

[Sélectionnez la date]

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية

الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث

العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Matériau de Génie Civil

Par : - DJAOUT Ali

- BENHAMOUDA Faïçal

Sujet

Les effets de l'adjuvant hydrofuge et super-plastifiant sur le comportement d'un mortier de caoutchouc des pneus usés

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

M/LOGZIT Nacer

Grade

Univ-BBA

Président

M/DEBOUCHA Sadek

Grade

Univ-BBA

Examineur

M/ GUELMINE Layachi

Grade MCA

Univ-BBA

Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous tenons à remercier Allah le tout puissant de nous avoir aidé à
réaliser ce modeste travail.

Nous adressons, nos vifs remerciements à nos encadrants :

Dr .Layachi .GUELMINE pour leur
contribution dans l'élaboration de ce projet grâce à leurs orientations et
conseils.

Nous exprimons toute notre gratitude à nos parents qui nous ont
soutenus tout au long de notre cursus dès le primaire jusqu'à l'écriture
de ces lignes. Mille mercis.

Un grand merci à nos enseignants qui par leurs paroles et leurs
critiques, ont guidés nos réflexions afin de perfectionner notre savoir-faire.

Enfin, nous témoignons toute notre reconnaissance à tous ceux qui
nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Nous dédions cet humble travail

A nos chers parents qui ont contribué à ma réussite à travers

Leur soutien et leur éducation tous les sacrifices et leurs précieux conseils,

Pour toute leur aide et leur présence dans nos vies à travers ce travail

*Dans la mesure où il est humble, nous exprimons nos sentiments et sincères
envers eux*

Respect et appréciation ; Que Dieu les protège pour nous.

*A nos frères Rafik Akram Islam et Laila et à tous ceux qui ont contribué de près
ou de loin*

Nous leur souhaitons bonne chance et succès dans leur vie

A ma chère mère.

*A notre vertueux professeur Layachi Guelmine, l'encadreur, et à tous les
professeurs du Département de Génie Civil*

ملخص:

في سياق زيادة إنتاج المخلفات الصناعية. إعادة تدوير بعض النفايات في مواد البناء هو حل مبتكر. تتناول الدراسة الحالية آثار الملدنات الفائقة والمضافات المقاومة للماء على تطور الخواص الفيزيائية الميكانيكية لملاط الأسمنت الذي يشتمل على 0%، 4%، 8%، و12% ركام مطاط معاد استخدامه (GCR). أظهرت نتائج توصيف الملاط المدروس أن إدراج (GCR) ينتج انخفاضًا كبيرًا في مقاومة الانضغاط للملاط المدروس. من ناحية أخرى، تعمل المواد المساعدة المقاومة للماء والملدنات الفائقة على تحسين المقاومة الميكانيكية للمواد المركبة المدروسة. فيما يتعلق بالاتساق، فإن إضافة (GCR) إلى ملاط الأسمنت ينتج انخفاضًا كبيرًا في انتشار جدول المونة المدروسة

الكلمات المفتاحية: ملاط إسمنتي، ملاط مطاطي، ركام مطاطي معاد استخدامه، طارد للماء، ملدن فائق، قوة ميكانيكية، اتساق.

Résumé

Dans un contexte d'augmentation de la production de déchets industriels. Le recyclage de certains déchets dans les matériaux de construction constitue une solution innovante. La présente étude traite les effets des adjuvants super-plastifiant et hydrofuge sur l'évolution des propriétés physico-mécaniques des mortiers de ciment incorporant 0 % , 4% , 8% , et 12 % de granulats de caoutchouc réutilisés (GCR). Nos résultats de la caractérisation des mortiers étudiés, montrent que l'inclusion des (GCR) produit une chute importante de la résistance à la compression des mortiers étudiés. Par contre, les adjuvants hydrofuge et super-plastifiant améliore significativement la résistance en mécanique des composites étudiés. Concernant la consistance l'ajoute des (GCR) au mortier de ciment produit une chute importante de l'étalement de table des mortiers étudiés.

Mots Clés : Mortier, ciment, caoutchouc, granulats, réutilisés, hydrofuge, super-plastifiant, résistance, mécanique, consistance.

Abstract :

In a context of increasing production of industrial waste. Recycling some waste into building materials is an innovative solution. The present study deals with the effects of super-plasticizer and water-repellent admixtures on the evolution of the physico-mechanical properties of cement mortars incorporating 0%, 4%, 8%, and 12% reused rubber aggregates (GCR.) Our results of the characterization of the mortars studied; show that the inclusion of (GCR) produces a significant drop in the compressive strength of the mortars studied. On the other hand, the water-repellent and super-plasticizer admixture significantly improve the mechanical resistance of the composites studied. Regarding the consistency, the addition of (GCR) to the cement mortar produces a significant drop in the table spread of the mortars studied.

Keywords: Cement ,mortar, rubber, reused, aggregates, water repellent, super-plasticizer, mechanical, strength, consistency.

Sommaire de mémoire :

ملخص

Résumé

Abstract

Sommaire

La liste des tableaux

La liste des Figures

Introduction Générale :	1
Chapitre I Analyse bibliographique :	3
I.1. Introduction :	3
1.1. Estimation des déchets pneumatiques en Algérie :	4
1.2. l'impact des déchets pneus sur la nature :	4
1.3. Les composants d'un pneu :	5
1.4. Valorisation des pneus usagés :	6
1.5. Techniques de valorisation des pneus dans le secteur du Génie Civil :	7
I.2. Mortier et ces constituants :	9
I.2.3 Principaux constituants du mortier de ciment :	10
I.2.4. Propriétés essentielles d'un mortier de ciment :	12
I.2.4.3 Réaction d'hydratation :	13
I.3. Les paramètres d'influence de la structure de la pâte de ciment :	15
I.4. Effet des adjuvant chimiques sur les propriétés des matériaux cimentaires:	17
I.4.1.1.Types d'hydrofuges :	18
I.4.1.2.Familles et exemples d'hydrofuges	19
I.4.2. Adjuvant type Plastifiant	:21
I.5. Les propriétés des bétons de caoutchouc :	23
I.5.2. Propriétés à l'état durci du béton incorporant des G.C. :	25

I.5.2.2. La résistance à la traction :	26
I.5.2.4. Capacité de déformation : 27	
.Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentales :	31
II-1) Introduction :	31
II-2) Caractérisation des matières premières :	31
A. Module de finesse :	32
I.2.1.2 Equivalent de sable : NFB.18-598[21] :	33
II.2.2.2 Masse volumique absolue : NFP 18-558[21] :	35
II.3. Etude du mortier frais :	37
II.4. Essai physico-mécaniques sur le mortier frais :	39
II.5. Essai physico-mécaniques sur le mortier durci :	41
II.5.1.4. Essai Ultrasonique :.....	43
II.6.2.Propriétés Mécaniques :	45
Chapitre III Résultats et discussions :	48
Introduction :	48
III.2. Caractérisation des matières premières :	48
III.2.1.1 Analyse granulométrique:	50
III.2.2. Ciment :	51
III.3. Etude des propriétés des mortiers étudiés	52
III.3.1. Propriétés fraîches :	52
III.3.2. Propriétés durcies :	53
III.3.2.2. La résistance en traction par flexion:	54
III.3.2.4. L'absorption capillaire:	55
Conclusion Générale et perspectives :	57
Références bibliographiques :	59
La liste des tableaux :	
Tableau 1.1 : Répartition du parc automobile en Algérie :	4
Tableau I.2: Différentes matières contenues dans le pneu[2] :	6

:Tableau I.6: Ouvrages Pneusol réalisés :	8
Tableau.I.3. Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition :	11
Tableau.I.4: Spécification et valeurs garanties du ciment en fonction de la classe :	12
Tableau II.1 : Opération de malaxage des mortiers :	38
Tableau II.2 : Composition des mortiers préparés :	39
Tableau.III.1. propriétés physiques essentielles des granulats utilisés :	49
Tableau.III.2. Composition chimique moyenne du sable utilisé :	49
Tableau.III.3. Propriétés physicomécaniques de ciment utilisé. :	51
Tableau.III.4. Composition chimique moyenne du ciment utilisé :	51

La liste des Figures :

Figure.I.2. Les risques de feux dans les décharges des pneus usagés :	5
FigureI.15 : Différents demi-produits issus du broyage des pneus usagés:.....	7
Figure 1.16: Chantier expérimental Pneusol à Bou-Ismaïl :	8
Figure.I.4.La structure de la pâte de ciment selon le modèle de Feldeman et Serada[7] :.....	15
Figure I -1 : Mode d'effet d'un plastifiant :	22
Figure I.6 : Influence de G.C. sur l'affaissement[16] :	23
Figure I-7 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des GCR[16] :	24
Figure I-8 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [17] :	25
Figure.I.8: Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des G.C. 0-4mm), [18] :	26
Figure.I.9. Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage[16] :	26
Figure I-30 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en G.C[20] :	27
Figure I-15 : Comportement en flexion des blocs de béton caoutchouc, [19] :	28
Figure.I.22. la montée en température du four et des mortiers étudiés pour différents taux des granulats de caoutchouc recyclés [22] :	28
Figure.I.23. Vue des demi-spécimens exposés aux quatre cycles de chauffage-refroidissement à la ambiants (20°C) et à la température 400°C [22] :	29
Figure.I.24. Evolution de la porosité ouverte relative des mortiers étudiés en fonction de la température de chauffage [22] :	30

Figure.I.25. Comparaison entre les résultats de la résistance à la compression relative de cette étude et ceux de DTU [22] :	30
Figure II.1 : Analyse granulométrique :	32
Figure(II.1) : Courbes Granulométriques des Granulats utilisés :	32
Figure II.2 : Essai d'équivalent de sable :	33
Figure II.3 : Masse volumique apparente :	34
Figure II.4 : malaxeur normalisé EN 196-1 :	38
Figure II.6 :Granulats de Caoutchouc utilisés :	38
Figure II.7 : Essai d'ouvrabilité :	40
Figure II.1 : table d'étalement :	41
Figure II.2 : Dispositif de mesure de la sorptivité par capillarité :	43
Figure II.14 : Appareillage pour l'essai ultrasonique :	44
Figure II.3 : Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion :	46
Figure II.9 : Dispositif expérimental de l'essai de flexion :	46
Figure II.5 : Dispositif de l'essai de rupture en compression :	47
Figure.III.1. Les granulats de GCR sable utilisés :	50
Figure.III.2. Analyse granulométrique des utilisé :	50
Figure.III.3. Etalement de table en fonction des dosage : en GCR , Super-plastifiant, hydrofuge des mortiers étudiés :	52
Figure.III. 4. La masse volumique apparente des mortiers de caoutchouc en fonction de super-plastifiant et l' hydrofuge :	53
Figure.III.5. Résistance en traction en fonction des dosage en GCR et les dosages de super-plastifiant et hydrofuge :	54
Figure.III.6. Résistance en compression en fonction des dosages en GC, super-plastifiant et hydrofuge des mortiers étudiés :	55
Figure.III. 7. Taux d'absorption d'eau en fonction des dosages GCR, Super-plastifiant et Hydrofuge des mortiers étudié :	56

Introduction Générale

Le recyclage de certains déchets dans les matériaux de construction constitue une alternative, à faible coût économique, aux granulats minéraux conventionnels. Parmi ces matières recyclables, on distingue les déchets de plastique dont, leur accumulation constitue une source potentielle de problèmes environnementaux. L'utilisation de ces déchets dans le domaine de la construction répondre à la demande sociétaire d'un plus grand respect de notre environnement .

L'objectif de cette étude est d'examiner les potentialités de l'utilisation des déchets de caoutchouc dans une matrice cimentaire, par substitution aux granulats minéraux conventionnels. Le matériau qui sera un mortier de ciment, contenant différentes fractions de granulats issus du broyage de déchets de plastique.

Pour atteindre cet objectif, des matériaux de types "mortier de ciment" sera ainsi élaboré, en substituant différentes fractions minérales par des particules de caoutchouc. Il s'agira d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur les propriétés du matériau aux états frais et durci, notamment les effets des adjuvants de type super-plastifiant et hydrofuge sur le comportement physique et mécanique des mortiers de caoutchouc.

Une démarche associant les étapes suivantes : études, analyses et expériences, se résume comme suite :

La première étape consiste à présenter les déchets de plastique, identifier les différents constituants de mortier de ciment, les facteurs qui ont une influence sur le comportement de ce matériau. La seconde étape est consacrée à la caractérisation des matières premières (sable, ciment, granulats de plastique) ; ainsi que la présentation des différentes techniques expérimentales utilisés dans cette étude.

La dernière étape consiste à présenter les résultats trouvés lors de cette étude .En fin, on termine ce travail par une conclusion et des perspectives

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Chapitre I : Etat de l'Art sur les matériaux cimentaires incorporant les granulats de caoutchouc

I .Introduction

L'essor de la prise en compte de l'impact environnemental des constructions et plus généralement des politiques de développement durable a conduit à s'interroger sur les procédés et les matériaux de construction alternatifs. Le secteur de la construction, et en particulier celui basé sur l'utilisation de matériaux cimentaires n'échappera pas à cette évolution ; Il faudra limiter les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre, économiser les ressources naturelles, penser à la déconstruction avec l'analyse du cycle de vie, tout en améliorant les propriétés d'usages des matériaux conventionnels. Dans ce contexte, de nouveaux matériaux innovants "composites" vont devoir, à terme, remplacer les matériaux usuels. En accord avec les principes du développement durable, les acteurs du bâtiment manifestent un intérêt croissant pour les co-produits et les déchets issus du secteur industriel. C'est en particulier le cas pour les déchets de caoutchouc, notamment les pneus usagés, qui peuvent, à court terme, remplacer certaines additions généralement utilisés comme renfort dans le béton. L'utilisation de ces déchets dans le domaine de la construction est une alternative qui présente un double objectif : répondre à la demande sociétale d'un plus grand respect de notre environnement et apporter une valeur ajoutée à certains co-produits ou déchets tout en générant de nouvelles opportunités pour le monde industriel[1,2].

En Algérie, l'accumulation des déchets de pneus, hors d'usage, constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. En effet, l'exploitation des véhicules industriels, de différentes catégories, génère des quantités importantes de déchets de pneus qui ne bénéficient d'aucune action de valorisation. Ils sont très souvent entreposés dans des décharges non-contrôlées, polluant de l'environnement, au travers leur incinération à l'air libre ou encore, leur enfouissement[1]. En Europe, ces modes de réduction des déchets sont totalement décriés et la réglementation actuelle impose la mise en place de filières de valorisation dans différents domaines. C'est dans ce contexte que se déroulera cette étude, qui consiste à examiner les possibilités du recyclage des déchets de pneus en Algérie, notamment leur utilisation dans le domaine des matériaux de construction [2,3].

1.1. Estimation des déchets pneumatiques en Algérie

Sur la base des statistiques de l'Office National des Statistiques (ONS) concernant la répartition du parc automobile par genre de véhicules au 31/12/2009 ainsi que les immatriculations des véhicules automobiles durant le premier semestre 2010, nous avons calculé le nombre de véhicules en circulation au premier semestre 2010 par genre. Le parc automobile national algérien compte **4 171 827 véhicules** qui se répartissent en 62,162 % de véhicules de tourisme, 8,683 % en camions et 19,694% en camionnettes. Les autocars et autobus représentent 1,679 % du parc. Les tracteurs routiers 1,520 %, les tracteurs agricoles 3,136 %, les remorques 2,779 %, les motos 0,263 % et les véhicules spéciaux 0,080% (Tableau 1.1)[1,2] :

Tableau 1.1 : Répartition du parc automobile en Algérie

Genre	Véhicules	Pourcentage(%)
Véhicule de Tourisme	2 593 310	62,162
Camion	362 257	8,683
Camionnette	821 626	19,694
Autocar / Autobus	70 070	1,679
Tracteur Routier	63 417	1,520
Tracteur Agricole	130 839	3,136
Remorque	115 972	2,779
moto	10 978	0,263
Véhicule Spécial	3 358	0,080
Total	4 171 827	100

I.2. l'impact des déchets pneus sur la nature :

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparait en presque totalité ou en partie comme se le produit de l'action humaine, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Les déchets menacent non seulement les paysages, mais aussi polluantes ressources naturelles (aire, sol, eau). De plus, ils exposent les humains à des nuisances et dangers, dont certain peuvent être très graves et particulièrement les déchets spéciaux qu'ils présentent des caractères de danger (inflammables, toxiques, irritantes,...) [1,2]. De plus, les combustions des déchets dans des décharges non contrôlées à l'aire libre contribuent fortement à la dégradation de la quantité de

l'aire et participent à l'apparition des maladies respiratoires. « L'enquête nationale de santé publique (1990) révèle que les maladies respiratoires occupent la première place des causes de morbidité ressentie (35%) et des motifs de consultation (27,2%) et que parmi les maladies chroniques identifiées, elles occupent le deuxième rang ». Aujourd'hui, le nombre d'asthmatique en Algérie semble atteindre le nombre de 2 millions. La répartition des cas, selon les régions, se présente comme suit : « 38% en région centre, 31% en région est, 22% en région ouest et 9% en région sud » cette répartition est variée en fonction du taux de pollution atmosphérique qu'est en relation avec l'urbanisation et l'industrialisation des régions [4].



Figure.I.2. Les risques de feux dans les décharges des pneus usagés.

.I.3. Les composants d'un pneu

Le pneu est généralement composé de caoutchouc naturel ou synthétique, de noir de carbone et de soufre. Sa constitution varie peu entre les pneus tourisme et poids lourds [2]. En fonction des on altération, on distingue deux types des pneus

- **Les pneumatiques usagés réutilisables (PUR)**

Il existe deux filières pour les Pneus Usagés Réutilisables, l'une est le rechapage (remplacement de la bande de roulement) qui concerne surtout les pneus de poids lourds et d'engins de chantier et la seconde est la commercialisation sur le marché de l'occasion ou à l'export, dans le cas où les pneus n'ont pas atteint la limite d'usure autorisée.

- **Les pneumatiques usagés non réutilisables (PUNR)**

Sont les pneus qui ne peuvent plus assurer la mobilité d'un véhicule en respectant les normes de sécurité, donc on doit les éliminer.

Le tableau ci-dessous présente en ordre d'importance les différentes matières contenues dans le pneu.

Tableau I.2 : Différentes matières contenues dans le pneu [2].

Matériaux	Pneu Tourisme	Pneu Poids Lourds
Elastomères	47%	43%
Noir de carbone	21.5%	21%
Acier	16.5%	27%
Textile	5.5%	0%
Oxyde de Zinc	1%	2%
Soufre	1%	1%
Autres	7.5%	6%

I.4. Valorisation des pneus usagés

Le pneu usagé, qui a complété un cycle de vie, réorienté ensuite vers l'industrie du rechapage ou de la vente de pneus d'occasions. Quant au pneu hors usage, il est inapte à reprendre la route qui doit être éliminé (figure.I.14). Toutefois, dans la littérature, les pneus usagés désignent les pneus usagés réutilisables et les pneus hors usage sont les pneus usagés non réutilisables. Dans notre vocabulaire, les pneus usagés sont les pneus usagés non réutilisables ou encore les pneus hors usage. Les pneus usagés sont utilisés sous différentes formes dans les applications industrielles telles que les infrastructures routières, le remplissage d'aire de jeux, le domaine du génie civil et de nombreux autres produits. La solution économique le plus fiable qui permet d'éliminer complètement ces déchets, la valorisation. Il existe plusieurs voies de valorisation des pneus usagés qui sont pratiquées parmi lesquels : la valorisation énergétique et la valorisation matière [2,5].

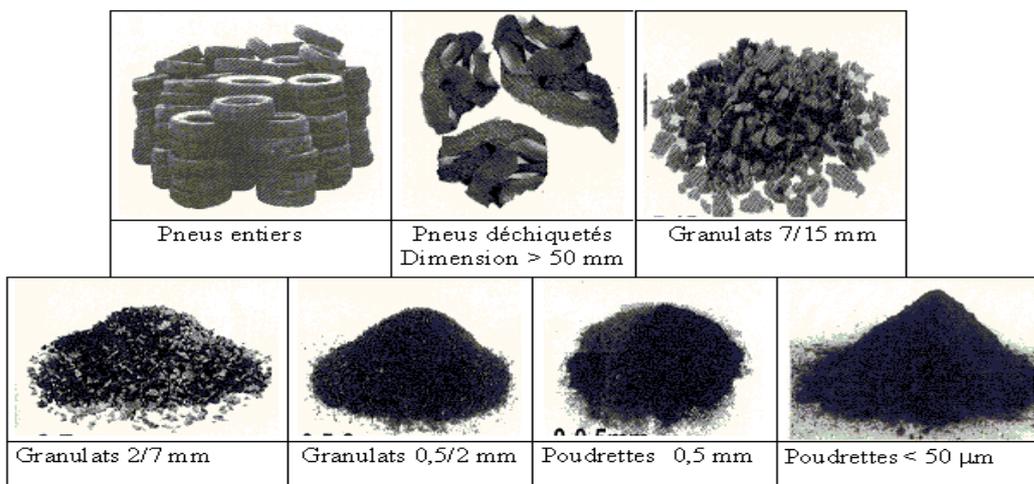


Figure. 15 : Différents demi-produits issus du broyage des pneus usagés

I.5. Techniques de valorisation des pneus dans le secteur du Génie Civil

I.5.1. Usage des poudrettes et des granulats de caoutchouc dans le domaine routier

Le broyage poussé permet d'obtenir un matériau de granulométrie inférieur à 1,2 mm, utilisable en technique routière. Il a été estimé par Trivalor que son utilisation sur les chantiers routiers entraîne un surcoût de 10 % par rapport à l'emploi d'un bitume non modifié. Cette différence est compensée par la durée de vie supérieure du bitume traité et par les propriétés thermiques meilleures [6].

Les bitumes mélangés avec poudrettes de caoutchouc permettent également de :

- ✓ limiter les nuisances sonores.
- ✓ d'améliorer la sécurité des automobilistes sur routes mouillées.
- ✓ de limiter les nuisances à l'environnement par une limitation du salage en hiver pour les pays froids, du fait d'une meilleure tenue de route à hautes et à basses températures.
- ✓ Les poudrettes ou les granules pourraient être utilisés en combinaison avec d'autres matériaux comme les bétons et les mortiers.

I.5.2. La technique Pneu sol

Le Pneu sol est formé par l'association de pneus usagés non rechapa blés (poids lourds ou tourisme) entiers, partiellement découpés (enlèvement d'un flanc), ou totalement découpés (deux flancs et une bande de roulement) et de sols pulvérulents, cohérents ou déchets. Les éléments de pneus, sont utilisés comme renforts du massif de sol, les bandes de roulement ou les flancs, sont découpés et associés en nappe par des attaches. Ces bandes peuvent être posées

sur chant ou aplaties. Dans le cas de l'emploi des flancs, ceux-ci sont posés à plat. Cette technique développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris par Dr Nguyen Thant LONG Ingénieur du LCPC, est largement diffusée depuis 1982. Les différentes applications concernent des ouvrages de soutènement, des ouvrages réducteurs de poussées ou de charges, des murs antibruit, des ouvrages de protection des berges et des pentes et talus. Plus de 12 ouvrages Pneu sol Anti Marston, sont réalisés en Algérie en 1986 [1,6].



Figure 1.16 : Chantier expérimental Pneu sol à Bou-Ismaïl

Tableau I.6 : Ouvrages Pneu sol réalisés

<i>Types d'ouvrage</i>	<i>Lieu de réalisation</i>	<i>Nombre d'ouvrage</i>
Ouvrage de soutènement	Mur de soutènement provisoire Métro d'Alger (2002)	1 Ouvrage
Stabilité de talus	Renforcement d'un talus Evitement de la ville de Bous mail Wilaya de Tipaza (2005)	1 Ouvrage
Protection contre les glissements	Wilaya de Bejaia (2006)	1 Ouvrage

Stabilité de talus	Modernisation de la RN 11- Wilaya de Mostaganem (2007)	1 Ouvrage
Répartiteur de contrainte	Ain T'émouchent (1986)	12 Ouvrages
Digue de Protection	Pont de Bou Arfa - Wilaya de Blida (2008)	1 Ouvrage

I.2. Mortier et ces constituants :

I.2.1 Définition et rôles d'un mortier de ciment :

C'est un mélange dans des proportions convenables (suivent la destination et l'emploi du mortier) de sable, de liant et d'eau, pour former une pâte de plasticité déterminée qui durcie avec le temps pour atteindre des caractéristiques similaires à une pierre naturelle. En plus de la liaison et de la cohésion qu'il assure aux éléments de maçonnerie, de la protection de la construction (rôle d'enduit) contre l'humidité due aux intempéries. Le mortier est une matière première entrant dans la confection des éléments préfabriqués et est le principal constituant du béton, il a pour rôle de colmater les vides inter-granulaires [7,8].

I.2.2 Différents types de mortier :

Selon leurs modes d'utilisation, on peut distinguer plusieurs types de mortiers d'après les normes [9] :

I.2.2.1 Mortiers de maçonnerie :

On peut classer les mortiers en trois catégories selon l'origine du liant entrant dans leur composition :

A. Mortiers de ciment :

C'est un mélange de ciment, de sable et de l'eau. Ils sont utilisés couramment pour les différents travaux du revêtement des murs et du montage des mures en panneaux.

B. Mortier de chaux :

Ils sont composés d'un mélange de Chaux, de sable et de l'eau. Ils sont très plastiques et adhèrent bien à la surface, ils ont un faible retrait. Les mortiers de chaux sont employés dans les parties de bâtiment du dessus de sol.

C. Mortier bâtards :

C'est un mélange de ciment, de la chaux, du sable et de l'eau, ils sont suffisamment maniables ; ils ont une forte résistance mécanique et une forte résistance au gel.

I.2.2.2 Mortiers spéciaux :

Ils sont utilisés dans le remplissage des joints formés par les éléments de construction en béton armé préfabriqué, mortier d'isolation hydrofuge, acoustique et résistance aux rayonnements.

I.2.2.3 Mortiers de réparation :

Ce sont des produits nouveaux utilisés pour la réparation des ouvrages en béton. Ils peuvent être classés en trois catégories selon la nature du liant qui assure la cohésion de l'ensemble : hydraulique (ciment), organique réactifs (résine synthétique) ou mixte.

I.2.3 Principaux constituants du mortier de ciment :

I.2.3.1 Le sable :

C'est un matériau naturel ou artificiel dont au moins 50% des diamètres de grains sont supérieurs à 80 mm et dont la taille n'excède pas 5mm [7,8]. La classification du sable est fondée sur trois paramètres essentiels :

- ❖ La provenance des grains (calcaire, silice) ;
- ❖ La granularité ;
- ❖ La propreté.

En effet, plusieurs types de sables sont à distinguer, parmi lesquels on trouve :

- Les sables naturels : Ils sont utilisés en construction des différents projets de

Construction et prélevés soit dans les alluvions des rivières ou des fleuves (sable

Roulé), soit sur les plages ou les dunes naturelles.

- Les sables artificiels : Sont soit du sable de concassage ou du sable roulés provenant de la production des matériaux concassés.

I.2.3.2 Le ciment :

C'est un liant hydraulique artificiel fabriqué essentiellement à partir d'un mélange de calcaires(environ 75%), d'alumine et de silice qui se trouvent dans l'argile (environ 25%).Le procédé de fabrication du ciment consiste essentiellement à broyer des matières premières, ales mélanger dans certaines proportions puis à les cuire dans un grand four rotatif à une température atteignant environ 1450°C, température à laquelle le matériau fond partiellement jusqu'à former des nodules connus sous le nom de clinker. Le clinker froidi puis broyé en poudre fine, opération de laquelle on ajoute un pourcentage de gypse (de 3 à5% de masse de clinker) et un pourcentage d'ajouts inertes ou actifs (laitier, pouzzolane, cendre, calcaire,...) pour obtenir le ciment désiré selon le type d'ouvrage réalisé [1, 4].Les ciments sont alors classés en fonction de leur composition en cinq types principaux selon la norme NFP15-301 (voir tableau I.1). Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne [9].

Tableau.I.3. Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition

	Ciment Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLK-CEM V/A	CLK-CEM V/B
Clinker (k)	≥ 95%	≥ 80% ≤ 94%	≥ 65% ≤ %74	≥ 35% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 34%	≥ 5% ≤ 19%	≥ 65% ≤ 90%	≥ 45% ≤ 64%	≥ 40% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 39%
Laitier (S)	•	6% ≤ totale	21% ≤ totale	≥ 36% ≤ 65%	≥ 66% ≤ 80%	≥ 81% ≤ 95%	•	•	≥ 18% ≤ 30%	≥ 31% ≤ 50%
Pouzzolane (Z)	•	≤ 20%	≤ 35%	•	•	•	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
Cendres siliceux (V)	•	(fumée de silice	(fumée de silice	•	•	•	≤ 35%	≤ 55% (fumée	≤ 30%	≤ 50%
Fumée de silice (D)	•	silice	silice	•	•	•	(fumée ≤ 10%	≤ 10%	•	•
Cendres calciques (W)	•	≤ 10%	≤ 10%	•	•	•	•	•	•	•
Schistes (T)	•			•	•	•	•	•	•	•
Calcaire (L)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Fillers (F)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

En fonction de la résistance normale à 28 jours, trois classes principales de ciment sont définies et des sous-classes "R" associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées [9]. Ces classes sont notées 32.5, 42.5 et 52.5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau (I-2).

Tableau.I.4 : Spécification et valeurs garanties du ciment en fonction de la classe

Classe	Résistance à la compression (MPa)				Retrait à 28 jours P.15 -433 (µm/m)	Début de prise EN 196-3 (Min)	stabilité EN 196-3 (mm)
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	Min	Max			
32.5		17.5	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 800	≥ 90	≤10
32.5R	≥13.5	•	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 1000	≥ 90	≤10
42.5	≥12	•	≥ 42.5	≤ 62.5	≤ 1000	≥ 60	≤10
42.5R	≥20	•	≥ 42.5	≤ 62.5	≤ 1000	≥ 60	≤10
52.5	≥ 20	•	≥ 52.5	•	•	≥ 60	≤10
52.5R	≥30	•	≥ 52.5	•	•	≥ 60	≤10

I.2.3.3 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage remplit deux fonctions principales, d'une part, une fonction physique qui permet de conférer au mortier les propriétés de fluidification et d'autre part une fonction chimique qui contribue à la réaction d'hydratation. Cette eau doit être propre et satisfaire aux exigences de la norme actuelle NF.18-303 [9]. L'eau utilisée dans la préparation des gâchés des mortiers élaborés dans ce travail est une eau potable du robinet.

I.2.4. Propriétés essentielles d'un mortier de ciment :

Les propriétés principales d'une pâte de mortier sont la fluidité, l'hydrophile et la résistance mécanique.

I.2.4.1 L'ouvrabilité et la maniabilité :

Une pâte de mortier peut avoir, suivent les composants, des consistances différentes, depuis l'état sec jusqu'à l'état fluide. Les mortiers de maçonnerie, des travaux de finissage des bâtiments et autres doivent être suffisamment maniable. L'ouvrabilité de la pâte de mortier détermine la maniabilité, c'est-à-dire le pouvoir de se poser sur une surface, avec une dépense minimale d'énergie, sous forme d'une couche de densité uniforme fortement adhérente à la surface de base [7].

I.2.4.2 La résistance mécanique :

La résistance d'un mortier au cours du durcissement dépend de l'activité du liant et du rapport E/C. Elle dépend aussi de la quantité de ciment et du sable employé. D'autre part, la résistance du mortier est fonction de la résistance des produits de gel (silice de calcium

hydraté S-C-H). Cependant, la source réelle de la résistance du mortier n'est pas entièrement maîtrisée [7, 8, 9,10], mais dépend probablement de deux types de liaisons homogènes :

- Le premier type est l'attraction physique entre les surfaces solides séparées seulement par les petits produits de gel (moins de 3nm). Cette attraction est généralement connue sous le nom de force de Van Der Waal.
- La deuxième source de cohésion vient des liaisons chimiques. Puisque le gel de ciment n'est pas gonflant, c'est -à dire que les particules ne peuvent être dispersées en ajoutant de l'eau, il semble que les particules de gel s'entrecroisent sous l'effet des forces chimiques. Ces dernières sont très fortes que les forces de Van Der Waal, mais les liaisons chimiques ne couvrent qu'une faible fraction de la surface des particules de gel.

I.2.4.3 Réaction d'hydratation :

On entend par hydratation du ciment toutes les réactions qui se développent entre le ciment et l'eau. En d'autres termes, les silicates et aluminates en présence d'eau forment des produits d'hydratations (gel) qui donnent avec le temps une masse ferme et dure (la pâte de ciment hydratée). Lech atelier était le premier qui a remarqué que les produits d'hydratation du ciment sont chimiquement les mêmes que les produits d'hydratation des composés seuls, dans des conditions similaires. Cela a été confirmé plus tard par H.H. Steneinour [11]. Dû au fait que les produits d'hydratation du ciment ont une très faible solubilité dans l'eau ; quelque soit le mode de précipitation des produits d'hydratation, la vitesse de cette hydratation décroît continuellement, si bien que, même longtemps après, il reste une quantité appréciable de ciment non hydraté. Par exemple, après 28 jours de contact avec l'eau, T.C. Power [12] a constaté que les grains de ciment se sont hydratés jusqu'à une profondeur de 4µm seulement et de 8µm après une année. Il a montré que l'hydratation totale dans des conditions normales n'est possible que pour les particules de ciment inférieur à 50µm, par contre, l'hydratation complète a été obtenue par broyage continu du ciment dans l'eau pendant cinq jours.

I.2.4.4. Evolution de la structure poreuse au cours du temps (durcissement) :

Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue ; pour les ciments à durcissement rapide, on obtient après quelques jours la quasi-totalité de la résistance, mais pour d'autres ciments le durcissement se poursuit

pendant des moins [7,9]. La plupart des propriétés mécaniques de la pâte du ciment durcie semblent dépendre non pas de la composition chimique du ciment hydraté mais aussi de la structure poreuse des produits d'hydratation (gel) vus au niveau des dimensions colloïdales. Il est donc important d'avoir une bonne illustration des propriétés physiques de la structure du gel de ciment. La pâte de ciment fraîche est un réseau plastique de particules de ciment dans l'eau, mais, une fois que la pâte a fait prise, son volume apparent ou brut demeure approximativement constant.

A n'importe quel stade de l'hydratation, la pâte durcie est constituée d'hydrates très mal cristallisés des différents composés considérés collectivement comme un gel, de cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de quelques composants mineurs, de ciment non hydraté et le reste d'espaces vides remplis d'eau dans la pâte fraîche. Ces vides sont appelés pores capillaires, mais, à l'intérieur même du gel, il existe des vides interstitiels, appelés pores de gel. La structure de la pâte du ciment a été représentée schématiquement sur la figure (I-2) par Power T.C [12]. La surface de la phase solide augmente considérablement pendant l'hydratation et une grande quantité d'eau libre se trouve adsorbée sur cette surface. Si aucun mouvement d'eau vers ou à partir de la pâte de ciment ne peut se faire, les réactions d'hydratation consomment presque la totalité de l'eau n'en laissant qu'une trop petite quantité pour saturer les surfaces solides, provoquant ainsi la diminution de l'humidité relative à l'intérieur de la pâte, ce que l'on appelle l'auto dessiccation. Etant donné que le gel ne peut se former que dans un espace rempli d'eau cette opération continue jusqu'à la fin du processus de durcissement [7, 13, 14].

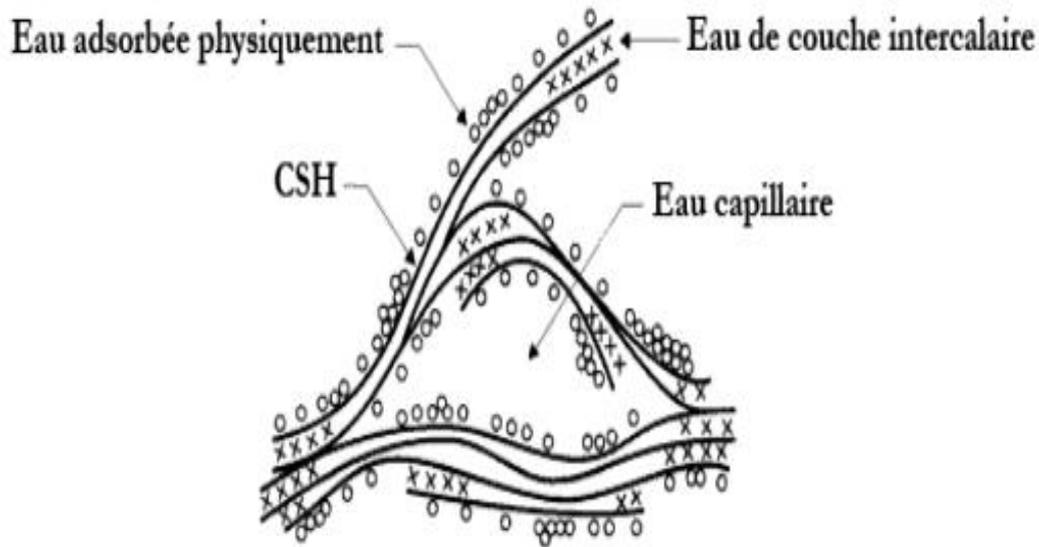


Figure.I.4.La structure de la pâte de ciment selon le modèle de Telemann et Sera da [7].

I.3. Les paramètres d'influence de la structure de la pâte de ciment :

I.3.1.Les conditions hygrothermique de conservation

La cause principale des fissures précoces qui apparaissent dès le jeune âge sur la surface des éléments d'un ouvrage est l'évaporation prématurée de l'eau de mélange, qui est l'action directe des conditions hygrothermiques (température, humidité relative) sur le béton frais. Si cette évaporation touche aussi l'eau nécessaire à la réaction d'hydratation, ce dernier risque d'être arrêté complètement le développement de la résistance mécanique s'arrête prématurément. Il est recommandé dense pas dépasser un taux d'évaporation de 1 Kg/m² par heure dans la phase plastique du béton [7]. Dans un béton exposé à un vent de 15 Km/h et une humidité relative de 25%, lorsque la température de conservation passe de 30 à 45°C, l'évaporation augmente de 0.77 à 0.9 kg/m². L'auteur confirme que l'évaporation diminue avec l'augmentation de l'humidité relative ; à 50% HR, elle est 10 fois celle à 95% HR.

I.3.2. Le mode de cure :

C'est la procédure utilisée pour maintenir le mortier ou le béton au cours de la formation de son structure (réaction d'hydratation) dans des conditions convenables (humidité, température) pour protéger le développement correct de ses propriétés physico mécaniques [9]. Le manque

de cure peut engendrer une diminution de la résistance et une augmentation de sa perméabilité [7, 8,10]. La cure peut être réalisée par différents procédés

Parmi lesquels :

Cure d'humidification par :

- Immersion ;
- Mise en atmosphère saturée ;
- Arrosage mécanique homogène ;

Cure de protection temporaire de l'imperméabilité par :

- Maintien des coffrages pendant la durée de cure ;
- Mise en place de bâches étanches maintenues en contact avec la surface à traiter ;
- Application de produits de cure qui sont à base de résine cire paraffine dissoute dans des produits pétroliers. Une cure efficace permet une hydratation uniforme du ciment, une réduction de la tendance de la pâte de ciment à se fissurer et elle lui offre une surface résistante aux intempéries et à l'abrasion [9].

I.3. 3.Cycle de Séchage-Mouillage

Les cycles de séchage-mouillage sont considérés toujours comme les conditions environnementales les plus défavorables pour les structures en béton en présence de chlorures. Dans ces conditions, la corrosion et la carbonatation se développent plus facilement dans le béton. Selon Pivoine et al (2003) [15], la température élevée de séchage (60°C) au cours des cycles de séchage –mouillage modifie la nature des hydrates et la microstructure des fissures. Dans la littérature, ils n'a y pas des résultats concernant l'influence des granulats de caoutchouc recyclés sur la résistance aux cycles de séchage-mouillage que ce soit au jeune âge ou au longue terme.

I.3. 4.L'effet des Sels :

La cause principale des dégradations de surface pouvant résulter de la diffusion des sels de déverglaçâtes dans les capillaires du béton est un accroissement des pressions osmotiques. L'importante chute de température de surface, due à la quantité de chaleur consommée pour provoquer la fusion de la glace, amplifie les effets du gel dans la zone du béton proche de la surface (la chute de température de surface peut atteindre 4 °C/minute au lieu de 4 °C/heure

habituellement). La peau du béton va donc se refroidir brutalement. Mais ce phénomène est rarement générateur d'un écaillage, car les sels de déverglaçats sont répandus dans la plupart des cas à titre préventif sur les ouvrages d'art des réseaux routier et autoroutier, pour garantir la sécurité des usagers. Il n'y a donc pas de film de glace lorsque les sels sont répandus. Parallèlement aux phénomènes essentiellement d'ordre physique, la présence des chlorures doit être considérée en vue de se prémunir des risques de corrosion des armatures, en respectant de manière rigoureuse les prescriptions relatives à l'enrobage [7].

I.4. Effet de l'adjuvant chimique sur les propriétés des matériaux cimentaires :

I.4.1. Hydrofuge :

Qui protège de l'humidité, qui fait une barrière contre une infiltration d'eau.

L'effet des hydrofuges est, comme déjà précisé, de rendre la surface d'un revêtement hydrophobe sans entraver le passage de vapeur d'eau. Pour ce faire, un hydrofuge ne peut pas boucher les pores mais doit pénétrer à l'intérieur et rendre l'entièreté de la surface, sur une certaine profondeur, répulsive à l'eau liquide [16].

Ainsi, la seule façon que les hydrofuges ont pour effectuer cette demande est de jouer sur les caractéristiques d'attraction de la surface en béton. La plus importante pour ce que nous étudions est "les tensions superficielles". En effet, toute surface présentant une tension superficielle supérieure à celle de l'eau, attirera celle-ci et lui permettra de pénétrer par capillarité. Or, le béton, sans protection, possède une tension superficielle de 80 mN/m contre 73 mN/m pour l'eau.

La couche permettant cet effet hydrophobe ne mesure que quelques nanomètres et ne détériore donc pas l'aspect de surface.

L'hydrofuge permet donc de réduire la tension superficielle à une valeur proche de 20 mN/m. Ainsi, les gouttes d'eau atteignant la surface seront attirées par les autres gouttes d'eau qui présentent une tension superficielle presque semblable. Grâce à cela, le comportement capillaire se trouve modifié et le comportement en surface voit apparaître "l'effet perlant".

En ce qui concerne le comportement capillaire, lorsque l'hydrofuge n'est pas mis en place, le réseau capillaire attire et aspire de l'eau en son sein. La pose d'un traitement hydrophobe diminuant la tension superficielle en surface et dans les pores permet d'inverser

totalement le comportement. En effet, l'eau se trouve repoussée hors du réseau capillaire. Une répulsion apparait grâce à l'impossibilité pour l'eau de pénétrer dans le réseau. Ce nouveau comportement capillaire peut être expliqué par l'effet perlant qui est détaillé au paragraphe suivant [14, 15,16].

I.4.1.1.Types d'hydrofuges :

a) Hydrofuge de masse :

Ce type d'hydrofuge ne peut être utilisé que lors de la préparation du béton vu qu'il consiste en l'incorporation d'adjuvants dans celui-ci afin de rendre sa surface imperméable une fois durcie.

Ce genre de produit n'est pas utile dans mon travail et ne sera plus étudié par la suite. Seuls les hydrofuges pouvant être appliqués sur des ouvrages existants seront considérés. Ainsi, les deux chapitres qui suivent définissent mieux ce type de traitement.

Pour au moins citer un hydrofuge de masse, des produits composés d'acide gras acyclique et d'une émulsion aqueuse, composée de polymère et de globules aromatiques.

Il protège l'entièreté du béton en l'imperméabilisant et en empêchant la dégradation par les sels, acides et autres. [15,16]

b) Hydrofuges superficiels :

Ce type d'hydrofuge, appelé également "enduit", ne pénètre pas le béton lors de sa pose sur celui-ci. Ces enduits forment une couche supplémentaire sur le béton en adhérant parfaitement bien à sa surface, grâce à des liens physiques. Ces types d'enduits ont, généralement, un bon pouvoir d'imperméabilisation et résiste bien aux [15,16].

Les caractéristiques de ces produits sont totalement indépendantes du béton devant être protégé. Ces produits peuvent présenter une bonne efficacité pour autant qu'une importante adhérence existe.

c)Hydrofuges pénétrants :

Ce type d'hydrofuge pénètre le béton et réagit avec celui-ci en profondeur. Ce produit ne bouche jamais les fissures mais recouvre plutôt les parois internes qui deviennent hydrophobes.

Bien entendu, si une fissure est très large ou si celle-ci est toujours active, l'utilisation d'hydrofuge n'aura pas une efficacité maximale, voire nulle.

Au niveau de la performance, de nombreuses influences peuvent exister comme [14,16] :

- L'arrêt ou la diminution de la pénétration d'eau et des substances agressives tout en laissant respirer le béton
- L'importance de la pénétration du béton. Celle-ci varie habituellement de 1 à 3 mm et dépend de nombreux facteurs tels que la dose de produit utilisé, le type de béton, les conditions climatiques lors de la mise en place, la préparation de la surface avant imprégnation et la technique de la mise en place.
- La résistance chimique des produits face aux chlorures et alcalis.

Deux groupes au sein de ce type d'hydrofuge peuvent être mis en évidence. Des produits pénétrants peuvent laisser une couche résiduelle en surface, alors que la majorité des hydrofuges pénétrant n'en laisse aucune.

Les produits laissant une couche résiduelle 6 utilisent celle-ci pour assurer l'arrêt de l'eau et des agents agressifs. Néanmoins, ce type de fonctionnement quitte légèrement la définition même d'un hydrofuge. En effet, l'apparition d'une couche crée une barrière à la vapeur d'eau et provoque une différence d'aspect à la surface [15,16].

Le deuxième groupe de produits, ne laissant pas de couche superficielle, est le plus fréquemment utilisé. Ces hydrofuges sont composés d'agents actifs en solution dans l'eau ou du solvant. Les grandes particularités de ce type d'hydrofuge sont le faible coût de ce traitement, la facilité d'application sans préparation de surface et le respect de l'aspect d'origine.

I.4.1.2.Familles et exemples d'hydrofuges

a)Enduits au latex :

Produits à base d'acétate de vinyle, d'acrylique et styrène et de résines acryliques. Même si largement utilisés, ces produits résistent peu aux UV et sont sensibles à l'humidité. Ainsi, leur utilisation sera privilégiée en intérieur. [14,16]

b) Ciment ou produits à base de ciment :

Distribués en poudre, divers types de ciment peuvent être créés en mélangeant cette poudre avec de l'eau ou un polymère au latex (émulsion de polymère et d'eau). [14,16]

c) Enduits polymériques :

Produits à base de résines diluées dans des solvants organiques. La couche active se dépose par simple évaporation du solvant. [16]

d) Résines époxy

Ces résines sont obtenues grâce au mélange de deux composants (résines époxy et un durcisseur). Une fois le mélange réalisé et le produit mis en place, celui-ci durcit en quelques heures pour devenir fortement rigide et résistant (aux attaques tant physiques que chimiques).

Mais outre ses bonnes caractéristiques, la production à grande échelle semble compliquée vu la nécessité d'un mélange de deux composants très peu de temps avant la mise en place. De plus, comme précisé plus haut, ce produit annule totalement la perméabilité à la vapeur et forme un film luisant (voire coloré) sur la surface [16].

Finalement, la résine époxy présente un coefficient de dilatation différent du béton.

e) Silicones :

La famille des silicones organiques est certainement la plus étudiée et la plus utilisée actuellement. Plusieurs sous-familles de produits existent en fonction de la taille des molécules de l'agent actif. En effet, les silicones sont des polymères composés par une répétition d'un ou plusieurs monomères. Les éléments présents au sein de ces monomères ont, comme pour le silicate, de l'oxygène et du silicium. La différence avec les hydrofuges inorganiques vient de la présence dans les polymères de groupes organiques tels que des hydrocarbures [15,16]

La principale caractéristique de ce type d'hydrofuge est l'absence totale de film à la surface et de liens physiques avec le béton. Celui-ci pénètre au sein des pores, sans les boucher, et réagit chimiquement avec le béton. Cette pénétration est influencée par le poids moléculaire et le type de solvant utilisé. Plus la taille moléculaire est faible, plus l'agent actif peut pénétrer en profondeur.

Pour que les produits agissent, deux réactions chimiques doivent avoir lieu : La première est l'"hydrolyse" qui consiste à faire réagir les molécules de silicones avec l'humidité pour former des groupes silanes. Ceux-ci réagissent eux même avec les groupes.

I.4.2. Adjuvant type Plastifiant :

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et en modifient la viscosité. Ils augmentent la maniabilité tout en réduisant la quantité d'eau de gâchage, ce qui facilite la mise en place des bétons. Ils permettent d'augmenter la compacité du mélange, ce qui se traduit par une amélioration des résistances.

I.4.2.1. Plastifiants – réducteurs d'eau :

Ces adjuvants ont pour fonction principale de conduire, à même ouvrabilité, à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau d'un béton. Ils permettent aussi d'augmenter la plasticité du béton à teneur en eau constante et donc de faciliter sa mise en œuvre. Ils provoquent une défloculation des grains de ciment. En effet, il existe à la surface des grains de ciment des forces d'attraction qui ont tendance à les faire s'agglomérer entre eux sous forme de flocons ou flocs et piéger une partie de l'eau du mélange. Ils dispersent les grains de ciment et libèrent l'eau piégée, ce qui génère un gain de fluidité. Ils augmentent la compacité du béton par réduction de l'eau de gâchage. Ils permettent aussi de réduire le risque de ségrégation des bétons.

Ces adjuvants peuvent être à base de lignosulfates, de sels d'acides organiques, de naphthalène (poly- naphthalène sulfonaté)...

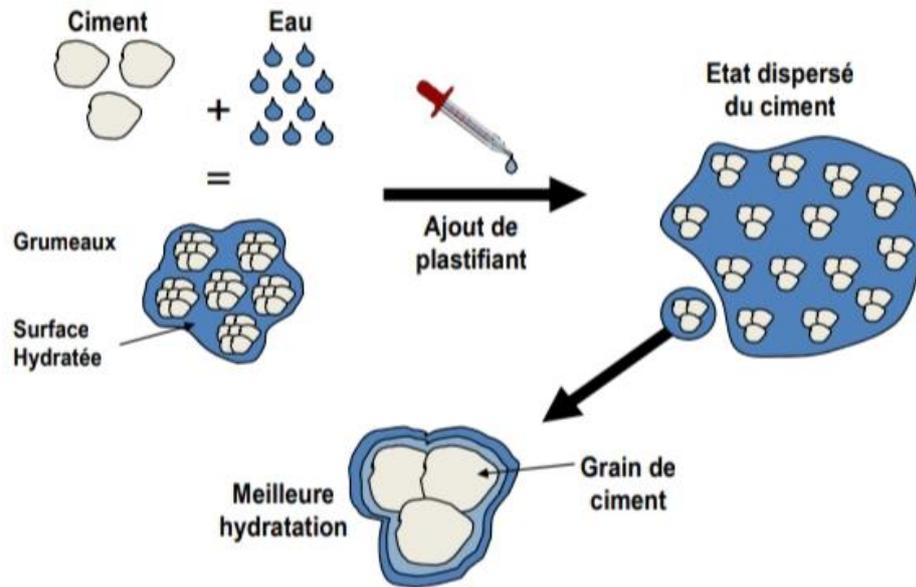


Figure I -1 : Mode d'effet d'un plastifiant

I.4.1.2. Super-plastifiants – hauts réducteurs d'eau :

Ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange tout en conservant les performances mécaniques. Ils permettent aussi, sans modifier la consistance (ou maniabilité) du béton, de réduire fortement la teneur en eau de gâchage et donc le rapport E/C. Ils confèrent aux bétons des résistances mécaniques à court terme et à très long terme élevées. Ils peuvent offrir un long maintien de rhéologie et limitent les risques de dessiccation et de ségrégation. Ils facilitent la réalisation des reprises de bétonnage. Ils conduisent à des bétons à compacité élevée grâce à la forte réduction d'eau, gage de durabilité. La montée en résistance rapide des bétons permet des décoffrages rapides.

Ils offrent 5 propriétés :

- ❖ soit d'améliorer considérablement la consistance du béton à teneur en eau constante et donc de faciliter sa mise en place ;
- ❖ soit de réduire fortement la teneur en eau, à consistance identique, et ainsi d'améliorer les résistances mécaniques du béton durci.
- ❖ Ils ont considérablement amélioré les performances des bétons et ont permis notamment le développement des Bétons à Hautes Performances (BHP), des Bétons

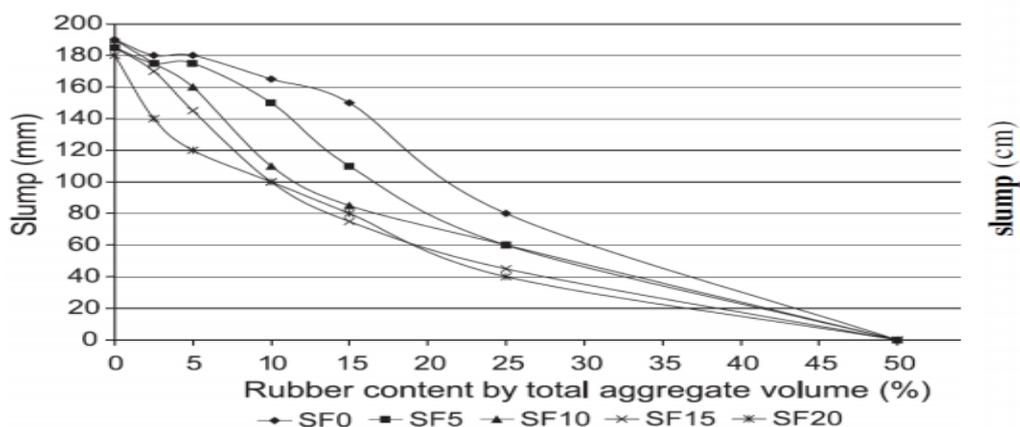
Fibrés à Ultra hautes

- ❖ Performances (BFUP) et des bétons autobloquants (BAP).
- ❖ Ce sont en général des produits de synthèse organique : poly carboxylates, polyacrylates, dérivés de naphthalène et mélamines sulfonés

I.5. Les propriétés des bétons de caoutchouc

I.5.1. Effets de GCR sur les propriétés fraîches du béton

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton, dans la pratique, on se base souvent sur des essais d'ouvrabilité dont le résultat est quantifié par l'affaissement ou par l'étalement dans le cas du béton auto-plaçant. Güney si et al. [16] ont étudié des propriétés mécaniques des bétons de caoutchouc dont de 0% à 20% de la masse du ciment est remplacée par la masse de fumée de silice (SF). La Figure I.6 illustre l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en G.C. et du dosage X% de la fumée de silice SF. Ces auteurs observent que l'affaissement du béton est diminué avec l'augmentation de caoutchouc. Pour le dosage de 50% de G.C., l'affaissement est presque nul.



(a)

Figure I.6 : Influence de G.C. sur l'affaissement [16].

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des G.C. en substitution des granulats naturels a

naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Comme le montre la Figure I.7, Güney si et al. [16] ont observé une chute de 25% de la masse volumique avec un taux de substitution de 50% de G.C. par rapport au béton de référence (la légende étant celle utilisée précédemment à la Figure I.7

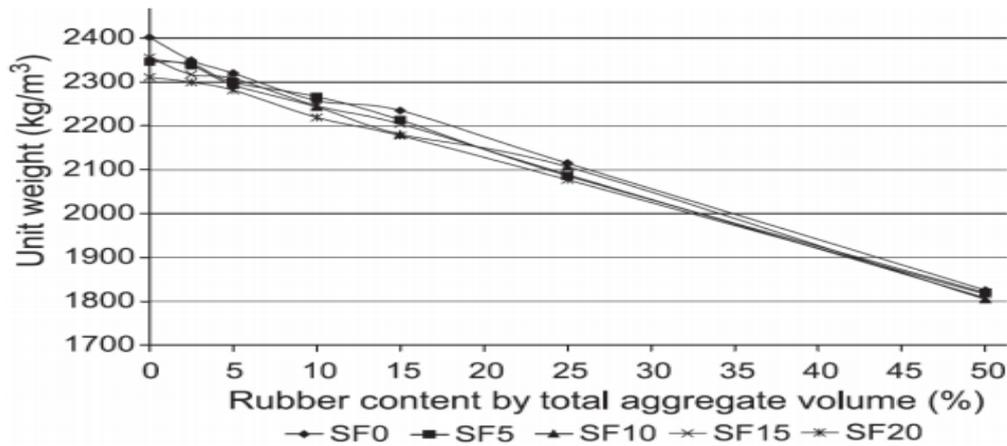


Figure I-7 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des GCR [16].

Concernant la teneur en air occlus, beaucoup des chercheurs [17, 18, 19,20] ont noté qu'elle augmente avec le volume de caoutchouc. C'est ce qui est illustré par la Figure I.8 où le groupe A correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par des G.C. fins, le gravier a été remplacé par de gros G.C. dans le cas du groupe B tandis qu'ils ont substitué le sable et le gravier par des G.C. fins et gros dans le cas du groupe C. Ces auteurs ont observé que la teneur en air occlus du groupe B est inférieure à celle du groupe A lorsque le volume de caoutchouc dépasse 30% du volume total des granulats. Cette diminution peut être expliquée par la compacité plus élevée pour le groupe B à même volume de G.C. Ces chercheurs pensent que la surface rugueuse des particules de caoutchouc sont les principales causes de l'augmentation de la teneur en air occlus du béton incorporant des G.C.

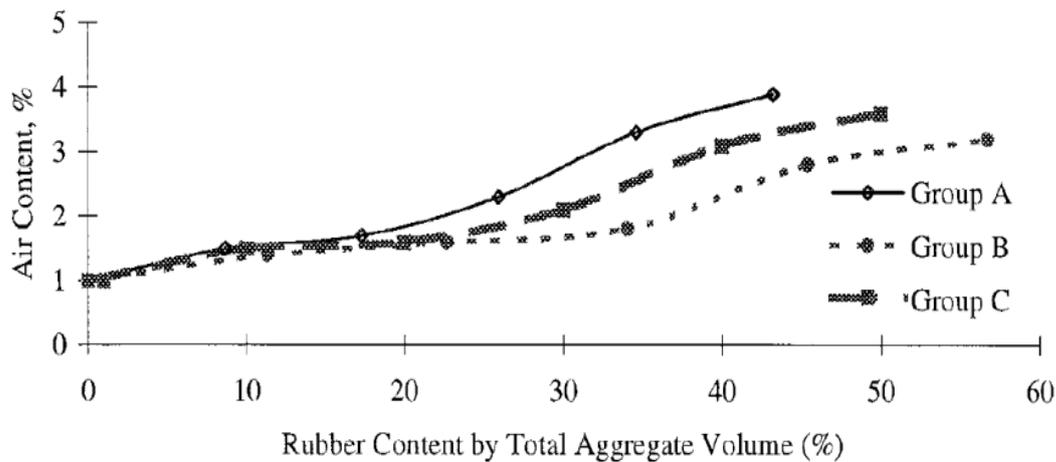


Figure I-8 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [17].

I.5.2. Propriétés à l'état durci du béton incorporant des G.C.

I.5.2.1. Résistance en compression

La caractéristique essentielle des matériaux cimentaires durcis est la résistance en compression à un âge donné. Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance des propriétés mécaniques est indispensable pour le dimensionnement des ouvrages. Ainsi, l'étude de cette résistance en compression peut permettre d'avoir une idée globale sur la qualité du béton. On verra que la résistance en compression du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et dosage des matériaux utilisés, la nature des granulats, la porosité, la condition de réalisation et de cure, etc. Les chercheurs qui ont travaillé récemment sur les matériaux cimentaires incorporant des G.C. ont tous relevé que la substitution de granulats naturels par des G.C. entraînait inévitablement une chute de la résistance en compression.

L'examen des résultats obtenus par Garros [18] lui a permis de préciser l'impact du dosage et de la taille des G.C. sur ce paramètre dans le cas de BAP. Ses résultats illustrés par la Figure I-9 ont confirmé que la présence de G.C. est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. Une chute jusqu'à 86% de la résistance est observée pour les composites les plus dosés en G.C. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 5 MPA lui a imposé un taux maximal de substitution de 25%.

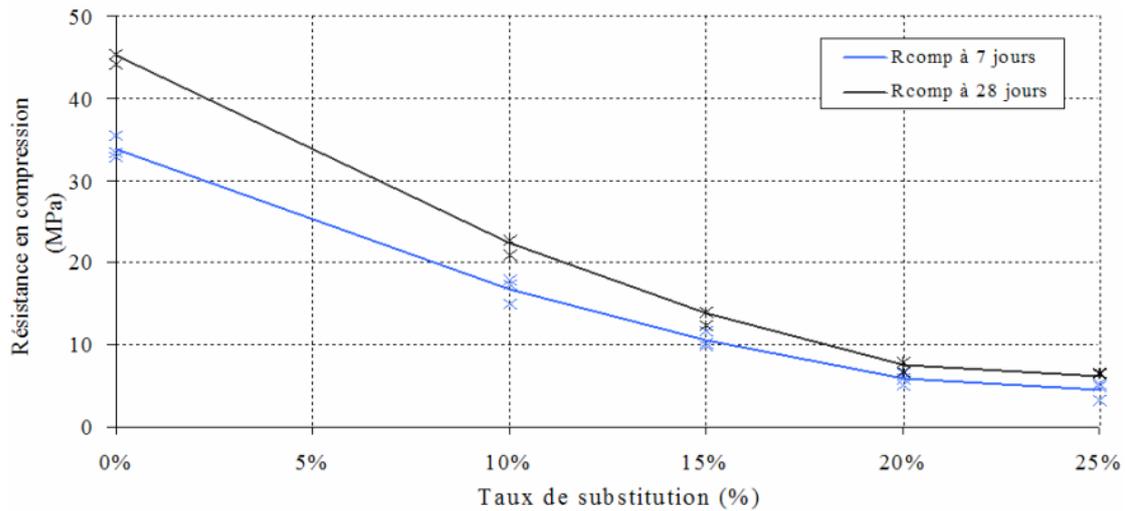


Figure.I.8 : Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des G.C. 0-4mm), [18].

I.5.2.2. La résistance à la traction

Dans l'étude de Güney si et al. [16] rapportée dans les pages précédentes, les auteurs observent une tendance baissière de la résistance en traction similaire à celle de la résistance en compression. Cependant, à même taux d'adjonction de G.C., la chute de la résistance en traction s'avère moins importante par rapport à celle observée en compression. La variation de la résistance en traction (mesurée par le biais d'essais de fendage) en fonction du taux d'adjonction des G.C. est illustrée par la Figure I-11 (le reste de la légende étant celui utilisé précédemment).

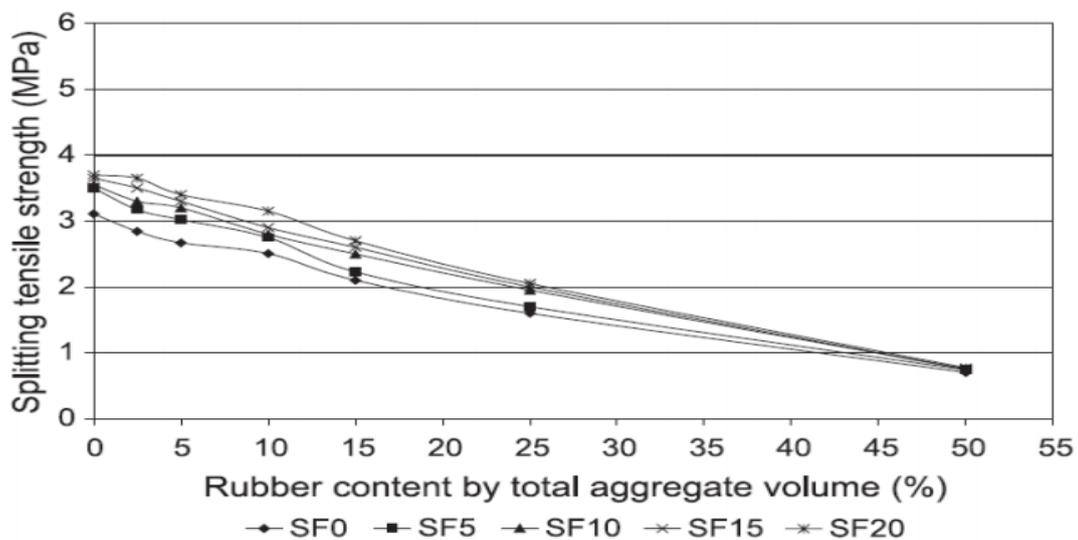


Figure.I.9. Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage [16].

I.5.2.3. L'absorption d'eau

S'agissant de l'absorption d'eau, les résultats de Benazzouk et al. [20] ont montré que la capacité d'absorption d'eau diminue avec le taux d'incorporation des G.C., ce comportement est expliqué 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.

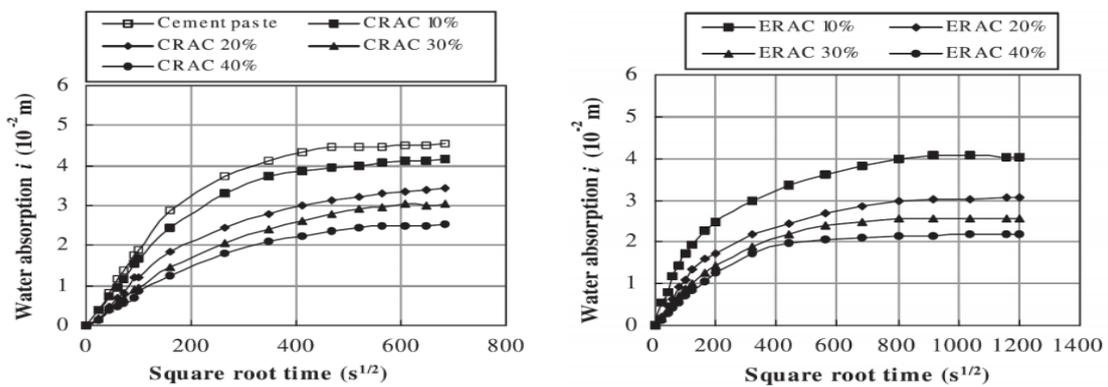


Figure I-30 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en G.C [20].

I.5.2.4. Capacité de déformation

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

Beaucoup des travaux ont été conduit [19, 20,21] montrés que, malgré la chute de la capacité portante en traction par flexion, les blocs de béton incorporant des G.C. présentent une flèche significativement plus importante en comparaison du bloc en béton de référence. Ces résultats révèlent que les composites des caoutchoucs ont une capacité de déformation plus élevées comparativement au béton de référence, cette bénéfique propriété, permet d'améliorer la ductilité et diminue la fragilité des matériaux cimentaires.

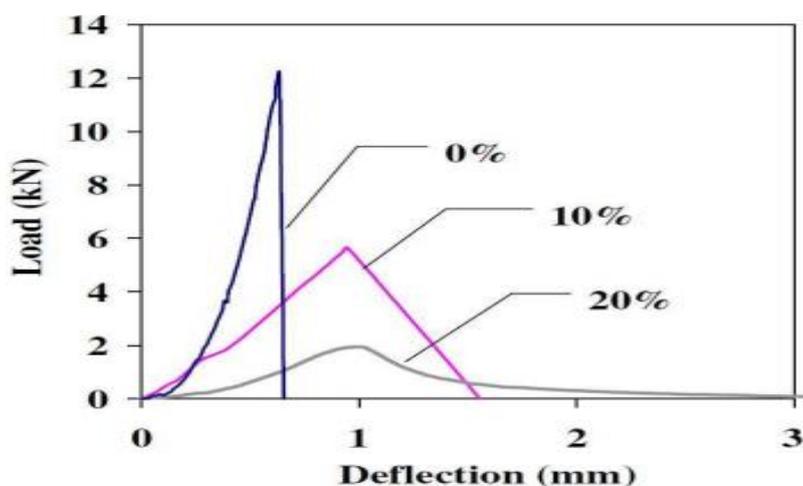


Figure I-15 : Comportement en flexion des blocs de béton caoutchouc, [19].

Des résultats similaires ont été obtenus par plusieurs chercheurs [18,19] qui a montré que la flèche associée à la charge maximale en flexion est plus importante lorsque la fraction du volume de sable remplacé par des granulates en caoutchouc (0, 30 et 50%) est plus élevée.

I.5.2.5. Comportement au Feu

Les récentes études, conduit par Geline [22] sur le comportement des mortiers de caoutchouc aux températures élevées, incorporant un taux de granulates de caoutchouc allant de 0 à 9%, montre que les composites de caoutchouc exposés aux quatre cycles de chauffage-refroidissement, ont des réponses thermiques similaires comparativement au mortier de référence (figure.I.21).

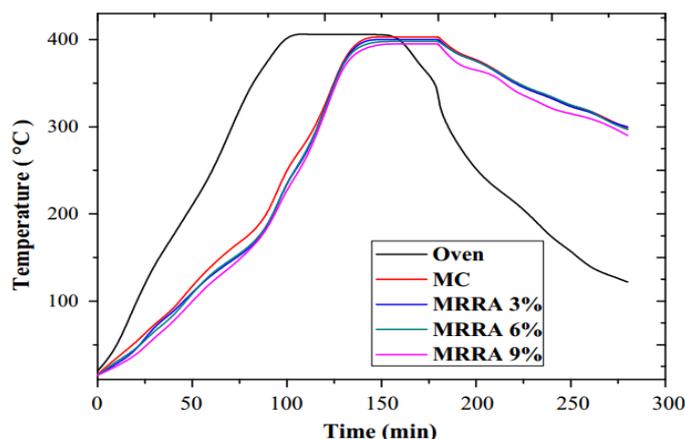


Figure.I.22. la montée en température du four et des mortiers étudiés pour différents taux des granulats de caoutchouc recyclés [22].

De plus, les spécimens non montrent aucun signe d'écaillage de surface ou d'éclatement. Néanmoins, les mortiers contenant plus de 3% des granulats de caoutchouc recyclés ont menacé par la décomposition de ces derniers (brûlage), ce comportement montre que les granulats de caoutchouc sont très sensibles aux températures au-delà de 200°C.



Figure.I.23. Vue des demi-spécimens exposés aux quatre cycles de chauffage-refroidissement à la ambiants (20°C) et à la température 400°C [22].

Les mêmes les composites cités ci-dessus, les propriétés physico-mécaniques (la perte en masse, la vitesse d'impulsion ultrasonique, la porosité ouverte, la résistance à la compression et la résistance à la traction) composites étudiés sont stables pour les températures jusqu'à 200°C. Au-delà de ce seuil, les propriétés physiques des composites étudiés sont menacés par la décomposition des granulats de caoutchouc, notamment pour les mortiers incorporant les dosages supérieurs à 3% (figure.I.24 et I.25). Donc, pour maintenir la stabilité physico-mécaniques des composites cimentaires incorporant les granulats de caoutchouc sous l'effet de température le dosage de ces derniers ne doit pas dépasser 3%. Dans cette limite on peut utiliser les granulats de caoutchouc avec les matériaux cimentaires en toutes sécurités.

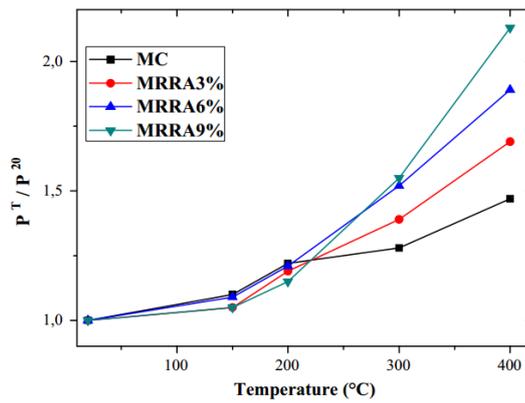


Figure.I.24. Evolution de la porosité ouverte relative des mortiers étudiés en fonction de la température de chauffage [22]

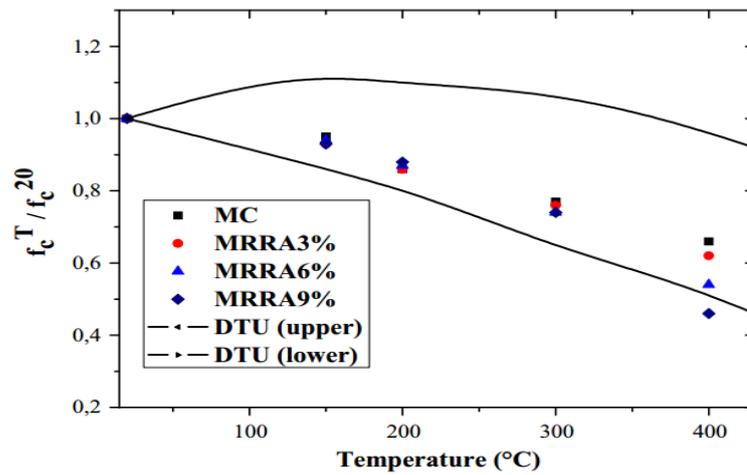


Figure.I.25. Comparaison entre les résultats de la résistance à la compression relative de cette étude et ceux de DTU [22].

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentales

II-1) Introduction :

L'objectif principal de cette étude, est l'évaluation expérimentale de l'effet des adjuvant chimiques comme l'hydrofuge et le super-plastifiant, sur le comportement de mortier de ciment incorporant les granulats de caoutchouc recyclés GCR. La première partie de ce chapitre concerne la caractérisation des matières premières, utilisées pour la fabrication des différents matériaux. La seconde partie sera consacrée à la formulation, la préparation et la conservation des matériaux. Par la suite, on décrit les méthodes expérimentales utilisés pour évaluer les propriétés frais et durcis des mélanges préparés.

Des matériaux. Par la suite, on décrit les méthodes expérimentales utilisées pour évaluer les propriétés frais et durcis des mélanges préparés.

II-2) Caractérisation des matières premières :

II.2.1) Essai sur les granulats utilisé :

II.2.2) Analyse granulométrique : NFP.18-560[21]

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. On utilise une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par tamis est. La courbe qui relie le pourcentage des passants aux diamètres des tamis est appelée courbe granulométrique. A partir de l'analyse Granulométrique, certains coefficients de classification peuvent être déterminés :

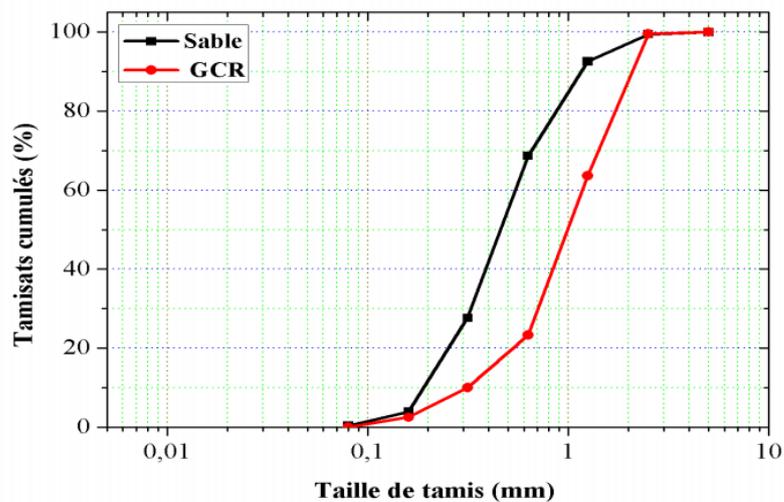


Figure II.1 : Analyse granulométrique

B. Module de finesse :

La finesse du sable étudié peut être quantifiée par le calcul du module de finesse M_F . celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis d'ouverture 0.08-0.16-0.315-0.63-1.25-2.5- et 3.15 le module de finesse représente, en quelque sorte, et de manière approchée, la surface comprise entre la courbe granulométrique et l'axe horizontale supérieure du graphe. Il est exprimé par la formule suivante :

$$M_F = \frac{[\sum \text{des refus des tamise (0.08;0.16;0.315;0.63;1.25;2.5;3.15)en(\%)]}{100} \quad (\text{II. 1})$$



Figure(II.1) : Courbes Granulométriques des Granulats utilisés.

D'après la courbe granulométriques, on remarque que les granulats de caoutchouc recyclés sont plus fins de les granulats de sable de dune.

I.2.1.2 Equivalent de sable : NFB.18-598[21]

L'essai d'équivalent de sable permet de mesurer la propreté d'un sable, il est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent. La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat. Ce coefficient est déterminé conformément à la norme **NFP.18-598**. **ON** détermine la qualité des sables par les coefficients suivants :



Figure II.2 : Essai d'équivalent de sable.

L'équivalent du sable visuel : $E_s = h'2/h1$ (II.2)

L'équivalent du sable par piston : $E_{sp} = h2/h1$ (II.3)

Avec :

$h2, h'1$: hauteur du sable propre seulement avec et sans piston ; $h1$: hauteur du sable + les éléments fins.

II.2.1.3 Masse volumique apparente et absolue :

La masse volumique apparente et absolue des différents granulats est déterminés conformément à la norme **NFP 18-555[3]**.

- **Masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente est le rapport de la masse d'échantillon sec M au volume total apparent V_{tt} . Il s'agit de rempli un volume de 1 dm^3 et déterminer sa masse M par peser, soit :



Figure II.3 : Masse volumique apparente

- **La masse volumique absolue :**

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Pour déterminer celle-ci, on utilise la méthode de l'éprouvette graduée. Pour opérer dans de bonnes conditions, on utilise une éprouvette graduée en verre de 500 cm^3 . Le volume du liquide déplacé détermine le volume absolu V_s des grains solides.

$$\rho_s = M/V_s \quad \text{(II.4)}$$

II.2.2.1 Surface spécifique :

La surface spécifique de Blaine est la surface totale en cm² développée par 1g de, elle est mesurée conventionnellement selon la norme **NFP 15-476[21]**. La surface spécifique d'un liant est calculée en déterminer le temps que met un volume d'air constant, sous une pression déterminer et à la température connue, pour traverser une couche du liant Tassé. La surface spécifique de Blaine est calculée en utilisant l'expression suivante :

$$SSB = k \frac{\sqrt{e} \sqrt{t}}{\rho_s (1-e) \sqrt{\eta}} \quad (\text{cm}^2 / \text{g}) \quad \text{(II.6)}$$

Avec :

t ; le temps de passage de l'air entre les deux traits en seconde ; k : la constante de l'appareil (ici égale à 43) ; e : la porosité de la couche tassée (égal à 0.5) ; ρ_s : la masse spécifique du ciment (g/cm³) et η : la viscosité dynamique de l'air à la température de l'essai.

II.2.2.2 Masse volumique absolue : NFP 18-558[21]

On déterminer la masse spécifique d'un liant par le densimètre le Chatelier. La masse spécifique peut être indice de la qualité du liant, en générale, sa valeur permet de déceler l'introduction des adjuvants ou des produits étrangers au liant la masse spécifique est la masse d'un liant par unité de volume de matière pleine, examine dans les conditions ambiantes (température, pression) constantes.

Afin de réaliser cet essai, il faut que le liant à analyse soit nettement pulvérisé en se servant du benzène ou d'une essence minérale n'ayant pas une action chimique sur le liant à analyser, la température doit rester constante pendant l'opération (18-20°C).

- On pèse 60g du liant ;
- On introduit cette quantité dans le densimètre le Chatelier déjà rempli du benzène jusqu'à un niveau déterminé ;

- On introduit le densimètre dans un bain thermostatique à une température de $(20 \pm 1^\circ\text{C})$;
- Lorsque le niveau du benzène devient stable on note le volume déplacé V ;
- On calcul la masse spécifique par la formule suivante.

$$\rho_s = \frac{M}{V_s} \text{(II.7)}$$

Ou ; M est la masse du liant dans le densimètre.

II.2.2.3. Masse volumique apparente :

La densité apparente d'un matériau est le poids d'une unité de volume de matériau. Il s'exprime en kg/m^3 . A cet effet on se sert des équipements suivants :

- 1-un entonnoir ;
- 2- un récipient d'un litre de volume
- 3-une réglette ;
- 4-une balance précision 0.01g.

➤ L'essai consiste à :

- 1-Tarer le récipient M_1 ;
- 2-Remplir le récipient posé au- dessous de l'axe de l'entonnoir avec la poudre de ciment ;
- 3- Faire l'opération sans vibration. Raser avec la réglette appuyée sue les borde de récipient ;
- 4-nettoyer l'extérieur du récipient ;
- 5-Peser de nouveau le récipient rempli, soit M_2 , sa masse

La masse volumique apparente est calculer par :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M_2 - M_1}{V} \text{(II.8)}$$

II.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage remplit deux fonctions principales, d'une part, une fonction physique qui permet de conférer au mortier les propriétés de fluidification et d'autre part une fonction chimique qui contribue à la réaction d'hydratation. L'eau de gâchage des mélanges de mortiers confectionnés est issue directement du robinet du réseau public d'eau potable. Ces propriétés chimiques n'ont pas fait l'objet de la présente étude. Donc, elle est supposée propre et ne contenir aucune impureté nuisible conformément à la norme NF.18-303.

II.3. Etude du mortier frais :

II.3.1 Préparation des mortiers étudiés :

Le malaxage de mortier a été réalisé à l'aide d'un malaxeur pour mortier muni d'un axe de rotation vertical. Celui-ci est effectué d'une façon identique pour tous les types de mortiers dans l'objectif d'obtenir une pâte homogène, nous avons suivi les étapes suivantes :

L'eau est introduire en premier dans la cuve du malaxeur ; ensuite on y verse le ciment ;

Aussitôt après mettre le malaxeur en marche à vitesse lente. Après 30s de malaxage on introduit régulièrement et de manière rapide le sable et continuer La malaxage 1min30s pendant les première 15 secondes, enlever au moyen d'une raclette en métal tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en repoussant vers le milieu de celui-ci. On reprendra ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s. Le mortier ainsi préparé est versé en fin du malaxage dans des moules 4*4*16cm³, ceux –ci subiront par la suite des chocs (2*60 coups) à l'aide d'une table à choc afin de dégager toutes les bulles d'air occluses lors de la mise en moule et d'homogénéiser la structure des éprouvettes préparées, après la fin de l'opération, on araser la partie du mortier en excès. Le démoulage se fait 24 heures après remplissage des moules. La conservation des éprouvettes s'effectuera dans l'ambiance du laboratoire à 20±2°C et HR=55±5% et dans l'eau pour subir une cure humide.



Figure II.4 : malaxeur normalisé EN 196-1.

Tableau II.1 : Opération de malaxage des mortiers

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Introduction du sable, faire le malaxage		Raclage de la cuve	Reprendre le malaxage	
Durée			30 s	30 s	15 s	1mn 15s	Durée
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Arrêt		Vitesse rapide

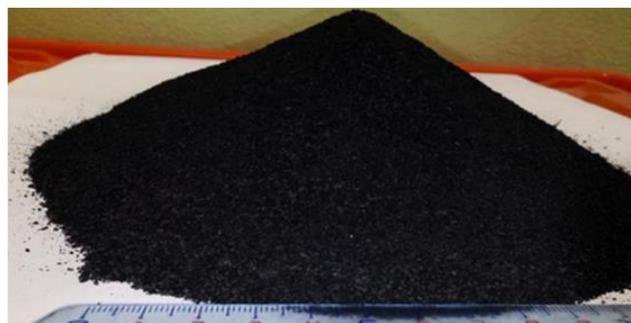


Figure II.6 : Granulats de Caoutchouc utilisés.

Tableau II.2 : Composition des mortiers préparés

Group	Mélange	Rapporte E/C	Ciment (g)	Eau (g)	Sable (g)	Granulats de caoutchoute (g)	Super-plastifiant (g)	Hydrofuge (g)
A	M1	0.50	450	225	1350	0	0	0
	M2	0.50	450	225	1296	54	0	0
	M3	0.50	450	225	1255	95	0	0
	M4	0.50	450	225	1215	135	0	0
B	M5	0.50	450	225	1296	54	2.25	0
	M6	0.50	450	225	1255	95	4.5	0
	M7	0.50	450	225	1215	135	6.75	0
C	M8	0.50	450	225	1296	54	0	2.25
	M9	0.50	450	225	1255	95	0	4.5
	M10	0.50	450	225	1215	135	0	6.75

Si préparé est versé en fin du malaxage dans des moules 4*4*16cm³, ceux-ci subiront par la suite des chocs (2*60coups) à l'aide d'une table à choc afin de dégager toutes les bulles d'air occlues lors de la mise en moule et d'homogénéiser la structure des éprouvettes préparés, après la fin de l'opération, on arase la partie du mortier en excès, le démoulage se fait 24 heures après remplissage des moules. Après démoulage, les éprouvettes préparées ont été conservés dans un bac l'eau de robinet durant 28 jours (T= 20±2°C et HR=100%). Par la suite, les éprouvettes sont conservés dans l'environnement de laboratoire jusqu'au jour de l'essai (T= 20±2°C et HR= 40 ± 5%). Les propriétés des éprouvettes exposées à l'acide sulfurique et le gel/dégel ont été évaluées en fin de chaque attaque puis comparés avec des spécimens de références.

II.4. Essai physico-mécaniques sur le mortier frais :

II.4.1.Ouvrabilité :

Il s'agit de trouver une composition optimale permettant d'avoir une bonne cohésion entre les grains de la pâte de mortier, ainsi qu'une bonne mise en œuvre. La maniabilité du mortier est réalisée par l'essai l'étalement conformément à la norme **EN 459-2** :



Figure II.7 : Essai d'ouvrabilité

II.4.2.1.Mode opératoire

Préparer le mortier conformément à la norme **EN 196-1**. Si la table d'écoulement n'a pas fonctionné pendant l'heure précédant l'essai, la faire fonctionner à vide plusieurs fois. Nettoyer et sécher avec beaucoup d'attention le plateau de la table. Placer le moule tronconique au centre de la table à chocs (centrage à l'aide du cercle gravé sur le plateau). Remplir le moule en 2 couches. Chaque couche doit être étalée en la compactant légèrement 10 fois à l'aide de la tige de compactage (pilon en bois). Araser puis lisser. Nettoyer la table d'écoulement et essuyer toute trace d'eau à proximité du moule. Programmer le tableau de commandes : taper 1 fois sur la touche de sélection (des 0 apparaissent à l'écran) puis plusieurs fois pour atteindre la décimale des dizaines (celle-ci doit clignoter). Incrémenter pour rentrer le nombre 1 pour la dizaine.

Taper 1 fois sur la touche de sélection pour atteindre la décimale des unités (celle-ci doit clignoter). Incrémenter pour rentrer le nombre 5 pour l'unité. Taper 1 dernière fois sur la touche de sélection pour valider le nombre 15 seul le nombre 15 s'affiche à l'écran. Retirer le moule verticalement. Soumettre le mortier à 15 chocs à raison d'1 choc par seconde en appuyant sur la touche START. Evaluer la valeur de l'étalement dans 2 directions perpendiculaires, la moyenne de ces mesures donnée à 1mm près représente l'écoulement.

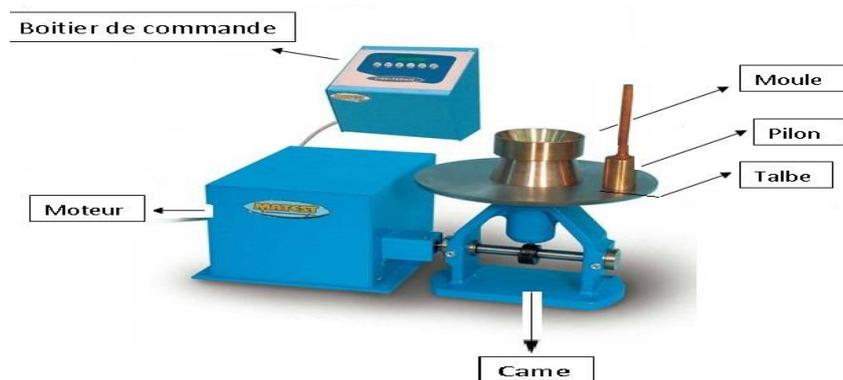


Figure II.1 : table d'étalement.

II.5. Essai physico-mécaniques sur le mortier durci.

II.5.1. Propriétés physiques :

II.5.1.1. Absorption par immersion :

C'est la propriété d'un milieu poreux. Elle est obtenus par un essai d'immersion dans le potable sur des éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Les éprouvette sont séchées pendant 24h à l'étuve à 105°C , puis, en émergeant dans un bac d'eau potable jusqu'à la stabilisation total de la masse de l'éprouvette [9]. On calcule la porosité ouverte par la formule suivante :

$$P = \frac{m^{\text{sat}} - m^{\text{sec}}}{m^{\text{sec}}} \times 100 \text{ (II.9)}$$

P : la porosité ouverte, accessible à l'eau.

m^{sat} : la masse saturée.

m^{sec} : la masse sèche.

II.5.1.2 Masse volumique apparente :

Par définition, la masse volumique apparent sèche ρ_{app} est le rapport de la masse de l'échantillon M à son volume apparent sec V_t . L'état sec est obtenu par séchage de l'échantillon en étuve à 105°C jusqu'à masse constante, les pesées sont effectuées à 0.1g près et les dimensions des échantillons sont déterminées à l'aide d'un pied à coulisse avec précision de 0.1mm . la masse volumique apparente est la moyenne des mesures effectuées sur trois échantillons de chaque composition.

II.5.1.3.La sorptivité :

Expérimentalement, la sportivité est déterminée directement par une méthode gravimétrique en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'échantillon par unité de surface absorbante en fonction de la racine carrée du temps. La courbe d'évolution obtenue généralement une droite dont la pente exprime la sportivité du matériau. La quantité d'eau absorbée est mesurée à des intervalles de temps par pesée avec une précision de 0.1g , le volume d'eau étant déduit connaissant la masse volumique de l'eau liquide ($1\text{g}/\text{cm}^3$). Le taux d'absorption volumique par unité de surface i (m^3/m^2) à un instante

T , donnée a calculé par la formule suivante :

$$i = \frac{m(t)-m(0)}{A\rho_1} \quad (\text{II.10})$$

Où : ρ_1 est la masse volumique de l'eau liquide = $1\text{g}/\text{cm}^3$.

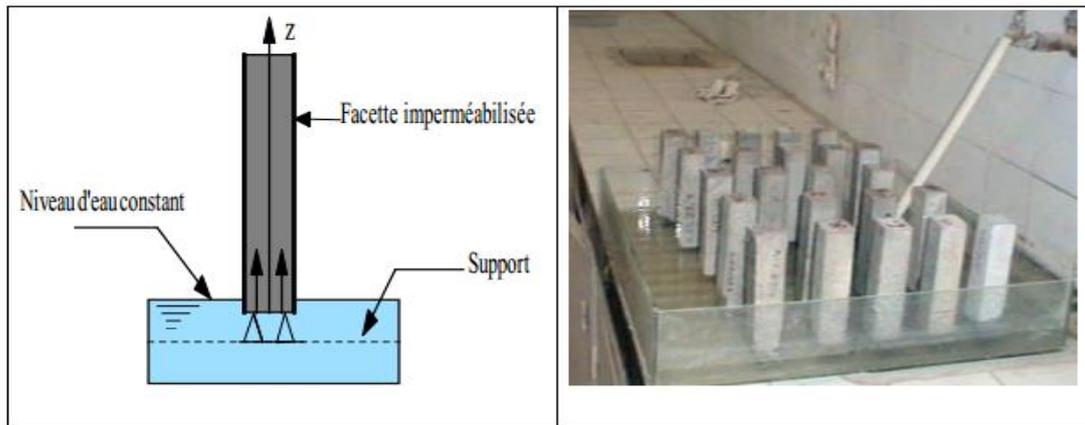


Figure II.2 : Dispositif de mesure de la sportivité par capillarité.

II.5.1.4. Essai Ultrasonique :

✓ Principe de l'essai :

Le principe des ultrasoniques est qu'un signal électrique est transformé en onde de déformation par un transducteur piézoélectrique cette onde se propage dans l'éprouvette de béton ou de mortier elle est capturée par le transducteur récepteur. Le temps de propagation ainsi que la vitesse des ondes ultrasoniques sont alors déduits.

✓ Matériels utilisés :

Pour la mesure des vitesses ultrasoniques, le matériel suivant est utilisé :

1-Unité d'affichage : l'unité d'affichage a les caractéristiques suivantes :

*Mémoire non volatile d'une capacité 250 mesures.

*Ecran LCD graphique de 128x128 points

*Plage de mesure environ 15 à 6550 μ s

*Impulsion de tension 1 kV

*Plage de température -10° à +60°C

2- Deux (2) transducteurs de 54 kHz

3- Deux câbles BNC

4- Barre d'étalonnage

5- Boite d'agent couplant de 150ml (ou le petroleumjelly).



Figure II.14 : Appareillage pour l'essai ultrasonique.

✓ **Mode opératoire :**

➤ **Étalonnage de l'appareil :**

Avant de commencer l'essai un étalonnage de l'appareil est nécessaire pour la précision et la fiabilité des résultats. Pour cela on branche les transducteurs à l'unité d'affichage à l'aide des câbles BNC et on applique une mince couche de pâte de contact entre les surfaces de la barre et des transducteurs, on règle la distance sur 0,2m, on applique l'onde ultrasonique et on assure que le temps donné est de 20,3 μ s. L'étalonnage est ainsi terminé.

➤ **Processus de mesure :**

- On mesure la distance entre les points de mesure (c'est la longueur de l'éprouvette)
- On applique une couche de l'agent couplant sur la surface de contact des transducteurs et des éprouvettes (couche mince pour le béton lisse, épaisse pour un béton rugueux)
- On appuie sur la touche START pour commencer la mesure.

✓ **Méthode de calcul :**

Du fait de l'hétérogénéité du matériau, l'interprétation des signaux ultrasoniques n'est cependant pas facile. Généralement, les tests sont souvent basés sur la mesure des vitesses de

propagation des ondes ultrasoniques longitudinales. La vitesse de l'onde traversant un solide élastique est donnée par l'expression suivante [26] :

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Le module d'Young (dynamique) E peut être exprimé en fonction de V, ν et ρ à l'aide de la formule suivante :

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \rho V^2$$

Avec :

V : vitesse d'onde mesurée en Km/s ; E : module d'élasticité dynamique en Gp.

ν : coefficient de poisson.

II.6.2. Propriétés Mécaniques :

II.6.2.1. Résistance à la flexion : norme EN196-[21]

L'essai consiste à estimer les résistances à la traction par flexion des éprouvettes de mortiers élaborés. Le dispositif de flexion (photo II.1) comporte deux appuis à section semi-cylindrique de 10mm de diamètre, distant de 100 ou 106.7mm sur lesquels repose l'éprouvette prismatique, un troisième appui de même diamètre, équidistant des deux premiers permet de transmettre la charge de rupture F (figure II.2). Afin d'avoir une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, les deux appuis doivent pouvoir légèrement tourner autour de leur centres, dans le plan vertical perpendiculaire aux axes des éprouvettes. La résistance à la flexion est calculée selon la formule :

$$Rf = \frac{3F_f L}{2b^3} [\text{Pa}] \dots\dots\dots (\text{II.11})$$

Avec :

F : charge de rupture en (N) ;

B : largeur de l'éprouvette ;

L : distance entre les appuie en m ;

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure (II.3) et dans la photo (II.9).

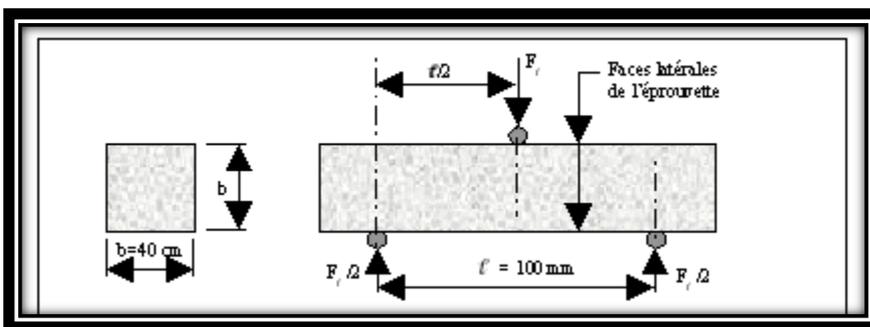


Figure II.3 : Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion

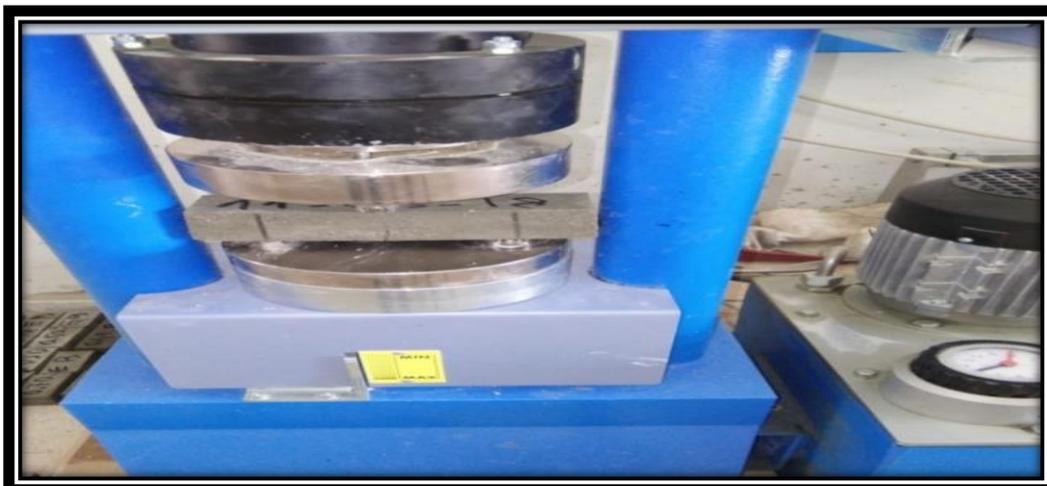


Figure II.9 : Dispositif expérimental de l'essai de flexion

II.6.3.2. Résistance à la compression : norme EN196-[21]

Chaque demi-éprouvette issue de l'essai de rupture par flexion est soumise à l'essai de compression sur ces faces latérales de moulage. La section visée est de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, l'échantillon est placé entre plaque de métal dur d'au moins 10mm d'épaisseur et de (40 ± 0.1) mm de largeur. Les plaque sont guidées sans forttement appréciable au cours de l'essai de manière à avoir la projection horizontale, une autre plaque placée sur la surface d'écrasement peut s'incliner légèrement pour permettre un contact parfait. La résistance à la compression est calculée selon. La formule :

$$R_c = \frac{F_c}{S} \dots \dots \dots \text{(II.12)}$$

Avec :

F_c ; force de rupture ; S ; section latérale de l'éprouvette, égale à 16 cm^2 .

L'essai de compression est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150KN avec vitesse de 2400N/s (photo II.2). Cette machine est équipée d'un dispositif de compression tel que schématisé sur la figure (II.5). Figure (II.5) : Dispositif de l'essai de rupture en compression.

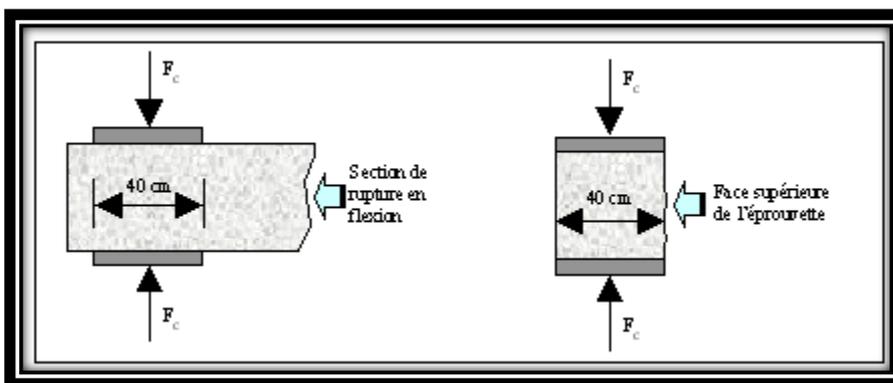


Figure II.5 : Dispositif de l'essai de rupture en compression.

Chapitre III : Résultats et discussion

III .I. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenter les caractéristiques physico-mécaniques des matières premières entrant dans la fabrication des mortiers de caoutchouc étudiés. Par la suite, on étudiera l'effet des adjuvants super-plastifiant et hydrofuge sur les propriétés des mortiers de caoutchouc que ce soit à l'état frais au à l'état durci. Des mesures de propriétés physiques (absorption capillaire) et de propriétés mécaniques (résistance à la traction, et à la compression) ont été réalisées sur les éprouvettes de 4x4x16 cm³ à l'âge de 28 jours.

III.2. Caractérisation des matières premières :

III.2.1. Les granulats utilisés :

Dans cette étude, nous avons utilisé deux types granulats qui sont les suivant :

- Des granulats naturels siliceux de Sable provenant de la région de d'oued Souf située au Sud-Est de la capitale d'Algérie.
- Des granulats de caoutchouc recyclés, obtenus par recyclage mécaniques des pneus usés. Ils ont des propriétés similaires de caoutchouc vierge (Figure.III.1).

III.2. Caractérisation des matières premières:

III.2.1. Les granulats utilisés :

Dans cette étude, nous avons utilisé deux types granulats qui sont les suivant:

- Des granulats naturels siliceux de Sable provenant de la région de d'oued Souf située au Sud-Est de la capitale d'Algérie.
- Des granulats de caoutchouc recyclés, obtenus par déchiquetage mécaniques des pneus usés. Ils ont des propriétés similaires de caoutchouc vierge (Figure.III.1).

Les propriétés des granulats ont été déterminées conformément aux normes, puis récapitulés et présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau.III.1. propriétés physiques essentielles des granulats utilisés.

Propriétés	Sable	GCR
Densité apparente (kg/m ³)	1,600	450
Densité absolue (kg/m ³)	2,560	0
Equivalent de sable (%)	90.53	-
L'absorption d'eau (%)	1.30	0.30
Module de Finesse	2.10	3.01

Les caractéristiques physiques du sable employé sont données dans tableau (III.1). L'analyse chimique qualitative réalisée par le diffractomètre aux rayons X sur un échantillon de sable tableau (III.2) montre la prépondérance de l'espèce siliceuse (SiO₂) dans la composition chimique.

Tableau.III.2. Composition chimique moyenne du sable utilisé.

Composition chimique Moyenne en (%)

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
	93.25	2.15	0.60	0.35	0.10	0.26	1.30	0.10

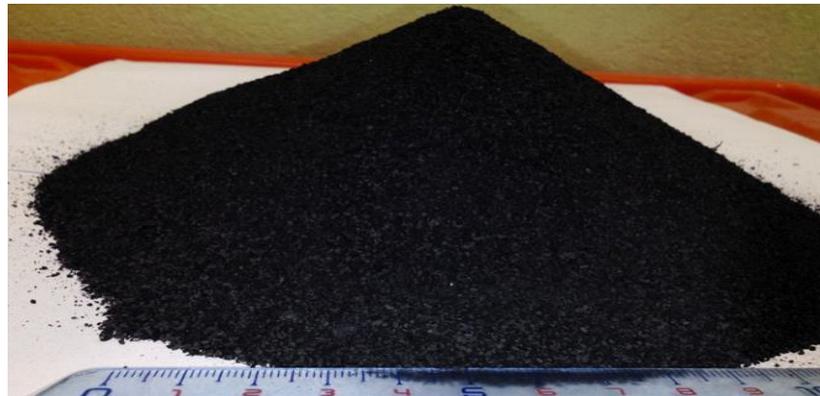


Figure.III.1. Les granulats de GCR sable utilisés.

III.2.1.1 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique des granulats utilisés est réalisée conformément au procédé expérimental décrit au chapitre II. Les résultats de cette analyse sont représentés dans la figure (III.2).

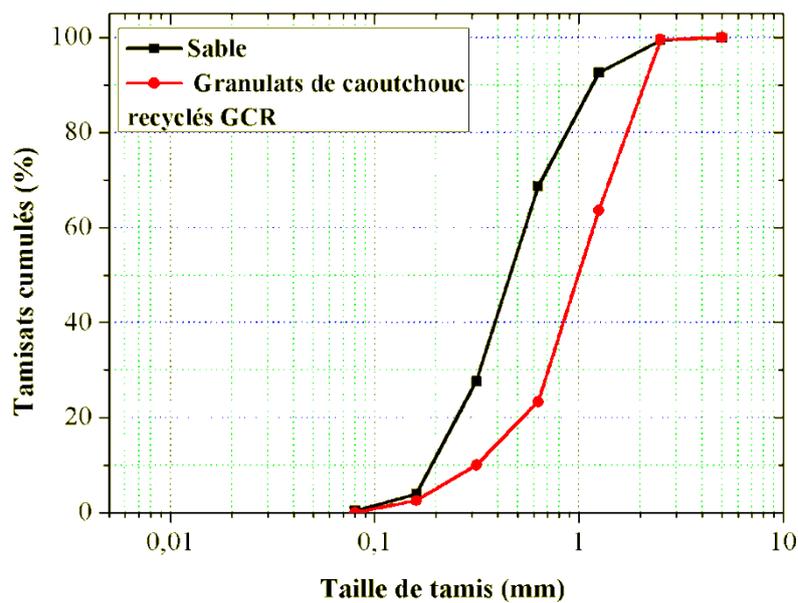


Figure.III.2. Analyse granulométrique des granulats.

Les granulats de caoutchouc sont plus fins que les granulats de sable.

III.2.2. Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé de type **CPJ 42.5** provenant de la cimenterie de M'silla. Les propriétés physiques et la composition chimique du ciment utilisé sont données respectivement dans les tableaux (III.3), (III.4).

Tableau.III.3. Propriétés physicomécaniques de ciment utilisé.

Densité apparente (kg/m ³)	Densité absolue (kg/m ³)	Finesse de Blaine (cm ² /g)	Début de prise (min)	Résistance en compression à 28 jours en (MPA)	
1050	3100	3950	160	45,30	45.30

Tableau.III.4. Composition chimique moyenne du ciment utilisé.

La composition chimique Moyenne en (%)								
Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Mg	So ₃	K ₂ O	Na ₂ O
	17.16	4.46	3.02	63.01	2.02	2.43	0.64	0.10

Ces résultats montrent qu'il s'agit d'un ciment assez fin à forte teneur en silicates tricalciques (C₃S).

III.3. Etude des propriétés des mortiers étudiés :

III.3.1. Propriétés fraîches :

III.3.1.1. Consistance :

La Figure III.3 représente l'évolution de l'étalement de table des mortiers étudiés en fonction du dosage en granulats de caoutchouc recyclés (0,4 %, 8 %, 12 %, dosage de super-plastifiant (0, 05 %, 1 % et 1.5 %) et le dosage d'hydrofuge (0 %, 05 %, 1%, 1.5%). Les résultats représentés dans la figure. III.3 montrent que l'inclusion d'un dosage de 12 % des GCR dans le mortier de ciment produit une chute de l'étalement de table de l'ordre de 60 % par rapport au mortier témoin. Le besoin en eau d'un matériau frais, pour atteindre une maniabilité convenable, est très influencé par la texture superficielle, la porosité et la forme des additions. Dans le cas des granulats GCR légers notamment, la perte de maniabilité peut être liée à la forme rigoureuse des granulats de caoutchouc recyclés par rapport aux granulats siliceux de forme régulière.

Il faut tenir compte que cette chute importante de la consistance des composites de caoutchouc pour maintenir leur maniabilité acceptables, par l'augmentation du dosage en eau ou par l'ajoute d'un adjuvant de type super-plastifiant.

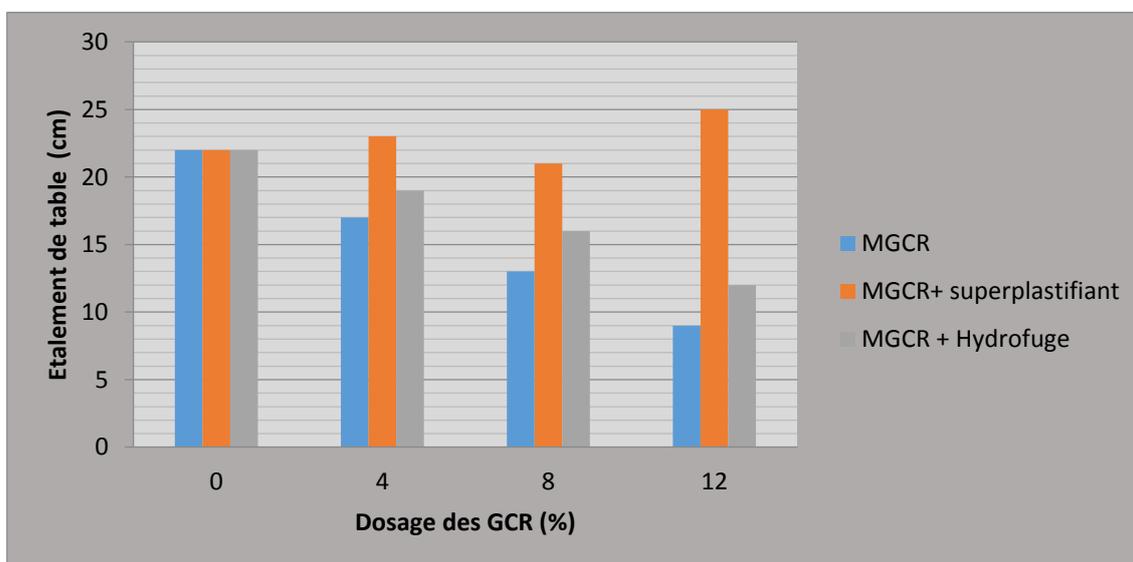


Figure.III.3. Etalement de table en fonction du dosage : en GCR, Super-plastifiant, hydrofuge des mortiers étudiés

Pour cette raison nous avons ajouté le super-plastifiant pour corriger la maniabilité des mortiers de caoutchouc. L'ajout d'une dosage de 0.5, 1%, et 1.5 % de la adjuvant super-plastifiant produit une hausse de l'étalement de table de l'ordre de 26 %, 38 %, et 36 % pour les mortiers incorporant 4 %, 8 % et 12 % de GCR respectivement. Cette tendance montre que le super-plastifiant corrige la chute de consistance produit par les GCR. Concernant l'effet de hydrofuge, nous résultats montrent que l'ajoute des dosages de l'ordre de 0.5 %, 1 %, et 1.5 % aux mortiers de caoutchouc incorporant 4 %, 8 %, et 12 % produit une faible évolution de l'étalement de table. Ce comportement montre que l'hydrofuge influence peu l'étalement de table.

III.3.2. Propriétés durcies :

III.3.2.1. La masse volumique apparente :

La figure.III.4. montre la variation de la masse volumique des mortiers incorporant 0 %, 4 %, 8%, et 12 % de GCR par substitution massique avec les granulats naturels siliceux en fonction du dosage en super-plastifiant et l'hydrofuge. La masse volumique apparente chute fortement en fonction du dosage en GCR. En effet, elle chute de 15% pour un taux de substitution de 12 %. Cette chute est expliquée par la légèreté des GCR par rapport les granulats naturel siliceux. Par contre, les adjuvants super-plastifiant et hydrofuge a été varié peu la masse volumique apparente des mortiers étudiés.

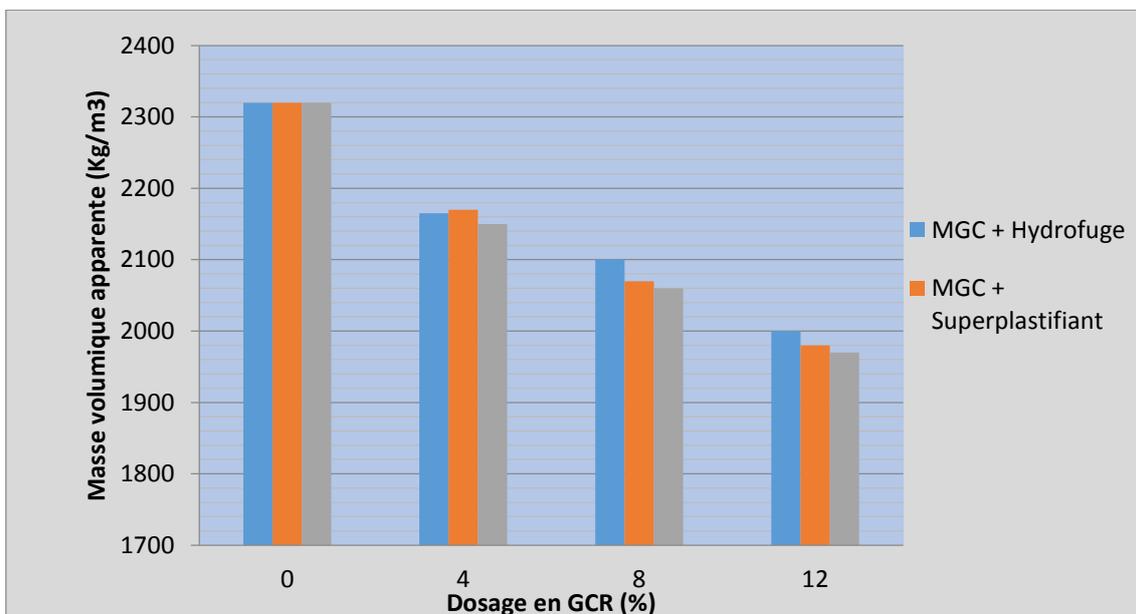


Figure. III. 4. La masse volumique apparente des mortiers de caoutchouc en fonction de super-plastifiant et l'hydrofuge

III.3.2.2. La résistance en traction par flexion :

Les résultats de la résistance en traction pour le mortier témoin et les mortiers incorporant les GCR à l'âge de 28 jours sont représentés sur la figure III.5. La figure.III.5, montre que l'inclusion des GCR dans le mortier de ciment jusqu'à 12 % produit une chute significative de la résistance en traction par flexion de l'ordre de 26.4 % par rapport au mortier témoin. Cette chute est due à la faible cohésion entre la matrice cimentaire et les granulats de caoutchouc. Ce comportement est expliqué par le fait que les granulats de caoutchouc ont une faible résistance mécanique par rapport aux granulats naturels durs. Néanmoins, l'adjuvant super plastifiant et l'hydrofuge augmente significativement la résistance en traction par rapport au mortier témoin. Ce comportement est dû à l'amélioration de l'adhérence entre la pâte de ciment et les grains de sable notamment pour l'hydrofuge.

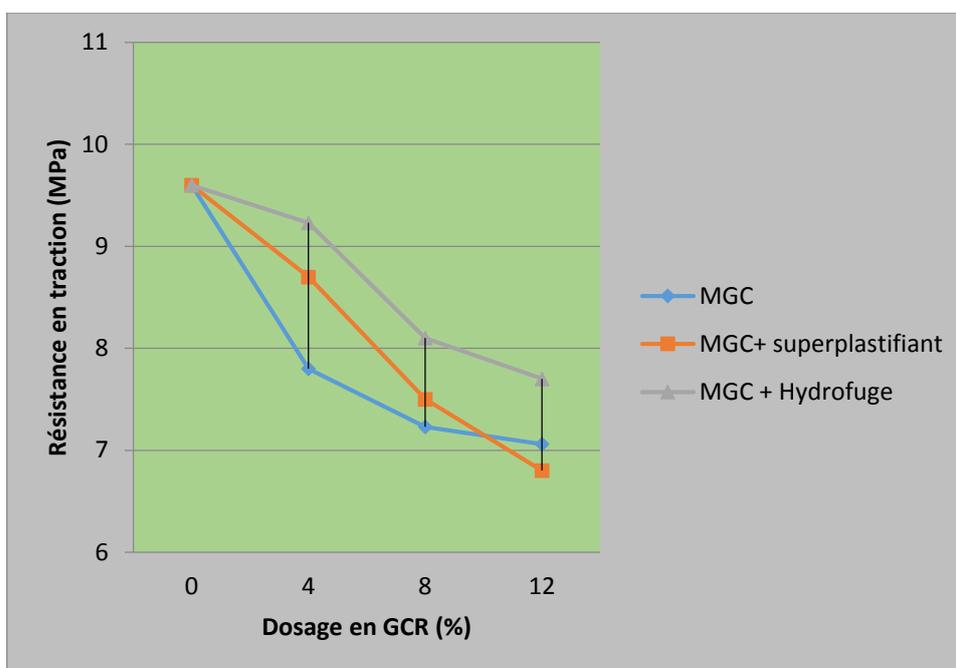


Figure.III.5. Résistance en traction en fonction du dosage en GCR et les dosages de super-plastifiant et hydrofuge.

III.3.2.3. La résistance en compression :

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme prismatique placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées. Les résultats de la résistance en compression sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) pour mortier témoin et les mortiers incorporant les GCR à l'âge 28 jours sont représentés sur la figure III. 6.

L'incorporation des granulats de caoutchouc recyclés GCR jusqu'à 12 % produit une chute importante de résistance en compression de l'ordre de 44%. Ce comportement est expliqué par le fait que les granulats de caoutchouc sont souples et de faible résistance en compression. L'ajout de super plastifiant augmente peu la résistance en compression. Par contre, hydrofuge augmente la résistance en compression fortement parce que l'hydrofuge diminue la porosité et augmente la compacité des composites étudiés.

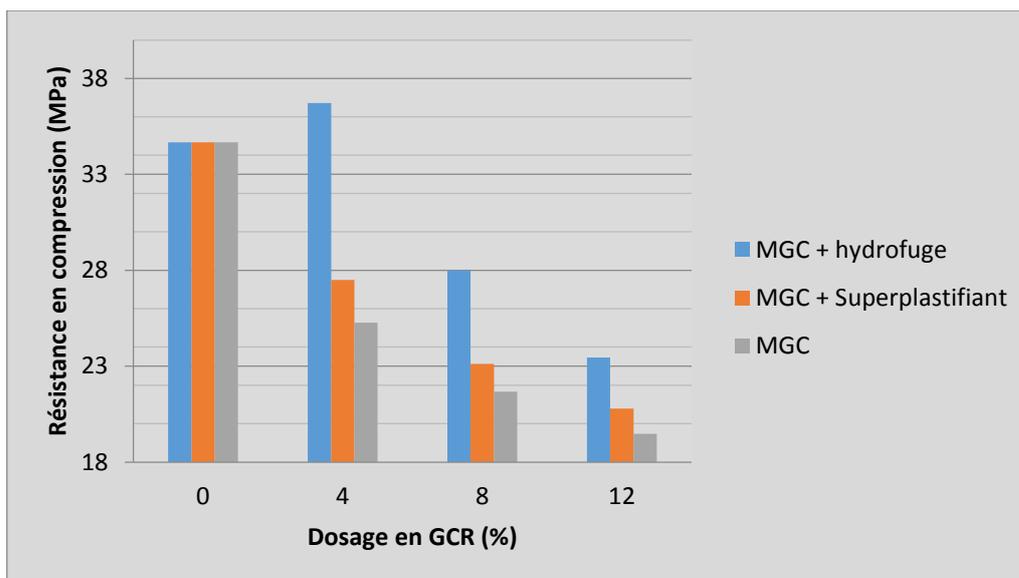


Figure.III.6. Résistance en compression en fonction des dosages en GC, super-plastifiant et hydrofuge des mortiers étudiés.

III.3.2.4. L'absorption capillaire :

La figure III.7, expose l'évolution du temps d'absorption d'eau par capillarité en fonction de la racine du temps pour les différents mortiers étudiés. Nos résultats montrent que la substitution des granulats de caoutchouc par les granulats naturels diminue le taux d'absorption capillaire des (MGCR 4% ; MGCR 8% et MGCR12%) par rapport au taux d'absorption du mortier témoin MGCR0%. cette réduction du taux d'absorption est due à la nature des granulats de caoutchouc qui sont pratiquement étanches en comparaison des granulats naturels absorbants. De plus, ce comportement est déjà confirmé dans plusieurs études antérieures similaires sur les matériaux cimentaires incorporant les granulats de caoutchouc. Donc on peut investir cette propriété innovante pour améliorer la durabilité des matériaux cimentaires attaqués par plusieurs pathologies physico-mécaniques. L'ajoute de super-plastifiant est varié peu le taux d'absorption d'eau. Par contre, l'ajoute d'hydrofuge réduire plus le taux d'absorption d'eau par capillarité.

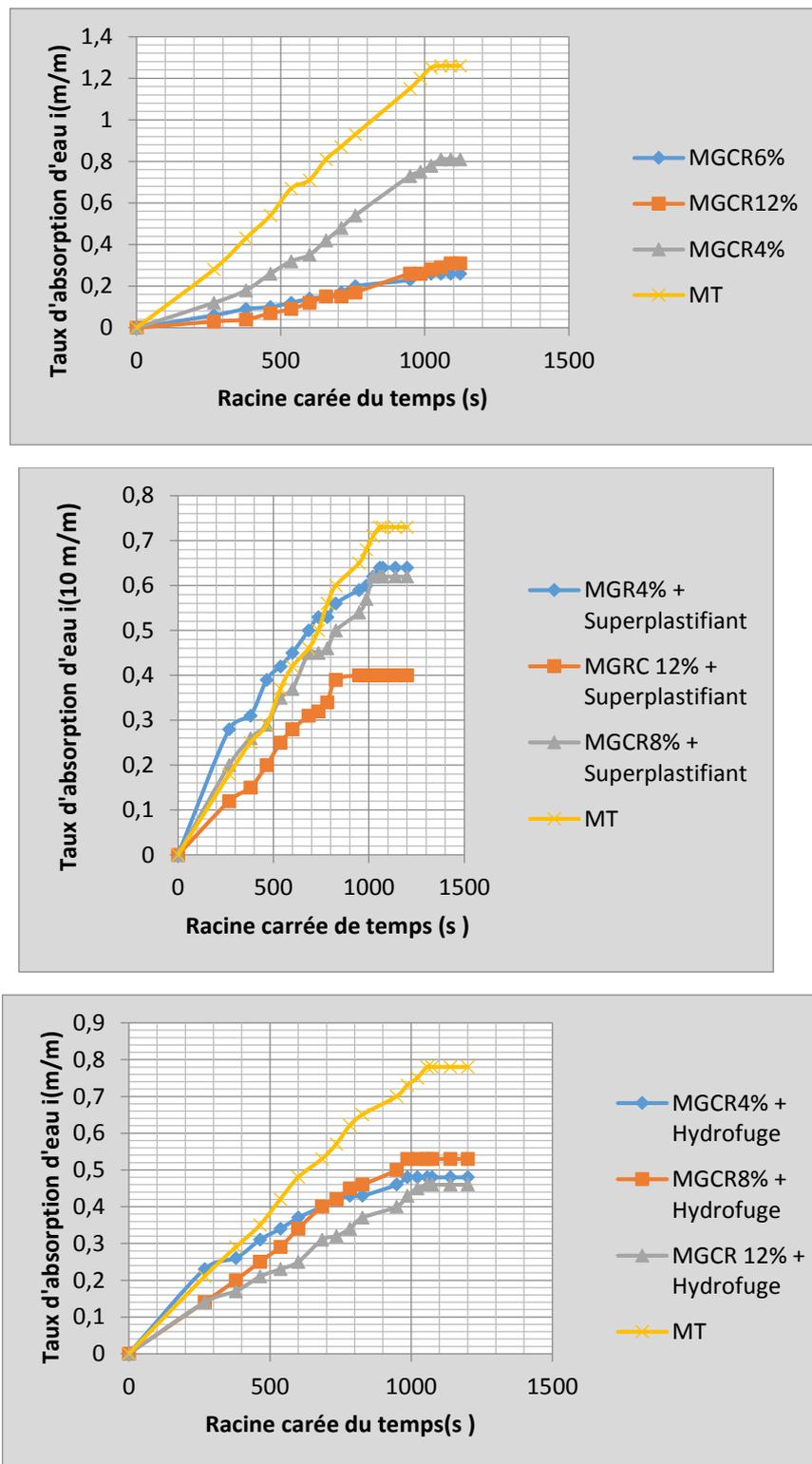


Figure. III. 7. Taux d'absorption d'eau en fonction des dosages GCR, Super-plastifiant et Hydrofuge des mortiers étudié

Conclusion Générale et perspectives

Dans ce travail de recherche, nous avons étudiés les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers de caoutchouc avec et sans adjuvant de type hydrofuge pour une future utilisation dans le domaine de Génie Civil. Pour d'atteindre cet objectif, ce travail a été entrepris par une révision des travaux de recherche antérieurs sur la thématique. Cette partie a été suivie une description des techniques expérimentales utilisés dans notre travail pour évaluer les différentes propriétés de nos mortiers fabriqués, notamment, les propriétés frais et durcies. A la fin, une dernière partie qui regroupe les résultats expérimentaux et leurs interprétations. Ces résultats ont permis de révéler les points suivants :

- Les résultats de la caractérisation des granulats de caoutchouc montrent que ceux-ci sont légers, volumineux et est moins absorbatifs que les granulats de Sable naturel.
- L'analyse des propriétés physico-chimiques des granulats naturels de Sable siliceux montrent que ceux sont propres, conformes aux normes en vigueur et ne contiennent aucun sorte impureté qui peut influencées les propriétés physico-mécaniques des composites étudiés.
- L'inclusion des granulats de caoutchouc dans le mortier de ciment produit une chute significative de sa consistance. Donc, nous avons limité le taux des GCR à 12 %. L'ajout de super-plastifiant améliore fortement la consistance des mortiers de caoutchouc. Néanmoins, l'ajoute d'hydrofuge améliore peu la consistance des mortiers de caoutchouc.
- Nos résultats de la résistance à la compression à la traction montrent que la présence des granulats de caoutchouc avec la matrice cimentaire produit une chute importante de la résistance à la compression des mortiers étudiés. Cette chute est due à la faible cohésion entre les GCR et la matrice cimentaire. L'adjuvant super-plastifiant augmente fortement la résistance mécanique en traction et en compression parce que cet adjuvant améliore l'adhérence liant-granulats. Par contre, l'ajoute d'hydrofuge améliore peu la résistance mécanique des mortiers de caoutchouc.
- Les résultats de cette étude montrent l'absorption d'eau des mortiers de caoutchouc est faible comparativement au mortier témoin sans GCR. L'adjuvant hydrofuge réduit

fortement le taux d'absorption d'eau. Par contre, le super-plastifiant influence peu le taux d'absorption d'eau.

L'étude de l'effet des granulats de caoutchouc, dans le domaine de la construction, c'est un sujet, d'actualité, innovante, très vaste, qui ne peut en aucun cas être investi en un sujet de master. Ce mémoire n'a traité qu'un cas particulier de substitution des granulats naturels par les granulats de caoutchouc avec l'ajoute des adjuvants super-plastifiant et l'hydrofuge. L'étude de la microstructure est un volet aussi très important pour découvrir l'interaction de ce type des granulats avec les granulats naturels silico-calcaire. Sur ce, on recommande d'approfondir cette étude en étudiant l'influence des différents attaques chimiques sur la stabilité physico-mécanique des bétons et des mortiers incorporant les granulats de caoutchouc afin d'apprécier convenablement leurs performances vis-à-vis ces sollicitations physico-mécaniques.

Références bibliographiques :

- [1] Toupine H, A.Asrom, N. As rom, F.Belabdelouhab, N.T.Long : Problématique des Pneumatiques usagés en Algérie, Revue nature et technologie, Vol.5, pp. 28-35, 2011.
- [2] Conférence des Partie à la Convention de BALE sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination, Directives Techniques Révisées pour une Gestion Ecologiquement Rationnelle des pneus usés, P52, Avril 2008.
- [3] Scrapper Tire Recyclions in Canada : FromScrap to Value/Recyclage des pneus hors d’usage au Canada
- [4] La transformation des pneus hors d’usage en produits à valeurs ajoutée.
www.catraonline.ca/pdf/Recyc_2006_pneus.pdf.
- [5] ETRMA – European Tire& Rubber Manufacturers’ Association (Belgium), 2010b. Used Tires Recovery 2010 (table) – UT/Part Worn Tires/ELT’s Europe – Volumes
- [6] Nguyen Thant L., Thèse de doctorat : Le Pneu sol : Recherches Réalisations – Perspectives. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Décembre 1993.
- [7] M.N. Adam, Propriétés des bétons, Ed Seyroles, pp. 754 (1998), Paris.
- [8] G. Dreux, J. Fiesta, Nouveau guide de béton et de ses constituants, Ed Seyroles, pp.317 (1998), Paris.
- [9] Guelmine, L., L’influence du rapport E/C et du mode de cure sur les propriétés physico-mécaniques et de transfert d’humidité des mortiers de ciment durcis, Mémoire de Magister, Université de Laghouat 2006, pp.86.
- [10] J. Baron, J.P. Ollivier, Les Bétons bases et données pour leur formulation, Ed Seyroles, pp. 345 (1998), Paris
- [11] H.H. Steneinour, The system CaO-SiO₂ –H₂O and the hydration of the calcium silicates, Chemical Reviews, pp. 40 (1947).
- [12] T.C. Powers, The physical structure and engineering properties of concrete, Portland. Cement. Association. Resarci. Département. Building. pp. 39 (1958).
- [13] COURS de Durabilité et réparations du béton de l’Université de Sherbrooke (Canada). Site Internet: www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/84
- [14] R.A. Olson, H.M. Jennings, Estimation of C-S-H in a blended cement paste using water Adsorption, Cement and Concrete Research, vol.31, pp.351-356 (December 2000).
- [15] Provin, A., Dive, L.A., Fenouillet, S., Randazzo, V & Davy, J.P., Impact de conditions de cycle de séchage et d’humidification sur la formulation différée d’étringite dans les bétons, Matériels& Structures Journal, Vol.36,2012,pp.189-196.
- [16] Genesis E., Gesoğlu M and Özturan T., Properties of rubberized concretes

Containing silica fume. *Cement and Concrete Research* 34, 2309–2317, 2004.

[17] : Khatib Z. K. and Beamy F. M., Rubberized Portland cement concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 206-213.

[18] Geline, L., Contribution à l'étude de la durabilité de composite cimentaire incorporant les granulats des pneus usés sous l'effet d'un gel et de hautes températures, thèse de doctorat en sciences, stub d'Alger, 2017, pp.159.

[19] Garros M., Thèse de doctorat : Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation. Université Paul Sabatier de Toulouse, 2007.

[20] Nanzouk A., Douzaine O. and Quinaude. T'Kinte M., Transport of fluidisé ciment-rober composites. *Cement&Concrete Composites* 26, 21–29, 2004.

[20]Layachi Guelmine, Hadjab H, Benazzouk A , Effet des granulats de caoutchouc recyclés de pneus usagés sur les propriétés physiques et mécaniques de mortier de ciment, Papier de Conférence International SIGC2018, d'Oran Novembre 2018, 10 pages Algérie. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35857.48484>

[21] :Sukontasukkul P. and Chaikaew C., *Properties of concrete pedestrian block mixed with Crum rubber*. *Construction and Building Materials*, 20: 450–457, 2006.

[22] Guelmine, L., Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar, *Constr. Build. Mater.* 26 (9) (2016) 77–85.

[3] Normes Afnor : Essais physico-mécaniques sur les bétons et mortiers. (1981-1997) :

o NF P 18-303 : Essais sur l'eau de gâchage.

o NF P 15-560 : Analyse granulométrique par tamisage. Octobre 1997.

o NF P 18-598 : Equivalent de sable. Octobre 1991.

o NF P 18-451 : Essai d'affaissement. Décembre 1981.

o XP P 18-540 : Granulats : définitions, conformité, spécification. Octobre 1997.

o NF P 18-555: Mesure de la masse volumique, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux. Décembre 1980.

o NF P 15-433 : détermination du retrait et gonflement. Janvier 1994.

o NFP 18-400 : Moule pour éprouvettes cylindriques et prismatiques. Décembre 1981.

o NFP 15-476 : Détermination de la finesse de ciment. Août 1990.

o NFP 15-474 : Détermination quantitative des constituants de ciment. Février 1994.

- o NF P 15-573 : Détermination du temps de prise et de stabilité. Août 1995.
- o NF P 15-532 : Détermination de l'expansion de ciment. Août 1995.
- o NF P 15-471 : Détermination des résistances mécaniques. Août 1995.
- o NF P 18-558: Détermination de la masse volumique absolue des fines.
Décembre1990.
- o NF P 15-301 : Ciments courants : composition, spécifications et critères de conformité. Juin1994.