

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Kasdi Merbah Ouargla



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

Département de Génie Civil et Hydraulique

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du diplôme de

Doctorat LMD en : Génie civil

Spécialité (Option): Géo-matériaux

Thème

**INFLUENCE DE LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC
SUR LES PERFORMANCES DES BÉTONS
HYDRAULIQUES À BASE DE GRAVIERS ROULÉS**

Présentée par :

BOUAKA Wafa

Soutenue publiquement le 10-06-2020, devant le jury composé de :

BOUTAOUTAOU Djamel	Professeur	UKM Ouargla	Président
TAALLAH Bachir	Maitre de Confé. 'A	UMK Biskra	Examineur
LEGHRIEB Youcef	Maitre de Confé. 'A	UKM Ouargla	Examineur
KRIKER Abdelouahed	Professeur	UKM Ouargla	Promoteur
KEBAILI Nabil	Maitre de Confé. 'B	UKM Ouargla	Co-promoteur

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à rendre grâce à Dieu, de m'avoir donné la patience et la santé afin d'accomplir ce travail de recherches.

J'exprime en premier lieu mes remerciements à mon directeur de thèse Monsieur KRIKER Abdelouahed, pour son indéfectible soutien, ses conseils et facilitations durant la préparation de ce travail. Qu'il trouve ici toutes mes reconnaissances.

Mes sincères remerciements vont à Mr KEBAILI Nabil, chef de département hydraulique et génie civil à l'université Kasdi Merbah – d'Ouargla, qui m'a procuré une aide précieuse pour faciliter les contacts et démarches nécessaires par cette recherche.

Je tiens à remercier Monsieur, BOUTOUTAOUA Djamel, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider ce jury. Mes remerciements vont également à Monsieur TAALLAH Bachir et Monsieur LEGHERIB Youcef qui m'ont fait l'honneur de prendre part au jury de cette thèse, pour leurs contributions accordées à l'évaluation et à l'enrichissement de ce travail.

Mes plus vifs remerciements vont à l'ensemble du personnel du laboratoire LTPS Ouargla pour leurs collaborations, et plus particulièrement Monsieur MOUDJAHED Nouredine directeur d'unité et Monsieur HAFSI Abdellatif Chef du département Laboratoire, pour leurs aides et leurs encouragements.

Un grand merci, à le responsable de SAEL/ Société d'Application d'Elastomères - Alger, pour la mise à disposition de la poudrette de caoutchouc ayant servi dans l'étude.

Mes remerciements s'adressent également à M^{elle} BABA ARBI Roumaïssa - ingénieur au niveau du laboratoire AQUA ENGINEERING/ Ouargla, et M^{elle} BELACHE Dehia doctorante à l'université Abderrahmane Mira – Béjaïa, pour leurs accueils et leurs aides au laboratoire.

Comme je remercie Monsieur SIMOND Mickaël directeur de laboratoire CALNESIS-France et tous les travailleurs, pour les informations qu'ils m'ont données.

A Monsieur GZANE Mohamed, Farouk et Aïssa, du laboratoire LEC - Ouargla pour l'aide et le soutien qu'ils m'ont apporté.

Je tiens à remercier M^{elle} HANI Aouda, de m'aider la réalisation d'une bonne partie de mes recherches, je lui suis profondément reconnaissante pour son aide.

Je n'oublie surtout pas ma collègue BAISSA Moulouda, pour son soutien sans conditions, morale et aide, merci infiniment.

Mes reconnaissances aussi envers mes chères amies BENKOUIDER Sabrina, BABA ARBI Roumaïssa, BAHOURA Khawla et tous ceux qui m'ont aidé et encouragé dans l'élaboration de cette thèse plus particulièrement HACHANI Ibrahim, BOUCHERBA Mohamed, Monsieur Mustapha (prof anglais).

Mes remerciements vont aussi au directeur et personnels du laboratoire de recherche EVRNZA de l'université Ouargla.

Je souhaite remercier aussi tous mes collègues et les enseignants du département de génie civil et hydraulique à l'université Kasdi Merbah de Ouargla.

Je souhaite aussi remercier mon cousin et mon grand frère BOUAKA Mohamed, pour encouragement et leur aide surtout dans la phase de préparation d'article.

Evidemment, j'aimerais remercier tous mes collègues au niveau du laboratoire LTPS/ Unité d'Ouargla, en particulier : SEBIHI Nabila, MELIANA Ismahane, BENSACI Souhila, Mr FOULANI Mourad, Mr KORICHI Djamel, Mr BENKHELIFA Oussama et Mr KHERFI Hadj Baghdad pour leurs encouragements et leurs soutiens tout au long de ce travail.

Je remercie du fond du cœur mes parents, pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de mes études, ainsi que ma sœur et mes frères : Manou, Mada, Mohamed.

Un merci tout particulier à mon fiancé HACHANI Brahim, qui m'a apporté beaucoup de réconfort et m'a aidé dans les moments difficiles.

W. BOUAKA

A mes parents
A Joujou et Rayouna

ملخص

اليوم, الخرسانة هي اكثر مواد البناء استعمالا مقارنة بالمواد الأخرى, حول ما يقرب الأربعة (4) مليار متر مكعب مستهلكة في العالم (Boukli h., 2009). خلال التاريخ, البشر استخدموا الخرسانة في البناء. وهي لم تستعمل فقط في تشييد البنايات كالمناطق العمرانية, انما استعملت أيضا في تشييد الجسور, الطرقات, الانفاق, المطارات و السدود. الخرسانة مركب غير متجانس مكون من اسمنت, حصى, ماء و كمية محددة من المواد المضافة.

الحصى هو من اهم مكونات الخلطة الاسمنتية, يمثل حوالي 60 % منها. كلما كانت خصائص الحصى المستعمل جيدة كلما زادت كفاءات الخلطة الخرسانية. الحصى المدور استعمل فيما مضى في الخرسانة حيث يمتاز بمقاومة جيدة للتشقق وهو ذو انتشار واسع في المناطق الصحراوية. رغم هذا استعماله اصبح شبه نادر في مختلف أصناف المنشآت.

هذه الاطروحة تهدف الى تثمين المادة المحلية (الحصى المدور) لواد النسا و كذا استغلال المخلفات الصناعية (المطاط) عن طريق تبديل مقادير كتلية من الرمل بالمطاط, المقادير هي (0, 5, 10, 15 %). هذه الاطروحة تهدف أيضا الى المساهمة في تطوير مادة اسمنتية مركبة تمثل عدة خصائص محسنة كسعة التشوه, التراص, التجانس, قابلية التشغيل وكذا المقاومة.

النتائج المحصل عليها تشير الى ان تواجد المسحوق المطاطي يؤثر على ريولوجية المادة في الحالة المرنة. بعد التصلب هناك انخفاض شديد ملحوظ في المقاومة الميكانيكية و كذا معامل اللدونة, و من جانب آخر قابلية التشوه تحسنت بشكل واضح. تم اجراء بعض التجارب لإثبات أن المركب الجديد يخفف من قابلية التعرض للتشقق.

الكلمات المفتاحية:

الخرسانة الهيدروليكية, مسحوق المطاط, الحصى المدور, المواد المحلية, التجارب الميكانيكية, تثمين المخلفات, السلوك الريولوجي.

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, le béton est utilisé plus que tout autre matériau de construction, avec près de quatre (4) milliards de mètres cubes consommés dans le monde (Boukli h., 2009). Au cours de l'histoire, l'humanité a utilisé le béton dans la construction. Le béton a été utilisé non seulement dans la construction des bâtiments tels que des zones d'habitation, mais également dans les ponts, les routes, les tunnels, les aéroports et les barrages. C'est un composite hétérogène résultant de ciment, d'agrégats, d'eau et d'une quantité limitée d'adjuvants.

Le gravier est l'un des principaux composants des mélanges hydrauliques. Il représente environ 60% de la proportion totale des bétons. Plus les propriétés du gravier grossier sont efficaces, plus la qualité des mélanges sera également efficace. Le gravier roulé est un matériau traditionnel existant dans la formulation du béton. Il est très résistant à la fragmentation et largement répandu dans les régions sahariennes. Cependant, son utilisation reste rare dans différents types de construction.

Cette thèse a pour objet de valoriser le matériau local (gravier roulé) de oued N'ssa et le déchet industriel (caoutchouc) par des substitutions massique et partiel de (0, 5, 10 et 15 %) dont cette substitution sera par le remplacement du sable par le caoutchouc. Cette thèse sert aussi à contribuer au développement d'un nouveau matériau composite cimentaire présentant plusieurs caractéristiques améliorées tel que : la capacité de déformation, la compacité, l'homogénéité, l'ouvrabilité et la résistance du béton.

Les résultats obtenus montrent que la présence de ces poudrettes est préjudiciable vis-à-vis de la rhéologie du matériau à l'état frais. A l'état durci, une chute de la résistance mécanique et du module d'élasticité est observée, en contrepartie la capacité de déformation est significativement augmentée. Des essais consacrés permettent de démontrer que ce nouveau composite permet de réduire la sensibilité à la fissuration de retrait.

Mots clés: Béton Hydraulique, Poudrette de Caoutchouc, Gravier Roulé, Matériaux Locaux, Essais Mécanique, Valorisation des Déchets, Comportement Rhéologique.

ABSTRACT

Today the concrete is the most used in the construction material, with almost four (4) billion cubic meters used worldwide (Boukli h., 2009). Throughout history, mankind has used concrete in construction. Concrete has not only been used in the construction of buildings such as dwelling areas but also in bridges, roads, tunnels, airports and water dams. It is a heterogeneous composite resulting from cement, aggregates, water and a limited quantity of adjuvant.

Coarse aggregate is one of the important contents of concrete, It represents about 60% of the total proportion of concrete. More the properties of the coarse aggregate are efficacy, more the quality of the mixtures will be also efficacy. The round gravel is an existing traditional material within the formulation of concrete. It is high in resistance to fragmentation and widely spread out in grand quantity in the Saharian regions. However, its utilization remains rare in different types of construction.

This work consists of a contribution between the valorization of local material (Rolled gravel) from oued N'ssa, and the use of industrial waste (rubber) by substitution in different proportions (0, 5, 10 et 15 %) massiques proportions, and also it's a contribution to the design of a cement-based material exhibiting an enhanced strain capacity. It aims to contribute to improving the compactness, homogeneity, workability and strength of concrete.

Results showed that rubber crumb are detrimental to the properties of the fresh materials. With regard to harden state, reduce the strength and the modulus of elasticity of the composite but the strain capacity corresponding to the macrocracking formation is significantly improved. Specific tests showed that rubber crumb reduced the propensity of the material for shrinkage cracking.

Keywords: Hydraulic Concrete, Crumb Rubber, Round gravel , Local Materials, Mechanic Test, Rheological behavior.

**LISTES DES ABRÉVIATIONS,
DES FIGURES, DES
TABLEAUX ET DES PHOTOS**

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

A	Affaissement
Ab	Absorption d'eau
ATG	Analyse Thermo-Gravimétrique
BM	Béton modifié
BR	Polybutadiène
BT	Béton témoin
C0	Mélange de béton témoin
C1	Mélange de béton modifié par poudre de caoutchouc 5 %
C2	Mélange de béton modifié par poudre de caoutchouc 10 %
C3	Mélange de béton modifié par poudre de caoutchouc 15 %
CA	Capacité d'absorption d'eau
CNIS	Centre National de l'Informatique et des Statistiques
D	Diamètre du plus gros granulat
d	Ouverture des mailles du tamis
DSC	Differential Scanning Calorimetry
e	Indice de vide
E	Module de young
Ec	Module d'élasticité statique
Ed	Module d'élasticité dynamique
EPM	Copolymères d'Éthylène et de Propylène
ES _P	Equivalent de sable au piston
ES _V	Equivalent de sable visual
GC	Granulats Caoutchouc
GR	Gravier roulé
H' ₂	Niveau supérieur de la partie sédimentée avec piston
H ₁	Niveau supérieur du floculat
H ₂	Niveau supérieur de la partie sédimentée
Inso	Taux d'insolubles
LA	Los Angeles
LRCCP	Laboratoire de Recherches et de Contrôle du Caoutchouc et des Plastiques
LTPS	Laboratoire des Travaux Publics du Sud
MDE	Micro Deval

M_h	Masse de l'échantillon de sol à l'état humide
M_p	Masse de la paraffine
M_s	Masse de l'échantillon de sol à l'état sec
n	Porosité
P	Propreté
PC	Poudrette Caoutchouc
PE	PolyÉthylènes
PP	PolyPropylènes
PS	PolyStyrènes
PU	PolyUréthannes
PVC	PolyChlorure de Cinyne
RC	Résistance à la compression
R_f	Résistance à la flexion
SBR	Caoutchouc (rubber) Butadiène-Styrénique
SCF	Société Chimique de France
TD	Les polymères thermodurcissables
T_g	Température de transition vitreuse de polymère
TP	Polymères thermoplastiques
V	Vitesse de propagation
V_d	Variation dimensionnelle
w	Teneur en eau
γ_a	Masse volumique apparente
γ_s	Masse volumique absolue
ε	Déformation de retrait du béton

LISTE DES FIGURES

<i>CHAPITRE I: GÉNÉRALITÉS SUR LES POLYMÈRES</i>		
Figure I.1	Développement des produits en polymères.....	05
Figure I.2	Formation des polymères (polymérisation)	06
Figure I.3	Schéma explicatif d'un polymère thermoplastique.....	08
Figure I.4	Schéma explicatif d'un polymère thermodurcissable.....	08
Figure I.5	Schéma explicatif d'un polymère élastomères.....	09
Figure I.6	Polymères linéaires	10
Figure I.7	Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b).	10
Figure I.8	Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.	11
Figure I.9	Modèle schématisant la structure d'un polymère amorphe.....	12
Figure I.10	Modèle de Prevorsek schématisant la structure d'une fibre de polyéthylène.....	12
Figure I.11	Schéma explicatif du changement de température de polymère.....	13
Figure I.12	Consommation de matières plastiques en Algérie (2017).....	14
Figure I.13	Domaines d'utilisation des polymères.....	15
Figure I.14	Caoutchouc naturel.....	16
Figure I.15	Fabrication de caoutchouc naturel.....	17
Figure I.16	Caoutchouc synthétique.....	17
Figure I.17	Poudrette de caoutchouc.....	19
Figure I.18	Différentes formes de caoutchouc après traitement et transformation.....	20
Figure I.19	Valorisation des déchets.....	21
Figure I.20	Différents modes de valorisation de poudrettes de caoutchouc.....	21
<i>CHAPITRE II: GÉNÉRALITES SUR LES GRANULATS</i>		
Figure II.1	Différents types de granulats selon leur diamètre.....	25
Figure II.2	Les différents types des granulats.....	25
Figure II.3	Granulats des gisements alluvionnaires.....	26
Figure II.4	Transformations des roches.....	27
Figure II.5	Schéma d'installation de production de granulats recyclés.....	29
Figure II.6	Extraction des granulats (roche meuble ou massives).....	30
Figure II.7	Extraction de gravier roulé – drague suceuse.....	31
Figure II.8	Fabrication des granulats à partir d'une roche massive.....	32
Figure II.9	Les trois indices morphologiques clés des agrégats.....	33
Figure II.10	Forme d'un granulats.....	33
Figure II.11	Influence de la forme et de l'état de surface des grains sur les propriétés du béton frais.....	36
Figure II.12	Exemples de gravier roulé.....	41

CHAPITRE III: GÉNÉRALITES SUR LES BÉTONS ET BÉTONS MODIFIÉS

Figure III.1	schéma récapitulatif des constituants du béton.....	45
Figure III.2	Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.....	49
Figure III.3	Développement progressif des hydrates dans une pâte de ciment en cours d'hydratation.....	51
Figure III.4	Influence de la forme des agrégats sur la résistance du béton avec deux types de granulats : concassé et roulé).	52
Figure III.5	Evolution des résistances à la compression en fonction de la nature des granulats.....	53
Figure III.6	Teneur en eau approchée pour différents affaissements et tailles maximales d'agrégats.....	53
Figure III.7	Influence des fines sur la résistance du béton.....	54
Figure III.8	Influence du rapport G/S sur la résistance du béton.....	54
Figure III.9	Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton.....	55
Figure III.10	Influence du rapport E/C sur la compacité du béton.....	55
Figure III.11	Influence du type d'adjuvant sur la résistance à la compression du béton.....	56
Figure III.12	Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression au jeune âge du béton.....	56
Figure III.13	Influence de la finesse de ciment sur les performances du béton.....	57
Figure III.14	Rôle des fibres dans la matrice du béton	58
Figure III.15	Béton avec et sans fibres	58
Figure III.16	Types des fibres métalliques	59
Figure III.17	Types des fibres végétales	59
Figure III.18	Incorporation des granulats caoutchouc dans une matrice cimentaire.....	62
Figure III.19	Influence de G.C. sur l'affaissement	63
Figure III.20	Influence de G.C. sur l'affaissement selon Güneyisi E.....	64
Figure III.21	Influence de G.C. sur l'affaissement selon Boudaoud Z.....	64
Figure III.22	Variation de la masse volumique du béton incorporant caoutchouc (G.C. ou P.C.).....	65
Figure III.23	Chute relative de Rc des bétons de broyat de pneu en fonction du taux de remplacement.....	66
Figure III.24	Résistance à la compression du béton à différents pourcentages de caoutchouc...	67
Figure III.25	Variation de la Rt du béton incorporant caoutchouc.....	67
Figure III.26	Effet des granulats caoutchouc sur la réduction des résistances en flexion/traction/compression.....	68
Figure III.27	Réponse dynamique de la normale et de la base isolée des structures.....	69
Figure III.28	Evaluation du module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en caoutchouc.....	70
Figure III.29	Effet du taux de substitution sur le retrait de béton.....	70

Figure III.30	Ecaillages à la surface des éprouvettes incorporant 0% et 3% du volume de G.C. après l'essai de résistance au feu.....	71
<i>CHAPITRE IV: MATERIAUX ET PROCEDURES D'ESSAIS</i>		
Figure IV.1	Localisation de gisement de gravier roulé (Image Google Earth 2018).....	75
Figure IV.2	Procédure de tamisage.....	76
Figure IV.3	Courbe d'analyse granulométrique du GR (3/8).....	78
Figure IV.4	Courbe d'analyse granulométrique du GR (8/15).....	78
Figure IV.5	Courbe d'analyse granulométrique du Sable.....	79
Figure IV.6	Courbe d'analyse granulométrique de Poudrette de caoutchouc.....	79
Figure IV.7	Courbe d'analyse thermogravimétrique de la poudrette de caoutchouc (perte de masse en fonction de la température).....	86
Figure IV.8	Courbe d'analyse Differential Scanning Calorimetry de la poudrette de caoutchouc (la quantité de chaleur en fonction de température).....	88
Figure IV.9	Courbe de mélange.....	91
Figure IV.10	Dispositif de rupture en compression.....	95
Figure IV.11	Appareillage pour la mesure du retrait (Rétractomètre).....	98
<i>CHAPITRE V: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS</i>		
Figure V.1	Dosage en eau pour chaque type de béton.....	100
Figure V.2	Schéma explicatif de l'effet d'ajout des poudrettes sur la ouvrabilité du béton.....	101
Figure V.3	Résistance à la compression pour chaque type de béton en fonction d'âge.....	102
Figure V.4	Résistance en traction par fendage pour chaque type de béton en fonction d'âge.....	107
Figure V.5	Résistance en traction par flexion pour chaque type de béton en fonction d'âge.....	110
Figure V.6	Variations dimensionnelles de retrait en fonction du temps.....	111
Figure V.7	Perte de masse en fonction du temps.....	112
Figure V.8	Variation de la vitesse du son à 7 et 28 jours.....	113
Figure V.9	Comparaison des différentes valeurs du module d'élasticité.....	115

LISTE DES TABLEAUX

<i>CHAPITRE I: GÉNÉRALITES SUR LES POLYMÈRES</i>		
Tableau I.1	Types et exemples d'homopolymères.....	7
Tableau I.2	Modes et enchainements des copolymères.....	7
<i>CHAPITRE II: GÉNÉRALITES SUR LES GRANULATS</i>		
Tableau II.1	Différents types de granulats issus de roches massives.....	28
Tableau II.2	Différentes formes de granulats.....	34
Tableau II.3	Différentes textures des surfaces des granulats.....	35
Tableau II.4	Aptitude des principaux granulats à leur emploi pour le béton selon la roche d'origine.....	39
<i>CHAPITRE III: GÉNÉRALITES SUR LES BETONS ET BÉTON MODIFIÉS</i>		
Tableau III.1	Types de béton en fonction de leur masse volumique.....	46
Tableau III.2	Types de béton en fonction de Dmax.....	46
Tableau III.3	Types de béton en fonction de leur consistance.....	46
Tableau III.4	Types de béton en fonction de leur consistance.....	47
Tableau III.5	Types de béton en fonction de leur destination.....	48
Tableau III.6	Différents type de fibres utilisés dans le béton.....	60
<i>CHAPITRE IV: MATERIAUX ET PROCEDURES D'ESSAIS</i>		
Tableau IV.1	Différentes composantes utilisées et leurs provenances.....	73
Tableau IV.2	Masse volumique des matériaux utilisés.....	80
Tableau IV.3	Résultat d'essai d'absorption.....	81
Tableau IV.4	Résultats de l'essai de propreté.....	81
Tableau IV.5	Résultats de l'essai de propreté après lavage.....	82
Tableau IV.6	Résultats de l'essai d'équivalent de sable.....	82
Tableau IV.7	Valeurs des VB de sable utilisé.....	83
Tableau IV.8	Résultats de l'essai de Los Angeles.....	83
Tableau IV.9	Résultats de l'essai de Micro-Deval.....	84
Tableau IV.10	Résultats d'analyse chimique.....	85
Tableau IV.11	Masse volumique des poudrettes de caoutchouc.....	86
Tableau IV.12	Composition chimique du ciment en %.....	88
Tableau IV.13	Caractéristiques mécaniques du ciment.....	89
Tableau IV.14	Résultats d'analyse d'eau.....	89
Tableau IV.15	Compositions optimales de 1m ³ de béton type BT et BM.....	91
Tableau IV.16	Eprouvettes et leurs conservations.....	93

CHAPITRE V: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau V.1	Variation de l'eau de gâchage de 1m ³ et le rapport E/C.....	99
Tableau V.2	Variation de la résistance à la compression à 28 jours.....	103
Tableau V.3	Variation de la résistance de traction par fendage à 28 jours.....	107
Tableau V.4	Variation de la résistance de traction par flexion à 28 jours.....	110

LISTE DES PHOTOS

<i>CHAPITRE II: GÉNÉRALITES SUR LES GRANULATS</i>		
Photo II.1	Exemples de gravier roulé.....	41
Photo II.2	Gravier roulé de Hassi Sayah	42
Photo II.3	Gravier roulé de Oued N'ssa	42
Photo II.4	Gravier roulé de Hassi Ben Abd Allah.	42
Photo II.5	Extraction traditionnelle de gravier roulé.....	43
Photo II.6	Poteau réalisé à base de gravier roulé.	44
<i>CHAPITRE III: GÉNÉRALITES SUR LES BÉTONS ET BÉTON MODIFIÉS</i>		
Photo III.1	Eprouvette d'un béton avec l'incorporation des granulats caoutchouc.....	63
<i>CHAPITRE IV: MATERIAUX ET PROCEDURES D'ESSAIS</i>		
Photo IV.1	Matériaux utilisés	74
Photo IV.2	Séparation les classe de gravier.....	76
Photo IV.3	Séchage de gravier lavé à l'air libre.....	77
Photo IV.4	Essai de la masse volumique.....	80
Photo IV.5	Mesure de l'absorption de sable.....	81
Photo IV.6	Essai de bleu de méthylène.....	83
Photo IV.7	Outils et solutions pour les analyses chimiques des granulats.....	84
Photo VI.8	Poudrette de caoutchouc utilisé.....	85
Photo IV.9	Appareil de Differential Scanning Calorimetry.....	87
Photo IV.10	Emplacement du matériau (essai DSC).....	87
Photo IV.11	Remplissage du cône par le béton.....	93
Photo IV.12	Mesure de l'affaissement.....	93
Photo IV.13	Presse d'écrasement.....	94
Photo IV.14	Dispositif de flexion à 4 points.....	95
Photo IV.15	Essai de traction par flexion.....	95
Photo IV.16	Réglette en contre-plaqué.....	96
Photo IV.17	Essai de traction par fendage.....	96
Photo IV.18	Appareil de mesure ultrasonique.....	97
Photo IV.19	Mesure de retrait.....	97
<i>CHAPITRE V: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS</i>		
Photo V.1	Eprouvette pendant l'essai d'écrasement RC.	102
Photo V.2	Eprouvette après l'essai d'écrasement RC.....	102
Photo V.3	Fissurations des types de béton C0, C1, C2 et C3 après écrasement	103
Photo V.4	Charge appliquée sur C0 (15s durée de chargement).....	105

Photo V.5	Charge appliquée sur C2 (25s durée de chargement).....	105
Photo V.6	Etat d'adhérence après l'écrasement	106
Photo V.7	Courbe d'évaluation la charge en fonction de temps (60s).....	108
Photo V.8	Eprouvette de fendage après l'écrasement.....	109
Photo V.9	Eprouvette avant l'essai de flexion + le dispositif de flexion.....	109
Photo V.10	Eprouvette de béton à différentes teneurs en poudrette de caoutchouc	115

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	I
Résumés.....	III
Liste des abréviations.....	VI
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	XI
Liste des photos.....	XIII
Table des matières.....	XV
INTRODUCTION GENERALE	
PARTIE THÉORIQUE	
CHAPITRE I: GÉNÉRALITÉS SUR LES POLYMÈRES	
I.1. INTRODUCTION.....	04
I.2. NOTIONS SUR LES POLYMERES.....	04
I.3. CLASSIFICATION DES POLYMERES.....	06
I.3.1. Classification selon la structure chimique.....	06
I.3.2. Classification selon le comportement thermique.....	07
I.3.3. Classification selon l'architecture.....	09
I.3.4. Classification selon l'origine.....	11
I.4. PROPRIETES DES POLYMERES.....	11
I.4.1. Structure à l'état solide.....	11
I.4.2. Polymères amorphes.....	12
I.4.3. Polymères cristallins orientés.....	12
I.4.4. Propriétés thermiques.....	13
I.4.5. Propriétés mécanique.....	13
I.5. DOMAINES D'APPLICATIONS DES POLYMERES.....	14
I.5.1. Le polymère dans l'Algérie.....	14
I.5.2. Utilisation des polymères.....	14
I.6. LES ÉLASTOMERES.....	16
I.6.1. Le Caoutchouc.....	16
I.6.2. Classification des caoutchoucs.....	19
I.6.3. La Poudrette De Caoutchouc.....	19
I.6.4. Fabrication de la poudrette de Caoutchouc.....	19
I.6.5. Valorisation de la poudrette de Caoutchouc.....	20
I.7. APPLICATIONS DE CAOUTCHOUTEE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL.....	22
I.8. CONCLUSION.....	23
CHAPITRE II: GÉNÉRALITÉS SUR LES GRANULATS	
II.1. INTRODUCTION.....	24
II.2. DÉFINITION DES GRANULATS.....	24
II.3. TYPE ET CLASSEMENT DES GRANULATS.....	25
II.3.1. Les granulats naturels.....	26

II.3.2. Les granulats artificiels	28
II.3.3. Les granulats recyclés.....	28
II.4. FABRICATION DES AGREGATS.....	29
II.4.1. Roches Meubles	30
II.4.2. Roches Massives.....	31
II.5. INDICES MORPHOLOGIQUES DES AGREGATS.....	32
II.5.1. Indice de forme des agrégats.....	33
II.5.2. Indice de d'angularité.....	34
II.5.3. Indice de texture de surface.....	34
II.6. CARACTERISATION DES GRANULATS.....	37
II.6.1. Caractéristiques de Fabrication..	37
II.6.2. Caractéristiques Intrinsèques.....	38
II.6.3. Caractéristiques chimiques.....	40
II.7. GRAVIERS ROULÉS.....	40
II.7.1. Définitions et Description.....	40
II.7.2. Genèse.....	42
II.7.3. Propriétés essentielles des granulats naturels.....	42
II.7.4. Utilisations Technologiques.....	43
II.8. CONCLUSION.....	44
CHAPITRE III: GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS ET LES BÉTONS MODIFIÉS	
III.1. INTRODUCTION.....	45
III.2. CLASSEMENT DU BETON.....	45
II.2.1. Leur masse volumique	46
II.2.2. Leur granularité	46
II.2.3. Leur consistance (cône d'Abrams)	46
III.2.4. Leur résistance à la compression.....	47
III.3. TYPE DE BETON ET DOMAINE D'APPLICATION.....	47
III.4. CONSTITUANTS DE BÉTON.....	48
III.4.1. Granulats	49
III.4.2. Ciment	49
III.4.3. Eau de gâchage	51
III.4.4. Adjuvants	51
III.5. PARAMETRES QUI INFLUENT SUR LES CARACTERISTIQUES DU BETON.....	52
III.5.1. Influence du squelette granulaire.....	52
III.5.2. Influence du rapport eau/ciment (E/C).....	55
III.5.3. Adjuvants	56
III.5.4. Influence du dosage et type de ciment	56
III.6. BETON FIBRÉ.....	57
III.6.1. Généralité	57
III.6.2. Objectifs de la modification de béton	58
III.6.3. Fibres utilisées dans le béton fibré	59
III.7. LE BETON CAOUTCHOUTÉ.....	61

III.7.1. synthèse des résultats sur un béton modifié par l'ajout de caoutchouc	61
III.7.1.1. Impact de caoutchouc sur le béton frais	62
III.7.1.2. Impact de caoutchouc sur le béton durci	65
III.8. CONCLUSION.....	71

PARTIE EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE IV: MATERIAUX ET PROCEDURES D'ESSAIS

IV.1. INTRODUCTION.....	73
IV.2. CHOIX DES MATÉRIAUX UTILISÉS.....	73
IV.3. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISÉS.....	75
IV.3.1. Le sable.....	75
IV.3.2. Le gravier.....	75
IV.3.3. Poudrette De Caoutchouc.....	85
IV.3.4. Ciment	88
IV.3.5. Eau de gâchage	89
IV.4. FORMULATIONS DES BETONS ETUDIÉS.....	90
IV.4.1. Méthode de Dreux Gorisse.....	90
IV.4.2. Confection des éprouvettes.....	91
IV.4.3. Malaxage	92
IV.4.4. Moulage et démoulage	92
IV.4.5. Conservation des éprouvettes.....	92
IV.5. PRÉSENTATION DES ESSAIS EXPERIMENTAUX.....	92
IV.5.1. Essai Sur Béton Frais.....	93
IV.5.2. Essais Sur Béton Durci	94
IV.6. CONCLUSION.....	98

CHAPITRE V: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. INTRODUCTION.....	99
V.2. EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR BETONS FRAIS.....	99
V.3. EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR BETONS DURCIS.....	101
V.3.1. Essai de la masse volumique de béton durci	101
V.3.2. Essai de la résistance à la compression	102
V.3.3. Essai de résistance à la traction par fendage	107
V.3.4. Essai de résistance à la traction par flexion à 4 points	109
V.3.5. Mesure De Retrait	111
V.3.6. Essai ultrasonique.....	113
V.4. CONCLUSION.....	115

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	i
ANNEXES	xii

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est un matériau le plus utilisé dans les voies, et la construction, grâce à ses propriétés à savoir la facilité de moulage, la rigidité, la résistance à la compression et la tenue au feu. Il existe plusieurs types de béton tel que : béton hydraulique, béton de fibres, béton précontraint,... ; Le béton est un matériau hétérogène, ayant des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques assez-complexe. Il est composé essentiellement de : granulats, ciment et d'eau de gâchage. Chacun de composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

Les granulats ; le sable et le gravier constituent la phase inerte du béton. Ils contribuent à l'amélioration de la compacité, de l'homogénéité, de l'ouvrabilité et de la résistance du béton. Notre choix doit s'orienter vers des granulats durs, propres, de granulométrie continue ; c'est pour cela on a choisi les granulats roulés. Ce dernier est un matériau traditionnel qui était utilisé avant le gravier concassé, mais actuellement ; on remarque la rareté d'utilisation de ce matériau dans les différentes constructions.

L'Algérie importe en moyenne 49,62 milliers de tonnes de pneumatiques en caoutchouc, selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur (2004). Après leurs usages les déchets issus du développement économique notamment des secteurs industriels et de transport peuvent être restitués sous une autre forme sans les abandonner dans la nature. Il convient de valoriser ces déchets lorsque le recyclage provoque une pollution de l'environnement moindre qu'un autre mode d'élimination. Ainsi renoncera-t-on à valoriser les pneus usagés non réutilisables dans le béton.

Le béton présente une bonne résistance en compression, par ailleurs il est sensible à la fissuration. Les ouvrages surfaciques restent les plus sensibles à se fissurer. En effet, les matériaux cimentaires ont une faible capacité de déformation lorsqu'ils subissent des contraintes, notamment sous l'effet du retrait. En effet, la mise majeure est d'améliorer la déformabilité de ce béton sans provoquer une grande chute de résistance. Le nouveau matériau composite qui pourra atteindre l'objectif prévu est un béton où on incorpore des poudrettes suffisamment déformables et plus précisément des poudrettes de caoutchoucs issus des tapis, semelles et pneus usagés non réutilisables.

Cette recherche s'inscrit dans un programme globale lancer par notre laboratoire de recherche dans le cadre de valorisation et exploitation des ressources naturelles en zone arides

comme les granulas roulés, et la substitution de la poudrette de caoutchouc. Ce travail consiste à réaliser les objectifs ci-après :

L'utilisation de granulat roulé pour valoriser et exploiter ces granulas comme un matériau abondant dans notre région et améliorer la résistance de béton par la dureté de ce type des granulats.

Ainsi que, la valorisation de poudrette de caoutchouc pour éliminer les déchets (protection de l'environnement), en même temps, augmenter la capacité de déformation du béton et limiter le risque de fissuration.

Pour atteindre cet objectif, on a scindé cette thèse en deux grandes parties à savoir :

- Une recherche bibliographique,
- Une étude expérimentale,

La partie bibliographique, qui renferme les notions de base nécessaires à la compréhension du contenu de la thèse, renferme trois chapitres ;

- Le premier chapitre est consacré aux différents types de polymères et leur classification d'une part, ainsi que leur rôle et utilisation dans le béton hydraulique d'autre part. Aussi, on dresse un état des lieux sur l'emploi des poudrettes de caoutchouc. De même, il met l'accent sur l'utilisation de la poudrette dans le domaine de construction suite au mélange avec le béton hydraulique, les performances du nouveau composite tant sur le plan rhéologique que mécanique sont abordées.

- Le deuxième chapitre traite des généralités sur les agrégats et surtout les agrégats roulés, il traite le type d'agrégat, de l'origine, de la genèse des matériaux prospectés, ainsi que leur fabrication.

- Le troisième chapitre, en présentant les notions fondamentales des bétons et des bétons modifiés, à savoir les propriétés des principaux types des matériaux ajoutés au béton et utilisés dans les domaines de la construction. Cite quelques résultats des précédentes recherches.

La seconde partie du mémoire, qui traite l'expérimentation au laboratoire sur un béton hydraulique témoin et modifié par la poudrette de caoutchouc, s'articule autour de deux (02) chapitres de la façon suivante :

- Description des matériaux choisis, du matériel utilisé et de la méthodologie suivie pour étudier les caractéristiques d'identification et mécaniques des différents composants ainsi que le plan expérimental adopté pour étudier les différents paramètres.

- Analyse et interprétation des résultats obtenus pour identifier la variation des propriétés de béton d'une part, ainsi que le comportement du béton (témoins et modifiés) en fonction des paramètres expérimentaux.

Enfin, une conclusion est rédigée pour souligner les résultats le plus importants ainsi que des recommandations jugées indispensables pour les futures recherches.

PARTIE THÉORIQUE

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES POLYMÈRES

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES POLYMÈRES**I.1. INTRODUCTION**

Le terme polymère désigne une molécule de masse moléculaire élevée généralement organique ou semi-organique. Une macromolécule constituée d'un enchaînement d'un grand nombre d'unités de répétition, d'un ou de plusieurs monomères, unis les uns aux autres par des liaisons covalentes (DOUBLIER G, 2009).

Ainsi l'amidon ou les protéines sont-ils des polymères, au même titre que la soie ou le bois sont constitués de polymères. Les matériaux thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères comptent également parmi les polymères. Et les matrices polymères sont beaucoup utilisées dans les matériaux composites.

La plupart des polymères utilisés par l'homme sont synthétiques et possèdent de larges domaines d'application. Mais bien avant l'homme, la nature utilisait déjà les polymères, dits naturels. Pour mettre en œuvre correctement ces matériaux, il est important de connaître leur mécanisme de réaction ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients spécifiques.

Ce chapitre a pour objet une présentation générale sur les polymères, et en particulier le caoutchouc.

I.2. NOTIONS SUR LES POLYMERES

Les matériaux polymères (polymères = plusieurs unités), appelés aussi matières plastiques ou simplement plastiques, sont des matériaux organiques composées essentiellement d'atome de carbone et d'hydrogène.

Les années 1900 ont vu le début d'apparition de la chimie des polymères. A cette époque, on distinguait les molécules organiques en deux catégories : les cristalloïdes et les colloïdes. Les cristalloïdes sont des composés organiques cristallisables, de température de fusion et de masses molaires définies. Les colloïdes, par contre, sont des molécules visqueuses, ne cristallisants pas et ayant des températures de fusion mal définies. Lorsque l'on mesurait leur masse molaire, on la trouvait supérieur à 100.000 atomes. En 1925, Staudinger déclare que les colloïdes sont une association de plus de 100.000 atomes de carbones reliés entre eux par des liaisons covalentes. A l'époque, c'est une hérésie (Théorie de la chimie moléculaire). Pendant les années 1940 et durant la deuxième guerre mondiale, on assistait à un essor considérable dans la science des polymères, suite à la volonté ardue de fabrication de certains matériaux militaires. Au début des années 1950, Carothers et Flory admettent et montrent que des édifices covalents de masse molaire supérieure

à 100.000 existent. C'est le fondement de la théorie des polymères. Dès cette époque, on a établi la notion de polymères. (HAMRI S., 2013 ;KEBAILI N. ,2017).

La figure I.1 montre le développement des produits en polymères depuis le milieu du 19^e siècle.



Figure I.1: Développement des produits en polymères (DURANEL L. 2011)

Le terme polymère (du grec : polus qui signifie « nombreux, plusieurs» et mēros qui signifie « unité, partie») ; qui sont typiquement regroupés tout matériau formés par la répétition d'un très grand nombre n de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères qui liés entre eux par des liaisons primaires (liaisons covalentes) sachant que le monomère est une molécule de base (pouvant être par exemple non saturée ou cyclique ou encore comportant des fonctions réactives à ses extrémités). L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation. La réaction de polymérisation, comme indique dans la figure I.2, est également utilisée par les organismes vivants. (GUIDOUM A., 2012).

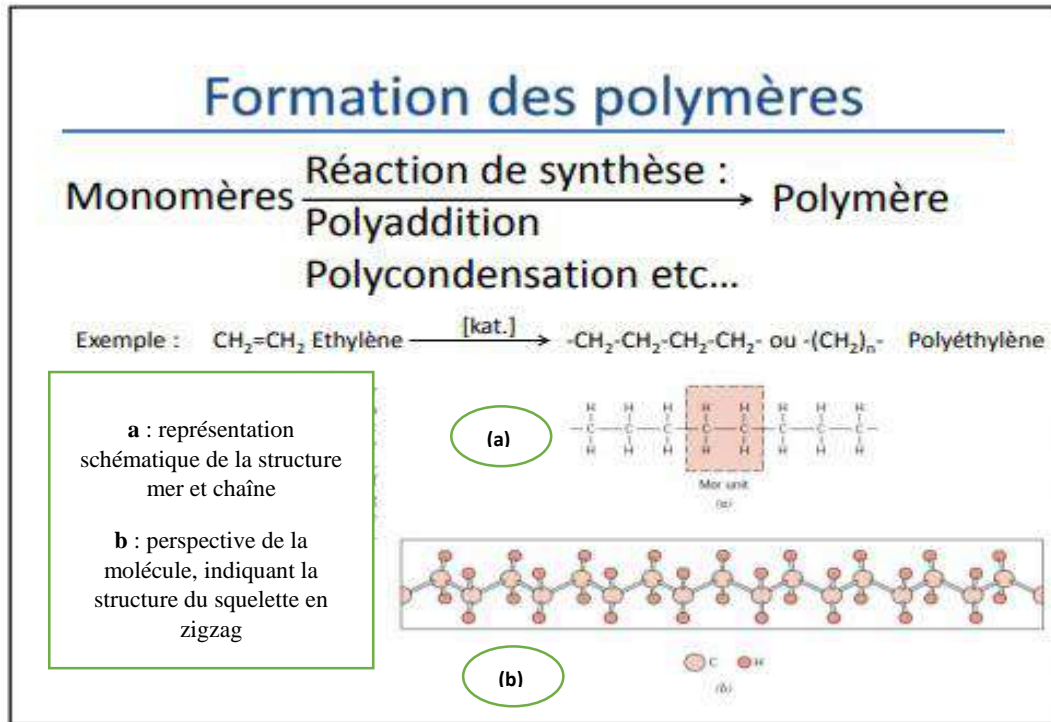


Figure I.2: Formation des polymères (polymérisation) (GUIDOUM A. 2012)

I.3. CLASSIFICATION DES POLYMERES

Plusieurs classifications des composés macromoléculaires peuvent être proposées selon qu'on choisit l'origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou le type de polymérisation, comme base de la classification.

I.3.1. Classification selon la structure chimique :

La structure chimique des motifs permet une classification des composés macromoléculaires en homopolymères et copolymères.

I.3.1.1. Les homopolymères :

Ils sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes. Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve : les homopolymères linéaires, branchés et étoilés, comme ils sont indiqués dans le tableau I.1. (FONTANILLE M., GNANOU Y., 2014 ; BENSALD M. O., 2015)

Tableau I.1 : Types et exemples d'homopolymères (Kausch HH. et al., 2001)

Type d'homopolymère	Disposition des unités	Exemple
linéaire		Polybutadiène (BR)
branché		polypropylène
étoilé		Polystyrène

I.3.1.2. Les copolymères :

Ils sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles, citons: le mode statistique, alterné, séquencé et greffé. (FONTANILLE M., GNANOU Y., 2014 ; BENSAID M. O., 2015).

Le tableau I.2 présente les modes et enchainements des copolymères.

Tableau I.2 : Modes et enchainements des copolymères. (Kausch HH. et al., 2001)

Mode de copolymère	Enchainement des unités constitutives
aléatoire	A - A - B - A - A - B - B - B - B - A - B
statique	A - A - B - A - B - B - B - B - A - A - B - A
alterné	A - B - A - B - A - B - A - B - A - B - A
séquencé	A - A - A - A - A - B - B - B - B - B - B
greffé	

I.3.2. Classification selon le comportement thermique :

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermomécaniques en trois grandes familles :

- Les polymères thermoplastiques (TP),
- Les polymères thermodurcissables (TD),
- Les polymères réticulés (élastomères).

I.3.2.1. Polymères thermoplastiques (ou thermoplastes) :

Ils sont constitués de macromolécules de taille limitée linéaires ou ramifiées. Ils peuvent passer de l'état rigide à l'état malléable par une faible élévation de la température. Ce processus est en général réversible, ce qui confère à ces polymères une certaine facilité de mise en œuvre et de recyclage. (DALI-YOUCHEF B., 2009 ; HAMRI S., 2013 ; BUTAUD P., 2015).

La figure I.3 présente un schéma explicatif d'un polymère thermoplastique.

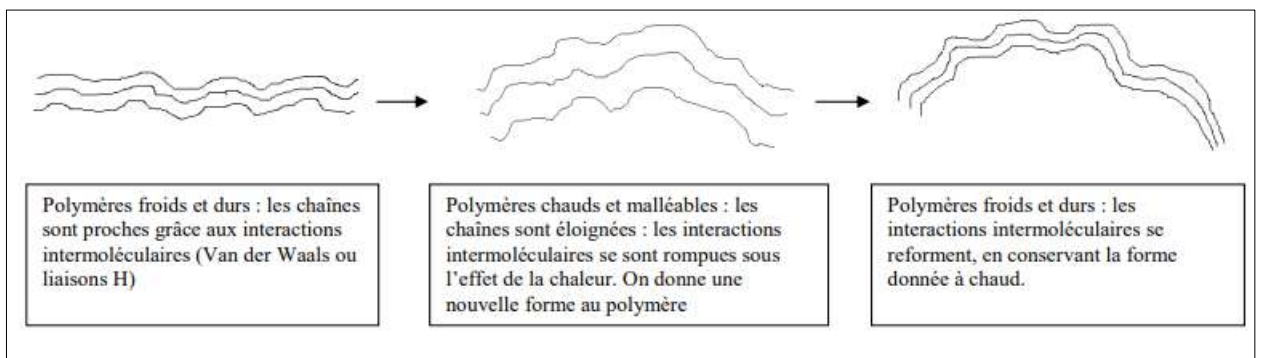


Figure I.3 : Schéma explicatif d'un polymère thermoplastique. (CNPD.fr)

I.3.2.2. Polymères thermodurcissables :

Ils sont des polymères fortement réticulés. En effet, leur taux de réticulation est de 10 à 100 fois plus élevé que dans les élastomères. Ils forment un réseau tridimensionnel et on peut considérer qu'ils ne sont constitués que par une macromolécule d'une taille infiniment grande à l'échelle atomique. Les fortes liaisons qui existent entre les chaînes confèrent à ces polymères une résistance mécanique et une résistance thermique nettement supérieures à celles des thermoplastes. Les polymères thermodurcissables sont insolubles, infusibles et non recyclables. (DALI-YOUCHEF B., 2009 ; HAMRI S., 2013 ; BUTAUD P., 2015). La figure I.4 présente un schéma explicatif d'un polymère thermodurcissable.

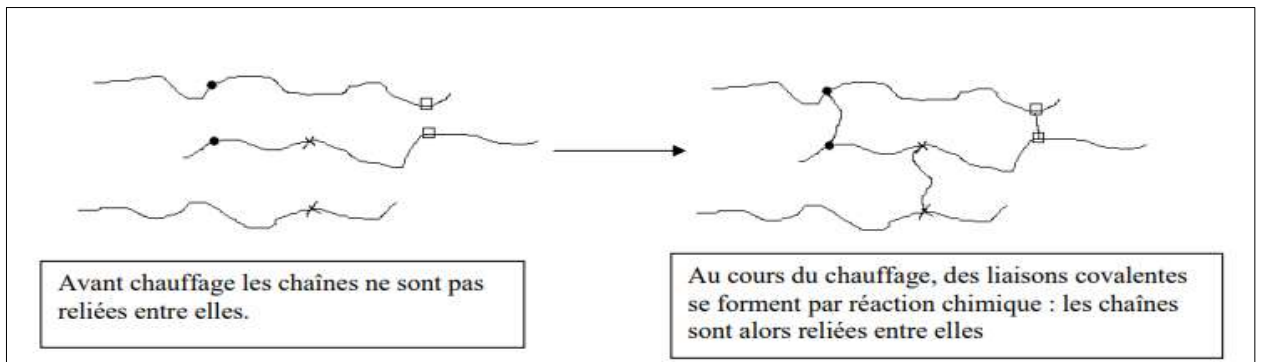


Figure I.4 : Schéma explicatif d'un polymère thermodurcissable. (CNPD.fr)

I.3.2.3. Élastomères :

Matériaux obtenus à partir des polymères linéaires ayant des liaisons secondaires très faibles. Ces matériaux sont ainsi considérés comme des liquides très visqueux. L'introduction d'un certain nombre de liaisons pontales entre les chaînes confère aux élastomères une structure tridimensionnelle, comme il indique dans la figure I.5 . Leur caractéristique principale est leur grande déformabilité. Ceci est principalement dû à leur faible densité de réticulation. Par ailleurs, le pontage rend les élastomères difficilement recyclables. (BUTAUD P., 2015 ; HAMRI S., 2013 ; DALI-YOUCHEF B., 2009).

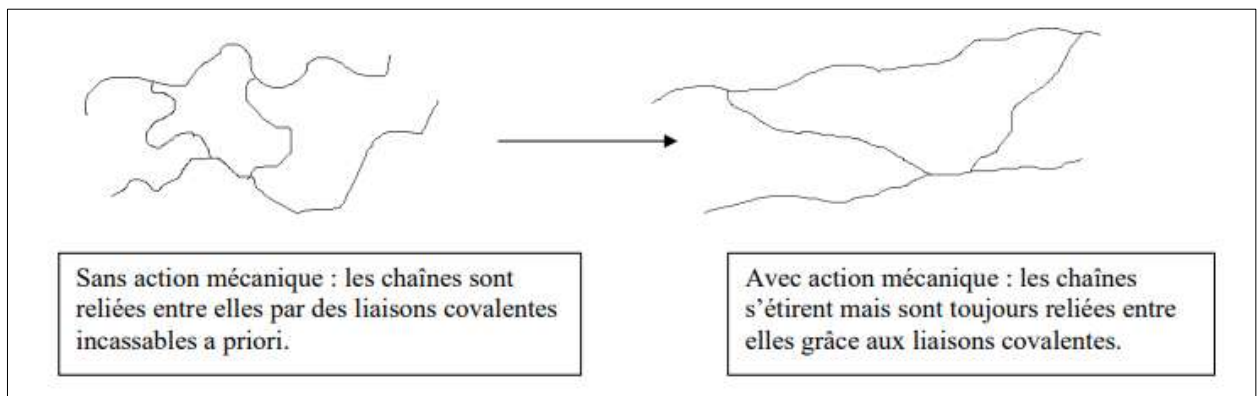


Figure I.5 : Schéma explicatif d'un polymère élastomères. (CNPd.fr)

I.3.3. Classification selon l'architecture :

Les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être, au moins partiellement, cristallisés.

I.3.3.1. Polymères linéaires :

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide. Si la température s'élève, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons secondaires. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids : il présente alors le comportement d'un liquide visqueux. La température à laquelle se produit cette évolution s'appelle la température de transition vitreuse. La transition vitreuse correspond à l'apparition de mouvements de longs segments de chaîne et marque le passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique. La figure I.6 donne différents exemples de polymères linéaires. (BENSAID M. O., 2015 ; WEISS P., 2010)

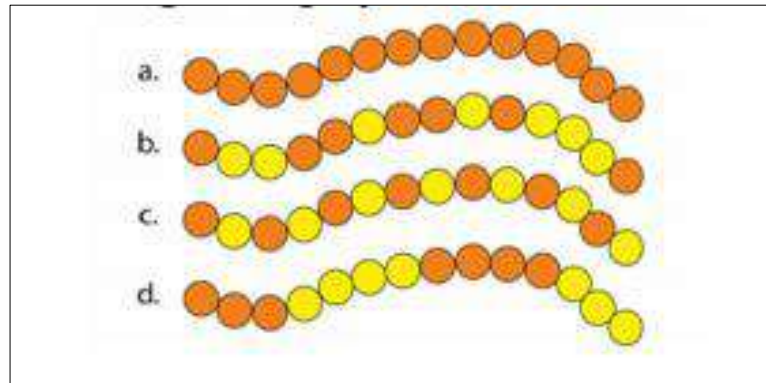


Figure I.6: Polymères linéaires (a.: homopolymère, b. : copolymère statistique, c. : copolymère alterné, d. : copolymère séquencé) (WEISS P., 2010)

Les propriétés mécaniques des copolymères varient en fonction du type et de la disposition des monomères. Les rotations de la chaîne sont facilitées ou au contraire rendues plus difficiles en fonction de la nature, de la disposition et de l'encombrement de chacun des monomères.

I.3.3.2. Polymères ramifiés :

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires. (BENSAID M. O., 2015 ; WEISS P., 2010)

La figue I.7 exprime un schéma de l'homopolymère ramifié et copolymère ramifié.

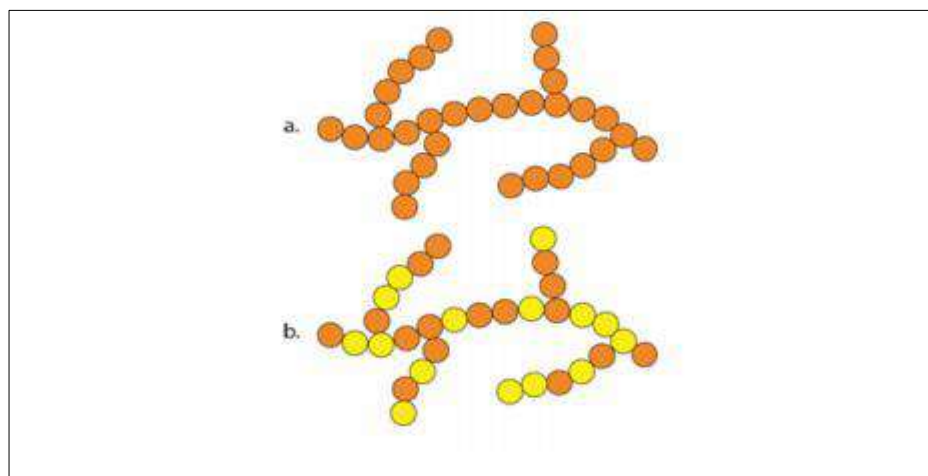


Figure I.7: Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b). (WEISS P., 2010)

I.3.3.3. Polymères réticulés :

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau. (BENSAID M. O., 2015 ; WEISS P., 2010)

La figure I.8 présente un polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.

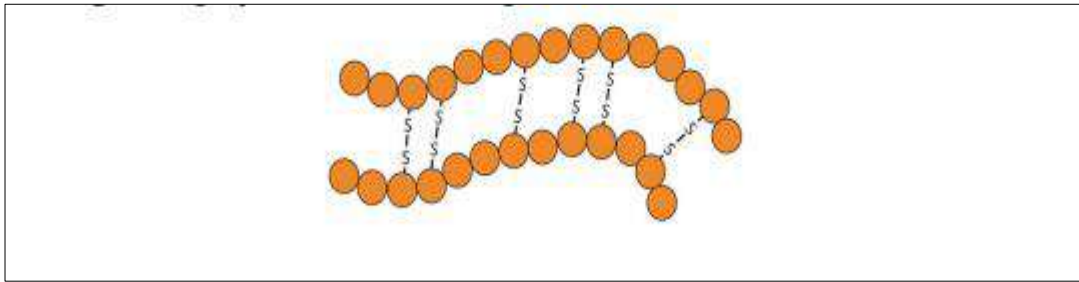


Figure I.8 : Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes. (WEISS P., 2010)

I.3.4. Classification selon l'origine:

On peut les classer en trois catégories :

I.3.4.1. Polymères naturels :

Ils sont issus des règnes végétal ou animal. Leur importance est considérable mais ils ne seront que succinctement décrits dans la première partie de cet ouvrage. On peut cependant mentionner, dans cette catégorie, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...), celle des protéines (laine, soie...), le caoutchouc naturel, etc. (BENSAID M. O., 2015 ; FONTANILLE M., et al., 2014)

I.3.4.2. Polymères artificiels :

Ils sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés ; les esters celluliques (nitrocellulose, acétate de cellulose...) ont toujours connu une certaine importance économique. (BENSAID M. O., 2015 ; FONTANILLE M. et al., 2014)

I.3.4.3. Polymères synthétiques :

Ils sont totalement issus du génie de l'Homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères. Leur variété est extrême et ce sont eux qui seront le plus souvent considérés dans la suite de cet ouvrage. (BENSAID M. O., 2015 ; FONTANILLE M., et al., 2014)

I.4. PROPRIETES DES POLYMERES

Les propriétés macroscopiques des polymères sont essentiellement dûes à l'état physique c'est-à-dire à la structure et aux liaisons intermoléculaires qui les constitue.

I.4.1. Structure à l'état solide :

A l'état solide, les polymères sont totalement à l'état amorphe (comme le verre) ou bien en partie amorphe et en partie cristallisés.

Il existe toutefois des forces qui s'exercent (de type Van der Waals : cas du polyéthylène, ou liaisons hydrogène : cas des polyamides) entre les chaînes polymériques qui engendrent, dans des régions, un ordre dans la disposition des chaînes: Ces régions cristallines sont appelées des cristallites. (BAZZINE, 2013 ; LUSSEAU C. et al. , 2004 ; PINAUD J.)

I.4.2. Polymères amorphes :

Les macromolécules y sont entremêlées en pelote comme des nouilles dans un plat. On dit qu'elles sont en désordre. Dans la structure amorphe, les macromolécules glissent les unes sur les autres engendrant une faible résistance à la traction.

La figure suivante (figure I.9) présente un modèle schématisant de la structure d'un polymère amorphe.

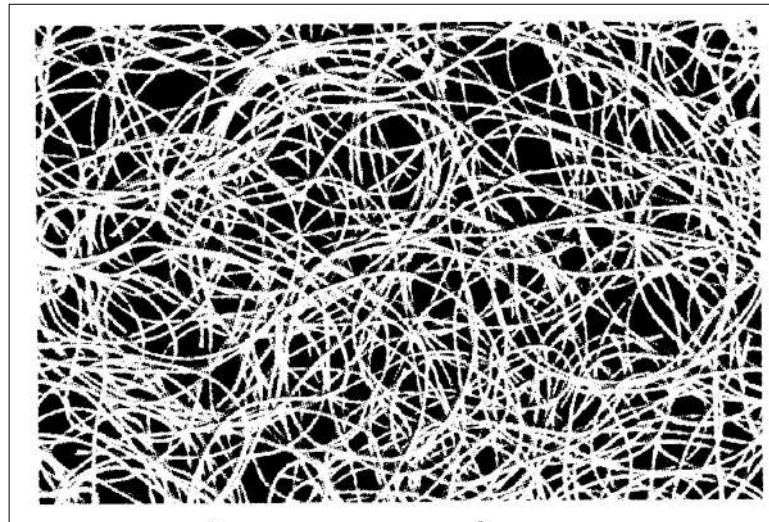


Figure I.9 : Modèle schématisant la structure d'un polymère amorphe. (PINAUD J.)

I.4.3. Polymères cristallins orientés :

Les cristallites sont orientées lors d'un étirage à froid, donc bonne résistance à la traction. La figure I.10 montre un modèle de structure d'une fibre de polyéthylène.

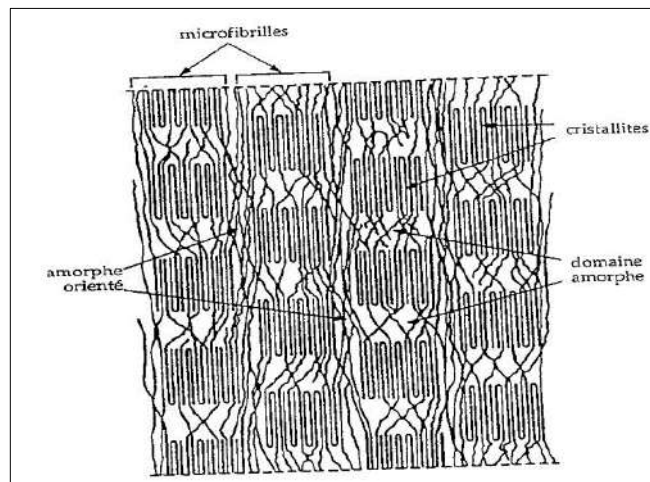


Figure I.10 : Modèle de Prevorsek schématisant la structure d'une fibre de polyéthylène (LUSSEAU C. et al. , 2004)

I.4.4. Propriétés thermiques :

GUIDOUM A., (2012) ; Mohamedou I., (2013) rapportent que le changement d'état du polymère ou du matériau composite polymérisé, sous l'action de la température, et entraînant des variations importantes de ses propriétés mécaniques. La transition vitreuse est caractérisée par une température de transition vitreuse (T_g).

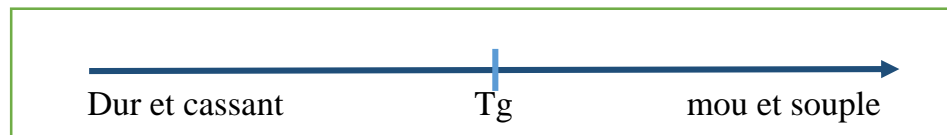


Figure I.11 : Schéma explicatif du changement de température de polymère.

En dessous de cette température, le polymère est dit vitreux (état solide) et présente le comportement d'un corps solide élastique. De là il présente un comportement de solide plastique (état viscoélastique), suite à l'affaiblissement de liaisons intermoléculaires (force de Van der Waals, ...).

Les paramètres les plus importants :

- La flexibilité des chaînes ;
- La taille et la polarité des groupes latéraux ;
- La masse moléculaire.

I.4.5. Propriétés mécaniques :

Décrivent leur comportement vis à vis des sollicitations mécaniques telles que pressions, étirements, torsions, frottements, chocs et effets de la pesanteur.

D'autres, les élastomères, seront recherchés pour leur élasticité qui leur confère une excellente capacité d'absorption des chocs, à cet effet ils sont employés dans les pneus, les semelles de chaussures, les matelas, les fibres... (GUIDOUM A., 2012 ; Mohamedou I., 2013).

D'autres caractéristiques des polymères sont également exploitées dans les applications pratiques, on peut citer à titre d'indication :

- * **Propriétés optiques** : transparence, translucidité, opacité, coloration (étuis de CD, bouteilles d'eau).
- * **Propriétés électriques**: isolation électrique, en particulier dans les circuits électroniques et les gaines de câbles électriques, comme il existe aussi des polymères conducteurs.
- * **Propriétés de protection physique et chimique** : imperméabilité aux liquides et gaz, résistance chimique aux solvants, résistance aux rayons UV.

I.5. DOMAINES D'APPLICATION DES POLYMERES

I.5.1. Le polymère en l'Algérie :

D'après la division des industries chimiques, l'Algérie se place en seconde position sur le continent Africain , après l'Afrique du sud, en matière d'importation du plastique dont le volume a augmenté de 13% entre 2007 et 2015.

Les données avancées par le Centre national de l'informatique et des statistiques des douanes algériennes CNIS, en l'année 2017, font ressortir des importations d'une valeur de 2,174 milliards de dollars de matières plastiques, dont 1,904 milliards de dollars de produits bruts destinés à l'industrie plastique avec un taux de 87,58 % et 269 millions de dollars de produits plastiques finis.

L'industrie et la transformation du plastique existe en Algérie depuis les années 70, indique le responsable qui précise que son activité s'est nettement développée depuis 2012 suite à la promulgation de plusieurs décrets exécutifs.

D'après le centre CNIS, le plastique transformé est utilisé dans les domaines de l'agriculture, de l'agroalimentaire, du logement, de la construction, des ressources en eau, de l'industrie automobile et dans le secteur de l'éducation et autres.

La figure I.12 présente les divers domaines de consommation de matières plastiques en l'Algérie pour l'année 2017.

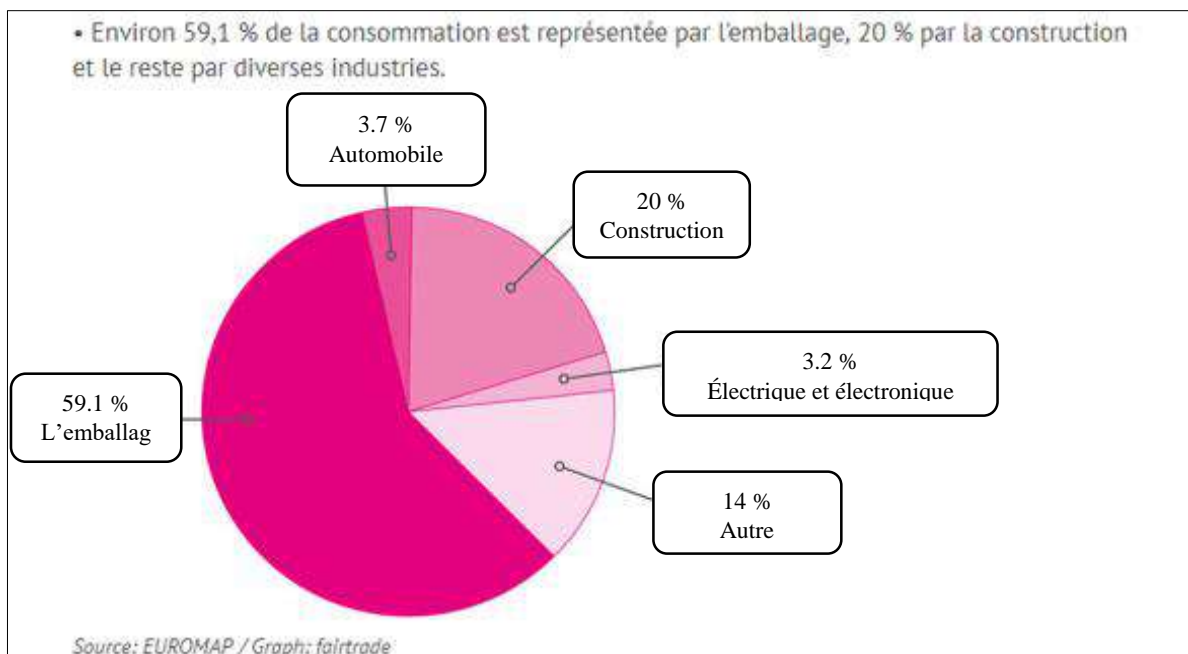


Figure I.12 : Consommation de matières plastiques en Algérie pour l'année 2017 (EUROMAP).

I.5.2. Utilisation des polymères :

Les polymères industriels de grande consommation sont des matériaux légers, ayant de bonnes propriétés mécaniques. Ils remplacent avantageusement les matériaux traditionnels, comme le bois

ou les métaux. Les cinq familles les plus utilisées sont : (GUIDOUM A., 2012 ; KEBAILI N., 2017)

- ✚ Les polyvinyles ou PVC : pièces rigides, tuyauterie, films d'étanchéité, tuyauterie d'eau potable et d'eaux usées, gaines de ventilation, les profilés de menuiserie, les stores et les revêtements muraux et des sols ;
- ✚ Les polyéthylènes ou PE : emballages transparents, pièces rigides, feuilles barrière, récipients domestiques, canalisation des eaux usées ;
- ✚ Les polypropylènes ou PP : appareils sanitaires et les conduites d'eau. Ajouté au béton sous forme de fibre, il améliore les propriétés mécaniques ;
- ✚ Les polystyrènes ou PS : pièces rigides, fibres et isolations thermiques ;
- ✚ Les polyesters saturés : cosmétiques, revêtements de surface, peintures, vernis, plastifiants pour autres polymères ;
- ✚ Les polyesters insaturés : films, fibres textiles, matériaux composites ;
- ✚ les polyuréthanes ou PU : Joint d'étanchéité.

Citons également les élastomères, qui proviennent pour certains de ces différentes familles et/ou du caoutchouc naturel, et dont la principale utilisation se trouve dans le domaine des pneumatiques. Les polymères pourraient avoir des applications très intéressantes dans le domaine des composants électriques et électroniques embarqués (aéronautique, astronautique), puisqu'ils sont très légers, mais aussi dans des applications plus courantes telles que les vêtements chauffants et les films transparents pour le désembuage de vitres. En outre dans le domaine routier pour modifier les bitumes (GLAOUI B., 2014). La figure I.13 montre les différents domaines d'utilisation des polymères.

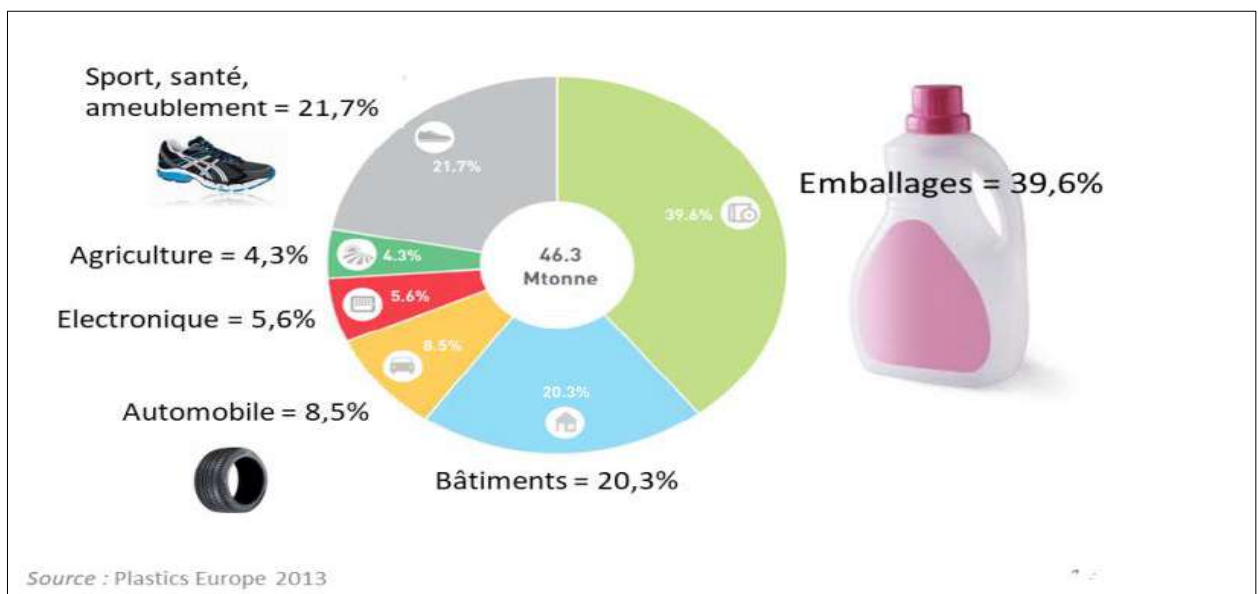


Figure I.13 : Domaines d'utilisation des polymères (Plastics Europe, 2013).

I.6. LES ÉLASTOMÈRES

Les élastomères sont des polymères amorphes comportant des cristallites, dont la température de transition vitreuse (T_g) est inférieure à la température ambiante et habituellement inférieure à -50°C . (MOHAMEDOU I., 2013 ; PME, 2010)

Le terme « élastomère » est utilisé aujourd'hui pour désigner d'une façon générale tous les caoutchoucs, c'est-à-dire les substances macromoléculaires, naturelles ou synthétiques, possédant l'élasticité caoutchouteuse.

Lorsqu'on tire sur un élastomère, les molécules se déplient et s'allongent (GUIDOUM A., 2012). Le rôle des « ponts » est de les empêcher de glisser et de les ramener dans leur position initiale lorsqu'on relâche la tension.

En conséquence, sous des conditions normales, les élastomères présentent une haute élasticité qui est leur propriété de base. La nature chimique et les autres propriétés des élastomères sont très diverses, ce qui impose leur classification.

I.6.1. Le Caoutchouc

Le terme « caoutchouc » vient du mot indien '*cahutchu*' (SCF) (« bois qui pleure ») et rappelle ainsi l'origine du caoutchouc naturel, précurseur des élastomères d'aujourd'hui.

Le caoutchouc à l'état naturel, se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex secrétée par les plantes à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont '*Hévéa brasiliensis*', arbre de la famille des euphorbiacées et d'autres espèces du même genre. (PME II 2010 ; Atomer ; SCF). La figure suivante (figure I.14) expose l'arbre d'origine de caoutchouc naturel.

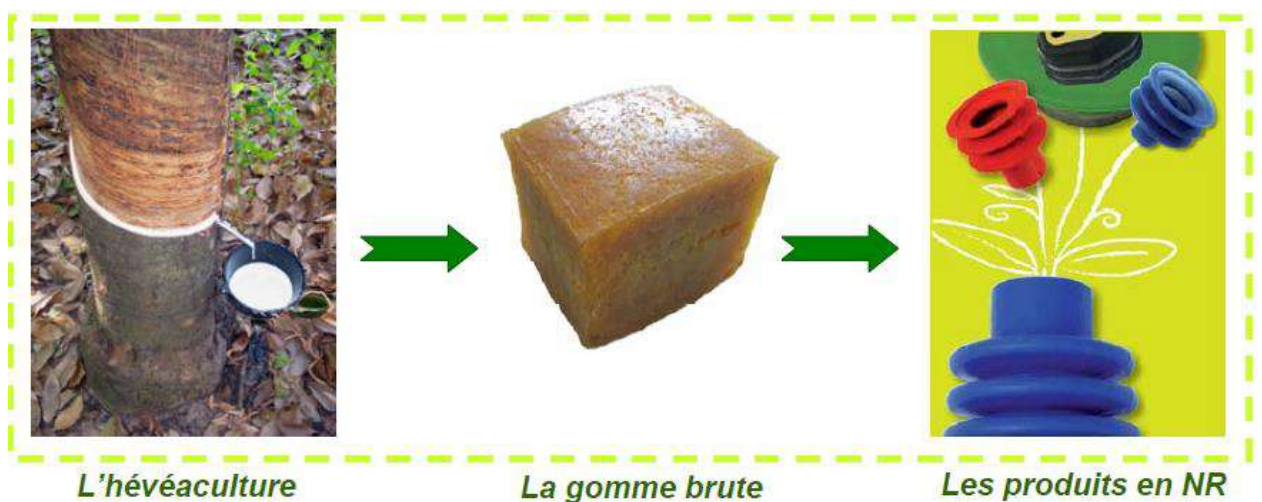


Figure I.14 : Caoutchouc naturel. (STANDARD GUM).

La figure ci-après (figure I.15) présente les étapes de fabrication de caoutchouc naturel.

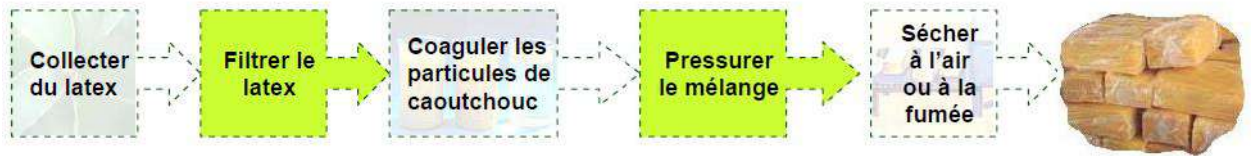


Figure I.15 : Fabrication de caoutchouc naturel. (STANDARD GUM)

Les caoutchoucs synthétiques sont obtenus par polymérisation (création de macromolécules à partir de molécules de base) et par transformations physiques en présence de catalyseurs. Les caoutchoucs possèdent de très nombreuses propriétés. Ils sont notamment élastiques, étanches et antivibratoires. La combinaison de ces trois(3) propriétés leur assure un spectre d'utilisation extrêmement large. (PME II, 2010)



Figure I.16 : caoutchouc synthétique.

D'après Macsiniuc a. (2013), Kebaili N. (2017) , il existe aussi quelque type de caoutchouc synthétique, on cité :

- **SBR** : copolymère du butadiène et du styrène, est très utilisé dans la fabrication des pneus : il a une grande résistance à l'abrasion. Il représente 60 % du caoutchouc synthétique produit dans le monde et 37,3 % de la production totale de caoutchouc.

- **Le polybutadiène BR** : est utilisé comme produit de coupage pour les caoutchoucs naturels (10,7 % de la production totale).

- **EPM** : les copolymères d'éthylène et de propylène (EPM) ont été mis au point par le chimiste italien Giulio Natta dans les années 1950. Ils présentent d'excellentes propriétés élastiques

et un faible prix de revient, mais sont difficilement vulcanisables. Aussi n'occupent-ils pas une place prépondérante sur le marché.

➤ L'apparition des **terpolymères EPDM** - polymères obtenus par polymérisation de l'éthylène, du propylène avec un diène-, facilement vulcanisables, n'a pas encore transformé les habitudes de consommation. EPM et EPDM représentent 4,3% de la production mondiale de caoutchouc.

➤ **Caoutchouc butyle**: préparé pour la première fois en 1940, est obtenu par la copolymérisation de l'isobutène avec le butadiène ou l'isoprène. Il est plastique et peut être mis en forme et mélangé comme le caoutchouc naturel, mais il est difficile de le vulcaniser.

Bien qu'il présente une moins grande résistance aux chocs que le caoutchouc naturel ou que d'autres caoutchoucs synthétiques, il est extrêmement résistant à l'oxydation et à l'action des produits chimiques corrosifs. Du fait de sa faible perméabilité aux gaz, il est largement employé dans les chambres à air des pneus de voitures. Il représente 4,2% de la production mondiale de caoutchouc.

➤ **Polyisoprène de synthèse** : La recherche menée aux États-Unis sur le caoutchouc synthétique à partir de la Seconde Guerre mondiale a débouché sur la synthèse d'un polymère de l'isoprène de composition chimique identique au caoutchouc naturel. Il représente 3,1% de la production mondiale de caoutchouc.

➤ **Néoprène** : les recherches du chimiste américain Carothers conduisirent à la synthèse du Néoprène en 1931. Il s'agit d'un polymère dont le monomère est le Chloroprène, de formule chimique $\text{CH}_2\text{C}(\text{Cl})\text{CHCH}_2$. Le Néoprène présente une grande résistance à la chaleur (supérieure à 150°C) et aux produits chimiques, comme les huiles et le pétrole. Il est utilisé dans les conduites de transport de pétrole, comme matériau isolant dans les câbles et les équipements de machines, et dans les colles. Il représente 3,1% de la production mondiale de caoutchouc.

➤ **Caoutchouc nitrile** : Les copolymères de butadiène-acrylonitrile (NBR), ou caoutchouc nitrile, sont remarquablement résistants aux solvants, aux huiles et aux graisses. Ils représentent 2,1% de la production mondiale de caoutchouc.

I.6.2. Classification des caoutchoucs :

On compte plus d'une quinzaine de familles de caoutchoucs. La classification courante consiste à séparer les caoutchoucs en trois catégories (les sigles utilisés sont ceux qui sont recommandés par la norme ISO 1 629 de 1995) (MOHAMEDOU I., 2013 ; KEBAILI N. 2017) :

- **Les caoutchoucs à usage général** : Ils ne résistent pas aux huiles, mais résistent bien aux acides et aux bases. Ils font preuve d'une élasticité exceptionnelle.
- **Les caoutchoucs à usages spéciaux** : Ils présentent une bonne résistance vis-à-vis des liquides agressifs (solvants, acides) ou des huiles et des carburants, et aussi un meilleur comportement à haute température. Ils vieillissent bien.
- **Les caoutchoucs à usages très spéciaux** : Ils ont d'excellentes tenues thermiques et chimiques, et ils représentent plus de 5 % de la consommation totale.

I.6.3. Poudrette de Caoutchouc

La poudrette de caoutchouc se présente comme des particules de caoutchouc de dimensions inférieures à 2mm (voir figure I.17) dont les principales caractéristiques sont : l'origine chimique, la finesse de mouture et l'existence ou non de corps étrangers. La poudrette est obtenue après un broyage poussé pour avoir un matériau de granulométrie voulue s'adaptant avec le domaine d'utilisation prévu. (KEBAILI N., 2017)



Figure I.17 : Poudrette de caoutchouc.

I.6.4. Fabrication de la poudrette de Caoutchouc

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables ou de déchets de rechapage, tapis et les semelles des chaussures. Le broyage peut être mécanique ou

cryogénique (fragilisation du caoutchouc à froid). S'il est cryogénique, la poudrette obtenue est de meilleure qualité mais présente un coût plus élevé. La poudrette est utilisée dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes anti fissures à usage routier ou de membranes anti vibrations destinées aux plates-formes ferroviaires, de roulettes... (AIT IDIR A., 2017)

I.6.5. Valorisation de la poudrette de Caoutchouc

La valorisation des caoutchoucs, ou des déchets industriels en générale, dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. La récupération des déchets touche deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'élimination de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande. (GHERNOUTI y. et al., 2011)

La valorisation de caoutchouc est le processus de traitement et de transformation des caoutchoucs qui en permet une nouvelle utilisation sous une autre forme (comme ils sont indiqués dans la figure I.18), par exemple en broyats, en granulat ou en poudrette.



Figure I.18 : Différentes formes de caoutchouc après traitement et transformation. (AIT IDIR A., 2017)

La figure I.19, montre les différents modes de valorisation.

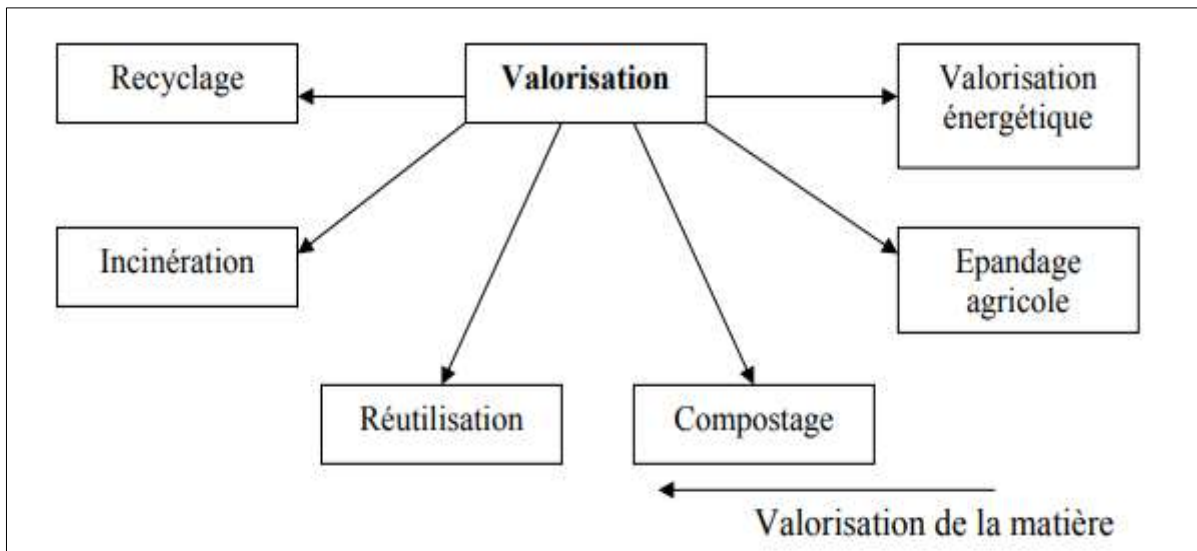


Figure I.19 : Valorisation des déchets (Zeghichi L., 2006).

La figure I.20 suivante résume la valorisation de poudrette de caoutchouc.

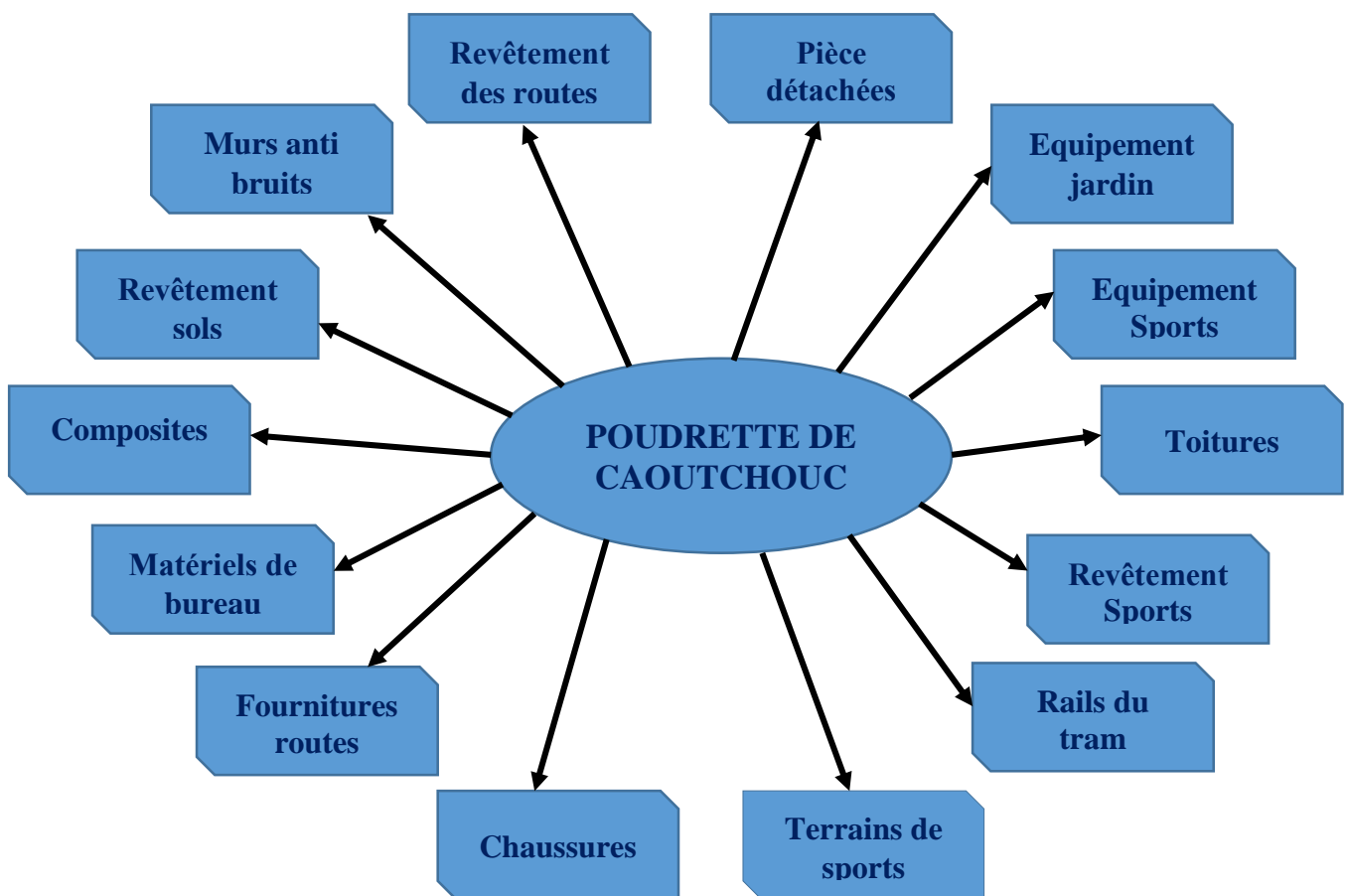


Figure I.20 : Différents modes de valorisation de poudrette de caoutchouc.

I.7. APPLICATIONS DE CAOUTCHOUC DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

Les élastomères sont utilisés dans presque tous les domaines d'activité, malgré l'apparition des nouveaux matériaux thermoplastiques. Leur utilité est reflétée par la production mondiale qui n'a pas cessé de croître. Entre 2009 et 2011, cette production est passée de 22,075 millions des tonnes à 26,108 millions des tonnes, dont plus de la moitié de la production annuelle est représentée par les caoutchoucs synthétiques. (MACSINIUC A., 2013)

Le plus grand consommateur reste l'industrie de l'automobile (30% de la consommation), suivi par l'industrie de la fabrication de chaussures (13%), la construction (12%) et les adhésifs (10%)

L'augmentation de la consommation mondiale a imposé de plus en plus les caoutchoucs synthétiques. Parmi les plus souvent employés, on retrouve le SBR et l'EPDM. (MACSINIUC A., 2013)

La poudrette de caoutchouc peut être utilisée en plusieurs activités, entre par exemple dans la fabrication : (AIT IDIR A., 2017 ; MACSINIUC A., 2013 ; GHERNOUTI Y. et al., 2011)

- **Aires de jeux** : Les propriétés élastiques des granulats de pneus en font un matériau particulièrement intéressant pour la fabrication d'aires de jeux amortissant. Ces éléments alvéolés permettent une absorption importante des chocs et garantissent une grande sécurité pour les aires de jeux. Cette sécurité est conforme à la norme Européenne EN 1177 relative aux aires de jeux et qui impose des sols sachant amortir les chutes des enfants (Aliapur).
- **Bassins d'infiltration** : Le caoutchouc broyé est couramment utilisé pour l'aménagement de bassins d'infiltration. Il retient des volumes d'eau importants, tout en conservant la solidité suffisante pour supporter une route sans déformation sous de lourdes charges.
- **Les chaussées routières** : La poudrette est incorporée comme granulats dans le mélange à la fabrication de l'enrobé (en moyenne 15%). Cette application vise à améliorer les caractéristiques acoustiques de l'enrobé.
- **Bétons** : Des études sont en cours afin d'étudier les opportunités résultant de l'incorporation de granulats issus du broyage de caoutchouc dans des mortiers et bétons à base cimentaire. Par cette incorporation, il s'agit à la fois d'alléger le béton et d'augmenter les performances (accroissement de la résistance à la fissuration et de la capacité de déformation de ces matériaux).
- **Drainage** : Une étude de faisabilité sur la valorisation de caoutchouc dans la fonction de drainage. Les broyats de caoutchouc possèdent en effet une conductivité hydraulique élevée, équivalente à celle des granulats naturels que sont les graviers. Ainsi, le recours

aux broyats pourrait être une opportunité intéressante, notamment dans les installations de stockage de déchets.

- **Gazon synthétique** : est composé d'un tapis d'herbe synthétique dans lequel a généralement été ajouté un lit de lestage en sable recouvert d'une couche de granulats libres. Cette technologie permet une utilisation du stade par tous les temps et en toute saison, puisque ce revêtement ne craint ni le gel en hiver, ni la sécheresse en été, ni les inondations dues aux pluies. Il exige un entretien très limité et ne requiert pas d'arrosage.
- La poudrette de caoutchouc peut réduire les vibrations induites par les plates-formes (tramway) en utilisant les granulats comme couche antivibratile. Les premiers résultats sont prometteurs et devraient déboucher sur une expérimentation.
- Comme elle peut être un mode d'isolation et pour réduire les bruits pour les toitures, les granulats peut être mélangés à des liants ou des résines, pour l'application dans les objets moulés, en particulier dans le domaine du mobilier urbain. Ils peuvent ainsi devenir des ralentisseurs, des plots de signalisation, des accessoires d'aménagement sur voie cyclable et même la fabrication des chaussures.

L'intérêt de poudrette de caoutchouc :

- ✓ Amélioration de la cohésion.
- ✓ Diminution de la susceptibilité thermique.
- ✓ Augmentation des capacités d'allongement.
- ✓ Amélioration des caractéristiques viscoélastiques.
- ✓ Amélioration de l'adhésivité passive (meilleure résistance aux dés enrobage sur la chaussée).
- ✓ Diminution les fissurations dans les matrices cimentaires.

I.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons mis l'accent en premier lieu sur les caractéristiques physiques et mécaniques les polymères les plus utilisées dans le domaine de la construction. Par la suite nous avons essayé d'abordé un aperçu sur le caoutchouc : fabrication, classification et utilisation comme ajout ou fibre dans le domaine de la construction. Enfin, l'ensemble des solutions proposées dans le monde pour la valorisation de ces types de déchets.

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LES GRANULATS

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LES GRANULATS

II.1. INTRODUCTION

L'ensemble des matériaux tels que le sable, les graviers, les gravillons et les pierres concassées qui constituent le squelette du béton sont dénommés les granulats.

Les granulats sont le constituant de base de la majorité des travaux de Génie Civil. Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés (et influences) ; tant du point de vue de leurs élaborations, que de leurs utilisations (mise en œuvre) ; et ce, afin de maîtriser le coût tout en respectant les critères de qualité.

Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton (Claude T., 2007). Ils sont constitués de sables et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Le plus important intérêt d'utiliser des granulats dans le béton c'est l'intérêt technique : bonne résistance, durabilité et limitent les variations dimensionnelles dans le béton.

A cet effet nous avons tenté dans ce chapitre s'intéresse davantage aux principes de fabrication, aux caractéristiques et à l'exploitation des gisements des granulats, ainsi que l'origine, genèse et attributions scientifiques des agrégats en générale et agrégats roulés en particuliers.

II.2. DÉFINITION DES GRANULATS

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme XP P 18-540. Un granulat est un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm, destiné notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation et de base, de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballasts de voies ferrées, des remblais.

Il existe six classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes « d » ou « D » des granulats rencontrés. (XP P 18-540)

- Filler : 0/D où $D < 2$ mm, avec au moins 70% de passant à 0.063mm ;
- Sablons : 0/D où $D < 1$ mm, avec moins de 70% de passant à 0.063mm ;
- Sables : 0/D où $1 < D \leq 0.063$ mm;
- Graves : 0/D où $D > 0.063$ mm;
- Gravillons : d/D où $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm;
- Ballasts : d/D où $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm;

La figure II.1 présente un schéma des différents types de granulats selon leur diamètre.

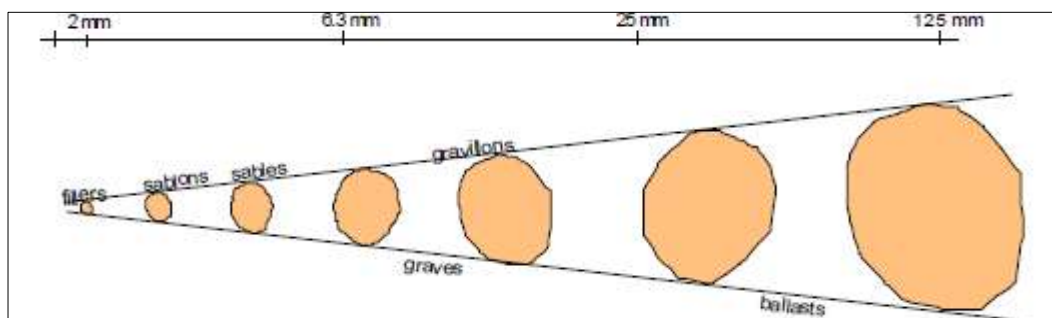


Figure II.1: Différents types de granulats selon leur diamètre. (Gabrysiak F.)

II.3. TYPE ET CLASSEMENT DES GRANULATS

Selon la norme NF EN 12620 on peut classer les agrégats selon leur origine en trois catégories (voir la figure II.2) :

- **Naturel** : d'origine minérale, issus des roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
- **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

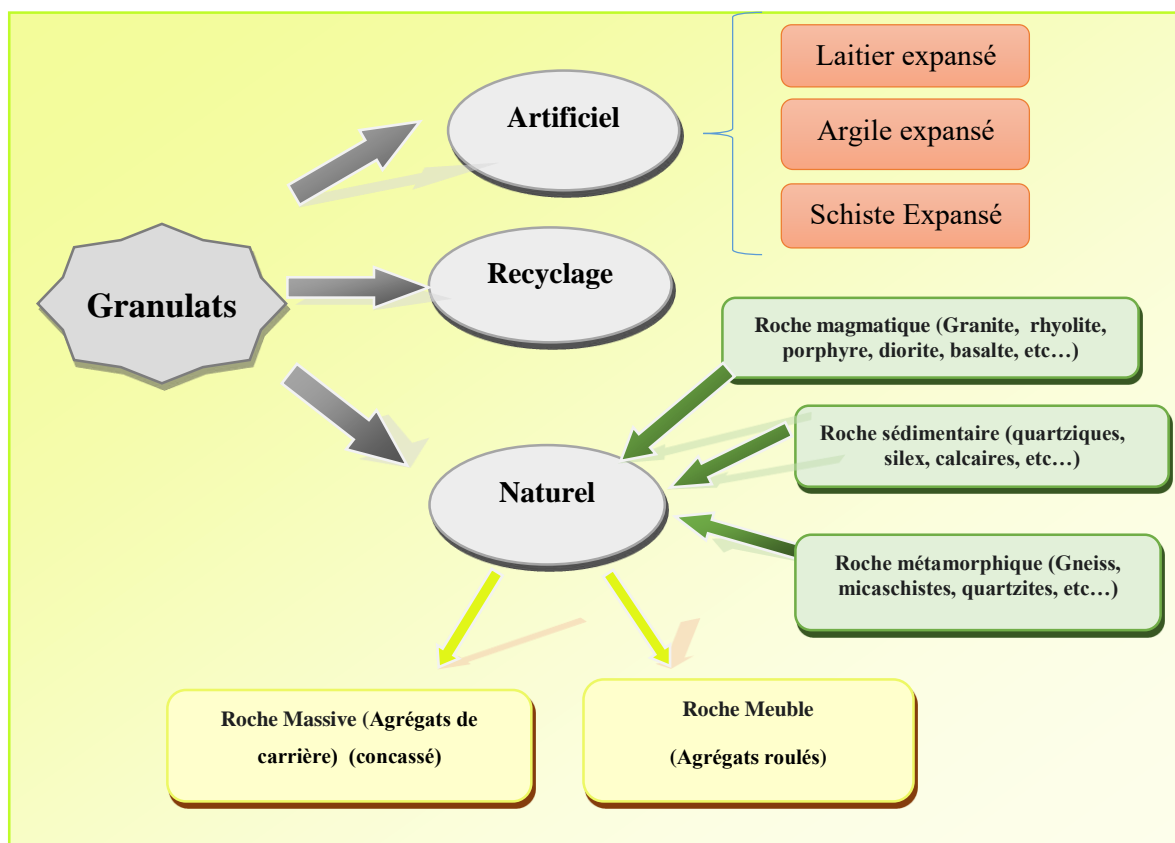


Figure II.2: Les différents types des granulats.

II.3.1. Granulats naturels :

Les granulats sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leur site géologique d'origine ; ils sont dits légers lorsque leur masse volumique réelle ρ_r est inférieure à 2 g/cm^3 , courants si ρ_r est comprise entre 2 et 3 g/cm^3 et lourds au-delà de 3 g/cm^3 . (TOURENQ C., 2007)

Ils proviennent de deux sources : les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Géologiquement, comme les procédés d'identification les granulats naturels peuvent varier suivant la source dont ils proviennent, on examinera successivement ces trois sources. Trois grandes catégories de roches existent dans la nature : (MAILLOT R., 2001).

- Magmatiques : Granites, Basaltes Porphyres,...
- Sédimentaires : Calcaires, Silex, Quartzites,...
- Métamorphiques : Gneiss, amphibolites,...

II.3.1.1. Gisements alluvionnaires :

Ils sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ainsi ils se sont formés des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable fin aux gros blocs (voir la figure II.3), de natures minéralogiques différentes (TOURENQ C., 2007). Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature : - Les granulats de rivière. - Les granulats de mer. - Les granulats de dunes.



Figure II.3 : Granulats des gisements alluvionnaires.

II.3.1.2. Les carrières de roches massives :

Les roches massives susceptibles de fournir des granulats viennent surtout des gisements épais de roches dures. Il s'agit surtout de calcaires de formations géologiques plus anciennes (au plus tôt du tertiaire), ou de roches d'origine Magmatiques, Sédimentaires et Métamorphiques. (Loewinson-Lessing)

- Les roches éruptives résultent de la cristallisation du liquide ou magma (bain silicaté), ce magma arrive directement à la surface à l'état liquide et on appelle ça volcan. Selon Loumachi L. (2011), Les granulats ayant pour origine les roches éruptives conviennent

généralement bien à la confection des bétons hydrauliques et à l'exécution des travaux de viabilité courants.

- Les roches métamorphiques est une roche formée par la recristallisation (et généralement la déformation) de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous l'effet de la température et de la pression qui augmentent avec la profondeur dans la croûte terrestre.
- Les roches sédimentaires sont des roches qui se forment à la surface de la croûte terrestre. Ce sont des roches qui résultent de la compaction et de la cimentation de boues, de sables, de graviers ou de fossiles. (Langer W.L., Kenpper D.H., 1995)

La transformation de ces roches magmatiques et sédimentaires sous l'action de contraintes σ et de températures θ élevées conduit aux roches métamorphiques. Elles sont caractérisées par un feuilletage ou une schistosité dus aux contraintes orientées (schistes, ardoises, etc.) et par une recristallisation due à ces deux facteurs (σ, θ) (micaschistes, gneiss). Il peut y avoir schistosité sans recristallisation, comme pour les ardoises, ou recristallisation sans feuilletage. (TOURENQ C., 2007). La figure II.4 montre les transformations des roches sous l'action de contraintes et de températures.

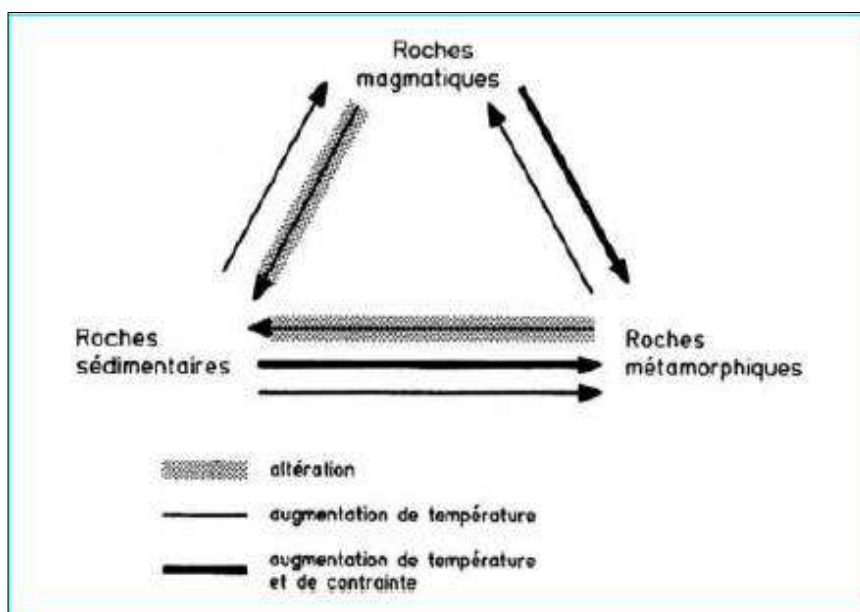


Figure II.4 : Transformations des roches. (TOURENQ C., 2007)

Les granulats extraits de ces roches sont obtenus par abatage et concassage, suivi des opérations de criblage ou tamisage pour sélectionner des grains à une dimension précise. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage... (NEVILLE M., 2000 ; Langer W.L., et al. 1995). Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité.

Le tableau II.1 présente quelques exemples de types de granulats de chaque roche.

Tableau II.1 : Différents types de granulats issus de roches massives

Types de roches	Exemple de famille massive de granulats
Roche magmatique Roche éruptive	Granite, rhyolite, porphyre, diorite, basalte, etc
Roche sédimentaire	Grès, grès quartziques, silex, calcaires, etc
Roche métamorphique	Gneiss, micaschistes, quartzites, etc.

II.3.2. Les granulats artificiels :

Les granulats d'origine artificielle sont des matériaux expansés par action thermique d'argiles, schistes, laitiers, cendres volantes et verres. Leur forte porosité entraîne souvent une absorption d'eau (10 à 15 %) dont il faut toujours tenir compte pour cet usage. (Loewinson-Lessing)

Ces granulats ont des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants. Les plus usuels sont le laitier, l'argile ou le schiste expansé, leurs masses volumiques varient entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granularité. Ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. (Witier P. et al., 1999)

II.3.3. Les granulats recyclés:

Le granulat recyclé est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux... (Berredjem L., 2009).

Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron. L'amiante est considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé. (Serifou M., 2013 ;Berredjem L., 2009).

La figure ci-après (figure II.5) présente un schéma d'installation de production de granulats recyclés.

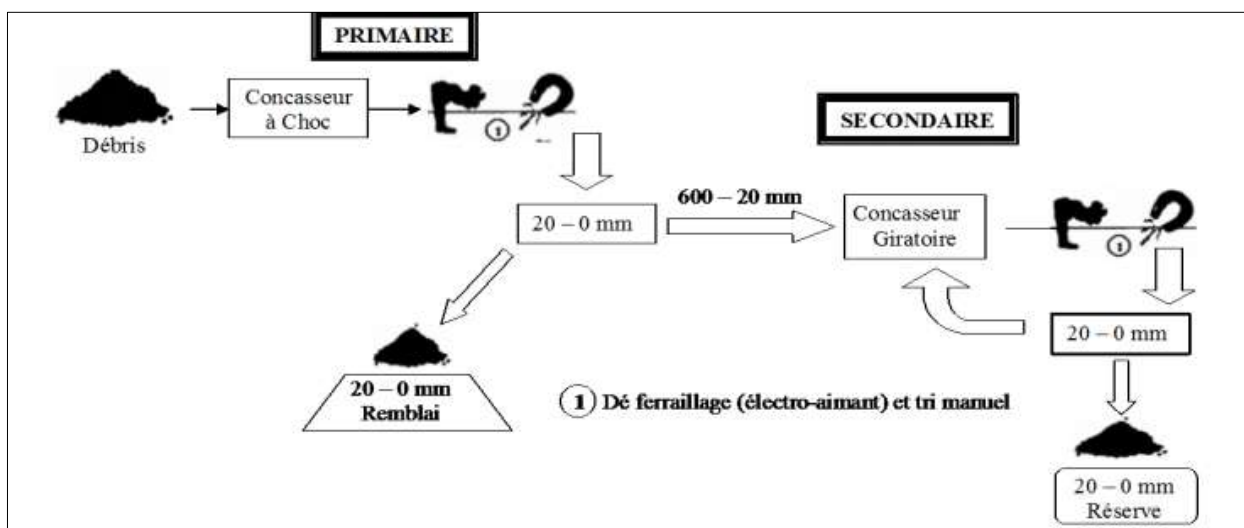


Figure II.5 : Schéma d'installation de production de granulats recyclés. (Berredjem L., 2009)

Divers types de granulats artificiels ou recyclés s'avèrent en outre potentiellement utilisables, plus particulièrement en technique routière, sous réserve de résultats d'études préalables probants. La politique actuellement menée en matière d'environnement tend à favoriser le développement de leur emploi, dans le respect des règles environnementales et techniques visant à minimiser les risques de pollutions et de désordres. (Serifou M., 2013 ;Berredjem L., 2009 ; Saadani S.)

II.4. FABRICATION DES AGREGATS

Avant toute ouverture de carrière, l'accès au gisement représente une tâche administrative et environnementale de grande ampleur qui peut facilement durer 5 à 10 ans. La période de production proprement dite est généralement plus longue dans les roches massives que dans les roches meubles. (Loumachi L., 2011) La production de granulats artificiels ou recyclés, quant à elle, a le mérite de ne pas consommer de ressources naturelles et de ne pas modifier la topographie des terrains d'accueil des installations.

Antérieurement de choisi le terrain et lancer les travaux, il faut d'abord caractériser le gisement sur les plans géologique et géotechnique et définir les moyens techniques qu'il convient de mettre en œuvre dans le cadre d'une démarche industrielle.

La production des granulats à partir de roches meubles ou massives, nécessite les principales étapes suivantes (voir la figure II.6) (Gabrysiak F., 2013) :

- Décapage des niveaux non exploitables ;
- Extraction des matériaux ;
- Transfert sur les lieux de traitement ;
- Traitement des granulats pour obtenir les produits finis ;
- Remis en état du site exploité.



Figure II.6: Extraction des granulats (roches meubles ou massives). (Gabrysiak F., 2013)

II.4.1. Roches Meubles :

Quand le gisement de granulats alluvionnaire se situe au-dessus du niveau d'eau (nappe phréatiques, eau de la rivière,...), on exploite directement les matériaux avec les engins traditionnels des travaux publics telle que des pelles ou des chargeuses, comme il indique dans la figure II.7.

Si le site est immergé dans l'eau, alors l'extraction peut être réalisée par des engins flottants : dragues à godets, à grappin ou dragues suceuse.

Dans le cas de site immergé peu profond, l'exploitation pourra avoir lieu depuis la rive avec des pelles à câbles équipées en draglines, des pelles hydrauliques ou des excavateurs à godets.



Figure II.7 : Extraction de gravier roulé – drague suceuse –

II.4.2. Roches Massives : (Tourenq C., 2007 ; Degussa; Gabrysiak F., 2013 ; Ghomari F.)

- ✚ **La découverte** : La roche saine d'un site d'extraction n'est accessible qu'après décapage de la couche de terre végétale et de la roche altérée dont l'épaisseur variable peut atteindre une dizaine de mètres. Il y a deux phases :
 - **Décapage** de la terre végétale.
 - **Extraction** des roches altérées qui seront intégrées dans les réaménagements du site ou commercialisées comme remblais.
- ✚ **L'abattage** : L'abattage consiste à détacher du massif rocheux par tir de mine un volume de matériaux fragmentés avec un bolomètre adapté à l'exploitation, les plus gros blocs de taille variable pouvant dépasser 1 mètre dans leur plus grande dimension.
- ✚ **Marinage et concassage primaire** : Cette phase représente le premier traitement de la roche extraite dans le processus d'élaboration des matériaux :
 - **Marinage** : les matériaux sont chargés et transportés depuis l'abattage (au front) jusqu'au concasseur primaire.
 - **L'alimentation** : après réception du tout-venant dans une trémie monobloc, un alimenteur pré-cribleur vibrant assure une introduction régulière tout en éliminant les matériaux terreux.
 - **Concassage primaire** : Passage de l'état de blocs à l'état de pierres.
- ✚ **L'installation de broyage-criblage** : Pour fabriquer des granulats, la phase suivante consiste à réduire la taille des matériaux issus du concassage primaire, par concassages successifs :

→ **Le criblage (ou tamisage)** : il permet de sélectionner les grains, le crible ne laissant passer dans ses mailles que les éléments inférieurs à la taille voulue. On peut ainsi, par une succession de criblages, trier les grains et obtenir des granulats de différents calibres.

→ **Broyage secondaire** : après un passage sur un premier crible à 2 étages, les matériaux trop gros sont dirigés vers un broyeur conique vertical qui passe la production à 0/30 mm.

✚ **Le lavage** : la présence d'argiles ou de poussières, mélangés aux matériaux ou enrobant les granulats, peut les rendre impropres aux usages auxquels ils sont destinés. Dans ce cas, ils sont lavés.

✚ **L'expédition** : Une fois traités et classés par granulométrie, les granulats sont acheminés vers les aires de stockage, soit sous forme de stocks au sol soit dans des silos.

La figure II.8 résume les étapes de fabrication des granulats à partir d'une roche massive.

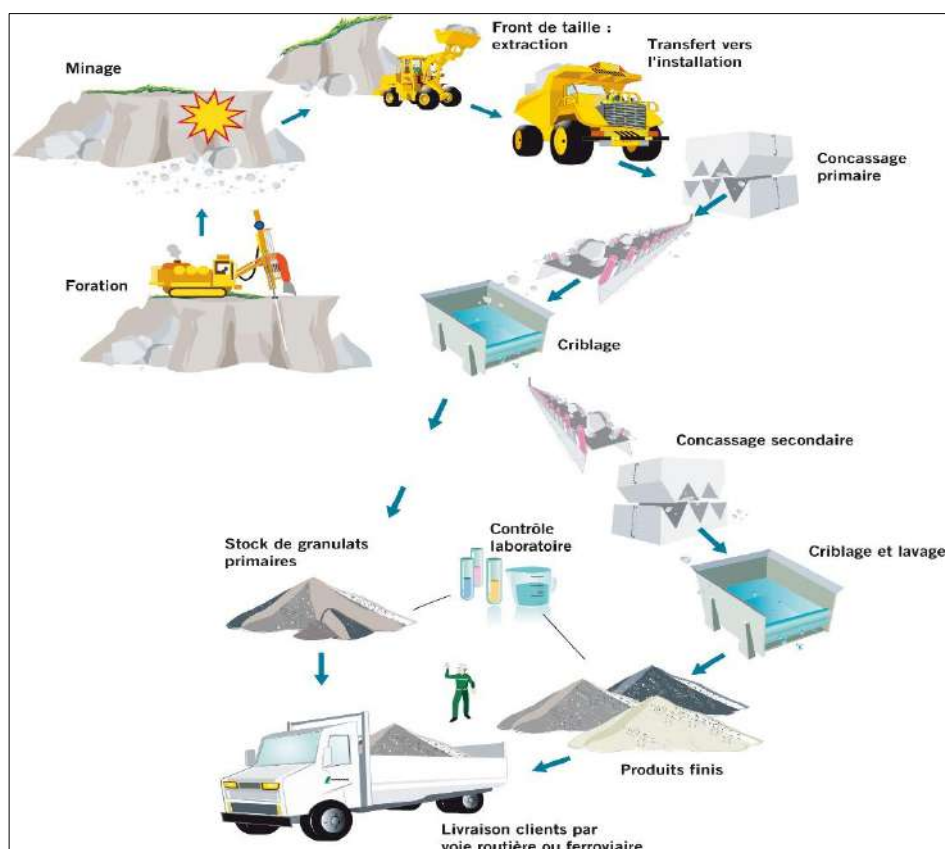


Figure II.8 : Fabrication des granulats à partir d'une roche massive.

II.5. LES INDICES MORPHOLOGIQUES DES AGREGATS

Le concassage des roches est effectué pour la production de granulats de formes variées, cubique ou isométrique et plate allongée ou parallélépipédique essentiellement. La fragmentation des roches dépend, en général, des caractéristiques physico-chimiques des minéraux constitutifs de la roche et, en particulier, de la fissuration et de la frontière de jonction des minéraux (Holcim

2015 ; Tutumluer E., 2005). C'est là que dépendent la nature et la structure de la roche dont les comportements seront différents lors du concassage et particulièrement en ce qui concerne la production de granulats (Tutumluer E., 2005 ; Miskovsky K. et al., 2004)

Les indices morphologiques des particules agrégats grossières comprennent le rapport plat et allongé (indice de forme), l'indice d'angularité et l'indice de texture de surface. Ces trois indices ont été développés pour représenter les trois descripteurs morphologiques clés des agrégats grossiers. La figure II.9 indique la différence entre ces indices morphologiques.

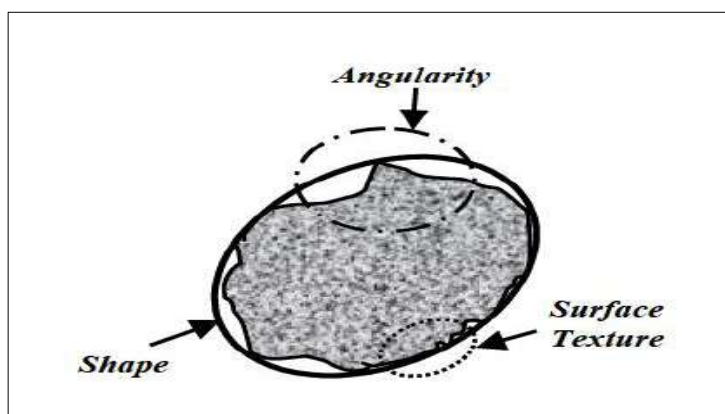


Figure II.9 : Les trois indices morphologiques clés des agrégées. (Tutumluer E., 2005)

II.5.1. Indice de forme des agrégats :

La forme d'un granulat est définie par : (NEVILLE A.M., 2000)

- Sa longueur L ;
- Son épaisseur E qui est le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles ;
- Sa grosseur G ; (voir la figure II.10).

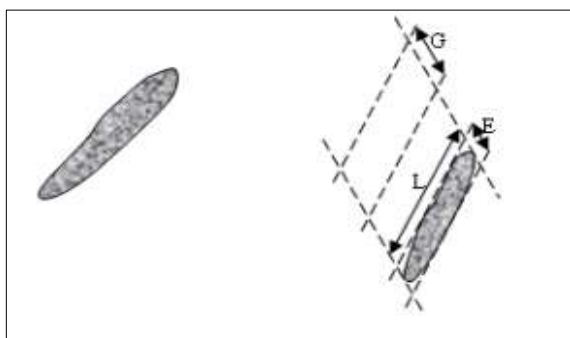


Figure II.10 : Forme d'un granulat. (Lunk P. et al. 2015)

La forme joue un rôle important pour les granulats ; Elle est définie, par le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1,58$ (Dreux G. 1998). Selon la norme NF P 18-561, elle est mesurée par un double tamisage sur des tamis à mailles carrées qui trient suivant la grosseur, et sur des cribles à barres parallèles qui trient suivant l'épaisseur.

Le tableau II.2 présent les différentes formes de granulats selon la norme BS812 ;

Tableau II.2 : différentes formes de granulats (Neville, 2000)

Classification	Description	Exemples
Arrondie	Complètement usée par l'eau où par l'attrition	Gravier de rivière où de plage, sable de désert où de dune
Irrégulière	Naturellement irrégulière où partiellement usée avec des angles arrondis	Autres graviers : Silex
Plate	Matériau dont l'épaisseur est faible par rapport au deux autres dimensions.	Roche laminée.
Angulaire	Bords très bien définis aux intersections de surfaces planes rugueuses.	Roches concassées de tout type, laitier concassé
Allongée	Matériau habituellement angulaire dont la longueur est beaucoup plus important que les deux autres dimensions.	-
Plate et allongée	Matériau beaucoup plus long que large et plus large qu'épais.	-

II.5.2. Indice d'angularité :

Il joue un rôle important pour les gravillons, en améliorant l'adhérence, et il améliore la stabilité.

Pour un granulats de roche massive, elle est égale à 100 %. Pour un granulats d'origine alluvionnaire, elle est définie par deux données :

- l'indice de concassage IC , proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension D du granulats élaboré ;
- le rapport de concassage RC , rapport entre d du matériau soumis au concassage et D du granulats obtenu. (Lunk P. et al. 2015 ; Neville, 2000 ; Dreux G. 1998).

II.5.3. Indice de texture de surface:

La texture des particules fait souvent référence à la qualité de leur surface. La texture des granitoïdes a été quantifiée à travers les paramètres morphologiques des minéraux de la roche, dépend de la dureté, de la dimension des grains et de la caractéristique des pores de la roche mère, autant que les forces agissant sur la roche pour produire les surfaces lisses où rugueuses du granulats. (Langer W.L et al., 1995)

On distingue en général deux grands types de surfaces : lisse et rugueuse. La surface d'une particule de granulat est lisse lorsqu'elle est douce au toucher ; elle est rugueuse lorsqu'elle a la texture d'un papier de verre. En règle générale, quand les granulats proviennent d'un concassage, ils ont des surfaces rugueuses. Par contre lorsqu'ils proviennent des gravières ou des sablières, ils ont des surfaces lisses. Le tableau II.3, présente les différentes textures de granulats selon la norme ;

Tableau II.3 : Différentes textures des surfaces des granulats. (Neville, 2000).

Texture de la surface	Caractéristiques	Exemples
Vitreuse lisse	Fracture conchoïdale.	Silex noir, laitier vitreux
Lisse	Roche usée par l'eau où adoucie par la fracture où le laminage, où roche micro grenue.	– gravier – ardoise marbre – certain cryolites.
Granuleuse	Fracture montrant des grains arrondis plus au moins uniformes.	Grés, oolithe
Rugueuse	Fracture grossière d'une roche à grains fins où moyens, ne contenant pas de particules cristallines visibles.	Basalte – calcaire – porphyre
Cristalline	Contenant très visiblement des particules cristallines.	Granite – gabro gneiss
Alvéolaire	Avec des pores et des cavités visibles.	Brique – pierre ponce – laitier expansé – clinker – argile expansée.

Selon Rýza P. et al. (2013), Zhang d. et al. (2012) et Miskovsky K. et al., (2004) , l'évaluation statistique des échantillons de roches analysés souligné les relations suivantes concernant l'influence des index texturaux sur les méthodes d'essais mécaniques:

Il y a une indication qu'une diminution de la taille du grain provoque une légère diminution de la valeur d'impact. Cela signifie que la résistance des roches granitoïdes aux effets de l'impact augmente légèrement avec une taille de grain décroissante.

Plusieurs auteurs (Bruce Roy T. V., 2016 ; Okonkwo V.O, 2015 ; Abdullahi M., 2012 ; Hafid H., 2012 ; Zhang d. et al., 2012 ; Boufedah Badissi A., 2011 ; Pachoukova I. et al., 2008 ; Mushtaq A., 2006 ; Rifath S., et al., 2006 ; Miskovsky K. et al., 2004 ; Rozalija K., 1997 ;...), trouvent les résultats suivantes concerne l'influence de ces indices morphologiques des granulats sur le comportement de béton :

- Les granulats plats exercent une influence défavorable sur la durabilité des bétons ;

- La texture de la surface de granulats affecte sa liaison avec la pâte de ciment, et influence aussi la demande en eau du mélange ;
- Une texture plus rugueuse entraînera peut être une forte adhérence, plus grande entre le granulat et la matrice de ciment.
- Une texture de surface rugueuse confère une certaine adhérence au matériau de cimentation, ce qui produit un lien plus fort et crée ainsi un béton plus solide ;
- Certains agrégats peuvent au départ avoir une bonne texture de surface, mais peuvent polir plus tard, en douceur, sous les charges. Ces agrégats sont inacceptables pour les surfaces d'usure finale.
- Les granulats roulés présentent aussi une bonne résistance intrinsèque mais développent une liaison médiocre avec la pâte de ciment ;
- les granulats concassés nécessitent une plus grande quantité d'eau à cause de leurs compacités, de leurs absorptions et leur surface spécifique ;
- Granulats concassés sont réputés avoir une excellente adhérence avec la matrice cimentaire, à cause de leurs natures chimiques, leurs porosités et leurs rugosités ;
- La consommation en ciment est plus forte avec le granulat roulé, à cause de sa mauvaise adhérence à la pâte de ciment ;
- Pour une bonne ouvrabilité, les granulats devraient présenter des formes aussi sphériques ou cubiques que possible avec une surface lisse ;
- les granulats concassés, allongés avec une surface rugueuse peuvent mieux s'enchevêtrer et ainsi améliorer les résistances à la compression, à la traction et à l'usure du béton.





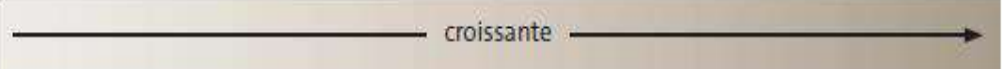
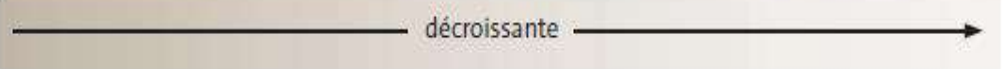
	Granulats roulés		Granulats concassés	
Forme	sphérique	aplatis/allongés	cubiques	aplatis/allongés
				
Angularité	arrondis		anguleux	
Etat de surface	lisses		rugueux	
Surface spécifique, demande en eau				
Ouvrabilité, aptitude au compactage				

Figure II.11 : Influence de la forme et de l'état de surface des grains sur les propriétés du béton frais. (Holcim 2015)

II.6. CARACTERISATION DES GRANULATS

Les spécifications relatives aux granulats diffèrent sensiblement suivant les techniques d'emplois et les ouvrages concernés (béton, couches de chaussées, ballasts, ...). Les caractéristiques des agrégats s'effectuent donc grâce à une série de tests normalisés lequel constituant la référence des moyens d'utiliser pour le contrôle de la qualité des fournitures.

La norme XP P 18-540 définit ces caractéristiques pouvant être utilisés pour la confection des bétons hydrauliques (voir annexe B).

II.6.1. Caractéristiques de Fabrications :

II.6.1.1. La granularité :

La dimension des granulats utilisés dans le béton passe de plusieurs dizaines de millimètres à moins d'un dixième de millimètre. Pour tous les bétons, on mélange des éléments de diverses grosseurs, la distribution de la grosseur des éléments s'appelle granulométrie.

On peut déterminer la granularité à partir l'essai analyse granulométrie (EN 933-1) : tamisage les granulats sur une série de tamis et traçage de la courbe granulométrique (% tamisât cumulés en fonction des diamètres des grains).

Un granulats est caractérisé par sa classe d/D ; d et D étant respectivement la plus petite et la plus grande dimension des grains.

II.6.1.2. Forme des gravillons :

Une bonne forme des granulats est essentielle pour éviter des chutes de résistance des bétons par suite du risque d'apparition de plans de glissements potentiels.

Le coefficient d'aplatissement (EN 933-3) caractérise la forme des granulats dont la dimension est comprise entre 4 et 80 mm à partir de (G) et (E) (voir article II.5.1), est par définition le pourcentage d'élément tel que : $G/E > 1,58$. (Dupain, R. et al., 2000)

II.6.1.3. La finesse des sables :

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante ; Il est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur une série de tamis. Le module de finesse est une caractéristique intéressante, surtout en ce qui concerne les sables.

II.6.2. Caractéristiques Intrinsèques :

II.6.2.1. Caractéristiques physiques :

❖ Propreté des granulats :

Gravier : La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particule inférieur à 0.5 mm mélange ou adhérent à la surface des granulats supérieur à 2mm.

Sable : la propreté (ES) est fournie par l'essai appelé « équivalent de sable » (EN 933-8) qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau. L'essai consiste à séparer le sable des matières argileuses ou fines, qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage (plus la valeur de ES est grande, plus le sable est propre).

- ❖ **Porosité** : La porosité représente le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. La porosité des granulats courants est en général très faible. Elle est importante dans le cas des granulats légers.
- ❖ **Masse volumique** : C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. Elle dépend du tassement des grains. Elle est comprise entre 1400 kg/m³ et 1600 kg/m³ pour les granulats roulés silico-calcaires. La masse volumique réelle du granulat (vides entre grains exclus) est nettement plus élevée : de 2500 à 2600 kg/m³. (Neville, 2000).
- ❖ **Absorption d'eau** : Le coefficient d'absorption d'eau A_b représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant.

II.6.2.2. Caractéristiques de dureté :

- ❖ **Résistance au polissage des gravillons** : Cette caractéristique concerne les granulats utilisés pour la réalisation de couches de roulement. Plus le coefficient de polissage accéléré (CPA) est élevé, plus la résistance au polissage est importante.
- ❖ **Essai Micro Deval (Résistance à l'usure des gravillons)** : La norme NF P 18-572 définit des catégories de valeurs maximales de la résistance à l'usure des gravillons en fonction des valeurs de coefficient micro Deval.
L'essai consiste à introduire des granulats (500g) dans le cylindre de la machine MDE, avec de l'eau et des billes de taille normalisée équivalente à celle des gravillons. Lors de la rotation du cylindre, les gravillons frottent sur les billes. La masse des éléments inférieurs à 1.6 mm à la fin de l'essai donne la résistance à l'usure du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant à l'usure.
- ❖ **Essai Los angeles (Résistance à la fragmentation)** : La norme NF EN 12620 définit des catégories des valeurs maximales du coefficient Los Angeles, et des catégories de valeurs maximales de résistances au choc.

L'essai consiste à introduire des gravillons (5Kg) dans le cylindre de la machine Los Angeles. Lors de sa rotation, les granulats sont heurtés par des boulets plus lourds que les gravillons. La masse des éléments inférieurs à 1,6 mm à la fin de l'essai donne la résistance aux chocs du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant aux chocs.

Le tableau II.4 résume les résistances mécaniques de chaque roche et visibilité d'utilisé pour le béton hydraulique.

Tableau II.4 : Aptitude des principaux granulats à leur emploi pour le béton selon la roche d'origine.
(Holcim , 2015 ; Dupain, R et al. 2000)

	Roche d'origine	Dureté Deval	Dilatation $\mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$	Vitesses de propagation des ondes km/s	propriétés	Difficultés rencontrées	Possibilité d'emploi pour les bétons
éruptives	Granites	15 à 19	8 à 12	6.00	Dures et compactes, donc bonne résistance au gel	-	Oui pour la Plupart
	Diorites	16		6.20			
	Porphyres	16 à 17		-			
	Basaltes	20		7.00			
métamorphiques	Quartzites	17 à 20	10	6,00	Durs et compacts, inattaquables chimiquement.	-	Granulats de qualité utilisés pour les parements
	Marbres Schistes	15 à 20	10/12	-	Sensible au gel.	Présence de fines friables	Oui. Uniquement Schistes durs
	Gneiss	-		6.00			Oui si stables
sédimentaires	Calcaires	12 à 15	6 à 8	6,60	Bonne adhérence au mortier.	-	Oui possible après essais préalables
	dolomies	10 à 12		-			

II.6.3. Caractéristiques chimiques:**II.6.3.1. Teneur en ions chlorures :**

Les chlorures modifient la cinétique d'hydratation du ciment et provoquent la corrosion des armatures. La teneur en chlorure issu de l'ensemble des constituants du béton est donc limitée. (Dreux G., Festa J.,1998)

II.6.3.2. Réactivités aux alcalis :

Dans des conditions défavorables (granulats contenant une fraction significative de silice soluble réactive dans un environnement riche en alcalin) et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcali-réaction peuvent provoquer un gonflement du béton. Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR) ou potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP). (Poyet S., 2003)

II.6.3.3. Teneur en soufre et en sulfates :

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'excède pas 0,4% en masse. La teneur en sulfates (SO_3^{-4}) doit être inférieure à 0,2%. On la détermine si S est supérieure à 0,08%. Les sulfures présents dans les granulats peuvent en s'oxydant se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la teneur en soufre pour se prémunir de ce phénomène. (Dreux G., Festa J.,1998)

II.7. GRAVIER ROULÉ**II.7.1. Définitions et Description**

Les granulats, dont le gravier roulé, sont définis comme étant un ensemble des grains chimiquement inertes, de dimensions allant jusqu'à 125 mm (NF P18-101). Les granulats sont classifiés selon plusieurs critères, tels que la provenance, la taille et la masse volumique.

Le gravier roulé est un agrégat pierreux d'origine alluvionnaire, aux grains de dimension généralement comprise entre 2mm et 80 mm.

Le gravier roulé provient soit du dragage de rivière, soit extrait dans des carrières. Le gravier de rivière est essentiellement composé de grains arrondis et lisse sous l'effet du courant d'eau. Il s'agit essentiellement de matériaux "roulés" dans le lit majeur des fleuves, dans le cours des rivières ou en mer.

Le gravier roulé se présente sous divers aspects selon la région où il est rencontré. Ci-dessous quelques exemples de gravier roulés (voir figure II.12).



-a- Le gravillon roulé de Marne est un petit caillou roulé de couleur beige clair/blanc. Il est extrait, lavé puis calibré.



-b- Au Portugal, un gravier blanc roulé, nuancé de couleurs orangées, roses et bordeaux, existe en différents calibres.



-c- Gravier roulé Playa jaune et gris bleuté

Photo II.1 : Exemples de gravier roulé.

Dans la région d'Ouargla existe trois principaux types de gravier roulé :

- Le gravier roulé de Hassi Sayeh (voir photo II.2) comporte deux formes de particules : des particules de couleur gris, enrobées d'une couche de calcaire et des particules rougeâtres.
- Le gravier roulé de Oued n'ssa (voir photo II.3). Il est un ensemble des particules de nuance de gris à blanc. Ces dernières sont un peu plus volumineuses que celles de Hassi Sayeh.
- Gravier roulés de Hassi Ben Abd Allah c'est un gravier au coloris mélangés de beige, blanc... (voir photo II.4).



Photo II.2 : gravier roulé de Hassi Sayah.



Photo II.3 : gravier roulé de Oued N'ssa.



Photo II.4 : gravier roulé de Hassi Ben Abd Allah.

II.7.2. Genèse

La forme arrondie des granulats de gravier roulée justifie amplement l'effet de courants d'eau dans la formation et transport de ceux-ci. Par accumulation de sédiments issus de l'érosion des roches affleurant en surface, on sait que les calcaires ne peuvent se former qu'avec l'aide des êtres vivants qui fixent dans leurs organes solides, comme un cas particulier, calcaire dissous dans l'eau. Leurs restes, accumulés, sont ramenés vers la surface par les mouvements de terrains et l'écoulement d'eau. (Maillot R., 2001).

II.7.3. Propriétés essentielles des granulats naturels :

Les granulats sont soit obtenus directement par criblage, où les grains se présentent alors sous une forme arrondie, soit issus d'un concassage, où les grains ainsi obtenus présentent des arrêtes.

Le choix des granulats est indispensable parce qu'ils représentent 75 % du volume de béton, d'où leur qualité influe fortement sur la qualité du béton, leurs propriétés jouent un rôle majeur dans les caractéristiques du béton soit : - au niveau de sa mise en œuvre : la granulométrie, l'angularité et la teneur en eau. - au niveau du comportement mécanique et les performances à long terme : l'affinité au ciments, résistance mécanique, gelivité, alcali réaction potentielle et la teneur en chlorures (Dupain, R, et al., 2000).

L'extraction des graviers roulés dans les régions citées se fait de manière traditionnelle. C'est-à-dire à la pelle manuelle et grille de tamisage (Photo II.5). Ce, principalement, à cause de la faible demande en la matière. En effet, les domaines d'utilisation du gravier roulé sont très peu nombreux et consomment d'infimes quantités par rapport aux réserves existantes. Ceci rend l'industrialisation du procédé d'extraction non justifiée. D'une autre part, et à cause du caractère pénible d'extraction traditionnelle, le prix de revient du m³ de gravier roulé est comparable à celui du gravier concassé.



Photo II.5: Extraction traditionnelle de gravier roulé.

II.7.4. Utilisations Technologiques :

Les graviers roulés sont utilisés comme matériaux décoratifs dans quelques types de jardins et des traitements du sol. Les patios et vérandas de structures d'habitation, et même de commerces ou administrations peuvent être garnis par le gravier roulé. La principale fonction de ce dernier est le drainage des eaux pluviales et la protection de l'étanchéité bitumineuse contre les rayons solaires. Le gravier roulé est aussi retrouvé comme matériaux de construction de carreaux granito de haute gamme.

Les quantités utilisées n'y sont pas énormes, de même que la technologie de mise en œuvre est avancée. Le prix de vente en est conséquent.

Le gravier roulé était, jadis, utilisé même dans la confection du béton armé dans des éléments tels que dalle de sol et poteaux, et il n'est pas plus utilisé dans les couches routières. La photo II.6 présente un ancien poteau réalisé par le gravier roulé dans la wilaya d'Ouargla (El-Kser).



Photo II.6: Poteau réalisé à base de gravier roulé.

Dans les deux cas, construction ou couches routières, le problème se pose au niveau de surface lisse de gravier, ce qui affaiblit l'adhérence et l'attachement avec les liens, le ciment dans le cas du béton armé et le bitume dans le cas de béton bitumineux. Cette utilisation s'est vue abandonnée à l'arrivée du gravier concassé.

A Ouargla, comme pour le cas de plusieurs régions, le gravier roulé est encore utilisé comme matériau de drainage dans les forages et dans les tranchées agricoles drainantes.

II.8. CONCLUSION

Les caractéristiques des granulats dépendent de la nature et de la qualité de la roche mère d'une part, et de leurs conditions d'exploitation et d'élaboration d'autre part. Les propriétés géométriques et de propreté peuvent être considérablement améliorées en mettant en œuvre des méthodes d'extraction, de fragmentation et de classement appropriées, alors que les propriétés intrinsèques ne peuvent être que peu influencées par la fabrication.

Le choix d'un granulat est donc un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudié en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité.

Pour mieux connaître le comportement des bétons incluant des granulats et comprendre l'influence des agrégats sur le comportement du béton, on a consacré le troisième chapitre à l'identification des bétons témoins et des bétons modifiés par des divers ajouts.

CHAPITRE III

GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS ET BÉTONS MODIFIÉS

CHAPITRE III : GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS ET BÉTONS MODIFIÉS

III.1. INTRODUCTION

Les bétons ordinaires sont un mélange de quatre éléments, défini par une formulation. Le ciment qui sert de liant hydraulique, de l'eau, de sables et granulats, qui deviennent homogènes entre eux, soit à la mise en oeuvre (béton frais), soit après durcissement (béton durci). Les granulats sont classés en fonction de leurs tailles : fins (sables) de taille inférieure à 4 mm et grossiers (gravillons) de taille supérieure à 4 mm (voir la figure III.1).

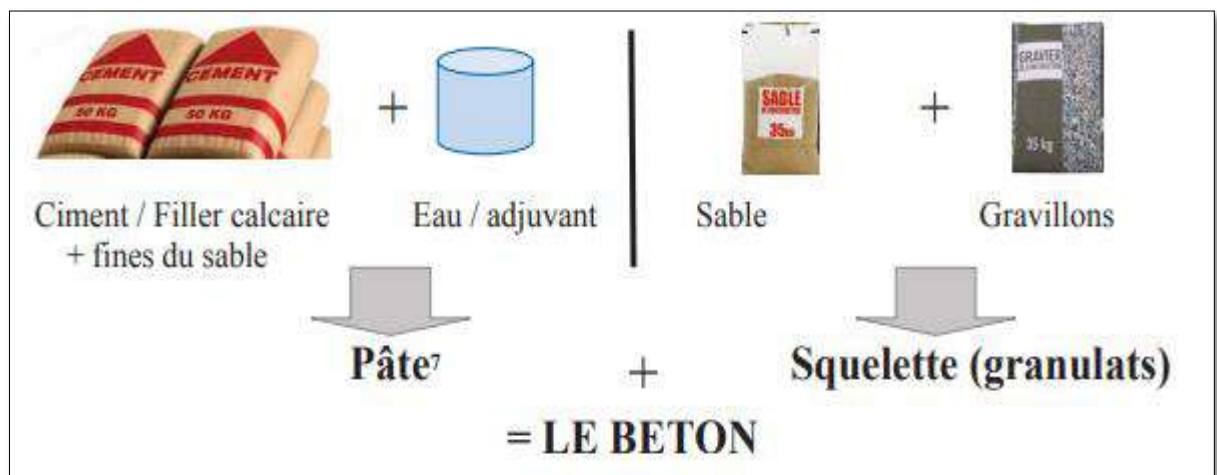


Figure III.1 : schéma récapitulatif des constituants du béton

Ce béton doit répondre à des exigences de performance telles que la consistance à l'état frais et la résistance mécanique à l'état durci. Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton »

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde pour les réalisations des ouvrages de génie civil. Il est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression. Ses inconvénients résident dans sa mauvaise résistance à la traction ainsi que sa masse volumique relativement élevée.

Dans ce chapitre et pour un premier temps, on présente le béton comme étant un matériau le plus utilisé dans le domaine de construction, les principales constituantes, les principales caractéristiques, les paramètres influençant sur le comportement du béton et étude de la relation entre ces caractéristiques et la résistance à la compression en particulière. De plus, une étude théorique sur le béton de fibre, ainsi qu'une description de ces fibres. Dans un second temps, nous

présentons, une synthèse sur les résultats trouvés par les autres chercheurs sur le béton caoutchouté.

III.2. CLASSEMENT DE BETON

La classification des bétons se fait suivant différents critères, comme :

II.2.1. Leur masse volumique :

Selon la classification européenne, il y a trois classes de béton qui sont représentées ci-dessous dans le tableau suivant :

Tableau III.1: Types de béton en fonction de leur masse volumique. (OLLIVIER. J.P et al. 2008)

Types de béton	Béton léger	Béton normal	Béton lourd
Masse volumique (kg/m³)	De 800 à 2000	De 2000 à 2600	Supérieur à 2600

II.2.2. Leur granularité :

La classification se fait en fonction de la dimension maximale des granulats D_{max} (voir tableau III.2) :

Tableau III.2 : Types de béton en fonction de D_{max} . (CIM béton, 2005)

Classes du béton	Béton fin	Béton moyen	Béton gros
Dimension maximale des granulats D_{max}	$8 \leq D_{max} < 16\text{mm}$	$16 \leq D_{max} < 31.5\text{mm}$	$31.5 \leq D_{max} < 63\text{mm}$

II.2.3. Leur consistance (cône d’Abrams) :

Elle est définie en utilisant le cône d’Abrams, et on obtient les cinq classes présentent dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Types de béton en fonction de leur consistance (DREUX G., et al. 1995).

Affaissement (Aff.) en cm	Classe des bétons
0 à 2	Très ferme
3 à 5	Ferme
5 à 9	Plastique
10 à 13	Mou
> 16	Très mou

III.2.4. Leur résistance à la compression:

La norme EN-206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau III.4. Dans ce tableau f_{ck-cyl} est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres de 160mm de diamètre (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Eurocode 2) ; $f_{ck-cube}$ est la résistance caractéristique mesurée sur cubes de 150mm de côté.

Tableau III.4 : Types de béton en fonction de leur résistance. (Contexte normatif des bétons)

Classes	C 8/10	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C45/55
f_{ck-cyl} (N/mm ²)	8	12	16	20	25	30	35	45
f_{ck-cub} (N/mm ²)	10	15	20	25	30	37	45	55

Les éprouvettes sont conservées pendant 28 jours à (20±2)°C sous eau ou dans une chambre où l'humidité relative est ≥ 95 %.

III.3. TYPES DE BETON ET DOMAINE D'APPLICATION

Le béton varie en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

Les types de béton se font selon différents critères, comme montré dans le tableau III.5 ci-après :

Tableau III.5: Types de béton en fonction de leur destination
(Guide de béton ; Boufedah Badissi A., 2011)

Types de béton	Destination
Bétons compactés au rouleau	bétons spéciaux pour réaliser certain type de barrage (barrages poids).
Bétons projetés	Pour réaliser les travaux miniers et souterrains, pour la réparation des ouvrages détériorés
Bétons de construction	destinés à la construction courante des bâtiments ou des ouvrages de faible importance
Bétons autonivelants (autoplaçants)	Pour les ouvrages présentant un ferrailage vraiment dense ou d'une forme variable difficile à mouler (courbures multiples).
Bétons coulables sous l'eau	Pour la construction ou la réparation des barrages, les structures portuaires, les tunnels
Bétons fibrés	Pour les dallages (fibres métalliques), piste d'aéroport ou des pièces techniques telles que les tuyaux, gaines (fibres de verre).
Bétons hautes performances	Ponts, centrales nucléaires, ouvrages de grande ampleur
Bétons décoratifs	Murs, terrasses, dalles, allée, trottoirs
Bétons des chaussées	Voiries urbaines, giratoires, zones d'arrêt de bus ou de stationnement, voiries autoroutières, tramways et aires de stockage lourd.

III.4. CONSTITUANTS DE BÉTON

Le béton est un mélange, en proportions diverses, de granulats, de ciment, d'eau et d'additions minérales (remplaçant parfois le ciment), souvent d'adjuvants et parfois de fibres. (Lunk P. et al. 2015). La figure III.2 présente les constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.

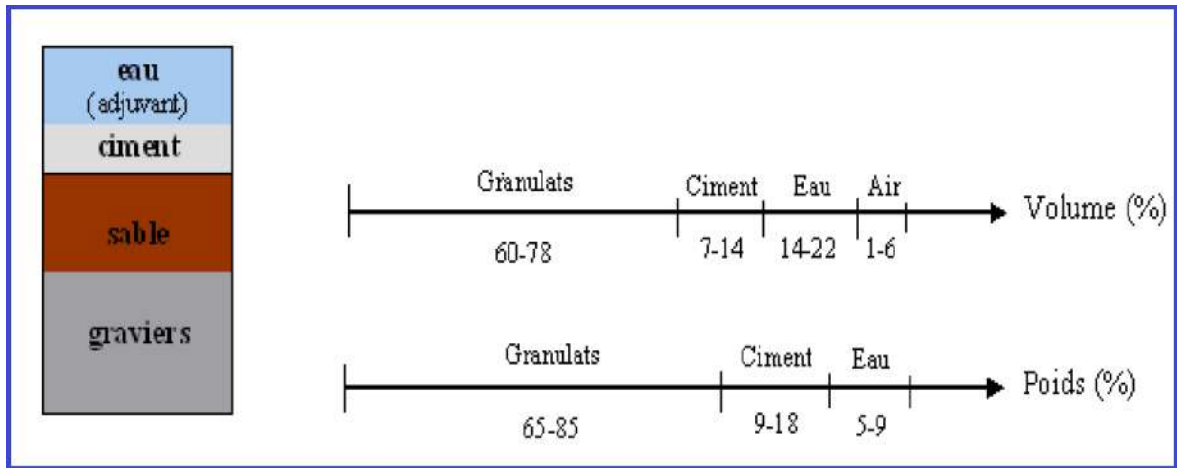


Figure III.2 : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire. (BOUKLI H., 2009)

III.4.1. Granulats :

On peut distinguer les granulats naturels et artificiels, quand le choix est possible, On appelle granulat un matériau granulaire utilisé dans le domaine de construction, soit lié à d'autres substances (liant, bitume) pour obtenir mortier, bétons, bétons routiers ...etc., soit non lié comme les ballasts des voies ferrées, les granulats pour le système de drainage. Il est constitué de plusieurs grains minéraux de différentes dimensions comprises entre 0 et 125 mm le plus fréquemment mais peuvent être aller jusqu'à 150 mm, par exemple pour des exigences d'utilisations (Cas des barrages) (Boufedah Badissi A., 2011 ; Mushtaq A. 2006). Il porte principalement sur la nature minéralogique, la masse volumique, la dureté, la forme, l'absorption d'eau, la propreté, la teneur en fines argileuses est strictement limitée et la granulométrie, propriété géométrique essentielle d'un granulat, dont le bon choix est déterminant dans la formulation d'un béton compact.

Les granulats jouent un rôle important dans le comportement du béton. Leur influence est très forte en termes de performances mécaniques. En effet, ceux-ci présentent de meilleures caractéristiques mécaniques que la pâte de ciment

Pour obtenir un béton ayant de bonnes caractéristiques, plusieurs paramètres entrent en jeu dans le choix des granulats : la qualité, la minéralogie, la forme et une granulométrie appropriée associée. (MAKANI A., 2011)

III.4.2. Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, matériau inorganique finement broyé, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, il forme une pâte qui fait prise, durcit et conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le choix du ciment en fonction de la destination du béton de l'ouvrage est très important (DREUX G., et al. 1995). Le type de ciment et son dosage dépendent à la fois des

performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants (CIMBÉTON, 2013). Le ciment utilisé doit être conforme à la norme NF EN 197-1.

III.4.2.1. Les types du ciment :

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1.

Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

- **CEM I**: Ciment portland (CPA)
- **CEM II**: Ciment portland composé (CPJ),
- **CEM III**: Ciment de haut fourneau (CHF),
- **CEM IV**: Ciment pouzzolanique
- **CEM V**: Ciment au laitier (CPZ) et aux cendres (CLC). (Boufedah Badissi A., 2011 ; Imran K. MD, 2010)

III.4.2.2. L'hydratation du ciment :

Lorsque le ciment est mis en présence d'eau, les réactions d'hydratation se développent et produisent une cristallisation du mélange qui aboutit à un système d'hydrates stables avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise.

La réaction d'hydratation du ciment peut-être découpée en quatre phases :

- **La phase initiale** : le silicate tricalcique se dissout superficiellement pour former un monosilicate de calcium hydraté et de l'étringite;
- **La phase dormante** : la pâte reste fluide, les réactions précédentes se poursuivent moins rapidement pendant une durée de 2 à 3 heures ;
- **La prise**: le béton passe de l'état liquide à l'état solide, la consistance s'acquiert par croissance d'hydrates, grâce à l'interpénétration des cristaux.
- **La période de durcissement**: lorsque suffisamment d'hydrates ont précipité autour des grains anhydres (environ 8 heures après le début de l'hydratation) (voir figure III.3), la diffusion des ions dans l'eau est ralentie. Les réactions continuent donc pendant des années à une vitesse de plus en plus lente et la résistance mécanique et la compacité augmentent en conséquence. (Peter Lunk et al. 2015 ; Boufedah Badissi A., 2011 ; BARON J. et al. 1992)

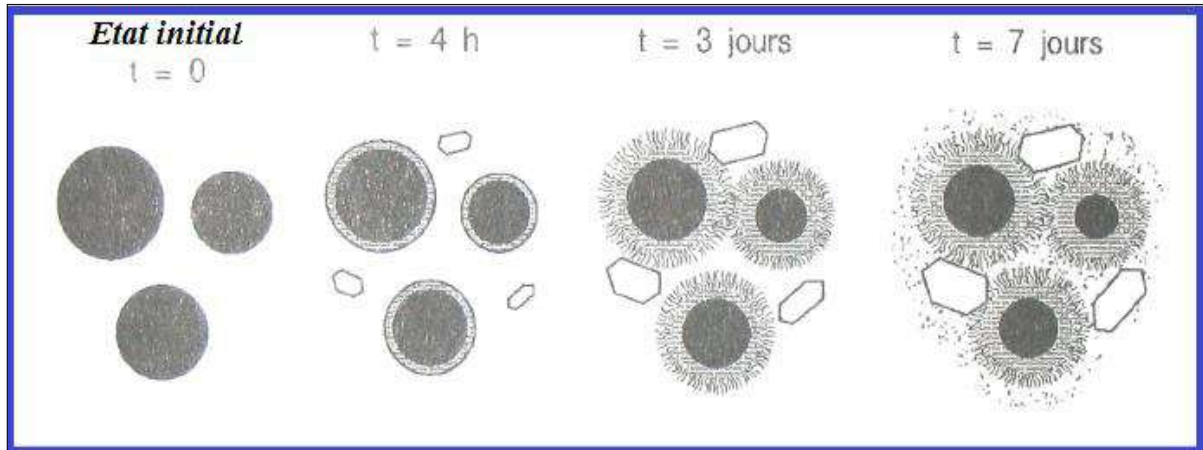


Figure III.3: Le développement progressif des hydrates dans une pâte de ciment en cour d'hydratation. (BARON J. et al. 1992)

III.4.3. Eau de gâchage :

L'eau utilisée en général pour l'élaboration des bétons est celle du réseau public. Étant donné que le dosage en eau influe de manière considérable sur la viscosité et la capacité de béton il est indispensable de bien jauger l'eau de gâchage. Il est donc important de prendre compte de l'humidité des granulats spécialement de celle du sable, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

III.4.4. Adjuvant :

Selon la propriété recherchée pour le béton, on aura recours à l'adjuvant approprié : accélérateur de prise, plastifiant, entraîneur d'air,... Compte tenu de la diversité des produits disponibles, on se conformera aux prescriptions du fabricant pour leur emploi et leur dosage, et on vérifiera leur compatibilité avec le ciment.

III.4.4.1. Classification des adjuvants:

La norme NF EN 934-2 classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

- ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton: plastifiants-réducteurs d'eau, super-plastifiants (anciennement fluidifiants) ;
- ceux qui modifient la prise et le durcissement : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise ;
- ceux qui modifient certaines propriétés particulières : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse. (LUNK P. et al. 2015. ; Guide de béton)

III.5. PARAMETRES QUI INFLUENT SUR LES CARACTERISTIQUES DU BETON

III.5.1. Influence du squelette granulaire :

III.5.1.1. Forme de granulats et la texture de surface :

D'après Mohamed R., (2014), Rýza P., et al. (2013), Boufedah A., (2011), Berredjem L., (2009) ; Mushtaq A., (2006) ; Zeghichi L., (2006) et Rozalija Kozul, (1997), la forme et la texture de surface des granulats, influencent considérablement sur la résistance des bétons, la résistance à la flexion est plus affectée que la résistance à la compression. Une texture plus rugueuse entraînera peut être une forte adhérence, plus grande entre le granulat et la matrice de ciment. En général, la texture et la forme des gros granulats, ont un effet appréciable sur la maniabilité des bétons (Chia Kok S., 2006 ; Jiong HU, 2006).

La figure III.4 montre l'influence de la forme des agrégats sur la résistance du béton d'après Mushtaq A., (2006).

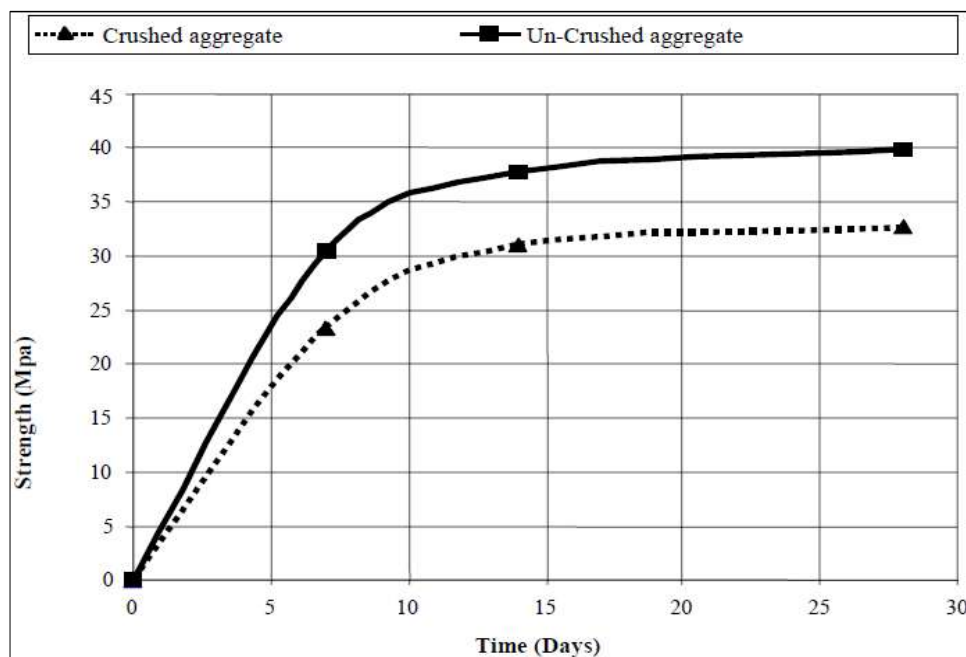
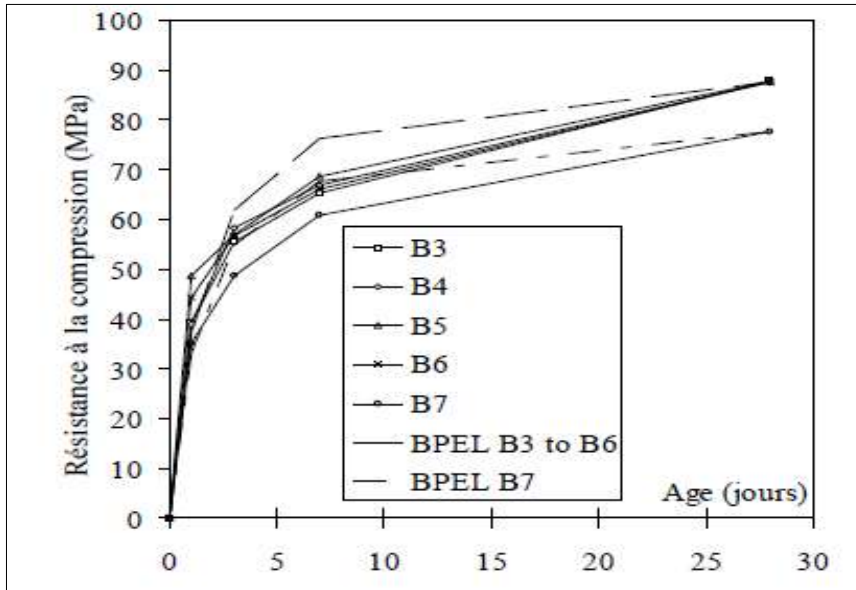


Figure III.4: Influence de la forme des agrégats sur la résistance du béton avec deux types de granulats : concassé et roulé). (Mushtaq A. 2006)

Une surface plus rugueuse, comme celle des granulats concassées génère une meilleure liaison, alors une bonne résistance, et de même les granulats moins durs, plus poreux et ayant une minéralogie hétérogène présentent eux aussi une meilleure liaison. (Okonkwo V.O, 2015)

Selon MAKANI A.,(2011) et Miskovsky K.,et al. (2004) les liaisons chimiques, peuvent être existées dans le cas des calcaires et des dolomies et éventuellement des granulats siliceux, comme ils sont indiqués dans la figure III.5.



B3 calcaire dolomite,
 B4 gravier siliceux concassé,
 B5 calcite concassé,
 B6 diabase concassé,
 B7 gravier siliceux roulé.

Figure III.5: Evolution des résistances à la compression en fonction de la nature des granulats (MAKANI A., 2011)

III.5.1.2. Influence de la granulométrie :

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 réalisées par Mushtaq A., et al. (2006), 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 porosité et la durabilité du béton (voir figure III.6).

Maximum size of Aggregate in mm	Water content in liter per m ³					
	25—50 mm slump		75—100 mm slump		150—175 mm slump	
	Rounded Aggregate	Angular Aggregate	Rounded Aggregate	Angular Aggregate	Rounded Aggregate	Angular Aggregate
10	189	214	202	225	231	255
20	172	196	189	208	208	225
40	160	172	172	189	189	208
50	148	166	166	178	178	196
75	136	154	154	166	160	184

Figure III.6 : Teneur en eau approchée pour différents affaissement et tailles maximales d'agrégats (Mushtaq A. 2006)

D’autre part, la granulométrie du sable caractérisée par son module de finesse qui affecte de façon majeure les performances du béton. Le module de finesse d’un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

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 ABDULLAHI M., (2012), 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 figure III.7 présente l'influence des fines sur la résistance du béton.

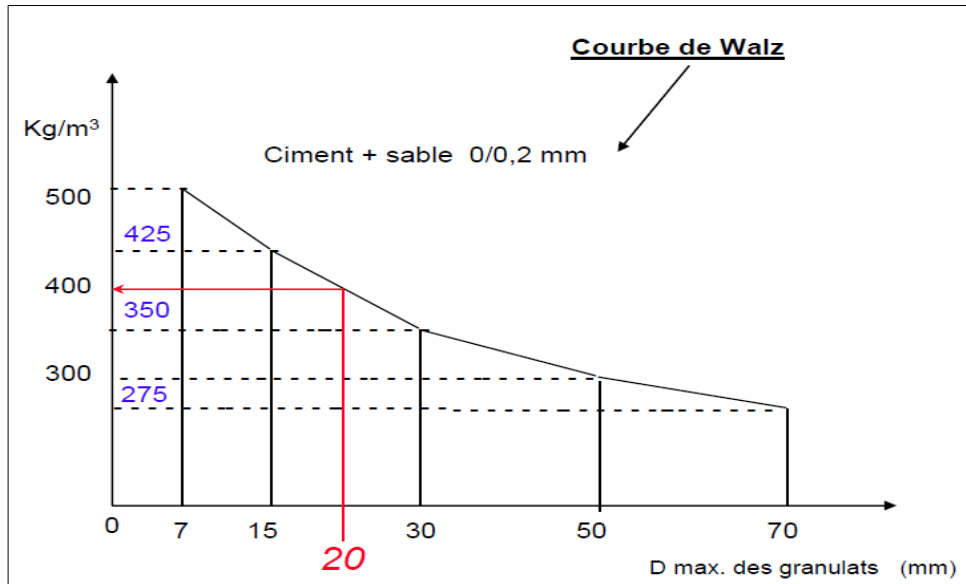


Figure III.7 : Influence des fines sur la résistance du béton. (Degussa.pdf)

III.5.1.3. Rapport G/S :

La proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant (voir figure III.8). Le G/S influe sur la compacité, la résistance à la compression et l'ouvrabilité (Trung-Hieu N., 2010).

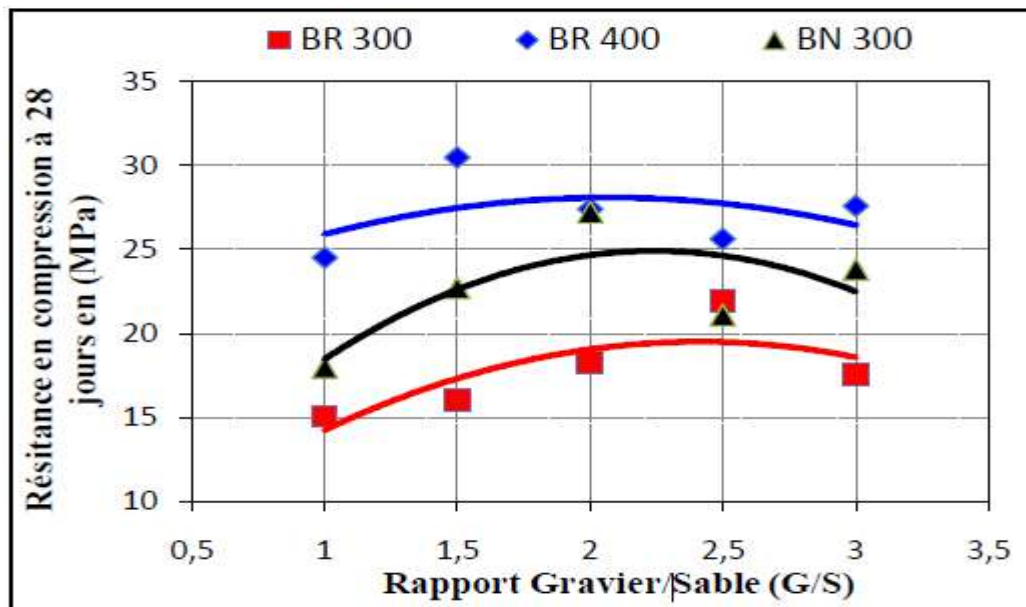


Figure III.8 : Influence de rapport G/S sur la résistance du béton. (Degussa.pdf)

III.5.2. Influence du rapport eau/ciment (E/C)

L'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. Le dosage du ciment est très souvent relié aux propriétés mécaniques du béton et à sa durabilité. On considère aussi que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont reliés au rapport E/C.

Cependant, c'est un facteur très important de la composition du béton. On ressent bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats).

Une augmentation du dosage en eau aura une incidence directe sur les performances mécaniques : (CONCRETEST ; Abdullahi M., 2012 ; Berredjem L., 2009 ; Pedro Nel Q, 2003 ; BOUKLI H., 2009 ; BARON J., 1999)

- ➡ Baisse de la résistance à la compression / flexion (voir la figure III.9);
- ➡ Baisse de la compacité (voir la figure III.10);
- ➡ Augmentation de la porosité ;

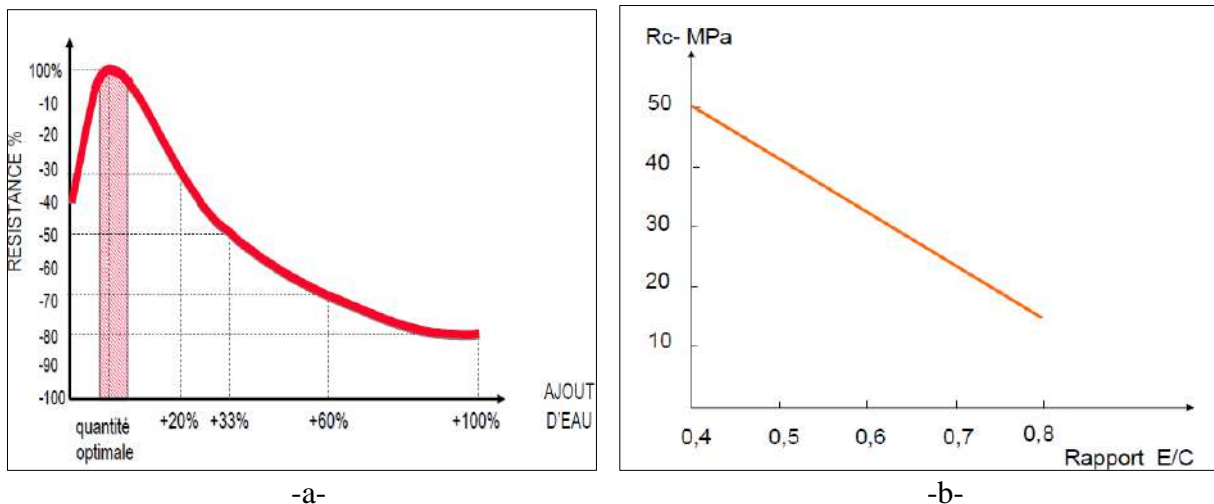


Figure III.9 : Influence de rapport E/C sur la résistance à la compression du béton. (Degussa.pdf)

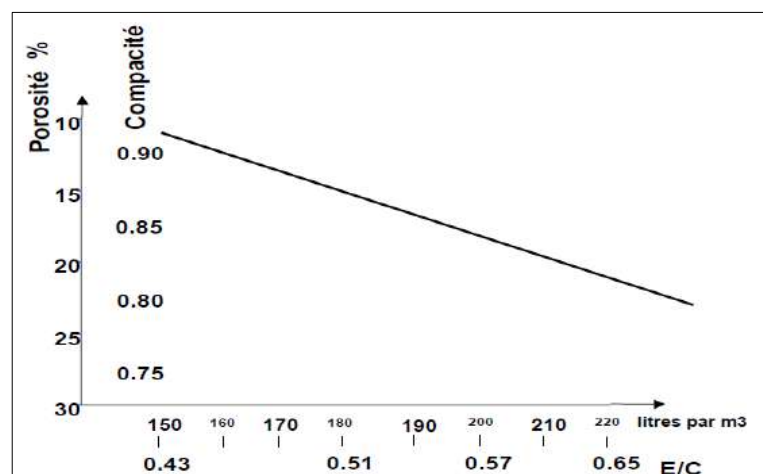


Figure III.10 : Influence de rapport E/C sur la compacité du béton. (Degussa.pdf)

III.5.3. Adjuvant :

D'après Creating Essentials (Degussa), les retardateurs diminuent évidemment les résistances initiales mais ils augmentent souvent les résistances finales, comme indiqué la figure III.11.

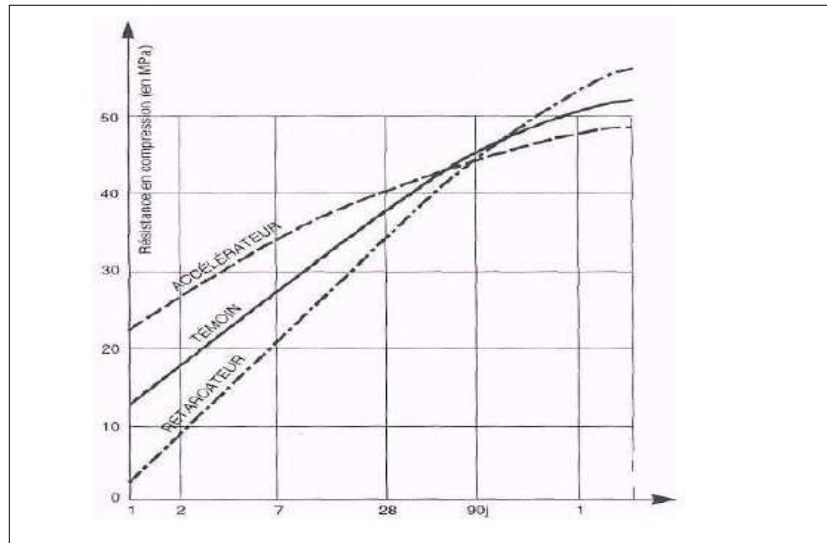


Figure III.11 : Influence de type d'adjuvant sur la résistance à la compression du béton. (CONCRETEST)

III.5.4. Influence du dosage et type de ciment :

Pour un dosage en eau constant, l'augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C du béton, ce qui traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme.

Baron et Ollivier (1996) ont expliqués ça comme montre la figure III.12.

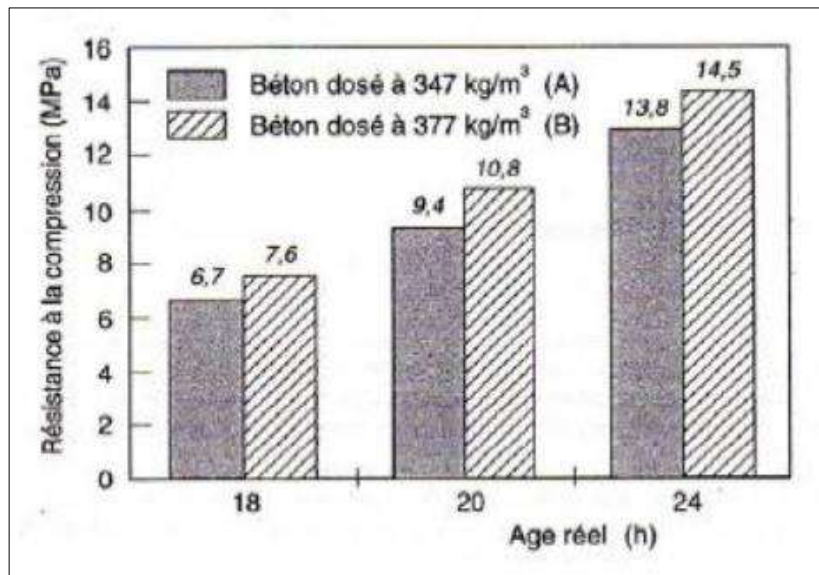


Figure III. 12: Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression au jeune âge du béton (Baron et Ollivier, 1996)

Selon Degussa (Technologie du béton), Imran K. MD (2010) et Hermida G.(2008), la taille des grains de ciment, leur répartition et leur forme ont une influence significative sur les paramètres rhéologiques, performantiels et esthétiques du béton (voir la figure III.13).

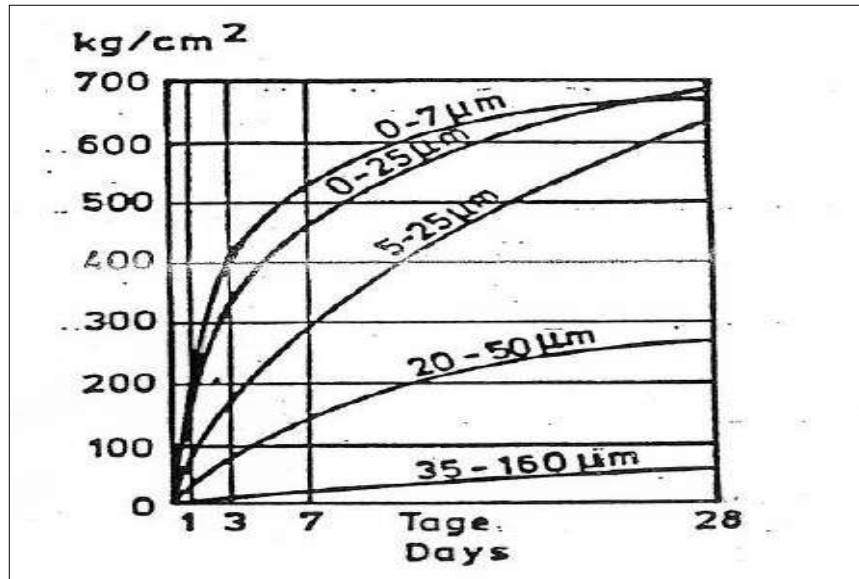


Figure III.13 : Influence de la finesse de ciment sur les performances du béton. (CONCRETEST)

III.6. BETON FIBRÉ

III.6.1. Généralité :

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène. Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent, et chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton. Pour certaines études le remplacement est massique ou volumique sans modifier les autres paramètres de composition (quantité de ciment, rapport E/C, etc) ; Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume soit de 5 à 150 kg par m³ de béton (CIMBÉTON, 2013).

L'incorporation de fibres dans le béton doit faire l'objet d'une étude de formulation et d'une vérification de la compatibilité avec les autres constituants. D'après (Bellferag 2016; H.Cuong 2010 ; Mezidi 2008 ; Bellferag 2006; Khatib Z. 1999), les bétons fibrés nécessitent souvent un dosage en superplastifiant plus élevé pour maintenir l'ouvrabilité du béton.

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. (Serifou M., 2013 ; BERREDJEM L., 2009)

Selon Serifou M., (2013), 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.

III.6.2. Les objectifs de la modification de béton :

L'incorporation de fibres dans les concrétions de béton permet d'améliorer les propriétés mécaniques et rhéologiques. Néanmoins, le rôle réel des fibres réside dans le fait qu'elles exploitent la matrice de deux manières. La première est la limitation et le contrôle des fissures, tout en essayant d'arrêter leur influence, ce qui implique une augmentation de la résistance. Et la deuxième c'est la transformation du matériau d'un comportement fragile à un comportement ductile se traduisant par un retard dans l'apparition des fissures.

Dans le même contexte, Selon (BELFERAG A. 2016 ; DUPLAN F., 2014 ; CUONG, 2010 ; MAKHLOUF N., 2010 ; NGUYEN T. 2010) évoquent que le rôle des fibres dans les composites cimentaires est de compenser en partie la faible capacité de déformation, et améliorent le comportement mécanique, elles sont introduites essentiellement pour arrêter la propagation des fissures. Les figures III.14 et III.15 présentent le rôle des fibres dans le béton.

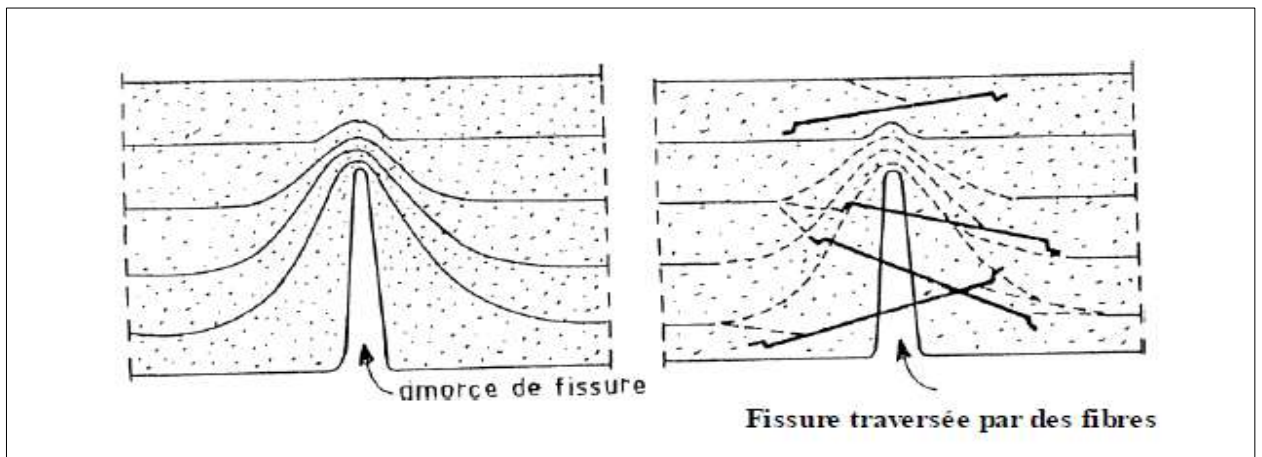


Figure III.14 : Rôle des fibres dans la matrice de béton (MAKHLOUF N., 2010)

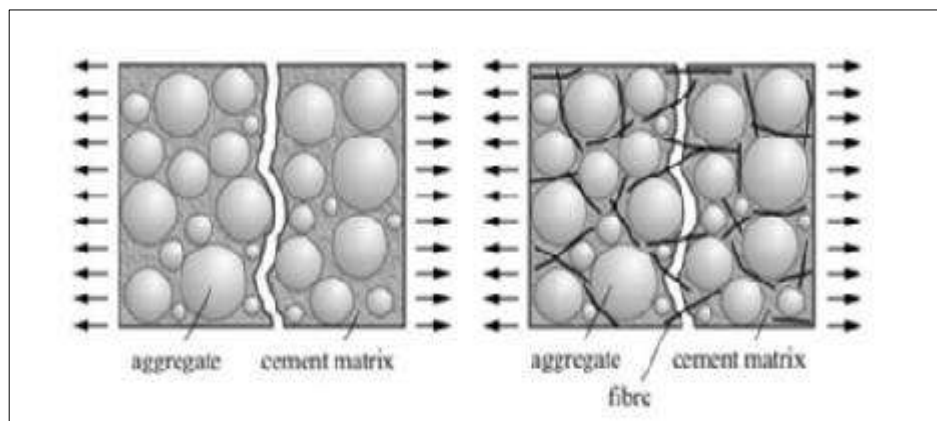


Figure III.15 : Béton avec et sans fibres (BELFERAG A. 2016)

Plusieurs chercheurs (BELFERAG A., 2016 ; CIMBÉTON, 2013 ; GHERNOUTI y. et al. 2011 ; MAKHLOUF N., 2010) soutiennent l'idée que les fibres ont une influence positive sur les propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons par le biais de nombreux paramètres parmi lesquelles on trouve : la forme et l'état de surface des fibres, l'élanement, la nature des fibres, la rigidité des fibres, le taux de fibres incorporées et la distribution et l'orientation des fibres au sein de la matrice.

Ces objectifs dépendent aussi des domaines d'application et des techniques projetés, par exemple :

- Fibres métalliques : Renfort pour bétons structurels et armature structurelle (Dallages – Sols industriels – Éléments préfabriqués – Voussoirs de tunnels – Tuyaux – Bétons projetés en travaux souterrains – ...)
- Fibres polypropylène : Limitation de la fissuration liée au retrait et amélioration de la tenue au feu des bétons (Dallage - Revêtement d'ouvrages souterrains- Mortiers projetés – Parements esthétiques)
- Fibres de verre : Réalisation d'éléments préfabriqués très minces (Panneaux de façade – Éléments décoratifs-Parements architectoniques)

III.6.3. Les fibres utilisées dans le béton fibré :

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres: dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, biondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.) (voir figure III.16 et figure III.17)

Le tableau III.6 présente les types de fibre utilisé dans la fabrication des bétons fibrés, ainsi que ces caractéristiques, rôle de l'ajout et domaine d'utilisation. (BELFERAG A., 2016 ; DUPLAN F., 2014 ; MAKHLOUF N., 2010 ; NGUYEN T., 2010 ; Kriker, 2005)



Figure III.16 : Types des fibres métalliques (DUPLAN F., 2014)



Figure III.17: Types des fibres végétales (DUPLAN F., 2014)

Tableau III.6 : différentes type des fibres utilisé dans le béton.

	Allongement à la rupture (%)	Longueurs / Diamètre (µm)	Densité (g/cm ³)	Module d'élasticité (GPa)	adhérence	Résistance à la traction (MPa)	Limite fissuration	Résistance au feu	Autre	Utilisation
Fibre Métallique	3 - 4	L= 50 -1000	7.85	150 - 200	bonne	1000 - 3000	-	assez	-surface spécifique élevée. -divers formes.	dallages et les sols industriels- la fabrication de voussoirs de tunnels, de coques ou la confection de pieux- réaliser des bétons projetés- produits préfabriqués- mortier de réparation ou de scellement.
Fibres Polypropylène	15	D > 4	0.9	2.5 – 3.5	assez	140 - 750	bonne	faible	souples et insensibles chimiquement	dallages et aménagements urbains – produits préfabriqués (parements) – mortiers projetés– enduits – sculptures.
Fibres de Verre	2 – 3.5	D = 5 – 500	2.4 – 2.6	70 - 80	bonne	2000-4000	-	bonne	-très grande fragilité. - sensibles aux alcalis	d'éléments de faible épaisseur (éléments architectoniques, éléments de bardage, panneaux de façade, etc)- éléments décoratifs- coffret, coffrages, habillages- Produits d'assainissements : tuyaux, caniveaux.
Fibres de Carbone	0.5 – 0.7	D=9	1.9	380-415	-	1500-2100	-	assez	-	éléments de faible épaisseur,
fibres Végétales palmier (FSPDM L = 100mm)	16 ± 3	0.1– 0.8	0.51 – 1.09	4.74 ± 2	bonne	170 ± 40	assez	faible	-	constructive et architecturale du bloc de terre- produits en terre crue

III.7. LE BÉTON CAOUTCHOUTÉ

La présente étude traite des effets de particules de caoutchouc sur des propriétés données du béton. L'emploi de caoutchoucs issus de l'industrie automobile comme granulat pour béton fait depuis longtemps l'objet de recherches, ce qui a conduit au développement du 'Rubcrete Mix' (PRI, 2016), lequel présente des caractéristiques très prometteuses pour diverses applications.

Les propriétés étudiées sont l'ouvrabilité, ainsi que la teneur en air et la résistance à la compression du béton. A ces fins, trois types de particules de caoutchouc ont été utilisés pour remplacer en partie ou totalement les granulats traditionnels (poudre de caoutchouc, miettes de caoutchouc et morceaux de caoutchouc). Les résultats de l'étude montrent que le Rubcrete Mix peut être utilisé efficacement pour le béton structural et non structural, comme pour les voies d'accès, l'infrastructure des chemins de fer et la construction routière ou les éléments des bâtiments, toitures et les bordures. Ces potentialités sont à attribuer aux bonnes propriétés du mélange en termes de poids propre, d'isolation thermique et acoustique et d'absorption des vibrations et une meilleure résistance à la fissuration (PRI, 2016 ; BONNET S., 2003)

En conséquence, si la résistance des bétons en compression ne cesse de s'améliorer, les matériaux cimentaires sont sensibles à la fissuration. Un phénomène lié à leur faible capacité de déformation, lorsqu'ils subissent des contraintes, notamment sous l'effet du retrait. « Une solution consiste donc à incorporer dans le matériau des granulats de caoutchouc, qui ont la propriété de relaxer les contraintes, évitant ainsi la formation ou la propagation de fissures », indique Anaclet Turatsinze, membre et ancien directeur de laboratoire LMDC.

La modification des bétons peut s'opérer de deux manières, la première étant la modification du liant hydraulique, la deuxième consiste en l'ajout direct du modifiant lors de l'opération de malaxage de béton. Toutefois, l'une des contraintes auxquelles on doit faire face en Algérie est l'absence d'unités de fabrication des liants modifiés. Il est donc nécessaire de développer des bétons fabriqués par le deuxième procédé.

III.7.1. Synthèse des résultats sur un béton modifié par l'ajout de caoutchouc :

L'incorporation des granulats caoutchouc dans les matériaux cimentaires a fait l'objet de beaucoup d'études dans la littérature. Les résultats obtenus jusqu'à maintenant permettent d'affirmer que la présence des granulats caoutchouc confère au composite une baisse importante des résistances, en contrepartie, un gain en capacité de déformation avant la localisation de la macro-fissuration. Le bénéfice de l'adjonction des granulats caoutchouc peut être une solution où la lutte contre la fissuration due aux déformations imposées est une priorité.

Les granulats caoutchouc utilisés dans le domaine de génie civil sont obtenus par broyage des pneus usagés, des tapis d'automobile ou des semelles des chaussures et sont classés en plusieurs catégories (NGUYEN T., 2010) :

- coupés morceaux de taille supérieure à 300 mm,
- déchiquetas : découpés en morceaux irréguliers de 15 à 300 mm,
- granulats : réduits à une granulométrie comprise entre 1 et 15 mm par processus mécanique ou cryogénique, (voir la figure III.18)
- poudrette : particules de granulométrie inférieure de 1 mm, obtenu par réduction mécanique ou cryogénique.



Figure III.18 : Incorporation des granulats caoutchouc dans une matrice cimentaire.(NGUYEN T., 2010)

Dans la littérature, de nombreux auteurs (Benazzouk et al, 2004 ; GARGOURI et al. 2011 ; Cuong, 2010 ; Ganjian et al. 2009 ; Topçu, 2007 ; Baoshan et al. 2004; Toutanji, 1995 ; Iker B., 1995) et autres chercheurs, ont étudié l'influence de l'incorporation des granulats ou poudrettes caoutchouc en substitution de sable ou de gravier dans les mortiers ou les bétons sur les propriétés mécaniques et rhéologiques.

III.7.1.1. Impact de caoutchouc sur le béton frais :

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton caoutchouté, dans la pratique, on se base souvent sur des essais d'ouvrabilité dont le résultat est quantifié par l'affaissement.

Toutanji H., (1995) , Khatib Z. et al. (1999) et Güneyisi E. (2014), ont étudié des propriétés des bétons de caoutchouc dont de 0% à 100% de le volume du gravier est remplacée par des granulats de caoutchouc.

La photo III.1 présente une éprouvette de béton avec l'incorporation des granulats caoutchouc.



Photo III.1 : Epreuve de béton avec l'incorporation des granulats caoutchouc. (Al-Nasra M. , Torbica Z., 2013)

La figure III.19 et III.20 illustrent l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en G.C.. Ces auteurs observent que l'affaissement du béton est diminué avec l'augmentation de caoutchouc. Pour le dosage de 50% de G.C., l'affaissement est presque nul.

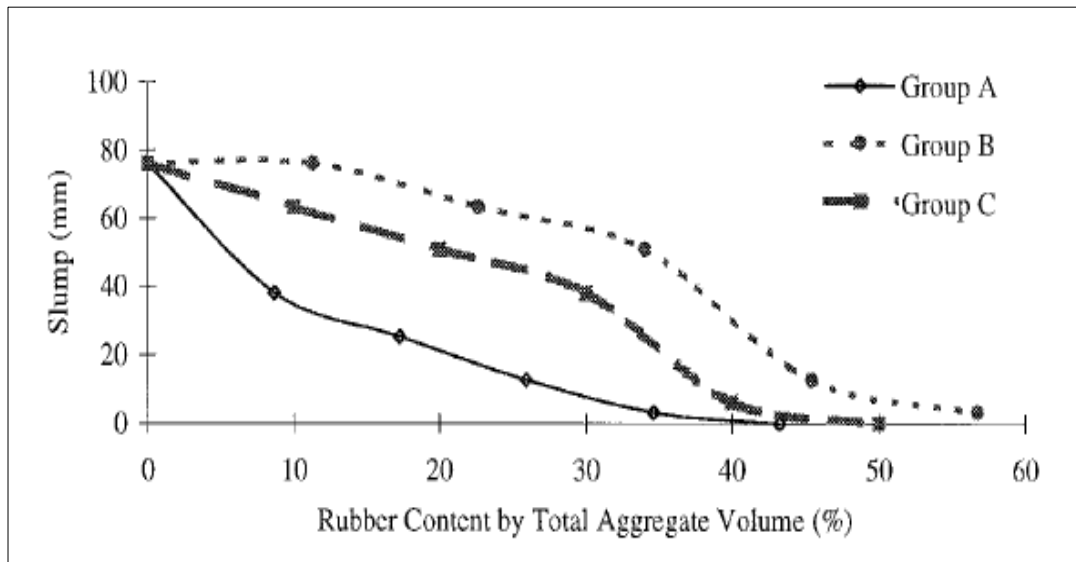


Figure III.19 : Influence de G.C. sur l'affaissement (Khatib Z. et al., 1999)

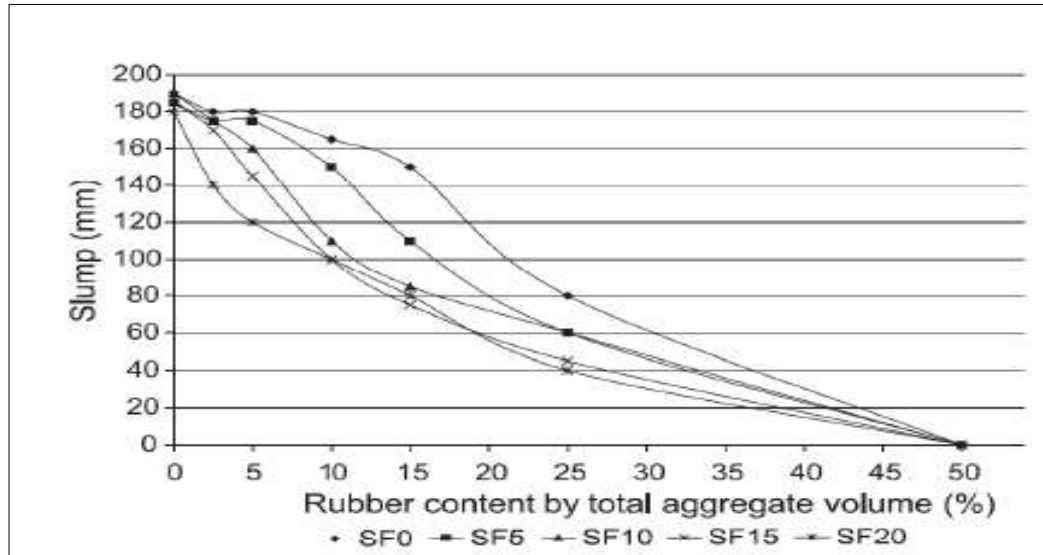


Figure III.20 : Influence de G.C. sur l'affaissement selon Güneyisi E. (2014)

L'étude réalisée par Benazzouk A. et al. (2013) et Boudaoud Z. (2012), a indiqué une conclusion un peu différente par rapport à d'autres auteurs. En effet, d'après cette étude le béton incorporant des G.C. a une maniabilité acceptable en termes de facilité de manipulation. Néanmoins, leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage en G.C. se fait l'augmentation des valeurs d'affaissement aussi, cela pourrait être dû aux type de caoutchouc utilisé, les effets des adjuvants utilisés ou le type et formes des granulats.

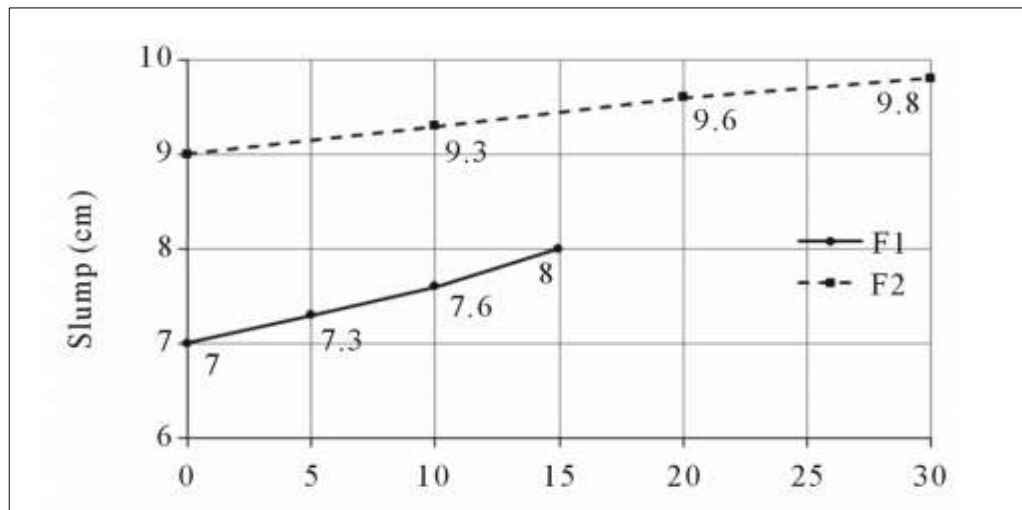
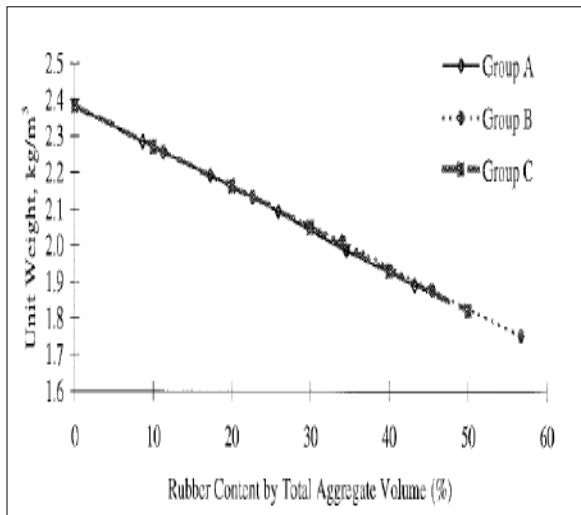


Figure III.21 : Influence de G.C. sur l'affaissement selon Boudaoud Z. (2012)

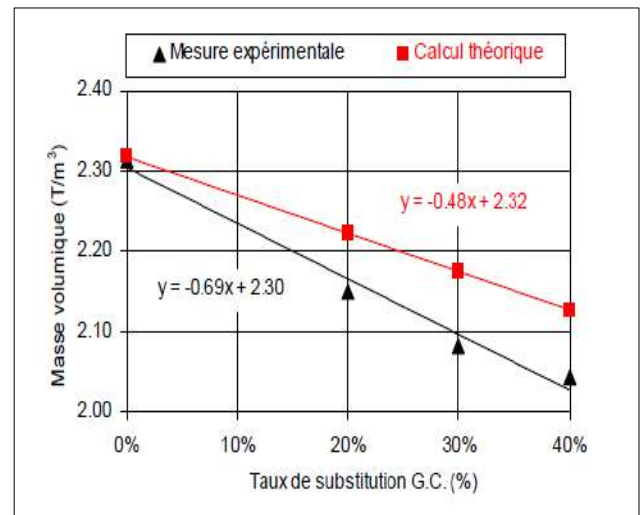
La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des caoutchoucs (granulats ou poudre) en substitution des granulats naturels ou sable a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Si on se réfère à la classification des bétons légers établie par l'ACI (ACI Commutée

213), avec l'incorporation de caoutchouc on peut envisager la production de bétons légers de structure.

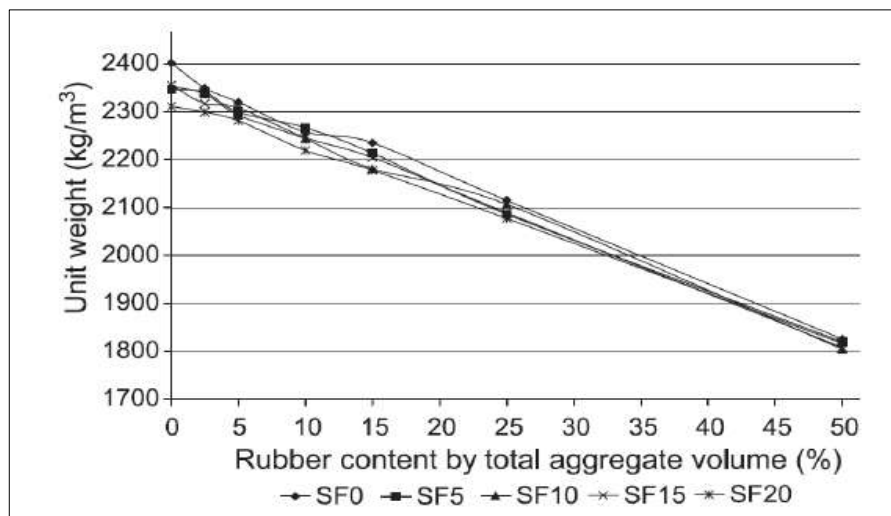
Plusieurs auteurs ont observé une chute de la masse volumique avec un taux de substitution de caoutchouc (voir la figure III.22), quel que soit un granulat ou une poudre. Les figures suivantes illustrent divers courbes de l'évaluation de la masse volumique en fonction d'ajout de caoutchouc.



-a-



-b-



-c-

Figure III.22 : Variation de la masse volumique du béton incorporant caoutchouc (G.C. ou P.C.) [-a- Khatib Z. et al. ; -b- Cuong H. ; -c- Ganjian et al.]

III.7.1.2. Impact de caoutchouc sur le béton durci :

➤ La résistance à la compression :

Les chercheurs qui ont travaillé récemment sur les matériaux cimentaires incorporant des granulats ou poudrettes de caoutchouc, ont tous relevé que la substitution de granulats naturels par des G.C. ou P.C. entraînait inévitablement une chute de la résistance en compression.

De nombreux chercheurs pensent que le défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment est une des raisons de la chute de résistance du béton incorporant ces granulats. Pour cela, certains auteurs étudient les possibilités d'améliorer l'adhérence entre ces deux matériaux qui sont très différents. Par exemple, ils utilisent une solution alcaline (NaOH), METHOCEL, polymère acétate de vinyle (PVA), solution d'hydroxyde de sodium, (SERIFOU M., 2013). En effet ils ont constaté que ces mesures n'avaient pas d'influence visible sur les résistances en compression et en traction et ils en concluent qu'elles n'ont pas d'effet sur l'adhérence entre le granulat en caoutchouc et la matrice cimentaire.

Selon GARGOURI A. et al (2011), on observe une perte de résistance en compression de 80% lorsqu'on substitue respectivement 100% du gravier par des granulats caoutchouc de granulométrie équivalente. Garros (2007), dans sa recherche, en remplaçant du sable par des granulats caoutchouc en même granulométrie (1-4 mm) a mesuré une perte de 86% pour le taux de substitution de 25%. D'après Neil N. Eldin (1995), une diminution de l'ordre de 65% pour remplacement de 100% granulats naturel par des G.C.

La figure III.23 résume les taux de perte de résistance en compression mesurés par différents auteurs par rapport à un béton de référence. (L'indice (1) est mis pour un taux volumique et (2) pour un taux massique).

Taux de remplacement	5%	Autre taux	100%
Auteur			
Batayneh et al (1)		52 % (pour 40%)	90 %
Khaloo et al (1)		99,95 (pour 50%)	99,98%
Li et al (1)		De 40% à 43% (pour 15%)	
Bravo et de Brito (1)	14%	45% (pour 15%)	
Fattuhi et Clark (2)		69% (pour 12%)	
Ganijian et al (2)	-4%	21% (pour 10%)	
Toutanji (1)		57% (pour 50%)	76%

Figure III.23 : Chute relative de Rc des bétons de broyat de pneu en fonction du taux de remplacement. (SERIFOU M., 2013)

A partir les études de (Garros M., 2007 ; Khatib Z. et al., 1999 ; Eldin et Senouci 1993) , les auteurs ont conseillé de ne pas dépasser un taux de substitution de 20% du volume total de la phase granulaire.(CUONG, 2010), ceci est confirmé par la figure III.24.

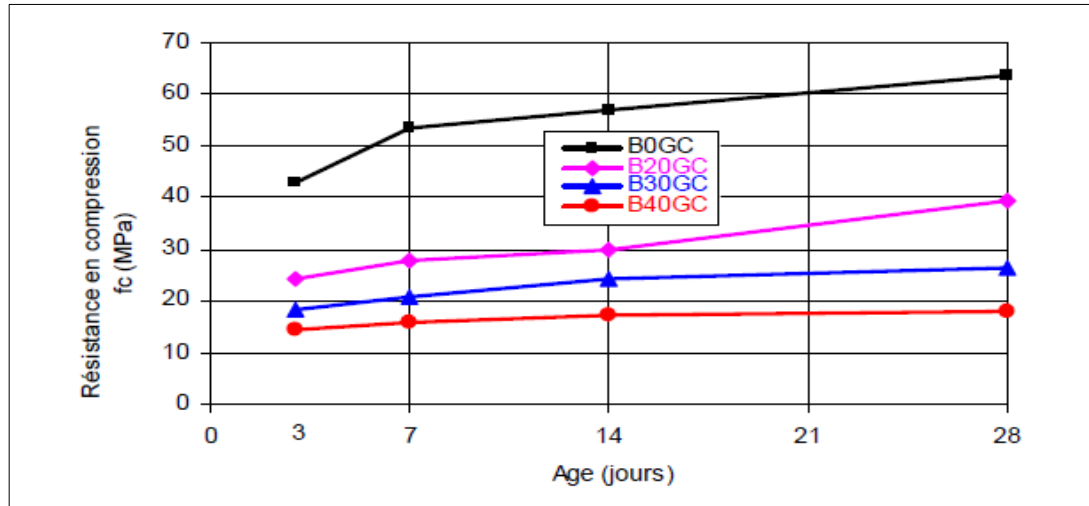


Figure III.24 : Résistance à la compression du béton à différents pourcentage de caoutchouc. (CUONG, 2010)

➤ **La résistance à la traction :**

Par rapport à la résistance à la compression, la résistance à la traction du béton est faible mais on a parfois besoin de la connaître. Elle est généralement indirectement déterminée par le biais d'essais de traction par flexion ou de traction par fendage dit essai brésilien.

• **Traction par flexion :**

L'incorporation des granulats caoutchouc dans la matrice cimentaire donne une chute significative de la résistance en traction, dont on peut citer plusieurs travaux comme celle de (Benazzouk A. et al. 2013 ; Al Nasra M., Torbica Z., 2013; Gargouri A. et al 2011 ; Cuong, 2010 ; Garros M., 2007 ; Khatib Z. et al., 1999). Les résultats obtenus par l'étude de Garros (2007) montrent qu'avec une substitution de 25% en volume des sables par des granulats caoutchouc de même taille entraînent une chute de 77% de la résistance en traction. Cependant, il conclut d'après les résultats trouvés expérimentalement que la résistance à la traction par flexion diminue avec le pourcentage des caoutchoucs incorporées dans la matrice du béton. (voir la figure III.25).

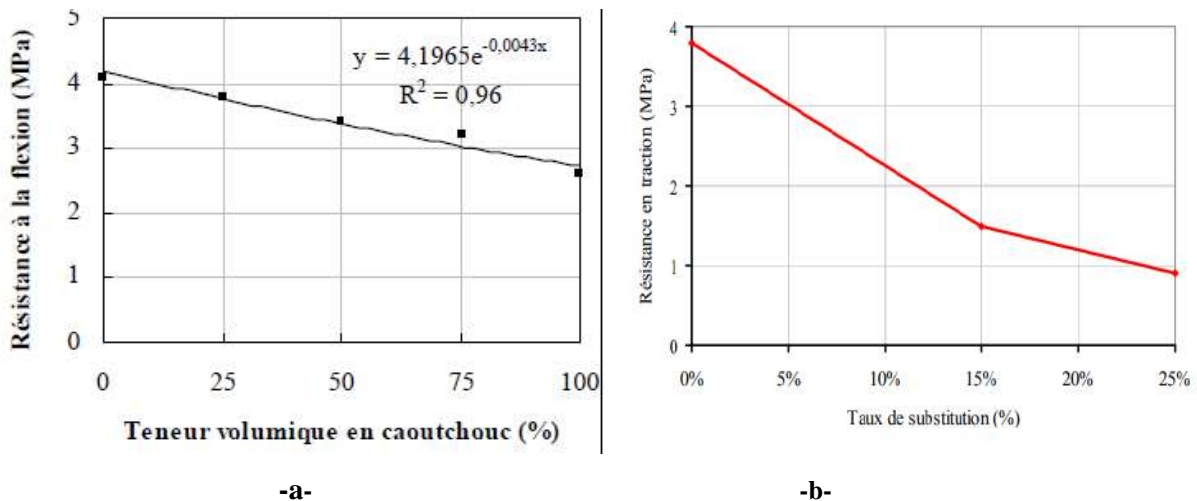


Figure III.25 : Variation de la Rt du béton incorporant caoutchouc [-a- Benazzouk; -b- Garros]

- **Traction par fendage :**

Les granulats caoutchouc diminuent les résistances en traction, flexion et compression dans des proportions très similaires, comme le montre la figure III.26. Pour ces trois modes de sollicitation, le facteur de réduction est quasiment le même pour l'ensemble des taux de substitution du sable par des granulats caoutchouc.

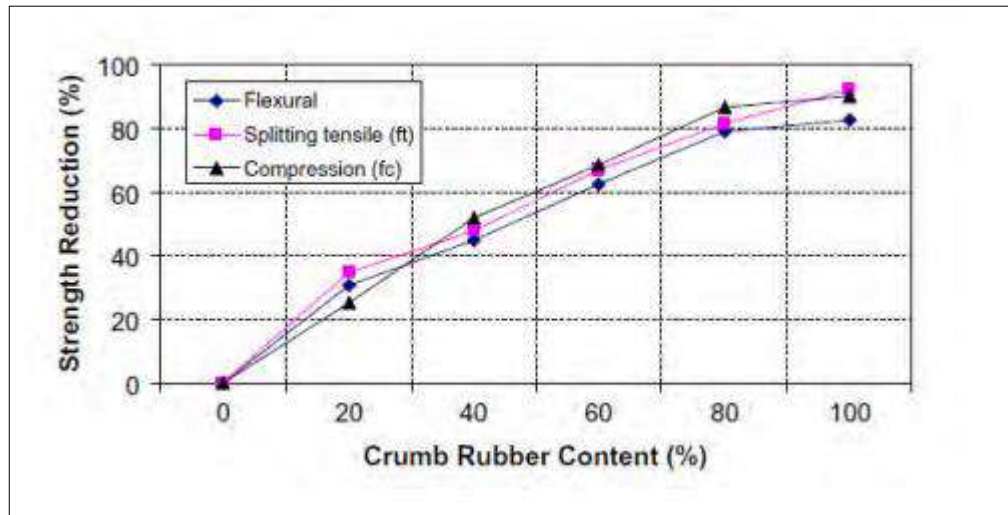


Figure III.26 : Effet des granulats caoutchouc sur la réduction des résistances en flexion/traction/compression (DUPLAN F., 2014)

Huang B. et al. (2004) et CUONG (2010), ont montré que l'augmentation du contenu en G.C dans le béton entraîne une réduction de la résistance à la traction par fendage. Les échantillons testés sont obtenus par sciage d'éprouvettes cylindriques. Cependant, ils ont observé aussi un bénéfice de l'incorporation de G.C : malgré la chute de la résistance en traction, la déformation à la rupture est augmentée. Cette capacité de déformation à la rupture montre que le béton incorporant des G.C est plus ductile.

- **Mode de rupture:**

Certains auteurs observent que la présence des granulats ou poudrettes de caoutchouc change le mode de rupture des éprouvettes. Les éprouvettes de béton modifié atteignent des déformations beaucoup plus élevées à la ruine que celles du béton de référence : elles conservent donc plus longtemps une forme avant de se désagréger. (CUONG, 2010)

Khatib et Bayomy (1999) indiquent que les éprouvettes du GC conservent encore une forme conique ou cylindrique au moment de la rupture car elles peuvent supporter une déformation imposée beaucoup plus élevée que celle du béton de référence. Ils qualifient de brutale la rupture des éprouvettes du béton de référence (durée de rupture courte : passage de l'état vierge à l'état de rupture d'une éprouvette sous la charge extérieure) (CUONG, 2010) tandis que celle des éprouvettes du BIGC est plus progressive grâce à leur capacité de déformation avant la ruine.

➤ **Essai ultrasonique :**

Certains chercheurs considèrent que le béton incorporant des granulats en caoutchouc a un potentiel pour amortir des ondes.

D'après Hernandez (2003) et Li (1999), observent que la présence des G.C. réduit significativement la vitesse des ondes ultrasoniques dans les bétons à base de caoutchouc. En conséquence, Li en a déduit que ce composite a un potentiel pour amortir une vibration et qu'il peut en particulier servir d'isolant phonique.

D'après li Z. et al. (1995), On peut voir sur la figure III.27, les résultats indiquent que la présence des particules de caoutchouc à la base d'une structure peut changer sa réponse dynamique de manière significative et réduire la résonance réponse substantielle.

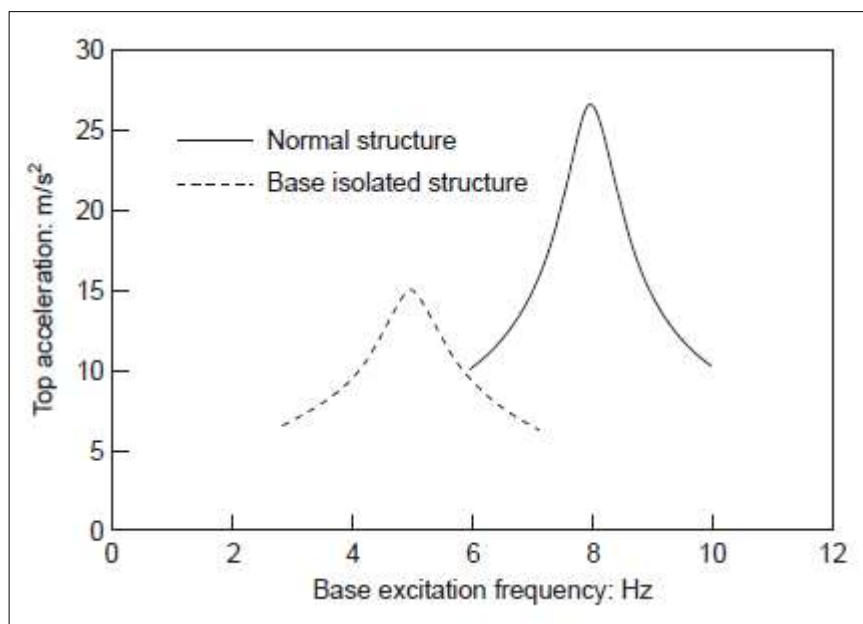


Figure III.27 : Réponse dynamique de la normale et de la base isolée des structures. (li Z. et al. ,1995)

➤ **Module d'élasticité:**

Au même titre que les résistances en compression et en traction, de nombreux travaux confirment que l'incorporation de la matière de caoutchouc induit une chute importante du module d'élasticité. Cela est par ailleurs prévisible compte tenu des relations empiriques existantes permettant d'estimer le module d'élasticité à partir de la résistance en compression ou la vitesse du son.(CUONG, 2010)

Les auteurs (Benazzouk A. et al. 2013 ; İlker Topçu B., 2007 ; Baoshan, 2004 ; Neil N. Eldin et al.,1995), montrent une réduction de 30% du module d'élasticité lorsqu'on passe du béton de référence au béton incorporant de G.C. Pour les granulats caoutchouc ayant une faible rigidité, l'incorporation des granulats caoutchouc dans la matrice cimentaire induite une chute de rigidité et ça augmente parallèlement avec l'augmentation du taux de granulats caoutchouc (CUONG,

2010). La figure III.28 présente un exemple de l'influence du taux de substitution en granulats caoutchouc sur le module d'élasticité dynamique.

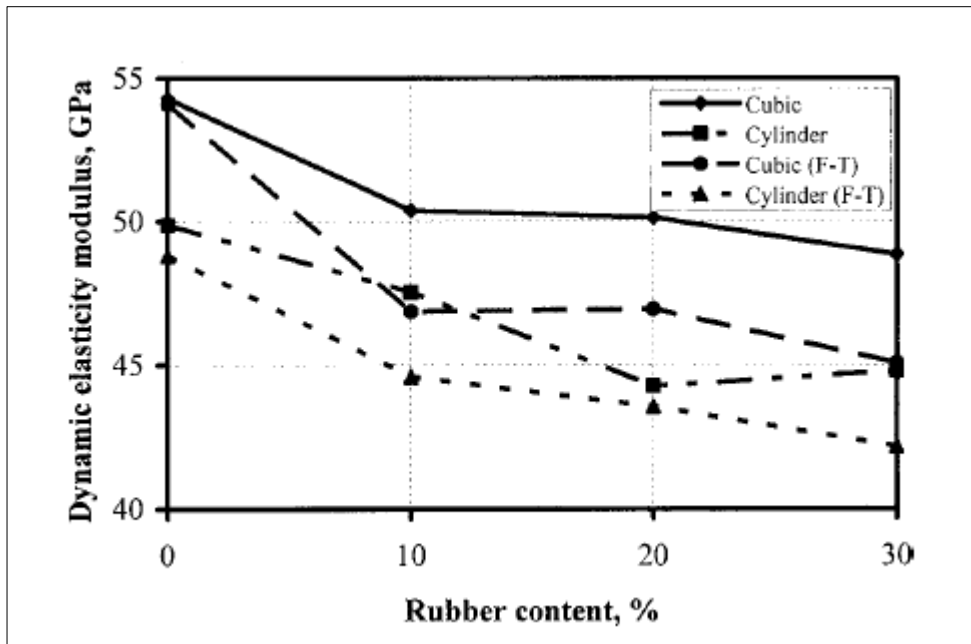


Figure III.28 : Evaluation du module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en caoutchouc. (İlker Topçu B., 2007)

➤ **Retrait:**

Certains auteurs ont étudié l'influence des G.C. sur le retrait du béton et leurs résultats montrent que le retrait du béton caoutchouc est plus élevé que celui du béton de référence. Boudaoud Z., Beddar M., (2012), CUONG (2010) et Garros M. (2007), confirment à la figure III.29 que les variations dimensionnelles des bétons incorporant des G.C. sont plus élevées que celles du béton de référence.

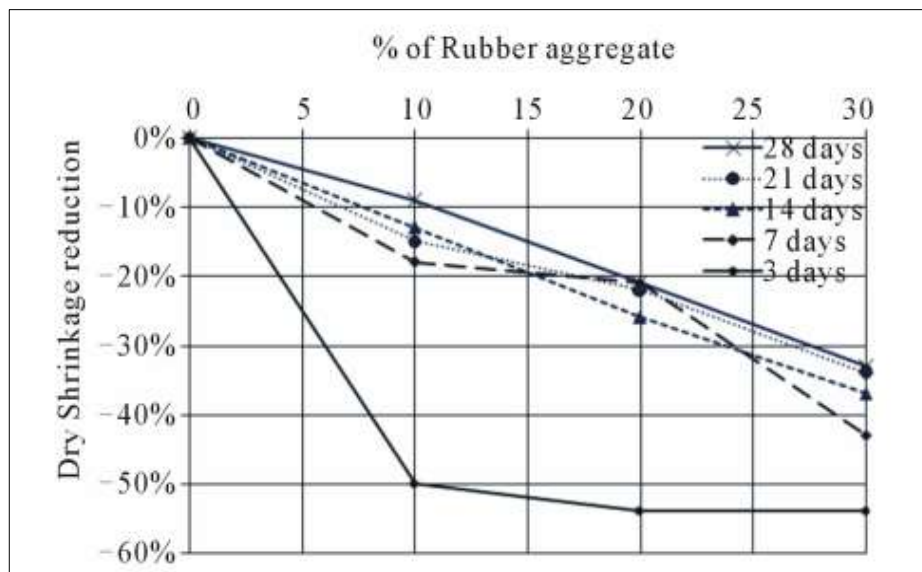


Figure III.29 : Effet du taux de substitution sur le retrait de béton. (Boudaoud Z. et al., 2012)

➤ **Résistance au feu:**

Le peu d'études réalisées sur cette propriété laisse penser que l'incorporation de granulats en caoutchouc est favorable à la résistance au feu du composite incorporant des G.C. En effet, Al Nasra M et al. (2013) et Hernández O. et al (2003), réalisent des essais pour évaluer la résistance au feu du béton incorporant des granulats de caoutchouc. Hernández O. et al (2003) observent que les éprouvettes de béton de référence présentent plus d'écaillures à leur surface exposée au feu et présentent une silhouette manifestement déformée par rapport à celle des éprouvettes incorporant des G.C (figure III.30).

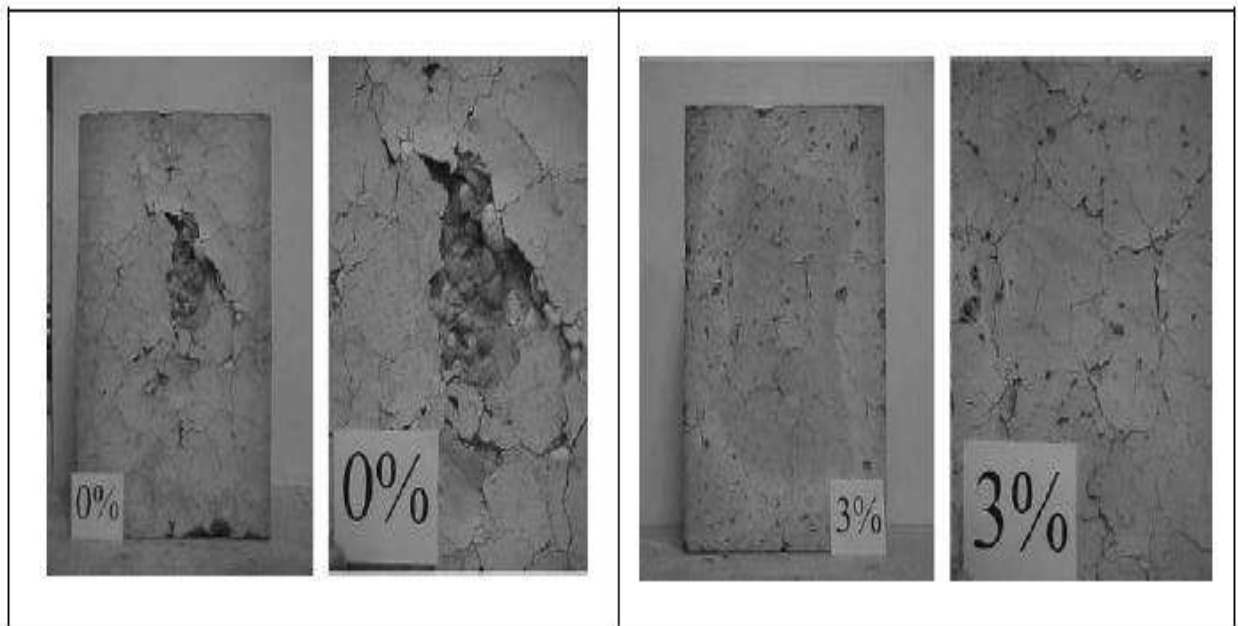


Figure III.30 : Ecaillages à la surface des éprouvettes incorporant 0% et 3% du volume de G.C. après l'essai de résistance au feu, (Hernández, 2003).

III.8. CONCLUSION

Ce chapitre bibliographique a englobé une synthèse des connaissances sur les bétons, les constituants des bétons, paramètres influant sur le comportement de béton, ainsi que le béton caoutchouté et les résultats trouvés par autres chercheurs dans ce domaine.

Bien que, pour l'usage courant, toute formulation de béton répond plus ou moins au besoin, il existe des proportions des constituants qui offrent de meilleures caractéristiques aux bétons. De nombreuses recherches ont été réalisées pour la mise au point de méthodes de formulation d'une part, et pour optimiser l'utilisation des constituants d'autre part.

A partir de cette recherche bibliographique, nous avons remarqué qu'il est nécessaire d'attacher une importance particulière à l'influence de chaque paramètre afin d'aboutir à une formulation optimale et d'atteindre au mieux les performances visées.

Dans un deuxième temps, dans ce chapitre nous avons essayé d'aborder l'essentiel des propriétés du béton avec et sans fibres, où nous pouvons retenir que les fibres incorporées dans les bétons présentent généralement un avantage dans le passage du béton d'un comportement fragile à celui d'un comportement ductile, ceci par une augmentation de la résistance à l'apparition et la propagation des fissures précoces. Quant aux propriétés mécaniques et rhéologiques, Malgré cette faible influence sur les caractéristiques du béton, le béton incorporant des caoutchoucs possède une capacité de déformation plus importante que celle du béton témoin, ceci est lié principalement aux caractéristiques intrinsèques et au dosage des fibres.

La partie expérimentale consiste à valoriser les poudrettes de caoutchouc (tapis de voiture, les semelles des chaussures,...) dans le béton hydraulique, et les comportements des bétons frais ainsi que les performances des bétons durcis sont évalués, présentés et discutés dans les chapitres suivants.

PARTIE

EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE IV

MATÉRIAUX ET PROCÉDURES D'ESSAIS

CHAPITRE IV : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES D'ESSAIS

IV.1. INTRODUCTION

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, le dosage en ciment et l'eau, afin de réaliser un béton répandant aux qualités recherchées. Avant la détermination des dosages des constituants qui rentrent dans la formulation du béton, il est nécessaire de vérifier certaines propriétés et caractéristiques des matériaux composants le béton, en les mesurant, par des méthodes et essais normalisés. Une fois le béton préparé, il doit subir des essais à l'état frais et durci, afin de matérialiser notre matériau et donc confectionner des ouvrages résistants et économiques. Ce chapitre est composé de trois parties :

- La première partie expose les modes opératoires des essais réalisés.
- La deuxième partie traite les caractéristiques des matériaux utilisés.
- La troisième partie concerne la préparation et la formulation des bétons.

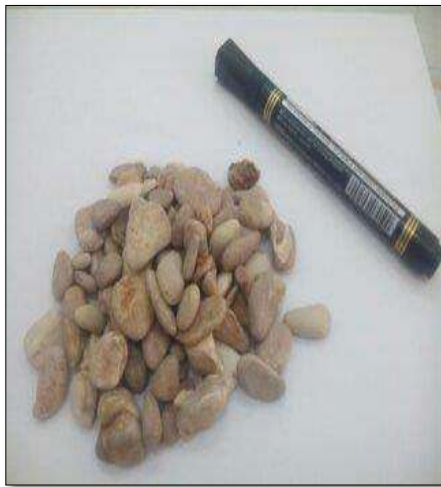
IV.2. CHOIX DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Les éléments entrants dans la composition du béton de cette recherche sont : sable carrière, gravier roulé, ciment, la poudrette de caoutchouc et l'eau de gâchage. Le tableau IV.1 résume les différentes composantes utilisées et leurs provenances :

Tableau IV.1. : Les différentes composantes utilisées et leurs provenances.

Matériau	Provenance
Sable	Carrière de Zarzaitine willaya d'Illizi
Gravier roulé 3/8 et 8/15	Gisement d' Oued N'ssa willaya de Ouargla
Ciment	Al Matine CPJ-CEM II/A 42.5
Eau de gâchage	Eau du robinet du laboratoire de LTPS
Poudrette de caoutchouc	SAEL/ Société d'Application d'Elastomères Zone industrielle Oued Smar-Alger

La photo IV.1 présente les différents constituants utilisés dans ce travail.



a- Gravier classe 8/15 d'Oued N'ssa

b- Gravier classe 3/8 d'Oued N'ssa

c- Sable de Zarzaitine.



d- Poudrette de caoutchouc.



e- Ciment CPJ-CEM II/A 42.5 .

Photo IV.1 : Les matériaux utilisés.

Le choix des constituants dans ce travail n'est pas aléatoire, ayant comme objectif de recherche d'un matériau élaboré à partir des constituants locaux et dans le souci de garantir le côté technique (caractéristiques mécaniques et rhéologiques) d'une part et le respect de l'environnement d'autre part.

Pour cela, nous avons opté pour l'utilisation du gravier roulé disponible dans la région d'Ouargla (sud-est Algérien), qui a une nature chimique carbonaté comme le gravier concassé. Et un sable roulé alluvionnaire extrait des gisements sahariens. Quant aux poudrettes, nous avons adopté à l'utilisation de poudrette de caoutchoucs issus de déchets industriels des tapis et semelles des chaussures, car il est en caoutchouc pur et ne contient aucun autre matériau tel que des fibres métalliques dans le caoutchouc des pneus.

IV.3. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISÉS

IV.3.1. Le sable :

Le sable, dans le domaine de la construction, avant d'être un matériau qu'on prend à la pelle ou à la truelle, fait l'objet de description et de prescriptions normatives. Pour la confection de mortiers, routes, bétons et enduits, le sable est un granulat, qui doit être conforme à la norme NF EN 12620+A1 2008 (EN 12620, 2008). Pour cette norme, le sable est une désignation des classes granulaires pour lesquelles D est inférieur ou égal à 4 mm. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. (K Gadri, A Guettala, 2015) [SETEC LERM, 2012]

Dans cette étude et dans un cadre de valorisation nous avons tenté l'utilisation d'un sable de carrière de couleur blanchâtre provenant de la région de Zarzaitine à proximité de la ville d'In Aménas (willaya d'Illizi). C'est un sable qu'a des caractéristiques physico-chimiques et des caractéristiques mécaniques acceptable et relatives pour un sable normalisé. On a utilisé ce sable pour garantir les performances mécaniques du béton.

IV.3.2. Le gravier :

On appelle granulat un ensemble de grains d'origine minérale, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm, provenant de roches meubles, massives, de minerais ou de leurs transformations thermiques et de sous-produits de l'industrie (Claude TOURENQ, 2007).

Dans cette étude et dans un cadre de valorisation et exploitation les granulas roulé comme un matériau correspondant dans notre région. Nous avons tenté l'utilisation d'un gravier roulé, de couleur blanchâtre à brunâtre provenant de la région d'oued el N'ssa à proximité de la ville de Afran (willaya d'Ouargla) (voir la figure IV.1).



Figure IV.1 : Localisation de gisement de gravier roulé (Image Google earth 2018).

❖ **Fractionnement et préparation des granulats naturels:**

Les granulats naturels sont prélevés en une seule classe, et pour des raisons techniques (D_{max} est en fonction de dimensions des moules) et pour avoir un bon béton ordinaire, on a procédé aux fractionnements des granulats pour avoir deux nouvelles classes : 3/8 et 8/15. Notant que lors de la séparation (tamisage) des graviers, on a éliminé certaines quantités des fillers qui peuvent influencer la qualité des bétons et aussi les gros éléments (>16 mm).

Le tamisage consiste à séparer le gravier en différentes classes granulaires à l'aide d'une série de tamis d'ouverture connue (photo IV.2). On appelle tamisât (ou passant) la partie du matériau qui traverse le tamis et refus celle qui y est retenue (figure IV.2).

Il existe différentes classes granulaires dont pour les plus fréquentes, les normes définissent des fuseaux à l'intérieur desquels les courbes granulométriques doivent être situées.

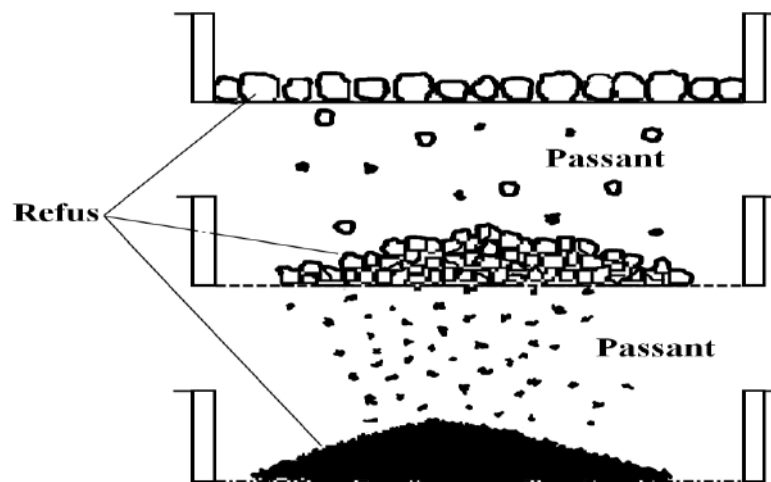


Figure IV.2 : Procédure de tamisage (HAFID H. , 2012).



Photo IV.2 : Séparation les classe de gravier.

Après avoir obtenu nos classes granulaires, nous passons nos échantillons au lavage dans le but d'éliminer les particules fines qui ont adhéré aux plus grosses particules durant le tamisage. Ce processus de lavage, dans de l'eau, est reproduit deux fois pour s'assurer de l'absence de particules fines dans nos échantillons. Le gravier humide est ensuite séché à l'air libre à une température de ($T_{\min}=15$ à $T_{\max}=32$)°C pendant 24 heures. (NF ISO 11464, 2006).

La photo IV.4 présente un échantillon de gravier lavé et séché à l'air libre (Hani et al., 2016).



Photo IV.3 : Séchage de gravier lavé à l'air libre.

IV.3.2.1. Essais sur le Sable et le gravier:

➤ **Essai d'analyse granulométrique (NFP 18-560) :**

L'analyse granulométrique par tamisage a été réalisée conformément à la norme NFP 18-560, qui permet de déterminer la grosseur et les pourcentages de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimensions inférieures ou égales à 80 mm (NFP 18-560, 1990), 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 le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Les courbes granulométriques pour les différents matériaux cohérents (gravier, poudrette, et sable) sont illustrés dans les figures ci-dessous.

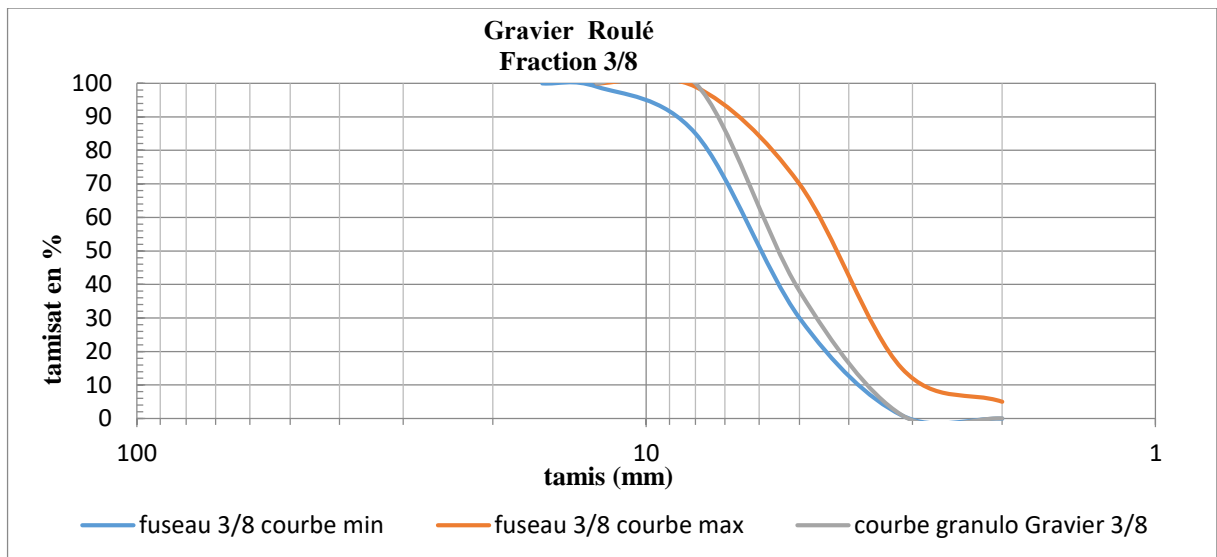


Figure IV.3: Courbe d'analyse granulométrique du GR (3/8).

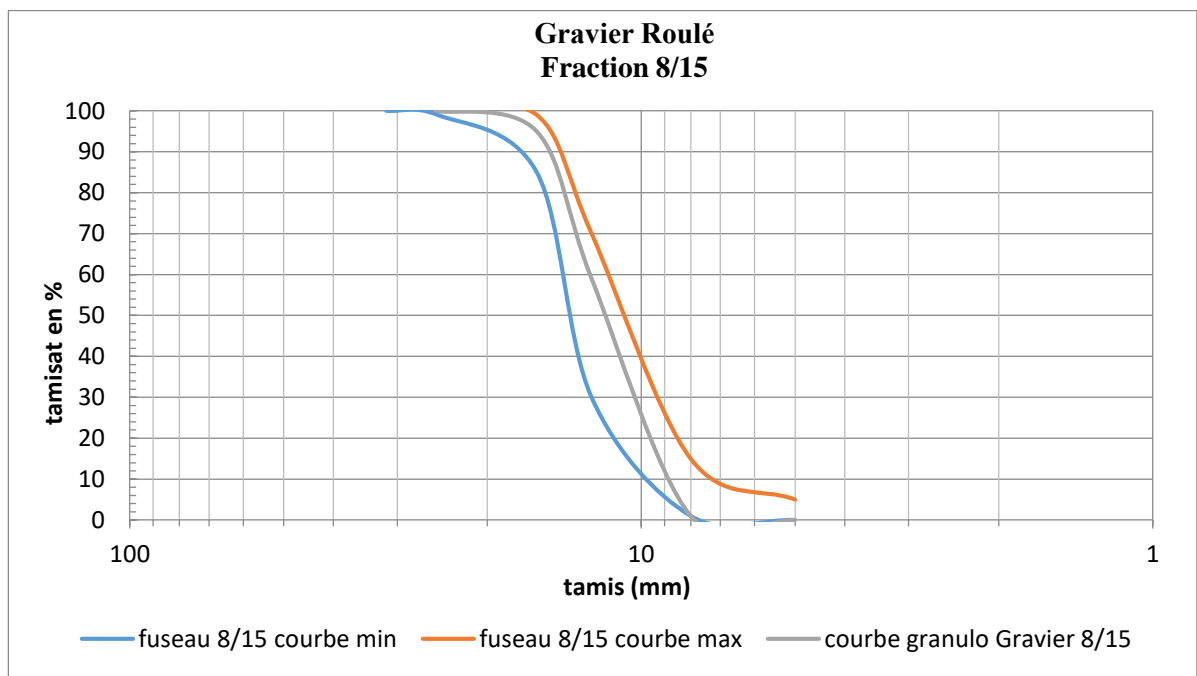


Figure IV.4: Courbe d'analyse granulométrique du GR (8/15).

La figure (IV.3) et (IV.4) montre que les deux courbes granulométrique du gravier roulé pour les deux classes : 3/8 et 8/15 sont entièrement situées à l'intérieur du fuseau de référence recommandé par la norme pour la confection des bétons.

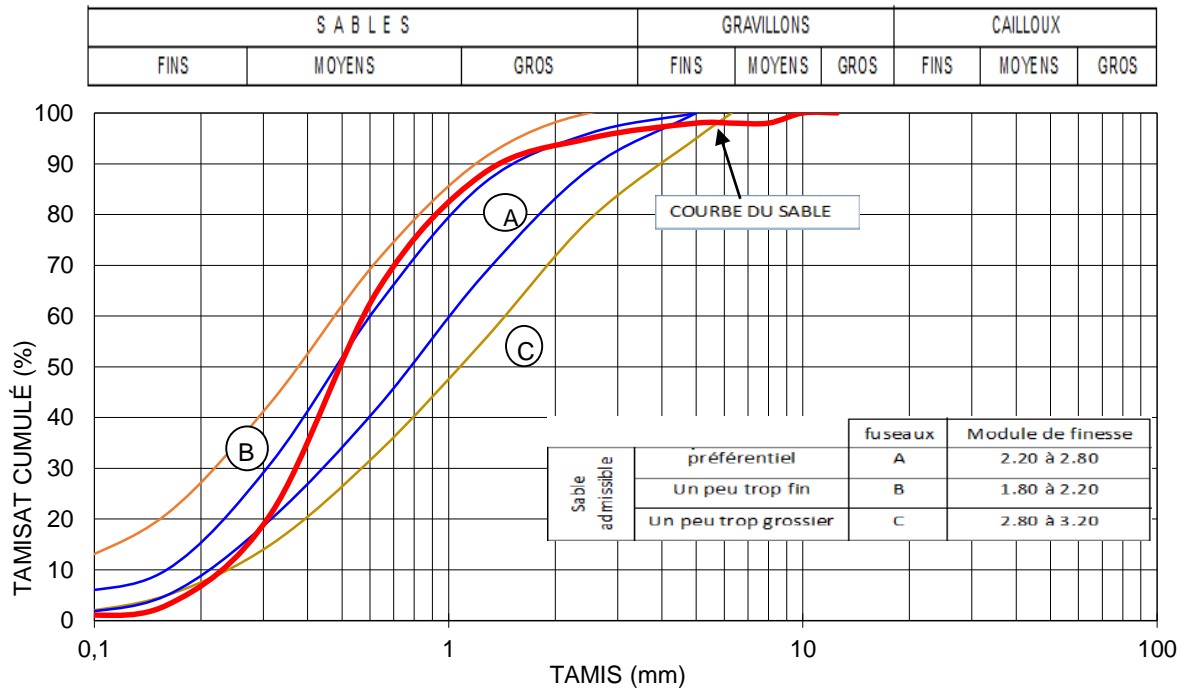


Figure IV.5: Courbe d'analyse granulométrique du Sable.

La figure (IV.5) montre que la courbe granulométrique du sable est située à l'intérieur du fuseau de référence, il présente une bonne granulométrie préférentielle ($M_f = 2.30$)

$C_u = 2.4$ → la granulométrie est dite étalée ;

$CC = 1.1$ → matériau bien gradués → matériaux plus denses ;

$M_f = 2.30$ → donc selon la norme NF P18-304 ce sable est un sable préférentiels.

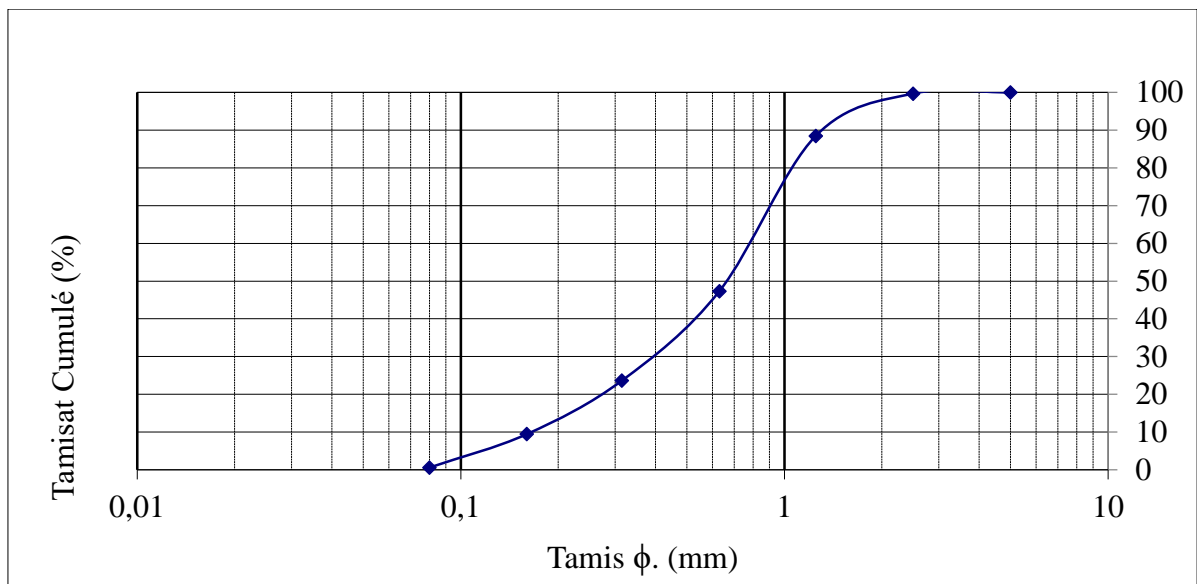


Figure IV.6: Courbe d'analyse granulométrique de la Poudrette de caoutchouc.

La figure (IV.6) montre que la courbe granulométrique de la poudrette de caoutchouc est convenable au fuseau d'analyse granulométrique du sable.

➤ **Masse volumique (NF P 94-064 Novembre 1993) :**

Cet essai est réalisé au niveau de LTPS, sur six 06 échantillons (de sable et de gravier) en utilisant la méthode du pycnomètre pour la masse volumique absolue. (voir la photo IV.4).



a- Essai de la masse volumique apparente.

b- Essai de la masse volumique absolue.

Photo IV.4: Essai de la masse volumique.

Le tableau ci-après présente les résultats de la masse volumique apparente et absolue des différents composants.

Tableau IV.2: la masse volumique des matériaux utilisés.

Classe d'agrégats	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Sable	2.60	1.57
Gravier roulé 3/8	2.62	1.56
Gravier roulé 8/15	2.62	1.52

Les résultats de la masse volumique absolue et apparente de sable et gravier testés sont présentés des valeurs vérifiées, parce que la plupart des granulats naturels courants :

- La masse volumique apparente varie de **1.3 à 1.6g/cm³**.
- La masse volumique absolue varie de **2.45 à 2.70g/cm³**. (Gorisse, F., 1978)

➤ **Le Coefficient d'absorption d'eau (NF P 18-554 Décembre 1990) :**

Le coefficient d'absorption est défini comme un rapport entre la masse d'un échantillon imbibé par la masse sèche de cet échantillon.

Le coefficient d'absorption est obtenu par :

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} \times 100$$

Ms : la masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105C°.

Ma : la masse de l'échantillon imbibé.

La photo IV.5 présente les outils utilisés pour l'essai d'absorption d'eau de sable.



Photo IV.5: Mesure de l'absorption de sable.

Les résultats de l'essai de coefficient d'absorption présentent dans le tableau suivant :

Tableau IV.3: Résultat d'essai d'absorption.

Classe d'agrégat	Coefficient d'absorption Ap (%)
Sable	0.52
Gravier roulé 3/8 et 8/15	1.65

On remarque que les deux matériaux utilisés à une capacité d'absorption d'eau acceptable. La norme préconise pour un bon agrégat une capacité d'absorption d'eau $CA < 2,5 \%$. (XP P 18-540, 1997)

➤ **La propreté superficielle (NF P 18-591 septembre 1990) :**

Les granulats employés pour le béton peuvent contenir des impuretés (argile, matières organiques...etc) qui perturbent l'hydratation du ciment et entraînent une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte. Ceci se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on les frotte entre les mains. (MERDAS A., 2011)

Les résultats de l'essai de propreté sont donnés selon le tableau suivant :

Tableau IV.4: Résultats de l'essai de propreté avant lavage.

Classe de granulats	La propreté P (%)
Gravier roulé 3/8	3.1
Gravier roulé 8/15	2.5

Selon les essais de propreté, données dans le tableau (IV.4) ci-dessus on remarque que les deux classes de gravier ont un coefficient de propreté élevés ($\geq 2\%$), donc la nécessité de criblage et nettoyé par lavage. Le tableau (IV.5) donne les résultats de propreté après lavage.

Tableau IV.5: Résultats de l'essai de propreté après lavage.

Classe de granulats	La propreté P (%)
Gravier roulé 3/8	0.03
Gravier roulé 8/15	0.01

Nous pouvons remarque à travers les résultats du Tableau (IV.5) que le gravier après lavage a une propreté admissible pour béton de qualité P (%) < 2%. cette propreté est presque nulle grâce le bon lavage de ce gravier.

➤ **Equivalent de sable (NF P 18-598 Octobre 1991) :**

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable effectué sur une fraction 0/5 mm du matériau à étudier.

Les résultats de mesure de l'équivalent de sable sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.6: Résultats de l'essai d'équivalent de sable.

Matériau	Equivalent de sable ES (%)
Sable	74.78

Ce résultat montre que le matériau utilisé est propre, à faible pourcentage de fines argileuses. La norme préconise pour Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante $65\% \leq ES < 75\%$. (Gorisse, F., 1978)

La valeur optimale de l'équivalent de sable est comprise entre 70 et 80, dans le cas des sables silico-calcaires tout au moins et ne contenant que peu de fines argileuses nocives dont a faible importance doit alors être confirmée par l'Essai « au bleu » (norme NF P 18-592). (Gorisse, F., 1978).

➤ **Essai au bleu de Méthylène (NF P94-068 Octobre 1998) :**

Couramment, l'essai au bleu de méthylène est utilisé pour quantifier et caractériser l'activité de l'argile contenue dans les sables. Il est utilisé également pour de manière sure et simple l'influence des fines d'origines argileuses contenues dans les sables.

La photo IV.6 montre les étapes de cet essai.



Photo IV.6: Essai de bleu de méthylène [GHEBICHI et al. 2018].

Le résultat de l'essai bleu au méthylène est présenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.7: valeurs des VB de sable utilisé.

L'échantillon	VB	Spécification
Sable	0.95	$V_{BS} \leq 1,5$

➤ **Los Angeles (NF P 18-573 Décembre 1990) :**

Cet essai permet de déterminer la résistance aux chocs des granulats selon la formule ;

$$LA = \frac{m}{M} \times 100$$

M : la masse totale d'échantillon (g).

m : la masse d'éléments < 1.6mm (g) (m= M-m')

m' : la masse d'éléments > 1.6mm (g).

Le résultat de l'essai du Los Angeles est présenté dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8: Résultats de l'essai de Los Angeles

Classe granulaire	LA (%)
10/14	18.2

Nous pouvons voir à travers le résultat étant donné que le matériau utilisé un très bon résistant aux chocs. La norme recommandé $LA\% \leq 35\%$ (béton exceptionnel) . (XP P 18-540, 1997)

➤ **Micro-Deval (NF P 18-572 Décembre 1990) :**

Cet essai permet de déterminer la résistance à l'usure d'un échantillon de granulat produit par frottement mutuel, en présence d'eau d'une charge abrasive, dans un cylindre en rotation.

Le coefficient Micro-Deval est le rapport en % entre la masse finale de refus et la masse initiale. Il est calculé selon la formule ci-après :

$$\text{MDE} = \frac{m}{M} \times 100$$

M : la masse totale d'échantillon (g).

m : la masse d'éléments < 1.6mm (g) (m= M-m').

m' : la masse d'éléments > 1.6mm (g).

Le résultat de l'essai de Micro-Deval est présenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.9: Résultats de l'essai de Micro-Deval

Classe granulaire	MDE (%)
10/14	4.48

À travers les résultats de l'essai on peut dire que le matériau utilisé est très bon résistant à l'usure (essai sous l'effet du courant d'eau); ce résultat est logique, car l'arrondissement des granulats est provoqué par la présence des eaux.

➤ **Analyse chimique des granulats (Hani et al., 2016) :**



Photo IV.7: Outils et solutions pour les analyses chimiques des granulats.

Le tableau ci-après (IV.10) montre les pourcentages des composants chimiques du chaque granulat utilisé.

Tableau IV.10: Résultats d'analyse chimique.

Pourcentages des composantes	Sable	Gravier
% Insoluble (SiO ₂)	95.68	10.44
% Gypse (Ca SO ₄ + 2H ₂ O)	0.70	0.90
% Sulfate (SO ₄ ⁻²)	0.15	0.20
% Carbonate de calcium (CaCO ₃)	0	85.00
% Chlorure (Cl ⁻)	0.03	0.01
% Chlorure de Sodium (NaCl)	0.05	0.02

À travers les résultats on peut tirer que les pourcentages des insolubles de sable plus du 90% indiquant que le sable utilisé de nature siliceuse par ailleurs le gravier est de nature calcaire (CaCO₃).

IV.3.3. Poudrette de caoutchouc :

La poudrette caoutchouc que nous avons étudié dans cette recherche est un déchet industriel de couleur noirâtre provenant du broyage de chutes de caoutchouc ; il présente une granularité assez fine (taille de 2.5 mm maximum et 5% < 0.08 mm) (voir la photo VI.8) . C'est un matériau élastique à température ambiante compatible avec le ciment et les agrégats. Cette poudrette provenant d'un caoutchouc synthétique.



Photo VI.8 : Poudrette de caoutchouc utilisée.

IV.3.3.1. Essais sur la poudrette de caoutchouc :

➤ Masse volumique de caoutchouc (ISO 2781, 2008) :

Le tableau IV.11 représente la variation de la masse volumique du caoutchouc.

Tableau IV.11 : Masse volumique des poudrettes de caoutchouc

Poudrette de caoutchouc	Masse volumique abs.	Masse volumique appr.
(g/cm ³)	0,62	0.43

On Remarque que la masse volumique de caoutchouc est moins cinq fois à celle de sable.

➤ Analyse Thermogravimétrique (ATG) (NF EN ISO 11358-1) :

Cette technique d'analyse consiste à connaître la composition massique d'un mélange de caoutchouc en le soumettant à un cycle thermique particulier sous atmosphère gazeuse donnée. La variation de masse de l'échantillon (décomposition, oxydation, volatilisation d'un des constituants) enregistrée en fonction de la température conduit à un diagramme thermique exploitable quantitativement, constituant une empreinte caractéristique du matériau. [LRCCP.com]

Cette analyse a été réalisée au laboratoire de recherche de l'université Abderrahmane Mira/Béjaia. Les résultats d'analyse sont présentés dans la figure IV.7 suivante ; La masse initiale du caoutchouc est 14.55mg.

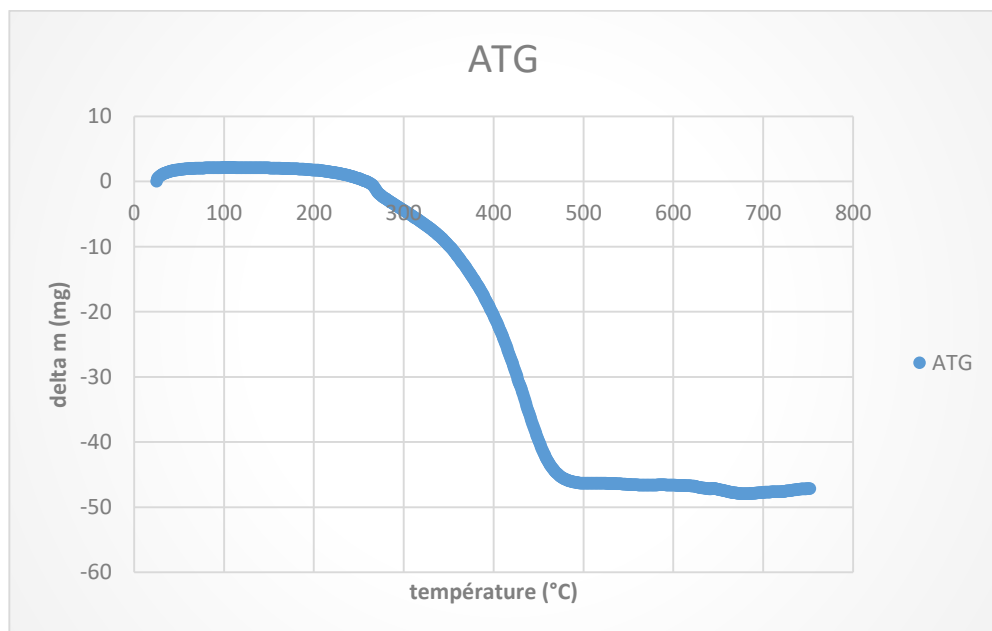


Figure IV.7 : Courbe d'analyse thermogravimétrique de la poudrette de caoutchouc (perte de masse en fonction de la température)

D'après M^r SIMOND [CALNESIS 2018] et les résultats de cette analyse on remarque qu'il y a deux pertes de masse, la première est due à l'évaporation d'un volatile et la seconde due à la dégradation du polymère.

➤ **Differential Scanning Calorimetry (DSC) (ISO 22768):**

Cette technique d'analyse consiste à soumettre l'échantillon à un cycle thermique contrôlé (généralement un balayage à température dans une atmosphère donnée). Appliqué aux polymères (thermoplastiques, élastomères et thermodurcissables), le DSC révèle les caractéristiques thermiques liées au changement d'état physique (fusion / cristallisation et transition vitreuse) ou chimique (réticulation et oxydation). [PerkinElmer.com, 2014]

Cette analyse a été réalisée au laboratoire LTPS/ unité de Ghardaïa (voir les photos IV.9 et IV.10) . Les résultats d'analyse sont présentés dans la figure IV.8 ;

La masse initiale du caoutchouc est **12 mg**.



Photo IV.9 : Appareil Differential Scanning Calorimetry.(LTPS - Unité Ghardaia)



Photo IV.10: Emplacement du matériau (essai DSC).

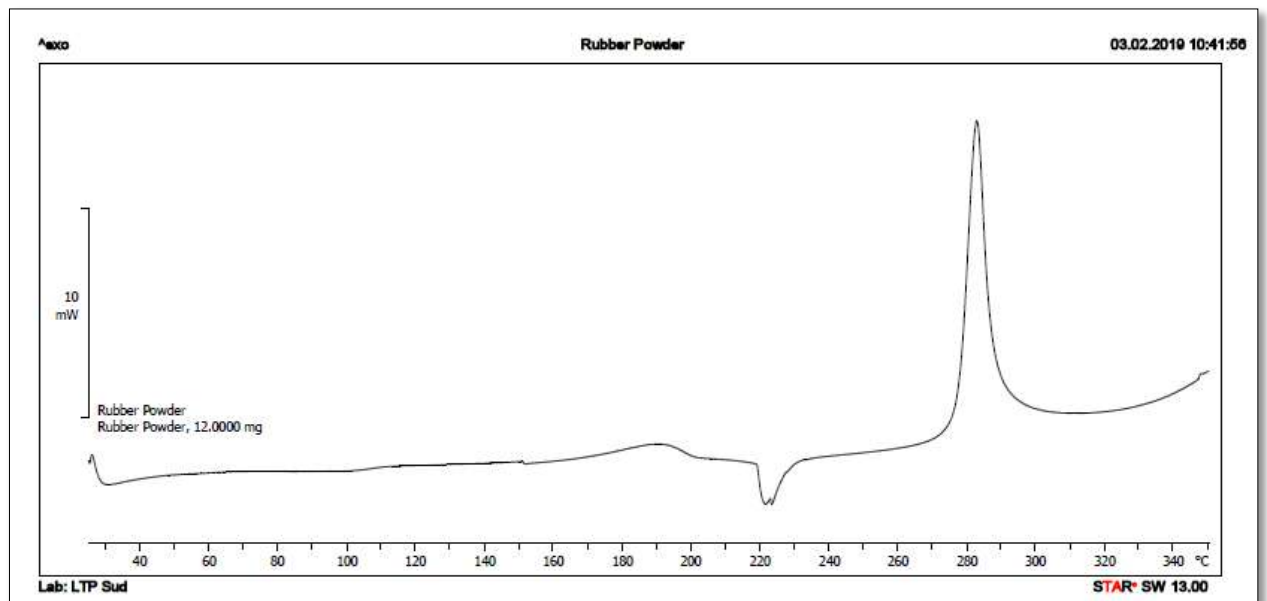


Figure IV.8 : Courbe d’analyse Differential Scanning Calorimetry de la poudre de caoutchouc (la quantité de chaleur en fonction de température).

D’après les résultats d’essai et la courbe présentée dans la figure IV.8 on peut constater que la température de fusion de ce caoutchouc est 220° (diminution de quantité de chaleur indique une absorption de chaleur), ces résultats concordent avec ceux rapportés par BAZZINE R., (2013), KEBAILIN., (2017) et MEZIDI O., (2006) ; par contre, on remarque une augmentation de quantité de chaleur à 280°C c’est un dégagement de chaleur alors une évaporation de matériau.

IV.3.4. Ciment :

Le ciment est présenté sous la forme d’une poudre minérale fine. Il forme avec l’eau une pâte qui se fige et durcit. Ce liant hydraulique permet d’agglomérer des substances variées appelées agrégat ou granulats. (Holcim SA , 2015)

Le ciment utilisé dans notre recherche est un ciment portland composé CPJ CEM II/A 42.5, disponible sur le marché, et fabriqué par la cimenterie (EL Matine) (LAFARGE en Algérie). Le choix de ce type de ciment a été sur la base de la norme (P 15-010) et selon le type de béton étudié. (FD P 15-010, 1997)

❖ **Caractéristiques chimiques :**

L'analyse chimique du ciment utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés en pourcentage massique dans le tableau IV.12.

Tableau IV.12: Composition chimique du ciment en %. (Fiche Technique, 2003)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
18.88	4.36	3.10	62.23	1.43	2.70	0.28	0.58	6.50

Nous remarquons que le ciment utilisé contient des pourcentages appréciables en chaux et en silice.

L'indice d'hydraulicité ou indice de Vicat, est le rapport de la fonction acide du ciment à la fonction basique (Beaudoin, 1982).

$$I = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$$

Pour le ciment utilisé : $I = 0,365 < 0,5$. Donc, le ciment est neutre (Dreux et Festa, 1998).

❖ **Caractéristiques mécaniques:**

Le tableau ci-après résume certaines caractéristiques mécaniques du ciment utilisé.

Tableau IV.13 : Caractéristiques mécaniques du ciment. (Fiche Technique, 2003)

Propriétés physiques et mécaniques	CPJ-CEMII/A
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50
Rc28 (MPa)	42.5
Rt28 (MPa)	4.3
Retrait 28j (Am/m)	≤ 1000

IV.3.5. Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage du béton est celle du robinet de laboratoire LTPS – unité d'ouargla. Les analyses d'eau de gâchage ont été réalisées au laboratoire **d'AQUA ENGINEERING/ Ouargla**.

Les résultats de l'analyse chimique de l'eau sont représentés dans le tableau IV.14 selon la norme NF P18-303 et NA 1966, relative aux concentrations en matières en suspension et sels dissouts.

Tableau IV.14: Résultats d'analyse d'eau.

Paramètre	Résultat d'analyse	Spécification utilisée (NF EN 1008)	commentaire
PH	7.71	≥ 4	Conforme
TH (C°)	20.8		
TDS (mg/L)	1224		
Conductivité (µs/cm)	1830		
Tub (NTN)	0.128		
Salinité (g/L%)	1.24		
Chlorures (Cl⁻) (mg/L)	640	Béton armé <1000	
		Béton non armé < 4500	
Sulfates (SO₄⁻²) (mg/L)	760	< 2000	

D'après les résultats exposés dans le tableau **IV.14**, il s'agit d'une eau qui présente une faible salinité (Gorisse, 1978), pouvant être utilisée pour les bétons et mortiers normaux.

IV.4. FORMULATIONS DES BÉTONS ETUDIÉS

L'étude suivante consiste en premier lieu à confectionner un béton ordinaire dont les ingrédients sont connus : granulats, ciment et eau. Pour le formuler, la méthode choisie est facile à appliquer, elle a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantiers et ayant donné satisfaction, c'est la méthode de Dreux Gorisse. En second lieu, on propose d'appliquer cette méthode pour formuler le béton afin d'éviter d'autres méthodes qui sont un peu compliquées par rapports à celle de Dreux Gorisse. (Zeghichi L, 2006).

IV.4.1. Méthode de Dreux Gorisse

C'est une méthode simple d'utilisation, puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés.

Les données sont :

- Dimension maximale des granulats $D = 20$ mm.
- Courbe de référence : $x = 10$, $y = 44.32$.
- Composition du mélange en granulats : gravier roulé $8/15 = 58\%$, $3/8 = 8\%$ et sable = 34% .
- Les hypothèses de calcul :
 - Résistance souhaitée : 25 MPa.
 - Affaissement souhaité : 8 cm.
 - La vraie classe du ciment composé CPJ = 350 kg/m^3 .

Quatre mélanges de béton sont préparés :

- **Béton témoin (BT) C0**: est un mélange ordinaire formulé à partir de trois classes granulaires (0/3), (3/8) et (8/15).
- **Béton modifié (BM) C1, C2, et C3** : est un mélange formulé à partir de trois classes granulaires : (3/8), (8/15) et le sable plus des différents pourcentages des poudrettes de caoutchouc 5%, 10% et 15% successivement.

Ces pourcentages sont choisis selon les recherches et les études similaires. Après l'application numérique, les compositions des bétons qui doivent être étudiés sont représentées dans le tableau IV.15.

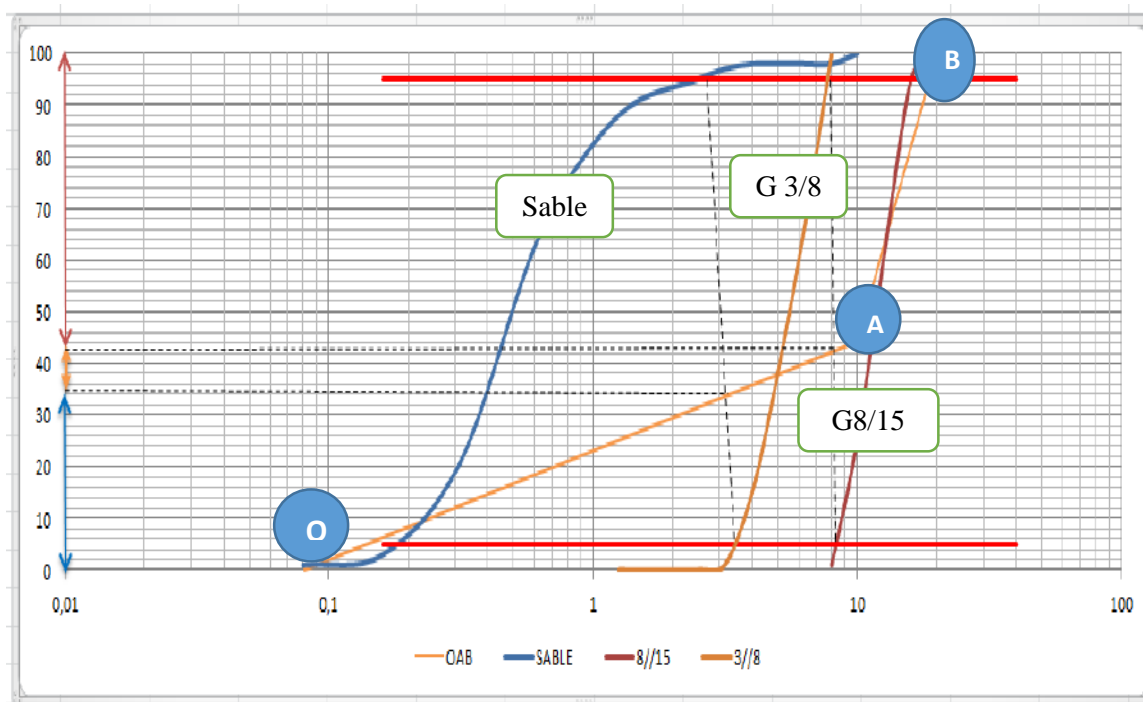


Figure IV.9: Courbe de référence avec les 3 granulométries du agrégats utilisés.

Tableau IV.15: Compositions optimales de 1 m³ des bétons type BT et BM.

Constituents	C0	C1	C2	C3
Ciment (Kg)	350	350	350	350
Affaissement (A) (cm)	8	8	8	8
Rapport (E/C)	0.45	0.45	0.45	0.45
Eau (calculé) (E) (l)	157.5	157.5	157.5	157.5
Gravier roulé (8/15) (%)	58	58	58	58
Gravier roulé (3/8) (%)	8	8	8	8
Sable (%)	34	32.3	30.6	28.9
Poudrette (%) / du sable	0	1.7	3.4	5.1
G/S	1.94	2.04	2.15	2.28

IV.4.2. Confection des éprouvettes

Conformément à la norme européenne NF EN12390-1, pour les besoins de notre étude et selon le type de l'essai à réaliser, on a utilisé :

Des éprouvettes cubiques (15×15×15) cm³ (norme NF P 18-400): Ces éprouvettes sont confectionnées pour la détermination de la résistance à la compression ainsi que pour l'essai de traction par fendage.

Des éprouvettes prismatiques (10×10×40) cm³ (norme NF P 18-400): Ces éprouvettes sont confectionnées pour la détermination de la résistance à la traction par flexion (4 points) ainsi que pour les essais d'ultrasonique.

Des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm³ (norme NF P 18-400): Ces éprouvettes sont confectionnées pour le essais de retrait.

IV.4.3. Malaxage :

Le malaxage est exécuté à l'aide d'un malaxeur au niveau de LTPSud, les étapes de malaxage sont conforme à la norme NF 18.404, les constituants, après avoir été pesés, sont introduits du plus gros au plus fin à l'intérieur du malaxeur (le ciment étant introduit juste avant le sable). Le malaxage prend une minute à sec et se prolonge durant deux minutes après l'ajout de l'eau.

IV.4.4. Moulage et démoulage :

Après le malaxage qui dure environ 5 minutes, le béton est prêt à l'emploi. Le béton est introduit dans des moules déjà graissés par une huile pour faciliter le démoulage après 24 heures de leur coulage.

Le remplissage des moules est exécuté en deux couches vibrées jusqu'à la fin des bulles d'air du béton. Le but de la vibration est le remplissage parfait du moule.

A la fin du coulage, il faut araser les éprouvettes à l'aide d'une règle selon les normes NF P18-422 et NF P 18-423. La face supérieure de l'éprouvette doit être lisse est bien finie.

IV.4.5. Conservation des éprouvettes :

Après démoulage, les éprouvettes sont entreposées dans de l'eau jusqu'au moment de l'essai, à une température de $20\text{ C}^{\circ} \pm 2\text{ C}^{\circ}$, ou dans une salle de conservation à $20\text{ à }26\text{ C}^{\circ} \pm 2\text{ C}^{\circ}$ et humidité relative $HR = 85\%$. La conservation des éprouvettes dans l'eau ou dans l'air libre a été faite selon le type d'essai.

IV.5. PRÉSENTATION DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés de béton témoin et béton modifié par poudrettes de caoutchouc et comparer ceux-ci aux propriétés de béton ordinaire.

Chaque essai est réalisé sur six éprouvettes de la même composition, et la valeur moyenne des six essais a été prise comme valeur caractéristique. Le tableau IV.16 décrit, pour chaque essai réalisé, les éprouvettes de bétons préparés ainsi que leurs modes et durées de conservation. Il décrit aussi les nombres et les dimensions des éprouvettes testés.

Tableau IV.16: Eprouvettes et leurs conservations ;

Essais	Eprouvettes préparées	Conservation après démoulage à 24 heures	Nombre Eprouvettes testés
Résistance à la compression	Cubique 15×15×15cm	Dans l'eau à T=20 ±2°C pendant 3, 7, 28 et 90 jours	120
Résistance à la traction et Auscultation dynamique	Prismatique 10×10×40 cm	Dans l'eau à T=20 ±2°C pendant 3, 7 et 28 jours	80
Résistance à la traction par fendage	Cubique 15×15×15cm	Dans l'eau à T=20 ±2°C pendant 3, 7 et 28 jours	80
Retrait	Prismatique 7×7×28 cm	Dans l'air à T=20 ±2°C et HR= 45±10%.	24

IV.5.1. Essai Sur Béton Frais

➤ Mesure de la consistance (Norme NF P 18-439)

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams qui consiste à :

- Mouler des troncs de cône en béton (base de diamètre 20cm, partie haute de diamètre 10cm) (voir la photo IV.11);
- Remplir le cône en trois couches piquées chacune par 25 coups avec une tige métallique de 16 mm de diamètre à extrémité arrondie;
- Soulever le moule avec précaution et mesurer la hauteur l'affaissement en cm (voir la photo IV.12).



Photo IV.11: Remplissage du cône par le béton.



Photo IV.12: Mesure de l'affaissement.

IV.5.2. Essais Sur Béton Durci :

Cette partie renseigne sur les différents essais effectués sur les différents types de béton après le démoulage. La distinction entre les essais destructifs et non destructifs sur le béton durci est également différenciée dans cette partie.

❖ Essais destructifs :

➤ Essais de compression : Norme (NF EN 18-455)

L'essai de résistance à la compression (Essai d'écrasement) a été effectué par l'application d'un effort de chargement sur une éprouvette cubique (15× 15 ×15) cm, dans le sens perpendiculaire à l'axe de coulage, jusqu'à rupture dans une presse d'essai de compression.

La presse utilisée est une machine de type «MATEST» (voir la photo IV.13), ayant une capacité maximale de 2000 KN. Sa mise en marche s'effectue avec une vitesse de chargement constante de 0,5 MPa/seconde.

La résistance à la compression sera calculée selon l'équation : $R_C = F/b^2$

Où : R_C : Résistance à la compression en MPa ;

F : Charge de rupture en N ; b : Côté de l'éprouvette en mm.



Photo IV.13: Presse d'écrasement utilisée.

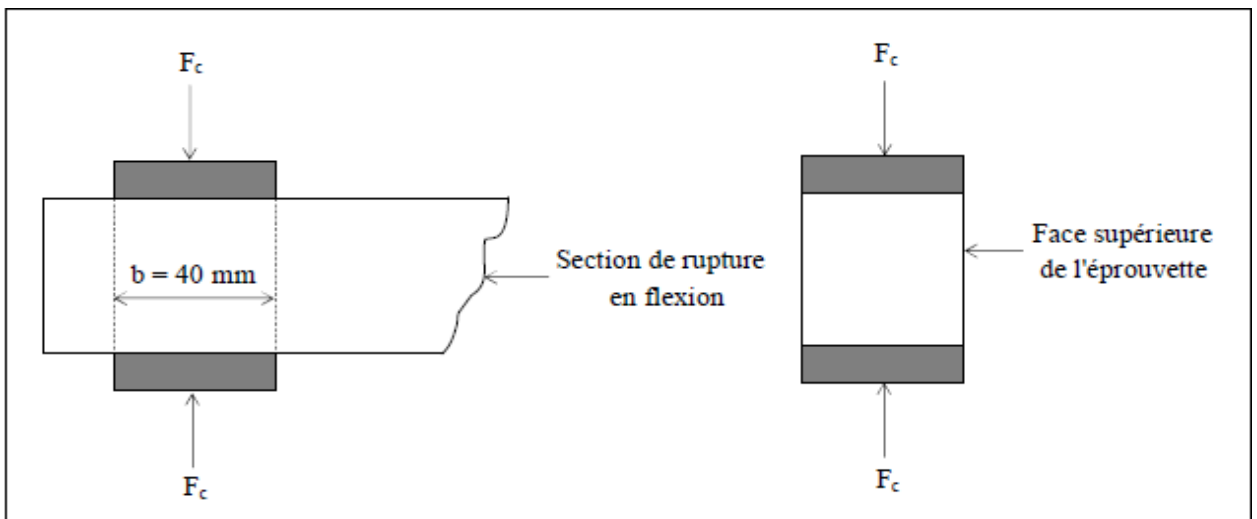


Figure IV.10 : Dispositif de rupture en compression (Dupain et al., 2000)

➤ **Essais de traction par flexion: (NF P18-433)**

L'essai de traction par flexion à 4 points est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (10x10x40) cm. celles-ci sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée par conséquence.

La photo IV.14 présente les dispositifs utilisés pour la flexion à 4 points, et la photo IV.15 présente une éprouvette montée sur l'appareil.

La résistance à la traction par flexion correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante:

$$\sigma = P l / a^3$$

P : La charge appliquée en N;

l : 3a en mm ;

a : Le coté de l'éprouvette prismatique ($a \times a \times 4a$) en mm

La presse effectue une vitesse de chargement constante de l'ordre de 0.05 MPa/sec.



Photo IV.14: Dispositif de flexion à 4 points.



Photo IV.15: Essai de traction par flexion.

➤ **Essais de traction par fendage: (NF P 18-434)**

Cet essai consiste à rompre l'éprouvette cubique (15×15×15) entre les deux plateaux d'un presse de compression suivant deux génératrices opposées. Le contact des plateaux avec l'éprouvette est réalisé par l'intermédiaire de réglettes de contre-plaqué de 5cm d'épaisseur (voir la photo IV.16), leur largeur est de la longueur de l'éprouvette.

La résistance à la traction par fendage (en MPa) calculée par la formule suivante:

$$\sigma = 2P / \pi Ld$$

P : La charge appliquée en N ;

L = d = 150 mm.

La vitesse de chargement varie entre 0.04 à 0.06 MPa/seconde.



Photo IV.16: Réglette en contre-plaqué.



Photo IV.17: Essai de traction par fendage.

❖ **Essais non destructifs:**

➤ **Essais ultrasonique: (Norme NF P 18-418)**

Cet essai consiste à mesurer la vitesse longitudinale du son dans le béton à l'aide d'un appareil comportant une boîte de mesure, et deux têtes (une émettrice et l'autre réceptrice). Les essais ultrasoniques ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (10x10x40cm). Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en micro-seconde. La vitesse de propagation est donnée par l'équation suivante :

$$V = D / t$$

- V : vitesse de propagation en m/sec ;

- D : distance entre les têtes en (mètre) mesurée avec une précision de 1 % ;

- t : temps en micro-seconde.



Photo IV.18 : Appareil de mesure ultrasonique.

➤ **Essai de retrait: (Norme NF P 15-433)**

Essai de retrait consiste à mesurer en fonction d'âge (jours) la variation de longueur d'une éprouvette prismatique (7x7x28) cm³, par rapport à sa longueur initiale, placée dans un rétractomètre muni d'un comparateur qui permet la mesure du retrait à tout moment. La longueur initiale (longueur de référence) est celle de prisme un jour après sa fabrication. La variation dimensionnelle de l'éprouvette "Vd", est définie par la formule suivante :

$$Vd = \frac{dL}{L} 1000 \text{ (}\mu\text{m/m)}$$

dL: variation de longueur, exprimée en micromètres;

L: longueur initiale entre les plots de mesure, exprimée en mètre.



Photo IV.19: Mesure de retrait.

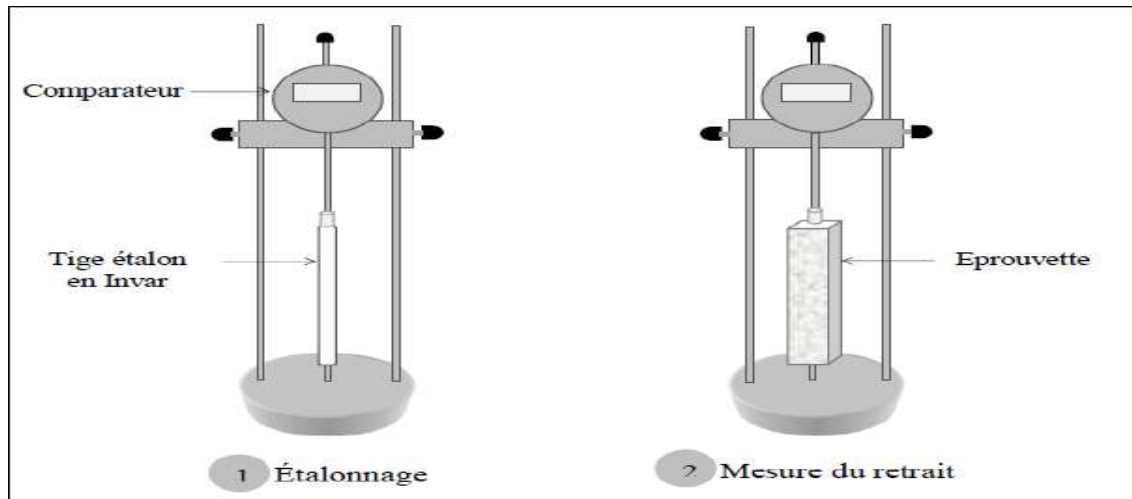


Figure IV.11: Appareillage pour la mesure du retrait (Rétractomètre). (BELFERAG, 2016)

IV.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, et dans un premier temps, les différentes caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des composants ont été établies. Les courbes granulométriques de toutes les classes granulaires sont présentées. Il était important de définir la partie normative à laquelle doivent répondre les différents mélanges.

Dans un deuxième temps, on a déterminés le dosage de chaque composant ; sable, gravier (3/8), (8/15), poudrette de caoutchouc, ciment et eau de gâche ; pour les 4 types des mélanges par la méthode de formulation DREUX-GORISSE.

On achève ce chapitre par les essais sur bétons frais et durci qui ont été effectués :

- ✓ Essais d'affaissement ;
- ✓ Essais de résistance mécanique à la compression ;
- ✓ Essais de résistance mécanique à la traction par flexion ;
- ✓ Essais de résistance mécanique à la traction par fendage ;
- ✓ Essais ultrasoniques ;
- ✓ Essais de retrait.

CHAPITRE V

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE V : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. INTRODUCTION

Ce chapitre porte sur l'influence de la substitution du sable par la poudrette de caoutchouc sur les caractéristiques du béton frais et durci. Pour se faire, plusieurs mélanges de béton à différentes combinaisons ont été formulés et une série d'essais expérimentaux est lancée. Dans ce qui suit nous allons exposer les différents résultats obtenus.

En se basant sur la méthode de formulation de Dreux-Gorisse, le dosage de ciment est pris constant $C=350 \text{ Kg/m}^3$, tout en gardant une ouvrabilité constante ($A_{ff} = 8 \text{ cm}$) et ceci pour toutes les combinaisons. L'objectif de cette démarche consiste en la recherche de la meilleure combinaison possible entre granulats qui puisse assurer les meilleures performances du béton à base de gravier roulé destiné aux ouvrages : bâtiments, toitures, bordures, éléments préfabriqués,...

V.2. EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR BÉTONS FRAIS

L'essai réalisé sur les bétons frais est la mesure de l'ouvrabilité évaluée à l'aide du cône d'Abrams. La consistance désirée pour ces bétons est une ouvrabilité plastique et tenant compte des caractéristiques intrinsèques des granulats, un ajustement a été apporté sur le dosage en eau dans le but d'assurer un écoulement du béton qui correspond à la consistance désirée.

Afin de faciliter la comparaison des types de béton entre eux, tous sont fabriqués à ouvrabilité constante appréciée par un affaissement au cône d'Abrams de l'ordre de 8 cm de la classe de consistance des bétons plastiques. Le tableau V.1 suivant donne des indications sur les quantités d'eau totales réellement utilisées dans les mélanges ainsi que les quantités effectivement ajoutées aux mélanges.

Tableau V.1: Variation de l'eau de gâchage de 1 m³ et le rapport E/C.

Béton	Eau Calculée (l)	Eau Ajoutée (l)	Eau Efficace (l)	Ciment (Kg)	E/C	Affaissement (cm)
C0	157.51	23.425	198.175	350	0.56	8
C1	157.51	23.260	187.431	350	0.53	
C2	157.51	23.100	183.800	350	0.52	
C3	157.51	22.930	180.570	350	0.51	

D'après les recherches et les études similaires sur le béton à base de gravier concassé et à travers ces résultats, il est montré que la demande en quantités d'eau de gâchage dans le cas des bétons à base de gravier concassé est plus importante que celle demandée dans le cas du béton à base de gravier roulé. Cela est probablement lié à la structure de la surface de chaque gravier : le gravier roulé est un gravier dense, à surface lisse par contre le gravier concassé est caractérisé par une structure anguleuse avec une surface spécifique très importante. D'après (HAFID H., 2012 ; MAKANI A., 2011 ; Mushtaq A., 2006), l'ouvrabilité de bétons formulés à partir de granulats concassés est souvent moins bonne que celle du béton à base des granulats roulés.

D'autre part, plusieurs auteurs (Bellferag 2016; H.Cuong 2010 ; Mezidi 2008 ; Bellferag 2006; Khatib Z. 1999), attestent que l'introduction d'un certain pourcentage de fibres dans le béton réduit l'ouvrabilité d'une manière significative (ouvrabilité diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de caoutchouc incorporés).

Par ailleurs, on remarque que le pourcentage des fines a également une influence sur la quantité du dosage en eau. Le C3 qui a un pourcentage en fines inférieur que celui du C0, nécessite un dosage en eau moins faible. Il est à noter que la composition granulométrique du sable utilisé pour la composition C3 a été rectifiée d'où une partie de fines a été retirée de la granularité tout en respectant la norme prescrite pour les limites de fines dans un sable.

En outre, on a constaté que la quantité d'eau d'ajustement pour maintenir la consistance plastique de la composition C0 est supérieure à celle de C1, C1 est supérieure à celle de C2, et ainsi de suite pour les autres dosages ; ce qui semble logique vu le caractère absorbant des grains du sable. Toutefois, cette quantité pour le C4 est aussi importante et ceci est attribué au fort module de finesse du sable de carrière ainsi que la présence dans celui-ci d'un pourcentage considérable de fines et à l'absorption d'eau considérable du sable de carrière utilisé (voir schéma ci-après **figure V.1.**).

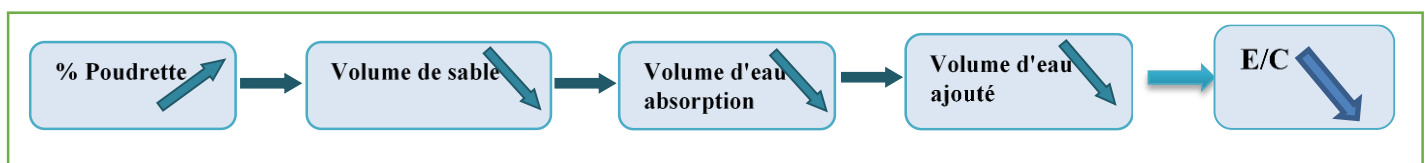


Figure V.1: Schéma explicatif de l'effet d'ajout des poudrettes sur l'ouvrabilité du béton.

Dans leur étude Benazzouk et al. (2004 et 2002), pour les deux cas (béton témoin et modifié), la capacité d'absorption d'eau diminue avec le taux d'incorporation des granulats caoutchouc, ce que les premiers auteurs expliquent par le fait que le caoutchouc n'absorbe pas l'eau et qu'elle doit par ailleurs contourner un réseau poreux plus dense symbolisant ainsi une plus grande difficulté à se propager à l'intérieur du composite cimentaire.

V.3. EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS SUR BÉTONS DURCIS

Les essais et les mesures réalisés sur les bétons durcis sont des essais destructifs (résistance à la compression, résistance à la traction par fendage et résistance à la traction par flexion) et des essais non destructifs (mesure des masses volumiques, le retrait et l'ultrasonique).

V.3.1. Essai de la masse volumique de béton durci :

Les résultats des masses volumiques pour les 4 types de béton sont présentés dans la figure V.2.

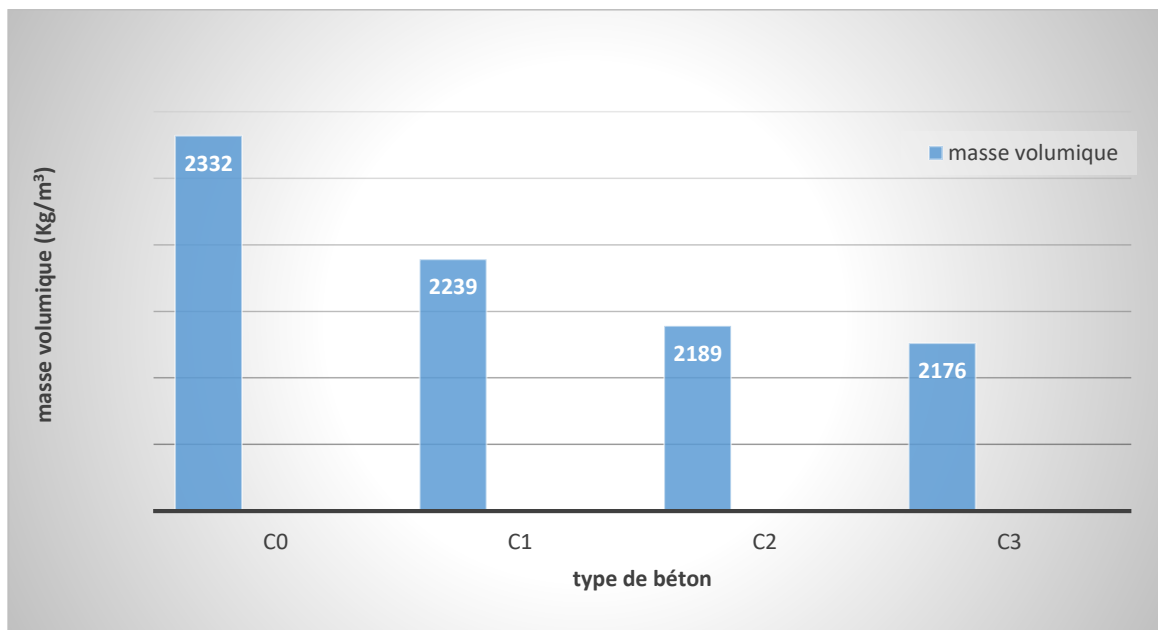


Figure V.2: Variation de la masse volumique pour chaque type de béton.

Les éprouvettes moulées sont conservées à l'air libre et à température ambiante (température à l'intérieur du laboratoire) durant 24 heures après le coulage. Juste après le démoulage elles sont pesées et immergées ensuite dans l'eau. Après 28 jours de placement dans l'eau, on a mesuré la masse volumique avant l'essai d'écrasement, car on a constaté que les masses volumiques apparentes des bétons durcis enregistrent une augmentation avec des pourcentages différents, cela est dû à l'absorption d'eau par capillarité multidirectionnelle. Au bout de 72 heures, les masses volumiques semblent se stabiliser à pallier ce qui correspond à un stade de saturation en eau des éprouvettes.

On remarque que la masse volumique du béton diminue avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc introduit ; ceci s'explique par le fait que la masse volumique du caoutchouc (0.62%) est plus faible que la masse volumique du sable (2.60%).

V.3.2. Essai de la résistance à la compression :

La composition des éprouvettes, le procédé de confection, le mode de conservation ainsi que les dispositions expérimentales pour déterminer la résistance en compression ont été présentés au chapitre précédent. Les résultats obtenus des résistances à la compression à différents âges (3 jours, 7 jours et 28 jours) pour les quatre sortes de béton, sont illustrés dans la figure V.3 et le tableau V.2 ci-dessous. Chaque valeur représente la moyenne de six essais.



Photo V.1 : Epreuve pendant l'essai d'écrasement RC.



Photo V.2 : Epreuve après l'essai d'écrasement RC.

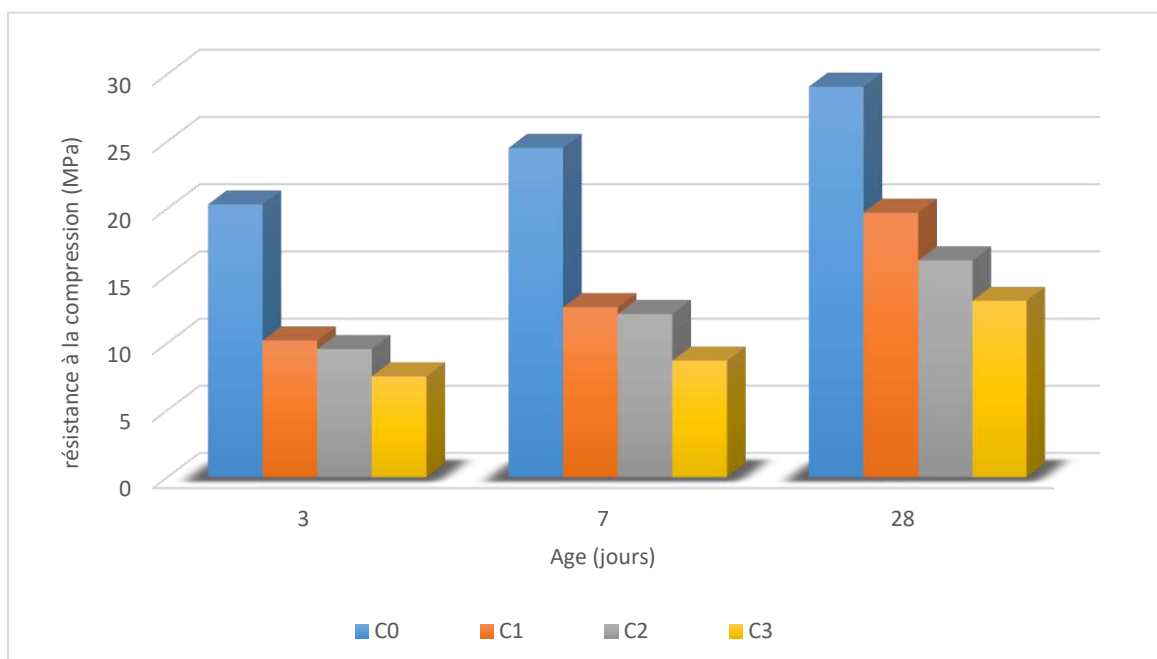


Figure V.3 : La résistance à la compression pour chaque type de béton en fonction d'âge.

Le tableau V.2 présente le rapport de résistance à la compression de chaque mélange par rapport le mélange témoin.

Tableau V.2: Variation de la résistance à la compression à 28 jours.

Type de béton	C0	C1	C2	C3
Résistance à la compression (MPa)	29.09	19.71	16.17	13.16
Rapport de R_c / témoin (%)	100	67.75	55.58	45.23

Les photos suivantes représentent les fissurations apparentes pour chaque type de béton après les écrasements



a) Epreuve C0.



b) Epreuve C1.



c) Epreuve C2.



d) Epreuve C3.

Photo V.3 : Fissurations des types de béton C0, C1, C2 et C3 après écrasement.

D'après les résultats obtenus par le tableau V.2 ainsi que la figure V.3 on peut observer les constatations suivantes :

- La résistance à la compression augmente entre 3, 7 et 28 jours pour les mélanges des différents pourcentages du caoutchouc.
- Comme montré ci-dessus, la résistance à la compression du béton témoin à 7 jours est de 24.53 MPa. Toutefois, cette valeur est ramenée à 12.69, 12.18 et 8,71 MPa avec l'addition de 5, 10 et 15 % de poudrette de caoutchouc, respectivement.
- La résistance à la compression du béton témoin C0 de 28 jours a été déterminée à 29.09 MPa. De plus, elle a été réduite à 19.71, 16.17 et 13.16 MPa avec l'addition de la poudrette de caoutchouc.
- La variation de la résistance à la compression des éprouvettes, à 28 jours, à différentes formulations, est donnée par le tableau V.2. La résistance diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en poudrette de caoutchouc. Pour une composition allant de 0 à 15%, la résistance à la compression varie de 29.09 MPa, pour le béton témoin, à 13.16 MPa ; soit une réduction de l'ordre de 45.23%.
- Les résultats montrent que malgré une baisse significative de la résistance à la compression, la valeur obtenue pour une composition à 5% en caoutchouc, reste compatible avec l'utilisation du matériau dans le domaine d'application des bétons légers de construction.
- Comme on pouvait s'y attendre, conformément aux conclusions d'autres chercheurs, la résistance des mélanges de béton contenant du poudrette de caoutchouc a été réduite de façon générale. Comme on peut le voir sur le tableau V.2, avec un remplacement de 5% de caoutchouc en poudre, la résistance à la compression n'a été réduite que d'environ 33% par rapport au mélange témoin malgré une réduction de 5% de sable. Les remplacements de 10 et 15% de caoutchouc en poudre ont réduit la résistance de 45 à 55 %, respectivement.
- Les échantillons contenant du caoutchouc présentaient des charges de compression après rupture et ont subi un déplacement significatif avant rupture. Bien que les éprouvettes soient très fissurées et ne présentaient pas de rupture fragile sous compression, elles ont été capables de résister à une partie de la charge ultime (photo V.3). Cette constatation est conforme à ce qu'ils ont observé Neil et Senouci. Les grands déplacements et déformations qui ont été observés sont dus au fait que le caoutchouc a une capacité de résister à de grandes déformations et son comportement plastique. Les particules de caoutchouc semblent agir comme des ressorts et retarder l'élargissement des fissures et empêcher la rupture brusque qui se produit habituellement dans les éprouvettes en béton ordinaire comme le montre la photo V.4 et V.5.

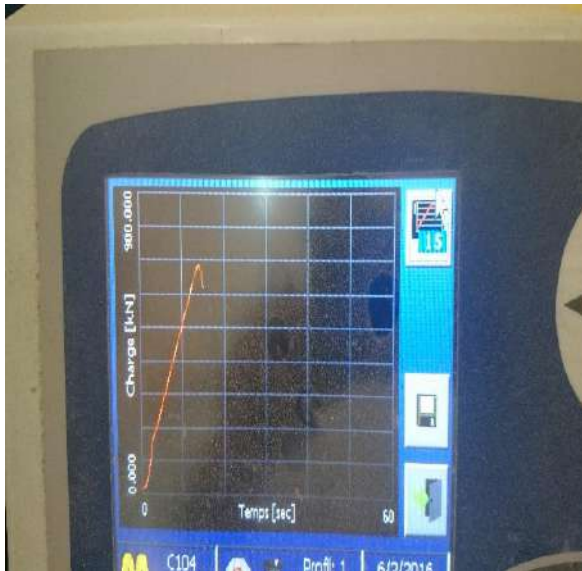


Photo V.4 : Charge appliquée sur C0 (15s durée de chargement).



Photo V.5 : Charge appliquée sur C2 (25s durée de chargement).

- On peut constater concerne l'incorporation de poudrette de caoutchouc, qu'elle permet aussi d'augmenter la capacité de déformation et cela malgré la chute de la charge maximale. Dans ce sens, un taux d'incorporation permet de multiplier la capacité de déformation avant localisation de la microfissure.

- Les raisons de la réduction de la résistance à la compression du béton modifié lors de l'utilisation de la poudrette de caoutchouc étaient liées aux propriétés différentes de ce polymère et des agrégats roulé ; L'une des raisons en est que la résistance du caoutchouc est inférieure à celle du sable de rivière et que la présence de caoutchouc est donc certainement défavorable en ce qui concerne la résistance du béton.

- L'autre raison de la résistance plus faible est que, le manque d'adhérence et la liaison entre les particules de caoutchouc et la pâte ou la matrice cimenterie d'une part, et d'autre part, une mal adhérence à cause de la forme et la surface lisse de gravier (photo V.6), les particules de caoutchouc mou peuvent être considérées comme des vides dans la matrice en béton. L'augmentation supposée de la teneur en vides entraînerait certainement une réduction de la résistance.

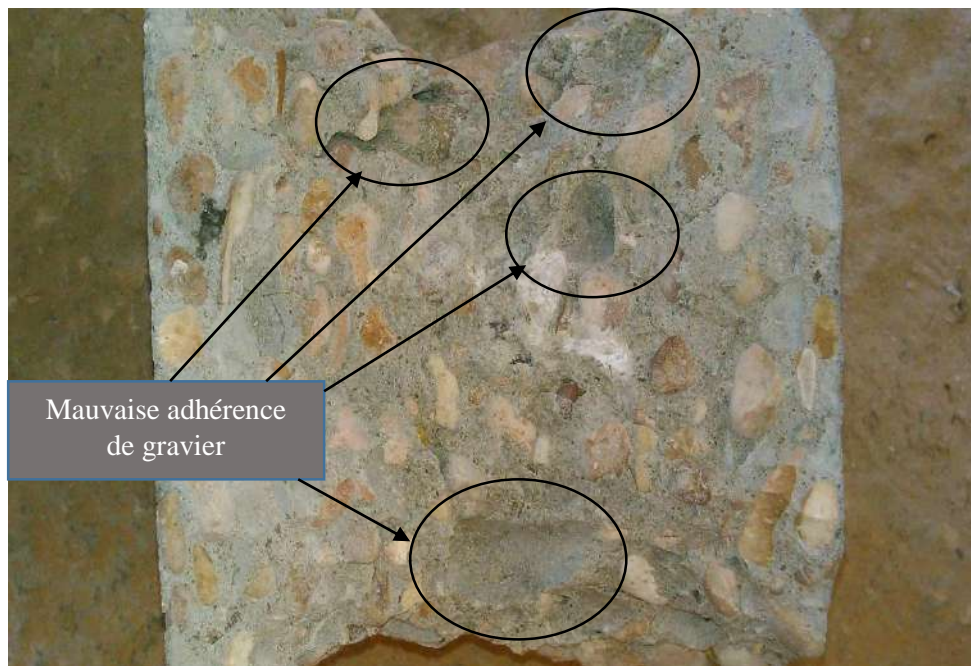


Photo V.6 : état d'adhérence après l'écrasement.

- Puisqu'une partie du sable est remplacée par des particules de caoutchouc, le volume des éprouvettes diminue en conséquence. D'autre part, la résistance à la compression du béton dépend des propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux. On peut donc s'attendre à une réduction de la résistance à la compression du béton.
- Pendant la coulée et la vibration des éprouvettes, les particules de caoutchouc ont tendance à se déplacer vers la surface supérieure du moule, ce qui entraîne une concentration élevée de particules de caoutchouc dans la couche supérieure des éprouvettes. Du fait de la faible densité des particules de caoutchouc et à l'absence de liaison entre les particules de caoutchouc et la masse de béton. La distribution non uniforme des particules de caoutchouc à la surface supérieure tend à produire des échantillons non homogènes et entraîne une réduction de la résistance du béton à ces parties, ce qui entraîne une rupture à des contraintes moindres.
- Finalement, on peut expliquer cette diminution de résistance par le faible module d'élasticité des inclusions en caoutchouc auxquelles il attribue les effets de pores. On peut penser que comme le caoutchouc est moins rigide que les granulats, la présence de particules de caoutchouc dans le béton réduit la rigidité de la masse du béton et diminue sa capacité de charge. La rigidité du béton caoutchouté est, en général, inférieure à celle du béton conventionnel comme ils ont indiqués Li et al. (1998), Eldin et Senouci(1999) , Ganjianet al. (2008) et Cuong H. (2010), ceci peut être attribué à la rigidité plus faible du caoutchouc par rapport à celle du sable. Cette caractéristique rend les bétons caoutchoutés appropriés pour une utilisation dans le domaine du contrôle des vibrations, comme dans les structures isolées de base.

V.3.3. Essai de résistance à la traction par fendage :

La résistance à la compression est une caractéristique mécanique importante du béton. C'est un élément obligatoire pour identité. En général, ce n'est pas tant sa résistance à la traction qui est généralement estimée à partir de la résistance en compression. Pourtant il convient de garder à l'esprit que, dans des cas très spécifiques d'application telles que celles aperçues pour le composite cimentaire avec des ajouts polymères, la résistance à la traction devient également un élément important qui doit être déterminé avec un grand soin.

Les mêmes éprouvettes (15*15 cm) que celles utilisées pour la résistance en compression ont été confectionnés pour un essai de traction par fendage.

Les résultats de l'essai de résistance à la traction par fendage sont montrés dans la figure V.4 et le tableau V.3.

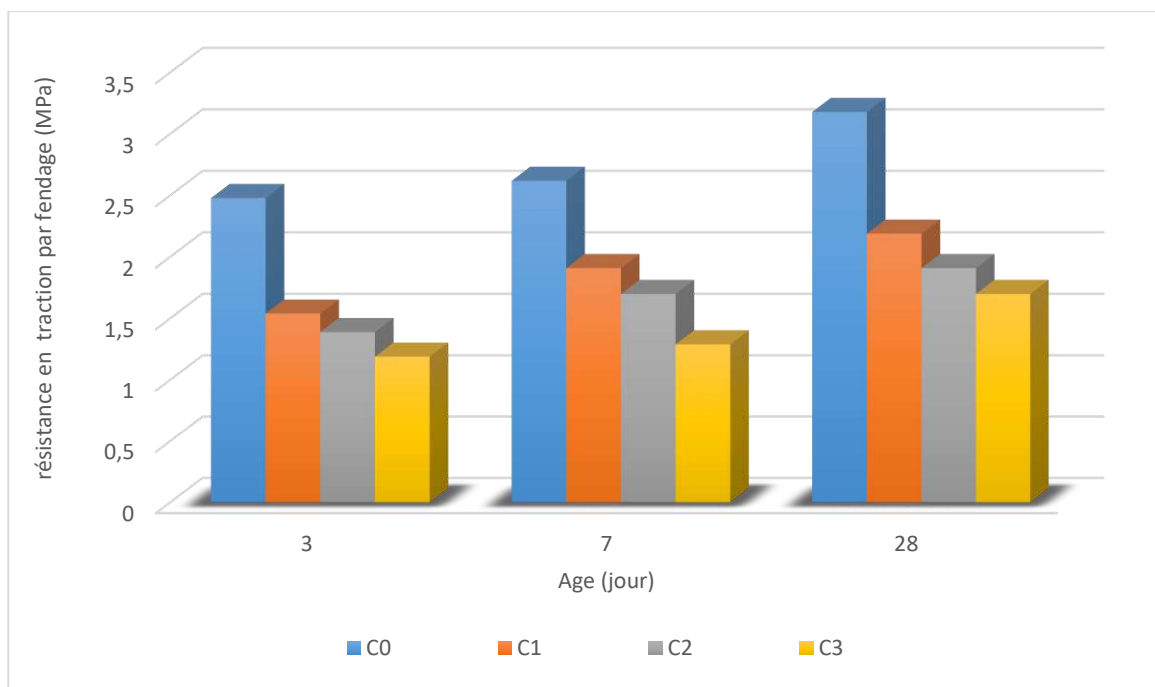


Figure V.4 : Résistance en traction par fendage pour chaque type de béton en fonction d'âge.

Le tableau V.3 présente le rapport de résistance de traction par fendage de chaque mélange par rapport le mélange témoin.

Tableau V.3: Variation de la résistance de traction par fendage à 28 jours.

Type de béton	C0	C1	C2	C3
Résistance à la traction par fendage (MPa)	3.18	2.19	1.91	1.70
Rapport de $R_{fendage}/$ témoin (%)	100	68.86	60.06	53.45

- Pour cet essai de traction par fendage, le béton ordinaire C0 donne 3,18 MPa, alors qu'il est réduit à 2.19, 1.91 et 1,70 MPa avec addition successive de 5, 10 et 15 % des poudrettes de caoutchouc. Lors des essais de résistance à la fissuration, les éprouvettes ont montré une grande capacité d'absorption de l'énergie plastique comme prévu. Alors, une réduction générale a été observée pour les résistances à la traction par fendage du béton caoutchouté. Diminution d'environ 32% de C1 (par rapport au mélange témoin) de la résistance à la traction par fendage, diminution de 40 % pour le béton C2.
- Les bétons caoutchoutés ont des capacités énergétiques plastiques plus élevées. Avec l'ajout de caoutchouc, qui est un matériau élastique, le béton commence relativement à montrer le comportement d'un composite élastique sous charge (voir photo V.7).



Photo V.7 : Courbe d'évaluation de la charge en fonction de temps (60s).

La raison de cette diminution peut être due aux paramètres suivants :

- Faible adhérence entre la poudrette et le corps granulaire lisse peut agir comme une microfissure, est une partie influente à la diminution de résistance en traction du béton incorporant des poudrettes en caoutchouc, mais il reste toujours une diminution non considérable surtout pour le béton C1. On outre, le béton à base de poudrette garde l'humidité (de conservation) qui influent négativement aussi sur la résistance (photo V.8).

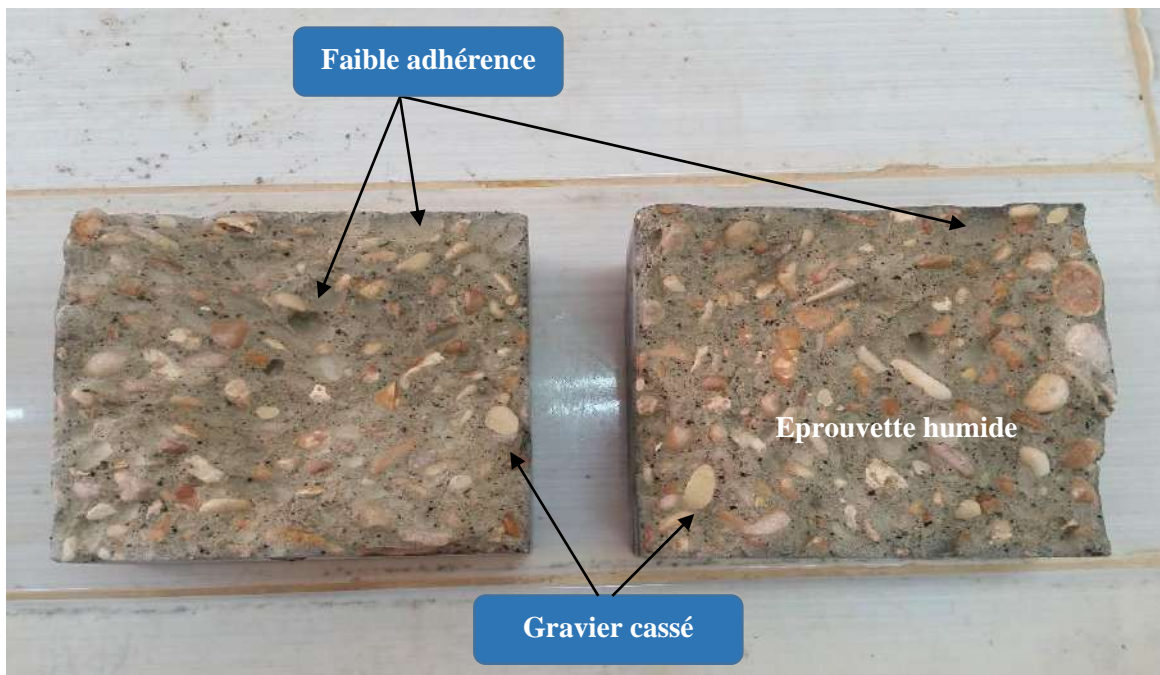


Photo V.8 : Eprouvette de fendage après l'écrasement.

- Lors de la propagation des fissures et lorsqu'elles entrent en contact avec des particules de caoutchouc, la contrainte exercée provoque une ségrégation superficielle entre le caoutchouc et la pâte de ciment. Donc, une autre variable qui peut affecter le comportement du béton est en fait la principale zone de ségrégation lorsque la résistance à la traction est exercée sur les limites des gros grains et de la pâte de ciment, ce qui affaiblit à son tour la zone d'interface produite.

V.3.4. Essai de résistance à la traction par flexion à 4 points :

Pour chaque composition, six éprouvettes ont été testées. Les résultats concernant ce paramètre sont présentés dans la figure V.5.



Photo V.9 : Eprouvette avant l'essai de flexion + le dispositif de flexion.

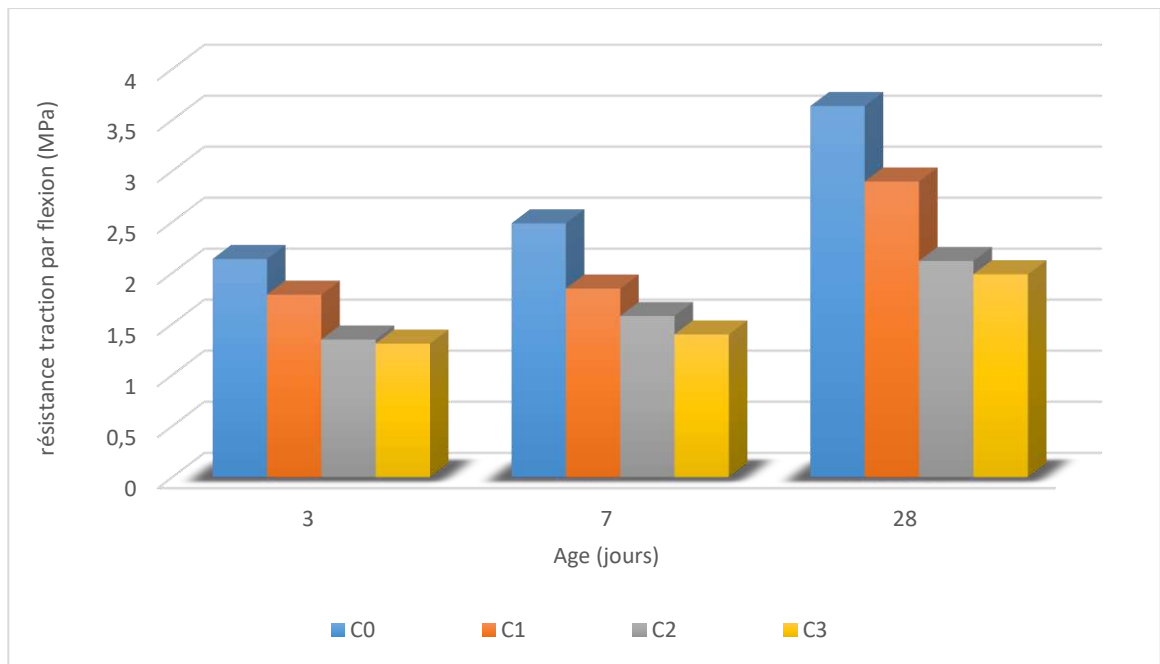


Figure V.5 : Résistance en traction par flexion pour chaque type de béton en fonction d'âge.

Tableau V.4: Variation de la résistance de traction par flexion à 28 jours.

Type de béton	C0	C1	C2	C3
Résistance de traction par flexion (MPa)	3.64	2.90	2.12	1.99
Rapport de $R_{flexion}$/ témoin (%)	100	79.67	58.24	54.67

▪ Les résultats de la résistance à la flexion de tous les mélanges de béton désignés sont présentés à la figure V.5. Cette figure montre que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc d'une manière similaire à celle observée dans la résistance à la compression et la traction. Toutefois, on a remarqué que le taux initial de réduction de la résistance était plus bas que celui de la résistance à la compression. Celui varie de 3.64 MPa (pour le béton ordinaire) à 1.99 MPa pour la composition de 15% de caoutchouc.

▪ La diminution de résistance de flexion est due à la faible liaison entre la matrice de béton et le gravier roulé d'une part, et les particules de caoutchouc d'une autre part. Lors de l'analyse visuelle des échantillons défailants, il a été observé que les particules de caoutchouc pouvaient être enlevées de la pâte de ciment par les doigts. De plus, des observations visuelles pendant les essais ont indiqué que les échantillons des mélanges caoutchoutés présentaient des déformations avant rupture beaucoup plus élevées que les échantillons du mélange témoin.

▪ Selon un principe général de flexion, les contraintes de flexion exercées sur le béton produisent une contrainte de traction d'un côté de l'axe neutre et une contrainte de compression de l'autre, de sorte qu'en combinant les forces de traction et de compression couplées, elles peuvent neutraliser le moment de compression. La rupture s'est amorcée dans la fibre extrême de la zone

de tension des éprouvettes de poutre dans laquelle les fissures se sont propagées dans le béton jusqu'à ce qu'elles atteignent la poudrette de caoutchouc. Lorsque les fissures ont atteint les particules de caoutchouc et, en raison de leurs propriétés élastiques et de leur faible module d'élasticité, les particules de caoutchouc ont prolongé et soutenu une partie de la charge appliquée, ce qui a entraîné une augmentation de la surface de la rupture.

- Le béton modifié par le caoutchouc peut subir une déformation en traction beaucoup plus élevée avant rupture que le béton témoin. Le caoutchouc joue un rôle important à cet égard. Lorsque des fissures apparaissent, en raison du dépassement de la capacité de déformation de la couche la plus externe, elles se propagent dans le sens vertical. Lorsqu'une fissure atteignait les particules de caoutchouc, en raison des propriétés élastiques et du faible module d'élasticité du caoutchouc, les particules de caoutchouc s'allongeaient, tout en portant une partie de la charge, jusqu'à ce que la liaison entre le caoutchouc et la pâte de ciment soit rompue.

V.3.5. Mesure de retrait :

Ces essais ont pour but de mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur d'éprouvettes prismatiques de béton de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³, conservées après démoulage dans une ambiance contrôlée (humidité relative : $25\% \pm 5\%$, température : $24 \pm 1^\circ\text{C}$). Les éprouvettes sont munies de plots à leurs extrémités, afin d'assurer le contact avec les palpeurs de l'appareil de mesure (rétractomètre).

Les résultats d'essai de retrait sont récapitulés dans la figure V.6 suivante :

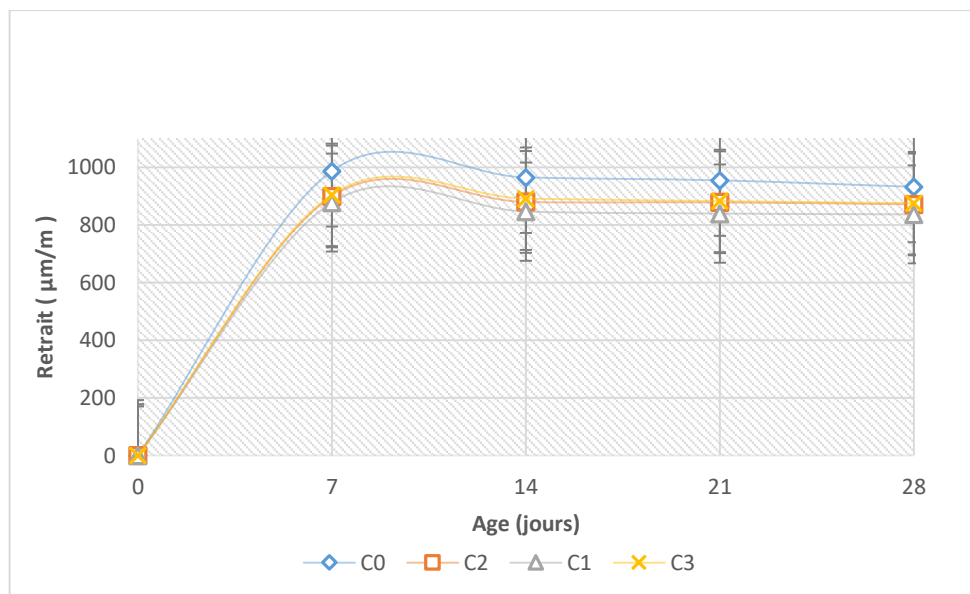


Figure V.6 : Variations dimensionnelles de retrait en fonction du temps.

- La figure V.6 représente successivement la variation de retrait des différents bétons en fonction de l'âge de béton. On remarque le béton à base gravier roulé provoque un retrait moins

que les matériaux concassé (Sandra Bonnet et al. 2004, Boukellouda A., 2010), à cause de son rapport volume/surface, qu'est plus élevé pour le béton de gravier roulé alors un retrait faible. Aussi que le gravier roulé plus dur que le gravier concassé.

- Dans ce travail, les résultats obtenus indiquent que la plus importante baisse du retrait des bétons est obtenue avec le mélange C1. Cela peut être expliqué par l'importance de ce dosage de poudrette, qui permet d'augmenter la capacité de déformation avant localisation de la fissuration, augmentant ainsi leurs adhérences ou bien autrement leurs forces à l'arrachement, pour enfin participer à faire stopper la propagation des microfissures.

- Il est bien connu que le module de déformation des granulats a une influence sur les variations dimensionnelles de retrait et, logiquement, les courbes obtenues montrent que le retrait total augmente en fonction du taux d'incorporation de granulats en caoutchouc. D'autres auteurs (Iker Bekir 2007, Ho Cuong 2010, Sandra Bonnet et al. 2004) ont mis en évidence cet effet des fibres, et ces remarques coïncidant avec les données et les résultats de cette recherche.

- Même si le retrait est un phénomène qui demeure complexe, il est largement admis qu'une partie prépondérante du retrait est liée à des échanges d'eau avec l'extérieur. Dans le cas des bétons incorporant des poudrettes de caoutchouc, La nature déformable des caoutchoucs est donc la cause première de l'augmentation des variations dimensionnelles de retrait.

- Néanmoins, ce surplus de retrait ne signifie pas forcément une plus grande sensibilité à la fissuration de retrait. En effet, la capacité de déformation des bétons incorporant des poudrettes de caoutchouc est susceptible de contrebalancer et de compenser les effets du retrait.

Quant aux résultats du suivi de masse, ils sont illustrés par les courbes de la figure V.7 .

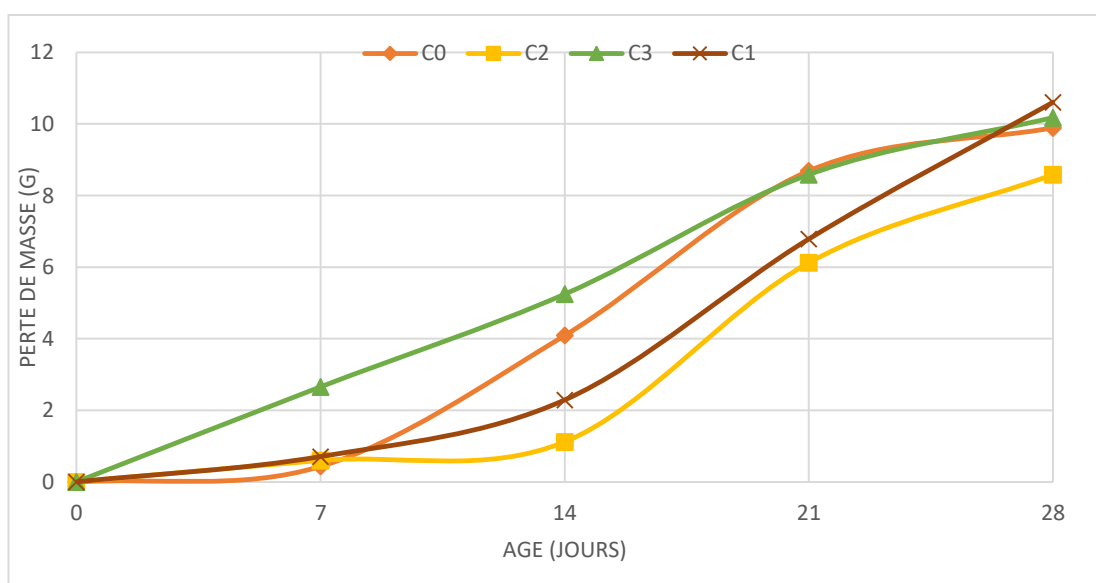


Figure V.7 : Perte de masse en fonction du temps.

▪ D'après la figure V.7 représentant la perte en poids en fonction d'âge. On remarque d'après les résultats trouvés, que la perte en poids de C1 est la plus importante par rapport aux autres bétons. On observe aussi, que les résultats de C2 est moins importante par rapports aux différents mélanges, mais il reste un résultat un peu déraisonnable, peut-être dû au peu de temps d'essai ; pour cela, l'essai de mesure de retrait doit se poursuivre avec plus de temps. on distingue aussi, que dans ce palier d'âge, il y a une augmentation de la perte en poids.

▪ On distingue que la perte en poids est plus importante pour les bétons modifiés par des poudrettes de caoutchouc (C1 et C3) par rapport aux bétons témoins (C0). Ces résultats concordent avec ceux rapportés par Bellefrag A. (2016) et Cuong H. (2010).

V.3.6. Essai ultrasonique:

Le graphe ci-dessus (figure V.8) montre la variation de la vitesse du son en fonction de la teneur en poudrettes de caoutchouc à différents pourcentages.

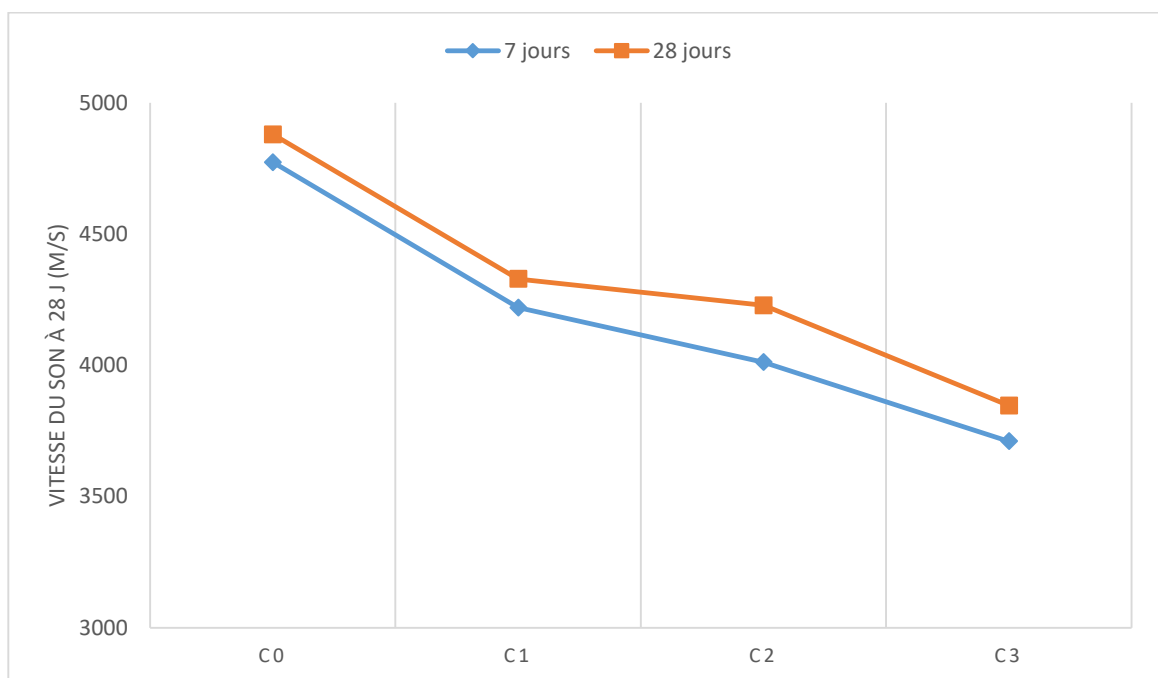


Figure V.8: Variation de la vitesse du son à 7 et 28 jours.

▪ La vitesse de propagation du son dans les bétons est un indice que définit le taux de vide dans la matrice, ce dernier influe, directement, sur :

- la compacité ;
- la résistance à la compression ;
- l'isolation thermique.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que :

- L'évolution de cette vitesse donne une idée sur le degré de compacité du béton ainsi que sur l'état des fissures.

- La figure V.8 montre la variation de vitesse du son en fonction des différents types de béton dans les différentes compositions à 7 et 28 jours. On peut constater une diminution de la vitesse de propagation de son en fonction de l'augmentation du pourcentage de substitution de poudrette dans les différentes compositions à 28 jours.

- On peut noter que, la vitesse de son du béton témoin est excellente (≈ 4662.6 m/s) (Selon Soshiroda et Voraputhaporn (2006)) $V \geq 4572$ m/s excellente) que le béton à base de gravier concassé. Et d'un autre côté, le béton témoin par rapport au béton modifié à des taux de substitution en poudrette entraîne une diminution de la vitesse du son mais reste toujours acceptables (3846.4 m/s) est un bon béton ($3658 \text{ m/s} \leq V < 4572 \text{ m/s}$ bonne). Ces remarques coïncident avec les données bibliographiques.

- La vitesse du son de béton augmente avec l'augmentation de l'âge du béton, mais diminue avec l'augmentation de la poudrette de caoutchouc dans les mélanges.

- Le phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans la matrice. Les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la pâte de ciment. Ce qui augmente le temps de propagation de l'onde ultrasonore et réduit ainsi sa vitesse de propagation. Ces résultats montrent que le composite à base de caoutchouc présente des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations. Ce résultat coïncide avec celle de Benazzouk A et al. (2004).

- D'après Munzer H. (1994) on peut aussi estimer le module d'élasticité dynamique et statique d'après les résultats d'ultrasonique selon les formules déterminées par lui:

$$Ed = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \gamma V^2 \dots\dots\dots(1)$$

Où :

ν : Coefficient de poisson (= 0.2) ;

γ : Masse volumique du béton (expérimentale) ;

V : vitesse du son (Km/s) ;

On peut aussi déterminer le module d'élasticité statique selon BAEL91 :

$$Ec = 3700 \sqrt[3]{Rc} \dots\dots\dots(2)$$

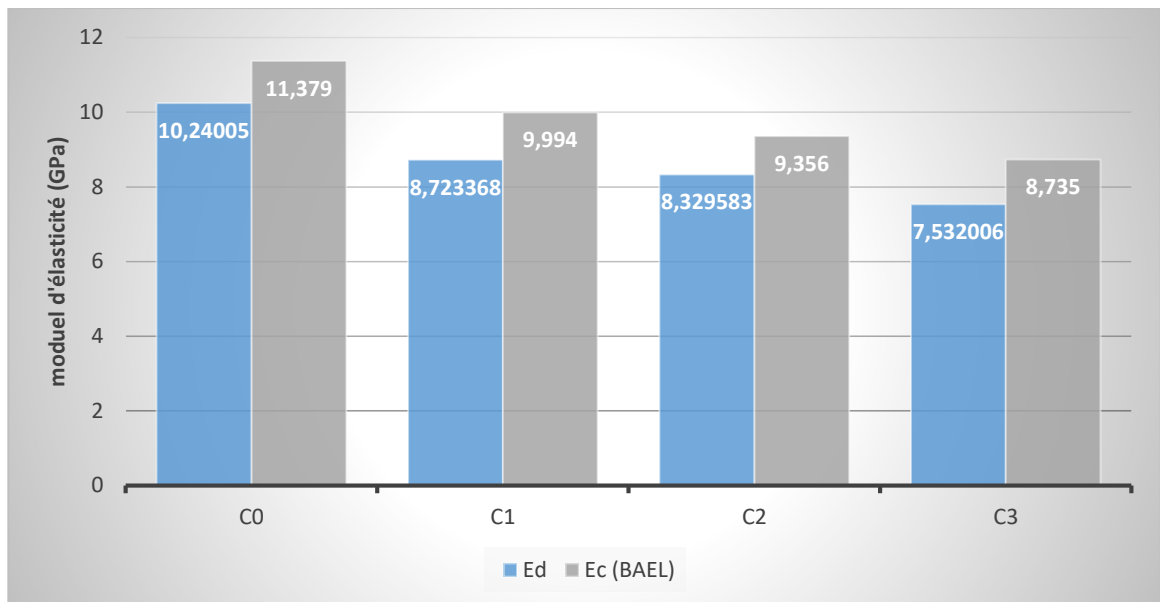


Figure V.9 : comparaison de différentes valeurs de module d'élasticité.

▪ Les résultats, donnés par la figure **V.9**, montrent que l'ajout de particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire, réduit le module d'élasticité dynamique de 10 à 7.5 GPa, pour une teneur en caoutchouc allant de 0 (béton de référence) à 15%. Cette diminution est due à la nature du caoutchouc qui absorbe les ondes ultrasonores, et sont identiques avec les résultats de (Ho. Cuong, 2010).



Photo V.10: Epreuve de béton à différentes teneurs en poudre de caoutchouc.

V.4. CONCLUSION

L'étude de l'ensemble des résultats concernant les caractéristiques physiques, mécaniques et rhéologique des bétons à base de gravier roulé et modifié par la poudre de caoutchouc, nous a permis de dégager l'essentiel de ce qu'on peut retenir comme résultats de ce chapitre :

- La consommation d'eau de gâchage dépend de l'état de surface et la géométrie des grains des granulats. Aussi, la taille maximale des granulats influe sur l'ouvrabilité.
- Les pertes en masse volumique sont généralement plus importantes pour les bétons modifiés par le caoutchouc comparées à celles du béton témoin, c'est un facteur important qui influe sur l'aspect économique et condition de mise en œuvre.
- Les résultats présentés dans ce chapitre montrent que l'incorporation de poudrette de caoutchouc est nuisible vis-à-vis des résistances en traction, en compression et du module d'élasticité ; Plus le taux de substitution en poudrette de caoutchouc est élevé plus les valeurs des propriétés ci-dessus diminuent.
- Pour le gravier roulé, on remarque une amélioration de la résistance (compression, traction). La variation dimensionnelle de retrait de béton à base de gravier roulé est moins élevée que le gravier concassé (Hachani et al., 2017)
- Les résultats de cette recherche avec d'autres (Ganjian a. et al. 2009, Khatib K. et al. 1999, Baoshan H. et al., 2004, İlker Bekir et al., 2004, Erhan G. et al. 2014) révèlent que l'ajout de 5% de caoutchouc n'aurait pas d'impact négatif notable sur la résistance du béton.
- On peut constater que, bien que le béton caoutchouté ait une capacité moindre de supporter à la fois des charges de compression et de flexion, il a toujours une capacité de charge acceptable, surtout si les particules de caoutchoucs sont enduites dans la matrice de béton.
- La réduction de la résistance à la compression était significativement plus élevée que celle de la résistance à la flexion et la traction. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des poudrettes de caoutchouc a une plus grande résistance à la fissuration de retrait que les cimentaire dits traditionnels et que, par rapport à un simple renfort par le caoutchouc, l'association des granulats en caoutchouc et des fibres s'avère être une alternative prometteuse.
- La perte en poids est plus importante pour les bétons modifiés par des poudrettes de caoutchouc comparativement aux bétons témoins.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Le présent travail a pour but de valoriser et d'exploiter les granulas roulés et les intégrant dans la masse du béton modifié pour améliorer des performances mécaniques et rhéologique de ces bétons, et modifié par la poudrette de caoutchouc. Pour atteindre cet objectif, nous avons envisagé l'incorporation dans le béton de quantités de poudrette de caoutchouc suivant des pourcentages de substitutions différentes.

Tout en menant une recherche basée conjointement sur une synthèse bibliographique et un travail expérimental.

Concernant la recherche bibliographique, nous l'avons subdivisée en trois chapitres:

- Dans le premier chapitre, on présente un aperçu général sur les polymères, à savoir, leurs différentes classes, leurs structures et leurs domaines d'applications, et les caoutchoucs quelque soit la définition, l'origine, les propriétés,...
- Dans le deuxième chapitre, on a rappel sur les agrégats en général et les granulats roulés en particulier.
- Dans le 3ème chapitre, on présente les propriétés essentielles du béton hydraulique et les bétons renforcés par des différentes fibres, afin d'avoir les arguments de comparaison. A cet effet, et selon les documents élaborés dans ce sens, nous avons trouvé que ces propriétés doivent être présentes dans tout béton ayant le même rôle que le béton ordinaire, à savoir la résistance, l'ouvrabilité, l'élasticité, l'étanchéité, le retrait et la vitesse de vide.

En deuxième partie, travail expérimental, nous l'avons subdivisée aussi en trois chapitres :

- On a étudié les caractéristiques des granulats et leur influence sur les propriétés essentielles du béton, on note à cet égard, que plusieurs ouvrages (livres) qui traitent le rôle des caractéristiques des granulats dans la composition des bétons.
- Le chapitre deux contient les essais de convenance des matériaux utilisés pour l'identification de ces derniers afin de connaître les caractéristiques des différents composants des bétons étudiés. Les essais réalisés sont ceux recommandés par les normes en vigueur, à savoir, la granulométrie, mesure des masses volumiques, mesure de module de finesse, mesure de propreté, essai de dureté Los Angeles et micro deval, et les analyse chimiques.

Les essais ont montré que :

- Le sable de construction de la carrière Zarzaitine/ Illizi, utilisé c'est un sable a des caractéristiques normalisés d'origine siliceux, de couleur blanchâtre, à granulométrie étalée et un module de finesse préférentiel.
- Pour les deux classes de gravier utilisées, elles sont d'origine calcaire provenant de la carrière d'Oued N' ssa, de couleur brunâtre avec des grains poreux affectant sur le taux d'absorption d'eau de ce gravier.
- L'eau de gâchage est celle du robinet de laboratoire des travaux public du sud de faible salinité.
- La poudrette de caoutchouc utilisée est celle en provenance de la société SAEL d'Oued Smar à Alger, qu'est spécialisée dans la transformation du caoutchouc par recyclage.
- Nous avons choisi, comme ajout, la poudrette de caoutchouc d'Origine des déchets de semelles de chaussures et tapies voitures dont la composition principale est l'EVA, de masse volumique faible (environ 0.6g/cm^3) et qui ont un taux d'absorption d'eau nul.

L'étude expérimentale des différents types de bétons obtenus, est indiquée dans le 4ème et 5ème chapitre, cette étude a été élaborée en deux étapes.

En première étape, on a confectionné les différents bétons d'après la méthode de «Dreux - Gorisse» et selon les différents pourcentages de poudrette qui seraient : 0 %, 5 %, 10 % et 15 %. Ces pourcentages sont sélectionnés en conformité avec les recherches similaire.

La deuxième étape, c'est la réalisation des essais de reconnaissance pour la détermination les propriétés mécaniques et physico-chimiques des différents bétons étudiés.

D'après les résultats trouvés nous ressortons les remarques suivantes :

- ✚ La consommation d'eau de gâchage dépend de l'état de surface et la géométrie des grains des granulats.
- ✚ travailler avec une ouvrabilité constante pour faciliter la comparaison.
- ✚ Les pertes en masse sont généralement plus grandes pour les bétons modifiés par le caoutchouc comparées à celles du béton témoin, c'est un facteur plus important qui influant sur coté économique et la mise en œuvre.
- ✚ Les travaux présentés concernent la faisabilité d'un nouveau composite cimentaire, à base de particules de caoutchouc. L'examen du comportement physique a montré un allègement de la masse volumique allant jusqu'à 8%.

✚ La résistance à la compression du béton témoin C0 de 28 jours a été déterminée à 29.09 MPa. De plus, elle a été réduite à 19.71, 16.17 et 13.16 MPa avec l'addition de 5, 10 et 15% de la poudrette de caoutchouc.

✚ Il existe une relation inverse linéaire entre la résistance et l'ajout de la poudrette de caoutchouc.

✚ Pour l'essai de traction par fendage, le béton normal C0 donne 3,18 MPa, alors qu'il est diminué à 2.19, 1.91 et 1,70 MPa avec les poudrettes de caoutchouc pour l'addition successive des rapports 5, 10 et 15 %.

✚ Lors des essais de résistance à la traction par fendage, les éprouvettes ont montré une grande capacité d'absorption de l'énergie plastique comme prévu.

✚ L'augmentation des pourcentages de poudrette dans le béton provoque une chute non considérable pour la résistance de traction par fendage et traction par flexion.

✚ Malgré une baisse significative de la résistance à la compression, les valeurs de mélange C1 restent compatibles avec l'utilisation du composite dans le domaine des bétons légers de construction. Par ailleurs, la baisse de la résistance à la flexion est moins importante que celle à la compression.

✚ De plus, les mesures du module d'élasticité dynamique ont mis en évidence des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations de ce composite. Les résultats ont également montré que l'ajout de particules de caoutchouc, permettait de réduire les variations dimensionnelles du matériau. La limitation de ces variations dimensionnelles est une caractéristique importante pour la durabilité des matériaux, notamment le contact accidentel avec l'eau qui génère des contraintes pouvant conduire à la fissuration.

Avec cette nouvelle propriété, il est prévu que ces bétons puissent être utilisés dans des applications architecturales telles que le clouage du béton, dans les constructions routières où une résistance élevée n'est pas nécessaire, dans les panneaux muraux qui nécessitent un faible poids unitaire, dans les éléments de construction et les barrières, qui sont soumis à des chocs, dans les barrières acoustiques comme amortisseurs de bruit et dans les voies ferrées pour fixer les rails au sol.

De telles propriétés permettent l'utilisation de ce matériau dans les entrées de garage, les trottoirs ou les constructions routières où les exigences de résistance sont relativement faibles. Une application réussie du matériel dans ces domaines serait très prometteuse. Toutefois, des recherches plus approfondies sont nécessaires avant son application pratique.

Il serait souhaitable d'étendre les investigations aux bétons et de valider les conditions permettant d'améliorer la déformabilité avec des granulats de plus grande dimension. Dans tous les cas, il est

nécessaire de compléter ce travail par des investigations sur les valeurs optimales et sur les valeurs « seuil » du dosage en granulats en caoutchouc. Par ailleurs, les propriétés du caoutchouc incitent facilement à prêter d'autres vertus au composite incorporant des granulats en caoutchouc : des études devront mettre en évidence le potentiel du composite en terme de propriétés thermiques et acoustiques. Des applications anti-vibratiles peuvent aussi être envisagées, mais cette hypothèse reste à valider.

D'après les résultats obtenus par cette recherche, et en vue d'une future utilisation rationnelle de ces matériaux, nous recommandons de compléter cette recherche par les axes suivants :

- L'étude de l'évolution de retrait de ce béton à long terme plus de 4 mois pour trouver des résultats plus représentatifs de la réalité.
- Une autre étude avec une substitution des granulats caoutchouc ($\varnothing > 4\text{mm}$) au lieu des poudrettes (influence de la granularité).
- Si elle est confirmée, la capacité du composite incorporant des granulats en caoutchouc pour amortir une vibration mécanique peut représenter un intérêt dans plusieurs applications et mérite donc d'être étudiée.
- Enfin, il est nécessaire de signaler la problématique de l'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire qui est quasi inexistante et qui reste toujours en débat s'agissant de son intérêt et surtout des moyens pour la promouvoir.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-A-

1. Abdullahi M., 2012. Effect of aggregate type on compressive strength of concrete. International Journal of Civil and Structural Engineering, volume 2, no 3, 2012 .
2. ACI Committee 213: Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete
3. Ait Idir A., 2017. Valorisation énergétique des pneumatiques usagés non réutilisables. ERA 2017, Centre des conventions d'Oran.
4. Aliapur, collecte et recyclage de vos pneus. www.aliapur.com, consulté le 25-09-2018.
5. Al-Nasra M. , Torbica Z., 2013. Concrete Made for Energy Conservation Using Recycled Rubber Aggregates. International Journal of Engineering Science Invention ISSN (Online): 2319 – 6734, ISSN (Print): 2319 – 6726
6. Atomer : <http://www.atomer.fr/1/lac1.html>, consulté le 05-09-2018.

-B-

7. Baoshan H., Guoqiang Li.; Su-Seng P.; John E., 2004. Investigation into Waste Tire Rubber-Filled Concrete. ASCE, 0899-1561.
8. Baron J. et Olliver J., 1996. La Durabilité des bétons, Presses de l'Ecole National des Ponts et Chaussées, Paris.
9. Bazzine R., 2013. Influence de l'ajout de la poudrette de caoutchouc sur la stabilité des enrobés bitumineux. Mémoire de magister, université Kasdi Merbah – Ouargla.
10. Beaudoin, J.J., 1982. Béton renforcé de fibres. Institut de recherche en construction (IRC). Conseil National de Recherche, Canada.
11. Belferag A., 2016. contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes. Thèse de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra.
12. Benazzouk A., Douzane O., Langlet T., Mezreb K. , Labbani F., Roucoult J., 2013. Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment. Université de Picardie Jules Verne.
13. Benazzouk A., Douzane O., Queneudec M., 2004. Transport of fluids in cement–rubber composites. Cement & Concrete Composites 26 21–29.
14. Benazzouk A., Mezreb K., Doyen G., Goullieux A., Queneudec M., 2002. Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement–rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates. Cement & Concrete Composites 25 711–720.
15. Bensaid M. O., 2015. Étude Des Polymères Par Dynamiques Moléculaire. Thèse de doctorat, Université d'Oran des Sciences et de La Technologie Mohamed Boudiaf.
16. Berredjem L., 2009. Le recyclage des bétons démolition, solution pour le développement durable, formulation et comportement physique et mécanique des bétons à base de ces recycle. mémoire de magister, université Badji Mokhtar – Annaba.
17. Bonnet S., 2003. Matériaux cimentaires a haut déformabilité par incorporation de granulats issus du broyage de pneus usagés. Thèse de doctorat - Université de Toulouse III.
18. Bonnet S., Turatsinze A., Granju J.-L., 2004. Un composite cimentaire résistant à la fissuration : synergie « granulats en caoutchouc–renfort par des fibres ». Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 250-251 réf. 4504.
19. Bouaka W., Boucherba M., 2013. Caractérisation Géotechnique des Matériaux de la Région de Ouargla. Mémoire Master, université Kasdi Merbah Ouargla.

20. Boudaoud Z., Beddar M., 2012. Effects of Recycled Tires Rubber Aggregates on the Characteristics of Cement Concrete. *Journal of Civil Engineering*, 2012, 2, 193-197.
21. Boufedah Badissi A., 2011. Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaire. Mémoire de magister, université Mentouri - Constantine.
22. Boukellouda A., 2010. Comparaison des caractéristiques mécaniques et retrait du béton en utilisant les différentes méthodes de compositions de béton. Mémoire de magister, Université A.MIRA Béjaia.
23. Boukli H., 2009. « Contribution à L'étude De La Resistance Caractéristique Des Bétons De La Région De Tlemcen », thèse de doctorat, Université de Tlemcen.
24. Bruce Roy T. V., Ndlangamandla S., 2016. The effect of aggregate size on the compressive strength of concrete. *Journal of Agricultural Science and Engineering* vol. 2, no. 6, 2016.
25. Butaud P., 2015. Contribution à l'utilisation des polymères à mémoire de forme pour les structures à amortissement contrôlé. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France.

-C-

26. CALNESIS [site CALNESIS 2018] , cosulté le: 29-05-2018.
27. Chia Kok Seng, 2006. Workability and stability of lightweight aggregate concrete from rheology perspective. These of Doctorat, University Of Singapore.
28. CIMBÉTON :Fiche Technique. Tom II, Janvier 2013: (les bétons : formulation fabrication et mise en œuvre).
29. CONCRETTEST: L'analyse intégrale du béton. 35 questions pour répondre aux interrogations sur les ciments et les bétons.
30. CNPD.fr. Synthèses des Matériaux polymères: PARTIE THÉORIQUE. RNSLT/polymère.
31. Contexte normatif des bétons : Mise en œuvre et réalisation : Amprincipe Paris (édition septembre 2005).
32. Cuong M. HOo ANH, 2010. Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : application aux éléments de grande surface. Thèse de doctorat, université de Toulouse.

-D-

33. Dali-Youcef B., 2009. Caractérisation de différents réseaux de polymères en présence de solvants isotropes et anisotropes. Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
34. Degussa: La Technologie du Béton. GUF\Formation\Béton\Techno-béton. V05_01.
35. Doublier G., Sorgho O., 2009. Valorisation des déchets de sachets plastiques Utilisation comme liant dans la fabrication de matériaux composites : Application dans les villes subsahariennes. Conférence internationale sur la valorisation des déchets et de la biomasse dans les pays en développement.
36. Dreux G., Festa J., (1998). " Nouveau guide du béton et de ses constituants", 8ème édition, Edition Eyrolles.

37. Dupain, R., Lanchon, R., Saint Arroman, J.C., 2000. Granulats, sols, ciments et bétons - caractérisation des matériaux de génie civil par les essais laboratoire, 2nd ed. Casteilla, Paris.
38. Duplan F., 2014. Composites Cimentaires à Module d'Élasticité Contrôlé : conception, caractérisation et modélisation micromécanique. Thèse de doctorat, l'université Toulouse, France.
39. Duranel L., 2011. Les plastiques: défis et opportunités. Colloque « Activités Humaines et Pollutions » Développement Polyoléfines - Europe Total Petrochemicals.

-E-

40. EN 12620+a1, 2008. Granulats pour béton.
41. EN 197-1 , 2011: Ciment – Partie 1: Composition, spécification et critères de conformité des ciment courants.

-F-

42. FD P 15-010, octobre 1997. Liants hydrauliques guide d'utilisation des ciments.
43. Fiche technique ; Matine ciment béton exigeant CEMII/B-L 42.5N / NA 230 ; NA234.
44. Fiche technique ; Matine ciment béton exigeant CEMII/B-L 42.5N / NA 5042.
45. Fontanille M., Gnanou Y., 2014. Chimie et physico-chimie des polymères, Sciences Sup, Dunod.

-G-

46. Gabrysiak F., 2013. Matériaux- les granulats –chapitre 2. Pdf
47. Gadri K., Guettala A., 2015. Etude du comportement physico-mécanique des bétons de sable à base de déchets de polissage de carrelage. Université de Biskra.
48. Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A., 2009. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. Construction and Building Materials 23 1828–1836.
49. Gargouri A., Ellouze S., Makni M., 2011. Amélioration des caractéristiques mécaniques d'un béton de caoutchouc. Innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction, Sfax, Tunisie.
50. Garros M., 2007. Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
51. Ghebichi R., Hachani B., Bouaka W., 2018. Influence des conditions climatiques de la région d'Ouargla (période hiver-été) sur des bétons à base du sable roulé et sable concassé. Université Kasdi Merbah – Ouargla.
52. Ghernouti y. et Rabehi B., 2011. Béton à base des granulats de déchets des sacs en plastique renforcé de fibres métalliques. Séminaire International, Innovation & Valorisation En Genie Civil & Materiaux De Construction, Rabat – Maroc.
53. Ghomari F.; Méthode de composition du béton : <https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/Methodes-de-composition-du-beton.pdf>, consulté le 18/04/2018.
54. Glaoui B., 2014. Contribution à la Caractérisation des liants bitumineux par l'analyse vibratoire effet des cycles de fatigue thermiques sur les liants bitumineux. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.

55. Gorisse, F., 1978. Essai et contrôle des bétons. Edition Eyrolles, Paris,
56. Guide de béton: <http://www.guidebeton.com>, consulté le: 15-10-2018.
57. Guidoum A., 2012. Les polymères et composites, site : https://lmc.epfl.ch/wp-content/uploads/2018/06/POLYMERES_EBC.pdf. Consulté le : 16-6-2019.
58. Güneyisi E., Gesoğlu M. , Mermerdaş K., İpek S., 2014. Experimental investigation on durability performance of rubberized concrete. Concrete Construction, Vol. 2, No. 3.

-H-

59. Hachani I., Kriker A., Seghiri M., 2017. Experimental study and comparison between the use of natural and artificial coarse aggregate in concrete mixture. Energy Procedia, Volume 119, pages 182-191.
60. Hafid H., 2012. Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles. Thèse de doctorat, université Paris-Est
61. Hamri S., 2013. Etude thermophysique de la diffusion de molécules de bas poids moléculaire dans des réseaux de polymères acryliques. Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
62. Hani A., Bouaka W., 2016. Comportement d'un Béton Hydraulique À Base De Gravier Roulé. Mémoire de Master, l'université Kasdi Merbah Ouargla.
63. Hermida G., 2008. Influence du volume de pâte et de la concentration en ciment sur la performance du béton : vers le développement d'un béton a contenu minimal en pâte. Thèse de doctorat, L'école Normale Supérieure de Cachan.
64. Hernandez-Olivares F., Barluenga G., 2003. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. Cement and Concrete Research 34 (109– 117).
65. Holcim (SUISSE) SA, 2015. Nouveau guide d'utilisation de béton, 6ème édition.
66. Huang B. , Li G. ,Pang S., Eggers J., 2004. Investigation into Waste Tire Rubber-Filled Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561.

-I-

67. Iker B., 1995. The Properties of Rubberized Concretes. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 2, pp. 304-310, Elsevier Science Ltd.
68. Ilker B., Şengel H., 2004. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. Cement and Concrete Research 34(8):1307-1312.
69. İlker Topçu B., Demir A., 2007. Durability of Rubberized Mortar and Concrete. Journal of materials in civil engineering ASCE.
70. Imran K. MD., Mushtaq A., Rifath S., H.M.A. Mahzuz, 2010. Comparative study on compressive strength of medium grade cement concrete using various types of coarse aggregates. World Applied Sciences Journal 8: 206-209, ISSN 1818-4952.
71. ISO 11464, 2006. Qualité du sol – prétraitement des échantillons pour analyses physico-chimiques.
72. ISO 2781, rubber, vulcanized or thermoplastic — determination of density.

-J-

73. Jiong HU, 2006. A study of effects of aggregate on concrete rheology. These de doctorat, Iowa State University.

-K-

74. Kausch HH, N Heymans, CJ Plummer, P Decroly, 2001. Matériaux polymères: propriétés mécaniques et physiques. Presses polytechniques et universitaires Romandes.
75. Kebaili N., 2017. Valorisation de la poudrette de caoutchouc en domaine routier -asphalte caoutchouc-. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Des Travaux Publics, Kouba/Alger.
76. Kriker, A., 2005. Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climats chaud et sec. Thèse de doctorat d'état, ENP, Alger.
77. Khatib Z., Fouad M. Bayomy, 1999. Rubberized Portland cement concrete. Journal of Materials in Civil Engineering 1:206-213.

-L-

78. Langer W.L., Kenpper D.H., 1995. Geologic characterization of natural aggregate (la field geologist's guide to natural aggregate resource assessment). U.S. Geologic survey, Denver, CO80225.
79. LERM: <http://doc.lerm.fr/le-sable-pour-la-construction/>
80. Li Z., F Li J. S. L., 1999. Properties of concrete incorporating rubber tyre particles. Magazine of Concrete Research, 50, No. 4.
81. Loewinson-Lessing F.. Composition chimique OES roches éruptives, l'Université de Saint-Pétersbourg. Pdf.
82. Loumachi L., 2011. Effet des granulats de la région de Biskra sur les propriétés du béton et les méthodes de formulation de mélange. Thèse de doctorat, université de Biskra.
83. LRCCP - Laboratoire de Recherches et de Contrôle du Caoutchouc et des Plastiques (consulté juillet 2018).
84. Lunk P. et al. 2015. Guide pratique du béton : Concevoir et mettre en oeuvre des bétons durables, ème édition, Suisse.
85. Lusseau C., Prensier J. , 2004. Définitions structure des polymères et taux de cristallinité. ENS, université Paris Saclay.

-M-

86. Macsiniuc A., 2013. Effet de la taille des particules sur la régénération des poudrettes de caoutchouc vulcanisé. thèse de doctorat, université LAVAL-Canada.
87. MAILLOT R., 2001. "Mémento technique des Granulats", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris.
88. Makani A., 2011. Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique diffère des bétons. Thèse de doctorat, l'université de Toulouse.
89. Makhlouf N., 2010. Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibre en copeaux. Mémoire de magister, université Mouloud Mammeri-Tizi ouzou.
90. Merdas A., 2011. Cours de MDC les granulats 5, université Farhat Abbas Sétif1.

91. Mezidi O., 2008. Etude comparative des caractéristiques et du comportement d'un béton de sable de dunes et d'un béton ordinaire modifié à la poudre de caoutchouc. Mémoire de magister, Ecole National Polyethnique El Harrach, Alger.
92. Miskovsky K., Tabora Duarte M., Kou S.Q., and Lindqvist P.-A., 2004. Influence of the Mineralogical Composition and Textural Properties on the Quality of Coarse Aggregates. Journal of Materials Engineering and Performance, 144—Volume 13(2).
93. Mohamed R., 2014. Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage par l'utilisation des tests d'absorption capillaire. Thèse de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra.
94. Mohamedou I., 2013. Applications des méthodes de l'analyse thermique à l'étude du vieillissement des polymères. thèse de doctorat, Université Blaise Pascal.
95. Mushtaq A., Rifath S., Mohiuddin A. and Forhat A., 2006. Comparison of strength performance of concrete with uncrushed or crushed coarse aggregates. ARPN journal of engineering and applied sciences.

-N-

96. Neil N. Eldin, Ahmed B. Senouci, 1999. Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate. J. Mater. Civ. Eng.5:478-496.
97. NEVILLE A.M., 2000. Propriétés des bétons", traduit par le CRIB, Edition Eyrolles.
98. NF EN 1008, Juillet 2003. L'eau de gâchage.
99. NF P 18-400, 1981. Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques.
100. NF P 18-560, Septembre 1990. Analyse granulométrique.
101. NF P18-303 (NA 1966),1999. Eau de gâchage pour béton
102. Nguyen T., 2010. Durabilité des réparations à base cimentaire : analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation. l'université Toulouse III - Paul Sabatier- France.

-O-

103. Okonkwo V.O., Arinze Emmanuel E., 2015. Effects of aggregate gradation on the properties of concrete made from granite chippings. International Journal of Advancements in Research & Technology, volume 4, issue 12, ISSN 2278-7763.
104. Ollivier. J.P et Vichot A. 2008. Pour l'ATILH : La durabilité du béton- Presses de l'école des Ponts et Chaussées - Paris -.

-P-

105. Pachoukova I. et al., 2008. La formation des granulats plats et leur influence sur la résistance mécanique des agrégats des granites et gneiss du Togo. Afrique SCIENCE 04(2) (2008) 261 - 273 ISSN 1813-548X.
106. PRI : Revues professionnelles pour l'industrie du béton : <https://www.cpi-worldwide.com/fr/journals/artikel/11727>. Consulté le : 05-06-2016.
107. Pedro Nel Q., David w. Fowler, 2003. The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete. Research Report ICAR – 104-1f, the university of Texas at Austin.
108. PerkinElmer, 2014 : essai DSC. Site consulté le :03-08-2018.
109. Pinaud J. IUT Nîmes – SGM. consulté le 29-04-2019.

- 110. Poyet S., 2003. Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chimico-mécanique variable. Thèse de doctorat, université de Marne-La-Vallee.
- 111. Pratique du BAEL 91, 1999. Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites.
- 112. Programme d'appui aux PME/PMI et à la maîtrise des technologies d'information et de communication PME II, 2010. Etude d'un Projet Industriel de Fabrication d'articles en Caoutchouc pour Automobiles.

-R-

- 113. Rifath S., Mushtaq A., Mohiuddin A. And Forhat Afja L., 2006. Comparison of strength performance of concrete with uncrushed or crushed coarse aggregates. ARPN journal of Engineering and Applied Sciences vol.1, no.2, August 2006 (ISSN 1819-6608).
- 114. Rozalija K., Darwin d., 1997. Effects of aggregate type, size, and content on concrete strength and fracture energy. A report on research sponsored by the national science foundation, university of Kansas Center For Research.
- 115. Rýza P., Mehrzad Mohabbi Y., Emre S., Seracettin A., 2013. The correlation between aggregate shape and compressive strength of concrete: digital image processing approach. Int. J. Struct. & civil Engg. Res. ISSN 2319 – 6009, vol. 2, no. 3.

-S-

- 116. Saadani S. Comportement des bétons à base de granulats recyclés. mémoire de magister, université Mentouri - Constantine.
- 117. SCF : <http://www.societechimiquedefrance.fr/caoutchouc.html?lang=fr> , consulté le 05-09-2018.
- 118. Serifou M., 2013. Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation. Thèse de doctorat, l'université Bordeaux I, France.
- 119. Soshiroda K. , Voraputhaporn Y., Nozaki, 2006. Early-stage inspection of concrete quality in structures by combined nondestructive method. Materials and Structures.
- 120. STANDARD GUM: www.standard-gum.fr, consulté le 25-08-2018.
- 121. Superpave Mixture, design guide, 2001. WesTrack Forensic Team Consensus Report. Washington, DC.

-T-

- 122. Tourenq C., 2007. Granulats sables, graviers et concasses de carrières.
- 123. Toutanji H.A., 1995. The Use of Rubber Tire Particles in Concrete to Replace Mineral Aggregates. Cement & Concrete Composkes 18 (1996) 135-139.
- 124. Trung-Hieu N., 2010. Durabilité des réparations à base cimentaire : analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation. Thèse de doctorat, l'université de Toulouse.
- 125. Tutumluer E., Pan T., Carpenter S., 2005. Investigation of aggregate shape effects on hot mix performance using an image analysis approach. University Of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois.

-W-

- 126.** Weiss P., 2010. La chimie des polymers. Université Médicale Virtuelle Francophone.
127. Witier P., Platret G., et al., 1999. Analyse et caractérisation de matériaux de construction. Laboratoire central des Ponts et Chaussées, service Physico-chimie des matériaux, Paris.

-X-

- 128.** XP P 18-540, Octobre 1997. Granulats : définitions, conformité, spécifications.

-Z-

- 129.** Zeghichi L., 2006. Thesis.univ-biskra.dz/1000/8/chapitre%2006.pdf.
130. Zhang d., Huang X., Zhao Y., 2012. Investigation of the shape, size, angularity and surface texture properties of coarse aggregates. Construction and Building Materials, (2012) 330–336.

Notre ciment

L'activité principale de l'entreprise est la fabrication et la commercialisation du ciment portland composé CPJ CEM II/A 42.5.

ECDE produit à la commande d'autres types de ciments tels que : Le CPJ CEM II/A 52.5 et le CPJ CEM II/A 32.5

Présentation

Le ciment CPJ-CEM II/A 42,5 est un ciment Portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts.

Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Composition

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

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

Spécification

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

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES		CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	
Norme NA 442	Ciment ECDE	Norme NA 442	Ciment ECDE
Sulfates SO ₃ ≤ 3.5 %	SO ₃ ≤ 2.00 %	Début de prise ≥ 60 mn	Début de prise > 60 mn
Chlorures Cl ⁻ ≤ 0.1 %	Cl ⁻ ≤ 0.08 %	Stabilité à chaud ≤ 10mm	Stabilité à chaud < 7mm
		Retrait 28j ≤ 1000 µm/m	Retrait 28j < 650 µm/m

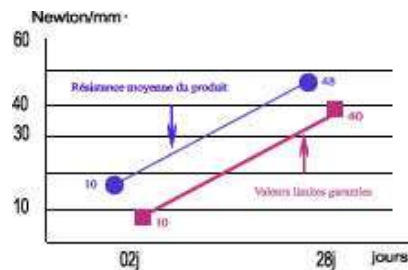
EVOLUTION DES RESISTANCES A LA COMPRESSION

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

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

Valeurs limites garanties:

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



Domaine d'utilisation

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

Précautions et recommandations pour l'emploi

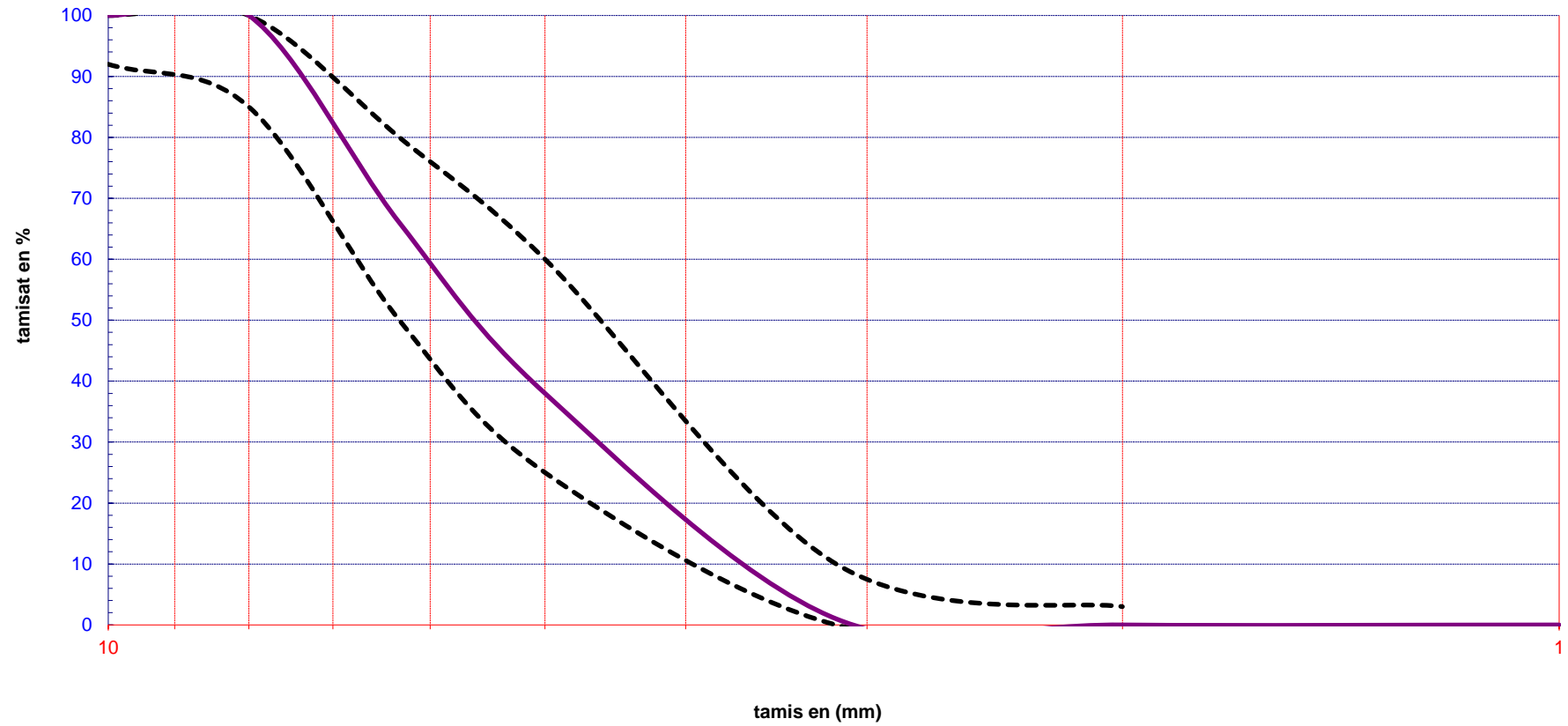
- Il est recommandé de stocker le ciment dans les endroits étanches secs pour éviter l'hydratation du produits.
- Pendant le durcissement et en saison chadue, maintenir le béton humide en l'arrosant régulièrement ou en utilisant des produits de cure afin d'éviter la dessiccation des parties superficielles.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



Aperçu d'un sac de ciment (50 Kg)



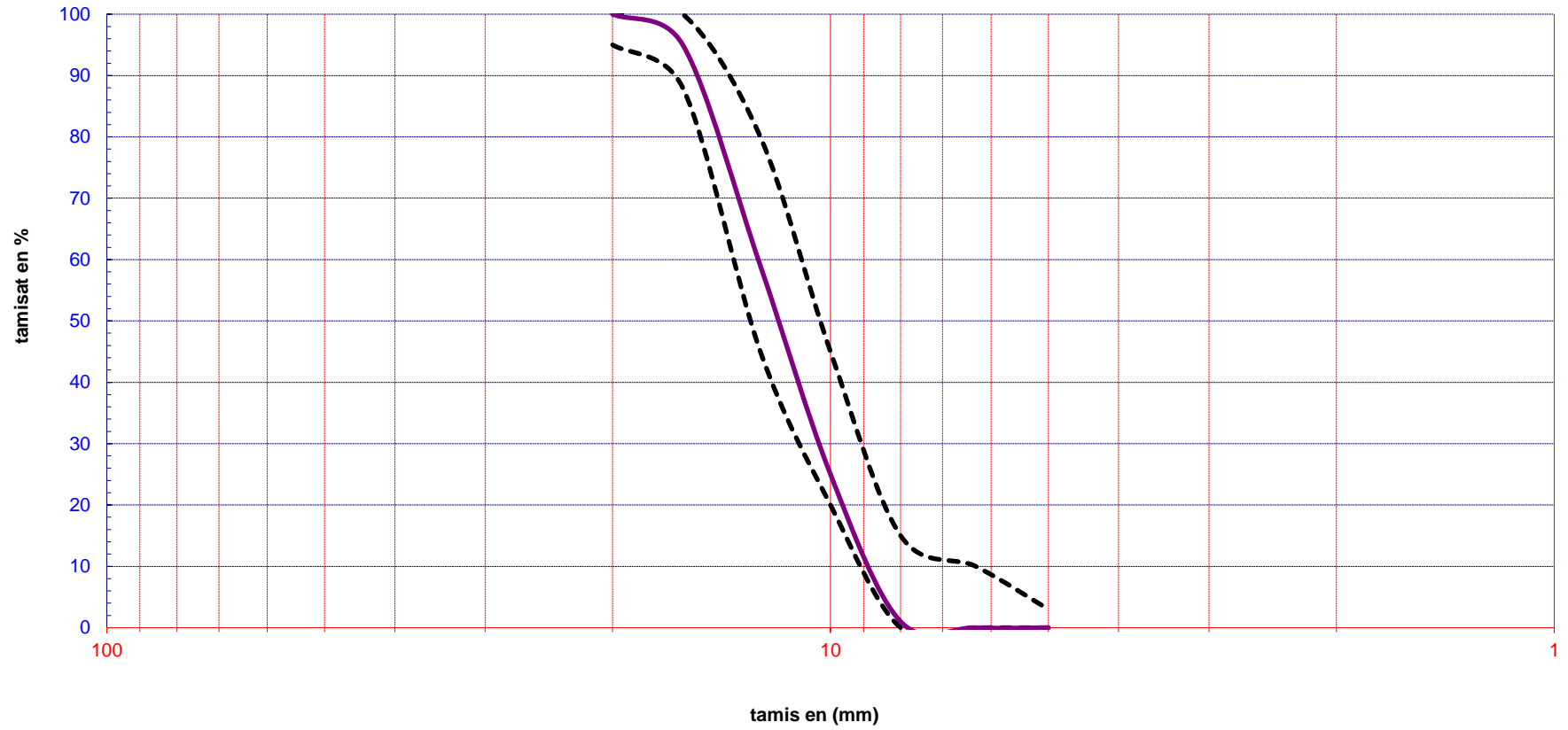
DOSSIER : Etude 03/2016
GR 3/8



---•--- fuseau 3/8 courbe min - - - - - fuseau 3/8 courbe max ——— prélèvement formulation



DOSSIER : 03/2019
GR 8/15



--- fuseau 8/15 courbe min - - - fuseau 8/15 courbe max ——— prélèvement formulation

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET ABSOLUE (MODE OPÉRATOIRE COURS DE LABORATOIRE) R.LANCHON BTS.DUT

Structure : Unité de Ouargla

N° Dossier interne : Etude 03/2016

Échantillon : Sable

Équipements utilisée : Balance électrique /App P-DETERI

Lieu de travail : OGX

Date : 11-01-2016

Opérateur : W. Bouaka / H. Aouda

N° D'inventaire : L21.19.15 - L12.02.86

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE :

Volume du récipient V	165,62	poids d'échantillon (g)
Poids T	53,42	
P1+T	314,27	260,85
P2+T	314,19	260,77
P3+T	312,99	259,57
P4+T	313,26	259,84
Poids moyen $M=(P1+P2+P3+P4)/4$		260,26
Masse volumique Apparente P/V		1,57

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE :

Poids des agrégats sec P1	300
Poids du récipient plein d'eau P2	856,66
$P3=P1+P2$	1156,66
Poids récipient + agrégats + eau P4	1041,6
volume des agrégats $V=P3-P4$	115,06
Masse volumique absolue P1/V	2,61

L'Opérateur

Visa du responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ÉQUIVALENT DE SABLE NFP 18-598 Octobre 1991

Structure : Unité de Ouargla

Lieu de travail : OGX

Date : 12-01-2016

N° Dossier interne : Etude 03-2016

Opérateur : W. Bouaka / H. Aouda

Équipements utilisée : Balance électrique

N° D'inventaire : L21-19-15

Echantillon	Sable 0/3		2		3	
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2
Hauteur totale H1 (cm)	11.70	11.70				
Hauteur de sable H2 (cm)	8.70	8.80				
$ES = \frac{H2}{H1} \times 100$	74.36	75.21				
ES moyen (%)	74.79					

L'Opérateur

Visa du responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

LOS ANGELES
NFP-18 573 December 1990

Structure : Unité de Ouargla
N° Dossier interne : Etude 03-2016
Échantillon : GR
Équipements utilisée : Balance

Lieu de travail : OGX
Date : 10-01-2016
Opérateur : W. Bouaka / H. Aouda
N° D'inventaire : L21.23.15

Classe granulaire	Nombre de boulets	Prisse d'essai M (g)	Poids d'éléments > 1,60 mm m' (g)	poids d'éléments < 1,60 mm m=M-m' (g)	LA =100*(m/M)	Observation
GR 10-14	11	5000	4090	910	18.2	

L'Opérateur

Visa du responsable

LABORATOIRE DES TRAVEAU PUBLICS DU SUD

COEFFICION D'ABSORBTION D'EAU
NFP 18-554 Décembre1990

Structure : Unité de Ouargla

N° Dossier interne : Etude 03/2016

Échantillon : Sable 0/3

Équipements utilisée : Balance électrique

Lieu de travail : OGX

Date : 13-01-2016

Opérateur : W. Bouaka /H. Aouda

N° D'inventaire : L21.19.15

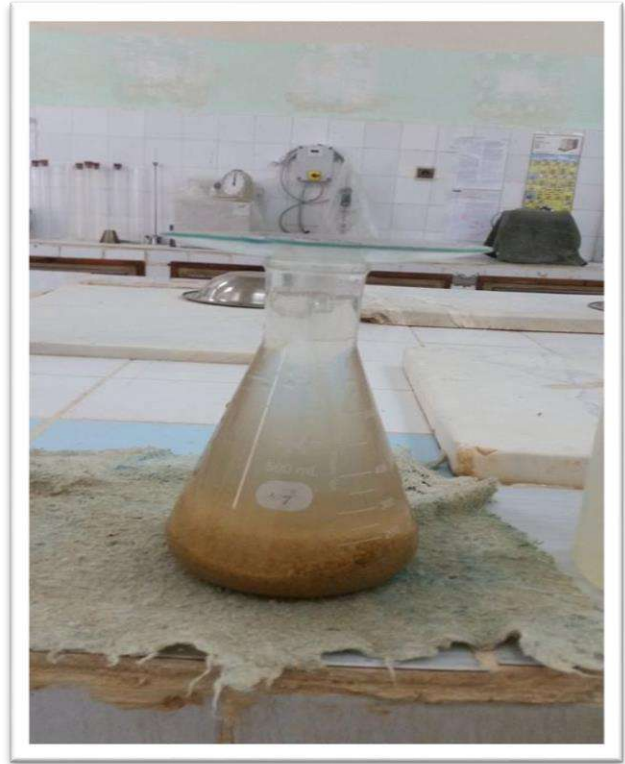
Masse sèche du refus au tamis 4mm : MS	Ms	198.95
Masse d'échantillon imbibé dans l'air :Ma	Ma	200.00
$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} \times 100$	Ab	0.53

L'Opérateur

Visa du responsable



a : masse volumique Apparent



b : masse volumique Absolu

Photo 1: Essai masse volumique



Photo 2 : Analyse chimique
sable et gravier



Photo 3: Méthode d'essai
d'absorption de sable

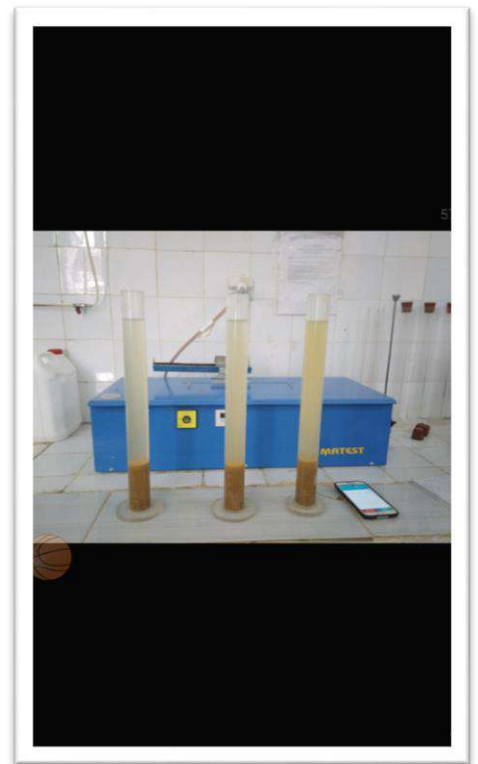


Photo 4: Appareillage et l'éprouvette
de l'équivalent de sable



Photo 5: Essai Los Anglos



Photo 6 : Essai Micro Deval

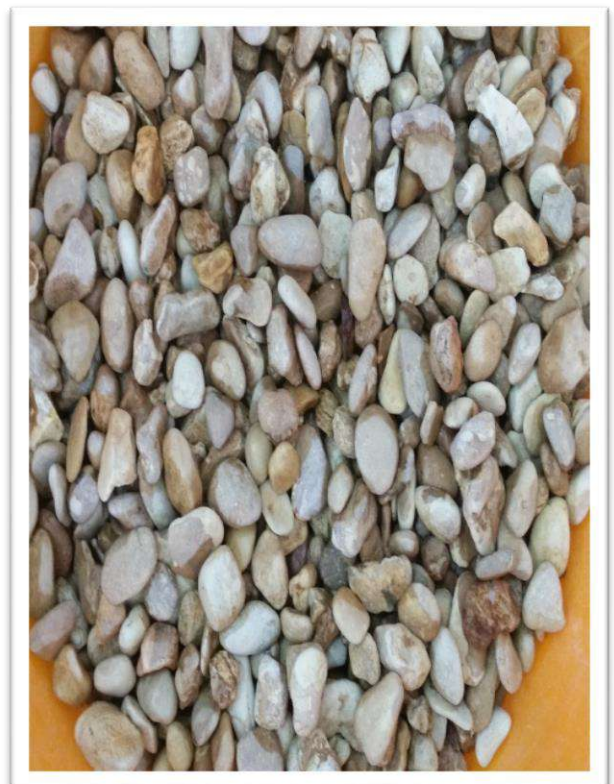


Photo 7: Préparation de gravier



Photo 8 : Malaxage du mélange



Photo 9: Substitution du sable par la poudrette de Caoutchouc

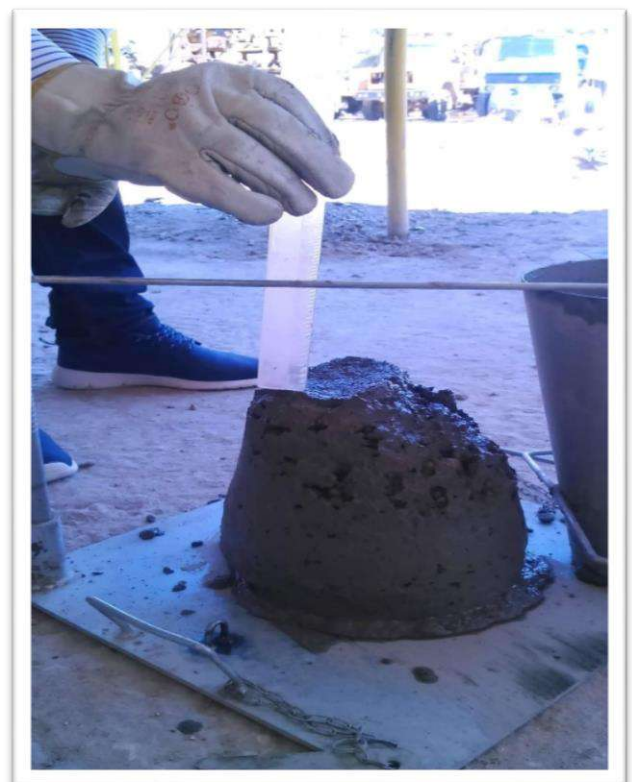


Photo 10 : Mesure de la consistance (Affaissement au cône d'ABRAMS).



Photo 11 : Collage des éprouvettes

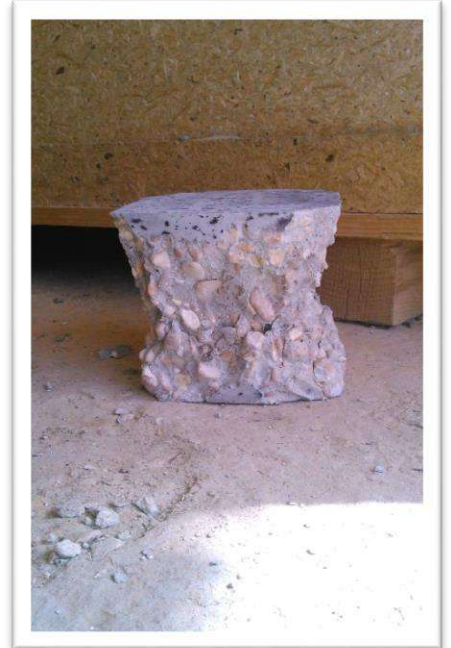
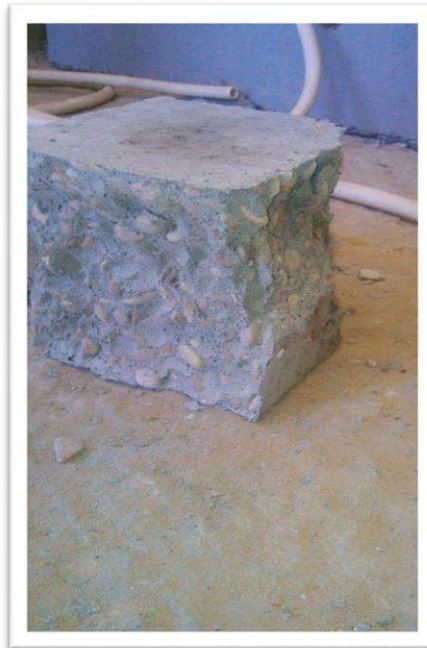


Photo 12 : éprouvettes après écrasement

Crumb rubber impact to the mechanical performance of concrete based at round gravel

Wafa Bouaka, and Abdelouahed Kriker

Citation: [AIP Conference Proceedings](#) **1814**, 020043 (2017); doi: 10.1063/1.4976262

View online: <https://doi.org/10.1063/1.4976262>

View Table of Contents: <http://aip.scitation.org/toc/apc/1814/1>

Published by the [American Institute of Physics](#)

Articles you may be interested in

[The valorization of the plastic waste to the rheological characteristics of bituminous mixtures](#)

AIP Conference Proceedings **1814**, 020025 (2017); 10.1063/1.4976244

[Shrinkage modeling of concrete reinforced by palm fibres in hot dry environments](#)

AIP Conference Proceedings **1814**, 020026 (2017); 10.1063/1.4976245

[Contribution study to the thermal insulation of the builders in the desert regions of exploiting gypsum fiber reinforced palm](#)

AIP Conference Proceedings **1814**, 020029 (2017); 10.1063/1.4976248

[Nonlinear analysis of concrete beams strengthened by date palm fibers](#)

AIP Conference Proceedings **1814**, 020020 (2017); 10.1063/1.4976239

[Effects of mineral additions on durability and physico-mechanical properties of mortar](#)

AIP Conference Proceedings **1814**, 020032 (2017); 10.1063/1.4976251

[Compressive strength of dune sand reinforced concrete](#)

AIP Conference Proceedings **1814**, 020023 (2017); 10.1063/1.4976242

Crumb Rubber Impact To The Mechanical Performance Of Concrete Based At Round Gravel

Wafa Bouaka ^{1,a)}, Abdelouahed KRIKER ²,

¹Laboratory EVRNZA, University of Kasdi Merbah Ouargla, Algeria.

²Laboratory EVRNZA, University of Kasdi Merbah Ouargla, Algeria.

^{a)}Corresponding author: bouaka_wf@yahoo.com
a_kriker@yahoo.fr

Abstract. Today the concrete is used more than any other construction material, with almost four (4) billion cubic meters used worldwide [1]. Throughout history, mankind has used concrete in construction. Concrete has not only been used in the construction of buildings such as dwelling areas but also in bridges, roads, tunnels, airports and water dams. It is a heterogeneous composite resulting from cement, aggregates, water and a limited quantity of adjuvant. The round gravel is an existing traditional material within the formulation of concrete. It is high in resistance to fragmentation and widely spread out in grand quantity in the Saharian regions. However, its utilization remains rare in different types of construction. The purpose of this study is to compare and contrast the use of local materials (Round gravel) with polymer industrial products (Crumb Rubber). This one is used to enhance the density, homogeneity, malleability and strength of the construction material.

Keywords: Hydraulic concrete, crumb rubber, Valorization of waste, Round gravel, local materials, Mechanic test, rheological behavior

INTRODUCTION

Since 2004, Algeria has been importing an average of 49.62 billion tons of pneumatic rubber according to the “National Agency of Promotion and External Commerce” (ANPCE).

When tires has been recycled to new, and when we took in consideration the loss in weight resulted from the erosion of tire after the first time use, we found almost 42.65 billion tons of used tires, every year. [2]

Previous research proved that the incorporation of crumb rubbers in the concrete has a big impact on the loss of the compression strength (80%). The latter has almost the same effect on young Module (70%). [3]

The current research aims to contribute to the improvement of the mechanical performances of the modified concrete by adding a crumb rubber with a new formulation. In order to reach this objective, we envisaged the incorporation of crumb rubber in the concrete by different substitutions.

This is where crumb rubber based concrete can be used and developed for: [4]

- ✓ Flexible industrial soils.
- ✓ Vertical or horizontal acoustic screens.
- ✓ Slabs cushioning for roads.
- ✓ The prefabricated elements for shock absorption and noise cancellation.

MATERIALS AND METHODS

The hydraulic concrete is a heterogeneous material. However, the physical, chemical and mechanical characteristics of multiple constitutions are different. It is composed essentially of aggregates (gravel and sand), cement and water for mixing the cement, every component has a specific role and are as follow:

Cement

The cement is a hydraulic binder, which exists in a form of mineral powder that is moisturized when in touch with water. It forms a paste setting and hardens progressively during contact with air. It is a fundamental constituent because it is the one that makes the cohesion between the other compositions.

The cement used is a cement EL-MATINE, it is composed by: CPJ-CEM II / A 42.5

Table 1: Characteristics of cement - El Matin CPJ.

Property	Bulk density (g/cm ³)	Specific Surface (cm ² /g)	Setting starting Hour/min	Setting End Hour/min	RC min. at 28 days (MPa)
CPJ-CEMII/A	3,02	3000 et 3200	2 :45	3 :50	52.5

Sand

The used sand is a normalized sample from the sandpit Zarzaitine in the region Illizi/Algeria

Table 2: Characteristics of used sand

Characteristics		Standards	Results
finesse Module		NF P 18-560	2.62
Absolute density (g/cm ³)		NF P 18-554	2.60
Equivalent sand (ES) %		NF P 18-598	78.77
Absorption %		NF P 18-554	0.52
bleu methylene value Vb		NF P 94-068	0.92
chemical Analyses %	Insoluble		96.09
	Total Sulfur	NF P 15-461, BS 1377,	0.17
	Carbonates	NF P 94 048	1.5
	Chloride		0.013

The sand used is of a siliceous nature, white with good preferential granularity, its cleanness according to the equivalent sand is around 79%, which only confirms its value [6], acceptable for the production of quality concretes.



Figure 1: Zarzaitine/Illizi Sund

Round Gravel

The round gravel had been directly extracted from valley Oued N'ssa / wilaya Ghardaia, Algeria.

Its extraction is done by traditional methods. This gravel is washed and separated using the sieves 2.5 and 8 mm to form the fraction 3/8 mm and the sieves 6.3 and 16 mm to form the fraction 8/15 mm.



Figure 2: Gravel of Oued N'ssa/Ghardaia.

Table 3: Characteristics of round gravel d'Oued N'sa.

Characters	Standards	Results	
		3/8	8/15
Flatness %	NF P 18-561	-	24
Absolute density (g/cm ³)	NF P 18-554	2.62	2.62
Absorption %	NF P 18-554	1.65	1.65
cleanness % (after wash)	NF P 18-591	0.03	0.01
Los Angeles %	NF P 18-573	-	18.2
Micro Deval %	NF P 18-572	-	4.48
Chemical analyses	Insoluble		10.44
	Total Sulfur	NF P 15-461, BS 1377,	0.2
	Carbonates	NF P 94 048	85.00
	Chloride		0.02

The two fractions of the gravels are of a calcareous nature of brown color, they are generally natural alluvium aggregates, sampled from dredging rivers, and these are the reasons of the good hardness (Micro Deval). After observing the impurity clays, we recommend to wash this gravel to ameliorate its characteristics.

Crumb Rubber

The crumb rubber we used in the research came from the industry waste (crushing rubber waste) with a black color, sampled from the society S.A.E.L Algiers / Algeria.

It is present in fine granularity shapes (size of 2.5 mm maximum) [7]. It presents a feeble density (= 0,62 g/cm³) compared to sand density.



Figure 3: Crumb Rubber .

EXPERIMENTAL PROGRAM

There are four (04) compositions to study:

C0: It's the initial state based on the formulation of concrete by round gravel according to Dreux Gorisse Method [8]. This one is considered as a reference.

C1, C2 and C3: From the initial state C0, we preserved the fractions 3/8 and 8/15 and we made a substitution of sand by crumb rubber.

This substitution successively varied between 5, 10 and 15 %. And we adopted this proportion in accordance with the previous research. [9,10]

The composition of concrete for the confection of specimens based on Dreux Method which gives a 350 kg/m³ of dosage in cement, a ratio of gravel to sand G/S of 1.91 and water to cement ratio E/C of 0,51 to 0/56.

After pulling out specimens from their mould after 24 hours, they are conserved in water at 20 °C, with the ones sent to retirement test being the only exception which were conserved in free air (20 at 30 °C and 50 at 60 % relative humidity) in the laboratory until the moment of test. [10]

OUTCOME AND INTERPRETATIONS

Consistency Test

As a purpose to facilitate the comparison of different types of concrete [10], all of them are fabricated with constant appreciated workability with a substance using Abrams cone in order to get nearly eight (8) cm. This means we have a plastic concrete according to the substance class [11].

The next table gives an indication of the real quantity of water used to create the hydraulic mixture.

Table 4: Variation of the mixture water in one meter cube (1 m³) and the ratio E/C.

Concrete	Cement (kg)	adding water (l)	Effective water (l)	E/C	Substance (cm)
C0		23.425	198.175	0.56	
C1	350	23.260	187.431	0.53	8
C2		23.100	183.800	0.52	
C3		22.930	180.570	0.51	

Bulk Density

Table 5: Variation in the bulk density of concrete.

Rubber percentage (%)	0	5	10	15
Bulk Weight (Kg/m ³)	2329	2253	2198	2132

The bulk density of concrete decreases when the percentage of the present crumb rubber increases. This means that the bulk density of the crumb rubber (0.62 t/m³) is weaker than the sand one (2.62 t/m³) .

Compression Strength

The variation in the resistance to compression indicated in the table 6 and figure 4. The test affects in specimens of $(15 \times 15 \times 15)$ cm³ after being preserved in water at 20°C and 98 % of humidity during 7 and 28 days of concrete age.

Table 6: Variation of compression strength (7 et 28 days).

	<i>C0</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>
RC at 7 days (MPa)	24.53	12.69	12.18	8.71
RC at 28 days (MPa)	29.09	19.71	16.17	13.16

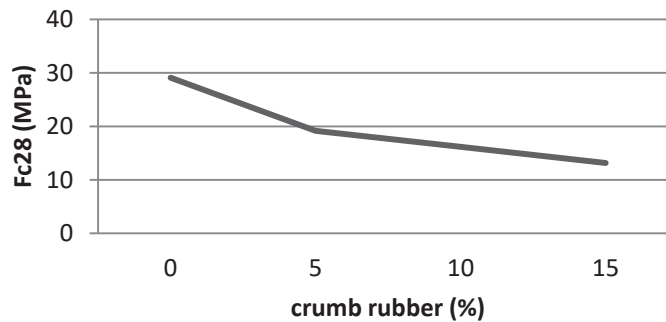


Figure 4: Variation in resistance to compression in 28 days.

The composition (C0) presents a good resistance to compression compared to concrete made by crushed gravels [5] caused by the round gravel hardness impact.

The compression strength of crumb rubber concretes didn't gave a significant improvement, in comparison to the composition (C0) and that's what confirms the previous result found by COOPER,P , GARGOURI and HO-CUONG. [12, 4, 9]

The resistance to compression decreases with the augmentation in the crumb rubber rate added to the concrete composition.

For each crumb rubber added, the resistance to compression decreases with 40 % comparing to the reference composition (C0), and this one is due to the weakness adhesion inter – granular favored by crumb rubber particles. [5, 13, 14]

Traction Strength

To measure the traction strength, we used the four point flexure method, for each composition we tested three specimens, the result of this parameter is demonstrated in table 7. The variation of rate of substitution of crumb rubber is illustrated by figure 5.

Table 7: Variation of Traction Strength (7 and 28 j).

	<i>C0</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>
Rt at 7 days (MPa)	2.49	1.85	1.58	1.40
Rt at 28 days (MPa)	3.64	2.90	2.12	1.89

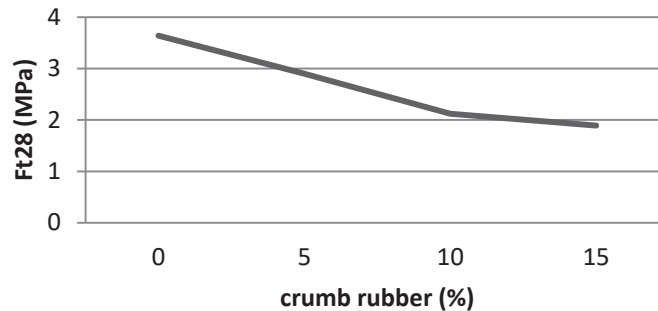


Figure 5: Variation in resistance to Traction by 4 point flexure method in 28 days.

The same reasons are present to demonstrate the decrease in the resistance to compression can be shown here where the impact of the flaw is more visible in the traction strength, a poor adherence between the rubber and granular corps is an influential part in the decrease of the resistance to traction of the crumb rubber concrete, but it's still none considerable.

CONCLUSION

The objectives of this research are to exploit the round gravel which is a local material in the saharian region and re-use again in constructions and roads to valorize the wastes and study their effect in the behavior of concrete According to the result found here we sort that the round gravel concrete is always preponderant in comparison to the other crushed gravel concretes.

Where the addition of crumb rubber to hydraulic concrete make it more compact than the reference concrete, more difficulty in mixing and demands more physical hard work with more rubber present in our concrete. In different side the consumption of mixing water depends on surface area of granular grains and the compression strength decreases with the increase in concentration of rubbers, and this is in agreement with previous academic studies. The increase in concrete rubber rate results insignificant decrease of traction resistance (four point flexure).

REFERENCES

1. H. Boukli, "Contribution A L'étude De La Resistance Caractéristique Des Bétons De La Région De Tlemcen", University of Tlemcen, PhD thesis, 2009.
2. H. Trouzinea, A. Asrouna, N. Asrouna, F. Belabdelouhac, N. Thanh Longd "Problématique des pneumatiques usagés en Algérie", Article, Nature & Technologie novembre 2011.
3. S. Bonnet « Effet de l'incorporation des granulats de caoutchouc sur la résistance à la fissuration des mortiers» XXI University Meetings of Civil Engineering 2003 Awards « René Houpert » pp 59-70.
4. A. Gargouri, M.S. Makni A. Boulila, S. Yaich "mecanic evaluation of the behavior of the rubber concrete behavior mecanic of the concrete" Colloquium International Conference on Concrete Technology in Developing Countries, ICCTDC, 8-9 November 2007.
5. Makhlouf « Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibre en copeaux », Memory magister, University of Tizi ouzou, november 2010.
6. NF P 18-598, « Équivalent de sable », Octobre 1991.
7. SAEL « Société d'Application d'Elastomère », Product Data Sheet

8. G. Dreux, J. Festa « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », Eyrolles 8th edition, Paris 1998.
9. A.C. Ho “Optimisation de la composition et caractérisation d’un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface”, PhD thesis, University of Toulouse, July 2010.
10. M. Guendouz, F. Debieb “Influence Des Déchets Plastiques Sur Les Performances Et La Durabilité Du Béton” volume 1 INVACO, November 2014.
11. NF P 18-451, “Essai d’affaissement”, December 1981.
12. P. Cooper “Tyres under pressure from different directions”, Proc. Int. Symp. “Recycling and reuse of Used Tyres” R.K . Dhir, M.C Limbachiya 19-20 March 2001.
13. H.A. Toutanji, “The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates, cement and concrete composites”, 1995, vol 18.
14. D.G. Goulias, A. Al-Hossain “Evaluation of rubber-filled concrete and correlation between destructive and non-destructive testing results”, cement, concrete and aggregates 1998 vol 20 n°1.