitier expansé». Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant [10]. Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable.

La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.

III.2. Sous-produits provenant des centrales thermiques

La combustion du charbon aux fins de la production d'électricité donne plusieurs sous-produits [10]. Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de houille sont désignés sous le nom de «mâchefer». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Les particules sont appelées «cendres volantes». Certaines particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four. Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon.

III.2.1. Mâchefer

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Etant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé.

A la sortie du four d'incinération les mâchefers sont généralement humides et contiennent des éléments grossiers (exemples : verre, ferrailles, gros imbrûlés). Ils sont classés en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques en 3 catégories :

1. Mâchefers de catégorie «V» à faible fraction lixiviable (fraction d'éléments solubles dans un solvant),
2. Mâchefers intermédiaires de catégorie «M»,
3. Mâchefers avec forte fraction lixiviable de catégorie «S».

III.2.2. Scories

Ces résidus constituent environ 2,5% de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers pour la fabrication de blocs de béton [10]. Les quatre catégories des scories [11] désignées selon leur procédé de fabrication sont : les scories FOP (Four à Oxygène Pur), les scories FAE (Four à Arc Electrique), les scories HF (Haut Fourneau) et les scories FP (Four Proche).

III.2.3. Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granulats légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées [10]. Elles sont issues de la combustion du charbon pulvérisé et poussé dans la chambre de combustion d'un four par des gaz d'échappement. Et sont préférables à beaucoup d'autres granulats légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace, du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage. Les cendres volantes sont classifiées selon leurs teneurs en C_aO et du type du charbon brûlé.

III.3. Verre de récupération

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier [12]. Il est utilisé sous deux formes principalement : les granulats (taille > 4mm) et les poudres (taille < 4mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des graviers dans les bétons et lui procurent une résistance moindre. Les poudres (sables et fines) sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment pour fines. Ces différents points seront détaillés plus loin puisque un des recyclats utilisés dans l'étude est un recyclat de verre.

III.4. Pneus usagers

Les matériaux cimentaires ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sensibles à la fissuration, notamment la fissuration due au retrait. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macro-fissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait. Néanmoins, la résistance en compression est très faible ce qui limite aussi les applications. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité [13].

Ce déchet issu de la récupération des pneus usagés constituera l'objet de notre partie expérimentale.

II.5. Le ciment durci

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau, la poudre se cristallise. Cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions sont rapides et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulats de béton [14]. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production.

Une cimenterie est très énergivore et productrice de gaz à effet de serre très néfaste pour l'environnement. Il est donc très important de ne pas gaspiller ce produit.

III.6. Résidus d'incinérateurs

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides. Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment. La présence de verre entraîne aussi la dilatation des granulats alcalins [10].

III.7. Boues rouges

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite (procédé de Bayer). Ces résidus selon [15] ont un PH supérieur à 12 et sont produits à un taux de 2 tonnes/tonne d'aluminium commercialisé [16].

III.8. Les granulats recyclés

III.8.1. Granulats recyclés issus de déchets de démolition

Le béton constitue en moyenne 75%, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. Par ailleurs, les sinistres fournissent des millions de tonnes de débris de béton.

Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature [17] :

- 1) Les bétons armés sans enduit ni plâtre.
- 2) Les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs Rocheux, etc.
- 3) Les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.

- 4) Les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10%.
- 5) Les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.

III.8.2. Granulats de déchets de production de l'industrie du béton

Les granulats de déchets de production ont deux origines :

- Les débris de béton générés tout au long des étapes de la production ; ils résultent du nettoyage des installations de fabrication et du transport du béton frais (chutes de béton), il peut également s'agir de béton provenant de gâchées non utilisées ou non utilisables, ce type de déchets est produit en quantité variant de 0,2 à 1% de la masse de béton produite selon les secteurs concernés [18].
- Les produits défectueux, mal formés, partiellement cassés ou d'aspect non conforme ; à ces produits défectueux s'ajoutent les produits ayant fait l'objet d'essais de résistance à la rupture, ce type de déchets est produit en quantité variant de 0,2 à 3% selon les secteurs et selon les conditions imposées par tri [18].

Lorsqu'ils ne sont pas mélangés avec d'autres déchets (emballages, chiffon, etc.), ces morceaux et débris de béton durcis et propres sont considérés comme des déchets inertes. Ils sont le plus souvent acceptés gratuitement par des entreprises de travaux publics pour constituer des remblais ou par des entreprises de traitement de déchets de chantier. Toutefois, pour certains secteurs de l'industrie du béton (planchers, ossatures, murs, assainissement), les produits défectueux fortement armés ou précontraints et volumineux posent des problèmes d'enlèvement.

III.8.3. Sables de fonderies

Les sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Dans le procédé de moulage de pièces métalliques, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques (exemple : résines phénoliques). Ce sable peut être recyclé mais le nombre réutilisations de celui-ci est limité [19].

Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge. Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques.

IV. Formulation :

Le béton est un mélange de constituants de base dont on dissocie :

- **La partie liante du béton (solide) :** Elle assure la fonction liante grâce à laquelle le béton passe d'un état initial de fluide moulable à un état final de solide mécaniquement résistant.

Elle se compose de ciment, d'eau et éventuellement d'additions minérales (filler calcaire, filler siliceux, laitier de haut fourneau, fumée de silice, cendres volantes, métakaolin, etc.).

- **Le squelette (solide) :** Cette phase constituée de granulats, généralement inertes, occupe la majorité du volume. Elle participe aux propriétés générales du matériau à l'état frais et durci.
- **La partie liquide :** Elle englobe l'eau et l'adjuvant. L'eau entre dans la réaction chimique avec le liant pour former les hydrates, mais est toujours largement excédentaire par rapport aux besoins de l'hydratation du ciment afin d'assurer une certaine rhéologie à l'état frais. Ces excédents introduisent une porosité résiduelle dans le matériau qui dégrade l'ensemble des propriétés (durabilité, résistance, etc.). Les adjuvants améliorent les caractéristiques du matériau à l'état frais ou à l'état durci. Selon (**norme sur les adjuvants [9]**), un adjuvant est incorporé lors du malaxage du béton à un dosage inférieur à 5% des éléments fins. Il existe 11 familles d'adjuvants (entraîneur d'air, superplastifiant, retardateur de prise, etc.).
- **L'air (gazeux) :** Le béton renferme toujours une certaine quantité d'air, appelé air occlus, car des bulles d'air sont piégées lors du malaxage. Cette quantité d'air, qui varie de 1 à 2,5% en absence de produit entraîneur d'air et peut atteindre 4 à 8% en présence d'entraîneur d'air, influe sur les performances mécaniques du matériau durci [20].

La composition d'un béton consiste dans la détermination des diverses quantités de granulats (sable, gravier, cailloux), de ciment et d'eau qu'il est nécessaire de mettre en présence pour obtenir un mètre cube de béton.

Deux critères essentiels doivent guider cette étude : la résistance à obtenir et l'ouvrabilité c'est-à-dire la facilité de mise en œuvre. Ces critères sont fonction de la nature de l'ouvrage ou des parties des ouvrages à réaliser.

De nombreuses méthodes existent pour composer un béton à partir des granulats dont on dispose [21], néanmoins aucune d'entre elles n'aboutit à coup sûr à une formulation exacte directement applicable aux chantiers. Ceci est dû à ce que les paramètres influant sur la composition d'un béton sont très nombreux et difficilement appréciables. Particulièrement en ce qui concerne la détermination de la quantité d'eau de gâchage, où l'on devrait tenir compte :

- En ce qui concerne le ciment : la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation, le dosage, la finesse de mouture des grains ;
- En ce qui concerne le béton lui-même, la plasticité désirée.

IV.1. Incorporation de granulats recyclés dans les bétons

Les granulats recyclés sont incorporés dans la formulation de béton en remplacement des granulats naturels dans des proportions variant de 0 à 100%. Des bétons témoins sont toujours

fabriqués pour établir un point de comparaison.

Ainsi, les approches pour formuler un béton sont nombreuses, chacun fixant les paramètres utiles pour comparer et observer l'effet des granulats recyclés sur le comportement physique des bétons. Certains choisissent de travailler à ouvrabilité constante ([22], [2]) tandis que d'autres auteurs s'intéressent aux temps de malaxage, au degré d'humidité des granulats recyclés et à la quantité d'eau globale et effective à mettre en œuvre ([24], [25]). Pour certaines études le remplacement est massique ou volumique sans modifier les autres paramètres de composition (quantité de ciment, rapport E/C, etc.) ([26]). Enfin, certains chercheurs travaillent avec une méthode de mortier équivalent. Dans cette méthode, on considère que la matrice cimentaire présente dans les granulats recyclés rentre en ligne de compte dans la matrice cimentaire du nouveau béton ([27]).

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires. Cependant, une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton qui respecte le cahier des charges.

IV.2. Influence de la granulométrie

La dimension d'un élément granulaire est donnée par l'ouverture de la maille carrée d'un tamis, exprimée en millimètres, à travers laquelle il passe facilement. La granulométrie est caractérisée par la distribution dimensionnelle des éléments. Elle est déterminée par l'analyse granulométrique par tamisage dans laquelle on détermine la quantité de matériaux utilisés entre chacun des tamis d'une série.

Des études expérimentales ont montré que la granulométrie et la taille maximale des granulats influent sur les proportions relatives des granulats, les quantités de liant et d'eau nécessaires, la maniabilité, la pompabilité, la porosité, le retrait et la durabilité du béton. Toute variation de granulométrie influence sérieusement l'uniformité du béton d'une gâchée à l'autre. Les sables très fins sont souvent peu économiques, tandis que les sables et granulats très grossiers peuvent produire des mélanges raides et peu maniables. Selon ([28]), les granulats ne souffrant ni d'une grande carence ni d'un excès de particules de diamètre donné et présentant une courbe granulométrique régulière donnent les meilleurs résultats. La variété dans la dimension des particules contribue à réduire le volume total des vides entre les granulats.

IV.3. Influence de la forme des granulats

Les résultats d'une étude expérimentale ([29]) ont montré qu'un granulats comportant une forte

proportion de particules plates et allongées se compacte difficilement et possède un indice des vides inter-granulaires plus élevé qu'un granulats similaire constitué de particules plus arrondies. L'indice des vides du mélange granulaire est un paramètre important de formulation d'un béton car il influence plusieurs de ses propriétés dont notamment sa compacité, sa maniabilité et ses propriétés mécaniques. Il faut donc porter une attention particulière aux caractéristiques du mélange granulaire, car un mélange ayant un indice des vides élevé donnera un béton moins économique, moins maniable ou nécessitant une plus grande quantité de matières cimentaires pour satisfaire les exigences de performance (maniabilité, propriétés mécaniques, perméabilité, durabilité).

En général, les granulats les plus désirables pour le béton sont ceux qui présentent des proportions élevées en particules cubiques (augmentation de la compacité du squelette granulaire) et rugueuses (augmentation de l'adhérence pâte-granulat).

IV.4. Généralités sur la formulation des bétons

La diversité des bétons actuels (Béton autoplaçant "BAP", Béton haute performance "BHP", Béton ultra haute performance BUHP, bétons avec granulats de caoutchouc, bétons fibrés, etc.), aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation unique. Généralement, la base de la formulation est orientée par les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées. Il faut donc raisonner par catégorie de béton même si certains principes peuvent être retenus.

Plusieurs méthodes ont été développées. Même s'il reste beaucoup d'empirisme, toutes reposent sur les mêmes principes de compacité optimale. Mais au préalable, il est nécessaire de faire un historique des différentes méthodes de formulation afin de comprendre les procédés actuels.

IV.5. Méthodes de formulations traditionnelles

Historiquement, les principes régissant les concepts de formulation commencent à se rationaliser à la fin du XIX^{ème} siècle ([20]). En 1892, Féret auquel on attribue les premières recherches, travaille sur un principe de compacité optimale.

Initialement, une compacité est déterminée sur un mélange ternaire de sables puis une matrice cimentaire y est insérée. Cette méthode donne un mortier avec une granularité discontinue sans obtenir le matériau le plus compact à l'état durci. Au travers de l'équation I-1, Féret relie une résistance en compression aux proportions volumiques et notamment en utilisant le rapport volumique E/C.

$$f_c = k_{Féret} \left(\frac{1}{1+(e+V)/c} \right) \quad [\text{Eq.I-1}]$$

Où $k_{Féret}$ coefficient de Féret relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier. En 1907, Fuller et Thompson ([30]) basent aussi leur méthode sur une compacité maximale mais sur un mélange à granulométrie continue. L'aspect novateur de la méthode se situe dans la prise en compte du ciment mais aussi des dimensions extrêmes des grains d (plus petite dimension) et D (plus grande dimension) (équation I.2). En revanche, la forme des grains n'intervient pas dans la méthode.

$$P_{Fuller\ Thompson} = 100 \times \sqrt[5]{\frac{d}{D}} \quad [\text{Eq.I-2}]$$

Où $P_{Fuller\ Thompson}$ porosité du mélange granulaire selon Fuller Thompson.

En 1918, Abrams ([31]) définit empiriquement une méthode dans laquelle le dosage en ciment et la dimension maximale des granulats sont les paramètres prépondérants (équation I-3) et fait intervenir au travers de K_{Abrams} ($K_{Féret}$ amélioré) la nature et la forme des granulats.

$$f_c = K_{Abrams} \frac{1}{7,5 \left(1,5^{\frac{E}{C}}\right)} \quad [\text{Eq.I-3}]$$

Où $f_c = K_{Abrams}$ coefficient d'Abrams relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier.

En 1925, Bolomey ([32]) propose une courbe granulaire continue de référence incluant le ciment (équation I-4).

$$P_{Bolomey} = A_{Bolomey} + (100 - A_{Bolomey}) \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad [\text{Eq.I-4}]$$

Où $P_{Bolomey}$ porosité du mélange granulaire selon Bolomey.

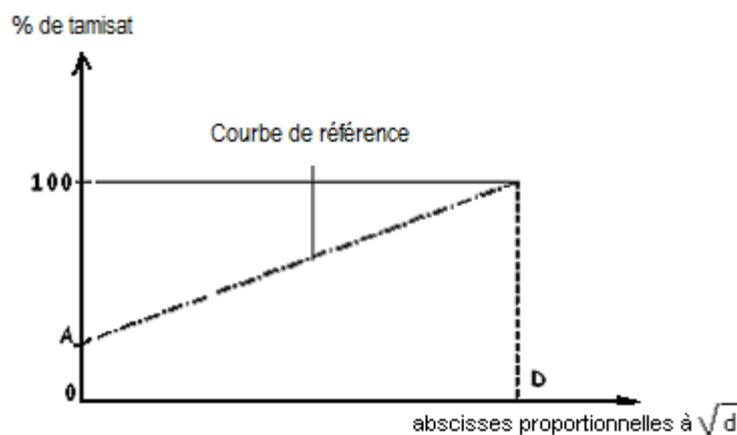


Figure I.2 : Courbe granulaire optimale d'un béton selon Bolomey [21].

La différence avec l'équation de Fuller et Thompson, intervient au travers de $A_{Bolomey}$ qui dépend de la forme des granulats ainsi que de la consistance du béton. La résistance en compression par Bolomey établie selon l'équation I-5, est une variante de la loi de Féret.

$$f_c = K_{Bolomey} \left(\frac{C}{E+V} - 0,5 \right) \quad \text{[Eq.I-5]}$$

Où $K_{Bolomey}$ coefficient de Bolomey relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier.

En 1937, Caquot ([33]) généralise sa recherche de compacité maximale à un nombre infini de classes granulaires à partir de la courbe de l'indice des vides d'un mélange de deux granulats de tailles différentes. Il définit expérimentalement une relation en prenant comme principe que le volume des vides dépend essentiellement des diamètres d et D (équation I-6). Il obtient donc une granulométrie infinie. Mais, en réalité, les dimensions des grains sont bornées ce qui entraîne une correction sur la proportion des plus petits et des plus gros granulats. De plus, il introduit l'effet de paroi engendré par les granulats de grosses dimensions.

$$V = V_0 \sqrt[5]{\frac{d}{D}} \quad \text{[Eq.I-6]}$$

Où V : volume des vides du mélange granulaire borné par d et D , V_0 : constante définie expérimentalement selon Caquot. D et d sont respectivement le diamètre du plus gros et du plus petit granulat.

En 1942 et en 1952, Faury ([34]) et Joisel ([35]) s'inspirent des travaux de Caquot et y apportent des modifications. Le premier prolonge l'étendue granulaire jusqu'à 6,5, en y incorporant le ciment, et prend aussi en compte l'effet de paroi. Joisel donne une droite de référence (avec une échelle complexe) prenant en compte le ciment, l'eau, les vides, la taille des grains et la compacité des classes granulaires.

En 1970, Dreux et Gorisse ([36]) mettent en œuvre une méthode, basée sur l'optimum granulaire encore couramment utilisée pour des bétons ordinaires. C'est une approche empirique selon une courbe granulaire de référence (2 segments de droite dans un diagramme semi logarithmique). Contrairement à Faury, le ciment ne fait pas partie de la courbe de référence du mélange, sa quantité massique C étant déterminée séparément.

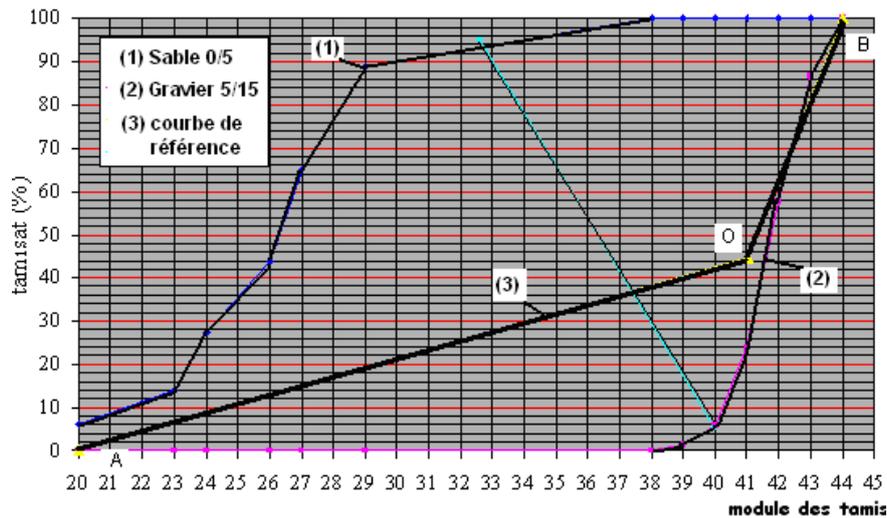


Figure I.3 : Exemple de courbe de référence optimale selon Dreux [21].

Il s'agit d'une méthode complète dans le sens où elle prend en compte un grand nombre de paramètres (équation I-7) : la géométrie de la pièce à couler, le type et le dosage du ciment, la finesse, la forme, la qualité et les dimensions de granulats, la consistance et la résistance du béton, etc.

$$f_{c28} = G_{Dreux} \times \sigma_{c28} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad [\text{Eq.I-7}]$$

Où G_{Dreux} représente le coefficient granulaire de Dreux et est la classe vraie du ciment relatif à Dreux.

En 1976, Baron et Lesage ([37]) proposent une technique d'optimisation du squelette granulaire selon le principe liant un temps d'écoulement minimum déterminé au maniabilimètre LCL selon avec une quantité optimale de granulat pour des proportions de ciment et d'eau fixée.

V. Conclusion du premier chapitre

Nous avons passé en revue dans cette synthèse bibliographique, les constituants de base du béton ainsi que les différents recyclats utilisés, ainsi que de leur valorisation, en tant que granulats dans les matériaux à base cimentaire (principalement le béton). Cette étude montre qu'un grand nombre de sous-produits de l'industrie sont actuellement utilisés dans la formulation des bétons, ce qui permet de réduire le coût (souvent ces sous-produits sont à faible prix de revient), et d'améliorer l'environnement.

Notre étude expérimentale cherche à valoriser un déchet largement disponible en Algérie représenté par les pneus usagés, en tant que substituant aux granulats. Dans un premier temps, on déterminera expérimentalement les principales propriétés des constituants utilisés à savoir les graviers, le sable et la poudrette de caoutchouc. Ensuite on établira quatre compositions de bétons dont trois vont recevoir des taux de poudrettes variant entre 10 et 25% du poids du sable. Enfin on procédera à

l'évaluation de quelques paramètres de résistance (compression sur cylindre, fendage sur cylindre et traction par flexion sur éprouvette prismatique de ces bétons). On procédera également à des mesures de résistance en compression à 28 jours à l'aide d'un scléromètre digital.

Références bibliographiques du premier chapitre

- [1] **Norme Algérienne NA442.** Liants hydrauliques- ciments courants : Composition, spécifications et critères de conformité. 2^{ème} Edition. Institut Algérien de la normalisation.
- [2] **Norme 16002.** Béton - Spécification, performances, production et conformité. Institut Algérien de la normalisation.
- [3] **Norme 5042.** Méthodes d'essais des ciments – Analyse chimique des ciments. Institut Algérien de la normalisation.
- [4] **Nigri Ghania.** Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, Thèse de doctorat en sciences, Université 8 mai 1945 Guelma, 2018.
- [5] **Norme 234.** Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques. Institut Algérien de la normalisation.
- [6] **Norme NA452.** Granulats - Eléments pour identification des granulats. Editions institut Algérien de la normalisation.
- [7] **Grairia Said.** Contribution à la Formulation des Bétons Auto plaçant à Hautes Résistances; Mémoire de magister, Université 8 mai 1945 Guelma, 2010.
- [8] **Norme NA1966.** Bétons - Eau de gâchage pour béton de construction. Institut Algérien de la normalisation.
- [9] **Norme NA774.** Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Adjuvants pour béton; Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage. Institut Algérien de la normalisation.
- [10] **Ramachandran V-S (1981).** Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada. Disponible sur: http://irc.nrcnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd215_f.htm/.
- [11] **Kharoune, M. (2006).** Séquestration du CO₂ par carbonatation minérale en réacteurs dynamiques. 7^{ième} Salon International des Technologies Environnementales. AMERICANA. Cité dans (Shkelzen, 2010).
- [12] **Saadani Sabrina (2006).** Comportement des bétons à base de granulats recyclés. Génie civil [en ligne]. Mémoire de magister. Université Mentouri Constantine, 156 P. Disponible sur:<http://www.umc.edu.dz/buc/buci/datum/theses/Geniecivil/SAA5286.pdf>.
- [13] **Bonnet S, Turatsinze A et Granju J-L (2004).** Effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment, Annales du bâtiment et des travaux publics. N° 6.

- [14] **Serifou M. (2008)**. Recherche de substitut du gravier dans le béton: Utilisation de déchets non biodégradables (ciment durci, bouteille, pneu usagé), Mémoire de DEA, Université Cocody-Abidjan.
- [15] **Doye, I, Duchesne, J (2003)**. Neutralisation of acid mine drainage with alkaline industrial residues: laboratory investigation using batch - leaching tests. Applied geochemistry. (18) 1197. Cité dans (Shkelzen, 2010).
- [16] **Vachon, P. Rajeshwar , D. Tyagi; Auclair, J. - C. Wilkinson , Kevin J (1994)**. Chemical and Biological Leaching of Aluminum from Red Mnà. Environ . Sci. Technol. 28 (1) 26. Cité dans (Shkelzen, 2010).
- [17] **Cimpelli C. et Lefort M (1996)**. Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île de France – Les bétons et produits de démolition recyclé UNICEM. Île de France. Cité dans (Raphaël, 2003).
- [18] **Raphaël B (2003)**. Substitution des granulats alluvionnaires dans l'industrie du béton par les granulats marins, concassés ou recyclés. CERIB, RB/JRO, EA286/Matériau. Réf.DDE 27.
- [19] **Maillard J-L (1997)**. Evaluation de l'aptitude à l'emploi des sables de fonderie Publication technique n°118 – CERIB.
- [20] **Franck, C. (2007)**. Produits préfabriqués en béton fileux. Vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production. Doctorat, Université de Toulouse III, 287p.
- [21] **CHERAIT Yacine, NAFA Zahredinne**. Eléments de matériaux de construction. Edition : Direction de la publication de l'université 8 mai 1945 Guelma. N° ISBN 9961-9548-7-4, 2007.
- [22] **Debieb, Farid, Courard, Luc, Kenai, Said and Degeimbre, Robert (2010)**. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. Cement and Concrete Composites - Vol 32 (6).
- [23] **Levy S.M. Helene P (2004)**. Durability of recycled aggregate concrete: A safe way to sustainable development. Cement and Concrete Research 34,pp. 1975-1980.
- [24] **Eldin N.N., Senouci A.B (1993)**. "Rubber tire particles as concrete aggregate". Journal of Materiel in civil Engineering, Vol.5, N°4, p.478-496.
- [25] **Gomez-Soberon J (2002)**. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. Cem Concr Res. pp 32: 1301.
- [26] **Olorunsogo, F.T., Padayachee, N (2002)**. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. Cement and Concrete Research. pp 32: 179-185.

- [27] **Abbas A. Carcassès M. Ollivier J.P (2009)**.The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete. Magazine of Concrete Research.
- [28] **Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (1993)**. Concrete: Structure, Properties, and Materials, 2nd edition, Prentice-Hall p.548. Cité dans (Noureddine, 1996).
- [29] **Noureddine J (1996)**. Influence de la forme et de la rugosité des particules d'un granulat sur les propriétés et les coûts du béton compacté au rouleau. Pp. 17-23.
- [30] **Fuller W.B. Thompson S. (1907)** «Proportion for concrete» Am Contractor, pp28-66. Cité dans (Franck, 2007).
- [31] **Abrams D.A. (1952)** «Scientific method of making concrete» Chemistry and Industry p42. Cité dans (Franck, 2007).
- [32] **Bolomey J.C. (1925)** «Durcissement des mortiers et bétons» Paris :Rouge et Cie, 1925. Cité dans (Franck, 2007).
- [33] **Caquot A. (1937)** Le rôle des matériaux dans le béton. Mémoires de la Société des ingénieurs Civils de France p. 562-582. Cité dans (Noureddine, 1996).
- [34] **Faury J. (1944)** «Les bétons : Influence de ses constituants inertes, règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers», Hachettes. Cité dans (Franck, 2007).
- [35] **Joisel A. (1952)** «Compositions des bétons hydrauliques» Annales de l'ITBTP (58), Série Béton et béton armé. Cité dans (Franck, 2007).
- [36] **Dreux G. (1986)**. Nouveaux guide du béton, Eyrolles, 5ème Edition, Paris. Cité dans (Ameur, 2009).
- [37] **Baron J, Lessage (1976)**. «La composition des bétons hydrauliques : du laboratoire au chantier»; Rapport de recherche des LCPC (64). Cité dans (Franck, 2007).

CHAPITRE II

**CARACTERISATION DES CONSTITUANTS ET
FORMULATION DES BETONS**

PARTIE I :

CARACTERISATION DES CONSTITUANTS

I. Introduction

De manière la plus générale le matériau béton, est un composite dans lequel on distingue deux phases : la matrice ou pâte de ciment durcie (ciment et eau) et les granulats (gravillons et sable). D'une manière générale, le béton représente entre 60 à 70% des dépenses engendrées par la construction, ce qui est considérable. Il est donc important de chercher à en réduire le coût. Ceci peut se faire en substituant une partie des composants par des sous-produits industriels à faible prix de revient.

L'objet principal visé dans cette partie expérimentale est d'élaborer quatre formulations : un béton ordinaire (BO) et trois bétons contenant de la poudre de caoutchouc (BC) avec des taux de substitution de 10, 17,5 et 25% du poids de sable. Ces quatre compositions doivent impérativement répondre aux critères de mise en œuvre (béton ferme) et de résistance (caractéristique à la compression moyenne visée de l'ordre de 20 à 25MPa), et ce en utilisant des matériaux locaux et un produit de recyclage issu de l'industrie du caoutchouc.

Pour atteindre les objectifs visés, il y a lieu de procéder dans une première étape à un bon choix des constituants de base, et plus particulièrement la phase inerte (mélange sable + gravier + poudrette de caoutchouc). Dans la deuxième étape, nous allons procéder à la formulation des bétons, et à déterminer leurs principales propriétés à l'état frais, notamment l'ouvrabilité au cône et la masse volumique.

II. Caractérisation des matériaux

II.1. Matériaux utilisés

Les différents constituants utilisés pour l'élaboration de nos bétons sont :

- Un ciment de type CPJ-CEM IIA 42,5 provenant de la cimenterie de Hdjar Essoud,
- Un sable roulé d'étendue granulaire 0/3 provenant de la Wilaya de Tébessa,
- Un gravier 8/16 provenant de la carrière d'Héliopolis (Wilaya de Guelma),
- Un gravillon 4/8 provenant de la carrière de Bousselba d'El fedjoudj (Wilaya de Guelma),
- De la poudrette de caoutchouc récupéré auprès de l'entreprise «Douib Recyclage Caoutchouc» dans la Wilaya de Sétif,

- Eau de gâchage (eau du robinet).

Certains de ses matériaux ont fait l'objet de quelques essais préliminaires décrits ci-après.

II.2. Essais de caractérisation des constituants

Cette partie expérimentale a été consacrée à la détermination de quelques propriétés physiques et mécaniques du squelette inerte (sable + graviers + poudre de caoutchouc). Les essais ont été effectués conjointement au Laboratoire pédagogique du département de génie civil, et au Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH) de l'Université 8 Mai 45 de Guelma. Les protocoles pour la conduite des essais ont été conformes aux normes en vigueur en Algérie (Normes NA).

II.2.1. Caractérisation des graviers utilisés

Pour l'élaboration des bétons, nous avons utilisé deux types de graviers concassés. Un gravillon 4/8 et un gravier d'étendue granulaire 8/16. Ces deux matériaux ont fait l'objet des essais de caractérisations suivants :

- Masse volumique absolue,
- Masse volumique apparente,
- Teneur en eau,
- Pourcentage d'impureté,
- Analyse granulométrique.

Les procédures ainsi que les résultats de ces essais sont développés dans le paragraphe suivant.

Mesure de la masse volumique apparente des graviers selon la norme NA255 [1]

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume en vrac, c'est-à-dire "vides" compris.

- Principe de la mesure : La mesure de la masse volumique apparente d'un gravier consiste à verser le granulat «sec» dans un récipient de volume connu en le disposant, sans tasser, par couches horizontales successives, d'araser la dernière couche par un mouvement de va et vient à l'aide d'une règle (figure II.1). La masse volumique apparente, notée " M_v ", est donnée par l'expression :

$$M_v = \left(\frac{M}{V} \right) \quad [\text{Eq.II.1}]$$

Avec :

M = masse des granulats contenus dans le récipient,

V = volume du récipient.



Figure II.1 : Procédé utilisé pour la mesure de la masse volumique apparente des graviers.

Mesure de la masse volumique absolue des graviers selon la norme NA255 [1]

La masse volumique absolue " ρ " 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.

Principe de la mesure : Pour déterminer la masse volumique absolue de nos graviers, nous avons utilisé la méthode dite de l'éprouvette graduée, dont nous exposons ci-après le principe.

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau. Peser un échantillon sec "M" de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume V_2 (figure II.2.).

La masse volumique absolue se déduit alors à partir de l'expression suivante :

$$\rho = \left(\frac{M}{V_2 - V_1} \right) \quad [\text{Eq.II.2}]$$



Figure II.2 : Mesure de la masse volumique absolue des graviers.

Mesure de la teneur en eau des graviers selon la norme NA255 [2]

Il est important de déterminer la teneur en eau des granulats afin de faire une correction de la quantité d'eau à incorporer dans le béton. La méthode de mesure consiste à prélever une quantité donnée de granulats mouillés, de faire évaporer cette eau et de peser la quantité de granulat sec. La

différence de ces deux pesées définit la quantité d'eau évaporée, d'où la teneur en eau (figure II.3). La teneur en eau, notée ω est donnée par la relation suivante :

$$\omega = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) 100 \quad [\text{Eq.II.3}]$$

Avec :

M_h = poids de granulat humide,

M_s = poids de granulat sec.



Figure II.3 : Détermination de la teneur en eau des graviers.

Mesure de la propreté des graviers [3]

La propreté des granulats pour béton désigne, d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains et d'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine, etc.

Principe de l'essai : Les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières, la séparation des agrégats des éléments fins se fera par un simple lavage à l'eau douce.

Mode opératoire :

- Peser une masse "M" de gravier et la placer dans le tamis de 0,5mm de mailles,
- Laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis devienne claire,
- Essuyer l'excès en eau à l'aide d'un chiffon propre et peser la nouvelle masse, soit M' (figure II.4).

Le pourcentage des impuretés se déduit alors à partir de l'expression suivante :

$$P(\%) = \left(\frac{M - M'}{M} \right) 100 \quad [\text{Eq.II.4}]$$



Figure II.4 : Mesure de la propreté des graviers.

Analyse granulométrique selon la norme NA2607 [4]

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis. La procédure utilisée est schématisée à travers la série des photos suivantes :

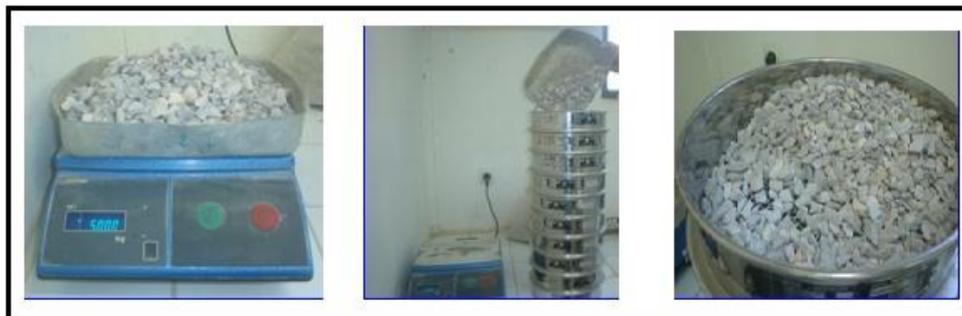


Figure II.5 : Analyse granulométrique des graviers.

Les résultats des essais sur les graviers sont reproduits sur les tableaux II.1, 2 et 3.

Tableau II.1 : Analyse granulométrique du gravillon 4/8.

Tamis	Refus (%)	Tamisât (%)
8	0	100
6,3	5,7	94,3
5	31,6	68,4
3,35	73,6	26,4
2	98,6	1,4
1,18	99,1	0,9
Fond	100	0

Tableau II.2 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.

Tamis	Refus (%)	Tamisât (%)
20	0,9	99,1
14	6,4	93,6
11,2	37,6	62,4
10	62,1	37,9
8	91,1	8,9
6,3	98,6	1,4

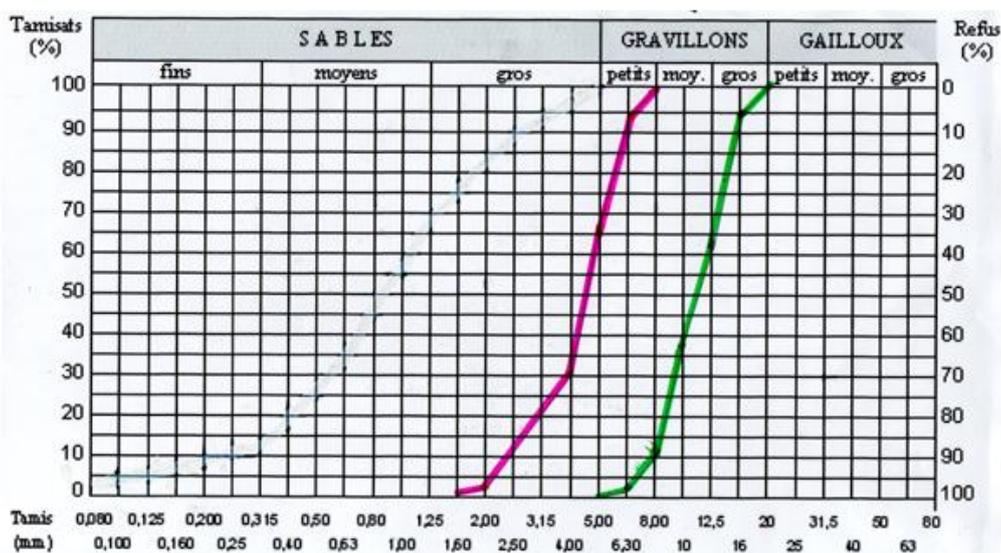


Figure II.6 : Courbes granulométriques des deux graviers utilisés.

Tableau II.3 : Récapitulatif des résultats des essais sur les graviers.

Nature de l'essai	Gravier 4/8	Gravier 8/16
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2650	2760
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1323	1385
Teneur en eau (%)	0,5	0,5
Pourcentage d'impureté	1	0,4
Analyse granulométrique	(voir figure II.6)	(voir figure II.6)

Commentaires

- ✚ Concernant les masses volumiques apparentes et absolues, les valeurs obtenues correspondent aux valeurs moyennes des granulats courants utilisés dans la fabrication des bétons. Ainsi pour

ce matériau, les sables et graviers présentent des masses volumiques absolues variant dans la fourchette [2500 ÷ 2700] kg/m³.

- ✚ La teneur en eau obtenue pour les deux graviers est très faible (0,5%), on ne fera donc pas de correction sur ces composants ;
- ✚ Les graviers testés présentent des taux d'impuretés respectivement de 0,4 et 1%. Ces deux taux répondent aux exigences des normes en vigueur qui limite à 2% le taux d'impuretés. Pour les graviers concassés, on tolère exceptionnellement un pourcentage en fine de 5%.
- ✚ Les deux fuseaux granulaires sont continus.

Ainsi les valeurs obtenues pour les différents essais entrepris sur les graviers répondent aux normes en vigueur.

II.2.2. Essais de caractérisation du sable

Les sables entrent dans la composition des mortiers, des bétons, des matériaux préfabriqués où ils participent à la résistance à l'écrasement, d'où la recherche d'un sable dur, et compact. C'est souvent par la médiocre qualité du sable que périssent les bétons. Il faut que les grains de sable demeurent plus durs que la pâte de ciment durci qui les enveloppes : ils donnent de la cohésion au mélange, mortier ou béton. Concernant le sable, nous avons procédé aux essais suivants :

- Masse volumique absolue,
- Masse volumique apparente,
- Compacité,
- Teneur en eau,
- Equivalent de sable,
- Analyse granulométrique.

Mesure de la masse volumique apparente du sable selon la norme NA451 [5]

La procédure utilisée pour la détermination de cette grandeur est représentée à travers la figure suivante :



Figure II.7 : Mesure de la masse volumique apparente du sable.

Masse volumique absolue selon la norme NA451 [5]**- Mode opératoire :**

- Peser le récipient plein d'eau, soit une masse P_1 ;
- Peser un échantillon du corps étudié, soit une masse P_2 ;
- Introduire le corps dans le récipient, remplir à nouveau d'eau, et peser, soit une masse P_3 .

La masse volumique absolue se déduit de l'expression suivante :

$$\rho_{\text{absolue}} = \left(\frac{P_2}{P_1 + P_2 - P_3} \right)$$

[Eq.II.5]

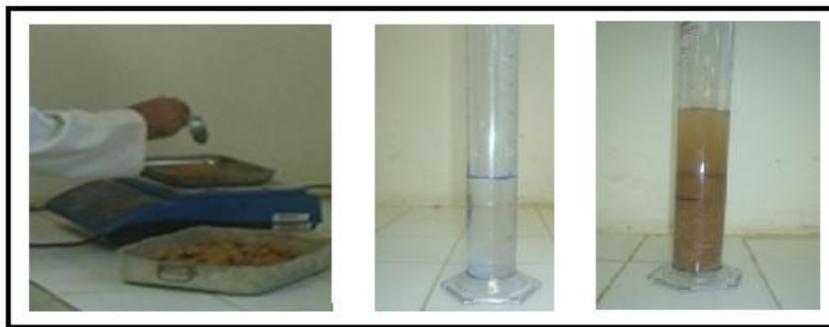


Figure II.8 : Mesure de la masse volumique absolue du sable.

Mesure de la compacité du sable

Pour effectuer cette mesure il suffit de déterminer le volume des vides présenté par une quantité donnée de granulats, remplissant un bocal de volume "V".

- Peser une quantité de matériau sec et le verser (sans le tasser) dans une éprouvette graduée.
- Noter le niveau atteint représentant le volume apparent du matériel, soit "V".
- Dans une deuxième éprouvette contenant un volume V' d'eau, verser le sable de la première éprouvette.
- Noter le volume atteint par l'eau "V₁".

Le volume des vides est égal à :

$$V + V' - V_1$$

La compacité sera déduite à partir de l'expression suivante :

$$C = \frac{(V_1 - V')}{V}$$

[Eq.II.6]



Figure II.9 : Mesure de la compacité du sable.

Teneur en eau selon la norme NA451 [5]

La méthode de mesure consiste à prélever une quantité donnée de granulats mouillés, de faire évaporer cette eau et de peser la quantité de granulat sec. La différence de ces deux pesées définit la quantité d'eau évaporée. La teneur en eau, notée « ω » est donnée par :

$$\omega = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) 100 \quad [\text{Eq.II.7}]$$

Avec :

M_h = poids des granulats humides,

M_s = poids des granulats secs.



Figure II.10 : Détermination de la teneur en eau par étuvage.

Analyse granulométrique selon la norme NA2607 [4]

Pour déterminer l'analyse granulométrique, nous avons utilisé une masse d'environ de 1000 grammes de sable préalablement conservées dans un four 105°C pendant 24heures. Les résultats sont reportés sur le tableau II.4.

Tableau II.4 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable.

Tamais	Refus (%)	Tamisât (%)
4	0	100
3,35	0,3	99,7
2	1,4	98,6
1	5,8	94,2
0,5	31,9	68,1
0,25	84,1	15,9
0,125	97	3
0,063	99,2	0,8
Fond	99,9	0,1

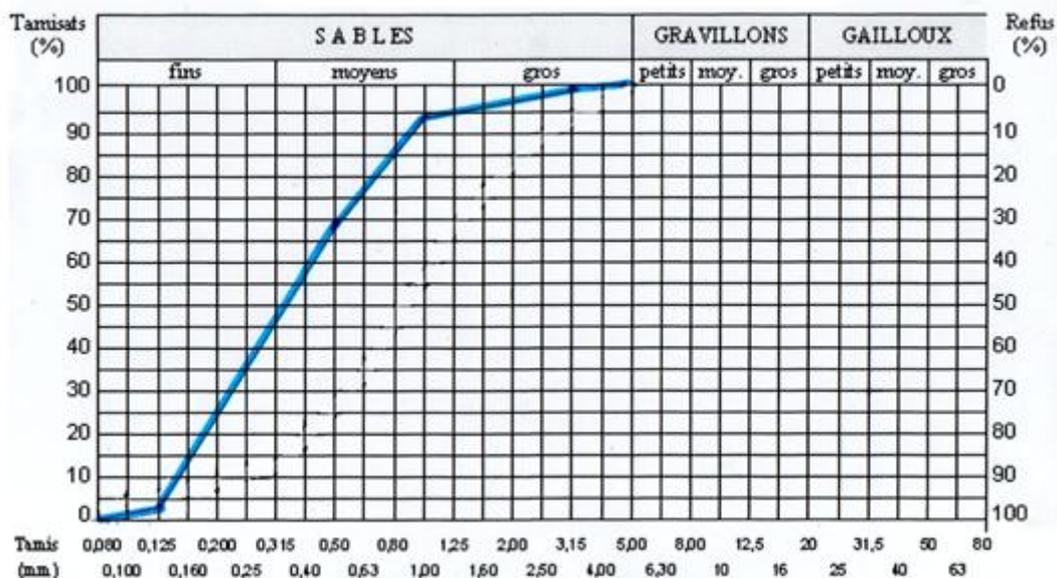


Figure II.11 : Courbe granulométrique du sable.

La courbe II.11 illustre le fuseau granulaire du sable utilisé.

Module de finesse :

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse. Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins. Le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis} \{ 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,50 - 5 \}$$

Interprétation des résultats : lorsque le module de finesse est compris entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

Commentaires

- ✚ Le module de finesse du sable utilisé est de 1,97, il s'agit donc d'un sable dont les grains fins représentent la majorité. Cette finesse nécessite d'avantage d'eau pour le mouillage du sable.

Equivalent de sable selon la norme NA455 [6]

Cet essai a été effectué dans le cadre de mon stage pratique au niveau du laboratoire LTP-Est d'Annaba. L'essai est important et a pour but de mesurer la propreté des sables. L'essai est effectué sur la fraction 0/5mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon (selon un processus normalisé). Pour cela on utilise une solution qui a pour rôle de séparer les éléments fins argileux et provoque la floculation. Après décantation, on mesure la hauteur des fines floculées, (sable propre + éléments fins = h_1) et la hauteur de sable propre (h_2 si c'est au piston ou h'_2 si c'est au réglet).

Mode opératoire :

- Remplissage de la solution jusqu'au premier trait,
- Une masse de sable 120g (sec) est introduite dans l'éprouvette,
- Imbibition du sable pendant 10mn dans la solution,
- Eprouvette secouée (60 cycles en 30 secondes), lavage du sable avec la solution,
- Et remplissage jusqu'au deuxième trait,
- Début de la décantation, durée 20mn,
- Mesure de la hauteur de sable h_1 de l'ensemble sable plus floculat,
- Mesure à vue la hauteur,
- Mesure de la hauteur du sable h_2 au piston.



Figure II.12 : Mesure de la propreté du sable (ES).

Tableau II.5 : Résultats de l'équivalent de sable.

Lectures	Prise n°1	Prise n°2
h_1	14,3	14,4
h'_2	9,4	9
h_2	7,6	7,5
Sur chaque prise : E.S.V	53,2	52,1
E.S	65,7	62,5
Sur l'échantillon : E.S.V	52,7	
E.S	64,1	
Température :	16°C	

Tableau II.6 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable [7].

ESV (%)	ES (%)	Qualité du sable
ESV < 65	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 \leq \text{ESV} < 75$	$60 \leq \text{ES} < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq \text{ESV} \leq 85$	$70 \leq \text{ES} \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ESV ≥ 85	ES > 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Récapitulatif des résultats

L'ensemble des résultats des essais entrepris sur le sable est résumé dans le tableau suivant II.7.

Tableau II.7 : Résultats des essais sur le sable.

Essais	Résultats des mesures
Masse volumique absolue (kg /m ³)	2500
Masse volumique apparente (kg /m ³)	1610
Compacité	0,527
Teneur en eau (%)	3,6
Analyse granulométrique	(voir figure II.11)
Equivalent de sable (%)	ES = 64,1 ESV = 52,7

Commentaires

- ✚ Concernant la propreté du sable utilisé, nous constatons qu'il présente un ESV de 52,7% et un ES de 64,1%, ces valeurs montrent qu'il s'agit d'une sable plutôt argileux. Il est par voie de conséquent à éviter si l'on recherche un béton de bonne qualité.
- ✚ Concernant les masses volumiques apparentes et absolues, les valeurs obtenues correspondent aux valeurs moyennes des sables courants utilisés dans la fabrication des bétons. Ainsi pour ce matériau, les sables et graviers présentent des masses volumiques absolues variant dans la fourchette [2500 ÷ 2700] kg/m³.
- ✚ La teneur en eau obtenue pour le sable est de 3,6%, une correction au niveau de la quantité d'eau sera effectuée,
- ✚ Concernant l'étude granulaire, elle correspond à une classe 0/3, et ne couvre donc pas l'étendue granulaire pour les sables (0/5). En principe il y a lieu de modifier l'étalement de sable, en lui apportant les grains manquants (3/5).

Ainsi le sable utilisé présente certaines caractéristiques en dehors de certaines normes.

II.2.3. Poudrette de caoutchouc

Avant de procéder à quelques essais sur la poudrette de caoutchouc, nous allons exposer un bref aperçu sur l'origine de cette matière et les problèmes posés pour le recyclage de certains sous-produits industriels.

II.2.3.1. Introduction

Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations graves pour l'environnement à travers le monde. Selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur, l'Algérie importe annuellement environ de 50 milles tonnes de pneumatiques en caoutchouc. 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 46 milles de tonnes de pneus usagés, chaque année [8].

II.2.3.2. Principaux constituants d'un pneu

Si on effectue une coupe, d'un pneumatique de type radial [9], dans le sens transversal (figure II.12), on distingue alors :

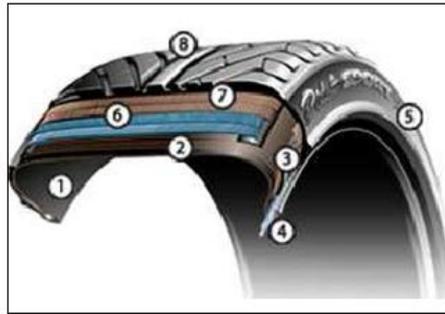


Figure II.13: Coupe transversale d'un pneu Michelin [9].

- Une feuille d'un caoutchouc synthétique
- La nappe carcasse,
- Un bourrage zone basse,
- Les tringles,
- Les flancs,
- Les nappes sommets,
- La bande de roulement.

Comme nous l'avons signalé précédemment, les pneus, une fois usagés, génèrent une quantité considérable de déchets. D'autres industries provoquent le même phénomène : le laitier des hauts fourneaux pour l'industrie sidérurgique, les cendres volantes pour les centrales électriques, etc. Ces déchets posent énormément de problèmes notamment vis-à-vis de l'environnement. Pour assurer un développement durable, en optimisant la consommation des matières premières et de l'énergie, notre pays s'est doté de règlements spécifiques concernant le juste des sous-produits industriels et des déchets. Un bref aperçu de ces lois sont exposés dans le paragraphe suivant.

Réglementation sur la gestion des déchets [10]

Pour se placer dans une logique de développement durable, il a été nécessaire à l'Algérie de construire, sur la base d'un constat, une stratégie nationale de l'environnement dans une perspective décennale, à la fois bénéfique pour l'environnement et le développement durable.

Au sens de la loi (Loi n°01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets) on entend par déchet : tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance ou produit et tout bien, meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou d'éliminer.

Selon le Décret exécutif n°06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux (Journal officiel du 5 mars 2006). Les déchets sont classés en

quatre catégories : les déchets ménagers et assimilés (MA), inertes (I), spéciaux (S), et spéciaux dangereux (SD).

Les déchets spéciaux selon le même décret exécutif sont : tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités qui, en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent, ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers ni assimilés à des déchets inertes.

Les pneus hors d'usage sont classés comme déchets spéciaux «classe S» sous le code «16.1.1» sans aucun critère de dangerosité, selon la réglementation algérienne. La loi algérienne précise que tout générateur et/ou détenteur de déchets, est tenu d'assurer ou de faire assurer la valorisation des déchets engendrés par des matières qu'il importe ou écoule et les produits qu'il fabrique.

Lorsque le générateur et/ou le détenteur de déchets est dans l'impossibilité d'éviter de générer et/ou de valoriser ces déchets, il est tenu d'assurer ou de faire assurer, à ses frais, l'élimination de ses déchets de façon écologiquement rationnelle, conformément aux dispositions de la loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, article 7 et 8 de ses textes d'application.

Valorisation des pneus usagés sous forme de matières premières [8]

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

Poudrettes : il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2mm. 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, brouette, etc.), la modification des revêtements routiers (diminution de bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface)...etc.

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

D'autres types de valorisation de matière, par transformation chimique, sont possible, telle que la régénération (par combinaison d'actions chimiques, mécaniques et thermiques), ou la Pyrolyse-Thermolyse. Les produits issus de cette décomposition, dont des huiles combustibles lourds et légères,

du carbone...etc. Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre.

Concernant la poudrette de caoutchouc utilisée, elle a été récupérée auprès d'une entreprise implantée dans la wilaya de Sétif [11] et qui est spécialisée dans le recyclage des produits caoutchoutés. Une présentation sommaire de cette entreprise est présentée en **annexe 1**.

Le principe de recyclage est relativement simple, et consiste à débarrasser les pneus usagés de leurs armatures métalliques et de procéder à un broyage. Le produit obtenu est ensuite calibré et conditionné, soit en poudrettes, soit en granulés. C'est la première catégorie qui a été utilisée comme substituant au sable, à cause de son étendue granulaire qui est de 0/5mm.

Analyse granulométrique de la poudrette de caoutchouc

L'analyse granulométrique de la poudrette de caoutchouc a été effectuée au niveau du laboratoire de l'habitat et de la construction (LHC). Ce laboratoire est implanté dans la commune de Belkheir (Wilaya de Guelma). Le fuseau granulaire obtenu est illustré à travers les valeurs du **tableau II.8**.

Tableau II.8 : Analyse granulométrique de la poudrette de caoutchouc.

Tamis	Refus cumule (%)	Tamisât cumule (%)
4	0,04	99,96
2	16,1	83,9
1	76,84	23,16
0,5	99,61	0,39
0,25	99,83	0,17
FOND	100	0

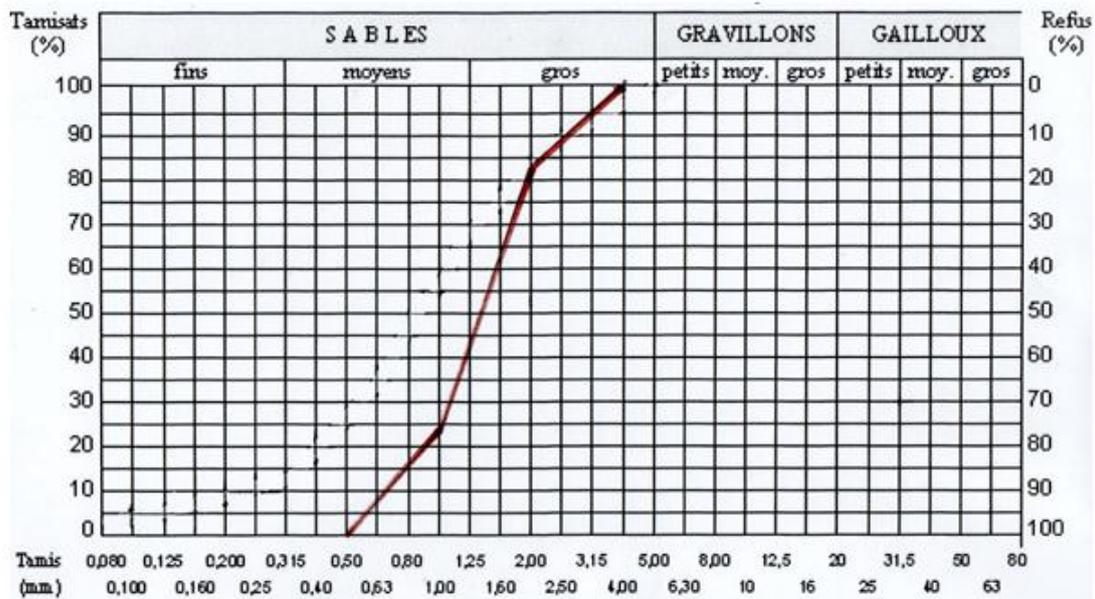


Figure II.14 : Fuseau granulair de la poudre de caoutchouc.

Comme on peut le constater, à travers la figure II.14, le fuseau granulair de la poudrette correspond à celui d'un sable moyen (0/4). Nous avons mesuré également (en procédant de la même que pour le sable) la masse volumique de la poudrette. Nous avons obtenu une valeur de 870kg/m^3 , soit pratiquement une valeur correspondante au tiers de celle du sable utilisé.

II.2.4. Eau de gâchage

L'eau permet d'activer la réaction d'hydratation du ciment anhydre et de donner une pâte. Les propriétés mécaniques (résistance, raideur, etc.) et de transfert (porosité et perméabilité). Ce paramètre est donné par le rapport massique de la quantité d'eau à celle du ciment, noté E/C. Ce rapport affecte également la saturation du matériau, c'est-à-dire l'eau disponible dans le réseau après hydratation. L'eau utilisée est celle disponible au laboratoire de génie civil et d'hydraulique. Elle a fait l'objet d'une analyse chimique conformément à la norme **NA1966 [12]**.

II.2.5. Le ciment

Pour tous les mélanges on a utilisé un seul type de ciment (CPJ-CEM II/42.5A) provenant d'une unique livraison de la cimenterie de Hdjar Essoud (Wilaya de Skikda). Ainsi, la qualité de ce ciment constitue une constante au niveau des paramètres d'étude. Ses analyses physiques, chimiques et minéralogiques communiquées par le producteur sont représentées respectivement dans les tableaux suivants :

Tableau II.9 : Composition chimique moyenne du ciment CPJ-CEM II/A utilisé [13].

Composant	CaO	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	PAF	MnO
(%)	58,6	24.92	6.58	3.65	1.21	085	0.08	2.17	1.7	/

Tableau II.10 : Caractéristiques physiques du ciment [13].

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité absolue	3.11
Densité apparente	1.09
Surface spécifique Blaine	3371
Consistance normale (%)	25,6
Début de prise (mn)	123
Fin de prise (mn)	180
Expansion à chaud (mm)	1,80
Refus au tamis 45	17,40

Le choix du CPJ42,5 s'explique aisément par le fait que c'est pratiquement le seul ciment courant disponible au niveau local. D'une manière générale, le choix du ciment dépend, notamment de la résistance souhaitée du béton des impératifs de mise en œuvre, et de l'environnement de l'ouvrage.

PARTIE II :

FORMULATION DES BETONS

I. Introduction

En utilisant une gamme de constituants disponibles et très utilisés localement, nous avons entamé un travail de formulation d'un béton ordinaire (désigné BO) et trois bétons de caoutchouc (désigné par BC_x où "x" exprime le taux de substitution par rapport au poids du sable).

I.1. Formulation du béton ordinaire (BO)

Cette partie est consacrée à la formulation d'un béton appelé à être mis en place par vibration (noté BO). Le béton élaboré va servir de témoin dans la suite du travail. Pour déterminer les proportions des différents constituants, nous avons choisi la méthode de **Dreux-Gorisse [14]** qui constitue un perfectionnement des méthodes de **Bolomey [15]** et de **Faury [16]**. C'est une méthode qui donne d'excellents résultats.

I.1.1. Présentation de la Méthode de Dreux-Gorisse [14]

La méthode de Dreux-Gorisse, constitue une synthèse des diverses théories existantes sur la composition des bétons, appuyée sur un examen statistique de nombreux chantiers sérieusement contrôlés. Son but est de définir d'une manière simple et rapide une première formulation de béton en fonction de deux paramètres principaux du béton à savoir : La résistance en compression et ouvrabilité.

La formulation définitive étant obtenue par quelques gâchées d'essais permettant d'ajuster au mieux la formule théorique du béton en fonction des qualités désirées et des matériaux réellement employés.

Détermination de la composition par mètre cube du béton ordinaire

Objectifs visés par l'étude : On cherche à déterminer la composition d'un béton ternaire plastique (ouvrabilité au cône variant entre 5 et 9cm) présentant une résistance en compression de l'ordre de 25MPa.

Données de départ :

- Ciment : CEM II A 42,5

- Densité du ciment CPJ CEM IIA 42,5 = 3,1
- Dosage pondéral du ciment adopté : $C = 400 \text{ kg/m}^3$.

On admettra que le béton présente une masse volumique de 2200 kg/m^3 . Dans cette hypothèse le pourcentage du ciment sera de :

$$C = \left(\frac{400}{2200} \right) \times 100 = 18,2\%$$

Les courbes granulométriques du sable, des graviers et de la courbe de référence sont illustrés à travers la figure suivante :

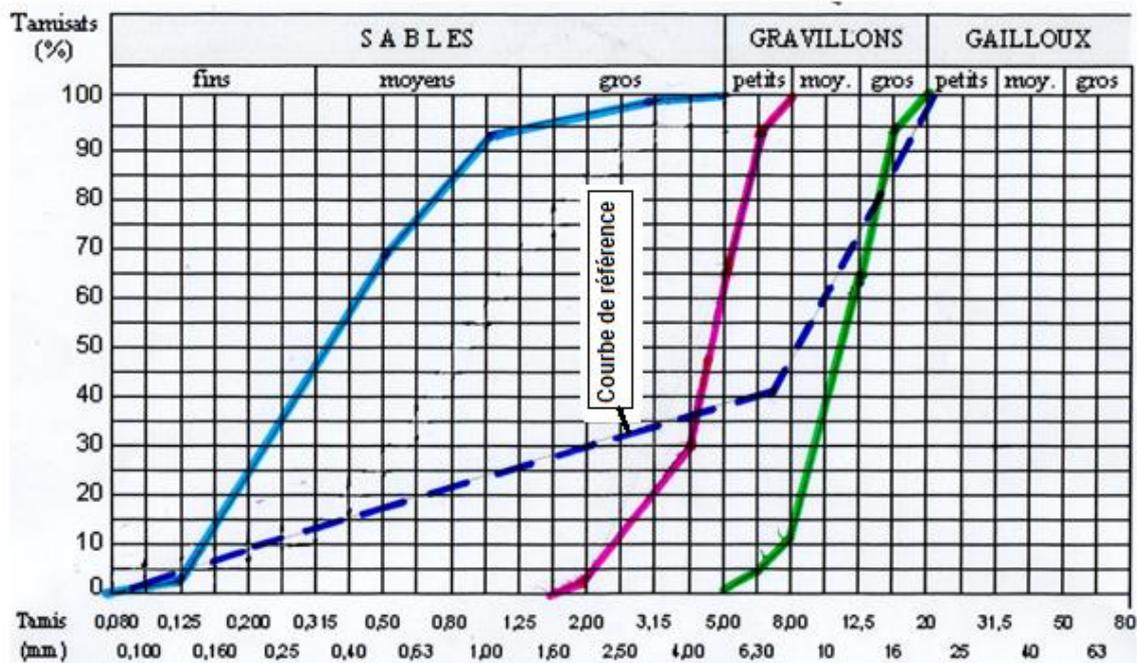


Figure II.15 : Courbes de référence du béton selon la méthode de Dreux-Gorisse.

A l'optimum nous obtenons :

Pourcentage de sable — Sable = $56 - 18,2 = 37,8\%$.

La formulation optimale au sens de la méthode de **Dreux-Gorisse** [14], devrait donc contenir les pourcentages suivants :

- ✓ 18,2% de ciment,
- ✓ 37,8% de sable,
- ✓ 44% de graviers.

Détermination de la quantité d'eau : Il existe plusieurs approches pour estimer avec une bonne précision la quantité d'eau de gâchage du béton [7]. Ils existent ainsi qui permettent de déduire le rapport Eau/Ciment (E/C) pour un affaissement donné, ou encore des expressions analytiques. C'est cette approche qui a été choisie.

Taille des grains : $D < 0,16 \text{ mm}$

$C = 400 \text{ kg}$

Sable fin ($D < 0,16 \text{ mm}$) = $\frac{1,8}{100} (2200) = 39,6 \text{ kg}$

Poids total des éléments fins à mouiller :

$P = 400 + 39,6 = 439,6 \text{ Kg}$

Soit une quantité d'eau de : $(0,23P) = (0,23 \times 439,6) = 101,1 \text{ kg}$

Taille des grains : $D \geq 0,16 \text{ mm}$

Masse à mouiller = Masse totale – Masse des éléments fins

$2200 - 439,6 = 1760,4 \text{ kg}$

$d_1 = 0,16 \text{ mm}$ $d_2 = 15 \text{ mm}$; $K = 0,10$

$\text{Eau} = \frac{0,10 \times 1760,4}{1,17 \sqrt[3]{0,16 \times 15}} = 112,4 \text{ kg}$

Soit donc une quantité d'eau totale à prévoir de :

$101,1 + 112,4 \approx 214 \text{ litres}$

Pourcentage d'eau

Il se déduit à partir de la masse des éléments secs :

$E = \left(\frac{214}{2200} \right) \times 100 = 9,7 \%$

Soit un rapport : $\frac{E}{C} = \frac{214}{400} = 0,54$

Composition d'un mètre cube de béton :

La composition de $(100 + E) \%$:

$\left\{ \begin{array}{l} C = 18,2 \\ S = 37,8 \\ g = 44 \\ E = 9,70 \end{array} \right. \Rightarrow \text{un total de} = 109,7\%$

Tableau II.11 : Formulation du béton ordinaire.

Composant	Composant en poids	Masse Volumique	Composant en volume	% en Poids	Composition en poids
Ciment	18,2	3,1	5,87	14,5	400
Sable	37,8	2.64	14,32	36.70	813
Graviers	44	2.65	16,60	40,4	946
Eau	9,70	1.0	9,70	8,50	242
TOTAUX	109,70		46,49	100	2373

Ainsi la composition optimale selon la méthode de Dreux-Gorisse doit contenir, pour 1m³ les masses suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ciment} = 400 \\ \text{sable} = 591 \\ \text{gravier } 5/15 = 834 \\ \text{gravillon} = 337 \\ \text{eau} = 242 \end{array} \right.$$

Estimation de la résistance du béton de Faury [16]

Une fois la composition, on cherche à prévoir sa résistance en compression à 28jours. La relation permettant d'évaluer cette propriété est celle de **Bolomey [15]**. Elle permet de déterminer la résistance normale du ciment en fonction de la résistance de béton souhaitée.

$$f_c = K_b \times f_{mc} \left[\frac{c}{e+v} - 0,5 \right] \quad [\text{Eq.II.8}]$$

Avec :

f_c : résistance souhaitée du béton à 28 jours ;

f_{mc} : résistance nominale du ciment utilisé (42,5MPa) ;

K_b : coefficient relatif au squelette granulaire ; il varie généralement entre 0,50 et 0,60 ;

C : dosage du ciment exprimé en kg/m³ ;

e : quantité d'eau efficace exprimée en litres ;

v : quantité d'air occlus dans le béton exprimée en l/m³.

Pour les bétons plastiques, il est d'usage d'admettre que la teneur en air occlus représente environ 10% de la quantité d'eau, soit $v \approx 0,1e$

Ainsi le béton proposé devrait présenter une résistance prévue de :

$$f_c = 0,60 \times 42,5 \left[\frac{400}{242 + 0,1 \times 242} - 0,5 \right] = 25,6 \text{MPa}$$

I.2. Formulation des bétons caoutchoutés

Nous avons testés trois compositions de bétons caoutchoutés, notés respectivement par BC₁₀, BC_{17,5}, et BC₂₅.

Tableau II.12 : Compositions des bétons caoutchoutés.

Composants	Désignation des bétons		
	BC ₁₀	BC _{17,5}	BC ₂₅
Ciment	400	400	400
Sable de mer S _R	532	488	443
Gravillons 4/8	337	337	337
Gravier 8/16	834	834	834
Poudre de caoutchouc	20,6	36	51,4
Eau	242	242	242

II. Préparation des bétons et conduite des essais

Nous présenterons dans qui suit, les différentes étapes suivies et respectées pour la réalisation des essais sur les différentes compositions retenues.

II.1. Malaxage et mise en place

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est un malaxeur à axe vertical planétaire d'une capacité de 120 litres.

Les séquences de malaxage suivies sont les suivantes :

- pré-humidification des granulats secs pendant 10 minutes,
- introduction du liant et malaxage pendant 30 secondes des constituants granulaires,
- introduction de l'eau de gâchage (plus une partie des adjuvants), puis malaxage pendant 1 minute et 30 secondes,
- introduction de la partie restante des adjuvants et malaxage pendant 2 minutes.

La mise en place est effectuée dans différents moules destinés aux corps d'épreuve correspondants aux essais programmés.



Figure II.16 : Photo de la bétonnière utilisée.

II.2. Caractérisation des bétons à l'état frais

Les bétons présentés dans le tableau précédent ont été testés pour déterminer leur fluidité au traditionnel cône d'Abram's, ainsi que leur masse volumique à l'état frais. Nous avons également noté la température ambiante lors du coulage.

II.2.1. Mesure de la température de coulage

Nous avons mesuré, à l'aide d'un thermomètre digital (figure II.17), la température du béton juste l'opération de remplissage des moules. Rappelons que l'opération de préparation des éprouvettes s'est étalée sur plusieurs semaines, avec un risque d'écart de températures.



Figure II.17 : Thermomètre digital utilisé pour la mesure de la température.

Tableau II.13 : Température ambiante lors du coulage des bétons.

Désignation	BO	BC ₁₀	BC _{17.5}	BC ₂₅
Température °C	17	16,1	14,6	16,2

La température ambiante est relativement basse en ce mois de mars. Ce facteur aura une conséquence sur l'évolution des résistances des bétons notamment au jeune âge.

II.2.2 Mesure de l'affaissement au cône d'Abram's

Cet essai appelé encore, essai au cône d'Abram's, sert à mesurer la fluidité des bétons après gâchage.

- Appareil utilisé

L'appareillage utilisé est composé :

- d'un cône, dont les dimensions intérieures sont : $[(d=100); (D=200)]$ mm
- d'une plaque de base,
- d'une tige piquante en acier de 600mm de longueur et de 16mm de diamètre,
- d'un portique et un réglet pour mesurer l'affaissement,
- d'une truelle pour manipuler le béton.

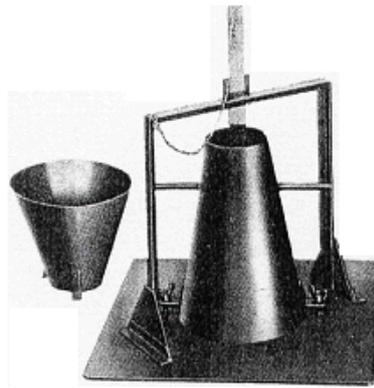


Figure II.18 : Photo du cône d'Abram's.

Exécution :

- L'essai doit être réalisé sur une surface horizontale,
- L'essai complet doit être exécuté sans interruption en moins de deux minutes et demie,
- Démouler verticalement (sans mouvement de torsion) en 5 à 10 secondes,
- Mesurer l'affaissement du béton à 10mm près.



Figure II.19 : Photos des affaissements au cône des quatre bétons étudiés.

L'affaissement est mesuré par la différence de hauteur entre le moule et le niveau supérieur du béton après démoulage. Le résultat obtenu permet ainsi de classer les bétons. Comme on peut le constater sur la figure II.19, les quatre compositions gardent leur intégrité après affaissement du béton sous son poids propre.

Tableau II.14 : Récapitulatif des résultats des essais d'affaissement au cône.

Désignation du béton	BO	BC ₁₀	BC _{17,5}	BC ₂₅
Affaissement au cône (cm)	6	8,5	9	7

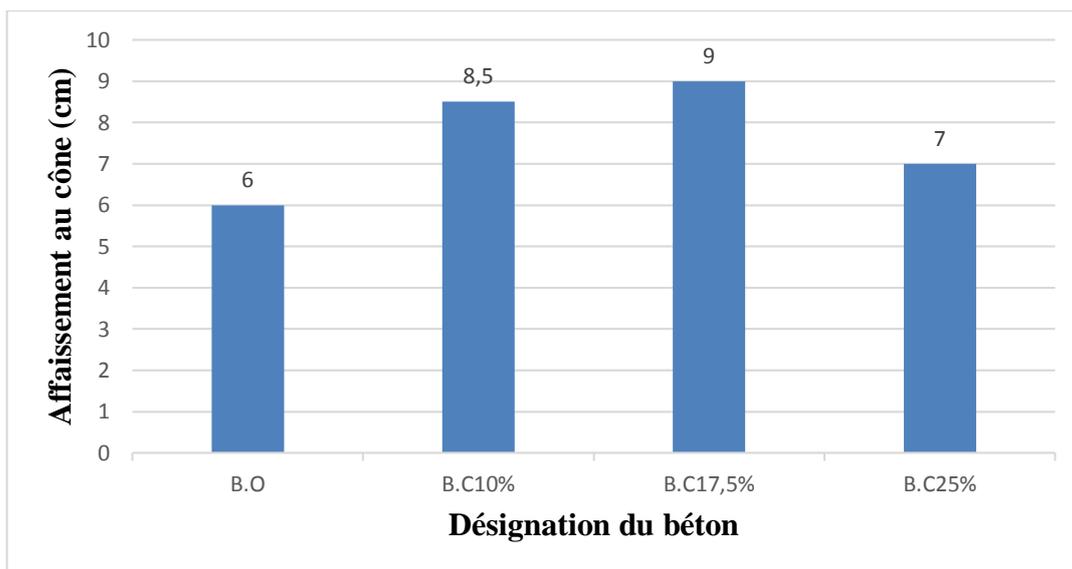


Figure II.20 : Affaissement au cône d'Abram's des quatre bétons confectionnés.

Les affaissements mesurés varient entre 6 et 9cm, les quatre compositions peuvent être classées dans la catégorie des "bétons plastiques".

II.2.3. Mesure de la densité des bétons à l'état frais

Cette mesure a pour but de vérifier si avec les dosages pratiqués pour la fabrication du béton on obtient bien un mètre cube de béton. La tolérance admise étant de 5%. L'obtention d'une densité réelle supérieure à la densité théorique indique que l'on obtient moins d'un mètre cube, et le béton a un dosage en ciment plus riche que celui prévu, réciproquement lorsque la densité réelle est inférieure à la densité théorique, la composition donne plus d'un mètre cube de béton, et le béton est sous dosé en ciment. Les corrections à apporter sur la composition doivent toujours se faire sur les granulats.

L'essai est assez simple et nécessite peu de moyens. Il suffit de remplir un moule de volume connu (V) (dans les mêmes conditions que celle du chantier) et de le peser, soit une masse (M).

La masse volumique se déduira alors de :

$$\text{Masse volumique du béton} = \frac{M}{V} \quad [\text{Eq.II.9}]$$

Les mesures expérimentales des densités à l'état frais ont été effectuées sur des moules cylindres comme le montre clairement les photos suivantes :



Figure II.21 : Mesure de la densité des bétons à l'état frais.

Les résultats des essais de la densité à l'état frais des 4 bétons sont présentés dans le tableau II.15.

Tableau II.15 : Densité des bétons à l'état frais.

Désignation du béton	Masse volumique expérimentale (kg/m ³)	Masse volumique théorique (kg/m ³)	Ecart (%)
BO	2395	2404	0,4
BC ₁₀	2390	2366	1
BC _{17,5}	2350	2337	0,6
BC ₂₅	2298	2308	0,4

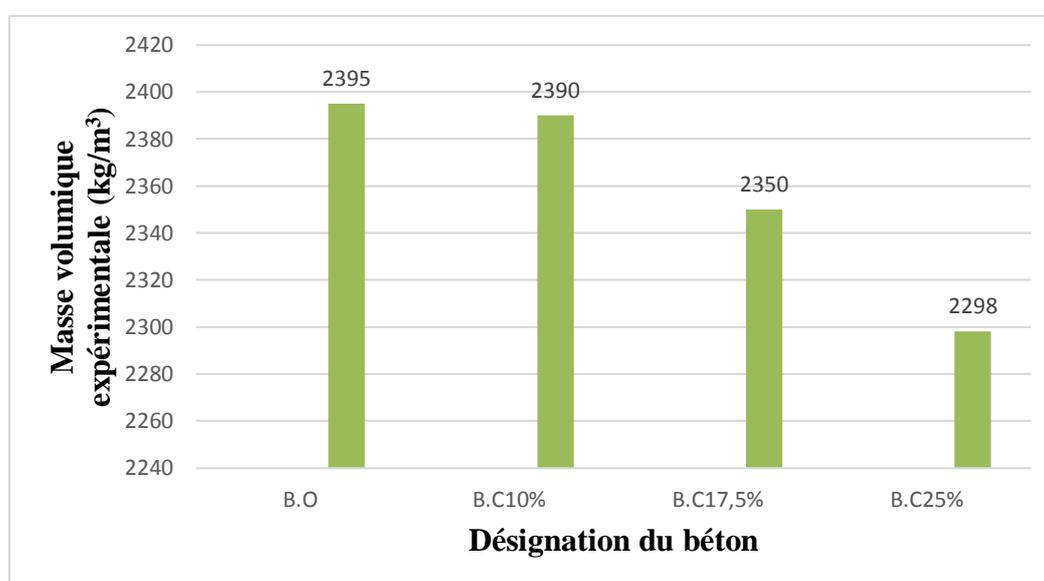


Figure II.22 : Masses volumiques des bétons à l'état frais.

La différence entre densités théoriques et expérimentales pour les bétons testés varie entre 0,4 et 1%. Les écarts sont minimes et ne dépassent pas le seuil limite admissible qui est de 5%. Ainsi il n'y a aucune correction à faire aux niveaux des compositions testées.

III. Conclusion du deuxième chapitre

Ce chapitre a été consacré à la caractérisation des constituants et la formulation de quatre bétons. En premier lieu, le choix s'est porté sur des matériaux locaux et disponibles et ce pour des questions économiques. En effet dans la confection du béton, le choix des granulats porte souvent sur des matériaux disponibles au voisinage de l'ouvrage à bâtir pour raison de coût du transport.

Le tableau suivant récapitule les propriétés des compositions retenues et qui font faire l'objet d'une caractérisation mécanique dont les résultats seront présentés dans le troisième et dernier chapitre.

Tableau II.16 : Formulations retenues des différents bétons.

Composant	Désignation des bétons			
	BO	BC ₁₀	BC _{17,5}	BC ₂₅
Sable roulé (0/3)	570	570	570	570
Gravillons (4/8)	328	328	328	379
Gravier (8/16)	492	492	492	567
Poudrette de caoutchouc	0	20,6	36	51,4
Ciment CPJ-CEM IIA 42,5	400	400	400	400
Eau	195	185	175	214

Références bibliographique du deuxième chapitre

- [1] **Norme NA255.** Mesure des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux. Institut Algérien de la normalisation.
- [2] **Norme 451.** Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée. Institut Algérien de la normalisation
- [3] Propreté des graviers
- [4] **Norme NA2067.** Analyse granulométrique par tamisage. Institut Algérien de la normalisation.
- [5] **Norme NA451.** Mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables. Institut Algérien de la normalisation.
- [6] **Norme NA455.** Equivalent de sable. Institut Algérien de la normalisation.
- [21] **CHERAIT Yacine, NAFA Zahredinne.** Eléments de matériaux de construction. Edition : Direction de la publication de l'université 8 mai 1945 Guelma. N° ISBN 9961-9548-7-4, 2007.
- [8] article pneu
- [9] **Michelin France-Pneu :** <http://www.mechelin.fr/michelinfr/index.jsp>
- [10] **ONS.** Office National des Statistiques de l'Algérie [en ligne]. <http://www.ons.dz/>
- [11] <http://www.drc.dz>.
- [12] **Norme NA1966.** Bétons - Eau de gâchage pour béton de construction. Institut Algérien de la normalisation.
- [13] <http://www.gica.dz>>fiche-technique-ciments.
- [14] **Dreux G.** (1986). Nouveaux guide du béton, Eyrolles, 5ème Edition, Paris.
- [15] **Bolomey J.C.** (1925) «Durcissement des mortiers et bétons» Paris :Rouge et Cie, 1925.
- [16] **Faury J.** (1944) «Les bétons : Influence de ses constituants inertes, règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers», Hachettes.

CHAPITRE III

CARACTERISATION MECANIQUE DES BETONS

I. Introduction

Les bétons qui ont fait l'objet de la présente étude ont été élaborés à partir de constituants locaux. La conception des bétons (un béton ordinaire et trois bétons caoutchoutés) et les essais ont été réalisés conjointement au sein du laboratoire pédagogique du département de génie civil et du laboratoire de recherche (LGCH) de l'Université 8 mai 1945 de Guelma. Les protocoles expérimentaux ont été effectués conformément aux normes en vigueur en Algérie (normes NA).

Les désignations ainsi que les notations des bétons conçus sont consignées dans le [tableau III.1](#).

Tableau III.1 : Désignations et notations des bétons retenus.

Notation	Désignation
BO	Béton ordinaire
BC₁₀	Béton contenant 10% de poudrette de caoutchouc
B_{17,5}	Béton contenant 17,5% de poudrette de caoutchouc
BC₂₅	Béton contenant 25% de poudrette de caoutchouc

I.1. Propriétés étudiées

Pour chacune des compositions énumérées dans le [tableau III.1](#), nous avons mesurée expérimentalement les propriétés suivantes :

- 1) La masse volumique du béton à l'état durci,
- 2) Les résistances à la compression sur cylindre à 14, 28 et 45 jours,
- 3) Les résistances par fendage sur cylindre à 14, 28 et 45 jours,
- 4) Les résistances à la traction par flexion à 28 jours,
- 5) Les résistances à la compression à l'aide d'un scléromètre digital à 28 jours.

Les compositions, des bétons, retenues pour cette étude sont présentées dans le [tableau III.2](#).

Tableau III.2 : Compositions des bétons étudiés pour 1m³.

Notations	Dosage en kg/m ³					
	Ciment	Eau	Gravillon 4/8	Gravier 8/16	Sable	Poudre de caoutchouc
BO	400	242	337	834	591	0
BC₁₀	400	242	337	834	532	20,6
BC_{17,5}	400	242	337	834	488	36
BC₂₅	400	242	337	834	443	51,4

I.2. Conduite des essais

Nous présenterons dans ce qui suit, les différentes étapes suivies et respectées pour la réalisation des essais sur les différentes compositions retenues. Deux formes de corps d'épreuves ont été coulées pour chacune des compositions : ils s'agissent de cylindres (16x32) cm² et de parallélépipèdes (8x8x30) cm³.



Figure III.1 : Corps d'épreuves utilisés [1].

I.3. Cure et conservation des éprouvettes

Une fois coulées, les échantillons ont été conservés à la température ambiante du laboratoire de génie civil. Le démoulage est effectué après 24 heures et les éprouvettes sont ensuite conservées à l'air libre jusqu'au démarrage des essais respectifs.

II. Résultats des essais

II.1. Mesure de la masse volumique des bétons à l'état durci [2]

La mesure de la densité des bétons à l'état durci s'est effectuée par simple pesée des moules cylindriques (16x32) cm² comme le montre la figure suivante :



Figure III.2 : Mesure de la masse volumique des bétons à l'état durci.

La masse volumique à l'état durci (M_v) s'obtient grâce à l'expression suivante :

$$M_v \left(\text{kg/m}^3 \right) = \frac{\text{Masse}}{\text{volume éprouvette}} = \frac{\text{Masse}}{0,00643} \cong 155,5 \text{Masse (kg)} \quad [\text{Eq.III.1}]$$

Les résultats obtenus sont directement reportés sur le [tableau III.3](#).

Tableau III.3 : Masses volumiques des bétons à l'état durci.

Désignation du béton	Masse volumique (kg/m ³)
BO	2353*
BC ₁₀	2281 (3,2%)
BC _{17,5}	2274 (+3,5%)
BC ₂₅	2236 (+5,2%)

* Valeur prise comme référence.

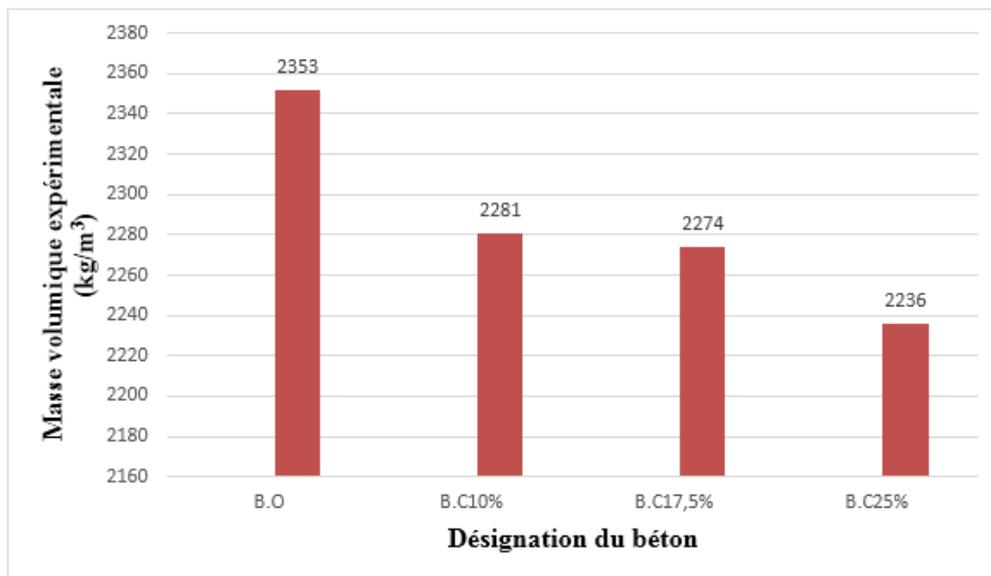


Figure III.3 : Masses volumiques des bétons à l'état durci.

Commentaires

- Comme prévu, on constate que la substitution d'une partie du sable par de la poudre de caoutchouc s'accompagne d'une chute de la masse volumique du béton durci. En effet la poudrette de caoutchouc présente une masse volumique de 870kg/m³, contre une masse volumique de 2500kg/m³ pour le sable, l'opération de substitution s'accompagne ainsi d'une baisse des masses volumiques. Par ailleurs cette baisse croît de manière concomitante avec le

taux de substitution. Cependant les écarts restent relativement peu significatifs et varient entre 3,2 et 5,2%.

II.2. Résistance à la compression simple (norme NA427 [3])

II.2.1. Principe de l'essai

L'objet de cet essai est de déterminer la résistance nominale en compression simple d'un béton. Il s'agit de soumettre une éprouvette normalisée qui est représentée par un cylindrique à base circulaire de 200cm² de section droite, dont la hauteur est égale au double du diamètre (32cm). Les modalités de confection et de conservation des éprouvettes sont définies de façon très précise par les normes **NA424**[4], **NA426**[5] et **NA5093**[6]. Selon les normes, la résistance à la compression doit représenter la moyenne arithmétique des résistances à la compression d'au moins trois essais réalisés sur des échantillons d'une même composition.



Figure III.4 : Essais d'écrasement en compression simple.

II.2.2. Expression des résultats

La résistance à la compression des éprouvettes testées est donnée par la formule :

$$F_c = \frac{10F}{S} \quad \text{[Eq.III.2]}$$

Dans laquelle :

F_c : résistance à la compression en Méga Pascal (MPa),

F : charge maximale supportée par l'éprouvette en kilo newtons (kN),

S : surface de la face d'essai en centimètres carrés (200cm² dans notre cas).

II.2.3. Résistances en compression des bétons à 28 jours

Les résistances ultimes des bétons sur cylindre à 28 jours sont reportées sur le tableau III.4.

Tableau III.4 : Résistances en compression sur cylindre à 28 jours des bétons étudiés.

Désignation du béton	Théorique	BO	BC ₁₀	BC _{17,5}	BC ₂₅
Résistance en compression à 28 jours (MPa)	25,6*	21,7**	20,13 (-7,2%)	16,3 (24,9%)	17,3 (-20,3%)

* Déduite de l'expression de Faury,

** Valeur prise comme référence.

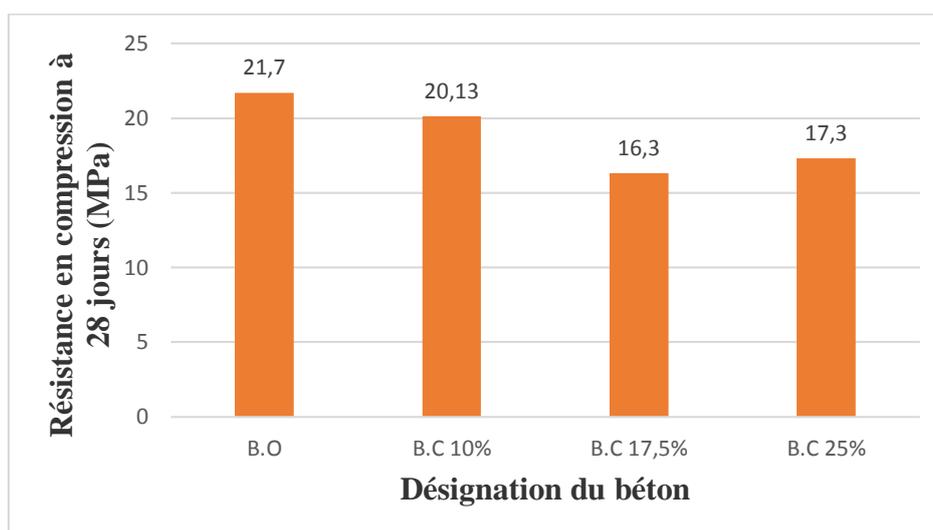


Figure III.5 : Résistances en compression à 28 jours des bétons étudiés.

Commentaires

- ✚ L'incorporation de poudre de caoutchouc s'accompagne d'une chute de la résistance du béton à 28 jours. Les chutes constatées varient entre 7,2 et 24,9% et suivent le même sens que le taux de substitution. A titre d'exemple, la substitution de 10% du poids du sable par de la poudre de caoutchouc fait passer la résistance en compression sur cylindre de 21,7MPa à 20,13MPa, soit une baisse de 7,2%.
- ✚ Par ailleurs nous constatons un écart relativement important entre résistance en compression prévue (selon la formule de Faury) et celle mesurée (25,6MPa contre 21,7MPa) pour le béton de référence. Cet écart de 15,2% peut s'expliquer notamment par la qualité relativement médiocre du sable utilisé (et principalement son équivalent de sable très bas) ainsi que les températures de conservation des éprouvettes. Sur ce point et selon les normes en vigueur, les éprouvettes doivent être conservées sous une température de 20°C, condition que l'on ne pouvait pas respecter faute de système de contrôle de la température disponible au niveau du laboratoire.

- ✚ Enfin concernant le mode de rupture, l'on constate qu'à la charge maximale, les 12 échantillons testés se sont séparés en plusieurs morceaux, comme l'illustre parfaitement bien les photos de la figure III.6. Les modes de ruptures observés ne sont pas influencés par l'opération de substitution



Figure III.6 : Faciès des surfaces de rupture en compression.

II.2.4. Influence de l'âge du béton sur sa résistance à la compression

Afin d'observer l'évolution de la résistance en compression des bétons dans le temps, nous avons procédé à des mesures à 14 et 45 jours d'âges des éprouvettes. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau III.5.

Tableau III.5 : Evolution des résistances en compression dans le temps des bétons étudiés.

Résistances à la compression à différents âges		Désignation du béton			
		BO*	BC ₁₀	BC _{17,5}	BC ₂₅
	14 jours	19,3	17,8	16,2	15,3
			(-7,8%)	(-16,1%)	(-20,7%)
	28 jours	21,4	20,7	16,3	17,3
			(3,3%)	(23,8%)	(19,2%)
	45 jours	22,5	20,61	21,27	17,4
			(8,4%)	(5,5%)	(22,7%)

* Valeur prise comme référence.

Sur la figure III.7 les résistances des bétons en compression simple sur cylindres sont présentées en fonction du temps. En analysant les courbes de cette figure, on peut constater que ces résistances évoluent toutes de manière similaire.

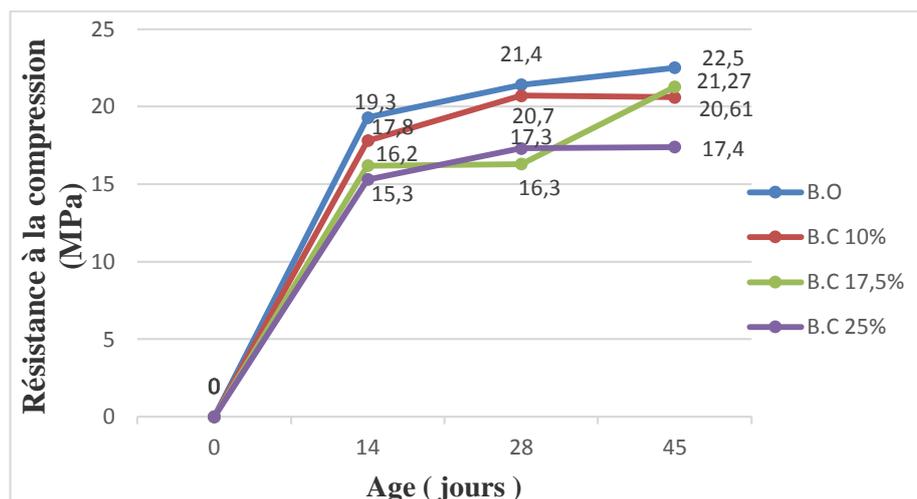


Figure III.7 : Evolution de la résistance à la compression des bétons étudiés dans le temps.

Commentaires

- Sur la figure III.7 les résistances en compression simple sur cylindres des quatre bétons sont présentées en fonction du temps. En analysant les courbes de cette figure, on peut constater que ces résistances évoluent pratiquement toutes de manière similaire. On constate une évolution rapide des résistances au jeune âge (jusqu'à 7 jours environ) et puis une évolution plus longue.

Il nous a semblé intéressant de comparer l'évolution des résistances réelles avec celles données par le règlement Algérien CBA/93 [7]. Selon ces règles, et pour les bétons non traités thermiquement on pourra utiliser l'équation III.3 pour suivre l'évolution de la résistance en compression.

$$f_{cj} = \left(\frac{j}{4,76 + 0,83 \times j} \right) f_{c28} \quad \text{pour : } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa} \quad [\text{Eq.III.3}]$$

Nous avons entrepris un calcul des résistances prévues au bout de 14 jours à partir de la résistance réelle atteinte au bout de 28 jours.

Tableau III.6 : Comparaison entre résistances à la compression réelles et règlementaires.

Désignation du béton	BO	BC ₁₀	BC _{17,5}	BC ₂₅
Résistance mesurée à 14 jours (MPa)	19,3	17,8	16,2	15,3
Résistance prévue selon le CBA93(MPa)	18,5 (4,1%)	17,2 (3,4%)	13,94 (8,6%)	14,8 (3,3%)

Commentaires

- ✚ On peut constater que les valeurs des résistances déduites à du CBA/93 sont légèrement plus faibles les résistances réelles.
- ✚ Cependant les différences sont minimales, et les lois proposées par les règles CBA/93 sur l'évolution des résistances en compression peuvent donc être utilisées pour les bétons caoutchoutés.

II.3. Résistance à la traction par flexion

II.3.1. L'essai de flexion 3 points [9]

Il consiste à soumettre une éprouvette de forme prismatique de section carrée (8cm de côté) et de 24cm de portée à une charge concentrée appliquée au milieu (figure III.8).

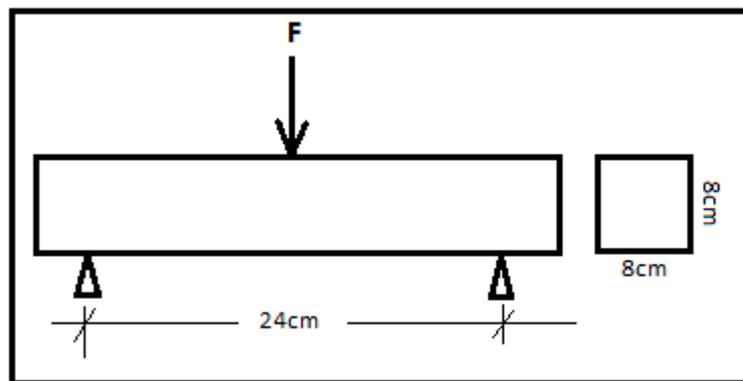


Figure III.8 : Essai de flexion 3 points sur éprouvette prismatique (8.8.30) cm³.

Si "F" correspond à la charge de rupture de l'éprouvette, la contrainte limite du béton se déduit alors par application de la formule de la résistance des matériaux qui s'écrit :

$$\sigma_{tf} = \frac{F \times \text{portée}}{4 \text{Inertie}} = \frac{3F \times \text{portée}}{a^4} \quad [\text{Eq.III.4}]$$

Avec :

$$\text{Inertie} = \frac{a^4}{12} = \frac{4096}{12} \approx 341 \text{cm}^4$$

Portée = 24cm.

II.3.2. Résistances des bétons en traction par flexion à 28 jours

Les essais ont été conduits à vitesse de chargement constant, et les résultats obtenus sont directement reportés sur le tableau III.7.

Tableau III.7 : Résistances à la traction par flexion, exprimées en MPa.

Désignation du béton	BO	BC ₁₀	BC _{17.5}	BC ₂₅
Résistance en traction par flexion (MPa)	2,18*	1,8 (17,4%)	1,82 (16,5%)	2 (8,3%)

* Valeur prise comme référence.

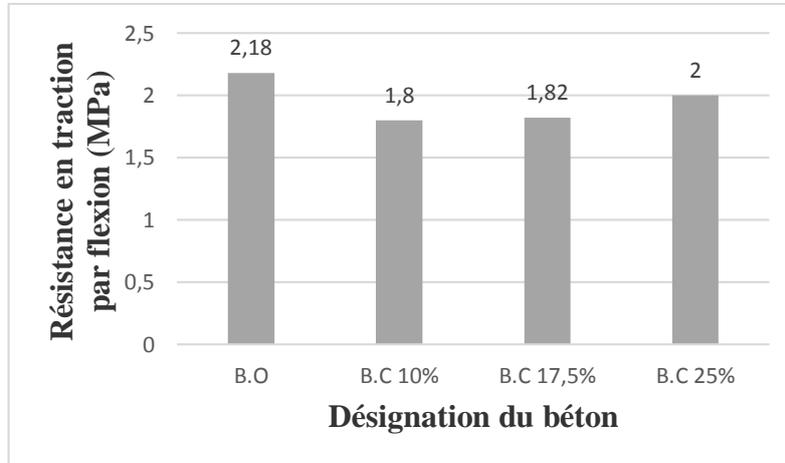


Figure III.9 : Résistance en traction par flexion à 28 jours.

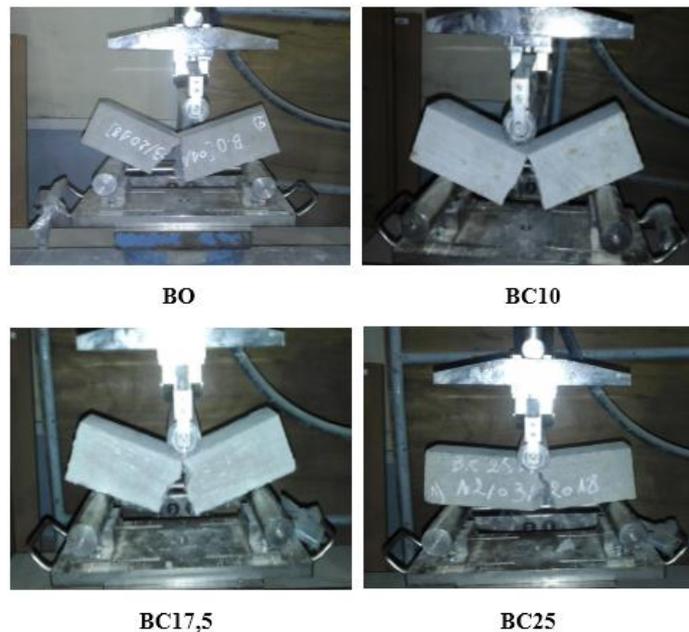


Figure III.10 : Processus de rupture des éprouvettes en traction par flexion.

Comme on peut le constater sur les quatre photos de la figure III.10 l'ensemble des éprouvettes se sont cassées au milieu de la poutre, (là où le moment de flexion est maximal), et particulièrement aux niveaux des fibres inférieures (là où se développent les contraintes de traction). Ainsi les ruptures des éprouvettes ont eu lieu par dépassement de la contrainte ultime de traction par flexion des bétons.

II.3.3. Relation entre résistance en compression et en traction

L'article A.2.1.1.2 des règles CBA/93 [7] définit une relation conventionnelle reliant la résistance en compression d'un béton à sa résistance en traction. Cette relation est exprimée par l'équation suivante :

$$f_{tj} = 0,06f_{cj} + 0,6 \quad (\text{MPa}) \quad [\text{Eq.III.5}]$$

Dans lesquelles les résistances sont exprimées en MPa. A partir de cette expression, nous avons reproduit dans le tableau suivant, les valeurs des résistances en traction mesurées ainsi que celles déduites de l'expression précédente.

Tableau III.8 : Comparaison entre résistances à la traction réelles et règlementaires à 28 jours.

Désignation du béton		BO	BC ₁₀	BC _{17,5}	BC ₂₅
Résistance à la traction flexion (MPa)	Mesurée	2,18	1,8	1,82	2
	Estimée	1,9 (12,8%)	1,81 (0,55%)	1,58 (13,3)	1,64 (18%)

On peut constater que les valeurs des résistances en traction déduites à partir de la relation (III.5) sont plus faibles que les résistances mesurées. Ainsi donc cette expression sous-estime la résistance réelle des BAP.

II.4. Résistance au fendage (ou essai brésilien) [8]

Il consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un effort de fendage, par application de forces de compression radiales suivant deux génératrices diamétralement opposées (figure III.12).

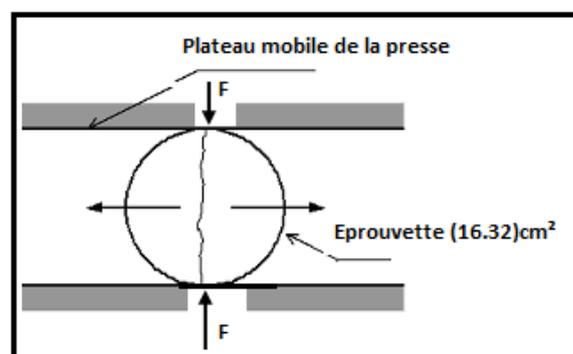


Figure III.11 : Essai brésilien.

L'essai de traction par fendage a été effectué sur des éprouvettes cylindriques (16x32) cm² en utilisant un dispositif convenable. La résistance à la traction du béton se déduit de la force appliquée «F» par la formule empirique suivante :

$$\sigma = 0,55 \frac{F}{(d \times l)} \quad [\text{Eq. III.6}]$$

Où (F) représente la charge de compression transversale provoquant la rupture par fendage, (d) et (l) étant respectivement le diamètre (16cm) et la longueur (32cm) de l'éprouvette testée.

II.4.1. Résistances des bétons par fendage à 28 jours

Les résistances ultimes au fendage des bétons sur cylindre à 28 jours sont reportées sur le tableau suivant :

Tableau III.9 : Résistance à la traction par fendage, exprimées en MPa.

Désignation du béton	BO*	BC ₁₀	BC _{17.5}	BC ₂₅
Résistance par fendage à 28 jours (MPa)	1,94	1,97 (+1,5%)	1,92 (-1%)	1,6 (-17,5%)

* Valeur prise comme référence.

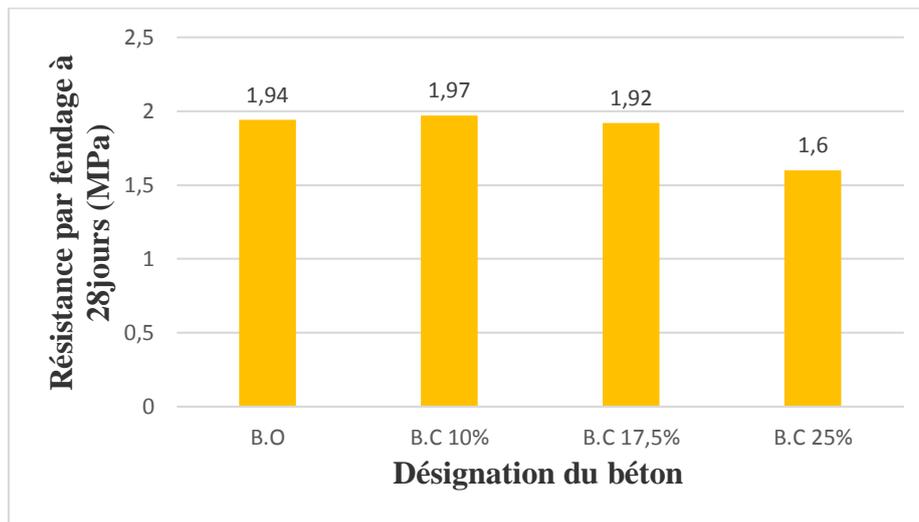


Figure III.12 : Résistances par fendage à 28 jours des bétons étudiés.



BO

BC₁₀BC_{17,5}BC₂₅

Figure III.13 : Faciées de rupture des éprouvettes sous fendage.

Commentaires

- ✚ Au niveau des résistances des bétons par fendage, les écarts de résistances sont minimales pour le béton ordinaire et les deux bétons contenant respectivement 10 et 17,5% de substitution, cependant pour le taux de substitution, la chute est notable et s'élève à plus de 17,5%.
- ✚ La figure III.13 montre des photos des échantillons des quatre bétons après écrasement en compression. La totalité des éprouvettes se sont rompues en se classant en deux parties pratiquement similaires. On voit nettement que les surfaces de rupture épousent le contour des granulats. Ceci est dû à une séparation entre le mortier et les granulats par rupture de l'auréole de transition le long des surfaces latérales des granulats. Par ailleurs, aucune différence notable au niveau des faciès de rupture n'est observée.

II.4.2. Influence de l'âge du béton sur sa résistance au fendage

Afin d'observer l'évolution de la résistance au fendage des bétons testés dans le temps, nous avons procédé à des mesures à 14 et 45 jours d'âges des éprouvettes. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau III.10.

Tableau III.10 : Evolution des résistances au fendage dans le temps des bétons étudiés.

Résistances à la compression à différents âges		Désignation du béton			
		BO	BC ₁₀	BC _{17,5}	BC ₂₅
Résistance au fendage (MPa)	14 jours	1,73	1,77	1,87	1,49
	28 jours	1,94	1,97	1,92	1,60
	45 jours	2,30	2,29	1,93	1,71

La figure III.14 montre clairement que la résistance à la traction par fendage augmente avec l'âge des éprouvettes.

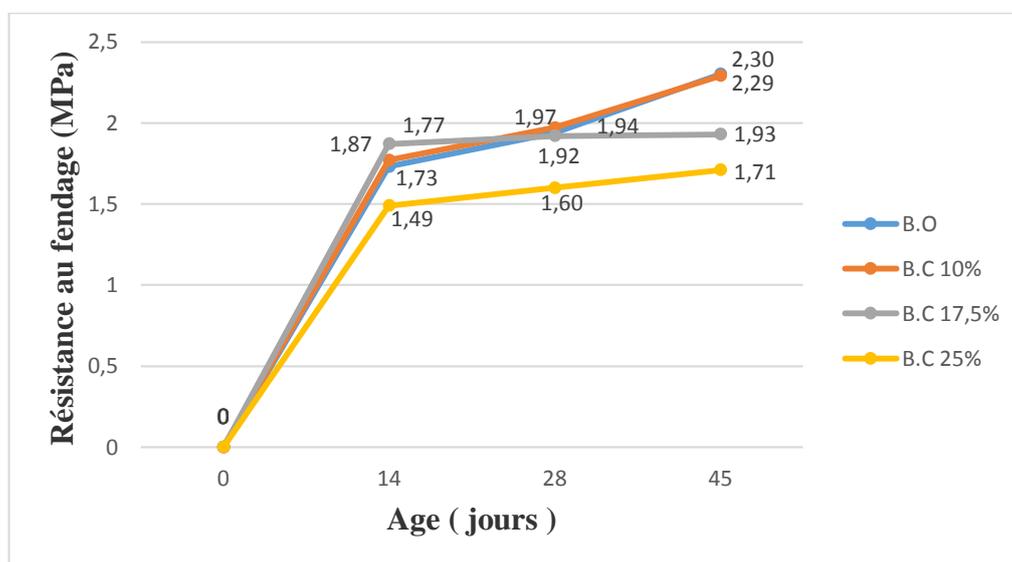


Figure III.14 : Evolution de la résistance à la traction par fendage dans le temps.

Commentaires

- ✚ Là aussi on constate que la résistance à la traction par fendage évolue de manière similaire à celle en compression, avec toujours ces évolutions croissantes dans le temps. Les résistances augmentent de manière significative les deux premières semaines, au-delà, l'augmentation est plus ralentie.

Cependant les résultats sont plus groupés et les écarts entre les quatre bétons testés ne dépassent pas les 16% à 28 jours.

II.5. Détermination des résistances par un essai non destructif

II.5.1. Principe du scléromètre [10]

Il s'agit sans aucun doute de l'instrument le plus utilisé dans le diagnostic des ouvrages déjà bâtis. Le scléromètre est composé d'une tige en acier, sortant d'un cylindre (figure III.15), qui est appuyée sur le béton et comprime un ressort. En fin de course, ce ressort projette une masse sur la tige, sur laquelle elle rebondit ; ce rebondissement, d'autant plus important que le béton est dur, est mesuré soit par un index (sur les anciens modèles) soit sur un cadran digital pour les modèles récents.

Il existe une relation directe entre la dureté superficielle et la résistance du béton à la compression.



Figure III.15 : Photo du scléromètre utilisé.

- Conduite de l'essai

L'emploi du scléromètre est très simple, et consiste à :

- Vérifier dans un premier temps, l'étalonnage de l'appareil. Cette opération vise à s'assurer de la bonne rigidité du ressort qui a tendance à faiblir dans le temps ;
- Éliminer toutes les aspérités dues au coffrage ;
- Préparer la surface à tester en enlevant l'enduit appliqué (avec la pierre abrasive fournie avec l'appareil) ;
- Supprimer toute trace de peinture ou d'enduit ;
- Faire apparaître la structure interne du béton ;
- Appliquer la tige perpendiculairement à la surface et appuyer sur le scléromètre ; lire la valeur, sur le cadran digital (ou sur l'index), de la résistance au rebond du béton ;
- Répéter l'opération pendant au moins dix fois.
- Il y a également lieu de noter l'épaisseur de la paroi étudiée ainsi que le taux d'humidité.

L'appareil peut être utilisé sur des positions autres qu'horizontale, simplement il faudrait effectués des corrections fournies avec l'appareil. Lors du calcul de la résistance moyenne du béton, on doit éliminer les valeurs trop faibles ou trop fortes.



Figure III.16 : Conduite d'un essai sclérométrique sur éprouvette (16.32) cm².

Le scléromètre constitue donc un essai très rapide d'exécution, d'un coût réduit, avec possibilité à l'utilisateur de travailler sans source d'alimentation électrique. Ces avantages ont fait du scléromètre un appareil fréquemment utilisé pour l'expertise des ouvrages. Cependant cet appareil ne fournit que des renseignements locaux et superficiels pour une couche de deux centimètres au plus à la surface de l'éprouvette soumise à l'essai.

II.5.2. Résistances en compression des bétons à 28 jours

Les résistances à 28 jours déterminées par le scléromètre des bétons sur cylindre à 28 jours sont reportées sur le tableau suivant :

Tableau III.11 : Résistance en compression à 28 jours des bétons étudiés.

Désignation du béton	BO	BC ₁₀	BC _{17.5}	BC ₂₅
Résistances par scléromètre à 28 jours (MPa)	25,4	27,4 (+7,9%)	29,4 (15,7%)	29,3 (15,4%)

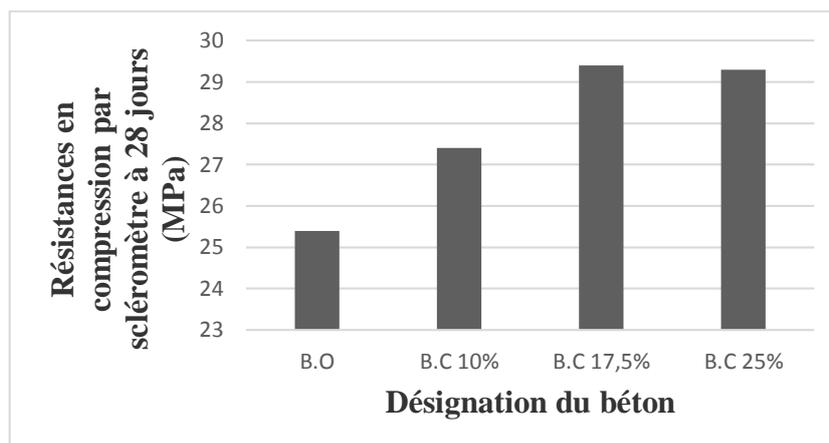


Figure III.17 : Résistances en compression par scléromètre à 28 jours des bétons étudiés.

Commentaires

- ✚ La mesure des résistances en compression sur cylindre par scléromètre à 28 jours donne l'avantage aux bétons à base de poudre de caoutchouc. Des écarts entre béton ordinaire et bétons caoutchoutés sont visibles et varient entre 7,5 et 15,4%.
- ✚ Par ailleurs nous constatons un écart relativement important entre résistances en compression ultimes c'est-à-dire obtenues par ruines des bétons (de 17,3 à 21,7MPa) et résistances obtenus par l'essai non destructif (de 25,4 à 29,3MPa). pour le béton de référence. Cet écart de 15,2% peut s'expliquer notamment par la qualité relativement médiocre du sable utilisé (et principalement son équivalent de sable très bas) ainsi que les températures de conservation des éprouvettes. Sur ce point et selon les normes en vigueur, les éprouvettes doivent être conservées sous une température de 20°C, condition que l'on ne pouvait pas respecter faute de système de contrôle de la température disponible au niveau du laboratoire.

II.5.3 Etude comparative entre résistances réelles et résistances sclérométriques

Dans cette partie, nous exposons les valeurs des résistances à 28 jours des bétons, obtenues par un essai destructif sur presse traditionnelle et par un essai non destructif à l'aide d'un scléromètre digital.

Tableau III.12 : Résistances à 28 jours déduites à partir d'essai destructif et non destructif.

Désignation du béton	BO*	BC ₁₀	BC _{17.5}	BC ₂₅
Résistance en compression ultime à 28 jours (MPa)	21,7	20,13	16,3	17,3
Résistance en compression par scléromètre à 28 jours (MPa)	25,4 (17%)	27,4 (36%)	29,4 (80,4%)	29,3 (69,4%)

* Valeur prise comme référence.

Le scléromètre donne des valeurs optimistes pour la résistance en compression des bétons. Pour le béton ordinaire, l'écart constaté est de 17%, et intègre ainsi la précision de cet essai. En effet, et selon les résultats de la littérature spécialisée, la précision du scléromètre est d'environ 30%. Cependant concernant les bétons à base de poudre de caoutchouc, les écarts observés sont nettement plus élevés. A titre d'exemple pour le BC₂₅, nous avons eu un écart entre résistance réelle et sclérométrique de plus de 69,4%, ce qui laisse à penser l'inadaptation d'un tel essai pour ce type de bétons.

III. Conclusion du troisième chapitre

Concernant l'étude des propriétés mécaniques (notamment la résistance en compression sur cylindre, la résistance en traction par flexion et la résistance au fendage) des bétons élaborés à partir de poudre de caoutchouc, l'ensemble des résultats montre sans équivoque que l'incorporation de la poudre de caoutchouc est très préjudiciable vis-à-vis :

- ✚ des résistances à la compression : les chutes constatées varient entre 7,2 et 24,9% et suivent le même sens que le taux de substitution,
- ✚ des résistances à la traction par flexion : les chutes constatées varient entre 8,3 et 17,4% et suivent le même sens que le taux de substitution,
- ✚ des résistances par fendage : les chutes constatées varient entre 1 et 17,5% et suivent le même sens que le taux de substitution.

Ces résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation du dosage de substitution en poudre de caoutchouc. Ces baisses constatées peuvent s'expliquer notamment par une faible adhérence des déchets avec la matrice cimentaire. En effet, une adhérence insuffisante est souvent source de développement de fissures.

Cependant les essais non destructifs effectués pour estimer les résistances en compression indiquent des apports favorables de la poudre de caoutchouc.

Références bibliographiques du troisième chapitre

- [1] **Norme NA2600.** Bétons - Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques. Institut Algérien de la normalisation.
- [2] **Norme NA435.** Bétons - Béton durci - Détermination de la masse volumique. Institut Algérien de la normalisation.
- [3] **Norme NA427.** Bétons - Détermination de la résistance à la compression des éprouvettes. Institut Algérien de la normalisation.
- [4] **Norme NA424.** Bétons - essais de béton - Dimensions, tolérances et destination des éprouvettes. Institut Algérien de la normalisation.
- [5] **Norme NA426.** Bétons - Essais de béton - Eprouvettes - Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance. Institut Algérien de la normalisation.
- [6] **Norme NA5093.** Essai pour béton durci - Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance. Institut Algérien de la normalisation.
- [7] **Règles de conception et de calcul des structures en béton armé (CBA/93).** «Document technique règlementaire B.C.2.41», Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (C.G.S), Alger, 1994.
- [8] **Norme NA430.** Bétons - Détermination de la résistance à la traction par fendage des éprouvettes. Institut Algérien de la normalisation.
- [9] **Norme NA428.** Bétons - Détermination de la résistance à la flexion des éprouvettes. Institut Algérien de la normalisation.
- [10] **Cherait Yacine, Nafa Zahredinne.** «Eléments de matériaux de construction et essais». Editions Direction des Publications Universitaires, 2007, I.S.B.N : 9961-9548-7-4.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

D'une manière générale, cette étude a mis en évidence que la substitution d'une partie des granulats naturels (le sable) par des pneus usagés découpés en poudrettes engendrait des différences mineurs au niveau des propriétés rhéologiques du béton à l'état frais. En effet les différences constatées entre densités théoriques et expérimentales pour les bétons testés varient entre 0,4 et 1%, est donc minimes. Concernant l'ouvrabilité, les 3 bétons caoutchoutés qui étaient élaborées avec des taux de substituant compris entre 10 et 25%, présentaient des affaissements au cône d'Abram's variant entre 7, et 9cm, contre un affaissement pour le béton sans substitution. Les quatre compositions peuvent être classées parmi la catégorie des bétons dits plastiques.

Concernant l'état durci, l'ensemble des essais réalisés montre sans équivoque que l'incorporation des granulats de caoutchouc est très préjudiciable vis-à-vis des résistances à la compression, au fendage et à la traction par flexion. Ces résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation du dosage de substitution en poudrette de caoutchouc. Ces baisses constatées peuvent s'expliquer notamment par une faible adhérence des déchets avec la matrice cimentaire. En effet, une adhérence insuffisante est souvent source de développement de fissures.

Par ailleurs la chute de la résistance, le béton de G.C sous la contrainte laisse apparaître difficilement les fissures. Les fissures qui représentent le principal handicap des matériaux cimentaires (béton). Ces baisses des performances mécaniques risquent d'avoir des conséquences néfastes sur la durabilité du nouveau béton. Des études poussées dans ce domaine sont donc à prévoir.

ANNEXES

Annexe I

DOUIB RECYCLAGE CAOUTCHOUC [11]

Création

Créée en 2012, DOUIB RECYCLAGE CAOUTCHOUC est une société Algérienne spécialisée dans la fabrication de granulats de caoutchouc à partir des pneumatiques usagés non réutilisables. Les granulats produits sont utilisés dans diverses applications tels que les sols sportifs, mais aussi les sols récréatifs, les enrobés modifiés aux élastomères ou encore les pièces moulées. Grâce à notre savoir-faire, nous valorisons 100% des constituants des pneus : le caoutchouc, la fibre métallique et la fibre textile. Chaque année 1200 tonnes de pneus sont ainsi recyclées pour produire environ 10 000 tonnes de granulats de caoutchouc, 2 500 tonnes d'aciers et 2 500 tonnes de textiles.

Domaine d'application

Même usé, le pneu conserve de nombreuses qualités : souplesse du caoutchouc, solidité de sa structure, pouvoir drainant, résistance, pouvoir calorifique, etc. Ces avantages ouvrent pour les pneus usagés, plusieurs applications pratiques. Citons à titre d'exemple :

Gazons synthétiques : Pour les stades de foot ou de rugby. Sous forme de granulats libres maintenant les fibres d'herbe synthétique, le pneu permet une utilisation «tout temps» du stade, une qualité de jeu identique en toute saison, une lutte contre la sécheresse ou l'inondation des terrains, une réduction de l'arrosage et de l'entretien.

- **Acierie :** Contenant une grande quantité de carbone, les pneus peuvent remplacer l'anthracite que les aciéries utilisent habituellement pour réduire la rouille des ferrailles usagées qu'elles recyclent.

- **Enrobés bitumineux :** Broyés finement sous forme de poudrette, les pneus peuvent être incorporés aux revêtements routiers, ce qui abaisse le niveau sonore du passage des véhicules et limite partiellement l'aquaplaning.

- **Objets moulés :** La poudrette de pneu peut être vulcanisée ou mélangée avec un liant pour fabriquer divers objets moulés, par exemple des roulettes de conteneurs à déchets ou de chariots de supermarché.

L'utilisation de poudrette

Utilisateurs, revendeurs de « poudrette » et professionnels du BTP, DRC vous propose un granulé de caoutchouc issu du recyclage de pneus usagés de poids-lourds, tracteurs et véhicules légers. Premier producteur Algérien de granulés de caoutchouc de pneus, DRC est équipé de la dernière génération de broyeur, très aboutie en matière de qualité, capable de vous fournir un granulé

de caoutchouc pur à 99,9%.

Granulés de caoutchouc disponibles avec différentes dimensions :

- > 0,5mm - POUDRE EN CAOUTCHOUC NOIR.
- 0,5 - 0,8mm - GRANULÉS DE CAOUTCHOUC NOIR.
- 1 - 2mm - GRANULÉS DE CAOUTCHOUC NOIR.