

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université du 08 Mai 1945 - Guelma -

Faculté des Sciences et de la  
Technologie



جامعة 08 ماي 1945 قالمة

كلية العلوم والتكنولوجيا

Département de : **Génie Civil et Hydraulique**

Spécialité : **Génie Civil**

Option : **Matériaux et Structures**

## **THÈSE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT 3<sup>ème</sup> cycle**

Par:

**BOUKOUR Salima**

---

**Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco-composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés**

---

Devant le jury

Pr. Nouaouria Med Salah	Université du 08 mai 1945 de Guelma	Président
Pr. Benmalek Med Larbi	Université du 08 mai 1945 de Guelma	Rapporteur
Pr. Redjel Bachir	Université Badji Mokhtar d'Annaba	Examineur
Pr. Boudaoud Zineddine	Université Larbi Ben M'hidi d'Oum El Bouaghi	Examineur
Pr. Nafa Zahreddine	Université du 08 mai 1945 de Guelma	Examineur

2017

# Remerciement

*Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile.*

*Avant tout, je remercie Allah le tout puissant, de m'avoir illuminé et ouvert les voies du savoir, pour m'avoir accordé le courage, l'optimisme et toute la capacité physique et morale pour mener à bien et faire aboutir ce travail.*

*Je tiens tout particulièrement à remercier mon encadreur, Professeur BENMALEK Mohamed Larbi qui m'a fait confiance en acceptant de m'encadrer sur ce sujet. Je lui suis très reconnaissante de l'opportunité qu'il m'a donnée, Je le remercie pour l'intérêt et le suivi qu'il a porté à ma thèse, pour les conseils toujours pertinents et enrichissants. J'estime avoir énormément appris à son contact. Son dévouement et sa rigueur scientifique resteront pour moi des modèles.*

*Mes plus vifs remerciements s'adressent à Monsieur Nouaouria Mohamed Salah Professeur au département de génie civil université de 08 Mai 1945 Guelma pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.*

*Mes plus vives gratitudes vont à messieurs Redjel Bachir Professeur au département de génie civil université Badji Mokhtar d'Annaba, Boudaoud Zineddine Professeur au département de génie civil université Larbi Ben M'hidi d'Oum El Bouaghi et Nafa Zahreddine Professeur au département de génie civil université de 08 Mai 1945 Guelma pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'être examinateurs et membres du jury.*

*Un remerciement spécial est adressé à tous les enseignants, qui depuis mes débuts au département de génie civil ont contribué de près ou de loin à ma formation.*

*Mes remerciements particuliers aux directeurs de laboratoire de recherche et pédagogique de génie civil et d'hydraulique de l'université du 08 Mai 1945 Guelma et aux techniciens pour leur entière disponibilité.*

*Je remercie également tout le personnel du laboratoire national de l'habitat et de la construction LNHC de Belkheir (Guelma) pour l'excellent accueil qu'ils m'ont toujours réservé et pour avoir mis leurs matériels à ma disposition, sans oublier d'exprimer ma profonde gratitude au personnel de la cimenterie de Ain Touta (Batna) pour m'avoir fourni le ciment nécessaire à cette recherche, l'ETER Guelma et ceux de Granitex Algérie pour leurs aides précieuses.*

*Je tiens à exprimer mon immense gratitude à ma grande famille: mes parents que le Bon Dieu me les garde aussi longtemps, mes sœurs, mes frères, mes nièces et mes neveux pour leurs soutiens permanents et pour leurs encouragements tout au long de ces années, sans lesquels je n'aurais jamais mené à bien ce travail.*

*Enfin, j'adresse mes sentiments les plus respectueux à mes amis, l'ensemble de mes proches et surtout les doctorants de ma promotion pour tous les bons moments partagés au labo, qui m'ont toujours soutenu et aidé et toutes les personnes qui valorisent ce travail de recherche.*

*Salima Boukour*

# RESUME

---

En Algérie la quantité de pneus usagés non réutilisables produits annuellement est estimée à environ 1.5 millions de tonnes. Ces déchets ne bénéficient encore d'aucune structure de valorisation et sont stockés dans des décharges à l'air libre constituant ainsi une gêne pour l'environnement. Les déchets de brique issus de l'industrie de la brique rouge font également partie des sous-produits peu réutilisés. La solution idéale est d'exploiter ces déchets dans la fabrication d'éco-mortiers durables capables de remplacer les mortiers traditionnels de sable.

Pour cet objectif, nous avons opté pour l'incorporation de granulats de caoutchouc (0-4 mm) issus de recyclage de pneus usagés en substitution volumique du sable avec des taux de 10, 20 et 30% et des déchets de fillers de brique en substitution volumique du sable également avec des taux de 2.5, 5.0, 7.5 et 10% afin d'obtenir des matériaux à faible impact environnemental.

Cinq séries d'éprouvettes de mortier  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  ont été préparées:

- Série 1: Avec granulats de caoutchouc traités avec de la soude.
- Série 2: Avec granulats de caoutchouc non traités.
- Série 3: Avec fillers de déchets de brique.
- Série 4: Avec une combinaison de granulats de caoutchouc traités avec de la soude et de fillers de déchets de brique.
- Série 5: Avec une combinaison de granulats de caoutchouc non traités et de fillers de déchets de brique dans une matrice cimentaire renforcée par une solution de résine aqueuse.

A travers cet important ensemble d'éprouvettes d'essais, dont le nombre dépasse 1836 éprouvettes, nous avons étudié les propriétés physico-mécaniques et de durabilité de ces éco-composites à l'état frais et à l'état durci.

Les mortiers élaborés ont été évalués en densité, résistance à la compression et flexion, module d'élasticité dynamique à travers l'essai ultrasonique, retrait, absorption d'eau par immersion totale et par capillarité puis modélisation par les courbes de sorptivité, attaque

chimique par les sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), par les acides ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) et par l'eau de mer, porosité accessible à l'eau et perméabilité à l'eau et à l'air.

La consistance de tous les mélanges a été maintenue constante grâce à l'utilisation d'un superplastifiant à base d'Ether polycarboxylate (Medaplast SP 40).

Les principaux résultats expérimentaux indiquent que le traitement des granulats de caoutchouc avec le NaOH, l'incorporation des fillers de déchets de brique ainsi que le renforcement des matrices cimentaires par une résine aqueuse sont autant des solutions pour produire des mortiers à base de granulats de caoutchouc et améliorer leurs performances.

Une alternative intéressante pour produire un mortier respectant l'environnement par l'utilisation de ces deux déchets a été prouvée par cette étude.

---

**Mots clés**: Eco-composites cimentaires, Granulats de caoutchouc, Fillers de déchets de brique, Caractéristiques physico-mécaniques, Durabilité.

---

# ABSTRACT

---

In Algeria, the quantity of used tires produced annually is estimated at about 1.5 million tons. This waste still does not benefit from any recovery structure and is stored in open-air dumps, thus creating a discomfort for the environment. Brick waste from the red brick industry is also one of the few re-used by-products. The ideal solution is to use this waste in the manufacture of sustainable eco-mortars capable of replacing traditional sand mortars.

For this purpose we have opted for the incorporation of rubber aggregates (0-4 mm) from recycled used tires in volume substitution of sand with rates of 10, 20 and 30% and waste brick fillers in substitution volumics of the sand also with rates of 2.5, 5.0, 7.5 and 10% in order to obtain materials with low environmental impact.

Five sets of  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  mortar specimens were prepared:

- Series 1: Rubber aggregates treated with sodium hydroxide.
- Series 2: With untreated rubber aggregates.
- Series 3: With brick waste fillers.
- Series 4: With a combination of rubber aggregates treated with sodium hydroxide and brick waste fillers.
- Series 5: With a combination of untreated rubber aggregates, brick waste fillers in a cementitious matrix reinforced with an aqueous resin solution.

Through this important set of test specimens, the number of which exceeds 1836, we have studied the physicochemical and durability properties of these eco-composites in the fresh and hardened states.

Elaborated mortars were evaluated in density, compressive and flexural strength and dynamic modulus of elasticity through the ultrasonic test, shrinkage, absorption by total immersion and capillarity, then modeling by sorptivity curves, chemical leaching by sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), acids ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) and by seawater, porosity accessible to water and permeability to water and air.

The consistency of all mixtures was kept constant by the use of an Ether polycarboxylate superplasticizer (Medaplast SP 40).

The main experimental results indicate that the treatment of rubber aggregates by NaOH solution, the incorporation of brick waste fillers and the reinforcement of the cementitious matrix by an aqueous resin represent adequate solutions to produce rubber aggregates based mortars and to improve their performances.

An interesting alternative to producing a mortar respecting the environment by the use of these two wastes has been proven by this study.

---

**Key words:** Cementitious Eco-composites, Rubber aggregates, Brick waste fillers, Physico-mechanical characteristics, Durability.

---

## ملخص

في الجزائر تقدر كمية نفايات الإطارات الغير قابلة لإعادة الإستخدام التي تنتج سنويا حوالي 1.5 مليون طن. هذه النفايات لا تستفيد حتى الآن من أي هيكله تئمين ويتم تخزينها في مكبات النفايات في العراء مما يشكل مصدر إزعاج للبيئة. نفايات الطوب الناتجة من صناعة الطوب الأحمر هي أيضا جزء من منتجات فرعية قليلة الإستعمال. الحل الأمثل هو إستخدام هذه المخلفات في صناعة ميلاط قادر على أن يعوض الميلاط التقليدي.

لهذا الغرض، إختارنا دمج حبيبات المطاط (0-4 ملم) الناتجة من إعادة تدوير الإطارات المستعملة باستبدال الرمل (حجم) مع المطاط بنسب متفاوتة 10، 20 و 30% وإستبدال حجمي لنفايات الطوب مع الرمل أيضا بنسب 2.5، 5.0، 7.5 و 10% من أجل الحصول على مواد ذات تأثير منخفض على البيئة.

خمس مجموعات من الميلاط (4×4×16) سم<sup>3</sup> تم إعدادها:

- المجموعة 1: إستخدام حبيبات المطاط المعالجة بمحلول هيدروكسيد الصوديوم.
  - المجموعة 2: إستخدام حبيبات المطاط الغير معالجة.
  - المجموعة 3: إستخدام نفايات الطوب.
  - المجموعة 4: إستخدام مزيج من حبيبات المطاط المعالجة بمحلول هيدروكسيد الصوديوم ونفايات الطوب.
  - المجموعة 5: إستخدام مزيج من حبيبات المطاط الغير معالجة ونفايات الطوب في مصفوفة إسمنتية معززة بمحلول الراتنج المائي.
- من خلال مجموعة هامة من عينات الإختبار، وأكثر من 1836 عينة، درسنا الخصائص الفيزيائية الميكانيكية والمثانة للمركبات الإسمنتية في الحالة الطازجة وفي الحالة الصلبة.

تتمثل خصائص الميلاط المدروسة في: الكثافة، قوة الضغط وقوة الانثناء، الإنكماش (تغيير الأبعاد)، المعامل الديناميكي للمرونة، سرعة إنتشار الأمواج الصوتية، إمتصاص الماء بالغمر الكلي والخاصية الشعرية، الهجوم من قبل الكبريتات (5%)، الهجوم من قبل الأحماض (5%)، الهجوم من قبل مياه البحر، المسامية للمياه والنفاذية للماء والهواء.

تماسك كل الخلائط أبقى ثابتا من خلال إستعمال ملدن أساسه الأثير المتعدد الكربوكسيل (Medaplast SP 40).

تشير النتائج التجريبية الرئيسية أن معالجة حبيبات المطاط بواسطة محلول من هيدروكسيد الصوديوم، دمج نفايات الطوب وتعزيز المصفوفات الإسمنتية بمحلول الراتنج المائي تعتبر كلها حلول لإنتاج ميلاط من حبيبات المطاط وتحسين ادائه.

في هذه الدراسة يعتبر إستخدام هذه النفايات بديلا لإنتاج ميلاط بيئي.

**كلمات البحث:** مركبات الإسمنت البيئية - حبيبات المطاط - نفايات الطوب - الخصائص الفيزيائية والميكانيكية - المثانة

# TABLE DES MATIERES

---

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### CHAPITRE I

#### ETAT DE L'ART SUR LES COMPOSITES A BASE DE DECHETS DE PNEUS USAGES ET COMPOSITES A BASE DE DECHETS DE BRIQUE

<b>I.1. INTRODUCTION</b> .....	01
<b>I.2. GENERALITES SUR LES DECHETS</b> .....	01
<b>2.1. Définition des déchets</b> .....	01
<b>2.2. Différents types de déchets</b> .....	01
<b>2.2.1. Déchet inertes</b> .....	01
<b>2.2.2. Déchets ultimes</b> .....	02
<b>2.2.3. Déchets ménagers et assimilés</b> .....	02
<b>2.2.4. Déchets d'activité de soins</b> .....	02
<b>2.2.5. Déchets encombrants</b> .....	02
<b>2.2.6. Déchets spéciaux</b> .....	03
<b>2.2.7. Déchets spéciaux dangereux</b> .....	03
<b>2.3. Déchets de caoutchouc et déchets de brique</b> .....	03
<b>2.3.1. Déchets de caoutchouc</b> .....	03

---

2.3.1.1. Définition d'un pneumatiques.....	04
2.3.1.2. Principaux constituants d'un pneu.....	05
2.3.1.3. Composition d'un pneu.....	06
2.3.1.4. Utilisation et valorisation des pneus usagés.....	07
2.3.1.5. Valorisation des déchets de caoutchouc en Algérie.....	10
2.3.2. Déchets de brique.....	13
<b>I.3. PROPRIETES DES COMPOSITES A BASE DES DECHETS DE PNEUS USAGES.....</b>	<b>14</b>
3.1. Effets des granulats de caoutchouc sur les proprietes des bétons et mortiers à l'état frais.....	15
3.1.1. Consistance.....	15
3.1.2. Air occlus.....	16
3.2. Effets des granulats de caoutchouc sur les propriétés des bétons et mortiers à l'état durci.....	18
3.2.1. Masse volumique à l'état sec.....	18
3.2.2. Résistance à la compression.....	19
3.2.3. Résistance à la flexion.....	22
3.2.4. Résistance à la traction.....	23
3.2.5. Module d'élasticité statique.....	24
3.2.6. Module d'elasticité dynamique.....	25
3.2.7. Retrait.....	27
3.2.8. Capacité de déformation.....	29
3.2.9. Absorption d'eau.....	30
3.3. Durabilité.....	32
3.3.1. Permeabilité à l'eau.....	32
3.3.2. Perméabilité à l'air.....	33
3.3.3. Attaque sulfatique.....	34
<b>I.4. CONCLUSION.....</b>	<b>37</b>
<b>I.5. PROPRIETES DES COMPOSITES A BASE DE DECHETS DE BRIQUE.....</b>	<b>38</b>
5.1. L'état frais.....	38
5.2. L'état durci.....	39
5.2.1. Densité à sec.....	39
5.2.2. Résistance à la compression.....	40

---

---

5.2.3. Résistance à la flexion et à la traction .....	41
5.2.4. Module d'élasticité .....	41
5.2.5. Porosité .....	42
5.2.6. Absorption d'eau .....	42
5.2.7. Retrait.....	44
5.3. Durabilité .....	44
5.3.2. Résistance aux sulfates .....	45
5.3.3. Indice d'activité pouzzolanique .....	46
5.3.4. Permeabilité .....	46
<b>I.6. CONCLUSION.....</b>	<b>47</b>

## CHAPITRE II

### CARACTERISATION, FORMULATIONS ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

<b>II.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>49</b>
<b>II.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES.....</b>	<b>49</b>
2.1. Ciment .....	49
2.2. Sable.....	50
2.3. Granulats de caoutchouc .....	51
2.4. Déchets de brique.....	51
2.5. Eau de gâchage .....	52
2.6. Adjuvant.....	52
2.7. Stabilisant.....	52
2.8. Résine.....	54
2.9. L'hydroxyde de sodium.....	54
<b>II.3. TRAITEMENT DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC.....</b>	<b>55</b>
3.1. Principaux types de traitements testés .....	56
3.2. Traitement des granulats de caoutchouc adopté dans le présent travail .....	58
<b>II.4. FORMULATION DU MORTIER D'ETUDE.....</b>	<b>59</b>
4.1. Composition de base.....	59
4.2. Composition adoptée pour les essais.....	61
4.3. Le malaxage des mortiers.....	64

---

4.4. Confection des éprouvettes.....	64
<b>II.5. TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....</b>	<b>65</b>
5.1. Caractéristiques physico-mécaniques .....	66
5.1.1. A l'état frais .....	66
5.1.2. A l'état durci .....	67
5.1.2.1. Masse volumique à sec.....	67
5.1.2.2. Mesure des résistances mécaniques.....	68
5.1.2.3. Essais d'auscultation dynamique .....	71
5.1.2.4. Module d'élasticité dynamique $E_{dyn}$ .....	72
5.1.2.5. Retrait (variation dimensionnelle) .....	73
5.1.2.6. Absorption d'eau par capillarité.....	73
5.1.2.7. Absorption d'eau par immersion totale.....	76
5.2. Durabilité .....	76
5.2.1. Essai d'attaque par les sulfates et les acides.....	76
5.2.2. Essais de porosité accessible à l'eau .....	78
5.2.3. Essais de perméabilité.....	80
5.2.3.1. Perméabilité à l'air.....	80
5.2.3.2. Perméabilité à l'eau .....	83

## **CHAPITRE III**

### **RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSES**

<b>III.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>86</b>
<b>III.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....</b>	<b>86</b>
2.1. A l'état frais.....	86
2.2. A l'état durci.....	88
2.2.1. Caractéristiques physiques.....	88
2.2.1.1. Masse volumiques à sec .....	88
2.2.1.2. Porosité accessible à l'eau .....	91
2.2.1.3. Absorption d'eau par capillarité.....	94
2.2.1.4. Absorption d'eau par immersion totale.....	99
2.2.2. Caractéristiques mécaniques .....	102
2.2.2.1. Résistance à la compression .....	102
2.2.2.2. Résistance à la flexion .....	107

---

2.2.2.3. Mode de rupture en flexion.....	108
2.2.2.4. Vitesse de propagation des ultrasons et module d'élasticité dynamique ...	113
2.2.2.5. Retrait .....	118
2.2.3. Durabilité .....	121
2.2.3.1. Perméabilité à l'eau .....	121
2.2.3.2. Perméabilité à l'air.....	125
2.2.3.3. Attaque des éco-composites élaborés par l'acide sulfurique H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	127
2.2.3.4. Attaque des éco-composite par le sulfate de sodium Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	133
2.2.3.5. Attaque des éco-composites par l'eau de mer .....	144
<b>III.3. CONCLUSION .....</b>	<b>158</b>

## CHAPITRE IV

### MORTIER RESINEUX DE GRANULATS DE CAOUTCHOUC ET DE FILLERS DE DECHETS DE BRIQUE

<b>IV.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>162</b>
<b>IV.2. FORMULATION DES MORTIERS D'ETUDE.....</b>	<b>162</b>
<b>IV.3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS .....</b>	<b>163</b>
3.1. Caractéristiques à l'état frais.....	163
3.2. Caractéristiques à l'état durci.....	165
3.2.1. Masse volumique à l'état durci (masse volumique sèche).....	165
3.2.2. Résistance à la compression et à la flexion.....	167
3.2.3. Retrait.....	170
3.2.4. Absorption d'eau par capillarité.....	172
3.2.5. Absorption d'eau par immersion totale.....	176
<b>IV.4. CONCLUSION.....</b>	<b>178</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>181</b>

---

# LISTE DES FIGURES

---

1.1. Coupe transversale d'un pneu.....	05
1.2. Maintien des bâches d'ensilage .....	08
1.3. Pneusol.....	08
1.4. Enrobés routiers.....	10
1.5. Gazons synthétiques pour les stades.....	10
1.6. Aire de jeux .....	10
1.7. Sol équestre.....	10
1.8. Cas d'une décharge (stockage à l'air libre) « El Harrach» Algérie.....	11
1.9. Fumée toxique qui se dégage en brûlant des pneus.....	12
1.10. Ouvrage végétalisé Projet pilote - de Bousmail .....	13
1.11. Pose de nappe de pneus Projet pilote - Route de Bousmail.....	13
1.12. Ouvrage de Mostaganem RN11 (Algérie) - Stabilité d'un talus .....	13
1.13. Schéma de la fabrication des briques .....	13
1.14. Valeur d'affaissement du béton frais .....	15
1.15. Effet de la cendre de caoutchouc sur la teneur en air du mortier frais .....	17
1.16. Densité par rapport au taux de remplacement du granulats fin par des miettes de caoutchouc.....	19
1.17. Evolution de la résistance à la compression des composites.....	20
1.18. Résistance à la flexion du béton à différents âges pour $E / C = 0.41$ .....	22
1.19. La réduction de la résistance à la traction en fonction de la teneur en caoutchouc.....	24
1.20. Effet de la teneur en caoutchouc sur le module d'élasticité statique .....	25
1.21. Variation du module d'élasticité dynamique du mortier autoplaçant en fonction de E/C et de la teneur en caoutchouc .....	26
1.22. Variations dimensionnelles de retrait en fonction du temps: effets du taux de substitution en granulats de caoutchouc et du fibrage .....	28
1.23. Evolution de la capacité de déformation maximale en fonction du taux de substitution en granulats de caoutchouc.....	29

---

<b>1.24.</b> L'absorption d'eau par capillarité des composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc.....	31
<b>1.25.</b> Profondeur de pénétration d'eau en fonction du taux de substitution de caoutchouc..	33
<b>1.26.</b> Perte de masse des éprouvettes attaquées par l'acide à différents âges (E/C= 0.4).....	35
<b>1.27.</b> Effet de la brique concassée sur la fluidité du mortier .....	39
<b>1.28.</b> Variation de la densité du mortier durci lors la substitution du ciment avec des déchets de brique.....	39
<b>1.29.</b> Variation de la densité du mortier durci lors la substitution du sable avec des déchets de brique.....	40
<b>1.30.</b> Effet de la substitution du ciment par la poudre de brique sur la résistance à la compression du mortier.....	40
<b>1.31.</b> Les courbes de sorptivité (i fonction $t^{1/2}$ ) pour les mélanges de mortier E/C=0.4 .....	43
<b>1.32.</b> Les courbes de sorptivité (i fonction $t^{1/2}$ ) pour les mélanges de mortier E/C=0.5 .....	43
<b>1.33.</b> Variation du retrait en fonction du contenu de déchets de la brique .....	44
<b>1.34.</b> Relation entre la perméabilité et la taille différente des granulats de brique et granulats naturel.....	47
<b>2.1.</b> Courbes granulométriques du sable et des granulats de caoutchouc .....	51
<b>2.2.</b> Ségrégation des granulats de caoutchouc au sein d'une matrice cimentaire .....	53
<b>2.3.</b> Distribution homogène des granulats de caoutchouc au sein des mortiers .....	53
<b>2.4.</b> Matières premières utilisées .....	54
<b>2.5.</b> Hydroxyde de Sodium (NaOH).....	55
<b>2.6.</b> Micrographe montrant la zone de transition entre « la pâte de ciment et le granulats de caoutchouc » et entre « la pâte de ciment et le sable naturel » .....	56
<b>2.7.</b> Processus de traitement des granulats de caoutchouc .....	58
<b>2.8.</b> Résistances mécaniques en fonction du rapport S/C .....	60
<b>2.9.</b> Aspect physique du mortier de base (S/C=2.8, E/C=0.5).....	61
<b>2.10.</b> Moule huilé.....	65
<b>2.11.</b> Arasage de la surface du mortier à la truelle .....	65
<b>2.12.</b> Cure dans l'eau des différentes éprouvettes d'essai .....	65
<b>2.13.</b> Table à secousses.....	67
<b>2.14.</b> Dimensions du cône.....	67
<b>2.15.</b> Mesure de l'étalement .....	67
<b>2.16.</b> Mesure des dimensions d'éprouvettes 4×4×16 cm <sup>3</sup> .....	68
<b>2.17.</b> Pesage d'éprouvette 4×4×16 cm <sup>3</sup> .....	68
<b>2.18.</b> Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion .....	69
<b>2.19.</b> Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes 4x4x16 cm <sup>3</sup> .....	69

---

<b>2.20.</b> Dispositif de rupture en compression .....	70
<b>2.21.</b> Essai de compression sur les éprouvettes 4x4x16 cm <sup>3</sup> .....	70
<b>2.22.</b> Mesure de la vitesse de propagation de sons sur des éprouvettes 15×15×15 cm <sup>3</sup> .....	71
<b>2.23.</b> Mesure du retrait par un rétractomètre digital .....	73
<b>2.24.</b> Schéma du dispositif expérimental.....	74
<b>2.25.</b> Dispositif d'absorption d'eau par capillarité .....	74
<b>2.26.</b> Eprouvettes 4x4x16 cm <sup>3</sup> immergées dans diverses solutions .....	78
<b>2.27.</b> Dispositif d'essai utilisé pour la mesure de la porosité accessible à l'eau.....	79
<b>2.28.</b> Perméamètre utilisé .....	81
<b>2.29.</b> Intérieur d'une cellule de perméabilité.....	81
<b>2.30.</b> Dispositif de mesure de la perméabilité à l'eau .....	84
<b>3.1.</b> Valeurs d'étalement des mortiers d'études .....	88
<b>3.2.</b> Masse volumique sèche des mortiers en fonction de : a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB .....	90
<b>3.3.</b> Porosité accessible à l'eau des mélanges à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB. ....	93
<b>3.4.</b> Absorption d'eau par capillarité " i" des mortiers en fonction de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB.....	97
<b>3.5.</b> Absorption d'eau par capillarité des mortiers de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB, pendant la période initiale d'exposition à l'eau (jusqu'à 8 heures).....	98
<b>3.6.</b> Absorption d'eau par immersion totale des mélanges à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB.....	101
<b>3.7.</b> Résistance à la compression des mélanges à base de a) GC non traités, b) GC traités .....	105
<b>3.8.</b> Résistance à la compression des mélanges à base de fillers de DB .....	105
<b>3.9.</b> Résistance à la compression des mélanges à base de a) combinaison des GC traités (10%) et DB, b) combinaison des GC traités (20%) et DB, c) combinaison des GC traités (30%) et DB.....	106
<b>3.10.</b> Résistance à la flexion des mélanges à base de a) GC non traités, b) GC traités.....	109
<b>3.11.</b> Résistance à la flexion des mélanges à base de fillers de DB .....	109
<b>3.12.</b> Résistance à la flexion des mélanges à base de a) combinaison des GC traités (10%) et DB, b) combinaison des GC traités (20%) et DB, c) combinaison des GC traités (30%) et DB .....	110

---

<b>3.13.</b> Mode de rupture du mortier de référence .....	111
<b>3.14.</b> Mode de rupture des mortiers à base des déchets de brique (2.5-10%) .....	111
<b>3.15.</b> Mode de rupture des mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités .....	111
<b>3.16.</b> Mode de rupture des mortiers à base de granulats de caoutchouc traités .....	111
<b>3.17.</b> Mode de rupture des mortiers à base des GC traités (10%) et DB (2.5-10%) .....	112
<b>3.18.</b> Mode de rupture des mortiers à base des GC traités (20%) et DB (2.5-10%) .....	112
<b>3.19.</b> Mode de rupture des mortiers à base des GC traités (30%) et DB (2.5-10%) .....	112
<b>3.20.</b> Vitesse de propagation d'ultrasons des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB .....	116
<b>3.21.</b> Module d'élasticité dynamique des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB .....	117
<b>3.22.</b> Effet de l'incorporation des a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB sur le retrait de mortier .....	120
<b>3.23.</b> Profondeur de pénétration d'eau sous pression des mortiers à base de a) GC traités, b) GC non traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB .....	123
<b>3.24.</b> Profondeur de pénétration d'eau sous pression du mortier de référence .....	124
<b>3.25.</b> Profondeur de pénétration d'eau sous pression des mortiers à base de GC traités ....	124
<b>3.26.</b> Profondeur de pénétration d'eau sous pression des mortiers à base de fillers de DB .....	124
<b>3.27.</b> Profondeur de pénétration d'eau sous pression des mortiers à base de GC et DB combinés .....	124
<b>3.28.</b> Perméabilité à l'air des mortiers à base de a) GC traités, b) GC non traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB .....	126
<b>3.29.</b> Perte de poids des mortiers à base de a) GC traités, b) GC non traités, c) DB d) combinaison des GC (10%) et DB, e) combinaison des GC (20%) et DB, f) combinaison des GC (20%) et DB dans une solution de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (5%) .....	130
<b>3.30.</b> Aspect visuel du mortier de référence après immersion dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	132
<b>3.31.</b> Aspect visuel des mortiers à base des GC traités après immersion dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	132
<b>3.32.</b> Aspect visuel des mortiers à base de fillers de DB après immersion dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ....	132
<b>3.33.</b> Résistance aux sulfates (5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités .....	136
<b>3.34.</b> Résistance aux sulfates (5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) des mortiers à base de fillers de DB .....	136

---

<b>3.35.</b> Résistance aux sulfates (5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) des mortiers à base de a) combinaison de GC traités (10%) et DB, b) combinaison de GC traités (20%) et DB, c) combinaison de GC traités (30%) et DB .....	137
<b>3.36.</b> Coefficient anti corrosion des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, d) combinaison des GC traités (20%) et DB, e) combinaison des GC traités (30%) et DB dans une solution de 5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	140
<b>3.37.</b> Expansion des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB dans une solution de 5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ..	143
<b>3.38.</b> Aspect visuel des mortiers de référence après immersion dans Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	144
<b>3.39.</b> Aspect visuel des mortiers à base de GC traités après immersion dans Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	144
<b>3.40.</b> Aspect visuel des mortiers à base de fillers de DB après immersion dans Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ..	144
<b>3.41.</b> Résistance des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités après immersion dans l'eau de mer .....	149
<b>3.42.</b> Résistance des mortiers à base de fillers de DB après immersion dans l'eau de mer .....	149
<b>3.43.</b> Résistance des mortiers à base de a) combinaison des GC traités (10%) et DB, b) combinaison des GC traités (20%) et DB, c) combinaison des GC traités (30%) et DB, après immersion dans l'eau de mer.....	150
<b>3.44.</b> Coefficient anti corrosion des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB, dans l'eau de mer .....	153
<b>3.45.</b> Expansion des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB dans l'eau de mer.....	156
<b>3.46.</b> Aspect visuel des mortiers de référence dans l'eau de mer.....	157
<b>3.47.</b> Aspect visuel des mortiers à base des GC traités dans l'eau de mer.....	157
<b>3.48.</b> Aspect visuel des mortiers à base de fillers de DB dans l'eau de mer.....	157
<b>4.1.</b> Etalement des mortiers d'étude .....	164
<b>4.2.</b> Masse volumique sèche des mortiers d'étude .....	165
<b>4.3.</b> Masse volumique sèche en fonction de la teneur en granulats de caoutchouc.....	166
<b>4.4.</b> Masse volumique sèche en fonction de la teneur en déchets de brique.....	167
<b>4.5.</b> Effet des granulats de caoutchouc sur la résistance du mortier à 28 jours .....	167
<b>4.6.</b> Effet des fillers de brique sur la résistance du mortier à 28 jours .....	168
<b>4.7.</b> Effet de l'incorporation combinée de GC et DB sur la résistance du mortier à 28 jours .....	169
<b>4.8.</b> Effet de l'incorporation de granulats de caoutchouc sur le retrait de mortier.....	170

---

**4.9.** Effet de l'incorporation des fillers de brique sur le retrait du mortier ..... 171

**4.10.** Effet combiné des GC et des DB sur le retrait du mortier résineux ..... 172

**4.11.** Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de GC ..... 174

**4.12.** Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de DB ..... 174

**4.13.** Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de mélange (GC + DB)..... 174

**4.14.** Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de GC pendant la période initiale d'exposition à l'eau (jusqu'à 8 heures). ..... 175

**4.15.** Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de DB pendant la période initiale d'exposition à l'eau (jusqu'à 8 heures). ..... 175

**4.16.** Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de mélange (GC+ DB) pendant la période initiale d'exposition à l'eau (jusqu'à 8 heures) ..... 175

---

# LISTE DES TABLEAUX

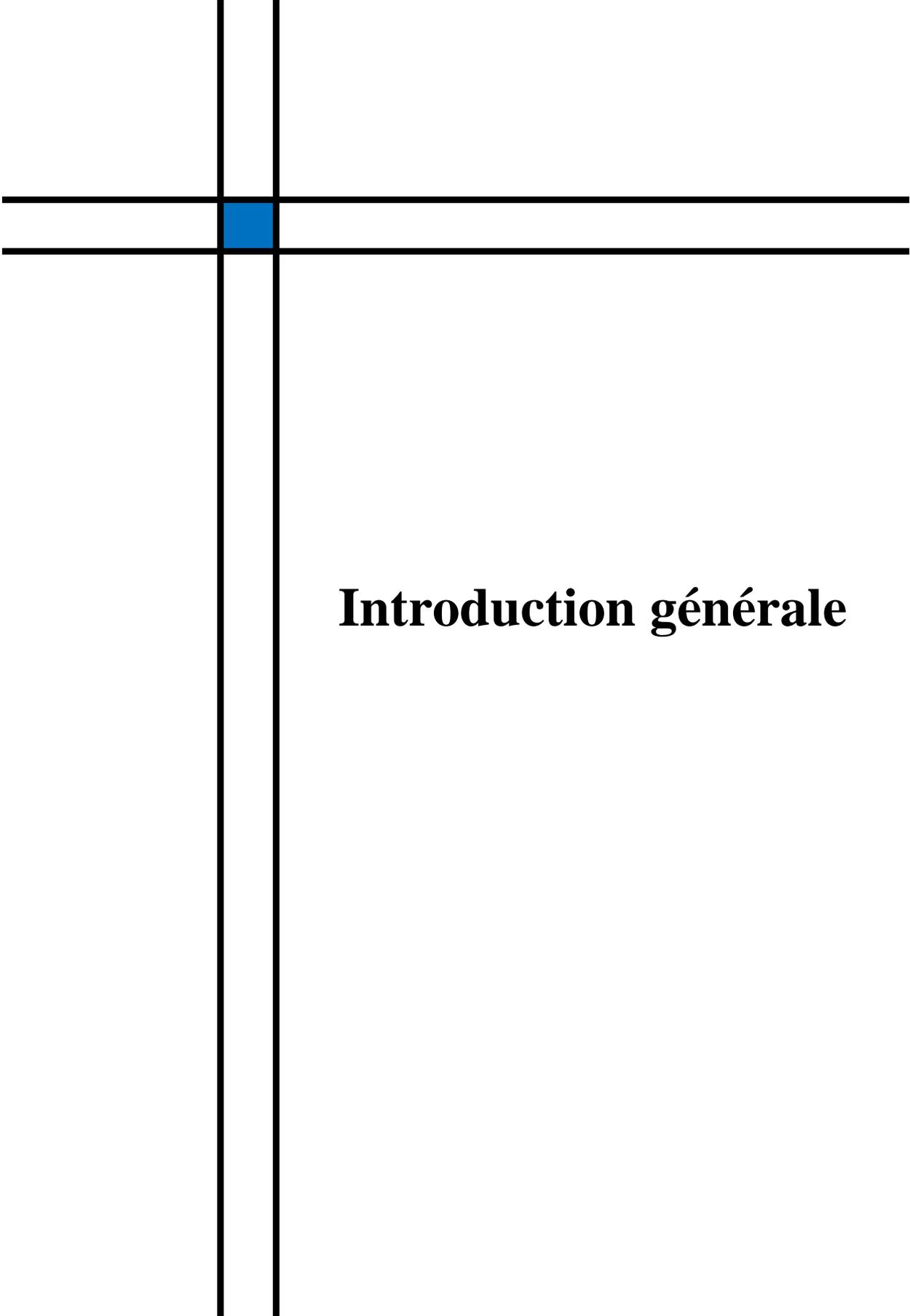
---

1.1.	Constitution moyenne en masse des pneus.....	06
1.2.	Composants chimiques d'un pneu .....	06
1.3.	Quantités de pneus usagés générés par an en Algérie .....	11
1.4.	La capacité de déformation limite du béton de poudre en caoutchouc traité et non traité.. .....	30
1.5.	Coefficient de la perméabilité à l'air des composites cimentaires caoutchoutés .....	34
1.6.	Durabilité des bétons de caoutchouc .....	36
2.1.	Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé.....	50
2.2.	Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé .....	50
2.3.	Caractéristiques du sable utilisé .....	50
2.4.	Composition chimique des déchets de briques utilisés .....	52
2.5.	Composition chimique du NaOH utilisé dans ce travail .....	55
2.6.	Composition des mortiers en fonction du rapport S/C ( $\text{kg/m}^3$ ).....	59
2.7.	Résistances mécaniques en fonction du rapport S/C .....	60
2.8.	Composition du mortier de base ( $\text{Kg/m}^3$ ).....	61
2.9.	Composition des mortiers adoptés avec granulats non traités et granulats traités par NaOH .....	63
2.10.	Valeurs d'étalement NF EN 1015-6.....	67
3.1.	Valeurs d'étalement des mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités et traités par NaOH. ....	87
3.2.	Propriétés à l'état frais des composites élaborés .....	91
3.3.	Sorptivité des mortiers d'étude. ....	96
3.4.	Amélioration des résistances à la compression des mortiers élaborés avec GC traités au NaOH.....	103
3.5.	Relation porosité-vitesse de propagation ultrasonique.....	114
3.6.	Valeurs des vitesses de propagation et leur différence par rapport au mortier de référence.....	115

---

<b>3.7.</b> Coefficient anti corrosion des éco-composites d'étude (%) immergés dans Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	141
<b>3.8.</b> Coefficient anti corrosion des éco-composites d'étude (%) immergés dans l'eau de mer .....	151
<b>4.1.</b> Composition des mortiers adoptés renforcé par la résine (Kg/m <sup>3</sup> ).....	163
<b>4.2.</b> Valeurs d'étalement à la table secousse des mortiers renforcés par la résine .....	164
<b>4.3.</b> Sorptivité des mortiers d'études .....	176
<b>4.4.</b> Absorption d'eau par imersion totale des mortiers d'études .....	177

---



# **Introduction générale**

# INTRODUCTION GENERALE

---

L'industrie du béton nécessite des quantités importantes de granulats. Ceux-ci constituent environ 60 à 75% du volume total du béton [01]. En Algérie, des millions de tonnes de granulats sont consommés dans le domaine de la construction et des travaux publics. Cette consommation est particulièrement importante dans les grands travaux publics, les infrastructures et les réseaux routiers de toute sorte.

L'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour mettre en place de nouvelles carrières imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement.

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

Parmi les nombreuses sources génératrices de déchets, l'industrie de caoutchouc produit chaque année plus de 1.5 milliards de pneus dans le monde [02]. On peut citer quelques cas: en France, plus de 363 500 tonnes de pneumatiques (toutes catégories confondues) ont été déclarées mises sur le marché en 2006 [03], en Tunisie 40 000 tonnes par an [04], en Thaïlande, le bilan de la seule année 2000 indique une consommation d'environ 94 000 tonnes de pneus [05]. Selon une statistique officielle iranienne, environ 20 millions de pneus ont été produits dans le pays en 2005 [06]. Environ 400 millions de déchets de pneus ont été collectés en Inde à la fin de l'année 2009 [07]. En 2004, 120 millions de pneus ont été produits en Chine et ce nombre augmente de 12% chaque année [08].

Les déchets de pneumatiques représentent une source intarissable du fait de la relation directe avec la construction automobile et d'engins divers constituant un marché en plein extension ayant un rapport avec la croissance économique et démographique.

Les pneus usagés sont des déchets non dangereux mais ils présentent un risque sur l'environnement et l'humanité en cas d'incendie sur les sites de stockage; le problème du stockage des pneus usagés est un défi important auquel doivent faire face les gestionnaires de déchets. En France depuis juillet 2002, et afin d'éviter les nuisances créées par les dépôts et les risques d'incendie, il est strictement interdit d'abandonner, de mettre en décharge ou de brûler à l'air libre des pneus usagés.

Les déchets de pneus ont de multiples propriétés qui peuvent permettre leur réutilisation dans l'ingénierie civile et géotechnique (technique pneu sol) [09-11], utilisation dans des applications telles que l'asphalte routier [12-16].

Beaucoup de recherches ont été menées dans le monde révélant des solutions créatives pour gérer et réduire le volume de pneus usagés qui sont générées chaque année [17]. Parmi les axes les plus étudiés, on trouve l'incorporation des granulats de caoutchouc dans les matrices cimentaires [18-34], qui a prouvé la viabilité de l'utilisation des granulats de pneus en substitution volumique ou massique des granulats fins (sable) et grossiers (graviers) dans les mortiers et les bétons, en particulier dans le cas où les résistances mécaniques, ainsi que les densités, ne sont pas les principales caractéristiques souhaitées [35, 36].

L'incorporation des granulats de caoutchouc issus de pneus usagés dans les matériaux cimentaires est préjudiciable sur la résistance à la compression et à la traction [25, 37-39]. En contrepartie, le composite obtenu possède une plus grande capacité de déformation. [26,40-47].

Un autre type de déchets provenant du secteur du bâtiment et représentant un des plus importants générateurs de déchets, il regroupe les déchets issus de la construction, de la réhabilitation, et de la démolition des bâtiments qui constitue la majeure partie des déchets produits et les catastrophes naturelles comme les séismes génèrent des quantités immenses des déchets de briques [48,49].

Il existe trois filières de valorisation pour les matériaux inertes: un réemploi direct sur les chantiers. En Algérie, la politique de récupération d'une manière générale est très timide et se limite à quelques rejets de la consommation; les matériaux de construction récupérés sont carrément inexistant malgré le besoin accru dans ce domaine, un acheminement vers des plateformes de recyclage et une utilisation en remblais pour le réaménagement des carrières.

Ces déchets proviennent aussi des industries de production de la brique qui est en nette croissance et génère une quantité non négligeable de briques de mauvaise qualité (1 à 3%) [50] c'est-à-dire brisées, déformées, brûlées ou surbrûlées. Les briques hors normes sont

vendues à des fins d'aménagement paysager, si cela est économiquement faisable, mais généralement jetées, qui restent peu utilisés.

Ces déchets sont habituellement déversés dans les sites autour des briquetterie et constituent un sérieux problème environnemental, en particulier dans les pays en développement où la quantité de la production de déchets est très importante.

Localement, dans la région de Guelma (nord de l'Algérie), la production annuelle des deux principales usines de briques est estimée en 2009 à environ 80 000 tonnes dans la première usine de Bendjerrah, avec près de 10% des unités rejetées et environ 15% pour l'usine de Bordj Sabath, par une production de 39 100 tonnes [51].

Les déchets de brique sont actuellement utilisés dans la construction d'assises routières, comme matériaux de remblaiement, pour l'aménagement paysager. Par ailleurs des études sont en cours pour valoriser les déchets de brique en poudre dans l'industrie cimentaire pour l'élaboration d'un nouveau ciment [52-57]. On note également la réutilisation des déchets de brique comme granulats fins et grossiers dans le béton [58-76].

Historiquement, l'usage de la brique concassée comme granulats dans le béton n'est pas nouveau. Le premier usage marqué de brique concassée avec le ciment Portland était en Allemagne en 1860 pour la fabrication de produits en béton. Des recherches systématiques ont été exécutées depuis 1928 sur des mélanges de ciment, d'eau et de granulats en brique concassée [77, 78], mais la première utilisation significative de briques concassées comme granulats dans le béton a été enregistrée pour la reconstruction après la seconde guerre mondiale [79].

L'utilisation des déchets de brique et pneus usagés dans l'industrie de la construction, comme matière première (substitution du sable par les déchets), est une alternative très intéressante, qui présente un double objectif. Elle permet, d'une part, de répondre aux besoins en matériaux nouveaux, présentant des propriétés particulières ou améliorées par rapport aux matériaux classiques. D'autre part, elle permet de pallier les contraintes économiques et environnementales par le réemploi et le recyclage des déchets solides.

### **Objectif de l'étude**

L'étude présentée dans cette thèse a pour objectif de faire le point sur la valorisation des déchets de brique qui sont en abondance dans les briquetteries algériennes et les déchets de caoutchouc issus de recyclage de pneus usagés qui sont jetés dans des décharges à l'air libre, pour la confection d'éco-composites cimentaires.

Afin d'évaluer certaines propriétés physico-mécaniques et de durabilité, nous avons opté pour l'incorporation de granulats de caoutchouc (0-4 mm) issus de recyclage de pneus usagés en substitution volumique du sable avec des taux de 10, 20 et 30% et des déchets de fillers de brique en substitution volumique du sable également avec des taux de 2.5, 5.0, 7.5 et 10% afin d'obtenir des matériaux à faible impact environnemental.

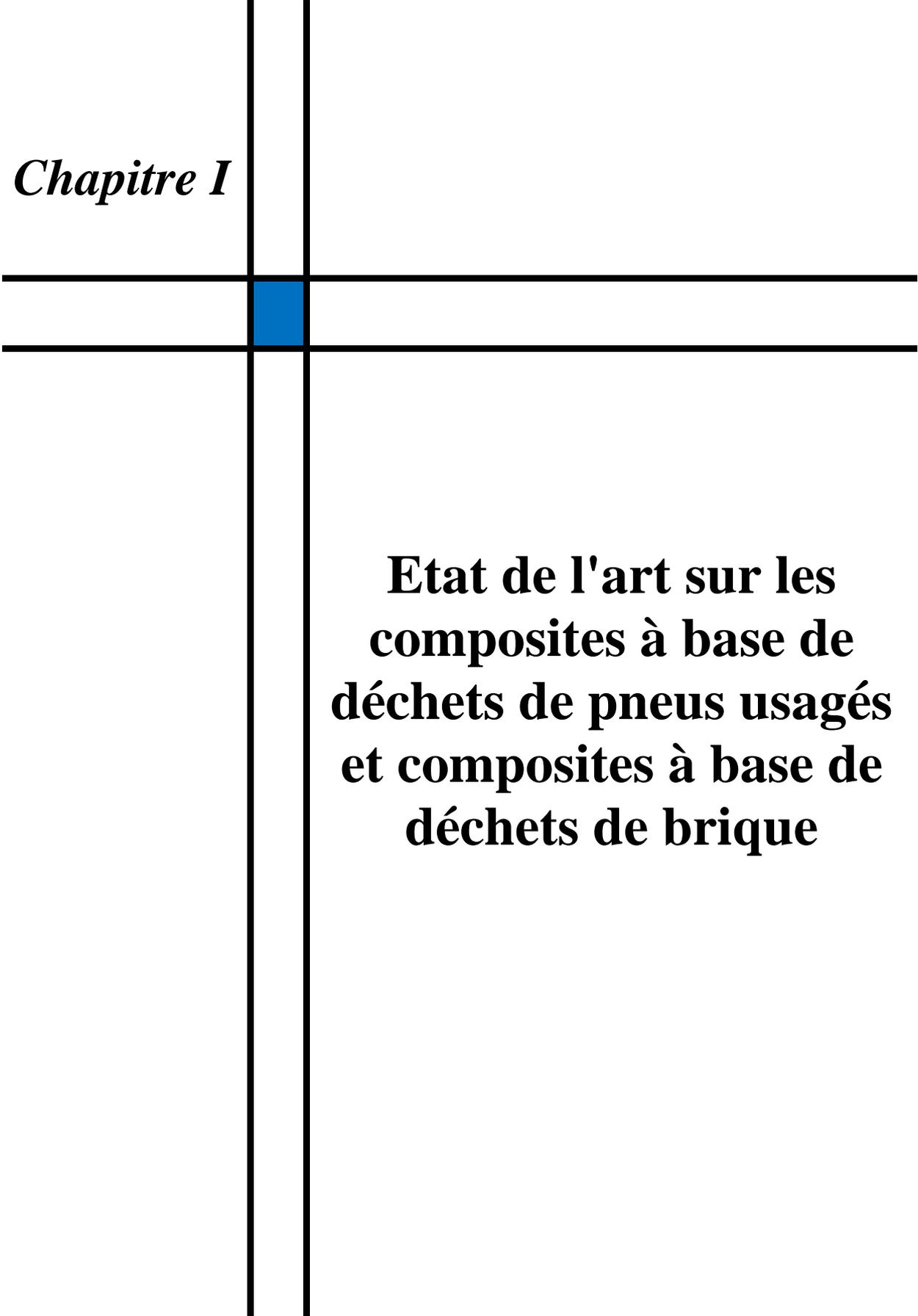
Dans le premier chapitre, nous avons réalisé une synthèse bibliographique regroupant des généralités sur les déchets (définition, types, gestion), les déchets valorisés dans le domaine de génie civil, déchets de brique et déchets de caoutchouc issus de pneus usagés et leurs compositions. Ensuite, nous avons établi une synthèse des travaux sur les éco-composites à base des granulats de caoutchouc issus de pneus usagés et déchets de brique ainsi que les propriétés des différents mortiers élaborés.

Le deuxième chapitre a porté sur la présentation et la caractérisation des matériaux utilisés dans l'étude (sable, ciment, eau, granulats de caoutchouc, déchets de brique, adjuvants, résine aqueuse) ainsi qu'au traitement des granulats de caoutchouc par la soude (NaOH). Les formulations d'étude et les procédures expérimentales adoptées ont été également présentées.

Le chapitre trois a été consacré à la présentation des résultats expérimentaux et à leurs interprétations. Les résultats obtenus ont permis d'étudier l'influence de la composition des différents mortiers avec déchets de brique (différent taux de substitution) et mortiers de granulats de caoutchouc non traités et traités avec hydroxyde de sodium sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des mortiers.

Le chapitre quatre a été consacré à la caractérisation d'un éco-composite à base de granulats de caoutchouc et de déchets de brique incorporés dans une matrice de mortier renforcée par une résine aqueuse; le but est de booster certaines performances pouvant être détériorées par le manque de cohésion entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire.

Une conclusion générale tirée de ce travail a été présentée en fin de mémoire prouvant la faisabilité de fabrication d'un éco-composite à base de deux déchets solides. Les voies qui nous semblent possibles d'explorer pour un travail de perspective ont été également indiquées.



*Chapitre I*

**Etat de l'art sur les  
composites à base de  
déchets de pneus usagés  
et composites à base de  
déchets de brique**

# Chapitre I

## *Etat de l'art sur les composites à base de déchets de pneus usagés et composites à base de déchets de brique*

---

### **I.1. INTRODUCTION**

Dans ce qui suit, nous allons donner un aperçu général sur les déchets de pneus usagés, les déchets de brique et présenter des travaux et recherches relatifs à l'utilisation des déchets de caoutchouc et de briques recyclés comme granulats (fins ou grossiers) dans la confection des bétons et mortiers.

### **I.2. GENERALITES SUR LES DECHETS**

#### **2.1. Définition des déchets**

Selon la loi Algérienne 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, le déchet est défini comme étant tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer.

#### **2.2. Différents types des déchets**

Chaque jour, de grandes quantités de déchets sont produites dans le monde. Pour pouvoir les traiter, il est nécessaire de les classer afin de les orienter vers des filières de traitements adaptées.

##### **2.2.1. Déchet inertes**

Ce sont des déchets minéraux non pollués, ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas au contact d'autres matières d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ils proviennent d'industries de

fabrication de matériaux de construction, des activités de construction, ou de réhabilitation (rénovation) et de démolition liées au secteur du bâtiment, ainsi que des activités liées à la réalisation et à l'entretien d'ouvrages publics (routes, ponts, réseaux...).

Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve: les bétons, les briques, les tuiles, les carrelages, les matériaux à base de gypse, les céramiques, les déchets de verre, les terres. On peut aussi ajouter les déchets liés aux activités routières (enrobés goudronnés, bitumineux, aimantés, avec ou sans métaux lourds...) et aux travaux de voirie (déblais de tranchées, de bordures de trottoirs, de pavés...), la réutilisation et le recyclage de ces déchets doivent être encouragés dès lors qu'ils sont possibles [80-82].

### **2.2.2. Déchets ultimes**

Un déchet ultime est défini comme n'étant plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques appartenant au processus de valorisation du déchet ou de réduction de son caractère polluant ou dangereux. La notion de déchet ultime n'est pas fonction de ses caractéristiques physico-chimiques mais plutôt du système de collecte et de traitement auquel il appartient [83].

### **2.2.3. Déchets ménagers et assimilés**

Les déchets assimilés aux ordures ménagères sont les déchets non dangereux provenant des activités économiques de l'artisanat, des commerces, des bureaux et petites industries, ou d'établissements collectifs (éducatifs, socioculturels, militaires, pénitentiaires, etc.), pouvant utiliser les mêmes circuits d'élimination que les déchets non dangereux des ménages [80, 83].

### **2.2.4. Déchets d'activité de soins**

Ce sont tous les déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire. Il s'agit donc des déchets d'activités de soins des établissements de santé, les déchets médicaux du secteur des professionnels en exercice libéral et des laboratoires d'analyses médicales et les déchets de soins des ménages et des personnes en automédication [80, 84].

### **2.2.5. Déchets encombrants**

Ce sont tous les déchets issus des ménages qui en raison de leur caractère volumineux ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés; nous pouvons citer ici, les meubles, les pneus, l'électroménager [80, 83].

### **2.2.6. Déchets spéciaux**

Ce sont les déchets qui ne sont pas assimilés aux déchets ménagers, et qui nécessitent un mode spécifique de traitement en raison de leur nature et de leur composition. L'origine de ces déchets est l'activité industrielle, agricole, les soins, les services et toutes autres activités, qui ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés. Il existe un cas particulier des déchets spéciaux, qui sont susceptibles de nuire à la santé publique et à l'environnement via leurs constituants ou par leurs matières nocives, on parle ici de déchets spéciaux dangereux [80].

### **2.2.7. Déchets spéciaux dangereux**

Les déchets dangereux sont des déchets contenant, en quantité variable, des éléments toxiques ou dangereux pouvant présenter un impact sur la santé humaine ou l'environnement. Ils peuvent être de nature organique (solvants, hydrocarbures...), minérale (acides, boues d'hydroxydes métalliques...) ou gazeuse. Ils possèdent l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : explosif, hautement inflammable, irritant, nocif, toxique, corrosif, mutagène ou cancérigène. Leur élimination nécessite des traitements particuliers dans des centres spécialisés [80, 85, 86].

## **2.3. Déchets de caoutchouc et déchets de brique**

**Les déchets de caoutchouc envisagés dans cette étude sont classés avec les déchets encombrants, les déchets de brique avec les déchets inertes. Nous devons noter que les deux déchets envisagés sont recyclables.**

### **2.3.1. Déchets de caoutchouc**

Les déchets de caoutchouc peuvent avoir diverses origines (naturelles ou synthétiques) :

- Le caoutchouc naturel: provient de la coagulation du latex de plusieurs plantes.
- Les caoutchoucs synthétiques: sont des produits de l'industrie pétrochimique.
- Les déchets de caoutchouc industriel.
- Les déchets de fabrication de pneumatiques et chambres à air.
- Les pneumatiques usagés.
- Les déchets du recyclage (poudrettes, copeaux) [87].

Les pneumatiques usagés représentent la part de déchets de caoutchouc la plus importante (plus de 85%) [88].

Cependant une fois usé, le pneu conserve encore de nombreuses qualités, ce qui en fait une véritable matière première [89].

- Elasticité
- Solidité de la structure
- Pouvoir drainant
- Pouvoir calorifique
- Haute teneur en carbone
- Durabilité
- Amortissement

La production mondiale de pneus dépasse 3,1 millions d'unité par jour, soit environ 1,2 milliard de pneus par an et plus de 38 pneus par seconde [89].

Le nombre de pneumatiques consommés progresse régulièrement avec la croissance du parc automobile. Malgré l'amélioration de la longévité des pneumatiques, le gisement de ces déchets reste très important, des centaines de millions de pneus hors d'usage, sont générés et cumulés dans des décharges à l'air libre dans des nombreux pays à travers le monde, chaque année (France, Espagne, Allemagne, Algérie...).

Même si la problématique concerne tous les pays sans exception, les données fiables disponibles ne concernent que les pays développés. Dans ce dernier cas, elles montrent que les pneus en caoutchouc représentent 60% de la production industrielle en caoutchouc.

Compte tenu de leur non décomposition, les déchets de pneus et leur méthode de stockage conventionnelle ont un effet néfaste sur l'environnement, et plus largement sur la santé publique : ils occupent une large place dans les centres de stockage important, leur mode de stockage en vrac reste très sensible au risque incendie, ces stocks sont propices à la prolifération des rongeurs et moustiques compte tenu de la grande quantité de vide et de poches susceptibles de retenir de l'eau.

### **2.3.1.1. Définition d'un pneumatique**

Les pneumatiques sont composés de mélanges de caoutchouc, d'acier galvanisé et de textiles, les pneus ne sont pas biodégradables dans la mesure où le temps qu'il leur faut pour se décomposer est indéterminé, ce sont des déchets volumineux qui sont difficiles à compacter, à collecter et à éliminer. Incorrectement traités, ils défigurent le paysage et peuvent bloquer les canaux de circulation, les ruisseaux et les déversoirs. Ils entraînent ainsi des modifications de l'écoulement des eaux qui peuvent à leur tour être des facteurs d'érosion, d'envasement et d'inondation [90].

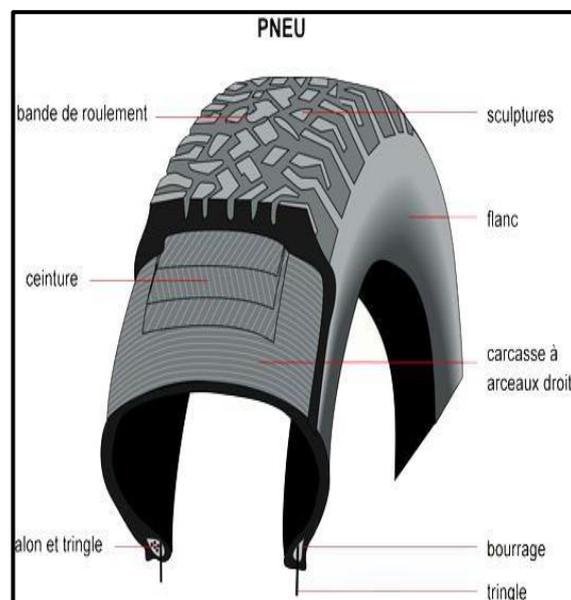
Les pneus usagés ne sont pas des déchets dangereux mais ils présentent un danger pour l'environnement en cas d'incendie (émission de fumées toxiques et éventuellement résidus huileux). On distingue 2 sortes de déchets pneumatiques :

- Les Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) qui doivent être éliminés ou orientés vers un autre emploi.
- Les Pneus Usagés Réutilisables qui doivent faire l'objet d'un rechapage ou d'une vente comme pneus d'occasion [91].

### 2.3.1.2. Principaux constituants d'un pneu

Les constituants d'un pneu sont présentés sur la figure 1.1. Peu importe où ils sont produits, tous les pneus contiennent quatre groupes fondamentaux de matériaux: les caoutchoucs naturels et synthétiques, les noirs de carbone/silices, les matériaux de renforcements (métaux/textiles) et les facilitateurs utilisés durant les divers stades de la production des pneus (cires, antioxydants...) [92].

Si on effectue une coupe, d'un pneumatique de type radial, dans le sens transversal (Figure 1.1), sa complexité, par le nombre de constituants, apparaît avec beaucoup de netteté, on distingue alors :



**Figure 1.1:** Coupe transversale d'un pneu [93].

- Pneu: bandage creux et élastique renfermant une chambre à air.
- Sculptures: dessins en relief sur la surface du pneu.
- Flanc: partie latérale du pneu.

- Carcasse à arceaux droits: charpente du pneu ayant la forme d'une arche.
- Bourrage: matériel qui sert à bourrer.
- Tringle: moulure du pneu.
- Talon et tringle: extrémité et partie inférieure du pneu.
- Ceinture: différentes épaisseurs qui recouvrent la carcasse à arceaux.
- Bande de roulement: partie du pneu entrant en contact avec la chaussée [93].

### 2.3.1.3. Composition d'un pneu

C'est un mélange à base de caoutchouc naturel ou synthétique dont les proportions varient selon le type de pneu et un certain nombre de matières auxiliaires tel que le noir de carbone. Des composants sont ajoutés à la formulation: accélérateurs, antioxydants, antiozone, charge, agents de vulcanisation, pigments, plastifiants agents de renforcements et résines. La constitution d'un pneu varie peu entre les pneus de véhicules légers et poids lourds [94]. Le tableau 1.1 présente les différentes matières contenues dans le pneu et le tableau 1.2 présente les composants chimiques.

**Tableau 1.1:** Constitution moyenne en masse des pneus [95].

<b>Material</b>	<b>Pneu de véhicules de tourisme</b>	<b>Pneu de véhicules poids lourds</b>
<b>Elastomère %</b>	47.0	45.0
<b>Noir de Carbone %</b>	21.5	22.0
<b>Acier %</b>	16.5	25.0
<b>Textile %</b>	5.5	-
<b>Oxide de Zink %</b>	1.0	2.0
<b>Soufre %</b>	1.0	1.0
<b>Autre %</b>	7.5	5.0

**Tableau 1.2:** Composants chimiques d'un pneu [95].

	<b>Pneu de véhicules de tourisme</b>	<b>Pneu de véhicules poids lourds</b>
<b>Elément</b>	<b>% W<sub>t</sub></b>	<b>% W<sub>t</sub></b>
<b>Carbone</b>	89.48	89.65
<b>Hydrogène</b>	7.61	7.50
<b>Nitrogène</b>	0.27	0.25
<b>Soufre</b>	1.88	2.09
<b>Oxygène</b>	<0.01	<0.01
<b>Chlore</b>	0.07	0.06
<b>Cendre</b>	3.9	5.5

#### ***2.3.1.4. Utilisation et valorisation des pneus usagés***

Le problème des pneus usagés est mondial, en effet des millions de tonnes sont jetés chaque année dans le monde (déchets encombrants et abondants), leur transport est coûteux et leur mise en décharge est consommatrice d'espace [96]. La valorisation de ces déchets est un sujet important pour la planète entière. Les voies de valorisation choisies sont largement diversifiées :

##### ***a) Valorisation énergétique***

La valorisation énergétique est principalement l'utilisation de broyats de pneus usagés ou de pneus entiers comme combustible de substitution pour la production d'énergie. Cette énergie sert à fournir de la chaleur et/ou de l'électricité [97]. Ils possèdent un pouvoir calorifique intéressant : 3 tonnes de pneus se substituent à 2 tonnes de fioul [98]. C'est donc le pouvoir calorifique du pneu qui est recherché lorsque celui-ci est brûlé.

L'industrie cimentière est la principale industrie consommatrice de pneus usagés. Ils sont utilisés comme combustible de substitution pour les cimenteries ou les chaufferies urbaines, lorsqu'elles sont spécialement équipées d'un système de traitement et de contrôle strict des fumées. Ici les pneus sont introduits, soit déchiquetés au niveau du four de pré-calcination, soit entiers au niveau du four [99].

**En Algérie cette valorisation est absente vu que l'utilisation du gaz naturel en industrie cimentaire est préférée [100].**

##### ***b) Valorisation en matière première***

La valorisation matière est le processus de traitement et de transformation des pneus usagés qui en permet une nouvelle utilisation sous une autre forme, par exemple en broyats, en granulats ou en poudrette et même comme pneus entiers. Les granulats de caoutchouc utilisés dans le domaine de génie civil sont obtenus par broyage des pneus usagés non réutilisables (cryogénique ou mécanique) et sont classés en plusieurs catégories:

- Pneus coupés: Morceaux de taille supérieure à 300 mm,
- Déchiquetas: Pneus découpés en morceaux irréguliers de 15 à 300 mm,
- Granulats: Pneus réduits à une granulométrie comprise entre 1 et 15 mm,
- Poudrette: Particules de granulométrie inférieure de 1 mm [101].

Nous décrivons dans ce qui suit les principales valorisations:

▪ **Le réemploi (le rechapage)**

Le rechapage consiste à réparer un vieux pneu, à condition que son support soit intact, en lui appliquant une nouvelle couche de gomme ou plus exactement en le revêtant d'une nouvelle bande de roulement, une fois celle qu'il avait à l'origine aurait atteint sa limite d'usure. Les pneus soigneusement rechapés sont considérés aussi fiables et sûrs que les pneus neufs [102].

▪ **La réutilisation**

Deux filières de réutilisation sont autorisées en France par le décret n° 2002-1563 du 24 décembre 2002.

- En milieu agricole, les pneus usagés entiers sont utilisés pour le maintien des bâches d'ensilage (Figure 1.2).
- Dans le domaine du génie civil, les pneus usagés sont utilisés entiers ou découpés pour constituer des parements ou renforcer des remblais allégés (techniques PNEUSOL, PNEURESIL) figure 1.3 [99].

▪ **Pneus entiers en technique pneusol**

Le pneusol est un mélange de pneus et de sol, dans lequel les pneus sont utilisés comme renforts du sol. Ils sont capables de supporter des efforts de traction importants et sont soit entièrement soit partiellement découpés afin d'être associés en nappes, en couches superposées, grâce à des attaches métalliques [103].



**Figure 1.2:** Maintien des bâches d'ensilage.



**Figure 1.3:** Pneusol.

▪ **Poudrette de caoutchouc**

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR) ou de déchets de rechapage. Le broyage peut être mécanique ou cryogénique

(fragilisation du caoutchouc à froid). S'il est cryogénique, la poudrette obtenue est de meilleure qualité mais présente un coût plus élevé. La poudrette est utilisée dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes anti fissures à usage routier ou de membranes anti vibrations destinées aux plates-formes ferroviaires, de roulettes, dalles de revêtement, sols amortissant, murs anti-bruit, aires de jeux, elle peut aussi servir de support de voie ferrée afin de réduire le bruit et les vibrations. Elle est également employée comme liant dans les bitumes. L'enrobé possède ainsi un pouvoir drainant important évitant le phénomène d'aquaplaning, le bruit de roulage s'en trouve réduit et le processus de vieillissement ralentit [99].

Incorporée dans le bitume ou associée aux enrobés (Figure 1.4), la poudrette de pneu usagé permet d'améliorer les caractéristiques acoustiques de l'enrobé ainsi que sa résistance à la fissuration lors du gel et du dégel. Elle favorise également l'adhérence des véhicules [104].

- **Granulats de caoutchouc:** il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes.

### - **Gazons synthétiques**

Pour les stades de foot ou de rugby, sous forme de granulats libres maintenant les fibres d'herbe synthétique, le pneu permet une utilisation illimitée du stade (Figure 1.5), une qualité de jeu identique en toute saison, une lutte contre la sécheresse ou l'inondation des terrains, une réduction de l'arrosage et de l'entretien [105].

### - **Aires de jeux**

Les propriétés élastiques des granulats de pneus en font un matériau particulièrement intéressant pour la fabrication d'aires de jeux amortissantes (figure 1.6), le caoutchouc des pneus usagés est transformé en granulats, mélangés à la résine et coulé dans un moule. Ces éléments alvéolés permettent une absorption importante des chocs et garantissent une grande sécurité pour les aires de jeux [105].

### - **Sol équestre**

Ce sol (Figure 1.7) est composé d'une semelle de granulats liés par une résine et recouverte d'une couche de granulats libres. Ils cumulent des qualités d'amortissement, de souplesse et d'élasticité permettant une bonne impulsion du cheval et dédramatisant la chute. Contrairement au sable utilisé en manège, ce revêtement ne dégage aucune poussière, ne

requiert donc aucun arrosage et permet d'économiser significativement les fers des chevaux [106].



**Figure 1.4:** Enrobés routiers.



**Figure 1.5:** Gazons synthétiques pour les stades.



**Figure 1.6:** Aire de jeux.



**Figure 1.7:** Sol équestre.

### **2.3.1.5. La valorisation des déchets de caoutchouc en Algérie**

L'environnement est un enjeu très important, et sa préservation est une responsabilité commune, l'Algérie a pris conscience de problème de pneus usagés et a donné naissance à des stratégies locales ou en coopérations internationales qui font face à la pollution.

Sur le plan réglementaire, plusieurs textes et lois ont été promulgués pour définir, gérer et éliminer les déchets. Au sens de la loi (Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets) [107], on entend par déchet : tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance ou produit et tout bien, meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou d'éliminer.

L'annexe III du décret exécutif n°06-104 classe les pneus hors d'usages comme des déchets spéciaux (classe S) sous le code (16.1.1) sans aucun critère de dangerosité [108]. Les déchets du caoutchouc et des pneumatiques ne doivent être ni abandonnés, ni brûlés à l'air libre.

Les pneus neufs en Algérie sont, soit produits localement, soit importés. Michelin Algérie détient 30 % de la part du marché algérien avec une production annuelle de 700 000 pneus, dont 60 % pour poids lourds (Quotidien Liberté du 14 juin 2007).

Depuis 2004, L'Algérie importe chaque année en moyenne 49.62 milliers de tonnes de pneumatiques en caoutchouc, selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur. Sachant que chaque pneu neuf vendu génère un pneu usagé, et tenant compte de la perte de masse due à l'usure du pneu une fois usé, on se retrouve avec environ 45.65 milliers de tonnes de pneus usagés, chaque année. Ces déchets ne bénéficient encore d'aucune structure de valorisation et sont stockés dans des décharges à l'air libre constituant ainsi une gêne pour l'environnement (Figure 1.8).



**Figure 1.8:** Cas d'une décharge (stockage à l'air libre) « El Harrach » Algérie [109].

D'une manière globale et selon une étude statistique estimative du gisement des pneumatiques usagés (PUNR) en Algérie, et selon un modèle proposé par [98]. Le tableau suivant donne un aperçu sur les quantités de pneus usés générés par an. (Tableau 1.3).

**Tableau 1.3:** Quantités de pneus usagés générés par an en Algérie [98].

Types de pneus	Pneus/an	Tonne/an
Véhicule Léger VL	1 107 410	7 966.97
Poids Lourds PL	332 104	17 951.53
<b>Total</b>	<b>1 439 514</b>	<b>25 918.50</b>

Cette étude, estime que la quantité générée annuellement en Algérie est de l'ordre de 1 439 514 unités, soit 25 918 tonnes par an (3 500 000 véhicules en 2007). Cette quantité évoluera à la hausse à cause de l'augmentation du parc automobile Algérien qui est estimé à 8 000 000 de véhicules, d'après la déclaration du Ministre du transport, pour la fin 2013 [110].

Malgré tous les inconvénients que les pneumatiques usagés possèdent, ils ne sont pas catégorisés comme déchets toxiques ou dangereux, car ils ne sont pas biodégradables, mais sont nuisibles pour l'environnement et la santé en cas d'incendie. Une fois les pneus brûlés ils dégagent des fumées hautement dangereuses par leurs teneurs en gaz toxique, causant ainsi chaque année des maladies et des allergies telle que l'allergie cutanée. Ils produisent aussi une vapeur toxique (possédant des composants de silice et de carbone). Les épaisses fumées se répandant dans l'atmosphère en cas d'incendie (Figure 1.9) peuvent causer beaucoup de maladies respiratoires.



**Figure 1.9:** Fumée toxique qui se dégage en brûlant des pneus [109].

Dans le bassin méditerranéen, l'Algérie comme certains autres pays a compris que la technologie est la clé de l'évolution, sur des méthodes et des techniques nouvelles, tout en pensant à la protection et la conservation de l'environnement dans le cadre du développement durable. Actuellement un certain nombre de réalisations pilotes utilisant les pneus usagés entiers sont initiées par la direction de la recherche et de la prospective du ministère des travaux publics et portent notamment sur la stabilité des talus des routes vis-à-vis du glissement (technique du pneusol).

Plusieurs réalisations par la technique pneusol ont été effectuées en Algérie (19 ouvrages), nous citons dans ce qui suit quelques réalisations importantes [109].



Figure 1.10: Ouvrage végétalisé  
Projet pilote – de Bousmail.



Figure 1.11: Pose de nappe de pneus  
Projet pilote –Route de Bousmail.



Figure 1.12: Ouvrage de Mostaganem RN11 (Algérie) - Stabilité d'un talus.



La construction génère aussi une quantité importante de déchets de brique et de béton rarement valorisés. La fabrication des briques génère également une quantité non négligeable de briques de mauvaise qualité qui sont rejetées et restent sans utilisation.

### 2.3.2. Déchets de brique

Les briques sont obtenues par cuisson de certaines argiles à une température d'environ 1000C°. Par combinaison chimique à partir de 700 C° l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite. L'oxyde de fer des argiles donne la coloration aux briques.

En général la fabrication des briques se compose des cinq opérations principales comme indiquées sur le schéma de la figure 1.13.

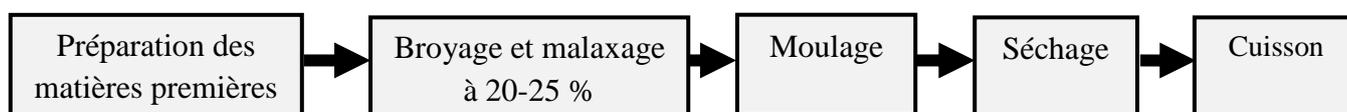


Figure 1.13: Schéma de la fabrication des briques [111].

La briqueterie est une source de production de déchets de brique. Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites.

En Algérie ces sous-produits sont en abondance, ils constituent 10 à 15% de la production totale [112]. Ils sont jusqu'à l'heure actuelle peu valorisés et peu recyclés.

Les principales utilisations de déchets de brique peuvent être résumées comme suit:

- Granulats dans la couche de fondation routière,
- Matériau de remblai,
- Pour l'aménagement paysager [113],
- Recyclage pour le revêtement des terrains de tennis [114],
- Briques broyées en tant que substrats végétaux,
- Granulats comme substituts pour le remplissage des tranchées de tuyaux in situ [115],
- Brique broyée comme ajout (addition minérale) pour la fabrication du béton à haute performance [116],
- Elaboration d'un nouveau ciment composé à base de déchets de briques finement broyés [112, 117],
- Brique concassée comme granulats grossiers, [113, 118, 66] et comme granulats fins pour remplacer les matériaux naturels tels que le sable [115, 67].

### **I.3. PROPRIETES DES COMPOSITES A BASE DE DECHETS DE PNEUS USAGES**

Les déchets de pneus usagés peuvent être incorporés dans les mortiers et bétons sous forme de granulats ou de poudrettes. Les performances obtenues sont présentées dans ce qui va suivre.

Des travaux récents utilisant plusieurs types de granulats de caoutchouc issus de différents secteurs ont été menés au laboratoire [26, 43]. Ces derniers ont montré que l'incorporation de granulats de caoutchouc dans une matrice cimentaire confère au composite des propriétés physicomécaniques et thermo-hydriques très intéressantes. L'effet de la nature du caoutchouc, notamment son élasticité et sa morphologie, a été mis en évidence.

Plusieurs autres travaux [21, 22, 25, 26, 119, 120] ont porté sur les performances mécaniques et hydriques et notamment la déformabilité de bétons, des mortiers et même des bétons autoplacants [121] dans lesquels une proportion variable des agrégats dits traditionnels (sable, gravillons et gravier) était remplacée par des granulats de caoutchouc issus de broyage de pneus usagés.

Nous présentons dans ce qui va suivre une synthèse sur l'effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés des bétons et mortiers frais et sur leurs propriétés à l'état durci (propriétés physico-mécaniques et durabilité).

### 3.1. Effets des granulats de caoutchouc sur les propriétés des bétons et mortiers à l'état frais

#### 3.1.1. Consistance

De nombreux auteurs [24, 122-132], ont étudié la consistance du béton et mortier caoutchouté. Ils ont observé une diminution de la maniabilité avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc en volume total cumulé par rapport au béton témoin, cette diminution est due à l'augmentation de la viscosité du mélange.

Selon Mehimer et al [133], les échantillons témoins ont la valeur d'affaissement la plus élevée (95 mm), tandis que la valeur d'affaissement a été réduite de 5.3%, 15.8%, 21.0%, 21.1% et 36.8% pour des teneurs en caoutchouc de 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement (Figure 1.14).

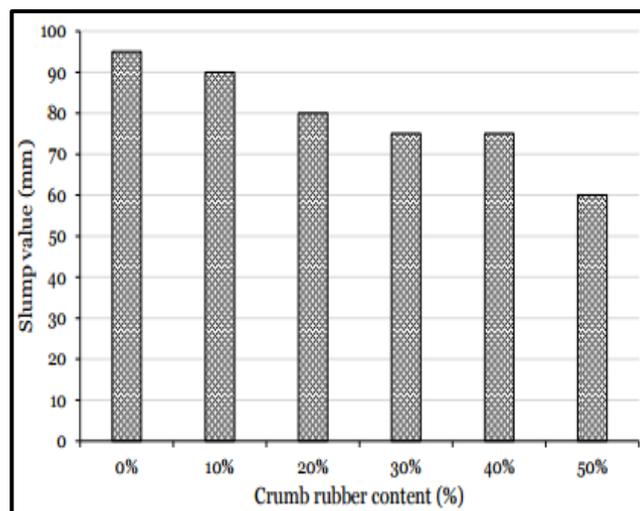


Figure 1.14: Valeur d'affaissement du béton frais [133].

Khatib et al, Taha et al [24, 134] ont également observé que les mélanges fabriqués avec la poudre fine de caoutchouc étaient plus pratiques que ceux fabriqués avec des copeaux de pneus ou une combinaison de copeaux de pneus et poudre de caoutchouc.

Avec l'augmentation supplémentaire de la teneur en caoutchouc, pour les deux granulats de caoutchoucs fins et grossiers, le mélange est devenu plus rigide et moins réaliste [135, 136],

ceci est reflété par la baisse significative des valeurs d'affaissement. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par [24, 27].

Bien que la majorité des investigations montrent que les granulats de caoutchouc conduisent à une diminution de la maniabilité du béton, au contraire des études réalisées par certains auteurs [31, 137-139], ont indiqué une conclusion un peu différente. En effet, d'après ces études le béton incorporant des granulats de caoutchouc a une maniabilité acceptable en termes de facilité de manipulation, de placement et de finition, cela signifie que la maniabilité est très dépendante des caractéristiques des granulats de caoutchouc.

Bignozzi et al [140], référant que l'introduction des particules de caoutchouc n'a pas d'influence sur la maniabilité d'une manière significative si la quantité du superplastifiant augmente en même temps. L'utilisation d'adjuvants représente un moyen de contrôler la rhéologie. Par exemple, l'utilisation d'un agent entraîneur d'air améliore de façon substantielle la maniabilité du béton frais.

Le processus de recyclage détermine également la maniabilité du béton à base de caoutchouc; l'étude menée par [141] a conclu que les granulats de caoutchouc obtenus par broyage cryogénique des pneus usagés non réutilisables (granulats ronds) affichaient une plus forte valeur d'affaissement que les granulats de caoutchouc broyés mécaniquement (granulats angulaires) ceci est dû à la faible surface spécifique et la faible rugosité des granulats de pneumatiques dans le processus cryogénique. Les granulats de caoutchouc angulaires forme une structure de verrouillage résistant au normal écoulement du béton sous son propre poids, d'où ces mélanges montrent moins de fluidité.

En ce qui concerne le béton auto-plaçant, des recherches [121, 142-144] ont montré que l'adjonction de granulats de caoutchouc dans des bétons auto-plaçants (BAP) entraîne une modification des propriétés à l'état frais, la modification la plus remarquable étant la chute de l'étalement avec l'augmentation du taux d'incorporation.

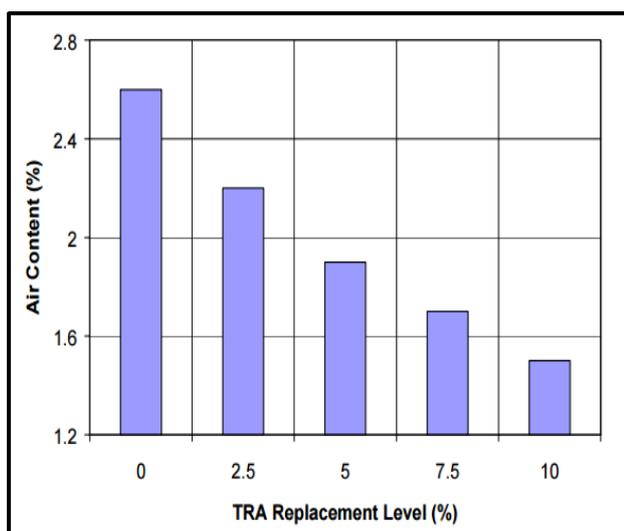
### **3.1.2. Air occlus**

La mise en place du béton conduit ce dernier à toujours renfermer une certaine quantité d'air, appelé air occlus. Ce volume dépend de l'énergie de serrage: plus l'énergie de serrage est importante, plus il sera possible de réduire la quantité d'air occlus.

La teneur en air est un paramètre important dans les bétons et mortiers, l'augmentation de l'air occlus entraînerait une diminution de la résistance à la compression après une période de durcissement désignée [145].

En termes de bétons caoutchouté, la substitution de granulats classiques par des granulats de caoutchouc, plus légers entraîne une augmentation de l'air occlus, par rapport au béton témoin sans particule de caoutchouc [24, 27, 39, 130, 146, 147].

Selon Al Akhrass et al [148], la teneur en air a diminué avec l'augmentation du taux de substitution de caoutchouc (caoutchouc sous forme de cendre volante) de 2.6% à 1.5% pour un mortier contenant 10% de caoutchouc. Le pourcentage de diminution de l'air occlus des mortiers était de 15, 27, 35 et 42% pour une teneur en caoutchouc de 2.5, 5, 7.5 et 10% respectivement comme le montre la figure 1.15.



**Figure 1.15:** Effet de la cendre de caoutchouc sur la teneur en air du mortier frais [148].

La quantité élevée d'air occlus dans des mélanges caoutchoutés peut être due à la nature non polaire des granulats de caoutchouc et de leur capacité à piéger l'air dans leur surface rugueuse. Lorsque les granulats de caoutchouc non polaires sont ajoutés au mélange de béton. Les surfaces extérieures des granulats de caoutchouc, de nature hydrophobe, ont tendance à entraîner des bulles d'air. Ces dernières peuvent se déplacer en partie vers le cœur de la matrice cimentaire ou rester piégées à la surface des granulats caoutchouc. Dans ce dernier cas, elles empêcheront la pâte de ciment d'adhérer aux granulats. Cette augmentation dans l'air occlus serait certainement la cause de réduction de la résistance du béton [39].

Certains chercheurs pensent que la granulométrie ouverte est l'une des principales causes qui affecte la teneur en air occlus du béton incorporant des granulats de caoutchouc, ils ont noté que la tendance est d'ordre croissante des valeurs de la teneur en air pour toutes les tailles de particules de caoutchouc [134, 24].

Le remplacement des granulats fins par des particules de caoutchouc entraîne une moindre augmentation de la teneur en air comparativement aux granulats grossiers [149]. En revanche, il a été noté par [24] que les particules de caoutchoucs plus grossiers entraînent une augmentation moins importante de l'air occlus par rapport à la taille plus fine des particules de caoutchouc.

### **3.2. Effets des granulats de caoutchouc sur les propriétés des bétons à l'état durci**

#### **3.2.1. Masse volumique à l'état sec**

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition, en particulier de la densité des granulats utilisés. L'éco-composite cimentaire incorporant des granulats de caoutchouc en substitution des granulats naturels a une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire, cela est dû à la faible densité du caoutchouc [24, 42, 150]. L'utilisation potentielle de ce type de béton s'avère très intéressante en termes de gain de poids. La diminution de poids conduit à des économies de transport des éléments manufacturés et à des gains de productivité à la mise en œuvre. La masse volumique des mélanges à base de granulats de caoutchouc diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc allant de 0-100% [20, 39, 134, 149, 151-154].

Mahmod et al [155] ont comparé la densité d'un mélange classique avec celui d'un mélange caoutchouté, ils ont enregistré une diminution de la densité du mélange caoutchouté de l'ordre de 4.9%, 10.5% et 12.2% pour des teneurs en caoutchouc de 10%, 20% et 30% comme le montre la figure 1.16.

Cette réduction est attribuable à la diminution de la densité du granulats de caoutchouc par rapport au granulats ordinaire; outre la faible densité du caoutchouc, l'allègement du composite est également liée à l'augmentation de l'entraînement d'air dans la matrice, cette augmentation est liée à la nature non-polaire du caoutchouc, qui entraînerait de l'air dans la matrice. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par certains auteurs concernant les bétons à base de caoutchouc [20, 21].

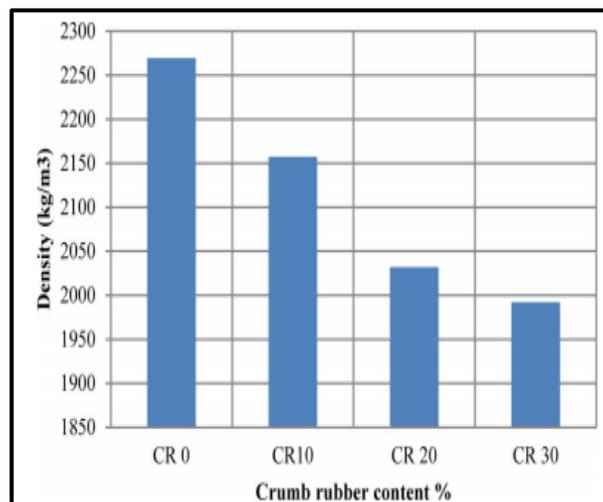


Figure 1.16: Densité par rapport au taux de substitution du granulat fin par des miettes de caoutchouc [155].

Sukontasukkul et al [05] ont estimé que la floculation des particules de caoutchouc pendant le malaxage du béton avec des teneurs en caoutchouc croissantes peut avoir un certain effet sur la diminution de la densité des spécimens de béton. La floculation peut créer de grands vides à l'intérieur du bloc conduisant à une plus grande porosité qui abaisse finalement la densité due à l'absorption d'eau élevée des particules de pneu.

La dimension du granulat de caoutchouc a une influence sur la densité des mélanges. Pour la même teneur en caoutchouc, les mélanges à base de granulats fins de caoutchouc ont des densités plus faibles que ceux contenant des granulats en caoutchouc grossier [123, 156].

La réduction de la densité peut être une caractéristique souhaitable dans certaines applications, y compris les applications architecturales telles que le clouage de béton, les façades de fausses pierres d'accompagnement ainsi que des blocs préfabriqués et dalles de béton [27].

### 3.2.2. Résistance à la compression

La résistance mécanique représente un critère de conception important. Généralement, on admet que la résistance à la compression est un bon indicateur des propriétés mécaniques d'ensemble du béton à l'état durci. Elle dépend d'un grand nombre de paramètres: le type et le dosage des matériaux utilisés, la nature des granulats, la porosité, la condition de réalisation et de cure, etc.

La teneur en sable joue un rôle important dans la résistance du béton. Par conséquent, le remplacement de la teneur en sable par du caoutchouc conduit à la formation d'une matrice plus faible, ce qui conduit à une résistance à la compression plus faible.

Les granulats de caoutchouc sont considérablement plus souples et plus élastiques que la matrice cimentaire [20, 157, 158] et les interfaces entre ces derniers et la pâte de ciment sont encore plus larges et poreux qu'avec des granulats naturels classiques.

L'unanimité des chercheurs admettent dans la littérature que les granulats de caoutchouc sont très préjudiciables à la résistance en compression. Les mesures réalisées sont en accord avec cette généralité [28, 45, 159-164]. Cette détérioration est d'autant plus importante que le taux de substitution est élevé et que les granulats en caoutchouc utilisés sont de petites dimensions. Elle est par ailleurs accompagnée d'une baisse du module d'élasticité.

Dans certaines études, une réduction d'environ 80- 90% de la résistance la compression a été rapportée en fonction de la taille et du type de granulats de caoutchouc pour une teneur en caoutchouc allons jusqu'au 100% [165, 166].

Selon Benazzouk et al [167], la résistance diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en particules de caoutchouc. Pour une composition allant de 0 à 100 %, la résistance à la compression varie de 36 MPa, pour le mortier de référence, à 6.5MPa ; soit une réduction de l'ordre de 82% (Figure 1.17).

Les résultats montrent que malgré une baisse significative de la résistance à la compression, la valeur obtenue pour une composition à 100% en caoutchouc, reste compatible avec l'utilisation du matériau dans le domaine d'application des bétons légers de construction de "classe II" (masse volumique inférieure à 1500 kg/m<sup>3</sup> et une résistance à la compression supérieure à 3.5 MPa), suivant la classification fonctionnelle de la Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux RILEM (RILEM LC2, 1978) [167].

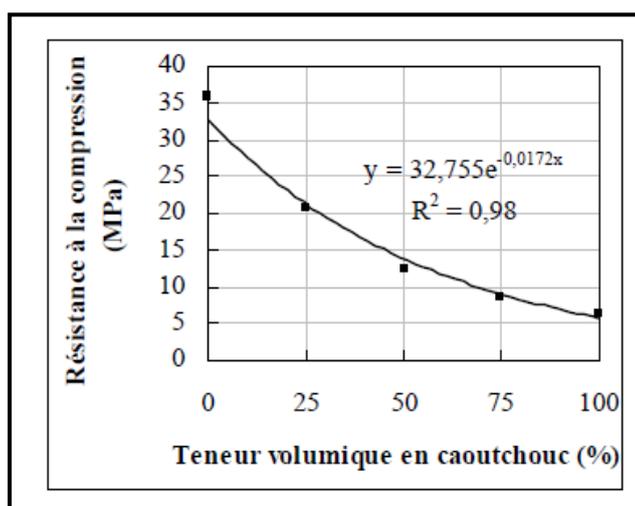


Figure 1.17: Evolution de la résistance à la compression des composites [167].

Le défaut d'adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire [24, 168,169], permet de justifier une partie des tendances observées pour ce qui est des propriétés mécaniques. La faible adhérence des particules de caoutchouc et de la pâte de ciment donne lieu à la formation d'une faible zone de transition interfaciale (ITZ) entre le caoutchouc et la pâte de ciment; la formation d'une faible liaison réduit la résistance de flexion et de compression du béton. De plus, la grande déformabilité du caoutchouc conduit à des concentrations de contraintes élevées autour des particules de caoutchouc, conduisant à une défaillance précoce des échantillons de béton caoutchouté sous la charge appliquée [170].

La perte de résistance est liée, d'une part, à la nature élastique des particules de caoutchouc et d'autre part, à l'augmentation de la porosité en raison d'une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau en fonction de la composition en caoutchouc [167]. Elle est nettement liée à la faible résistance à la compression des particules de caoutchouc par rapport à la résistance des granulats de béton selon d'autres auteurs [21, 171].

Le caoutchouc a une densité inférieure à celle des éléments constitutifs du béton. En outre, la sur-vibration du mélange caoutchouté, se traduit par la migration de particules de caoutchouc moulus vers la surface supérieure du béton qui provoque une répartition non homogène des particules de caoutchouc dans la matrice de béton entraînant une réduction de la résistance du béton [172].

Les particules de caoutchouc ont une nature hydrophobe, lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau [134, 149, 173]. Ce comportement piège les bulles en augmentant la teneur en air du mélange [27, 137]. Un résultat majeur de l'augmentation de la teneur en air est la réduction de la résistance du béton [170].

Il est avantageux de substituer ou d'ajouter des additions comme la fumée de silice dans la matrice cimentaire à base de caoutchouc [174], pour améliorer l'adhérence entre la pâte de ciment et le caoutchouc et augmenter la résistance à la compression. Ces ajouts minéraux ont la propriété de réagir avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment Portland et de former de nouveaux C-S-H, qui contribuent à améliorer les résistances à la compression au jeune âge et aux âges avancés des bétons.

Des études ont révélé que le changement de la texture de surface en caoutchouc lisse à une surface rugueuse par différents traitements pourrait développer une meilleure liaison par le traitement de la surface des grains de caoutchouc avant leur introduction dans le mélange permettant de pallier le défaut d'adhérence observé entre le caoutchouc et la matrice cimentaire et ainsi de limiter les chutes de résistance en compression [175, 176].

Dans la plupart des études antérieures, une réduction de la résistance à la compression a été notée avec l'ajout des granulats de caoutchouc dans le mélange de béton, mais il existe une possibilité d'améliorer cette résistance en utilisant des agents de désaération ou de super plastifiant permettant d'abaisser la teneur en eau de 10 à 30% ce qui provoque automatiquement l'augmentation des résistances [177].

### 3.2.3. Résistance à la flexion

Une perte de résistance à la flexion est associée au remplacement du granulat naturel dans un béton ou mortier par des granulats de caoutchouc avec un taux de substitution élevée [30,178-180], cette réduction est liée toujours à la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment.

D'après les résultats de [139], la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc de 0% à 30%, à l'âge de 28 jours et pour un rapport E/C= 0.41, la résistance de béton de référence est égale 10.3 MPa et 6.68 MPa pour une teneur de caoutchouc 30% comme montre la figure 1.18.

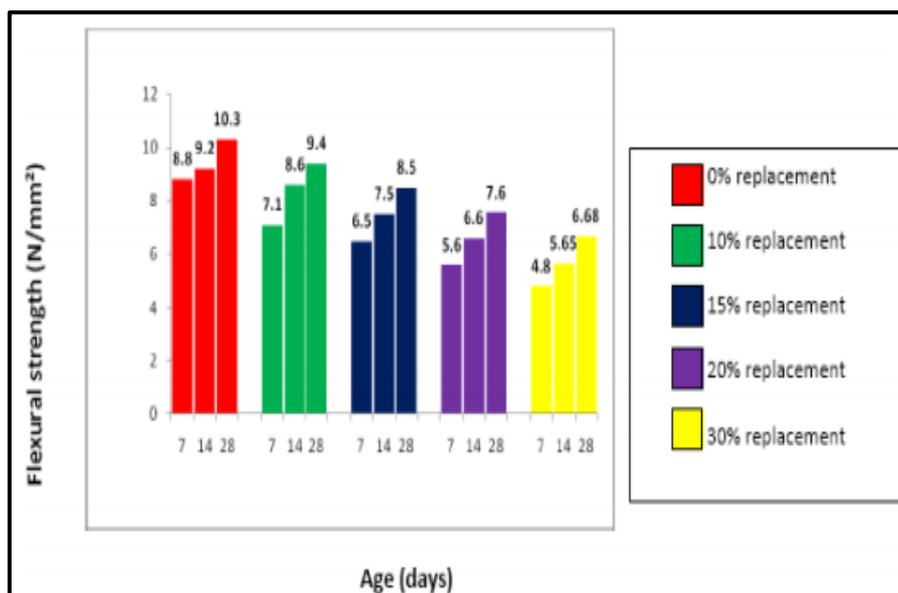


Figure 1.18: Résistance à la flexion du béton à différents âges pour E/C= 0,41 [139].

Les résultats obtenus montrent qu'avec une substitution de 30% en volume des sables par des granulats de caoutchouc de même taille, la résistance en flexion est réduite de 62 %, contre 74% pour la résistance en compression. Ces résultats confirment les observations très similaires de [29].

Aiello et al [31] ont montré que la résistance à la flexion diminue également lorsque l'agrégat grossier était remplacé par des agrégats de caoutchouc par rapport aux agrégats fins. Une tendance similaire a été observée par [6,181], puisque la granulométrie de la poudrette de caoutchouc est petite et elle peut améliorer la compacité du mélange, la résistance à la flexion tend à se comporter mieux avec l'ajout de la poudrette de caoutchouc au lieu de copeaux de caoutchouc grossier.

L'ajout du caoutchouc en tant que fibre jusqu'à 20% du volume total augmente la résistance à la flexion du béton, montrant une rupture lente et incomplète [182]. Cependant, l'augmentation de la quantité de fibres au-delà de 20%, diminue le gain de la résistance à la flexion.

Des observations visuelles pendant les essais de flexion ont montré qu'à la charge ultime, les échantillons de mortiers de référence (sans caoutchouc) ont soudainement éclaté, représentant le mode de rupture fragile. Au contraire, des échantillons de mortier caoutchouté, en particulier à 10% et 15% de remplacement de granulats fins, ont présenté un mode de rupture ductile et sont restés intacts après défaillance [183].

Ho et al [161], ont signalé que la fragilité et l'évolution des dommages causés par le caoutchouc dans les composites de ciment ont diminué à mesure que la teneur en caoutchouc a augmenté. Ils ont attribué ce comportement à la résistance à la propagation des microfissures à l'interface matrice caoutchouc-ciment.

### **3.2.4. Résistance à la traction**

La résistance à la traction des bétons est une autre propriété importante pour évaluer la qualité des bétons. On mesure celle-ci par l'essai de résistance à la traction indirecte aussi appelée essai brésilien ou par fendage. Bien que les bétons ne soient généralement pas conçus pour résister à la traction directe, connaître la résistance à la traction permet d'estimer la charge sous laquelle la fissuration se développe.

Comme plusieurs autres propriétés du béton, on observe que la résistance à la traction du béton résultant diminue lorsque le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat de caoutchouc augmente [28, 178, 184-187]. Les résultats de la figure 1.19 sont une parfaite illustration.

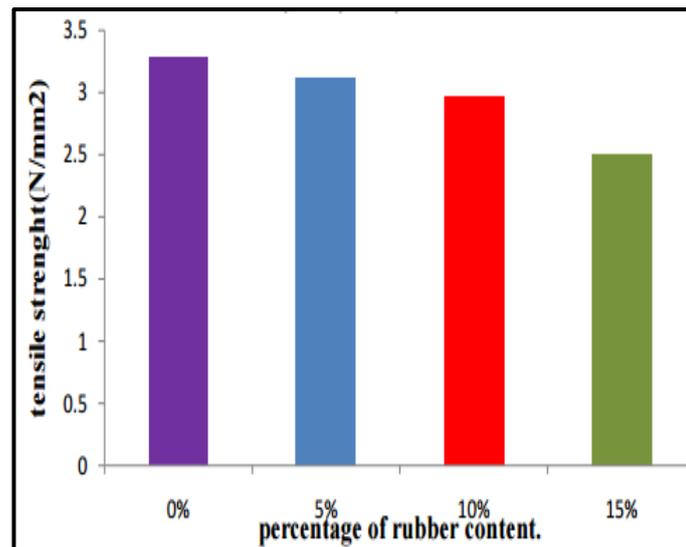


Figure 1.19: La réduction de la résistance à la traction en fonction de la teneur en caoutchouc [186].

Il ya eu une diminution de la résistance à la traction de 4.7%, 9.5% et 23.7% par rapport au béton témoin associée au remplacement du granulat naturel par des granulats de caoutchouc d'un taux de 5%, 10% et 15% respectivement [186].

### 3.2.5. Module d'élasticité statique

Le module d'élasticité du béton est étroitement lié à la propriété de la pâte de ciment, à la rigidité des agrégats sélectionnés, ainsi qu'à la méthode de détermination du module.

Comme les résistances mécaniques, l'incorporation de caoutchouc dans les bétons et les mortiers réduit considérablement le module d'élasticité statique [46, 188-191].

Les caractéristiques d'agrégats influents sur le module d'élasticité, généralement, le béton normal est plus fragile (cassant) avec un module d'élasticité plus élevé par contre le béton mélangé avec le caoutchouc est plus ductile ou flexible et le module d'élasticité est inférieur (les agrégats de caoutchouc ont une rigidité très faible par rapport aux agrégats naturels). Par conséquent, il est prouvé que l'addition d'un faible volume de caoutchouc dans le béton augmente notamment le module d'élasticité [192, 193].

Le module d'élasticité est également affecté par la substitution de sable par des granulats caoutchouc de grande taille. Cependant, sa diminution est moins sévère que celle de la résistance ; pour des taux de substitution de 10%, 20% and 30%, la résistance diminue de 42.48%, 65.10% and 78.77% et le module d'élasticité de 17.95%, 33.33% et 53.85% respectivement [194].

La variation du module d'élasticité statique ( $E_s$ ) pour deux types de caoutchouc, granulats de caoutchouc moulé GR-8 et granulats de caoutchouc concassé CR-40, est représentée sur la figure 1.20. Le module d'élasticité statique du béton caoutchouté est inférieur à celui du béton ordinaire. La valeur moyenne du module d'élasticité du béton ordinaire était de 31.8 GPa, tandis que celui du béton avec du caoutchouc broyé était de 27.1 GPa, soit 81% de celui du béton ordinaire. Le module d'élasticité a diminué avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc pour les deux bétons caoutchouté moulé et concassé par rapport au béton sans caoutchouc. Alors que la teneur en caoutchouc variait de 15 à 45%, le module d'élasticité pour le béton caoutchouté moulé a diminué de 14.8 à 29.9%, tandis que pour le béton caoutchouté concassé la valeur est passée de 27.4 à 49.4% par rapport au béton ordinaire [154].

Comme le montre clairement la figure 1.20, le caoutchouc concassé a provoqué une réduction plus importante du module d'élasticité statique du béton caoutchouté, pour un taux de substitution plus élevé des granulats par le caoutchouc [154].

L'addition de 15% de fumée de silice en substitution du ciment, améliore légèrement le module d'élasticité du béton caoutchouté, mais elle est encore plus faible que celle observée pour le béton conventionnel [195].

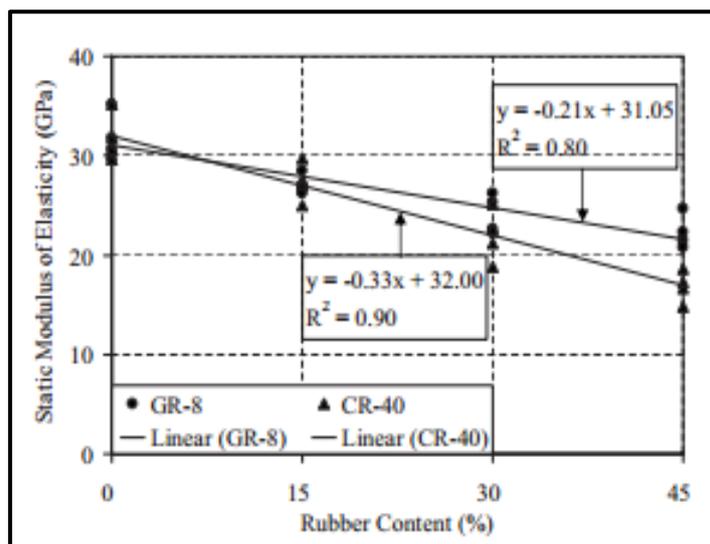


Figure 1.20: Effet de la teneur en caoutchouc sur le module d'élasticité statique [154].

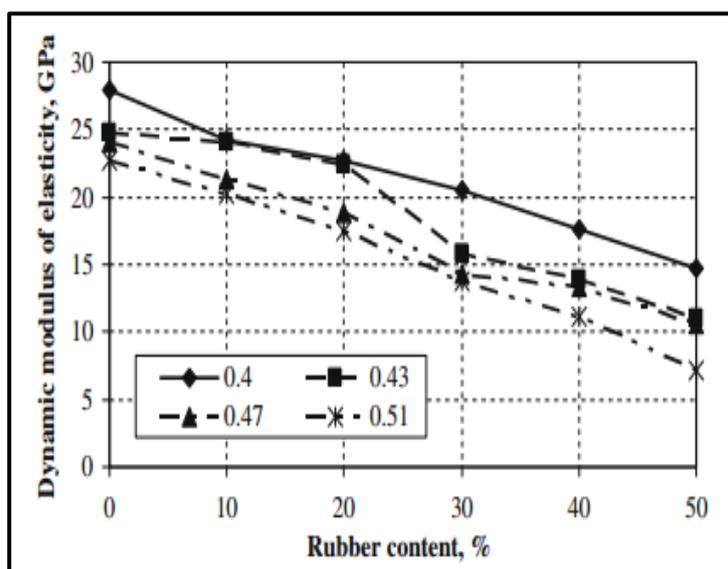
### 3.2.6. Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique  $E_d$  est l'une des propriétés mécaniques les plus importantes du béton; il existe généralement une corrélation positive entre  $E_d$  et la résistance à la compression dans le béton [196]. Le module d'élasticité dynamique est fortement affecté par le type d'agrégats, par leurs proportions ainsi que par la porosité et l'homogénéité du

mélange. Au contraire, de la résistance à la compression, le module d'élasticité dynamique  $E_d$  est testé en utilisant des méthodes non destructives sans application de contrainte donc il n'y a ni formation de microfissures ni fluage pendant l'essai.  $E_d$  est généralement plus élevé que le module d'élasticité statique  $E_s$  [197].

La vitesse des impulsions ultrasoniques et le module dynamique du béton mesuré ont été réduits au fur et à mesure que le pourcentage des particules de caoutchouc augmente [198-200].

Selon Uygunog̃lu et al [201], les modules d'élasticité dynamiques des mortiers autoplaçants témoins étaient de 28.0, 24.8, 24.0 et 22.6 GPa, et les valeurs pour les mortiers autoplaçants incorporant 50% des granulats de caoutchouc étaient de 14.7, 11.0, 10.6 et 7.1 GPa avec des rapports  $E/C= 0.40, 0.43, 0.47$  et  $0.51$  respectivement. Lors de la comparaison des mélanges témoins et caoutchoutés, la diminution du module d'élasticité dynamique due à la teneur en caoutchouc était respectivement de 47.4%, 55.8%, 55.7% et 68.4% pour des rapports  $E/C = 0.40, 0.43, 0.47$  et  $0.51$ . Toutes ces valeurs sont visibles sur la figure 1.21.



**Figure 1.21:** Variation du module d'élasticité dynamique du mortier autoplaçant en fonction de  $E/C$  et de la teneur en caoutchouc [201].

Cette diminution est due à la nature du caoutchouc qui absorbe les ondes ultrasonores, les particules de caoutchouc peuvent absorber les vibrations acoustiques d'un facteur d'environ 21 fois celles de la pâte de ciment durcie [167].

Le phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans la matrice, les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la pâte de ciment. Ce qui augmente le temps

de propagation de l'onde ultrasonore et réduit ainsi sa vitesse de propagation. Ces résultats montrent que le composite à base de caoutchouc présente des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations [167].

L'impact des granulats de caoutchouc fins (moulés) sur le module d'élasticité dynamique est donc moins grand (faible) par rapport aux granulats de caoutchouc grossier (concassés) pour un même taux de remplacement [154].

### **3.2.7. Retrait**

Le retrait du béton est une déformation volumique dans le temps induite par des phénomènes physicochimiques liés à l'hydratation de la pâte de ciment et au séchage en l'absence de tout chargement [202].

Le béton peut subir des dégradations dont la cause est l'existence d'un retrait mal maîtrisé. Le retrait est en effet un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein d'un béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement. Ce qui engendre en fissuration superficielle de formes et direction quelconque, on a différents types de fissures de retraits dont deux types sont : Retrait plastique causé par un manque d'humidité durant le mûrissement du béton. Retrait du séchage causé par le manque d'eau durant le mûrissement [203]. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation [204].

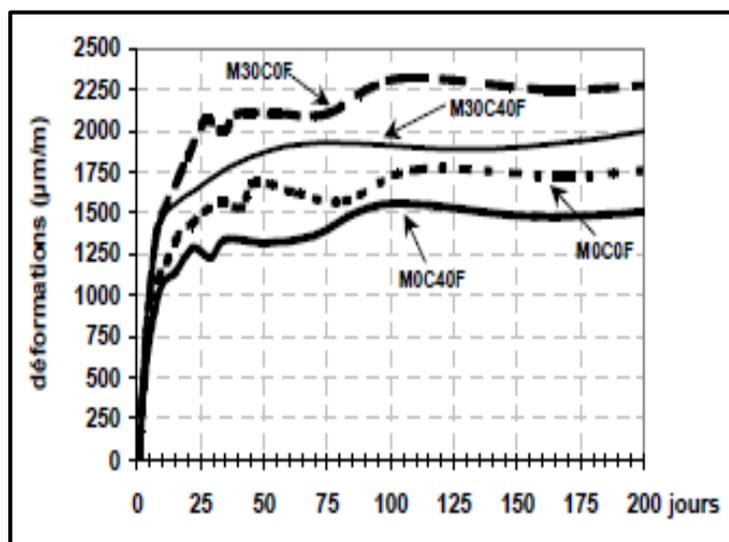
Certains auteurs [205, 206] ont étudié l'influence des granulats de caoutchouc sur le retrait du béton. Leurs résultats montrent que les retraits du béton de caoutchouc sont plus élevés que ceux du béton de référence. Les granulats naturels jouent un rôle dans le rétrécissement. La même conclusion a été tirée par [207, 208] qui ont conclu que l'augmentation de la teneur en caoutchouc conduit à l'augmentation du retrait du béton.

Une étude menée par [209] a révélé que lorsque les granulats fins sont remplacés par 5% et 10% de granulats caoutchouc, le retrait de séchage augmente respectivement de 24% et 34%. Ceci est dû à la faible liaison entre le caoutchouc et la pâte de ciment et à la nature déformable des granulats de caoutchouc.

Le retrait dépend non seulement de la quantité de caoutchouc, mais aussi de la taille. Il a été rapporté que les miettes de caoutchouc présentaient moins de retrait par rapport au caoutchouc sous forme de poudre [194]. Ceci est dû au faible module d'élasticité de la particule de

caoutchouc de petite taille (ressemblant à un ressort) qui permet au béton de se déformer plus [194].

L'incorporation de fibres métalliques produit un effet inverse [210, 41]. La figure 1.22 présente les variations dimensionnelles de retrait des composites, au cours du temps.



**Figure 1.22:** Variations dimensionnelles de retrait en fonction du temps: effets du taux de substitution en granulats de caoutchouc et du fibrage [41].

Le durcissement influence sur le rétrécissement des bétons, indépendamment de l'addition de caoutchouc. Un temps de durcissement plus long entraînerait moins de rétrécissement. Selon l'étude [141], la plupart du retrait s'est produite dans les 15 premiers jours comparativement à 90 jours de durcissement. Cela est dû à une augmentation du taux d'hydratation du ciment dans les premiers jours de durcissement.

D'autres recherches [211, 45] ont constaté que l'incorporation des granulats de caoutchouc dans la composition du béton entraîne une réduction du retrait de séchage avec l'augmentation du pourcentage de granulats de caoutchouc dans le béton. Cette atténuation du retrait peut améliorer la durabilité de ces composites cimentaires. Cela s'explique par le fait que ces composites avec des granulats de caoutchouc absorbent moins d'eau et conservent plus longtemps la chaleur dégagée pendant l'hydratation du ciment. Il semble également que ces agrégats gênent la propagation des fissures microscopiques [45].

Une quantité limitée de documentation est disponible concernant le retrait plastique du béton contenant des particules de caoutchouc. Les résultats préliminaires rapportés par [145] suggèrent que l'incorporation de caoutchouc, dans le mortier (deux formes différentes (i) granulats d'environ 2 mm de diamètre et (ii) déchiquetés ayant deux tailles qui étaient,

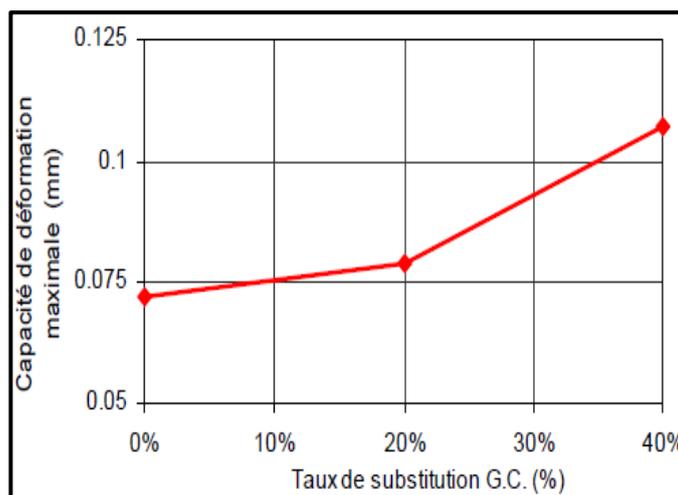
nominalement 5.5 mm×1.2 mm et 10.8 mm×1.8 mm (longueur×diamètre) aident à réduire le retrait plastique par rapport au mortier témoin.

Ils ont en outre signalé que les spécimens témoins ont développé des fissures ayant une largeur moyenne d'environ 0.9 mm, alors que la largeur moyenne des fissures pour les échantillons avec une fraction massique de 5% de lambeaux de caoutchouc était d'environ 0.4-0.6 mm, le temps de début du craquage était retardé par l'ajout de lambeaux de caoutchouc. Mortier témoin (sans caoutchouc) fissuré dans les 30 min, tandis que le mortier avec 15% de caoutchouc fissuré après 1 h, plus la teneur en caoutchouc était élevé, plus la longueur et la largeur des fissures étaient diminués et la fissuration a été plus retardée [145].

### 3.2.8. Capacité de déformation

Malgré le fait que l'incorporation des granulats caoutchouc dans la matrice cimentaire donne une chute significative de la résistance, beaucoup de recherches [21, 22, 26, 28] montrent que cette incorporation permet d'améliorer significativement la capacité de déformation. Les granulats de caoutchouc permettent en général aux composites cimentaires de tolérer des déformations plus importantes avant le pic et la rupture, et diminuent la fragilité du matériau [24, 137].

Les résultats présentés dans la littérature montrent que les bétons incorporant des granulats caoutchouc ont une capacité de déformation plus importante en comparaison au béton de référence selon [22, 131]. Un taux d'incorporation en granulats de caoutchouc de 40 % permet de multiplier la capacité de déformation avant localisation de la microfissure par deux (2) par rapport au mortier de référence [172], l'effet bénéfique des granulats en caoutchouc sur cette capacité de déformation est représenté sur la figure 1.23 qui suit.



**Figure 1.23:** Evolution de la capacité de déformation maximale en fonction du taux de substitution en granulats de caoutchouc [101].

Les résultats expérimentaux de déformation ultime obtenus par [212] sont présentés dans le tableau 1.4. On peut constater que la capacité de déformation limite du béton en poudre de caoutchouc est devenue plus grande par augmentation de la teneur en caoutchouc, le béton de caoutchouc traité par NaOH a montré une plus grande capacité de déformation.

**Tableau 1.4:** La capacité de déformation limite du béton de poudre en caoutchouc traité et non traité [212].

Teneur en caoutchouc (%)	déformation ultime (‰)	
	Poudre de caoutchouc non traité	Poudre de caoutchouc traité
0	2.6	2.6
10	3.4	3.6
20	4.6	5.0
40	6.1	6.6
60	8.1	8.2

Selon Fiore et al [131] l'amélioration de la capacité de déformation peut être interprétée comme conséquence de l'effet des granulats de caoutchouc sur le champ de contrainte, le granulat de caoutchouc est supposé agir comme un trou à la pointe de la fissure, ce qui peut entraîner un mécanisme gênant et retardant la propagation des microfissures. En conséquence, l'utilisation de granulats de caoutchouc peut être considérée comme une solution appropriée pour améliorer la ductilité des matériaux à base de ciment.

### 3.2.9. Absorption d'eau

La quantité d'eau absorbée est liée à la porosité des éprouvettes et donne un aperçu de la microstructure interne, plusieurs recherches disponibles sur le comportement d'absorption d'eau dans le domaine des nouveaux matériaux de construction ont montré que l'introduction de particules de caoutchouc issues de l'industrie de récupération (déchetage) réduit l'absorption d'eau du composite [167, 182, 213].

Segre et al [214] ont rapporté que l'utilisation des granulats de caoutchouc en substitution partielle du sable, réduit l'absorption d'eau par capillarité (Figure 1.24). Le coefficient d'absorption est de  $0.29 \text{ mm/min}^{1/2}$  pour le mortier classique et de  $0.06 \text{ mm/min}^{1/2}$  pour le mortier avec 10% de granulats de caoutchouc traités par NaOH.

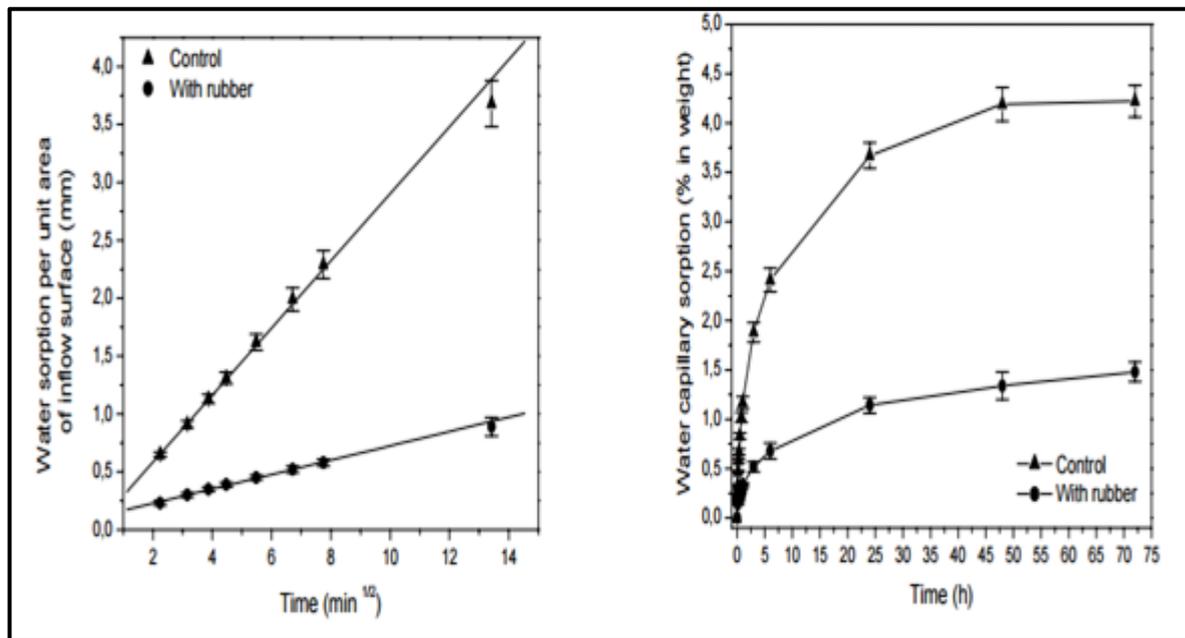


Figure 1.24: L'absorption d'eau par capillarité des composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc [214].

Cette réduction peut être attribuée à la nature hydrophobe des particules de caoutchouc qui ont moins de pores ou moins de pores accessibles à l'eau (pores fermés ou capillaires très étroits qui repoussent l'eau) [123, 214].

Cependant, d'autres recherches sont arrivées à des conclusions différentes [215-217]. Selon ce dernier l'absorption d'eau est directement liée au pourcentage de caoutchouc ajouté au mélange, une augmentation maximale de l'absorption d'eau d'environ 8% a été atteinte pour un remplacement de 15% à 28 jours.

Cette augmentation de l'absorption d'eau peut être attribuée à une rétention plus élevée du granulat de caoutchouc (2.53%) par rapport à l'agrégat naturel (1.20%). De plus, la rétention d'eau entre les particules de caoutchouc et le mélange de béton pourrait être la cause d'une absorption d'eau plus élevée du béton caoutchouté [217]. Ce type de granulats (caoutchouc) conduit à un mélange moins compact et poreux, en plus la faible adhérence entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment, l'apparition des fissures et l'augmentation de l'air occlus dans le mélange, favorisent l'absorption d'eau et rendent le mélange caoutchouté plus sensible aux infiltrations d'eau comparativement avec les mélanges témoins qui sont plus denses absorbant ainsi moins d'eau [218]. L'augmentation de l'absorption d'eau dans les bétons, mortiers et les bétons autoplaçants caoutchoutés est également rapportée par d'autres chercheurs [201, 219].

La taille des granulats de caoutchouc influe sur l'absorption d'eau des bétons. La présence des granulats de caoutchouc de grande taille favorise l'absorption d'eau en raison de l'interaction faible entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment. Au contraire l'addition des granulats de caoutchouc fins peut réduire la quantité d'eau absorbée dans le béton caoutchouté en raison de l'effet de remplissage des vides des granulats fins [06, 220].

### **3.3. Durabilité**

#### **3.3.1. Perméabilité à l'eau**

L'une des caractéristiques qui ont une influence importante sur la durabilité du béton est sa perméabilité à la pénétration de l'eau et d'autres substances nocives.

La perméabilité à l'eau d'un béton est définie comme étant sa capacité à être traversé par l'eau sous gradient de pression.

La perméabilité est le facteur interne le plus efficace dans la durabilité du béton. Une réduction de la perméabilité du béton améliorerait ses autres caractéristiques, y compris la durabilité contre des conditions environnementales telles que les cycles de congélation et de décongélation, la réduction de la corrosion du béton et des barres d'acier exposées aux minéraux agressifs et / ou aux acides.

Selon [152, 221, 222] un consensus semble se dégager sur la profondeur de perméabilité dans les composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc. Ces derniers favorisent la pénétration d'eau (sous pression) et rendent les composites caoutchoutés plus faibles vis-à-vis des actions chimiques. L'adhérence entre les particules de caoutchouc et la matrice cimentaire est faible. Cette situation provoque beaucoup de porosités, plus le béton est poreux, plus la perméabilité à l'eau est élevée. Ces pores agissent comme la litière pour l'écoulement de l'eau dans le béton. Cela conduit à la progression des produits chimiques agressifs et de l'eau qui causent la détérioration du béton [221, 223].

Selon Ganjian et al [06] la substitution par des granulats de caoutchouc augmente la profondeur de perméabilité à l'eau dans les mélanges de béton, l'augmentation de la profondeur de perméabilité à l'eau est plus élevée dans le mélange avec caoutchouc grossier que dans le mélange avec caoutchouc fins (Figure 1.25). La combinaison de différentes tailles de particules de caoutchouc rendent le béton plus compact car les particules de caoutchouc les plus fines remplissent les espaces formés par les plus grandes, Ainsi, le nombre de conduits par lesquels l'eau peut se transporter serait réduit [181].

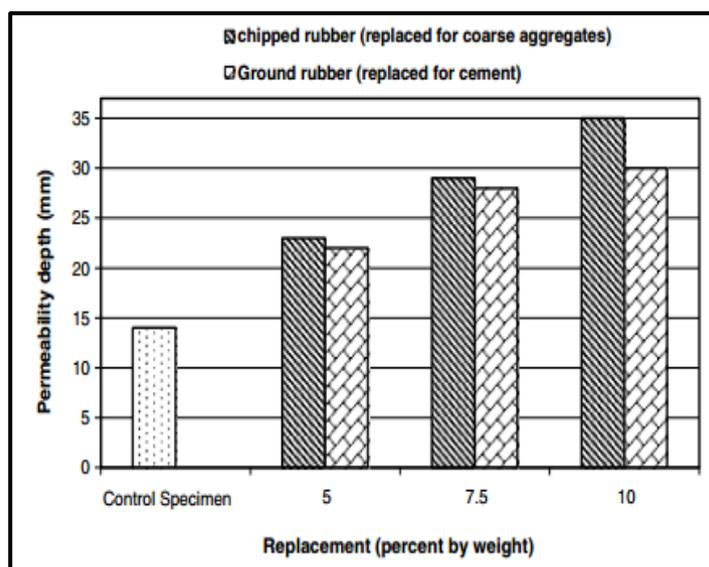


Figure 1.25: Profondeur de pénétration d'eau en fonction du taux de substitution de caoutchouc [06].

Des résultats inverses ont été obtenus par [224, 225]; l'augmentation de la teneur en caoutchouc diminue la perméabilité à l'eau, car les particules de caoutchouc agissent comme une barrière pour le passage de l'eau.

### 3.3.2. Perméabilité à l'air

La perméabilité à l'air est également importante car l'air transporte du dioxyde de carbone et parfois d'autres rejets gazeux qui réagissent avec des composants de la pâte de ciment. Le coefficient de perméabilité à l'air, indicateur de durabilité des mortiers et bétons a été très peu étudié.

D'après certaines études, le coefficient de perméabilité à l'air diminue avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc alors que la porosité augmente. Ils justifient ces constatations a priori contradictoires par le fait que le réseau poreux du composite incorporant des granulats en caoutchouc est plus discontinu [43]. Dans cette étude [43] qui ont étudié deux types de GC (granulats de caoutchouc expansé (cellulaire) et granulats de caoutchouc (compacté)) ont trouvé que le coefficient de perméabilité à l'air des composites cimentaires diminue avec l'augmentation du volume des granulats de caoutchouc. Les valeurs diminuent d'environ  $12.56 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  (pâte de ciment) à  $2.36 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  et  $1.74 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  pour un échantillon contenant 40% de caoutchouc compact et expansé respectivement. Cette différence entre le caoutchouc expansé et le caoutchouc compact peut être attribuée à l'entraînement d'air dans le caoutchouc expansé, les valeurs moyennes des coefficients de

perméabilité à l'air pour différents volumes de particules de caoutchouc sont indiquées dans le tableau 1.5.

Garros [122] arrive à une conclusion opposée à celle de [43], la perméabilité à l'air du BAP augmente avec le taux d'incorporation en G.C

**Tableau 1.5:** Coefficient de la perméabilité à l'air des composites cimentaires caoutchoutés [43].

Teneur en caoutchouc (%)	Coefficient de perméabilité à l'air $10^{-17} \text{ m}^2$	
	Béton avec granulats compactés	Béton avec granulats expansés
0	12.56	12.56
10	10.25	9.85
20	4.38	2.95
30	3.24	2.23
40	2.36	1.74

### 3.3.3. Attaque sulfatique

Certains ouvrages en béton peuvent être soumis à des conditions environnementales agressives. C'est le cas notamment des constructions agricoles, des installations industrielles ou des égouts. Les produits chimiques agressifs nuisent à la durabilité du béton entraînant des coûts d'entretien élevés et détériorant la performance du cycle de vie des structures en béton; l'attaque de sulfate provoque la dégradation du béton, le ramollissement, le changement de forme, la perte de poids et la corrosion du gypse.

Certaines des sources de sulfate peuvent être trouvées sous forme de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$  et  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , en particulier dans les eaux souterraines et l'eau de mer. En outre, les structures en béton dans les zones industrielles sont susceptibles de se détériorer en raison des pluies acides dont l'acide sulfurique est un composant principal ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) [226].

Plusieurs recherches ont été menées pour étudier l'effet de l'attaque sulfatique externe sur des éprouvettes en béton et en mortier immergées dans de l'eau distillée dosée à 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  [131, 208, 227], 3%  $\text{MgSO}_4$  [228], 5%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [229], 3%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [230, 231], 10%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [215, 232]. Ces protocoles ont été choisis pour accélérer le vieillissement des bétons causé par l'immersion complète, la résistance à l'attaque acide a été évaluée par les différences de poids des spécimens secs avant et après attaque acide.

Concernant l'attaque par l'acide sulfurique, l'augmentation des taux de granulats de caoutchouc diminue la perte de poids et la perte de résistance à la compression des composites par rapport au composite de référence [233, 231].

Thomas et al [230] ont étudié la résistance aux acides (avec 3% de concentration) du béton caoutchouté à haute résistance par l'évaluation de l'absorption d'eau et la perte de poids. Une plus grande perte de poids a été observée dans les échantillons témoins (8.5%), la perte de poids minimale a été observée pour le mélange avec 20% de caoutchouc (7.24%) comme le montre la figure 1.26 qui suit.

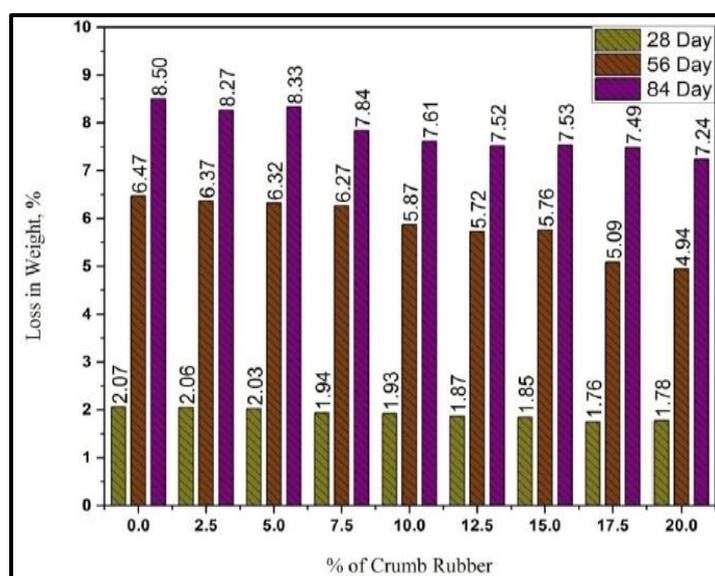


Figure 1.26: Perte de masse des éprouvettes attaquées par l'acide à différents âges (E/C= 0.4) [230].

L'absorption d'eau des éprouvettes contenant des granulats de caoutchouc attaqués par l'acide sulfurique était supérieure à celle du mélange témoin, l'absorption a augmenté progressivement avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc dans le béton. La couche supérieure des éprouvettes de béton avec 0% de caoutchouc a été complètement retirée par érosion (100%) par l'action de l'acide sulfurique. Dans le cas du mélange avec 20% de caoutchouc, moins de 100% de la surface supérieure a été attaquée par l'acide. Les granulats de caoutchouc et la couche de ciment entourant les particules de caoutchouc n'ont pas été affectées par l'acide et ont été projetées vers l'extérieur en fournissant des poches supplémentaires à l'eau. L'absorption d'eau du béton caoutchouté était plus élevée que celle du béton de témoin.

Le béton caoutchouté retenait les particules constitutives du béton en se dégageant en empêchant la formation de fissures et la séparation des matériaux. Mais dans le béton sans

caoutchouc ou contenant une faible quantité de caoutchouc, plus de fissures ont été développées et les matériaux constitutifs ont été facilement séparés [230].

Une conclusion différente a été notée par [215] qui ont étudié la résistance d'un béton à hautes performances avec 10% d'acide sulfurique. L'augmentation de la teneur en caoutchouc a conduit à un degré élevé de perte de masse. Le mélange de béton avec du caoutchouc à 5%, le remplacement partiel du ciment avec 15% de cendres volantes et 15% de métakaolin présentait presque la même résistance que celle du mélange témoin. Le mélange avec 45% de cendres volantes et 15% de métakaolin a montré une résistance aux acides beaucoup plus élevée que le mélange témoin.

Dans la solution de sulfate  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , il y a eu moins de perte de résistance à la compression (moindre sensibilité à l'érosion) du béton incorporant du caoutchouc par rapport au béton témoin avec 0% de caoutchouc, comme le montre le tableau 1.6 qui suit [189, 208, 227].

**Tableau 1.6:** Durabilité des bétons de caoutchouc [189].

---

Mélange	Béton de référence	Béton avec miettes de caoutchouc			
Teneur en caoutchouc (%)	0	5	10	15	20
Pourcentage de perte de masse (%)	5.8	4.8	3.2	3.1	2.7
Coefficient anti corrosion (%)	96.1	96.7	97.4	97.7	98.4

---

Le caoutchouc est un matériau élastique, et il peut absorber l'énergie d'expansion provoquée par l'étringite et, de cette manière, évite la défaillance de la structure [227].

L'attaque à l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) est plus désastreuse que l'attaque au sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) en raison du fait qu'il y aurait une dissolution affectée par les ions hydrogène en plus de l'attaque par des ions sulfate [234].

Topçu et al [235] ont rapporté que l'effet sur la diminution de la résistance à la compression des mortiers avec des quantités variables de granulats de caoutchouc remplaçant le sable naturel était plus fort dans l'eau de mer que dans l'eau douce. Les auteurs ont donc recommandé d'utiliser du ciment résistant au sulfate ou du ciment de haute résistance dans des mortiers caoutchoutés pour être utilisés dans l'eau de mer.

## **I.4. CONCLUSION**

La synthèse bibliographique réalisée dans ce travail relative aux composites à base de granulats de caoutchouc montre principalement que :

- Les composites à base de granulats de caoutchouc (considérées comme déchets encombrants dans la législation algérienne) possèdent des résistances mécaniques faibles et en contrepartie une grande capacité de déformation. Ces résistances sont systématiquement abaissées avec le taux de granulats de caoutchouc incorporés.
- Leurs masses volumiques à l'état sec diminuent également avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc (GC) mis en œuvre. Cet allègement est attribué à la faible densité du caoutchouc ainsi qu'à l'augmentation de l'entraînement d'air dans la matrice lié à la nature non polaire du caoutchouc.
- L'incorporation des GC affecte les modules d'élasticité statique et dynamique avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Le caoutchouc absorbe les ondes ultrasonores, par ailleurs la présence de bulles d'air dans la matrice réduit la vitesse de propagation des ondes qui doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la matrice cimentaire.
- L'incorporation des GC dans les composites cimentaires réduit le retrait de séchage avec l'augmentation de leurs teneurs. Cette réduction est généralement attribuée à la nature des GC qui absorbent moins d'eau et conservent plus longtemps la chaleur dégagée pendant l'hydratation du ciment. Selon [Boudaoud et al] les GC gêneraient les fissures microscopiques.
- L'absorption d'eau est généralement réduite dans ces éco-composites en raison de la nature hydrophobe du caoutchouc.
- La perméabilité à l'eau et à l'air augmentent avec le taux d'incorporation des GC. La faiblesse de l'adhérence entre les particules de caoutchouc et la matrice cimentaire semble être la raison principale. Les pores ainsi générées favorisent la pénétration d'eau sous pression.
- L'attaque des composites de GC par différents types d'acide a prouvé consensuellement une perte de poids et une perte de résistance à la compression des éprouvettes avec l'augmentation du taux de GC. Toutes ces constatations ont été prises en compte dans le programme expérimental détaillé dans le chapitre 2 et relatif à cette partie de notre travail.

## **I.5. PROPRIETES DES COMPOSITES A BASE DES DECHETS DE BRIQUE**

L'une des applications envisageables des déchets de brique est sa valorisation dans la fabrication des ciments et des bétons, le recyclage des briques concassées issues de la construction, de la démolition et de l'industrie manufacturière de la brique rejetée (non conforme) comme granulats alternatifs présente un intérêt particulier puisqu'il permet de réduire considérablement le problème de stockage des déchets et d'autre part, peut contribuer à la préservation des granulats naturels [67].

Un certain nombre de travaux ont été réalisées pour évaluer le potentiel d'utilisation des briques concassées comme granulats grossiers et fins [67, 70-76, 78, 236-239].

D'autres travaux [62, 53, 54,240] ont porté sur la faisabilité de fabrication du ciment composé à base de déchets de briques finement broyés, mais la plupart des recherches [72, 241-244] ont porté sur le recyclage des briques concassées sous forme de granulats grossiers individuellement dans le béton.

La recherche sur la brique concassée comme granulat fin est relativement nouvelle. La réticence à l'utiliser comme granulat fin est probablement due à une demande d'eau anormalement élevée qui pourrait être causée par des briques concassées fines [245].

### **5.1. L'état frais**

A l'état frais, il semble que c'est la consistance des mortiers et bétons élaborés avec des granulats de déchets de brique qui a intéressé le plus les chercheurs dans ce domaine. Celle-ci diminue selon [62, 60] avec l'augmentation du taux de substitution quelque soit la résistance de la brique d'origine.

Bektas et al [65] sont arrivés à la même conclusion. Ils ont noté une réduction sensible de la fluidité des mélanges à mesure que le taux de granulats de déchets de brique mis en œuvre augmente. Les réductions étaient de 11%, 23% et 32% pour les substitutions de 10%, 20% et 30% de granulats de déchets de brique, comparativement au mortier témoin de référence (Figure 1.27). La tendance est presque linéaire. Il est évident que l'absorption d'eau des granulats de brique affecte significativement la maniabilité des mortiers.

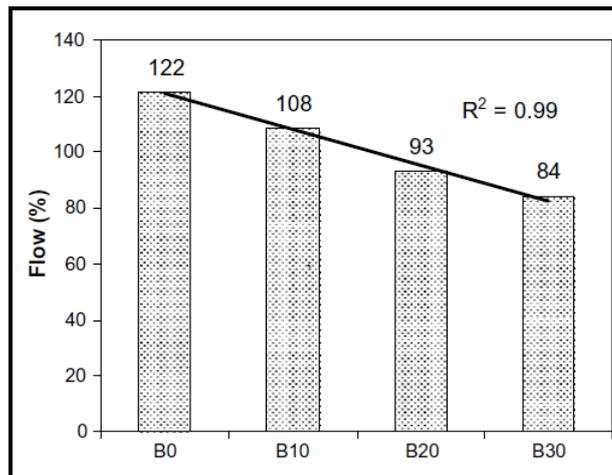


Figure 1.27: Effet de la brique concassée sur la fluidité du mortier [65].

## 5.2. L'état durci

### 5.2.1. Densité à sec

Les granulats de brique recyclés peuvent être utilisés pour produire du béton plus léger que le béton normal, ce qui entraîne des charges mortes plus faibles [246, 60].

La densité du mortier durci diminue lorsque le sable est remplacé par la brique en raison de la densité plus faible de la poudre de déchets de brique par rapport à celui du sable. Cependant, une plus faible compacité est également responsable d'une diminution de la densité sèche du mortier avec remplacement du sable par rapport au remplacement du ciment [247].

La densité apparente sèche diminue soudainement dans le remplacement du ciment et diminue linéairement dans le remplacement du sable comme la montre les figures 1.28 et 1.29 [247].

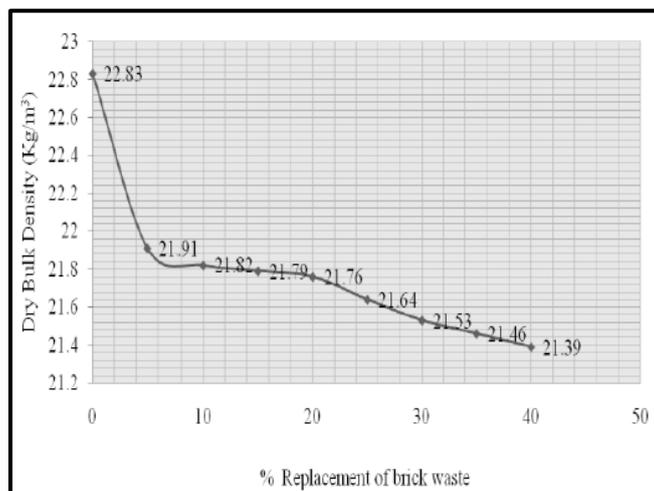


Figure 1.28: Variation de la densité du mortier durci lors de la substitution du ciment avec des déchets de brique [247].

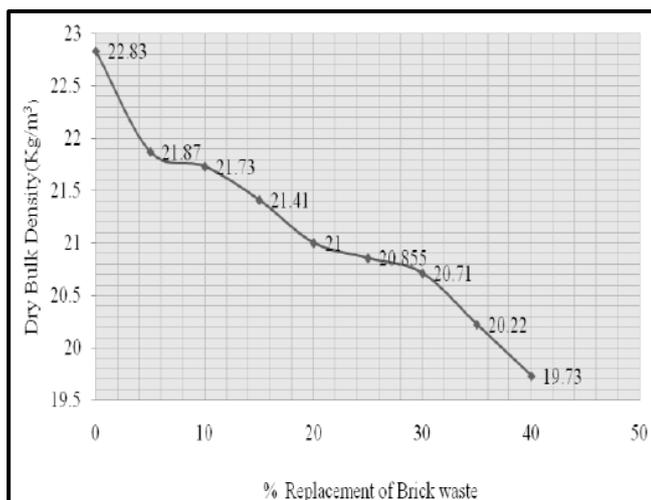


Figure 1.29: Variation de la densité du mortier durci lors de la substitution du sable avec des déchets de brique [247].

La densité à sec du béton contenant des granulats de brique grossier était inférieure à celle du béton contenant des granulats de brique fins aux mêmes taux de substitution [248].

### 5.2.2. Résistance à la compression

L'augmentation du taux de substitution du granulat (naturel fin ou grossier) avec le granulat de brique recyclé produit un béton moins résistant [249-253]. Cette conclusion peut être attribuée à l'absorption d'eau plus élevée du granulat de brique par rapport au granulat naturel [118].

Selon Aliabdo et al [254], des réductions de la résistance à la compression du mortier à 28 jours de l'ordre de 8.3%, 14.0%, 18.7%, 14.2% et 25.2% ont été atteintes pour le mortier modifié avec 5%, 10%, 15%, 20% et 25% de poudre de brique respectivement, par rapport au mortier témoin (figure 1.30).

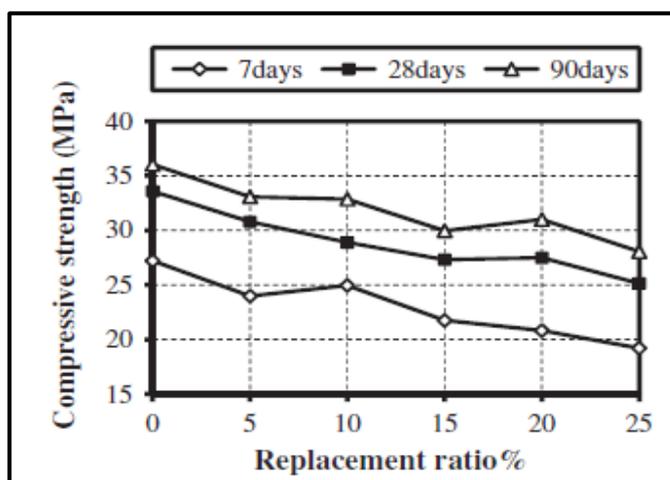


Figure 1.30: Effet de la substitution du ciment par la poudre de brique sur la résistance à la compression du mortier [254].

La diminution de résistance est due au fait que la réaction pouzzolanique n'est pas prédominante aux jeunes âges, ceci mène à une hydratation du composé  $C_3S$  (silicate tricalcique) et  $C_2S$  (silicate bicalcique) moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances. Par contre la résistance à la compression à long terme est supérieure à celle du ciment portland sans ajout [255], ainsi, la faiblesse des résistances à court terme peut être compensée par l'activité pouzzolanique des déchets de brique [53]. Ceci confirme le rôle de la réaction pouzzolanique plus élevée à des âges plus tardifs du déchet de brique dans l'hydratation du ciment Portland, [71, 250, 255].

D'autre part, Khatib et al [62] ont trouvé des résultats de résistances comparables avec le mélange témoin et ont attribué ce résultat à la très bonne réactivité pouzzolanique [55].

Pour surmonter cette réduction de résistance, plusieurs combinaisons avec les déchets de brique ont été élaborées: la micro-silice lorsqu'elle est ajoutée en remplacement du ciment favorise une augmentation prédominante des propriétés mécaniques du béton. Ceci est attribué à la raison que la silice présente dans la micro-silice réagit avec l'hydroxyde de calcium produit pendant l'hydratation du ciment et forme de l'hydrate de silicate de calcium. La formation d'hydrate de silicate de calcium améliore les propriétés mécaniques globales du béton. En outre, la finesse de la micro-silice agit comme un matériau de remplissage entraînant une réduction de la porosité et aide à densifier le mélange de béton [256].

La combinaison de nano  $SiO_2$  et de déchets de brique améliore également les propriétés de durabilité et de résistance du béton et neutralise les effets négatifs de la brique de déchets. Les particules nano  $SiO_2$ , en raison de leur taille et de leur adhérence superficielle, sont placées entre C-S-H et remplissent les espaces. En outre, ces propriétés de nano  $SiO_2$  augmentent la température de réaction d'hydratation et augmentent ainsi l'accélération du gain de résistance [257].

### **5.2.3. Résistance à la flexion et à la traction**

Le comportement en résistance à la flexion et à la traction est similaire au comportement observé pour la résistance à la compression [63, 258, 259].

### **5.2.4. Module d'élasticité**

Les travaux de [57, 253] sur un béton à base de granulats de déchets de brique en remplacement au ciment ont montré que leurs modules d'élasticité ont été réduits (par rapport au béton ordinaire de référence) en raison du faible module d'élasticité de la brique.

Par ailleurs les travaux de [67] ont révélé une diminution de 30%, 40% et 50% du module d'élasticité du béton avec les gros, fins et une combinaison de deux tailles de brique concassé, respectivement, en comparant avec le béton avec les granulats naturels.

### 5.2.5. Porosité

L'utilisation des déchets de brique comme matériau pouzzolanique en substitution du ciment a été étudiée par plusieurs chercheurs, [260, 261]. Les résultats montrent que l'addition des déchets de brique se distingue par une vitesse de réaction plus rapide et par une réactivité plus élevée avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment Portland. Les composés ainsi formés, C-S-H et hydrates d'aluminosilicates [262, 263] ont pour effet de diminuer la porosité des mortiers et des bétons, ce qui favorise la durabilité des ouvrages.

### 5.2.6. Absorption d'eau

Le granulat produit à partir de la brique a une absorption d'eau élevée [60], celle-ci entraîne des problèmes de mélange dans la production de béton. La brique concassée doit être complètement saturée dans l'eau avant utilisation dans la fabrication du béton pour empêcher le béton d'être «trop assoiffé» [78, 241, 242, 264, 265]. Cette approche a été précédemment recommandée par [58,71]. Sur la base de cet argument, les granulats grossiers ont été préalablement mouillés pendant 24 h avant leurs incorporations dans le mélange.

Une immersion de 30 min est une durée pratique pour le trempage des granulats car une immersion additionnelle pendant encore 24 h ne produit qu'une augmentation d'environ 2% d'absorption d'eau [78].

Une étude de [54] indique que la sorptivité de deux séries  $M_1$  (E/C=0.4) et  $M_2$  (E/C=0.5) diminue, avec l'augmentation du taux de poudre de brique d'argile calciné (figures 1.31 et 1.32).

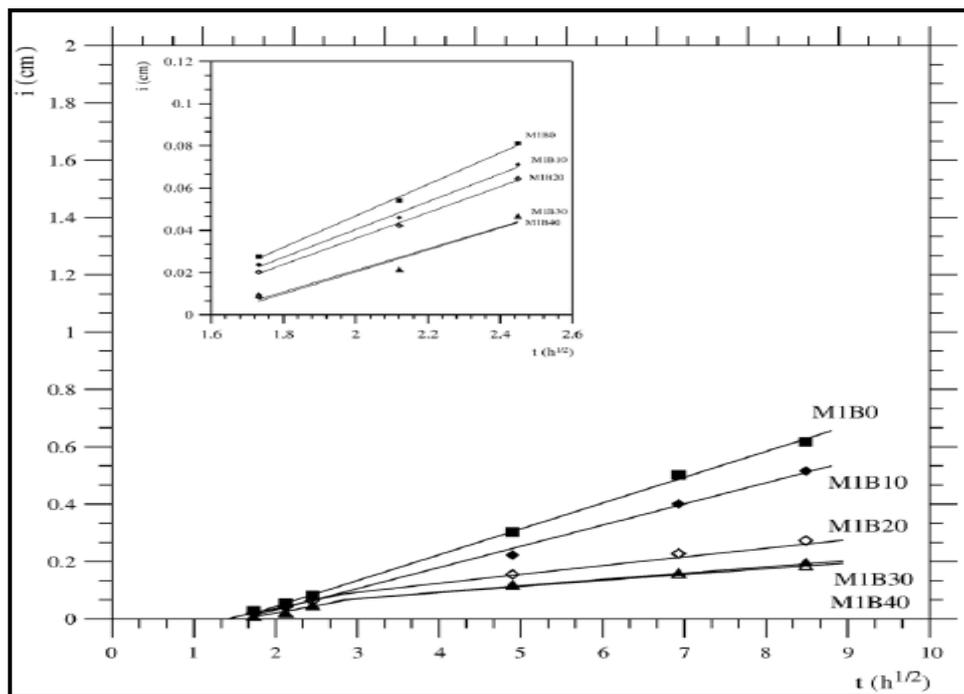


Figure 1.31: Les courbes de sorptivité ( $i$  fonction  $t^{1/2}$ ) pour les mélanges de mortier (E/C=0.4) [54].

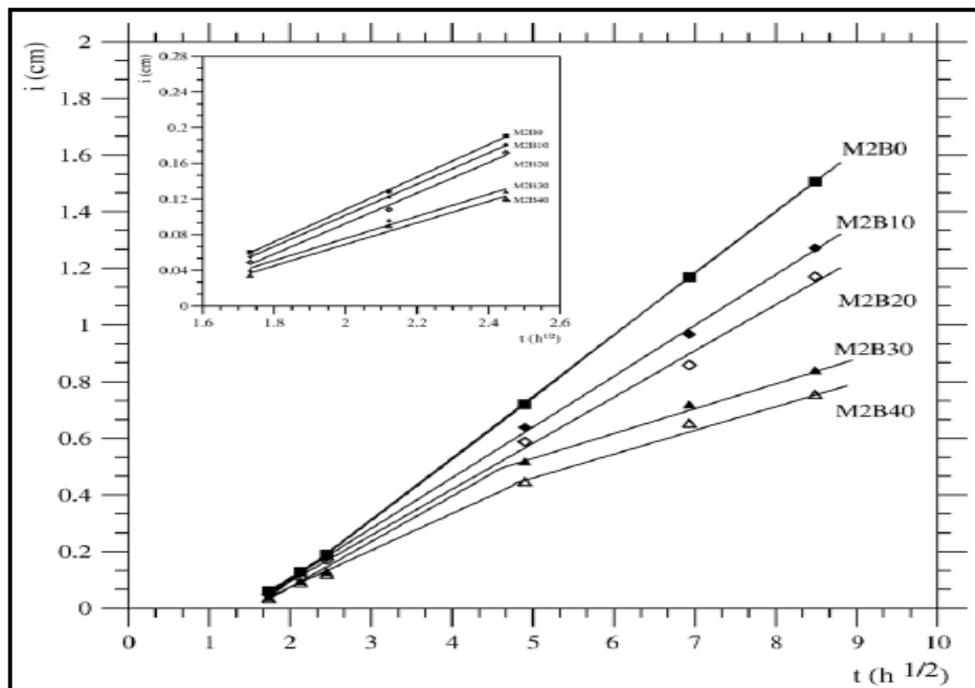


Figure 1.32: Les courbes de sorptivité ( $i$  fonction de  $t^{1/2}$ ) pour les mélanges de mortier (E/C=0.5) [54].

Ce comportement peut être lié à un raffinement dans la structure des pores des mélanges témoins produits par l'effet pouzzolanique de la poudre de brique calciné [54].

### 5.2.7. Retrait

Le retrait de séchage est souvent une préoccupation particulière pour le béton réalisé avec un granulat poreux. IL existe une tendance évidente selon laquelle l'incorporation de quantités croissantes de briques broyées entraîne un rétrécissement plus important sur une longue période de temps comme le montre la figure 1.33 [53].

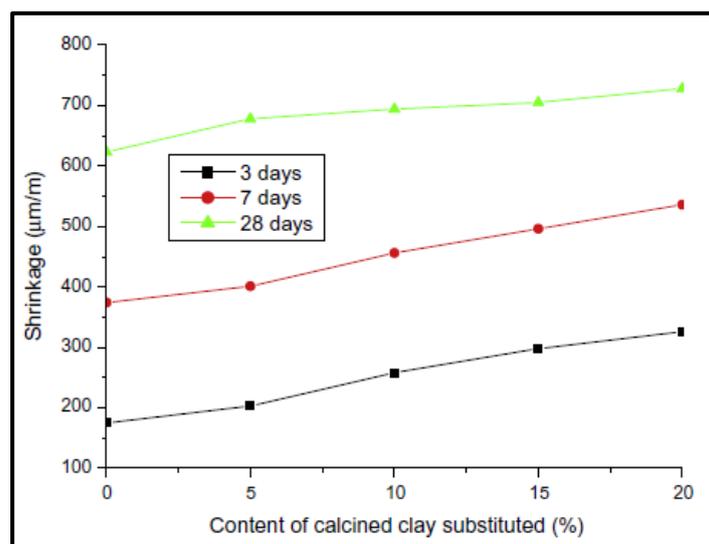


Figure 1.33: Variation du retrait en fonction du contenu de déchets de la brique [53].

En outre, le rétrécissement de ces mélanges peut également s'expliquer par les réactions pouzzolaniques. Étant donné que la brique finement broyée contient une grande quantité de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , il est possible que, en faisant réagir avec le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pour former des produits d'hydratation supplémentaires, une plus grande quantité d'eau a été consommée. De ce fait, il y avait une tension plus grande dans les pores capillaires en augmentant le retrait autogène du béton [266]. Cette augmentation peut être aussi attribuée en partie au moindre module d'élasticité de d'agrégats de briques concassées par rapport à celui de l'agrégat naturel [267].

Khatib et al [62] ont également signalé une diminution du retrait à mesure que la teneur en briques broyées augmente.

### 5.3. Durabilité

La recherche sur la durabilité des composites à base de granulats de brique concassées est très limitée dans la littérature.

### **5.3.1. Résistance aux sulfates**

Une résistance élevée aux attaques du sulfate est normalement associée à une structure de pores discontinue et à des niveaux faibles d'hydroxyde de calcium (CH) [268-269]. Ceci est dû au fait que le premier inhibe le transport d'espèces réactives dans la pâte de ciment et ce dernier limite les taux d'étringite et de gypse produits, qui sont les principaux composants impliqués dans l'expansion et la rupture de la matrice de pâte de ciment. Cependant, dans des environnements particuliers (par exemple l'exposition au sulfate de magnésium), de faibles niveaux d'hydroxyde de calcium CH ont été associés à une résistance réduite à l'attaque de sulfate [270] résultant de la décalcification du gel C-S-H.

Une méthode efficace pour accroître la résistance aux attaques au sulfate est de remplacer partiellement le ciment Portland ordinaire par des matériaux pouzzolaniques tels que la fumée de silice condensée (FSC) [271] ou les cendres volantes (CV) [268] ou encore avec des matériaux hydrauliques latents tels que le laitier de haut fourneau granulé broyé (LHF) [272-273]. Tous ces remplacements minéraux produisent un raffinement des pores et réduisent la perméabilité de la matrice liante bien que le temps de durcissement nécessaire pour obtenir des réductions significatives de la perméabilité dépend de la quantité initiale. A ce sujet [240] ont montré que la brique cuite présente une activité pouzzolanique significative équivalente à celle de la fumée de silice

Le béton et les ciments préparés avec les déchets de briques montrent également une bonne résistance aux attaques chimiques, en particulier l'attaque du sulfate. Ils montrent également un meilleur raffinement des pores après une longue période [56].

Farrell et ses collaborateurs [274] ont étudié l'expansion des mortiers contenant de la brique broyée, exposés à une solution de 2% de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Ils ont utilisé quatre types de briques dont les compositions chimiques et minéralogiques sont différentes. Ils ont trouvé que les briques renfermant une faible proportion de phase vitreuse où la phase vitreuse a une teneur élevée en CaO, ne devraient pas être employées comme pouzzolanes. Par contre, les briques avec une proportion élevée en verre de faible teneur en calcium font des pouzzolanes très efficaces. Wild et al [240] soutiennent que les mortiers contenant des déchets de briques calcinées à une température supérieure à 900°C donnent une résistance aux sulfates plus forts liés.

### **5.3.2. Indice d'activité pouzzolanique**

IL est généralement admis que tous les types d'argile calcinée ne peuvent pas être considérés comme des matériaux pouzzolaniques. En fait, l'argile contenant de fortes proportions de minéraux très cristallins, comme le quartz et le feldspath, ne produit pas de matière réactive et ne peut donc pas être considérée comme pouzzolane.

Au contraire, pendant le processus de fabrication de la brique d'argile, l'exposition de l'argile à des températures allant de 600 à 1000°C change souvent les structures cristallines de ses silicates en un composé amorphe qui réagit avec la chaux à température ambiante [275-276].

La température de «combustion» ou de «calcination» de l'argile influence son activité pouzzolanique. L'argile est dans son état le plus réactif lorsque la température de calcination entraîne une perte d'hydroxyle et une structure d'argile effondrée et déformée [281]. La température de calcination pour produire cet état actif est habituellement dans la gamme de 600-900°C [277-278].

Au-delà de cette température, la cristallisation se produit et l'activité diminue. En fait, Baronio et al [261] affirment que les températures de cuisson supérieures à 900°C ne produisent pas de matières pouzzolaniques. Cependant, à des températures de cuisson encore plus élevées, des formes en phase liquide qui lors du refroidissement se solidifie à une phase de verre amorphe. Les phases de verre amorphe présentent également une activité pouzzolanique élevée.

Par conséquent, les résidus de briques d'argile broyés à une finesse appropriée peuvent devenir des pozzolans actifs si l'argile originale et le procédé de cuisson fournissent les conditions nécessaires. [280, 261].

### **5.3.4. Perméabilité**

Pour le béton avec les granulats de brique, la porosité aide à créer plus de chemins d'écoulement et augmentent ainsi la perméabilité résultante du béton [281].

La relation entre la perméabilité et la granulométrie est présentée sur la figure 1.34. La perméabilité du béton de granulats de briques est plus élevée que celle du béton de granulats de pierre. La perméabilité du béton de granulats de brique semble également augmenter proportionnellement avec la taille granulats.

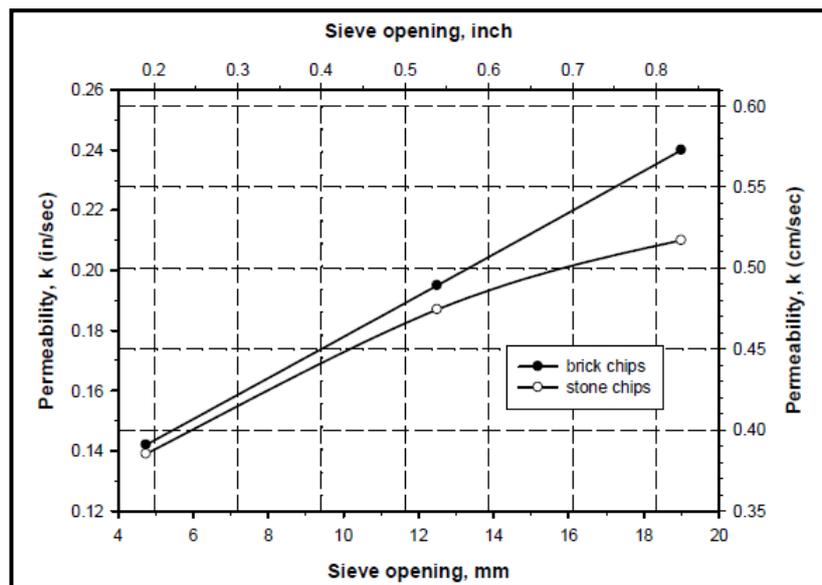


Figure 1.34: Relation entre la perméabilité et la taille des granulats de brique et des granulats naturels [282].

## I.6. CONCLUSION

La synthèse bibliographique réalisée dans ce travail relative aux composites à base de déchets de brique montre essentiellement que:

- Les DB ont été utilisés principalement comme granulats de substitution aux granulats traditionnels du béton: comme granulats fins pour substitution au sable naturel et gros granulat pour substitution aux graviers et gravillons.
- Avec l'incorporation des granulats de DB, les composites élaborés ont été globalement allégés, ont gagné en fluidité et ont perdu de leurs performances mécaniques.
- Certains travaux ont concerné la substitution du ciment portland avec des DB sous forme de poudre. Les composites élaborés ont gagné en porosité, en sorptivité, en retrait et en durabilité (notamment la résistance aux sulfates). Par contre leurs performances mécaniques ont globalement chuté.
- Il n'y a pas eu, à notre connaissance de recherches concernant la substitution des sables naturels par de la poudre de déchets de brique sous forme de fillers, d'où l'intérêt des travaux réalisés dans la présente étude.

*Chapitre II*

**Caractérisations,  
formulations et  
techniques expérimentales**

# **Chapitre II**

## ***Caractérisations, formulations et techniques expérimentales***

---

### **II.1 INTRODUCTION**

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons la caractérisation des matériaux de base pour la confection des mortiers envisagés. Il s'agit des caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et minéralogiques relatives au ciment, sable, eau de gâchage, granulats de caoutchouc, déchets de brique, résine aqueuse, stabilisant et superplastifiant.

Nous présenterons par la suite, dans la deuxième partie, les procédures et techniques utilisées pour caractériser les mortiers d'étude à l'état frais et à l'état durci. A l'état frais on déterminera les consistances et les masses volumiques et à l'état durci: les performances mécaniques, les variations dimensionnelles de retrait, le module d'élasticité dynamique, résistance aux attaques par les sulfates, les acides et l'eau de mer, absorption d'eau par immersion totale et par capillarité, porosité accessible à l'eau et perméabilité à l'eau et à l'air.

### **II.2 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES**

Pour la confection des éprouvettes de l'éco-mortier envisagé, nous avons utilisé du ciment, des granulats (sable et caoutchouc), un filler siliceux, de l'eau, deux types d'adjuvants (sikalatex et superplastifiant SP 40) et un stabilisant. Leurs caractéristiques sont présentées dans ce qui suit.

#### **2.1. Ciment**

Le ciment utilisé est un ciment CPA-CEM I 42.5 provenant de la cimenterie de Ain Touta (Wilaya de Batna, Algérie), répondant à la norme algérienne NA 433/2002, sa masse volumique absolue est  $3.15 \text{ g/cm}^3$  et ses autres caractéristiques sont présentées dans les tableaux 1 et 2. Les analyses concernant sa composition chimique et ses caractéristiques physico-mécaniques ont été réalisées au laboratoire du fabricant.

Tableau 2.1: Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé (%).

Caractéristiques chimiques et minéralogiques							
SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	MgO	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	(C <sub>4</sub> AF+2C <sub>3</sub> A)	Résidus insolubles	Perte au feu
≥ 3.5	0.1	≤ 4.0	≥ 50	≤ 5.0	≤ 20.0	≤ 0.75	≤ 3.0

Tableau 2.2: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé.

Caractéristiques physiques		
Temps de prise mesuré sur pâte pure ≥ 60 minutes.		
<b>Début</b>	<b>Fin</b>	
1h30 min	4h20 min	
Retrait à 28 jours d'âge mesuré sur mortier normal ≤ 1000 μm / m		
Stabilité mesurée sur éprouvette de pâte pure ≤ 05 mm		
Surface spécifique de Blaine 3200 cm <sup>2</sup> /g ± 250		
Consistance normale : 23% essai réalisé avec de l'eau distillée		
Caractéristiques mécaniques		
Les valeurs limites des résistances à la compression		
<b>02 jours</b>	<b>07 jours</b>	<b>28 jours</b>
≥ 10.0 N/mm <sup>2</sup>	≥ 31.5 N/mm <sup>2</sup>	≥ 40.0 N/mm <sup>2</sup>

## 2.2. Sable

Le sable utilisé est un sable naturel roulé (SN) moyen de couleur jaunâtre et de classe (0/4). Il est issu d'une sablière située à Oum Ali, dans la wilaya de Tébessa (Algérie). Ses caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau 2.3 qui suit.

Tableau 2.3: Caractéristiques du sable utilisé.

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.56
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.54
Module de finesse	2.36
Equivalent du sable visuel (%)	82
Absorption d'eau %	2.66

### 2.3. Granulats de caoutchouc

Les granulats de caoutchouc utilisés (GC), issus du broyage mécanique de pneus usagés, proviennent d'une manufacture située dans la ville de Batna, ils sont utilisés en substitution volumique du sable. La dimension maximale de ces granulats est de 4.0 mm ; leurs masses volumiques absolues et apparentes sont de 0.94 et 0.40 g/cm<sup>3</sup> respectivement.

Les courbes granulométriques du sable et des granulats de caoutchouc sont présentées sur la même figure pour faciliter la comparaison des deux distributions granulaires. On notera aussi que les GC, en comparaison du sable, ont une teneur en fine moins importante.

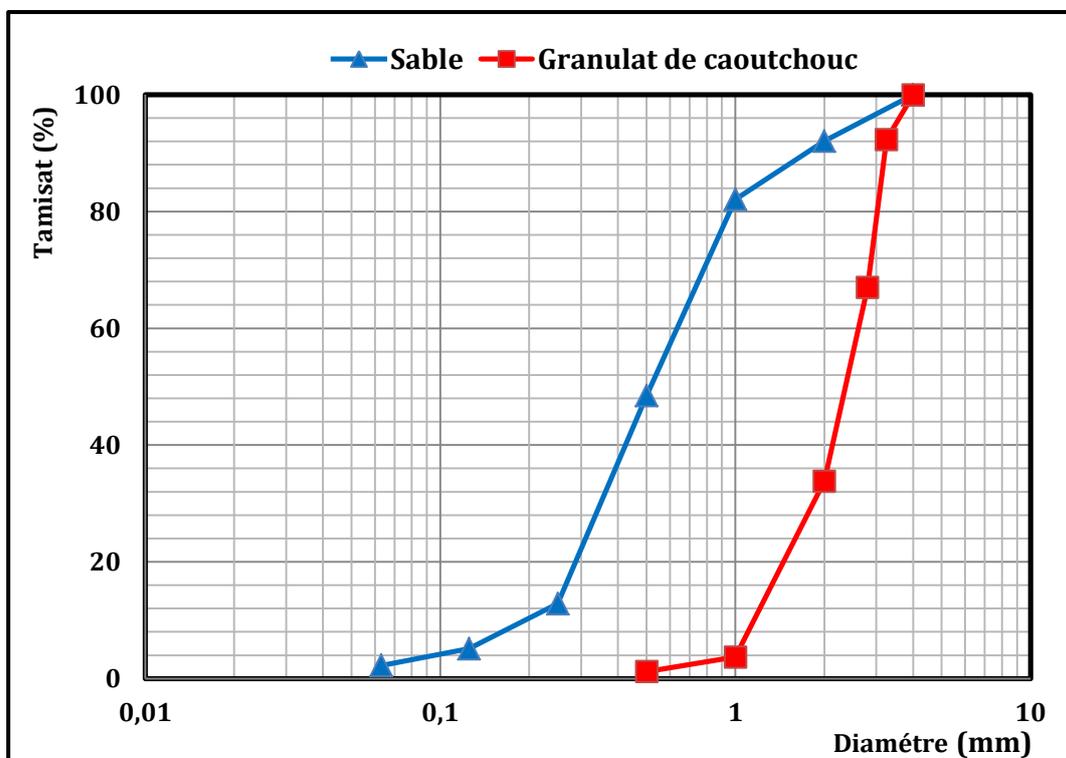


Figure 2.1: Courbes granulométriques du sable et des granulats de caoutchouc.

### 2.4. Déchets de brique

Ces déchets (DB) proviennent d'une briquetterie locale située dans la commune de Bendjerrah, wilaya de Guelma, Algérie. Ils ont été broyés puis tamisés dans un tamis de mailles carrées de 2 mm d'ouverture. 74% des grains sont passés à travers le tamis de 0,063 mm ce qui nous a permis de les classer comme fillers selon la norme française NF XP 18-540. Ils ont été ensuite homogénéisés puis séchés dans une étuve à une température de 105°C

pendant 24 heures. La masse volumique absolue de ces déchets est de  $2.50 \text{ g/cm}^3$  et sa composition chimique est présentée dans le tableau 2.4 qui suit.

**Tableau 2.4:** Composition chimique des déchets de brique utilisés (%).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Perte au feu
69.26	14.17	6.30	4.28	2.25	1.34	0.02	0.28	1.96

## 2.5. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est l'eau du robinet du laboratoire LGCH ayant un pH voisin de 7.

## 2.6. Adjuvant

C'est un superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau « Medaplast SP40 » à base d'Éther polycarboxylates, fabriqué en Algérie par la société GRANITEX implantée à Oued Smar, conforme à la norme EN 934-2. Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0.6 à 2.5 % (en extrait sec) du poids de ciment [283].

Les caractéristiques de Medaplast SP40 sont:

Aspect ..... Liquide.  
 Couleur ..... Marron.  
 pH ..... 8.2.  
 Densité .....  $1.2 \pm 0.01$ .  
 Teneur en chlore .....  $< 1\text{g/L}$ .  
 Extrait sec ..... 40 %.

## 2.7. Stabilisant

Le stabilisant utilisé dans cette étude est le MEDACOL BSE fabriqué par GRANITEX. C'est un adjuvant composé essentiellement d'agents colloïdaux et de micro silice ultra fine, conforme à la norme EN 934-2. Ses caractéristiques telles que fournies par le fabricant sont :

Forme ..... Poudre.  
 Couleur..... Grisâtre.  
 Densité ..... 0.5 [284].

A cause de la différence importante entre la densité du sable naturel (2.56) et celle des granulats de caoutchouc (0.94), et aussi en raison de la nature hydrophobe des granulats de

caoutchouc, la ségrégation a été observée lorsque les granulats de caoutchouc sont ajoutés au mélange, ils ont tendance à remonter à la surface supérieure du volume du mortier lors de la vibration. La photographie de la figure 2.2 est une illustration du phénomène de ségrégation des granulats de caoutchouc au sein d'une matrice cimentaire.



**Figure 2.2:** Ségrégation des granulats de caoutchouc au sein d'une matrice cimentaire [285].

Le stabilisant utilisé permet d'éviter la ségrégation des mélanges et assurer une bonne dispersion du caoutchouc, l'observation des sections des éprouvettes de tous les mortiers montre une répartition régulière du squelette granulaire (Figure 2.3). Les granulats de caoutchouc sont bien répartis dans la masse du mortier sur toute la hauteur des éprouvettes, aucun signe de ségrégation n'a été observé.

Dans notre étude nous avons fixé le dosage à 0.1% du poids de ciment après plusieurs tests.



**Figure 2.3:** Distribution homogène des granulats de caoutchouc au sein des mortiers.

## 2.8. Résine

La résine utilisée est une dispersion aqueuse synthétique (SIKALATEX) qui se présente sous la forme d'un liquide laiteux concentré, parfaitement diluable, produit par la société SIKA. Sa densité est de 1kg/l. Il s'ajoute directement à l'eau de gâchage des mortiers hydrauliques [286]. Selon [287], la teneur en latex (résine) varie entre 10% et 20% par rapport à la masse de ciment.

Dans cette étude nous avons opté, dans une étape préliminaire, pour un dosage de 10% qui nous a conduit à une maniabilité de 22 cm à la table à secousses correspondant à un mortier fluide. Après maintes tentatives par tâtonnement, nous avons fixé ce dosage à 7% (du poids de ciment) pour tous les mélanges correspondant à la maniabilité visée ( $16 \pm 2$ ) cm.

Les matières premières utilisées dans ce travail et décrites précédemment ont été photographiées et présentées sur la figure qui suit.

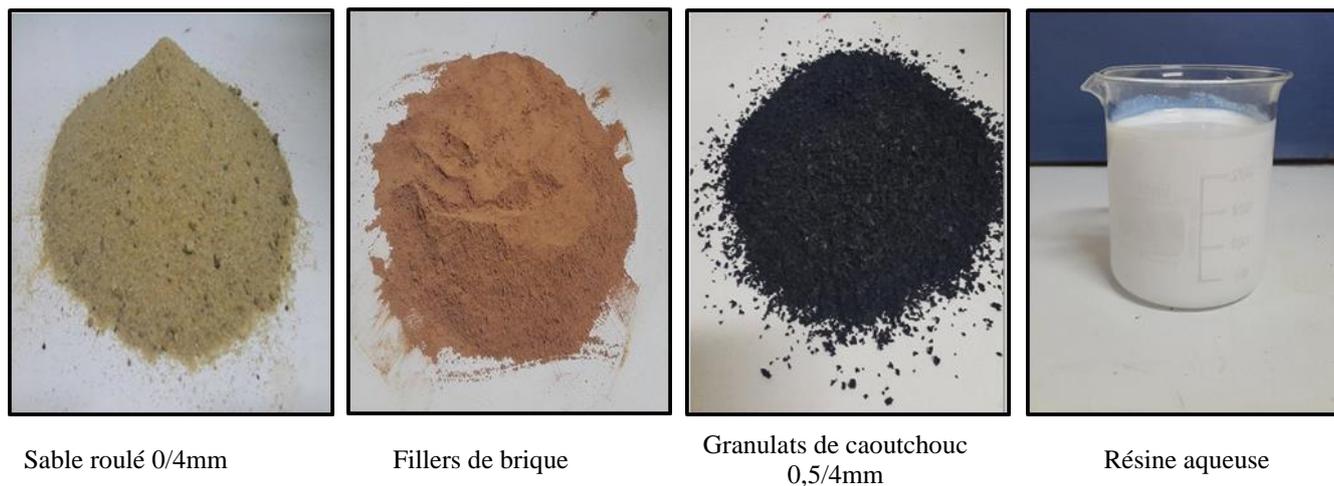


Figure 2.4: Matières premières utilisées.

## 2.9. Hydroxyde de sodium

Appelé également soude caustique, c'est un corps chimique composé minéral de formule chimique NaOH, qui est à température ambiante un solide ionique, fusible vers 318°C, il se présente généralement sous forme de pastilles, de paillettes ou de billes blanches ou d'aspect translucide, corrosives et très hygroscopiques. Il est très soluble dans l'eau et légèrement soluble dans l'éthanol. Nous l'avons utilisé dans ce travail pour traiter les granulats de caoutchouc et améliorer ainsi l'adhérence granulats de caoutchouc-mortier, les détails de traitement sont exposés dans la section II.3.2 qui suit.



**Figure 2.5:** Hydroxyde de Sodium (NaOH)

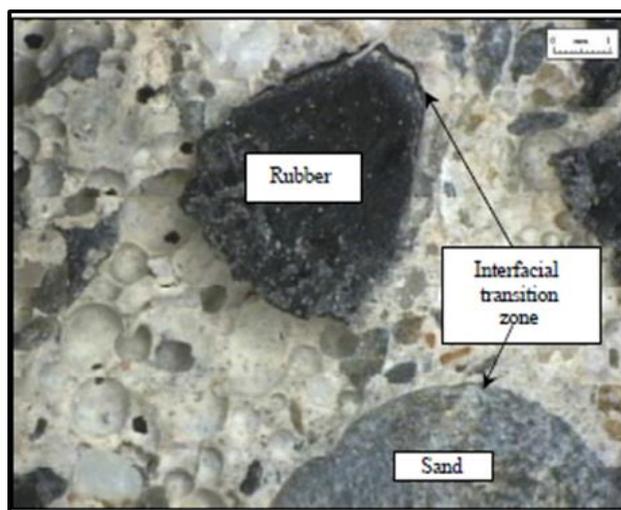
**Tableau 2.5:** Composition chimique du NaOH utilisé dans ce travail [288].

Composition	Quantités mg/kg
Chlorure Cl <sup>-</sup>	≤ 20
Phosphate PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	≤ 10
Silicate SiO <sub>2</sub>	≤ 100
Sulfate SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	≤ 30
Al	≤ 10
As	≤ 2
Ca	≤ 10
Fe	≤ 10
Hg	≤ 1
K	≤ 1000
Pb	≤ 0.5

### II.3. TRAITEMENT DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC

Le mortier caoutchouté est un matériau composite qui se compose de deux matériaux non homogènes à savoir le mortier (matrice) et les granulats de caoutchouc, les qualités fondamentales du mortier sont largement marquées par divers facteurs tels que: la composition des mortiers témoins, le dosage et les dimensions des granulats de caoutchouc ainsi que l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats de caoutchouc.

L'adhérence du caoutchouc au mortier est faible (Figure 2.6). De plus, le caractère hydrophobe du caoutchouc provoque un défaut de continuité à la zone d'interface de transition (l'ITZ) à cause du repli d'eau d'hydratation dans cette zone. Ce qui implique que l'ajout de Granulats Caoutchouc (GC) en tant que granulats dans le mortier diminue sa performance mécanique et sa durabilité. Une des principales raisons à cela, ce défaut d'adhérence entre GC et matrice cimentaire.



**Figure 2.6:** Micrographie montrant la zone de transition entre « la pâte de ciment et le granulat de caoutchouc » et entre « la pâte de ciment et le sable naturel » [28].

### 3.1. Principaux types de traitements testés

De nombreux chercheurs pensent que le défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment est une des raisons de la chute de résistance du béton incorporant ces granulats. Sous l'effet de la charge extérieure, les premières microfissures apparaissent dans la zone de transition entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment, une zone dont la résistance est beaucoup plus faible que celle des autres phases solides du composite [20, 23, 147, 158, 169, 289]. Un tel écart de performance du caoutchouc rend les particules de caoutchouc semblables aux vides dans les composites de ciment [140, 290]. Pour cette raison, certains auteurs étudient les possibilités d'améliorer l'adhérence entre ces deux matériaux (le caoutchouc et la pâte de ciment) par un traitement préalable de la surface des granulats de caoutchouc dans le but de minimiser la perte de résistance [145, 158, 291].

On peut citer :

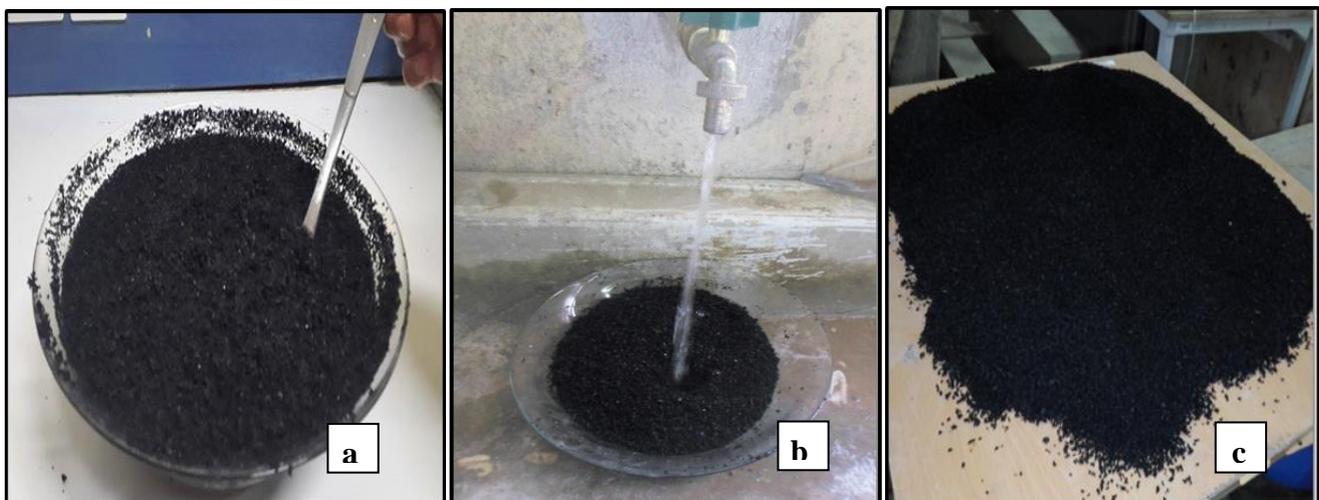
- Le prétraitement par lavage avec de l'eau [20, 292-295].

- L'imprégnation dans une solution alcaline hydroxyde de sodium NaOH [25, 145, 156, 195, 212, 296-298], l'hydroxyde de sodium élimine le stéarate de zinc présent sur la surface du caoutchouc, additif responsable des mauvaises caractéristiques d'adhérence, il améliore l'homogénéité de surface en augmentant l'hydrophilie des granulats de caoutchouc (leur capacité d'attirer et de retenir l'eau).
- Le traitement chimique avec l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [141, 299, 300].
- Les traitements avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub> [301, 302] et l'acide acétique CH<sub>3</sub>COOH [302], ces traitements ont un niveau de danger faible et sont plus respectueux de l'environnement par rapport à des acides ou des bases forts, tels que l'acide sulfurique et l'hydroxyde de sodium.
- Les traitements avec différents solvants de l'éthanol, méthanol et de l'acétone. Dans tous les cas, il y a eu des changements importants dans la structure du caoutchouc, par rapport au caoutchouc non traité, créant une surface plus hydrophile; l'augmentation la plus importante a été la résistance mécanique présentée dans les échantillons traités à l'acétone [303].
- Revêtement des particules de caoutchouc par deux méthodes: revêtement avec la pâte de ciment et revêtement avec une solution de méthocel éthers cellulose [175]. Ils ont observé que le revêtement de surface des granulats de caoutchouc avec la pâte de ciment a amélioré la résistance à la compression et le module d'élasticité du béton caoutchouté; les propriétés mécaniques des mélanges contenant la solution de Methocel éthers cellulose se détériorent.
- Traitement de caoutchouc avec les déchets de soufre organique provenant d'une usine de raffinage du pétrole afin de modifier leur surface, le soufre organique avec ses propriétés amphiphiles peut améliorer les propriétés hydrophiles du caoutchouc et augmenter les propriétés intermoléculaires, les forces d'interaction entre le caoutchouc et C-S-H et les performances mécaniques augmentent significativement [304].
- l'utilisation d'oxychlorure de magnésium comme liant dans des mélanges de ciment avec du caoutchouc, produit la modification de surface du caoutchouc, dans le but d'augmenter l'adhérence avec du ciment [27, 305].
- Un autre traitement a été adopté par [306]. Les auteurs ont étudié l'effet du traitement de surface des particules de caoutchouc par les rayons ultraviolets (UV), et ont constaté que l'exposition des particules de caoutchouc aux UV a été bénéfique pour la résistance à la flexion des composites cimentaires.

### 3.2. Traitement des granulats de caoutchouc adopté dans le présent travail

Pour remédier à ce problème d'adhérence, on cherche à favoriser une adhérence épitaxique<sup>1</sup> entre le ciment et le caoutchouc granulaire, en effectuant des traitements de surface sur les granulats de caoutchouc, par immersion dans une solution alcaline préparée à partir de la dissolution de 10 g de pastilles d'hydroxyde de sodium NaOH dans 90 cm<sup>3</sup> d'eau distillée. Cette solution d'une concentration de 10% a été adoptée pour promouvoir une continuité physique et épitaxique entre le caoutchouc et la matrice cimentaire.

Les granulats de caoutchouc sont immergés dans une solution aqueuse saturée pendant 20-30 minutes en agitant l'ensemble périodiquement. L'élimination de l'excès de la soude adsorbée sur la surface de caoutchouc a nécessité un rinçage avec de l'eau distillée. Pour s'assurer que toute la soude a été éliminée des granulats de caoutchouc, le pH de la solution est testé à l'aide du papier pH jusqu'à ce que ce pH soit égal à 7. Enfin, les granulats de caoutchouc sont séchés à l'air libre avant utilisation. Les photos a, b et c de la figure 2.7 montrent le processus de traitement. La solution d'hydroxyde de sodium est un nettoyant résistant et peut nettoyer les granulats de caoutchouc de la poussière, de l'huile et de la saleté [219].



a) Immersion des granulats de caoutchouc

b) Lavage des granulats de caoutchouc

c) Séchage des GC à l'air libre

**Figure 2.7:** Processus de traitement des granulats de caoutchouc.

L'huile et la saleté mentionnées sur la surface des granulats de caoutchouc génèrent une couche indésirable entre la pâte de ciment et la surface de caoutchouc, ce qui peut être une source de défaut dans la formation d'une forte adhérence entre la surface de caoutchouc et la

<sup>1</sup>Épitaxie: phénomène d'enchevêtrement dirigé des molécules de deux corps ayant des analogies de structure

pâte de ciment. En outre, le stéarate de zinc est un additif, qui est ajouté aux caoutchoucs de pneus pour les rendre plus résistants à l'oxydation. L'existence de stéarate de zinc sur la surface du caoutchouc conduit à des caractéristiques d'adhérence médiocres.

Le stéarate de zinc crée une couche barrière sur la surface du caoutchouc, ce qui rend les granulats de caoutchouc hydrophobes. La surface du caoutchouc tend à piéger les bulles d'air, qui sont adhérentes au caoutchouc [149, 195]. En outre, il a été signalé qu'un grand nombre de bulles d'air emprisonnées par du caoutchouc non traité, a été ajouté à l'eau [137]. Cela vient du comportement hydrofuge des particules de caoutchouc résultant de l'effet du composé de zinc sur sa surface. Pendant le traitement au NaOH, le stéarate de zinc se transforme en stéarate de sodium, qui est soluble dans l'eau. En conséquence, il peut être retiré de la surface de caoutchouc si le caoutchouc est rincé correctement après le traitement [307].

## II.4. FORMULATION DU MORTIER D'ETUDE

Afin d'adopter les compositions des mortiers devant servir à l'étude des caractéristiques physico-mécaniques et de durabilité, nous avons cherché à formuler une composition préliminaire de base (sans granulats de caoutchouc et sans déchet de brique) sur la base de critères mécaniques.

### 4.1. Composition de base

L'étude systématique des résistances mécaniques en fonction du rapport sable/ciment (S/C), nous a permis de choisir des rapports massiques S/C, correspondant à des résistances en compression et en flexion optimales. Dans cette composition, le rapport E/C a été maintenu fixe à 0.5 et le rapport S/C a varié de 2.6 jusqu'à 3.0. Les compositions qui ont résulté sont consignés dans le tableau 2.6 qui suit.

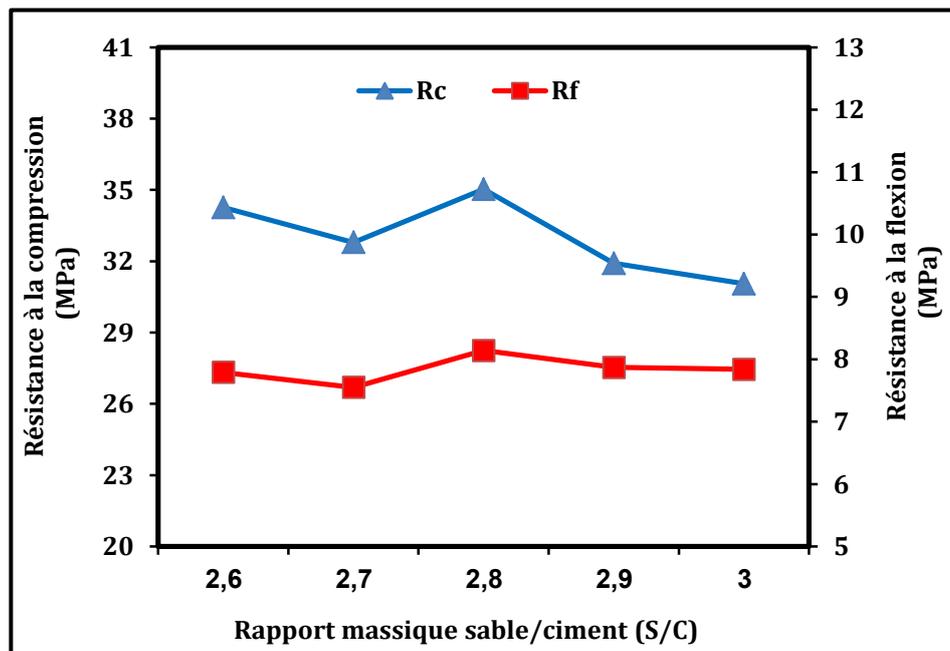
**Tableau 2.6:** Composition des mortiers en fonction du rapport S/C ( $\text{kg/m}^3$ ).

Rapport S/C	Ciment	Sable	Eau	E/C
2.6	500	1300	225	0.5
2.7	500	1350	225	0.5
2.8	500	1400	225	0.5
2.9	500	1400	225	0.5
3.0	500	1500	225	0.5

Les résistances mécaniques obtenues en compression et en flexion sont présentés dans le tableau 2.7 et la figure 2.8.

**Tableau 2.7:** Résistances mécaniques en fonction du rapport S/C.

Rapport massique S/C	Résistance à la compression $R_c$ (MPa)	Résistance à la flexion $R_f$ (MPa)
2.6	34.26	7.79
2.7	32.79	7.55
2.8	35.03	8.14
2.9	31.91	7.87
3.0	31.05	7.84



**Figure 2.8:** Résistances mécaniques en fonction du rapport S/C.

Le rapport S/C = 2.8 correspond à la résistance à la compression et à la flexion optimales, soient 35.03 MPa et 8.14 MPa respectivement. Ce rapport sera adopté dans la formulation du mortier d'étude. La composition correspondante est donnée dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8: Composition du mortier de base (Kg/m<sup>3</sup>).

Composant	Quantités (Kg/m <sup>3</sup> )
Ciment CEM I 42.5	500
Sable 0/4 mm	1400
Eau de gâchage	250

La composition préliminaire du mortier de base qui a une densité apparente de 2.06 avec un rapport E/C = 0.5 et S/C = 2.8, a généré des échantillons de mortier pratiquement avec un manque de cohésion, comme le montre la figure 2.9, difficulté de mise en œuvre et des résistances pas très élevées comme c'est indiqué dans le tableau 2.7. Pour ces raisons, nous avons utilisé un superplastifiant MEDAPLAST SP40 haut réducteur d'eau qui permet d'améliorer la fluidité du mélange sans augmenter la teneur en eau et d'obtenir des mortiers plus performants mécaniquement.



Figure 2.9: Aspect physique du mortier de base (S/C=2.8 et E/C= 0.5).

Pour notre étude on s'est fixé un dosage en superplastifiant de 1.4% du poids du ciment pour le mortier de base, ce dosage est ensuite varié pour assurer la même consistance (plastique)  $16 \pm 2$ cm pour tous les mélanges avec des proportions variées de granulats de caoutchouc. Les consistances ont été systématiquement évaluées au moyen d'un essai de table de secousse de mortier (EN 12350-5).

C'est à partir de cette composition que nous avons lancé une campagne de formulation de mortiers incorporant des granulats de caoutchouc que nous présentons dans ce qui va suivre.

## 4.2. Composition adoptée pour les essais

Plusieurs travaux ont été réalisés sur la base de l'incorporation de sous-produits dans des mélanges basiques tels que le calcaire [308], les cendres volantes [119], et les fumées de silice

(micro silice exactement) [195], le métakolin [215], l'ajout de nanomatériaux [309], l'ajout de nano silice [310], a été adoptée comme alternative pour remplir les vides inter-granulaires et contribuer à l'amélioration de la résistance à la compression de ces mélanges. Des résultats prometteurs ont été obtenus. Cependant, l'incorporation de déchets de brique (DB) en tant que fillers, dans le remplacement du sable naturel (SN) n'a pas été étudiée malgré sa réaction pouzzolanique avec la chaux hydratée [54]. Le déchet de brique ajoutée à la composition basique corrigera également la compacité du mélange granulats (SN+GC).

Il est également utile de noter que le composant déchet de brique a été utilisé sous forme de poudre (en tant que fillers) pour corriger la compacité (C) des granulats de sable naturel et déchet de brique (62.5% et 57% respectivement) tel que déterminé par l'expression  $C = \text{densité apparente} / \text{densité absolue}$ . Les densités apparentes et absolues ont été mesurées en utilisant la méthode du picnomètre. Le nouvel éco-matériau avec deux déchets représente un ajout intéressant à la gamme de composites caoutchouc-ciment.

Dans cette partie du travail nous avons opté pour l'étude de 23 formulations de mortiers: un mortier de référence et 22 mortiers incorporant les GC et les fillers de DB, les GC utilisés ont été traités avec une solution d'hydroxyde de sodium dans 19 formulations et non traités dans les 3 restantes. Le traitement des GC vise l'amélioration de la liaison matrice-GC, elle vise également l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques de l'éco-mortier envisagé.

Tous les mélanges ont été confectionnés pour avoir une rhéologie semblable; soit une consistance plastique de  $16 \pm 2$  cm à la table à secousses. Ceci a été rendu possible grâce à l'introduction contrôlée d'un superplastifiant Médaplast SP40. Par ailleurs un stabilisant a été rajouté dans les mélanges contenant des GC pour empêcher leurs ségrégations.

Des mortiers ont été fabriqués avec des déchets de caoutchouc en substitution volumique du sable avec des taux de 10, 20 et 30% et des fillers des déchets de brique en substitution volumique du sable également avec des taux de 2.5, 5.0, 7.5 et 10% (voir Tableau 2.9). Il est à noter que les mélanges composés contenant des granulats de caoutchouc et des fillers de brique ont été préparés pour évaluer l'effet de leurs remplacements.

Les mortiers étudiés ont été désignés par GCXDBY, GCNTXDBY et GCTXDBY, GC et DB désignent granulats de caoutchouc et déchets de brique respectivement. X et Y sont les taux variables (en %) des GC et DB respectivement, NT et T désignent les granulats de caoutchouc non traités et les granulats de caoutchouc traités.

Tableau 2.9: Composition des mortiers adoptés avec granulats non traités et granulats traités par le NaOH.

N°	Mortiers	C	S	E	GC	DB	ST	SP
01	GC0DB0	500	1400.00	250	0	0	0.0	07.00
02	GC0DB2.5	500	1365.00	250	0	34.11	0.5	12.50
03	GC0DB5.0	500	1330.00	250	0	68.23	0.5	12.50
04	GC0DB7.5	500	1295.00	250	0	102.34	0.5	12.50
05	GC0DB10	500	1260.00	250	0	136.45	0.5	12.50
06	GC10DB0	500	1260.00	250	51.14	0	0.5	11.00
07	GC20DB0	500	1120.00	250	102.28	0	0.5	11.50
08	GC30DB0	500	980.00	250	153.34	0	0.5	11.50
09	GCNT10DB0	500	1260.00	250	51.14	0	0.5	11.00
10	GCNT20DB0	500	1120.00	250	102.28	0	0.5	11.00
11	GCNT30DB0	500	980.00	250	153.34	0	0.5	11.50
12	GC10DB2.5	500	1228.50	250	51.14	30.70	0.5	11.50
13	GC10DB5.0	500	1197.00	250	51.14	61.40	0.5	12.00
14	GC10DB7.5	500	1171.58	250	51.14	92.10	0.5	12.50
15	GC10DB10	500	1142.11	250	51.14	122.81	0.5	12.50
16	GC20DB2.5	500	1093.80	250	102.28	27.29	0.5	12.00
17	GC20DB5.0	500	1067.60	250	102.28	54.58	0.5	12.50
18	GC20DB7.5	500	1041.40	250	102.28	81.87	0.5	12.50
19	GC20DB10	500	1015.21	250	102.28	109.16	0.5	11.50
20	GC30DB2.5	500	957.08	250	153.34	23.88	0.5	10.50
21	GC30DB5.0	500	934.15	250	153.34	47.76	0.5	09.50
22	GC30DB7.5	500	911.23	250	153.34	71.64	0.5	09.50
23	GC30DB10	500	888.30	250	153.34	92.52	0.5	12.50

**Nomenclature des composants:**

C: ciment, SN: sable naturel, E: eau, GC: granulats de caoutchouc, DB: déchet de brique, ST: stabilisant, SP: superplastifiant et R: résine.

### 4.3. Le malaxage des mortiers

Cette opération influe d'une façon notable sur le produit final. Pour les mortiers, le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 5 litres. La palette du malaxeur pouvant tourner à deux vitesses (lente et rapide). La séquence de malaxage est conforme à la norme (EN 196-1).

- Les composants secs (ciment, sable, déchets de brique et granulats en caoutchouc) ont été introduits dans le malaxeur puis malaxés pendant 3 minutes à vitesse lente afin d'assurer une bonne dispersion des granulats de caoutchouc.
- Après rajout d'une solution contenant 80% d'eau et de la totalité des deux adjuvants (SP et stabilisant), pour la deuxième série on ajoute la résine avec ses deux adjuvants et fait un malaxage à vitesse lente pendant 2 minutes.
- Les 20% restants de l'eau ont été introduits et le tout a été malaxé pendant 2 minutes à vitesse lente.
- Un malaxage à vitesse rapide a été finalement adopté jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène (environ de 2 à 3 minutes).

La consistance de  $16 \pm 2$  cm correspondant à un mortier plastique, déterminée par l'essai de la table à secousses conformément à la norme européenne EN 1015-6, a été vérifiée pour tous les mélanges.

### 4.4. Confection des éprouvettes

Les essais expérimentaux sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16$  cm<sup>3</sup>, des éprouvettes cubiques de  $15 \times 15 \times 15$  cm<sup>3</sup> et des éprouvettes cylindriques avec un diamètre de 15 cm et une hauteur de 5 cm.

La mise en moule a été effectuée immédiatement après la fin de malaxage afin que l'expansion du matériau ne se produise pas à l'intérieur de la cuve de malaxeur; les éprouvettes ont été coulées dans des moules préalablement huilés (Figure 2.10). Le mortier frais est placé en deux couches vibrées pendant 1 minute à l'aide de la table vibrante. Une fois le moule rempli, le surplus du mortier a été arasé et la surface a été égalisée à la truelle (Figure 2.11). Les moules remplis par le mortier frais ont été ensuite recouverts par un film plastique jusqu'au démoulage. Le démoulage est effectué après une durée de 24 heures. Les

---

éprouvettes ont été ensuite soumises à une cure dans l'eau (Figure 2.12) pendant 28 jours et conservées à l'air libre pour les éprouvettes de retrait.

Il est à noter que pour les différents mélanges de mortier, trois éprouvettes ont été utilisées pour effectuer chaque essai.



Figure 2.10: Moule huilé.



Figure 2.11: Arasage de la surface du mortier à la truelle.

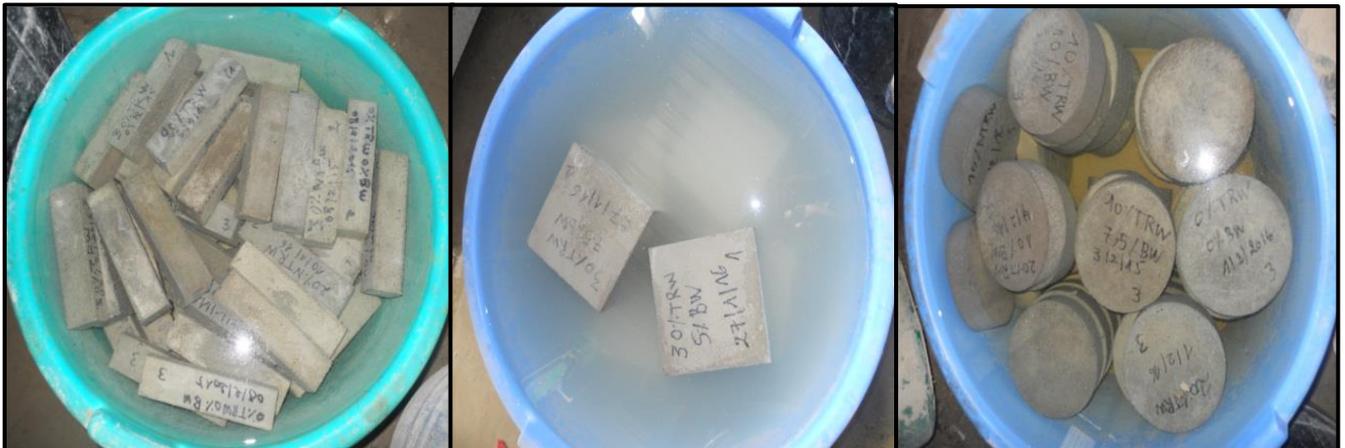


Figure 2.12: Cure dans l'eau des différentes éprouvettes d'essai.

## II.5. TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés physico mécaniques et de durabilité des mortiers d'étude en faisant varier le pourcentage des granulats de caoutchouc et déchets de brique en comparant ceux-ci aux propriétés des mortiers témoins à différents échéances d'âges.

## 5.1. Caractéristiques physico-mécaniques

### 5.1.1. A l'état frais

Nous décrivons dans ce qui suit l'essai de la table à secousses qui nous a permis de mesurer la consistance des éco-mortiers d'étude afin de la contrôler. Nous avons en effet opté pour la confection d'éco-mortiers ayant des consistances semblables.

Cet essai d'étalement (Figure 2.13) est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du béton et mortier à s'étaler par écoulement [311]. La consistance de tous les mortiers étudiés dans ce travail a été évaluée conformément à la norme européenne EN 1015-3 [312].

La valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses définie, et soumis à un nombre donné de secousses verticales en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur donnée.

Le moule tronconique de diamètre inférieur 100 mm, de diamètre supérieur 70 mm et de hauteur 60 mm (Figure 2.14) est placé au centre de la table et après rempli de mortier. Le remplissage se fait en deux couches, chacune étant compactée avec 10 coups de bâton en pilon pour homogénéiser la matière dans l'embase tronconique. L'échantillon est retiré au moyen d'une règle en acier. Le moule est soulevé lentement et verticalement et la table à secousses est actionnée par 15 secousses à une cadence d'une par seconde est appliquée au mortier. Puis l'étalement de l'échantillon est mesuré à 2 endroits diamétralement opposés (Figure 2.15). L'étalement est calculé par une moyenne de deux diamètres  $D_1$  et  $D_2$  en mm.  $D_1$  et  $D_2$  sont respectivement le diamètre de la galette.

$$D_{\text{moyenne}} = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

Les valeurs sont arrondies au millimètre près. Pour chacun des mortiers, 3 points de mesures sont effectués et une moyenne permet de définir le diamètre d'étalement du mortier.

Les classes de consistance sont définies en fonction des variations de l'affaissement (Tableau 2.11).

Tableau 2.10: Valeurs d'étalement NF EN 1015-6 [313].

Consistance d'utilisation	Valeurs d'étalement
Mortier raide	< 14 mm
Mortier plastique	Entre 140 et 200 mm
Mortiers fluide	> 200 mm

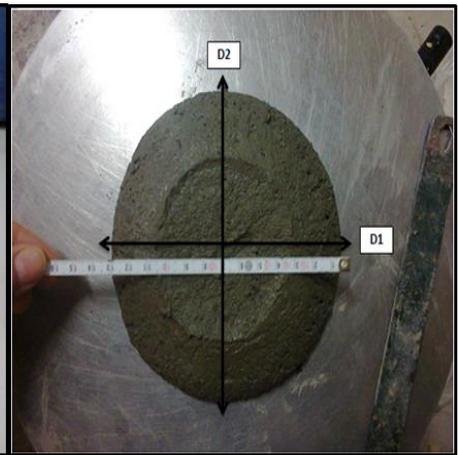
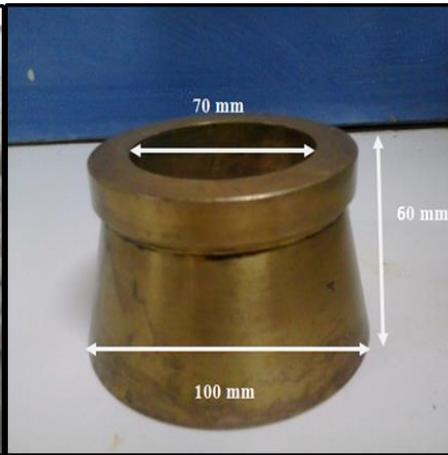


Figure 2.13: Table à secousse.

Figure 2.14: Dimensions du cône.

Figure 2.15: Mesure de l'étalement.

## 5.1.2. A l'état durci

### 5.1.2.1. Masse volumique à sec

La masse volumique du mortier durci  $\rho$  est déterminée pour les différents mortiers confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN 12390-7 [314]. La procédure suivie est présentée ci-dessous.

- Peser la masse d'une éprouvette durci  $M$  après passage à l'étuve à  $70^\circ\text{C}$  (jusqu'à masse constante), pour notre cas on utilise des éprouvettes  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$  ayant subit une cure dans l'eau pendant 28 jours.
- Une fois la masse constante obtenue, une mesure des dimensions des éprouvettes est effectuée pour déterminer le volume (Figures 2.16 et 2.17).



**Figure 2.16:** Mesure des dimensions

d'éprouvette 4x4x16 cm<sup>3</sup>.



**Figure 2.17:** Pesage d'éprouvette 4x4x16 cm<sup>3</sup>.

La masse volumique est obtenue en divisant la masse par le volume correspondant aux dimensions des éprouvettes, la masse volumique du mortier durci  $\rho$  sera:

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

### 5.1.2.2. Mesure des résistances mécaniques

Les résistances mécaniques en compression et en flexion ont été déterminées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm<sup>3</sup>. Après conservation dans l'eau pendant 28 jours, elles sont séchées dans une étuve ventilée à 70°C jusqu'à masse constante, avant d'être soumises aux essais. Les essais mécaniques normalisés ont été réalisés aux échéances de 28 et 300 jours de façon à observer l'évolution progressive des performances.

#### a) Résistance à la traction par flexion

Pour chaque échéance, trois échantillons ont été testés en flexion simple sur une machine d'essais de résistance à la flexion (3 points) de marque "CONTROLS" permettant d'appliquer des charges jusqu'à 50KN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/s. Les mesures sont effectuées sur une presse qui répond aux normes EN 196-1 et NF EN 1015-11 [315, 316].

Les Figures 2.18 et 2.19 qui suivent décrivent les essais de résistances réalisés dans ce travail.

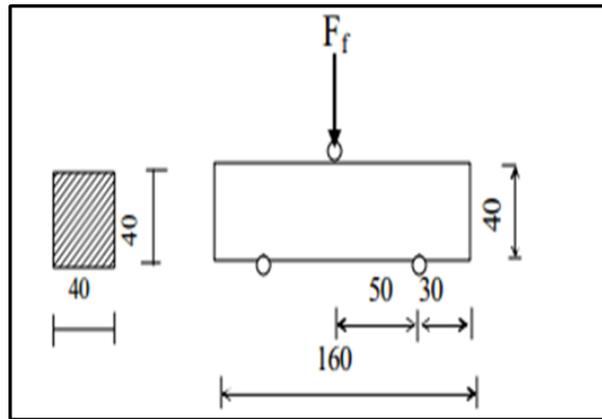


Figure 2.18: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

Si  $F_f$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut  $F_f L/4$  et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1,5 F_f \cdot L}{b^3}$$

$F_f$  : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

$L$ : La distance entre les appuis ( $L = 100$  mm).

$b$ : Le côté de la section carrée de l'éprouvette ( $b = 40$  mm).

Si  $F_f$  est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en mégapascals (MPa) vaut :

$R_f(\text{MPa}) = 0.234 F_f(\text{N})$  [317].



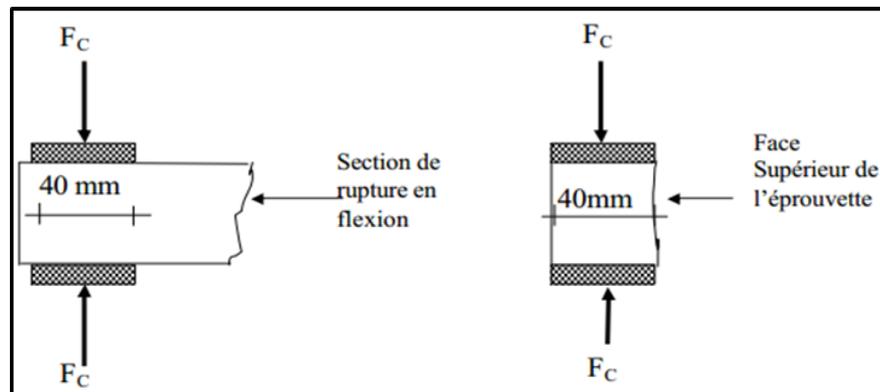
Figure 2.19: Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes  $4 \times 4 \times 16$  cm<sup>3</sup>.

**b) Résistance à la compression**

L'essai de compression simple est l'un des plus significatifs pour caractériser la qualité d'un mortier. Cet essai s'effectue par chargement monotone jusqu'à la rupture de l'échantillon.

Pour l'essai de résistance en compression, la presse hydraulique utilisée est du type Contolab, d'une capacité de 1500 KN conforme à la norme EN 196-1 et NF EN 1015-11 [315, 316], avec une vitesse de mise en charge de  $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$ . Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion ont été rompus en compression comme indiqué sur la Figure 2.20.

L'éprouvette est placée au milieu du plateau de la presse comme le montre la Figure 2.21, la surface de contact entre l'éprouvette et le plateau de compression est de  $16 \text{ cm}^2$  ( $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ).



**Figure 2.20:** Dispositif de rupture en compression.



**Figure 2.21:** Essai de compression sur les éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ .

La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette, elle est calculée selon l'expression suivante. La valeur prise en compte est la moyenne de trois mesures pour chaque composition.

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

$R_c$  : Résistance à la compression en (MPa).

$F_c$  : Charge de rupture en (N).

$b$  : Côté de l'éprouvette cubique (40 mm).

Si  $F_c$  est exprimée en newton, cette résistance exprimée en mégapascals vaut :

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

### 5.1.2.3. Essais d'auscultation dynamique

La vitesse sonique est un paramètre qui permet d'obtenir une information qualitative sur le matériau et sur la structure. La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le mortier résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton et le mortier. Le principe de la méthode des ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le mortier. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion [318], comme le montre la Figure 2.22.



**Figure 2.22:** Mesure de la vitesse de propagation de sons sur des éprouvettes  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ .

Cet essai est réalisé conformément à la spécification de la norme NF EN 12504-4 [319]. Il est effectué sur des éprouvettes cubiques ( $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ ) conservées dans l'eau pendant 28 jours et séchées à l'étuve à température de  $60^\circ\text{C}$  jusqu'à la masse constante.

La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de contact telle qu'une mince couche de gel de contact est indispensable.

Un train d'ondes longitudinales (54KHz) est produit par un transducteur (émetteur) électro-acoustique maintenu au contact d'une surface du mortier soumis à l'essai. Après avoir parcouru une longueur connue dans le mortier, le train de vibrations est converti en signal électrique par un deuxième transducteur (récepteur), et des compteurs électroniques de mesure du temps permettent de mesurer le temps de parcours de l'impulsion.

Après avoir actionné l'appareil on lit le temps de propagation en micro-seconde ( $\mu\text{sec}$ ). La distance entre les têtes doit être connue avec une précision de 1% pour calculer la vitesse de propagation à l'aide de l'expression suivante :

$$V = \frac{L}{T}$$

V: La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le mortier en m/sec.

L: La distance entre les têtes en m.

T : Le temps de propagation en  $\mu\text{sec}$ .

A partir de la vitesse de propagation du son, on peut déterminer quelques paramètres intéressants comme le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression.

#### 5.1.2.4. Module d'élasticité dynamique $E_{\text{dyn}}$

A partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique  $E_{\text{dyn}}$  selon l'expression suivante:

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

V: vitesse du train d'ondes (m/s).

$\rho$  : masse volumique apparente des éprouvettes ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\nu$  : le coefficient de poisson, on prendra  $\nu = 0.3$ , valeur usuelle pour les mortiers.

### 5.1.2.5. Retrait (variation dimensionnelle)

Le retrait est un paramètre important car il entraîne souvent l'apparition de fissures qui peuvent nuire à la durabilité du béton et du mortier. Les déformations de la matrice sont dues soit aux processus physico-chimiques lors de l'hydratation, soit au gradient hydrique entre le matériau et le milieu extérieur.

Cet essai a pour but de mesurer, en fonction du temps, les variations dimensionnelles de retrait des éprouvettes à l'état durci, selon la norme NF P15-433 [310]. Cette mesure a été réalisée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm<sup>3</sup>. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées à l'air ambiant du laboratoire.

Les variations dimensionnelles ont été déterminées à l'aide d'un rétractomètre électronique à affichage digital à haute sensibilité, capable d'apprécier des variations de l'ordre de 10<sup>-3</sup> mm (Figure 2.23). La prise de valeur s'effectue à partir du 1<sup>er</sup> jour, une évaluation de la déformation à moyen et long-terme est présentée pour les différents types de mortiers.



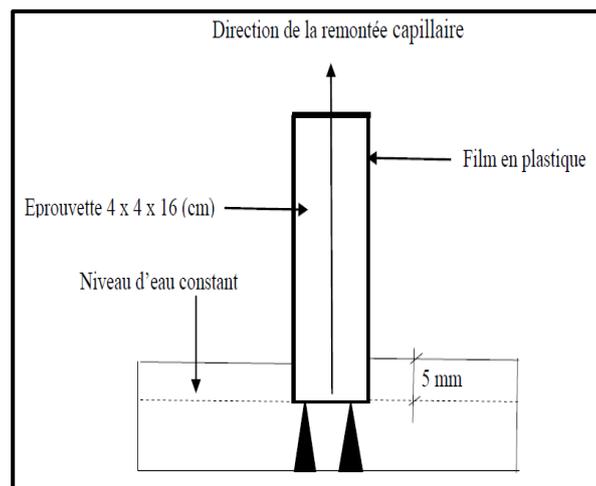
Figure 2.23: Mesure du retrait par un rétractomètre digital.

### 5.1.2.6. Absorption d'eau par capillarité

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux. Plus la sorptivité est élevée, plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide de contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité.

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de mortier non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. L'essai renseigne globalement sur les structures et sur l'importance du réseau capillaire. Il est utilisé en complément à d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton et du mortier.

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480-5 [321] et consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par le mortier en fonction du temps. Le taux d'absorption par remontée capillaire due à la force de succion d'une éprouvette prismatique de mortier  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  posée à sa base sur des petits supports (non absorbants) dans un bac à eau de telle manière que seuls les 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par un film plastique sur toutes les autres faces afin d'obtenir un écoulement unidirectionnel, le bac d'eau muni d'un système d'alimentation automatique en eau permet de maintenir le niveau d'eau constant tout le long de l'expérience (Figure 2.24 et 2.25).



**Figure 2.24:** Schéma du dispositif expérimental.



**Figure 2.25:** Dispositif d'absorption d'eau par capillarité.

Puis on procède à de relevés de masses successifs à l'aide d'une balance de précision de 0,01 g sur des intervalles de temps très courts au début puis de plus en plus espacés au fur et à mesure que l'on avance dans l'expérience (1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64 minutes, 2h, 4h, 8h jusqu'à 24h). A chaque échéance, l'éprouvette prismatique séchée préalablement à l'étuve (105 °C) jusqu'à masse constante, est sortie du récipient, essuyée légèrement puis pesée ( $M_j$ ) et replacée dans le récipient en position verticale.

Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire « CA » est exprimée en grammes par millimètre carré, par la formule suivante :

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S} \text{ (en g/mm}^2\text{)}$$

Avec :

$M_0$  : Masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en grammes.

$M_j$  : Masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en grammes.

$S$  : Section de la base de l'éprouvette en millimètre carré, c'est-à-dire 1600 mm<sup>2</sup>.

Les résultats obtenus à chaque échéance sur trois éprouvettes de chaque type du mortier sont exprimés sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées.

Le coefficient de sorptivité  $S$  (mm / s<sup>1/2</sup>) a été déterminé mathématiquement selon Hall [322] en utilisant l'équation suivante:

$$i = S \cdot t^{1/2} + i_0$$

Où:

$i = \frac{W}{A}$  : Volume cumulé d'eau absorbée ( $W$ ) par rapport à la section transversale ( $A$ ). Il a une dimension de profondeur (mm<sup>3</sup> / mm<sup>2</sup> ou mm).

$i_0$  : Coefficient empirique qui dépend de la finition de surface de l'échantillon. Il correspond au remplissage instantané des pores en contact avec l'eau.

$t$  : Temps (s).

$S$  : Coefficient de sorptivité (mm/s<sup>1/2</sup>).

Les résultats d'essais sur différents mortiers sont présentés en traçant toutes les droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps.

### 5.1.2.7. Absorption d'eau par immersion totale

L'absorption d'eau par immersion d'un mortier est déterminée selon les prescriptions de la norme NBN B 15-215:1989 [323].

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée.

Rappelons que l'essai consiste à un séchage des éprouvettes prismatique (4x4x16) cm<sup>3</sup> du mortier jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à 105 °C. Ensuite l'immersion totale des éprouvettes dans un bac à eau à 20 ± 2 °C durant un minimum de 48 h et jusqu'à saturation du matériau. Avant la pesée l'éprouvette est essuyée avec une éponge humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle. La masse est considérée constante lorsque deux pesées successives à 24 h d'intervalle ne donnent pas une différence supérieure à 0,1%. Une fois la masse saturée obtenue et la masse à sec préalablement connue, nous avons déterminé la masse d'eau absorbée.

L'absorption d'eau par immersion  $A_b$  est exprimée en % de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

$M_a$ : Masse de l'échantillon imbibé d'eau.

$M_s$ : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.

Les résultats obtenus sur 3 éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées.

## 5.2. Durabilité

### 5.2.1. Essais d'attaque par les sulfates et les acides

Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, mais surtout sulfates), on peut alors observer des dégradations des ouvrages en béton par dissolution et érosion en cas d'attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline, en particulier sulfatiques.

---

La résistance vis-à-vis des attaques chimiques a été déterminée sur des éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  confectionnées selon la norme NF EN 196-1.

Après la durée de cure sous l'eau pendant 28 jours (temps zéro), les éprouvettes de mortier sont pesées pour déterminer la masse ( $M_1$ ) avant d'être soumises à l'immersion dans plusieurs types de solutions d'attaque. Elles ont été placées dans des bacs séparés (Figure 2.26) pendant 90 jours, 180 jours et 270 jours.

Les solutions utilisées sont: une solution d'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  de concentration 5% et un  $\text{pH} = 1$ , une solution du sulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  de concentration 5% et de  $\text{pH} = 11$  et l'eau de mer. Cette eau provient de la mer méditerranée, son  $\text{pH}$  est de 8 et sa salinité est de 38,4-41,2g/L [324].

Cette concentration est souvent choisie dans la littérature. L'utilisation des faibles concentrations demanderait plus de temps d'investigation, c'est pourquoi le choix s'est porté sur celle de 5% qui représente le seuil maximal pour un milieu très agressif.

Les éprouvettes sont nettoyées avec de l'eau douce pour éliminer le mortier altéré puis séchées pendant  $\frac{1}{2}$  heure avant d'être replongées dans des solutions d'attaque renouvelées. Ensuite on procède à la pesée de ces dernières ( $M_2$ ), la balance utilisée était de précision 0,01 gramme et la solution d'attaque est renouvelée tous les mois chaque 15 jours (selon la valeur du  $\text{pH}$ ).

Afin d'évaluer la durabilité des mortiers vis-à-vis de l'attaque des sulfates de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ASTM C1012 -89) [325], de l'eau de mer et de l'eau de robinet, nous avons déterminé pour les différents types de mortiers les résistances à la compression, à la flexion et l'expansion en fonction de la durée d'exposition dans cette solution, à chaque âge d'essai, l'expansion moyenne est déterminé à l'aide d'un comparateur sur trois prismes de chaque type de mortier. La résistance aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions est vérifiée par leur perte de poids.

Le degré de l'attaque d'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a été déterminé conformément à la norme ASTM C 267-96 [326]. Il a été évalué à partir de la perte de poids selon la formule :

$$\text{Perte de poids (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

$M_1$  et  $M_2$  sont les masses des éprouvettes avant et après immersion respectivement.

---

a) Dans  $H_2SO_4$ b) Dans  $Na_2SO_4$ 

c) Dans l'eau de mer

**Figure 2.26:** Eprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  immergées dans diverses solutions.

### 5.2.2. Essai de porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau a été mesurée par pesée hydrostatique, suivant la norme NF EN 18-459 [327]. Les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours. Cette mesure simple, praticable sur une large variété de pâtes de ciment, mortiers ou bétons, est considérée comme un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. Elle est calculée grâce à la différence de masse entre un échantillon à l'état sec et ce même échantillon à l'état saturé.

Cette méthode (pesée hydrostatique) présentée dans la figure 2.27 étant certainement la plus simple parmi toutes celles permettant d'accéder aux différents indicateurs de durabilité, les spécifications proposées sont préférentiellement basées sur la porosité à l'eau. L'essai comprend les étapes suivantes :

### 1. Pesée hydrostatique

Cette pesée s'effectue en immergeant complètement l'éprouvette à l'aide d'une balance hydrostatique (précision de 0.01 g) pour obtenir  $M_{\text{eau}}$  de l'éprouvette immergée dans l'eau.

### 2. Pesée à l'air

Après la pesée à l'eau, il faut essuyer rapidement et superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans toutefois retirer l'eau des pores. Ensuite peser immédiatement l'éprouvette à l'air à 0.01 g près. On obtient de cette manière, la masse  $M_{\text{air}}$  de l'éprouvette imbibée. Pour mieux caractériser un mortier, l'essai est réalisé sur trois échantillons.

### 3. Pesée à sec

S'effectue par étuvage de l'échantillon à une température de  $105 \pm 5$  °C jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire lorsque deux pesées consécutives espacées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0.05 %. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche  $M_{\text{sec}}$ .

On utilise la formule suivante pour calculer la porosité accessible à l'eau P :

$$P = \frac{(M_{\text{air}} - M_{\text{sec}})}{(M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})}$$



**Figure 2.27:** Dispositif d'essai utilisé pour la mesure de la porosité accessible à l'eau.

### 5.2.3. Essais de perméabilité

La perméabilité du béton et du mortier est un autre paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. C'est l'aptitude d'un corps à se laisser pénétrer et traverser par l'air, par la vapeur d'eau ou par l'eau à l'état liquide. Elle est directement liée aux caractéristiques du réseau poreux (forme, dimension, distribution, sinuosité, etc.).

#### 5.2.3.1. Perméabilité à l'air

La perméabilité aux gaz permet de caractériser la capacité du béton à permettre le transfert d'un gaz au travers de sa porosité. Il constitue à ce titre un indicateur de durabilité du matériau, notamment vis-à-vis des gaz pouvant réagir chimiquement avec les hydrates (carbonatation due au dioxyde de carbone). L'objectif de cet essai est de mesurer le débit volumique de gaz, en l'occurrence l'air comprimé, traversant en régime permanent un échantillon de matériau à base de liant hydraulique soumis à un gradient de pression constant, puis par application de la loi de Darcy d'en déduire la perméabilité aux gaz.

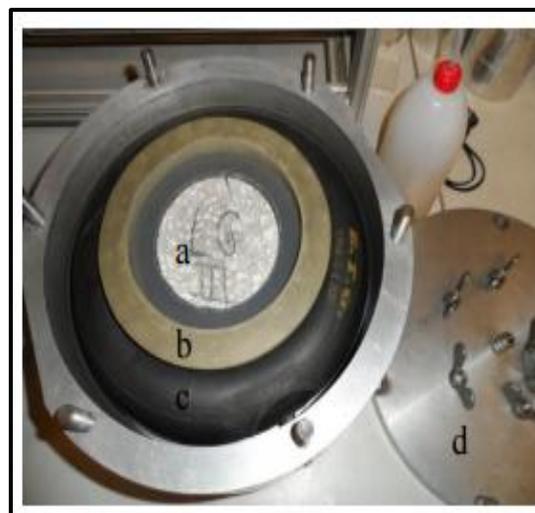
Cet essai de perméabilité a été effectué sur des éprouvettes cylindriques de mortier durci, de 150 mm de diamètre et 50 mm de hauteur. Le démoulage des échantillons est effectué au bout d'un jour et les éprouvettes sont ensuite conservées dans l'eau à 20°C pendant 28 jours avant d'être séchées dans l'étuve à 60°C. A chaque fois, l'éprouvette n'est retirée de l'étuve qu'après stabilisation de la masse. Trois échantillons ont servi à la caractérisation d'une seule formulation.

L'essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un gradient de pression de gaz constant. La perméabilité est déterminée à partir de la mesure du flux en régime permanent à l'aide d'un perméamètre à oxygène à charge constante de type CONTROLAB (Figure 2.28). La face latérale de l'éprouvette est enveloppée par un film étanche afin d'avoir un flux de gaz unidirectionnel.



**Figure 2.28 :** Perméamètre utilisé.

L'échantillon est disposé dans une cellule appropriée (Figure 2.29). Ses deux faces planes reposent sur une plaque striée permettant une répartition homogène de la pression, la face circulaire est entourée d'un manchon néoprène étanche.



**Figure 2.29:** Intérieur d'une cellule de perméabilité.

- a: Echantillon de béton.
- b: Manchon en polyuréthane étanche.
- c: Chambre à air gonflable.
- d: Couvercle avec fixations.

Les essais de perméabilité au gaz (air comprimé) effectués comprennent en général plusieurs mesures de perméabilité apparente  $k_a$  relatives à différentes pressions différentielles.

Chaque test de perméabilité comprend alors des mesures de débit relatives à cinq pressions différentielles d'injection s'étageant autour des valeurs suivantes 1.5 – 2 – 2.5 – 3 et 3.5 bars de manière à obtenir une précision de mesure satisfaisante. Pour des éprouvettes perméables, ces pressions pourraient être, par exemple: 1. 5, 2.0 et 2.5 bars. Pour les spécimens de test qui ne sont pas perméables, les niveaux de pression de 2.5, 3.0 et 3.5 bars sont recommandés. [328].

Les débits de gaz sont mesurés à pression atmosphérique à l'aide d'un débitmètre à bulle comprenant une série de quatre tubes calibrés de 1.5, 5, 20 et 160 cm<sup>3</sup>. Les tubes sont choisis de telle façon que la bulle de savon parcourt une distance maximum pendant une durée comprise entre 20 et 60 secondes conformément aux recommandations [329, 330]. Pour chaque pression d'injection, cinq mesures de débit au minimum sont effectuées durant une période d'au moins 15 minutes.

Le tube de mesure capillaire choisi (donc le volume) est correct quand le temps mesuré pour qu'une bulle de savon passe à travers tout le volume est  $\geq 30$  secondes. Si le temps mesuré est inférieur à 30 s, alors on doit choisir un tube de mesure capillaire plus grand (donc un plus grand volume). Si le temps de mesure est plus long, on doit utiliser un tube de mesure capillaire plus petit (donc un volume inférieur) [328].

Un temps suffisamment long est requis entre deux mesures afin que l'écoulement de gaz puisse s'établir en régime permanent à travers l'échantillon. Généralement un temps de 30 minutes suffit pour que l'écoulement soit stable et établi [330]. Dans la pratique, après chaque incrément de pression, un temps minimum de 30 minutes, plus souvent 1 heure, est attendu avant que les premières mesures de débit ne soient effectuées. L'étalement des mesures sur une durée de 15 minutes permet de vérifier que le régime d'écoulement est établi.

Si les débits mesurés durant cette période diffèrent de plus de 2%, un temps supplémentaire de 30 minutes est attendu à nouveau avant de procéder aux mesures de débit pour la même pression d'injection [331].

La pression relative ( $P - P_{atm}$ ) appliquée à l'échantillon est mesurée avec un manomètre digital de 1 hPa de précision. Pour chaque pression différentielle la perméabilité apparente  $k_a$  est calculée à partir de l'équation Hagen-Poiseuille pour un écoulement laminaire visqueux [332, 333].

---

$$K_a = \eta \frac{2 \cdot Q \cdot P_{atm} \cdot h}{A \cdot (P^2 - P_{atm}^2)} \text{ (m}^2\text{)}$$

Où

$K_a$ : Coefficient spécifique de perméabilité, (en  $\text{m}^2$ ).

$Q$  : Débit volumique mesuré à la pression atmosphérique ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$h$  : Hauteur du spécimen de test dans le sens du flux (m).

$A$  : Zone en coupe du spécimen de test ( $\text{m}^2$ ).

$\eta$  : Viscosité dynamique du gaz de test.

Oxygène à 20°C     $\eta = 2.02 \times 10^{-5} \text{ (Ns/m}^2\text{)}$ .

Air à 20° C         $\eta = 1.82 \times 10^{-5} \text{ (Ns/m}^2\text{)}$ .

$P$ : Pression d'entrée (absolue) en ( $\text{N/m}^2$ ).

$P_a$  : Pression de sortie (pour ce test, elle correspond à la pression atmosphérique) ( $\text{N/m}^2$ ).

### 5.2.3.2. Perméabilité à l'eau

La présente norme européenne NF EN 12390-8 [334] spécifie une méthode de détermination de la profondeur de pénétration d'eau sous pression dans un béton durci conservé dans l'eau de diamètre supérieur à 150 mm

Les essais de perméabilité ont été réalisés sur des éprouvettes de mortier de 150 mm de diamètre et 150 mm de hauteur. Elles ont été démoulées 24 heures après leurs mises en œuvre et immergées dans un bain d'eau pendant 28 jours. Elles ont ensuite été desséchées dans une étuve ventilée à 105° C jusqu'à masse constante.

Le principe de l'essai consiste à mettre les éprouvettes âgés de 28 jours au moins dans le dispositif d'essai de la figure 2.30 de manière à ce qu'elle soit traversée de bas en haut suivant sa hauteur, par de l'eau sous pression de  $500 \pm 50 \text{ KPa}$  (écoulement unidirectionnel), pendant 72 heures. La surface de l'éprouvette qui reçoit la pression d'eau doit être rendue rugueuse à l'aide d'une brosse métallique immédiatement après le démoulage, il est recommandé de ne pas appliquer la pression d'eau sur la surface d'une éprouvette arasée à la truelle.



Figure 2.30: Dispositif de mesure de la perméabilité à l'eau.

Au cours de l'essai, observer régulièrement l'apparence des surfaces de l'éprouvette d'essai non exposées à la pression d'eau pour noter l'éventuelle présence d'eau. En cas de fuite, s'interroger sur la validité de l'essai et consigner l'évènement.

Après rupture de l'éprouvette par fendage, on mesure la profondeur de pénétration d'eau à l'aide d'un pied à coulisse. On mesure ensuite la variation de quantité d'eau qui a traversé l'éprouvette en fonction du temps, ce qui permet de déterminer le coefficient de perméabilité du matériau  $k_p$ .

Le coefficient de perméabilité est calculé suivant l'équation :

$$K_p((m/s) \times 10^{-5}) = \frac{Q \cdot H}{F(P_1 - P_2)\tau} \mu k$$

Où:

Q: Quantité d'eau qui traverse l'éprouvette (cm<sup>3</sup>).

H: Hauteur de l'éprouvette (cm).

(P<sub>1</sub> - P<sub>2</sub>): Différence de pressions entre les deux faces de l'éprouvette (bars).

$\tau$  : Temps d'essai (s).

$\mu$  : Viscosité de l'eau.

k: Coefficient qui tient compte du diamètre de l'éprouvette.

F: Section de l'éprouvette (cm<sup>2</sup>).

*Chapitre III*

**Résultats expérimentaux  
et analyses**

# Chapitre III

## *Résultats expérimentaux et analyses*

---

### III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur les éco-composites à base de granulats de caoutchouc traités par une solution de NaOH et non traités, à base de déchets de brique et à base de la combinaison des deux déchets.

Les résultats obtenus sur les éco-composites résineux seront présentés séparément dans le chapitre 4 de ce mémoire.

### III.2 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

#### 2.1. A l'état frais

Pour la formulation des mortiers d'étude, nous avons choisi de préparer des mélanges ayant une consistance plastique comparable, soit un étalement à la table à secousses de l'ordre de  $16 \pm 2$  cm. Ce choix nous permettra une mise en place facile et facilitera la comparaison des caractéristiques à l'état durci des différents mélanges.

Pour atteindre ces consistances plastiques désirées, des quantités de superplastifiant réducteur d'eau (Médaplast SP40) successives ont été ajoutées aux mélanges comme il a été indiqué dans le tableau 2.9 du chapitre 2.

Dans le tableau 3.1 et la figure 3.1 nous avons rassemblé les résultats des mesures de l'étalement pour les différentes formulations de mortier d'étude,

Tableau 3.1: Valeurs d'étalement des mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités et traités par NaOH.

N°	Formulations	Etalements (E) en cm	Moyenne en cm
01	GC0DB0	18.20	16 ± 2
02	GC0DB2.5	16.00	
03	GC0DB5.0	15.10	
04	GC0DB7.5	15.35	
05	GC0DB10	15.15	
06	GC10DB0	16.55	
07	GC20DB0	17.70	
08	GC30DB0	16.30	
09	GCNT10DB0	16.20	
10	GCNT20DB0	16.75	
11	GCNT30DB0	16.50	
12	GC10DB2.5	15.85	
13	GC10DB5.0	15.85	
14	GC10DB7.5	15.70	
15	GC10DB10	14.60	
16	GC20DB2.5	16.35	
17	GC20DB5.0	17.95	
18	GC20DB7.5	16.40	
19	GC20DB10	16.80	
20	GC30DB2.5	16.65	
21	GC30DB5.0	16.20	
22	GC30DB7.5	16.30	
23	GC30DB10	15.70	

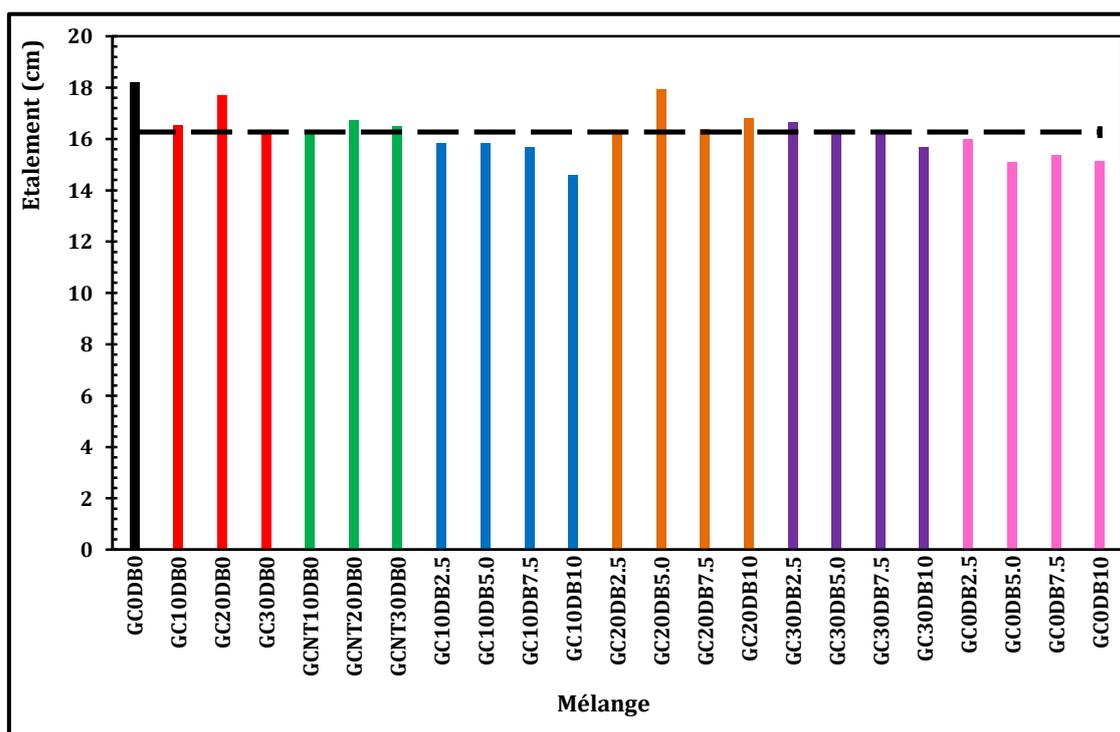


Figure 3.1: Valeurs d'étalement des mortiers d'étude.

Le trait horizontal discontinu représente la moyenne des valeurs expérimentales.

## 2.2. A l'état durci

### 2.2.1. Caractéristiques physiques

#### 2.2.1.1. Masse volumique à sec

Les mesures des masses volumiques sèches ont été effectuées après séchage des éprouvettes dans une étuve régulée, jusqu'à masse constante. L'évolution de la masse volumique sèche pour les différentes séries est illustrée sur la figure 3.2.

Tous les mortiers à base de GC non traités (GCNT10DB0, GCNT20DB0 et GCNT30DB0) subissent des diminutions dans leurs masses volumiques sèches (Figure 3.2a) par rapport au mortier témoin GC0DB0 de l'ordre de 9.00, 12.21 et 16.08% respectivement. Ces valeurs sont toutefois légèrement importantes par rapport aux mortiers à base des granulats de caoutchouc traités (Figure 3.2b). L'étude réalisée par [335] confirme ces résultats.

Si l'on considère l'évolution de la masse volumique sèche des mortiers à base de GC traités (Figure 3.2b), on constate que le mortier à base de GC traités possède la plus faible masse volumique, alors que la plus élevée est celle du mortier avec sable naturel (mortier témoin).

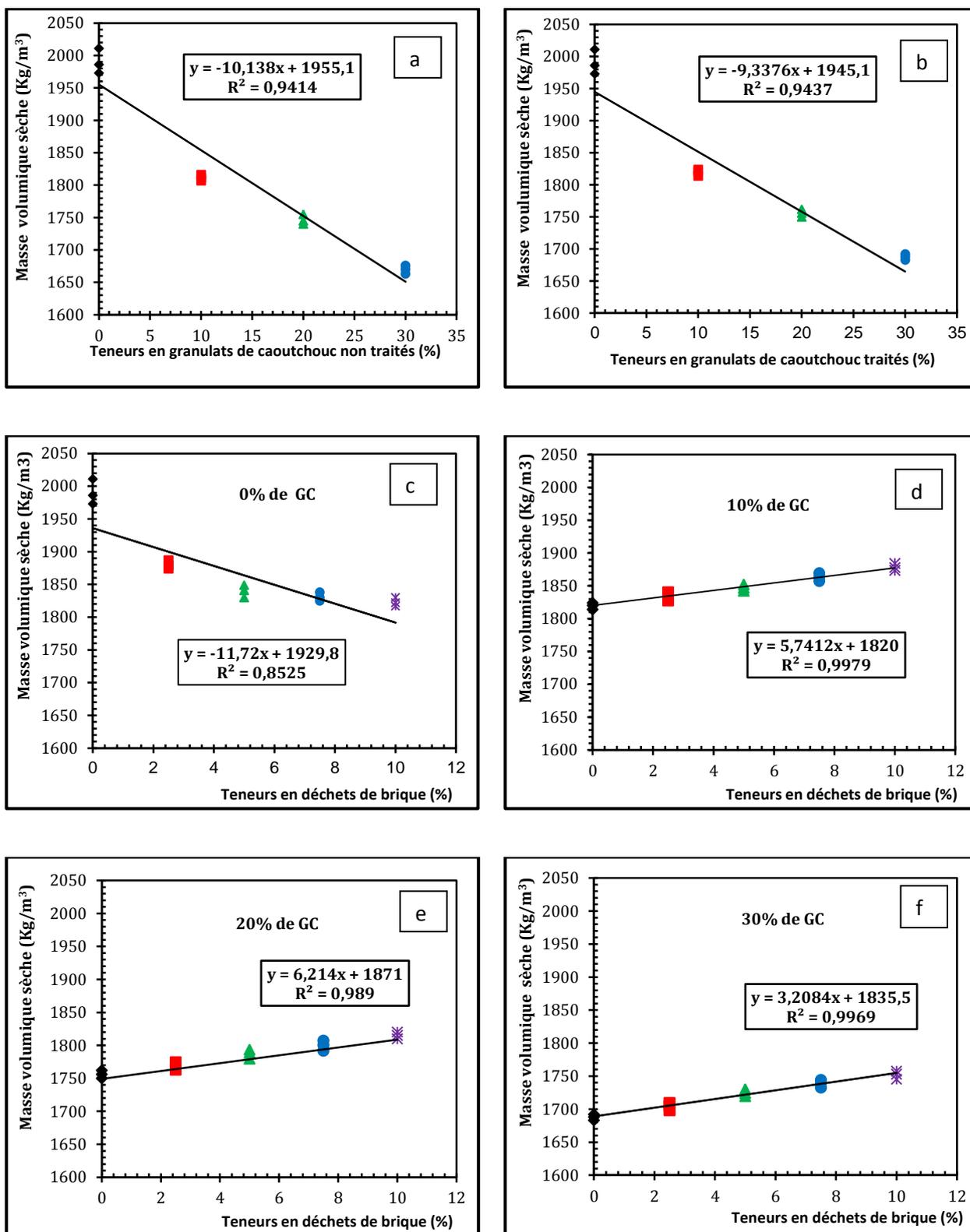
D'après cette même figure, la masse volumique sèche diminue considérablement de  $1990\text{kg/m}^3$  (mortier témoin) à  $1687\text{ kg/m}^3$  avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc traités de 0 à 30%. Cette réduction est de l'ordre de 8.60% pour GC10DB0, 11.75% pour GC20DB0 et 15.22% pour GC30DB0 respectivement par rapport au mortier de référence GC0DB0. La faible masse volumique des granulats de caoutchouc ( $940\text{ kg/m}^3$ ) est le facteur essentiel qui explique cette réduction. L'air occlus entraîné par les GC lors du malaxage est un autre facteur favorisant l'augmentation de la porosité [167] et par conséquent participe à l'allègement des éco-mortiers étudiés. Il est à noter que les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs [156, 336]. Signalons que d'autres auteurs [27, 337] suggèrent que la nature hydrophobe du GC, responsable du piégeage des bulles d'air, participe à l'allègement des composites des GC.

La figure 3.2c présente la relation entre la masse volumique sèche et le taux de déchets de brique incorporé dans les composites. On remarque un allègement systématique des composites en raison de la plus faible densité des DB ( $2500\text{ Kg/m}^3$ ) comparativement à celle du sable naturel substitué ( $2556\text{ Kg/m}^3$ ). Les diminutions enregistrées dans la masse volumique ne sont pas très importantes et sont: 5.52, 7.54, 7.98 et 8.39% par rapport au mortier témoin dont la densité mesurée est de ( $1990\text{ Kg/m}^3$ ). Notons également que des observations similaires ont été signalées dans les travaux de [60].

L'effet combiné des GC et des fillers de DB sur la masse volumique sèche des composites a été évalué expérimentalement et les résultats sont présentés en:

- Figure 3.2d pour un taux de 10% de GC et des taux variables de DB (2.5, 5.0, 7.5 et 10.0%).
- Figure 3.2e pour un taux de 20% de GC et des taux variables de DB (2.5, 5.0, 7.5 et 10.0%).
- Figure 3.2f pour un taux de 30% de GC et des taux variables de DB (2.5, 5.0, 7.5 et 10.0%).

On remarquera, en observant les courbes d'évolution présentées, l'augmentation systématique de la masse volumique sèche quel que soit le taux de GC mis en œuvre. Cette augmentation est pratiquement proportionnelle aux teneurs de DB. Il faut noter l'allègement plus important avec 30% de GC.



**Figure 3.2:** Masse volumique sèche des mortiers en fonction de : a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB.

### 2.2.1.2. Porosité accessible à l'eau

Les résultats des mesures expérimentales réalisées sur des éprouvettes 4×4×16 cm selon la procédure exposée en section 5.2.2 du chapitre 2 et présentés dans les figures 3.3a et 3.3b indiquent globalement une augmentation de la porosité avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc en substitution volumique du sable naturel par rapport au mortier de référence. Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres études menées sur des mortiers à base de GC [308] et sur les bétons caoutchoutés [165, 338, 339].

Concernant les mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités, les résultats sont présentés dans la figure 3.3a. On peut constater que l'augmentation est de l'ordre de 3.24, 5.49 et 6.22% en comparaison avec le mortier de référence pour les taux de GC de 10%, 20% et 30% respectivement.

La figure 3.3b présente l'accroissement de la porosité dans le cas des mêmes mélanges confectionnés avec les granulats de caoutchouc traités. Ceux-ci sont de l'ordre de 2.01, 2.85 et 4.50% en comparaison avec le mortier de référence. Cet accroissement est lié probablement à la nature non polaire des granulats de caoutchouc selon [27, 151], et à l'air occlus piégé au cours du malaxage des mélanges caoutchoutés selon [42]. Ce phénomène génère une porosité à l'interface entre la pâte de ciment et les granulats de caoutchouc. Nous présentons dans le tableau 3.2 qui suit les valeurs de l'air occlus rapportées par Benazzouk [42].

**Tableau 3.2:** Propriétés à l'état frais des composites élaborés [42].

<b>Teneur en caoutchouc (%)</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>
<b>Entraînement d'air (%)</b>	2.8	4.2	6.4	7.7	8.6

On peut constater que les porosités des mortiers à base de GC non traités sont relativement supérieures par rapport à celles des mortiers à base de GC traités.

Cette différence est liée à la plus faible teneur en air occlus dans la zone de transition interfaciale reliant les GC traités au NaOH à la pâte de ciment [340]. Selon [195] ceci est attribué à l'effet hydrophile du traitement par NaOH.

Concernant les mortiers à base de DB seuls, les résultats des porosités accessibles à l'eau sont présentés dans la figure 3.3c. Elles indiquent des porosités de l'ordre de 15.04, 14.94, 14.82 et 14.76% pour des taux de DB de 2.5, 5.0, 7.5 et 10 respectivement, soient des réductions de

l'ordre de 0.46, 1.13, 1.92 et 2.32% respectivement par rapport au mortier de référence GC0DB0.

Cette réduction est due, selon nous, à l'effet filler joué par les DB lors du malaxage des mélanges. Le manque de références bibliographiques rapportant des résultats sur les composites similaires ne nous a permis d'établir des comparaisons utiles.

Lorsque les mélanges sont confectionnés avec une combinaison de GC et des fillers de DB, on constate (voir figures 3.3d, 3.3e et 3.3f) une réduction de porosité par l'augmentation des taux de GC. L'effet filler des DB a été donc prépondérant par rapport à l'effet incorporation des GC.

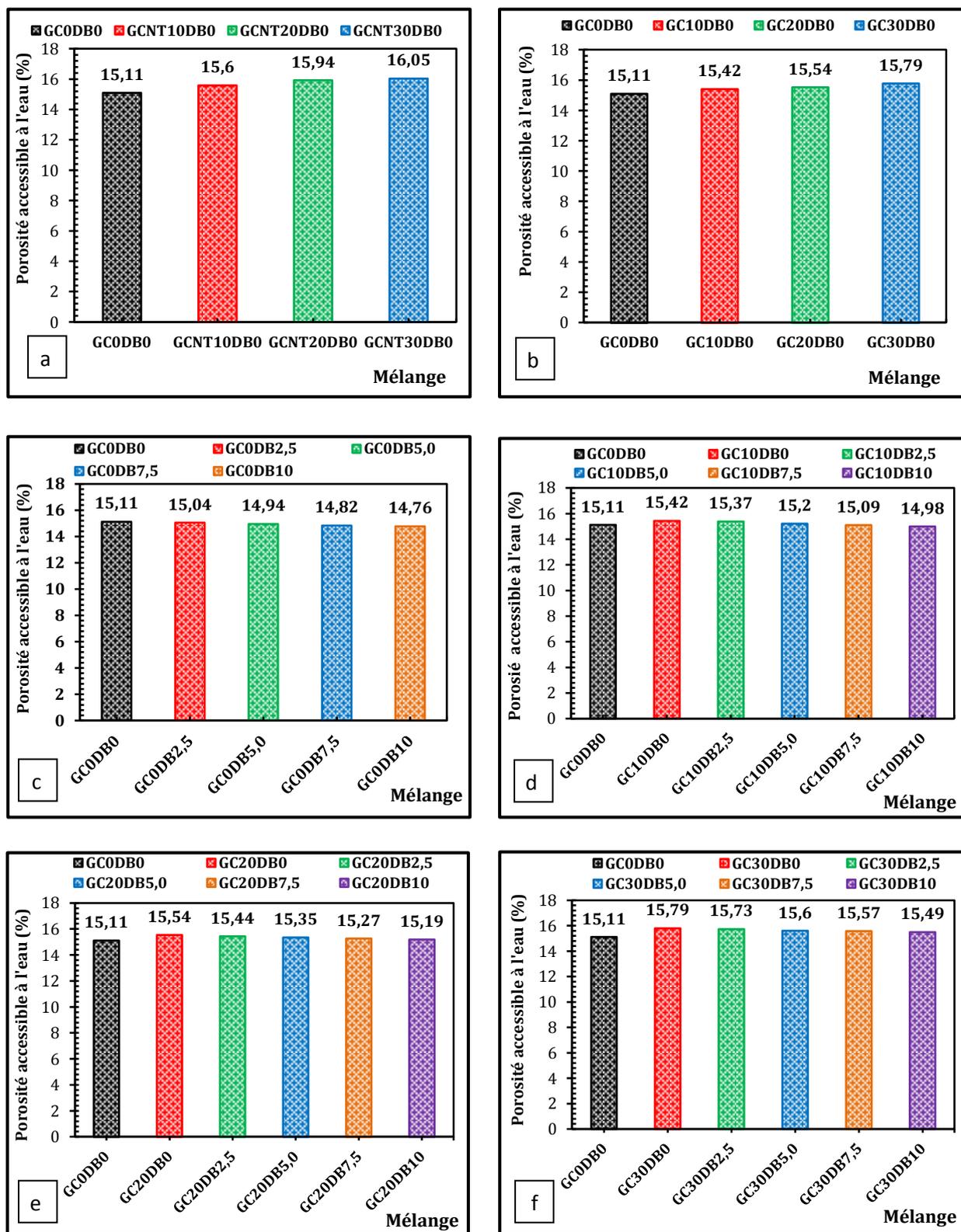


Figure 3.3: Porosité accessible à l'eau des mélanges à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB.

### 2.2.1.3. Absorption d'eau par capillarité

La quantité d'eau absorbée par un matériau composite lors de son immersion dans l'eau pendant une durée déterminée est appelée eau d'absorption. Cette technique est utilisée pour déterminer la susceptibilité aux infiltrations d'eau à travers les pores du composite insaturé lors de l'immersion dans l'eau, celle-ci est affecté par les pores (vides) dans le composite [218].

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par capillarité sur les différents mortiers étudiés sont présentés sous forme de droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps dans la figure 3.4. Il apparaît que l'absorption d'eau "i" des mortiers d'étude (par unité de surface) augmente avec la racine carrée du temps aux différentes échéances.

L'absorption d'eau par capillarité est d'autant plus forte que la proportion des granulats de caoutchouc non traités est élevée malgré la nature hydrophobe des granulats de caoutchouc [341]. D'après la figure 3.4a, une augmentation de l'eau absorbée est observée lorsque le taux de substitution des granulats de caoutchouc non traités est augmenté (10-30%), pour les mortiers GC0DB0, GCNT10DB0, GCNT20DB0 et GCNT30DB0. Les valeurs de l'absorption d'eau  $i$  (après 8 heures d'exposition dans l'eau) sont:  $1.4 \times 10^{-2} \text{m}$ ,  $1.72 \times 10^{-2} \text{m}$ ,  $2.04 \times 10^{-2} \text{m}$  et  $2.27 \times 10^{-2} \text{m}$  respectivement. L'accroissement est de l'ordre de 22.85, 45.71 et 62.14% par rapport au mortier de référence. Cette tendance a été observée par d'autres chercheurs [215, 342]. Cette augmentation de l'absorption d'eau peut être attribuée à la forte porosité des mélanges caoutchoutés. Ce résultat a été confirmé par les tests que nous avons fait subir aux composites étudiés qui ont été exposés dans la section 2.2.1.2 de ce même chapitre. La quantité d'eau absorbée est étroitement liée à la porosité de la structure composite, en plus la faible adhérence entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment, l'apparition des fissures et l'augmentation de l'air occlus dans le mélange, favorisent l'absorption d'eau et rendent le mélange caoutchouté plus sensible aux infiltrations d'eau comparativement avec les mélanges témoins qui sont plus denses absorbant ainsi moins d'eau [218]. On peut constater que les granulats de caoutchouc rendent les mortiers de plus en plus sorptifs, plus l'absorption est élevée plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide en contact.

On observe dans la figure 3.4b la même tendance d'évolution que celle des mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités (Figure 3.3a). Les valeurs de l'absorption d'eau  $i$  obtenues après 8 heures d'exposition dans l'eau sont:  $1.4 \times 10^{-2} \text{m}$ ,  $1.66 \times 10^{-2} \text{m}$ ,  $1.93 \times 10^{-2} \text{m}$  et  $2.18 \times 10^{-2} \text{m}$ . L'accroissement est de l'ordre de 18.57, 37.88, 55.71% par rapport au mortier de référence (GC0DB0), mais les mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités absorbent plus

d'eau, ceci est dû à la plus mauvaise adhérence des GC non traités à la pâte de ciment, par rapport à celle des GC traités par une solution alcaline de NaOH [27, 343].

La courbe de la figure 3.4c tend à prouver que les déchets de brique ralentissent la progression d'eau dans les mortiers, la même tendance a été observée par [267]. Le mortier témoin (GC0DB0) présente une absorption de 1.93, 2.18, 2.37 et 2.5 fois plus forte que celle de GC0DB2.5, GC0DB5.0, GC0DB7.5 et GC0DB10 respectivement et ce après 8 h d'exposition dans l'eau. Ce résultat peut être dû à une diminution de la porosité des mortiers étudiés avec l'introduction progressive des déchets de brique. Bien que cela puisse sembler contradictoire en raison de la capacité d'absorption d'eau plus élevée des fillers de brique [344], cela peut s'expliquer par l'activité pouzzolanique causée par ces matériaux, étant donné que les DB contiennent des teneurs élevées en  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , il est possible selon [345, 346] que celles-ci aient réagi avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pour produire des phases supplémentaires de C-S-H. L'augmentation du volume de ces phases solides, dans la zone occupée par l'eau, provoque une diminution du volume du système de pores capillaires et diminue ainsi l'absorption d'eau par capillarité.

Il est également noté que lorsque les granulats de caoutchouc et les fillers de brique ont été incorporés ensemble dans le mortier avec des différents teneurs, l'absorption d'eau a également été réduite, comme le montre les figures 3.4d, 3.4e et 3.4f. Les réductions obtenues par l'incorporation de 10% GC et différents teneurs de DB (2.5, 5.0, 7.5 et 10.0) sont 2.41, 5.42, 9.46 et 13.37% après une durée d'immersion de 8 heures dans l'eau.

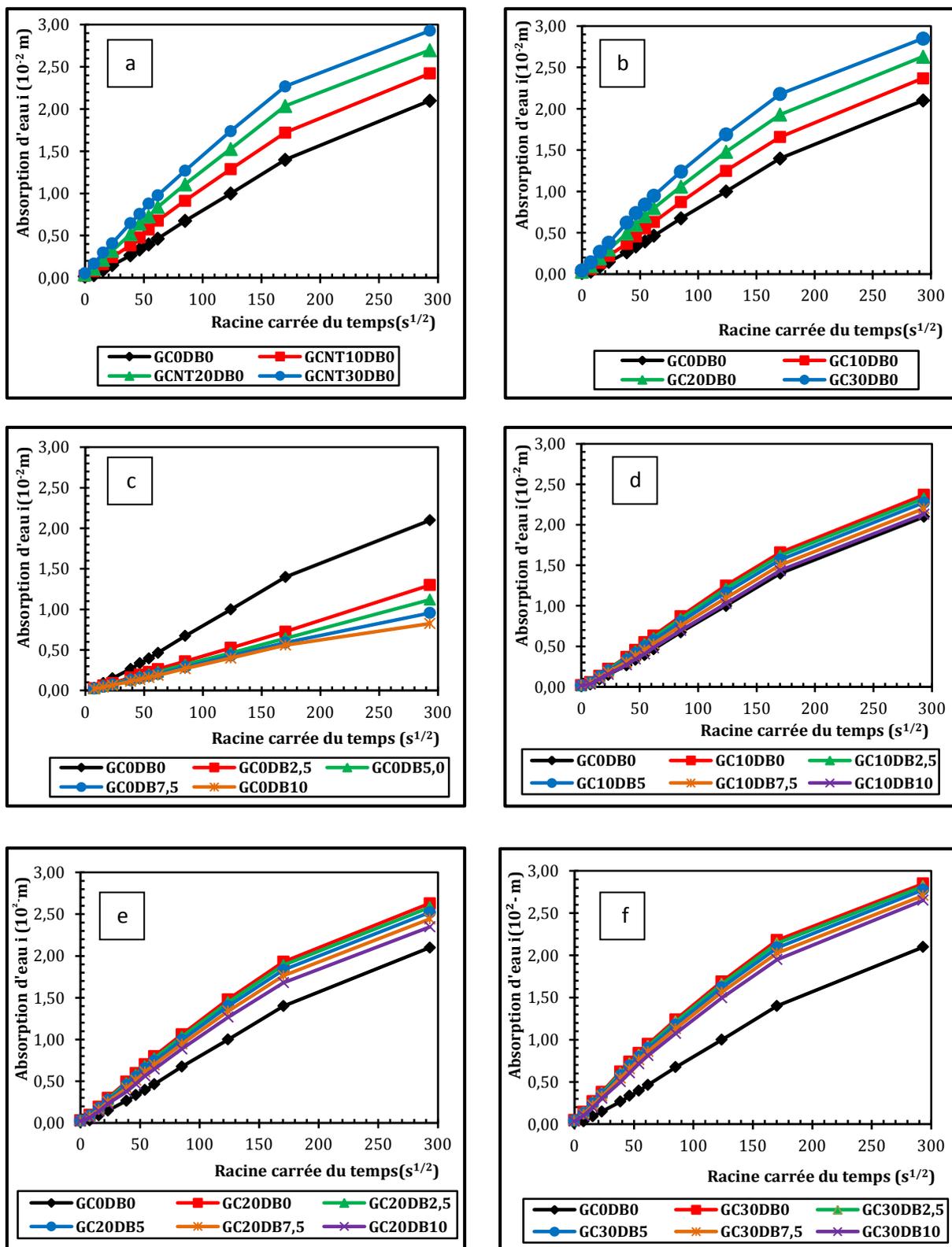
Les mortiers GC20DB2.5, GC20DB5.0, GC20DB7.5 et GC20DB10 présentent des réductions de l'absorption d'eau par remontée capillaire par rapport au mortier avec GC sans déchet de brique, celle-ci sont évaluées à 2.12, 5.01, 8.60 et 12.95%. Les mêmes constatations ont été relevées pour un taux de 30% de GC et des teneurs différentes de déchets de brique, mais les valeurs de diminution sont moins importantes, elles sont de l'ordre: 1.74, 4.08, 6.97 et 10.55%. On peut penser que les fillers de DB ont rempli partiellement les pores capillaires dans la pâte durcie ainsi que les interfaces entre granulats de caoutchouc et matrice cimentaire.

La sorptivité désigne la vitesse d'absorption d'eau par remontée capillaire, elle augmente avec l'augmentation de la proportion des granulats de caoutchouc dans le mortier, l'augmentation dans le cas du mortier GC30DB0 est maximale, ceci montre bien que les granulats de caoutchouc induisent dans la matrice cimentaire une porosité supplémentaire qui elle-même favorise l'absorption d'eau par capillarité, les valeurs de sorptivité sont présentées dans le tableau 3.3 qui suit.

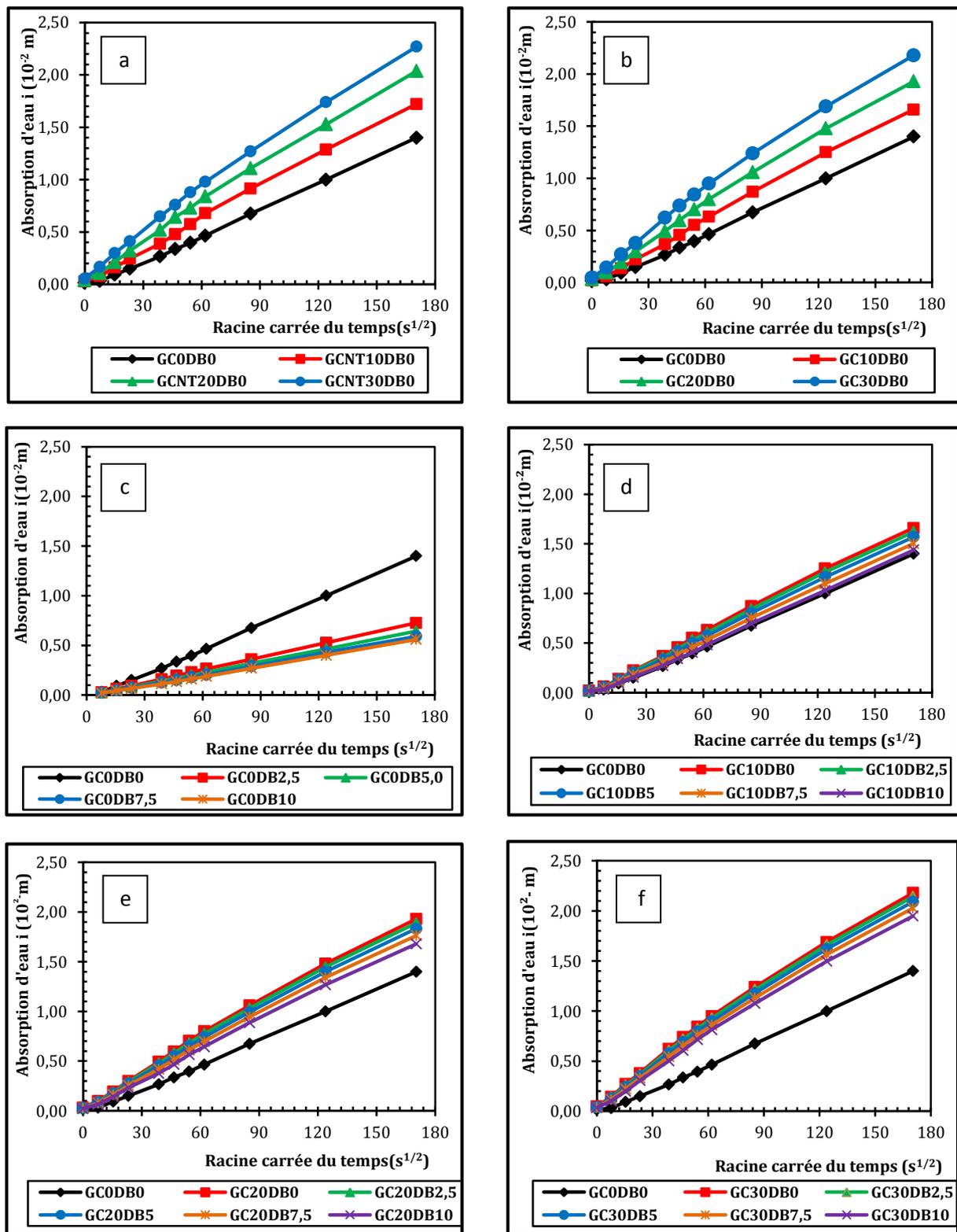
---

Tableau 3.3: Sorptivité des mortiers d'étude.

N°	Formulations	Sorptivité (S) en $\text{kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$
01	GC0DB0	0.0077
02	GC0DB2.5	0.0044
03	GC0DB5.0	0.0039
04	GC0DB7.5	0.0033
05	GC0DB10	0.0030
07	GC10DB0	0.0098
13	GC20DB0	0.0124
19	GC30DB0	0.0140
06	GCNT10DB0	0.0107
12	GCNT20DB0	0.0136
18	GCNT30DB0	0.0154
08	GC10DB2.5	0.0096
09	GC10DB5.0	0.0092
10	GC10DB7.5	0.0089
11	GC10DB10	0.0081
14	GC20DB2.5	0.0121
15	GC20DB5.0	0.0116
16	GC20DB7.5	0.0108
17	GC20DB10	0.0100
20	GC30DB2.5	0.0135
21	GC30DB5.0	0.0131
22	GC30DB7.5	0.0129
23	GC30DB10	0.0125



**Figure 3.4:** Absorption d'eau par capillarité " i " des mortiers en fonction de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB.



**Figure 3.5:** Absorption d'eau par capillarité des mortiers de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB, pendant la période initiale d'exposition à l'eau (jusqu'à 8 heures).

#### 2.2.1.4. Absorption d'eau par immersion totale

Le mortier témoin GC0DB0 présente la plus faible absorption si on se réfère à la figure 3.6 soit 9.98%. En effet les mortiers de GC sont constitués d'une structure poreuse de plus en plus importante. En considérant l'effet séparé des granulats de GC non traités (Figure 3.6a), on peut observer que l'absorption d'eau par immersion totale augmente légèrement avec l'augmentation de la teneur en GC non traités. Les valeurs de l'absorption sont 10.33, 10.89 et 11.32% pour des taux qui varient aussi de 10, 20 et 30%. Ce résultat pourrait être lié aux pores générés par les granulats de caoutchouc en raison de leurs natures non polaire et de leur tendance à piéger l'air en surface. L'air piégé dans le mortier contenant des GC rend le mortier plus poreux, devenant ainsi plus perméable et permettant une absorption accrue d'eau [347].

Les mortiers avec granulats de caoutchouc traités présentent toujours une absorption d'eau par immersion plus faible que les mortiers avec granulats de caoutchouc non traités (Figure 3.6a) Pour les mêmes taux de granulats de caoutchouc (10, 20 et 30%) la différence d'absorption d'eau a été évaluée à 0.15, 0.10, 0.05% respectivement, ceci est lié à la faible adhérence entre la pâte de ciment et les granulats de caoutchouc non traités qui tend à augmenter la porosité dans la matrice, ce qui confirme que le traitement des GC apporte une contribution légèrement positive sur l'absorption totale par diminution de la zone de transition.

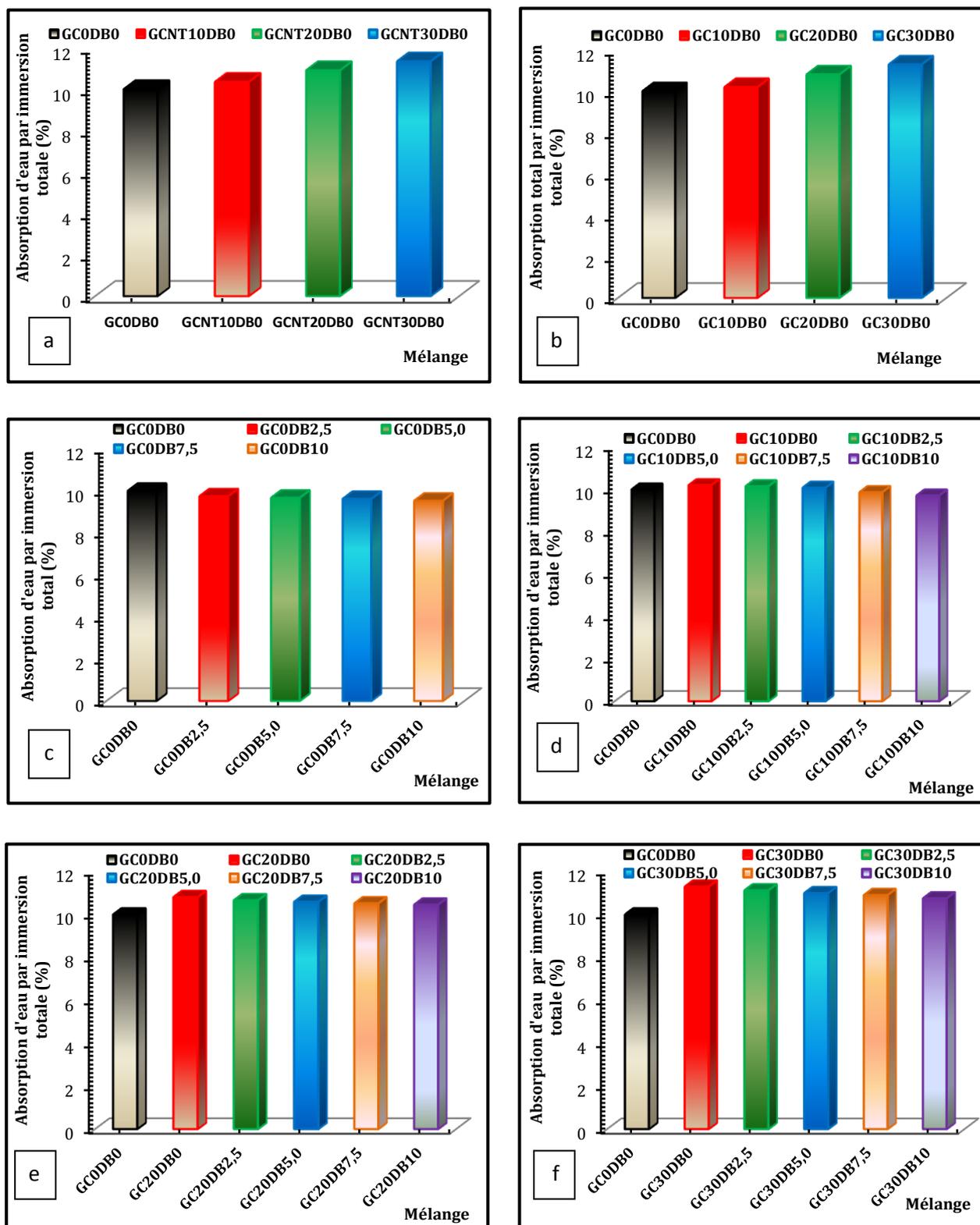
En comparant l'absorption d'eau par immersion totale des mortiers contenant des fillers de brique (Figure 3.6c), on peut observer que l'absorption d'eau diminue légèrement avec l'augmentation de la quantité de DB par rapport au mortier de référence ayant une absorption égale à 9,98%. Des diminutions d'environ 2.16, 3.31, 3.80 et 4.71% pour des teneurs en brique de 2.5, 5.0, 7.5 et 10% respectivement par rapport au mortier sans déchets de brique ont été constatées. La diminution maximale a été obtenue pour l'incorporation maximale de DB (c'est-à-dire 10%), ce résultat était prévisible puisque l'absorption d'eau est liée directement à la porosité.

Les données relatives aux mortiers composés de (GC-DB) présentées dans les figures 3.6d, 3.6e et 3.6f tendent à prouver que les effets séparés des GC et des fillers de brique DB ont été ajoutés. Il est en effet aisément remarquable que la combinaison a conduit à une diminution de l'absorption d'eau par immersion.

La combinaison de 10% de GC avec différentes teneurs en DB donne des réductions de l'absorption égales à 0.49, 1.18, 3.24 et 4.81% respectivement par rapport au mortier GC10DB0.

La combinaison conduit à une diminution de l'absorption d'eau de 1.39, 2.04, 2.68 et 3.24% respectivement pour les mortiers GC20DB2.5, GC20DB5.0, GC20DB7.5 et GC20DB10.0 respectivement par rapport GC20DB0.

Pour les mortiers GC30DB2.5, GC30DB5.0, GC30DB7.5 et GC30DB10.0, on peut constater une diminution de l'absorption de 1.51, 2.66, 3.46 et 4.79% respectivement par rapport au mortier GC30DB0. Cela est attribué à la densification de la structure par l'effet fillers de brique, ainsi qu'à leur pouzzolanité.



**Figure 3.6:** Absorption d'eau par immersion totale des mélanges à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB.

## 2.2.2. Caractéristiques mécaniques

### 2.2.2.1. Résistance à la compression

La figure 3.7 montre l'évolution de la résistance à la compression des mortiers d'étude à différents âges et à différents dosages de GC et DB. Il est constaté pour tous les mélanges un développement dans cette caractéristique dans le temps en raison de la poursuite de la cristallisation du ciment (durcissement).

L'incorporation des granulats de caoutchouc non traités réduit la résistance à la compression d'une façon considérable avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc comme le montre la figure 3.7a; les résistances les plus faibles sont obtenues avec la composition GC30DB0. L'ensemble des valeurs à 30 jours s'inscrivent dans un fuseau borné par des résistances de 49.92, 35.58, 26.62, 18.90 MPa pour les composites GC0DB0, GCNT10DB0, GCNT20DB0 et GCNT30DB0 respectivement, soient des diminutions de 28.73%, 46.6%, 62.14% par rapport au mortier de référence. A l'âge de 90 jours; les résistances à la compression croissent à cause du durcissement du ciment pour tous les taux de GC mais la résistance conventionnelle à 28 jours du mortier de référence n'a pas été atteinte. Il en est de même aux âges de 180 et 270 j.

Nous devons noter que cette caractéristique est affaiblie par l'introduction progressive des GC non traités à tous les âges. A titre d'exemple, à l'âge de 270 jours (9 mois) et en comparaison avec la résistance du mortier de référence GC0DB0 (56.93 MPa), celle de GCNT10DB0, GCNT20DB0 et GCNT30DB0 étaient de 40.22, 34.74 et 22.10 MPa respectivement, ce qui représente une chute de 29.35, 38.98 et 61.19% respectivement. Cette chute de résistance peut s'expliquer par un développement important de la porosité en présence des GC non traités ainsi qu'à la faible adhérence entre la matrice de ciment et les GC [32]. Ces défauts d'adhérence constituent des points faibles d'où les fissures sous sollicitations mécaniques pourront être initiées [121, 348]. Une autre explication couramment avancée notamment par [169] est la rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels. Comme conséquence, l'utilisation des GC dans le béton n'est pas recommandable pour les travaux majeurs [335] en raison de leurs effets préjudiciables vis-à-vis de la résistance à la compression.

En ce qui concerne les résistances des mortiers incorporant les granulats de caoutchouc traités (Figure 3.7b), on a pu relever des écarts de résistance de: 12.40, 20.49 et 30.84 MPa pour 30 j, des écarts de l'ordre de 13.00, 19.97 et 31.48 MPa pour 90 j, 13.69, 20.30 et 32.99 MPa pour 180 j et à l'âge de 270 jours les écarts enregistrés sont: 14.67, 21.14 et 34.04 MPa pour les mortiers GC10DB0, GC20DB0 et GC30DB0 respectivement par rapport au mortier GC0DB0.

Les pertes de résistance à la compression sont de 24.84%, 41.04% et 61.78% à 30 j, 24.93, 38.41 et 60.52% à 90 j, 24.49, 37.00 et 60.13% à 180 j et 25.00, 37.11 et 59.78% à 270 j.

La résistance mécanique des mortiers caoutchoutés est principalement affectée par la texture et la rigidité des granulats de caoutchouc selon O. Youssef [349]; la texture relativement lisse des GC entraîne une faible liaison avec la matrice cimentaire. Le traitement des GC par la solution alcaline de l'hydroxyde de sodium (NaOH) a donc contribué effectivement à une légère augmentation de la résistance à la compression des mortiers étudiés si l'on considère les différences de résistance mentionnés dans le tableau 3.4 qui suit. Selon les mêmes auteurs [349] les GC traités ont subi des modifications considérables dans la rugosité de leurs surfaces extérieures, ce qui a entraîné une adhérence accrue avec la matrice cimentaire environnante.

Tableau 3.4: Amélioration des résistances à la compression des mortiers élaborés avec GC traités au NaOH.

Mortiers	Résistances (MPa)				Différences (%)			
	30 j	90 j	180 j	270 j	30 j	90 j	180 j	270 j
<b>GCNT10DB0</b>	35.58	36.13	38.03	40.22	<b>5.45</b>	<b>8.08</b>	<b>8.25</b>	<b>5.10</b>
<b>GC10DB0</b>	37.52	39.05	41.17	42.27				
<b>GCNT20DB0</b>	26.62	30.82	33.77	34.74	<b>10.56</b>	<b>3.96</b>	<b>2.34</b>	<b>3.05</b>
<b>GC20DB0</b>	29.43	32.04	34.56	35.80				
<b>GCNT30DB0</b>	18.90	20.28	21.03	22.10	<b>0.95</b>	<b>1.28</b>	<b>3.99</b>	<b>3.62</b>
<b>GC30DB0</b>	19.08	20.54	21.87	22.90				

On peut noter que les différences de résistances sont globalement aléatoires.

La figure 3.8 montre l'influence du taux de DB substitué au sable naturel sur la variation des résistances à la compression des mortiers dans le temps (30, 90, 180 et 270 jours). On peut constater qu'à l'âge de 30 jours, elles diminuent progressivement jusqu'à atteindre le taux de 5% de DB constituant un pic inférieur, puis remontent jusqu'au taux de 10% de DB. L'itinéraire suivi est: 49.92 MPa (pour GC0DB0) - 40.37 MPa (pour GC0DB5.0) - 43.37 MPa (pour GC0DB10). La résistance à la compression du mortier de référence (GC0DB0) reste la plus élevée. Par ailleurs il n'existe pas de symétrie dans cette évolution. L'observation de la figure 3.8 révèle qu'à l'exception de l'évolution de la résistance à la compression à 90 jours entre GC0DB0 et GC0DB2.5 (chute de 52.02 MPa à 50.27 MPa), les résistances à la compression de tous les mélanges et à tous les âges sont en progression. A titre d'exemple

chiffré,  $R_{C270} (GC0DB0) = 56.93 \text{ MPa} < R_{C270} (GC0DB2.5) = 59.22 \text{ MPa} < R_{C270} (GC0DB5.0) = 62.00 \text{ MPa} < R_{C270} (GC0DB7.5) = 66.82 \text{ MPa} < R_{C270} (GC0DB10) = 69.70 \text{ MPa}$ . Cette évolution a été notée dans les travaux réalisés par [350] et a été expliquée par l'effet fillers des DB par [344]; cet effet a comme conséquence une augmentation de la compacité des mélanges. Nous pouvons penser que la progression des  $R_c$  dans le temps est due à la réaction pouzzolanique entre le CH libre et les DB qui est plus forte à long terme. La résistance à la compression du mortier de référence a été dépassée à partir de 3 mois pour les taux de 5.0, 7.5 et 10% de DB.

La figure 3.9 présente les valeurs des résistances à la compression des mortiers confectionnés avec une combinaison de DB et de GC. Ces résultats montrent l'effet de l'incorporation des fillers de DB sur les résistances des mortiers à base de GC seuls dans le temps. L'introduction des granulats de caoutchouc et fillers de brique combinés (10, 20 et 30% GC) et (2.5, 5.0, 7.5 et 10% DB) favorise l'amélioration des résistances en comparaison avec celle du mortier de GC sans déchets de brique (Figures 3.9a, 3.9b et 3.9c) aux différents âges 30, 90, 180 et 270 jours.

Nous devons noter à partir des valeurs des histogrammes des figures 3.9a, 3.9b et 3.9c:

- Les valeurs des résistances des mortiers de référence (GC0DB0) aux différents âges n'ont jamais été atteintes quelque soient les taux de GC et de DB combinés mis en œuvre. C'est la conséquence de l'effet négatif des GC.
- L'effet des fillers de DB est favorable vis-à-vis de la résistance quelque soit le taux de GC mis en œuvre et à tous les âges. Le taux le plus fort de fillers de DB engendre les résistances les plus élevées. A titre d'exemple, à l'âge de 270 jours (9 mois) et pour le taux moyen de GC (20%) combiné à tous les taux de DB on relève les valeurs de:  
 $R_{C270} (GC20DB0) = 35.80 \text{ MPa} < R_{C270} (GC20DB2.5) = 36.49 \text{ MPa} < R_{C270} (GC20DB5.0) = 38.85 \text{ MPa} < R_{C270} (GC20DB7.5) = 40.97 \text{ MPa} < R_{C270} (GC20DB10) = 42.17 \text{ MPa}$ . Soient des améliorations de l'ordre de 1.93, 8.52, 14.44 et 17.79%.
- On note que l'amélioration des résistances à l'âge de 270 jours des mortiers avec 10% de GC est la plus importante quelque soit le taux de DB mis en œuvre.

Les constatations précitées ont été notées par [308] lorsqu'ils ont substitué le sable naturel par des fillers calcaires et des fillers siliceux dans un mortier à base de granulats de caoutchouc. En effet avec 1% de substitution, ils ont noté une amélioration dans les résistances mécaniques des mortiers fillérisés sans toutefois atteindre les résistances mécaniques du mortier de référence. L'effet filler est la principale explication fournie par les auteurs.

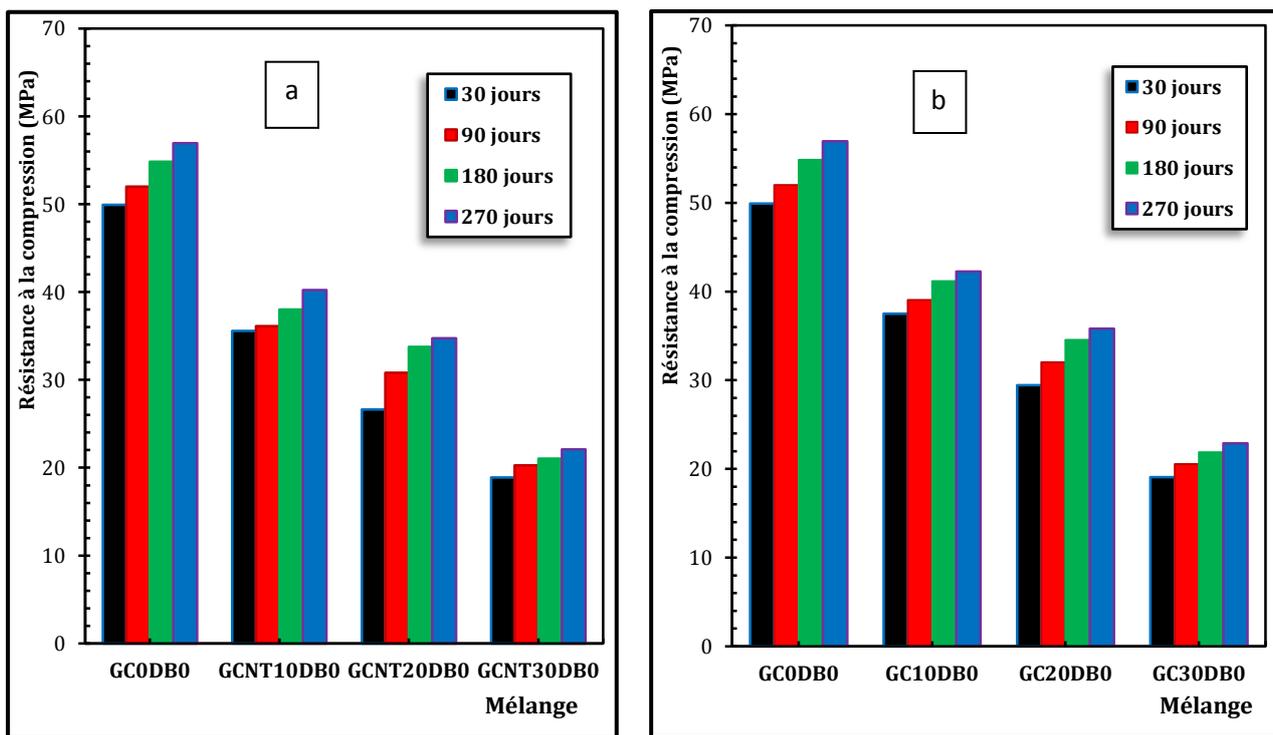


Figure 3.7: Résistance à la compression des mélanges à base de a) GC non traités, b) GC traités.

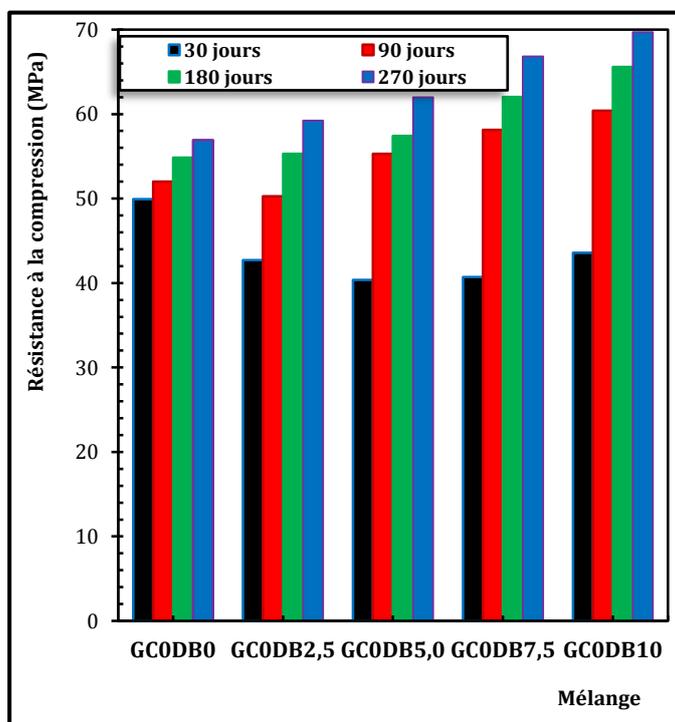


Figure 3.8: Résistance à la compression des mélanges à base de fillers de DB.

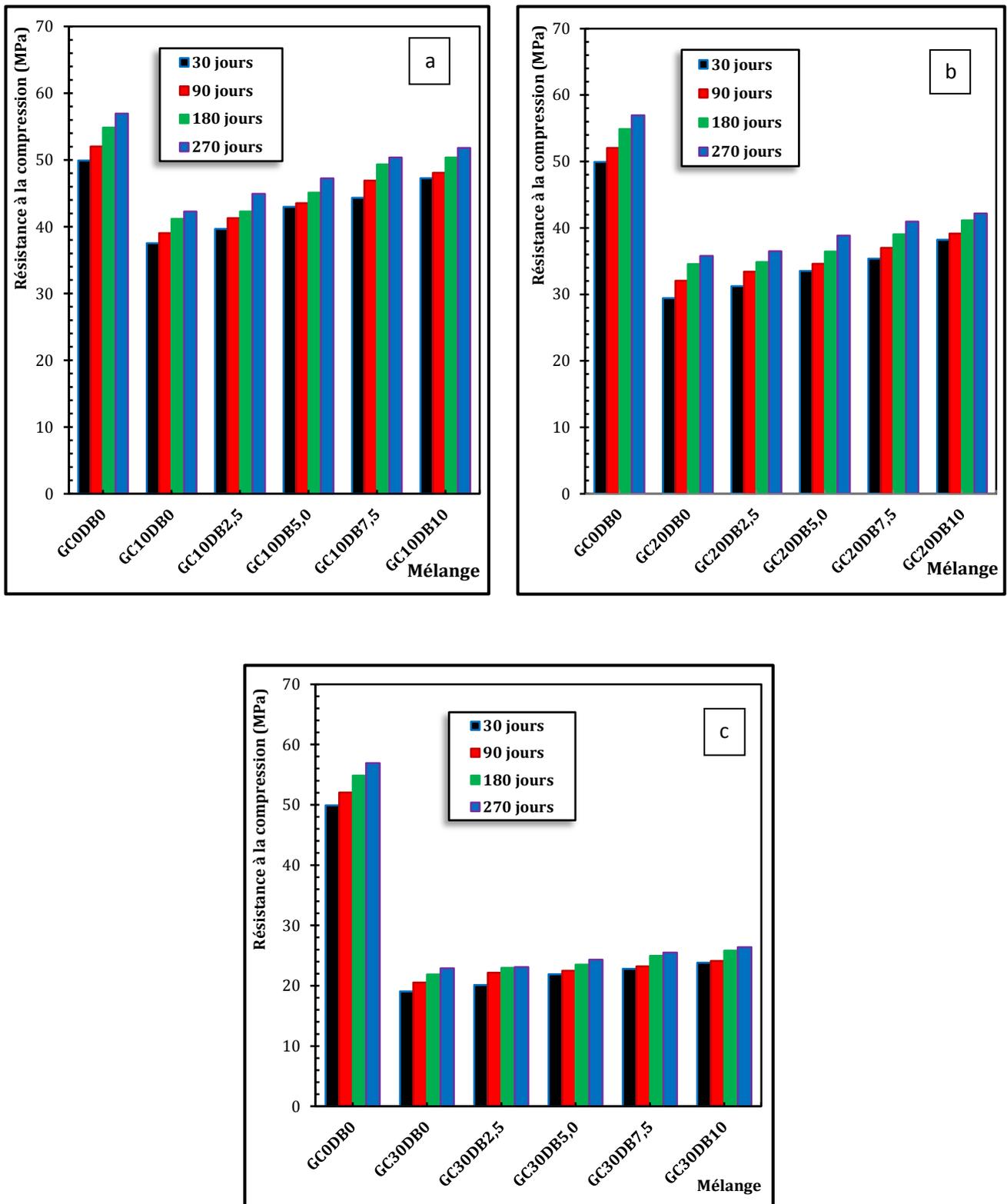


Figure 3.9: Résistance à la compression des mélanges à base de a) combinaison des GC traités (10%) et DB, b) combinaison des GC traités (20%) et DB, c) combinaison des GC traités (30%) et DB.

### 2.2.2.2. Résistance à la flexion

A partir des résultats d'essais regroupés dans les histogrammes de la figure 3.10 ci-après, nous constatons que le comportement à la flexion des éprouvettes est globalement peu différent de son comportement à la compression, l'écart de résistance en flexion entre les différents mélanges est assez faible par rapport à celui observé en compression.

Dans le cas des mortiers élaborés avec GCNT, une chute systématique de résistance à la flexion a été observée avec l'augmentation du taux de GC (Figure 3.10a) à tous les âges. Les valeurs expérimentales extrêmes obtenues sont:

- 8.70 MPa pour GC0DB0 et 2.40 MPa pour GCNT30DB0 à 30 jours.
- 9.21 MPa pour GC0DB0 et 3.03 MPa pour GCNT30DB0 à 90 jours.
- 11.11 MPa pour GC0DB0 et 4.93 MPa pour GCNT30DB0 à 180 jours.
- 12.40 MPa pour GC0DB0 et 6.30 MPa pour GCNT30DB0 à 270 jours.

On note également que ces chutes systématiques diminuent dans le temps par rapport aux mortiers de références et demeurent plus importantes avec l'augmentation du taux de GCNT.

Dans le cas des mortiers élaborés avec GC traités, on observe les mêmes tendances de chute sauf que les résistances de ces mortiers sont systématiquement supérieures à celles avec GCNT à tous les âges (Figure 3.10b).

Les résultats de la figure 3.11 montrent que les déchets de brique jouent un rôle important dans l'accroissement de la résistance à la flexion à tous les âges. Mis à part le comportement des éco-mortiers étudiés à 30 jours dont les résistances chutent jusqu'au taux de 5% de DB en comparaison avec GC0DB0, le reste des éco-mortiers subissent également des chutes de résistances jusqu'au taux de 2.5% seulement pour ensuite gagner en résistance (à 90, 180 et 270 jours).

Ce gain de résistance est dû selon [351] à la forte activité pouzzolanique des DB qui prend place très rapidement et vient consommer la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  produite par l'hydratation du ciment. Il serait dû également à l'effet fillers de DB qui par leurs granulométrie fines rendent la pâte plus homogène et plus compacte.

Cette tendance de comportement (courbe variable) a été observée par [237] qui a travaillé sur un éco-composite à base de DB en remplacement au sable naturel.

---

Un autre résultat remarquable est celui des résistances acquises à long terme (au-delà de 3 mois) pour les éco-mortiers de 5% de DB et plus, qui ont dépassé celles des mortiers de référence (GC0DB0). A titre d'exemple:  $R_{f270}(GC0DB0) = 12.4\text{MPa}$ ,  $R_{f270}(GC0DB7.5) = 13.70\text{MPa}$ , soit une différence de 10.48%.

Les résultats d'essais sur les éprouvettes de mortiers contenant la combinaison des GC et des fillers de DB sont illustrés dans les figures 3.12a, 3.12b et 3.12c. Ils montrent qu'il y'a une amélioration de la résistance à la flexion du mortier par rapport aux mortiers avec GC seuls à tous les taux croissants de DB et à tous les âges (en raison de l'effet fillers de DB). A titre d'exemple: les gains enregistrés à 270 jours pour un taux moyen de 20% de GC sont: 5.68, 9.09, 13.34 et 18.18% par rapport au mortier GC20DB0.

Malgré l'amélioration des résistances à la flexion par incorporation des fillers de DB à tous les taux étudiés, les résistances des mortiers de référence n'ont pas été atteintes.

### **2.2.2.3. Mode de rupture en flexion**

Les figures 3.13 à 3.19 montrent les modes de rupture des éprouvettes soumises à la charge de flexion. On a pu observer ce qui suit:

- Une rupture fragile correspondant à un comportement élastique sur les éprouvettes du mortier de référence GC0DB0 (Figure 3.13) et sur celles du mortier à base de DB seuls GC0DB2.5, GC0DB5.0, GC0DB7.5 et GC0DB10 (Figure 3.14).
- Une rupture ductile après une déformation plastique (densification des microfissures) sur les éprouvettes de mortier à base de GC non traités (Figure 3.15) et GC traités (Figure 3.16) pour les taux étudiés de 10, 20 et 30%. Les microfissures sont plus denses sur les éprouvettes de plus faibles taux de GC.
- Une rupture intermédiaire (entre fragile et ductile) alliant les deux types de comportement sur les éprouvettes à base des combinaisons GC et DB à tous les taux étudiés. La rupture brutale a eu lieu après déformation des éprouvettes (Figure 3.17, 3.18 et 3.19).

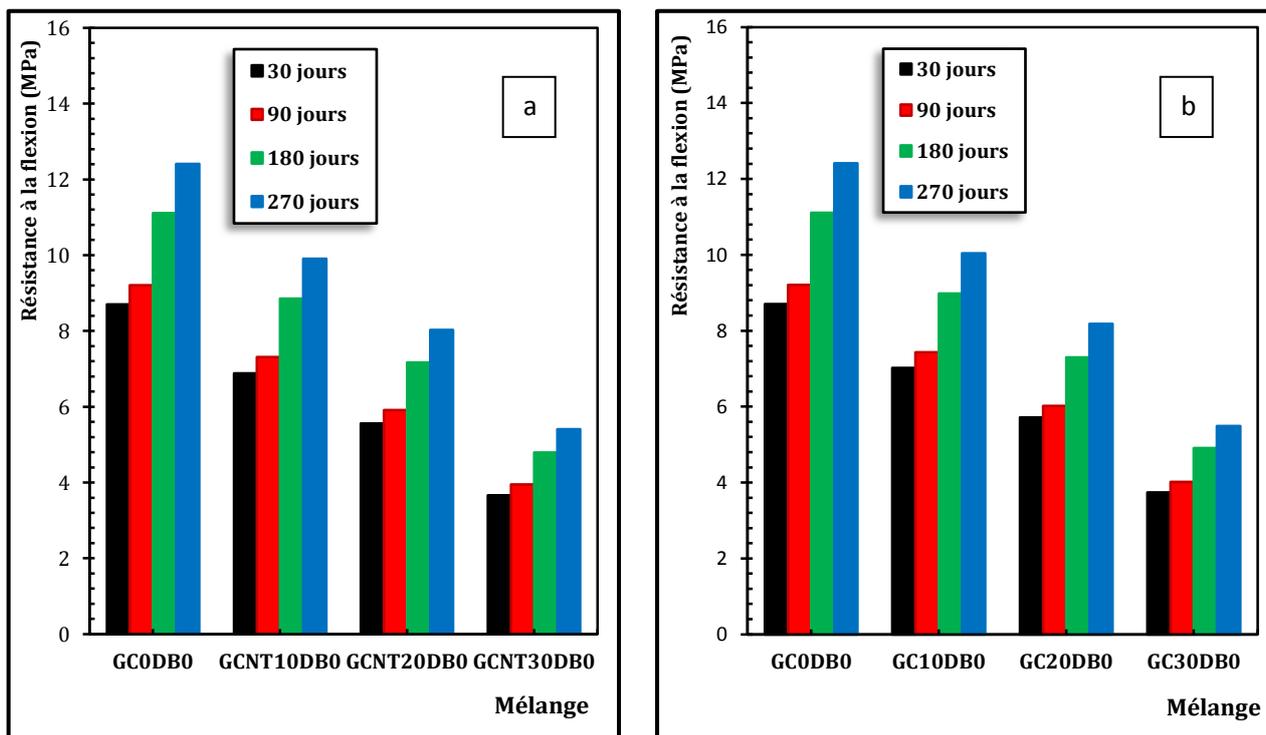


Figure 3.10: Résistance à la flexion des mélanges à base de a) GC non traités, b) GC traités.

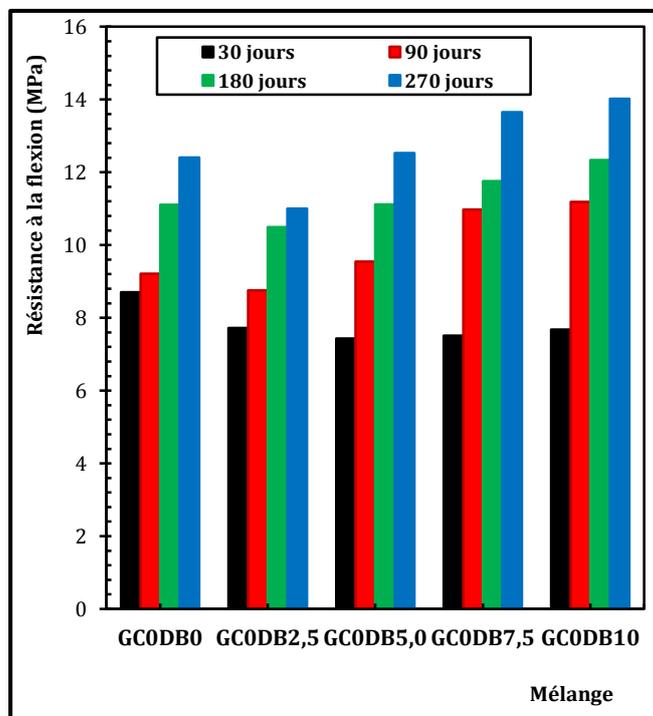
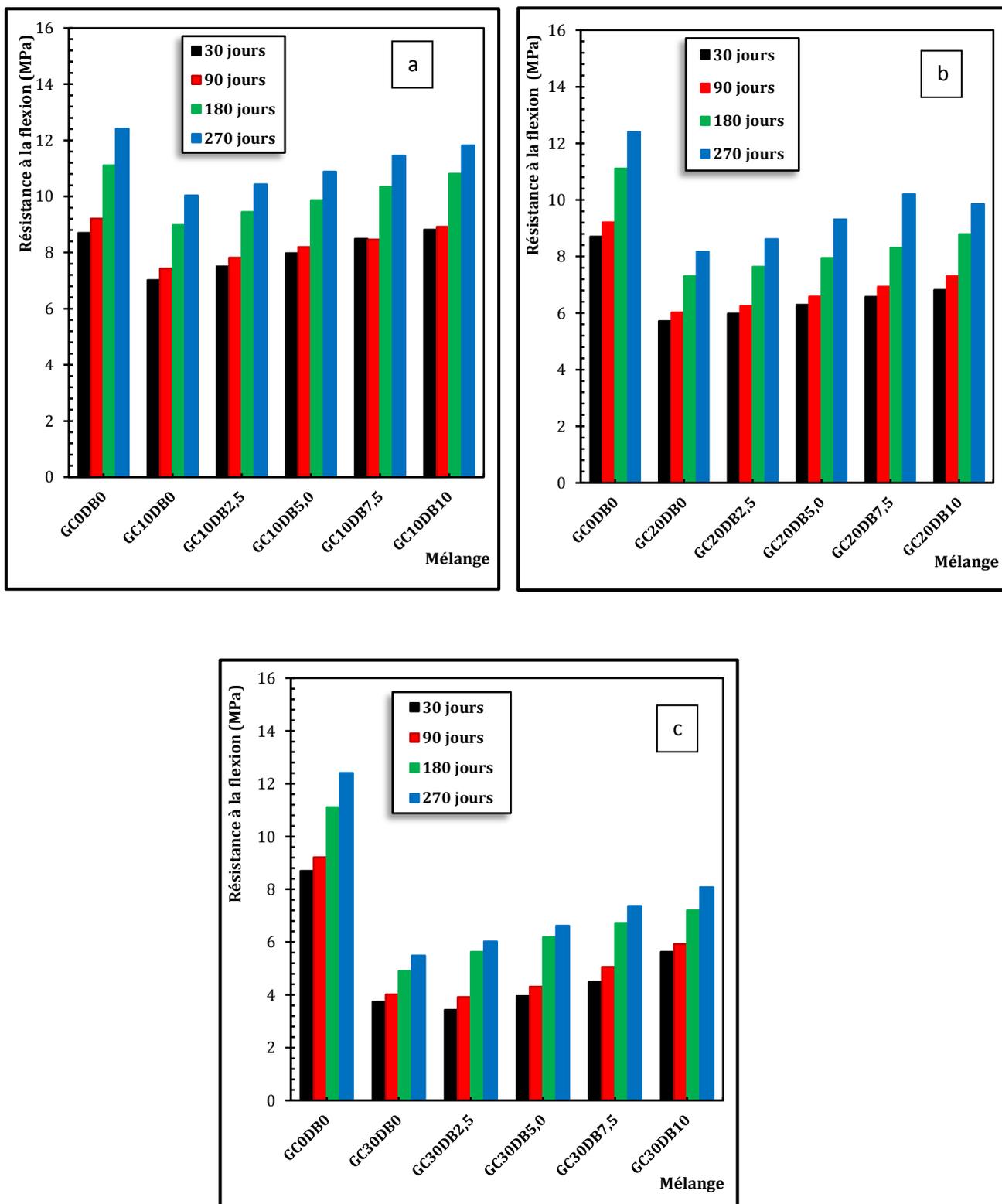


Figure 3.11: Résistance à la flexion des mélanges à base de fillers de DB.



**Figure 3.12:** Résistance à la flexion des mélanges à base de a) combinaison des GC traités (10%) et DB, b) combinaison des GC traités (20%) et DB, c) combinaison des GC traités (30%) et DB.



Figure 3.13: Mode de rupture du mortier de référence.



Figure 3.14: Mode de rupture des mortiers à base des déchets de brique (2.5-10%).



Figure 3.15: Mode de rupture des mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités.



Figure 3.16: Mode de rupture des mortiers à base de granulats de caoutchouc traités.



Figure 3.17: Mode de rupture des mortiers à base des GC traités (10%) et DB (2.5-10%).



Figure 3.18: Mode de rupture des mortiers à base des GC traités (20%) et DB (2.5-10%).



Figure 3.19: Mode de rupture des mortiers à base des GC traités (30%) et DB (2.5-10%).

#### 2.2.2.4. Vitesse de propagation des ultrasons et module d'élasticité dynamique

Dans la figure 3.20 qui suit, nous avons présenté l'ensemble des résultats des essais expérimentaux réalisés sur les éco-mortiers étudiés à l'âge de 30 jours. L'évolution des vitesses de propagation des impulsions ultrasonores a été examinée en fonction du taux de GC (traités et non traités), du taux de DB et de la combinaison des deux. Les observations suivantes peuvent être relevées:

- La vitesse moyenne de 3 mesures des ultrasons sur les éprouvettes à base de GC non traités est en nette diminution (Figure 3.20a). Elle est de l'ordre de 3382m/s pour le taux de GCNT de 10%, de l'ordre de 2866 m/s pour le taux de GCNT de 20% et 2664 m/s pour le taux de 30%. Cette diminution est dûe aux difficultés de compactage des mélanges contenant un volume plus élevé de granulats de caoutchouc qui engendre une porosité plus élevée [201]. Ce phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans la matrice. Les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la pâte de ciment. Ce qui augmente le temps de propagation de l'onde ultrasonore et réduit ainsi sa vitesse de propagation. Ces résultats montrent que le composite à base de caoutchouc présente des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations [42, 153].
- Ces vitesses de propagation des ultrasons sont plus élevées lorsqu'il s'agit d'éprouvettes à base de GC traités (Figure 3.20b). L'explication réside dans le fait que les GC traités devenus moins hydrophobes, réduisent la porosité dans la matrice cimentaire caoutchouté d'où la hausse de la vitesse de propagation des ultrasons enregistrée. Le gain en vitesse de propagation dû au traitement de GC par la solution de soude (NaOH) est de l'ordre de 2.39%, 2.96% et 2.44% pour GC10DB0, GC20DB0 et GC30DB0 respectivement.
- Concernant les vitesses ultrasoniques relevées sur les éco-mortiers à base de DB seuls, elles sont en nette progression avec l'augmentation du taux de DB mis en œuvre (Figure 3.20c). L'effet fillers est, selon nous, la principale raison de cette augmentation. La porosité des mélanges confectionnés est en relation avec la vitesse de propagation si l'on se réfère aux valeurs du tableau 3.5 suivant.

Tableau 3.5: Relation porosité-vitesse de propagation ultrasonique.

Mélange	Porosité (%)	Vitesse ultrasonore (m/s)
<b>GC0DB2.5</b>	15.04	3619
<b>GC0DB5.0</b>	14.94	3652
<b>GC0DB7.5</b>	14.82	3686
<b>GC0DB10</b>	14.76	3739

Les figures 3.20d, 3.20e et 3.20f montrent l'évolution des vitesses de propagation des éco-mortiers à base de la combinaison des GC traités et des DB. Les éco-mortiers produits possèdent tous des vitesses ultrasoniques légèrement supérieures à celles des éco-mortiers avec GC seuls. Les différences sont de :

- 0.37, 1.55, 3.06 et 4.82% pour les éco-mortiers de faible taux de GC (10%) et des taux de DB de 2.5, 5.0, 7.5 et 10% respectivement.
- 2.16, 4.27, 5.93 et 7.32% pour les éco-mortiers de moyen taux de GC (20%) et des taux de DB de 2.5, 5.0, 7.5 et 10% respectivement.
- 1.94, 3.08, 4.29 et 4.95% pour les éco-mortiers de taux élevé de GC (30%) et des taux de DB de 2.5, 5.0, 7.5 et 10% respectivement.

Lorsque les résultats sont comparés, il semble que les valeurs sont toutes proches les unes des autres, ce qui confirme que l'incorporation des fillers de brique induit une faible augmentation de la vitesse de propagation d'ultrasons avec les différents taux de GC et DB étudiés.

Afin de comparer l'effet des GC (traités et non traités) sur la vitesse de propagation ultrasonique par rapport au mortier de référence (GC0DB0), nous mettons dans le tableau 3.6 les valeurs de toutes les vitesses ultrasoniques enregistrées.

On peut constater que les vitesses de propagation de tous les mélanges sont inférieures à celle du mortier de référence (GC0DB0) et que les mélanges contenant le plus de DB présentent les différences les plus faibles. Par ailleurs pour les mélanges GC0DB7.5 et GC0DB10, les différences sont positives et les vitesses de propagation dépassent celle de GC0DB0. L'amélioration des porosités due à l'effet fillers des DB peut expliquer en partie cette différence. En effet nous rappelons les valeurs de porosité: - GC0DB0: 15.11% - GC0DB7.5: 14.82% - GC0DB10: 14.76%.

Tableau 3.6: Valeurs des vitesses de propagation et leur différence par rapport au mortier de référence.

N°	Mortier	Vitesse de propagation (m/s)	Différence/GC0DB0 (%)
01	GC0DB0	3670	±0.00
02	GC0DB2.5	3619	-1.41
03	GC0DB5.0	3652	-0.49
04	GC0DB7.5	3686	+0.43
05	GC0DB10	3739	+1.88
06	GC10DB0	3462	-6.01
07	GC20DB0	2951	-24.36
08	GC30DB0	2729	-34.48
09	GCNT10DB0	3382	-7.85
10	GCNT20DB0	2866	-28.05
11	GCNT30DB0	2664	-37.76
12	GC10DB2.5	3475	-5.61
13	GC10DB5.0	3516	-4.38
14	GC10DB7.5	3568	-2.86
15	GC10DB10	3629	- 1.13
16	GC20DB2.5	3015	-21.72
17	GC20DB5.0	3077	-19.27
18	GC20DB7.5	3126	-17.40
19	GC20DB10	3167	-13.70
20	GC30DB2.5	2782	-31.92
21	GC30DB5.0	2813	-30.46
22	GC30DB7.5	2846	-28.95
23	GC30DB10	2864	-21.96

Ce module est relié au carré de la vitesse de propagation des ultrasons par la relation:

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

Pour un éco-mortier donné, on peut écrire  $E_{\text{dyn}} = KV^2$

$$K = \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} = \text{constate positive}$$

Donc la variation du module d'élasticité dynamique  $E_{\text{dyn}}$  est la même que celle des vitesses de propagation des ultrasons examinées au paragraphe précédent et ce, pour les mêmes raisons indiqués dans ce paragraphe. Nous présentons dans la figure 3.21 les modules  $E_{\text{dyn}}$  calculés pour l'ensemble des mélanges. Le module d'élasticité dynamique du mortier de référence a été également incorporé.

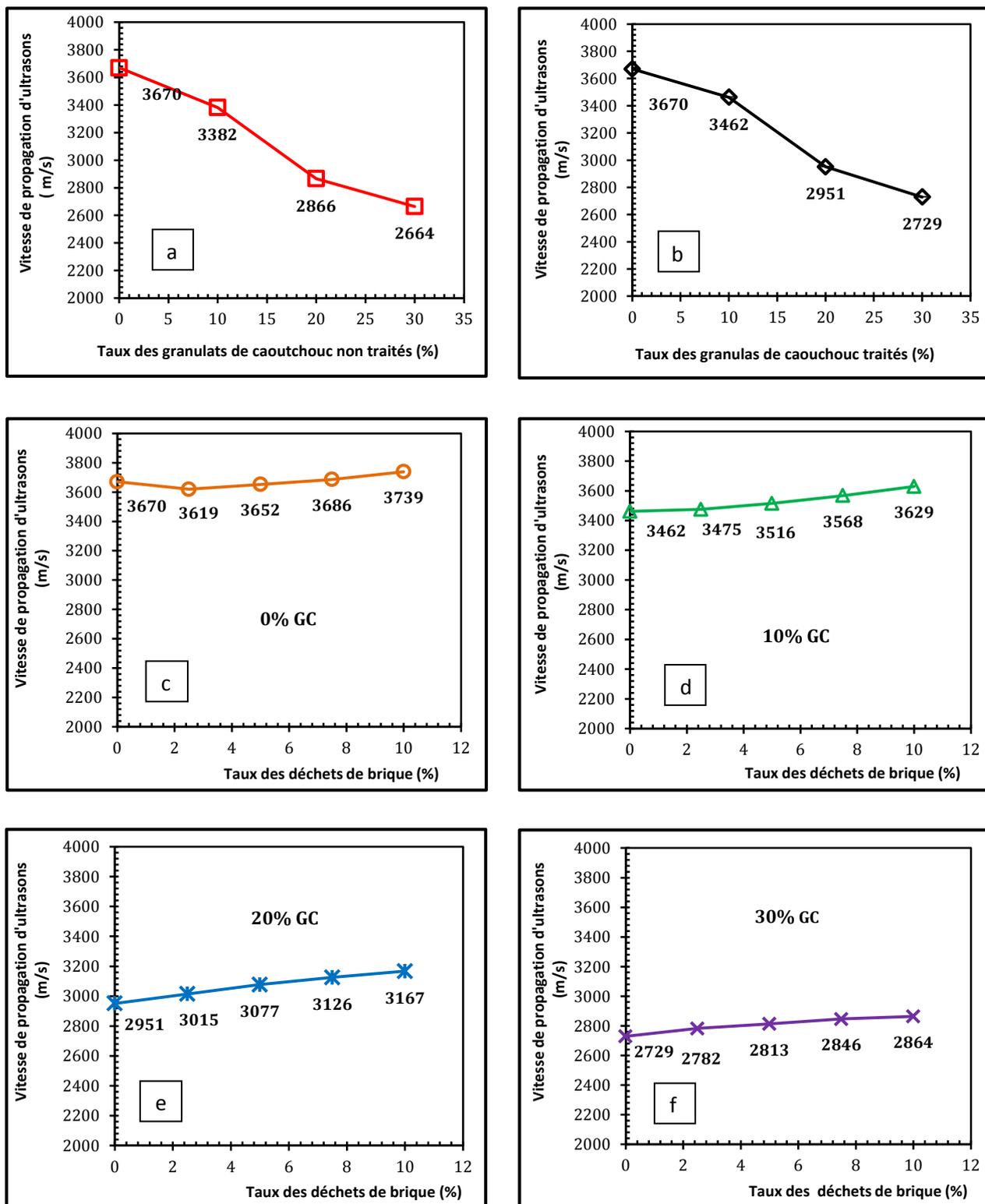
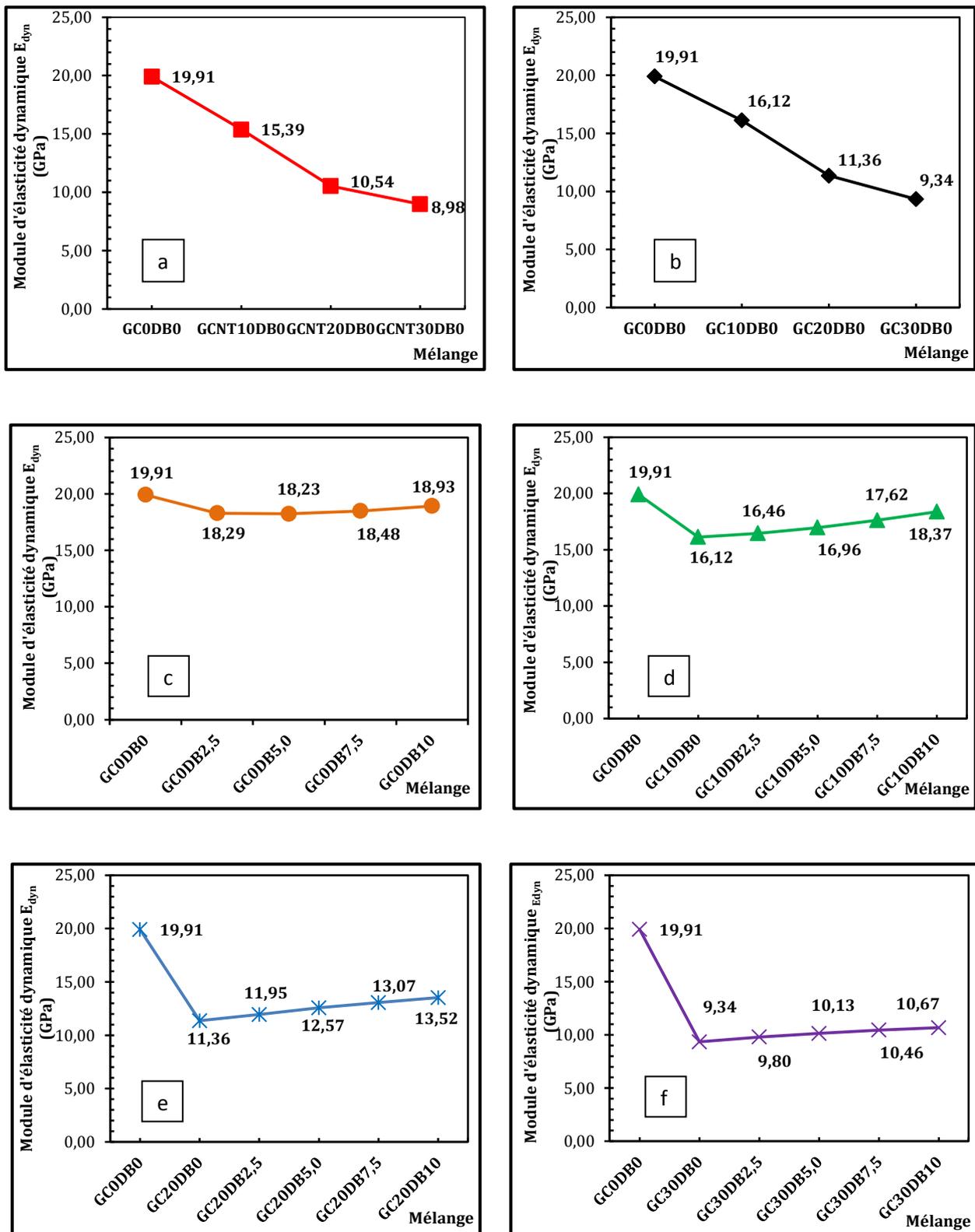


Figure 3.20: Vitesse de propagation d'ultrasons des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%).



**Figure 3.21:** Module d'élasticité dynamique des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB.

### 2.2.2.5. Retrait

La figure 3.22 illustre l'évolution du retrait mesuré sur l'ensemble des mortiers d'étude en fonction de l'âge. Comme il était prévisible, cette caractéristique augmente dans le temps en raison de la perte progressive de l'eau capillaire des mélanges.

- Les granulats de caoutchouc incorporés dans les mélanges étudiés (qu'ils soient traités ou non) augmentent le retrait à tous les âges avec l'augmentation de leurs teneurs en comparaison avec les mélanges sans granulats de caoutchouc. Les granulats de caoutchouc non traités semblent favoriser encore plus ce retrait comme le montre les figures 3.22a et 3.22b. A titre d'exemple le retrait à 35 jours du mortier de référence GC0DB0 est de l'ordre de -0,74 mm/m tandis que celui de GC10DB0 est de -0,88 mm/m et celui de GCNT10DB0 est de -0,94 mm/m.

Cet écart dans les valeurs du retrait est lié à leurs porosités qui sont 15.11%, 15.42% et 15.6% respectivement. L'augmentation du retrait dans ce mélange peut être due à la teneur en vide plus élevée introduite par l'incorporation des granulats de caoutchouc, qui aboutit à un mortier poreux. Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature [153, 167, 194, 290].

- L'effet des DB sur le retrait est positif si l'on réfère à la figure 3.22c. On constate une diminution du retrait à tous les âges à mesure que la teneur en DB augmente. Ceci est dû à une probable réaction pouzzolanique. A titre d'exemple la réduction du retrait dans l'intervalle de temps [1j-35j] a été de :

- De - 0.170 à - 0.600 mm/m pour GC0DB2.5.
- De - 0.070 à - 0.370 mm/m pour GC0DB5.0.
- De - 0.040 à - 0.300 mm/m pour GC0DB7.5.
- De - 0.010 à - 0.250 mm/m pour GC0DB10.

Si on compare les réductions du retrait à 35 jours, nous enregistrons 18.90, 50.00, 59.45 et 66.22% par rapport au mortier de référence. Ces résultats, sont cohérents avec ceux trouvés par [65].

- En considérant la combinaison de DB et GC en remplacement au sable naturel, on constate qu'à taux de GC fixe, une réduction progressive du retrait en fonction de l'augmentation du taux de DB (Figure 3.22d, 3.22e et 3.22f). Des réductions de 3.14, 7.95, 11.36 et 13.64% ont été enregistrées pour GC10DB2.5, GC10DB5.0, GC10DB7.5 et GC0DB10 respectivement par rapport à GC10DB0.

Pour un taux fixe de 20% des réductions de 3.92, 6.86, 8.82 et 11.76% ont été enregistrées pour des taux variables de DB de 2.5, 5.0, 7.5 et 10%.

L'incorporation de 30% de GC avec les taux variables de DB de 2.5, 5.0, 7.5 et 10% a permis d'enregistrer des réductions de l'ordre de 2.75, 4.59, 5,50 et 7.34% respectivement.

Cette réduction enregistrée pour tous les taux de GC et tous les taux de DB est attribuable au grand nombre d'hydrates formés en présence des fillers de DB (réaction pouzzolanique) qui rend la matrice cimentaire plus rigide et moins déformable. La porosité des mélanges devient ainsi moins importante.

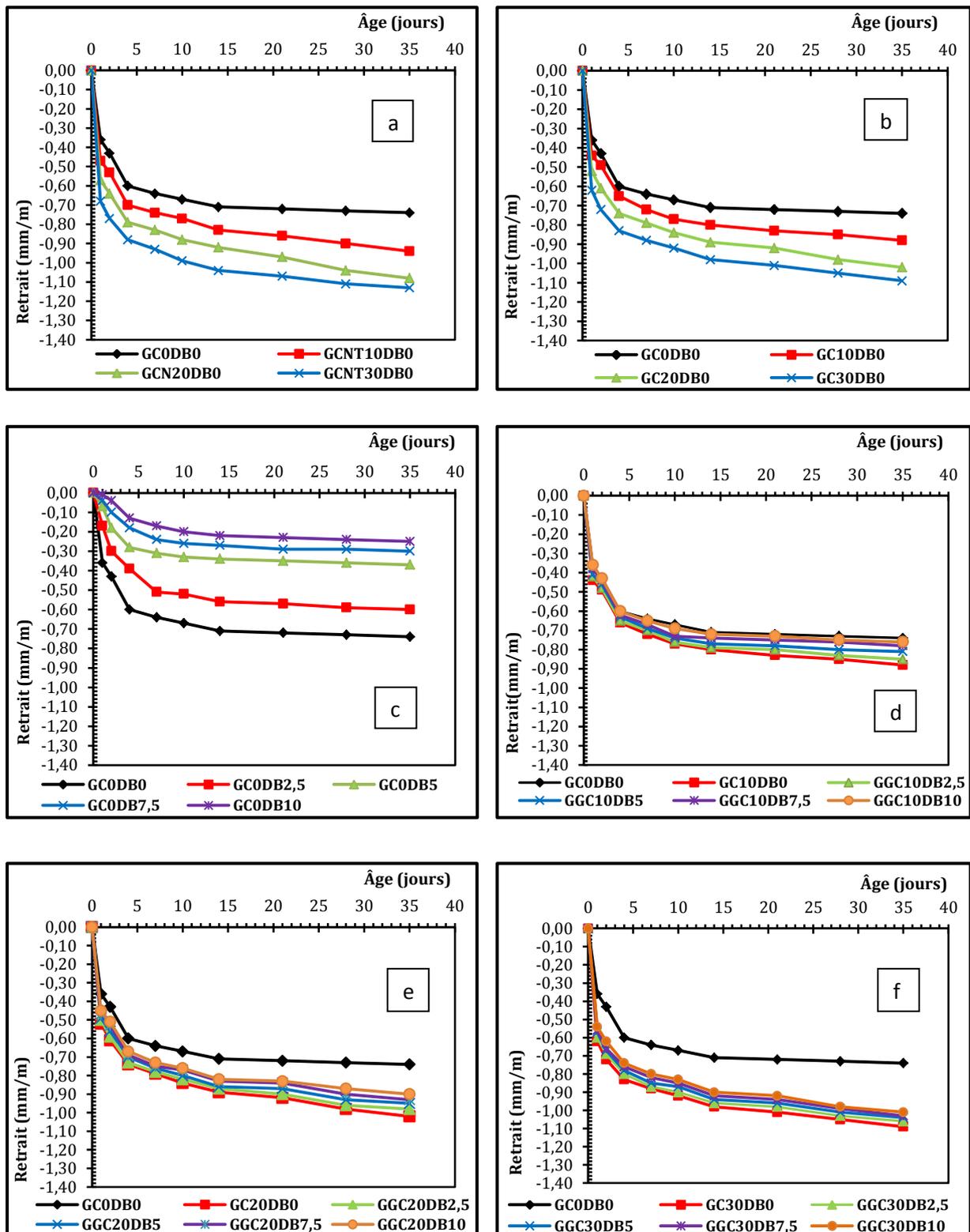


Figure 3.22: Effet de l'incorporation des a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB sur le retrait de mortier.

### 2.2.3. Durabilité

#### 2.2.3.1. Perméabilité à l'eau

La perméabilité du mortier est un indicateur important de durabilité. Elle est augmentée par l'interconnexion du chemin d'écoulement entre les fissures du mortier. Ceci conduit à la progression des produits chimiques agressifs et d'eau qui provoquent une détérioration du mortier.

Les résultats d'essais de perméabilité sont donnés dans la figure 3.23 qui va suivre. En général, la perméabilité à l'eau du mortier contenant des GC a été trouvée supérieure à celle du mortier témoin et qu'elle augmente avec l'augmentation du taux de GC. Pendant le test, l'eau pénètre dans le mortier sous haute pression et neutralise l'eau initiale repoussée par le caoutchouc [352], le taux d'accroissement est de 26.90, 41.52 et 61.98% lors de la substitution volumique du sable par 10, 20 et 30% de granulats de caoutchouc non traités respectivement (Figure 3.23a); des résultats similaires ont été trouvés par [06, 353, 354]. La principale raison de l'augmentation de la perméabilité du mortier contenant des GC est due à la faible liaison entre les granulats de caoutchouc et la matrice de ciment. Selon [222], l'eau pressurisée s'écoule dans la zone d'interface entre la matrice cimentaire et les granulats de caoutchouc. L'augmentation de la perméabilité est attribuée aussi à l'augmentation de la porosité avec l'augmentation des GC [355].

En ce qui concerne l'effet des GC traités (Figure 3.23b), on peut observer que la perméabilité d'eau augmente d'une façon nette avec l'augmentation de la teneur en GC traités (10, 20 et 30%). L'accroissement obtenu est de 22.80, 39.18 et 56.73% respectivement par rapport au mortier GC0DB0. Dans la plage étudiée (0-30% de GC), la perméabilité à l'eau des mortiers à base de GC non traités est supérieure à celle des mortiers confectionnés avec des GC traités.

L'effet négatif des GC non traités sur la perméabilité peut être minimisé par le traitement des granulats de caoutchouc par utilisation d'une solution alcaline [355]. Ce traitement a amélioré l'adhérence entre le granulat de caoutchouc et la matrice de ciment permettant une réduction de la taille des vides et des micro-fissures, il a par conséquent réduit les micro-conduits par lesquels l'eau peut pénétrer.

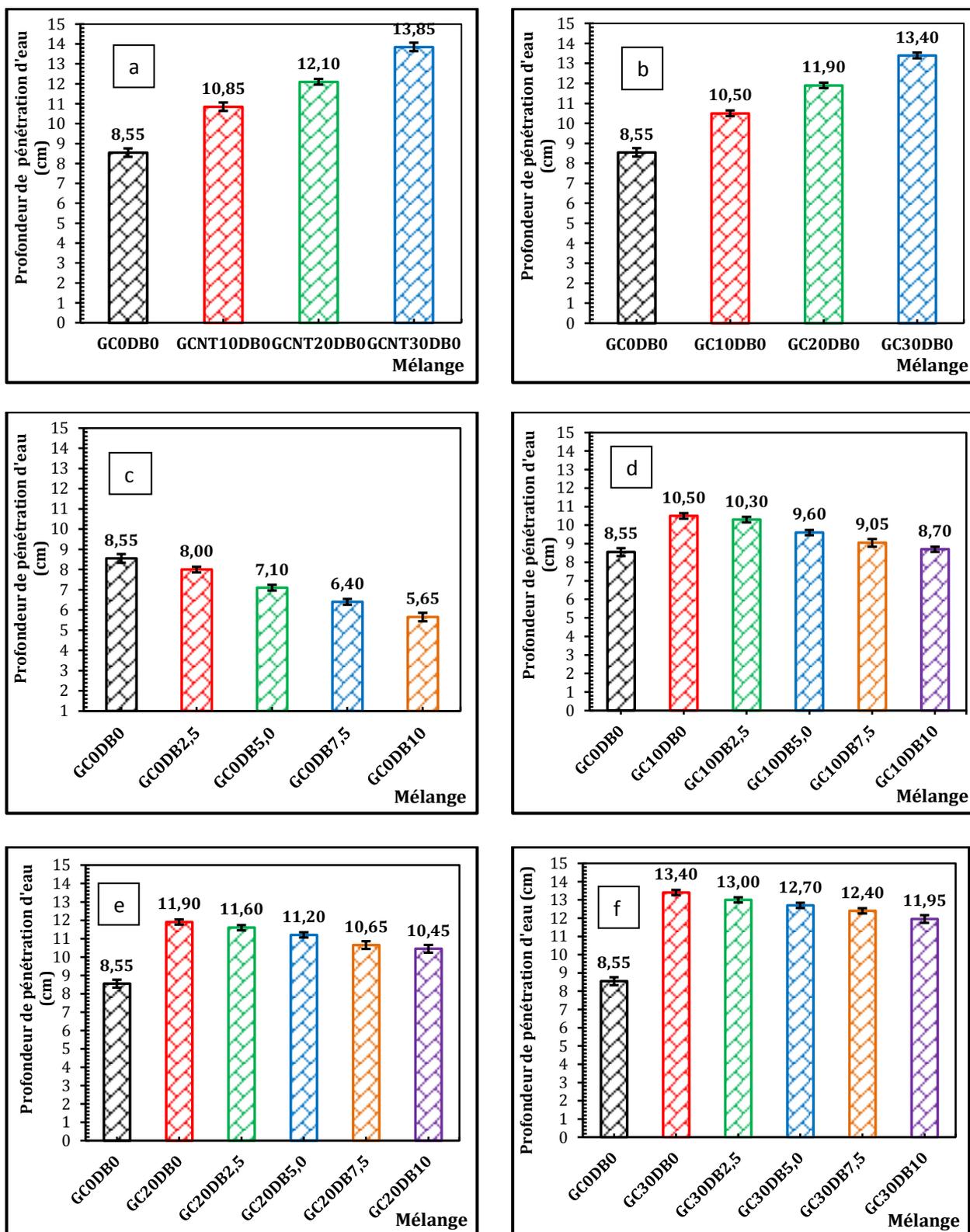
Nous pouvons constater également que la substitution partielle du sable par les déchets de brique avec des fractions volumiques allant de 2.5 à 10% (Figure 3.23c) a conduit à une réduction de la profondeur de pénétration d'eau de l'ordre de 6.43, 16.95, 25.15 et 33.91%.

L'ajout des déchets de brique engendre une modification de la structure poreuse du mortier durci (la réaction des fillers de brique avec le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , la formation d'un gel C-S-H supplémentaire et le remplissage des pores capillaires du mortier). Cette modification a agit positivement sur la durabilité du mortier par la réduction de la perméabilité à l'eau du mortier durci [356].

Les figures 3.23d, 3.23e et 3.23f présentent les résultats de l'effet combiné de l'incorporation de GC traités et de DB sur la perméabilité à l'eau du mortier. Sur la base de ces résultats, il est établi que l'incorporation combinée de GC et de DB a un effet positif sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression. Elle diminue pour toutes les teneurs en granulats de caoutchouc traités combinés avec les différentes teneurs en fillers de brique par rapport à celui du mortier sans déchets de brique GC10DB0, GC20DB0 et GC30DB0. A titre d'exemple, la diminution de la profondeur de pénétration représente environ 1.90, 8.57, 13.80 et 17.14% pour les mélanges GC10DB2.5, GC10DB5.0 et GC10DB7.5, GC10DB10 respectivement par rapport au GC10DB0. La diminution de la profondeur de pénétration représente environ 2.52, 5.88, 10.50 et 12.18% pour les mélanges GC20DB2.5, GC20DB5.0 et GC20DB7.5, GC20DB10 respectivement par rapport au GC20DB0. La diminution de la profondeur de pénétration représente environ 2.99, 5.22, 7.46 et 10.82% pour les mélanges GC30DB2.5, GC30DB5.0 et GC30DB7.5, GC30DB10 respectivement par rapport au GC30DB0.

Les fillers de brique rendent le mortier plus compact car les particules les plus fines remplissent les pores formées lors de l'incorporation des GC. Des travaux semblables réalisés par Güneyisi [222] sur l'utilisation simultanée des GC et de la fumée de silice a conduit à une meilleure homogénéité et à l'amélioration de la structure des pores du composite à la suite de la contribution de la fumée de silice par micro-remplissage.

Les photos des figures 3.24 à 3.27 qui suivent sont une illustration des différentes pénétrations observées.



**Figure 3.23:** Profondeur de pénétration d'eau sous pression des mortiers à base de a) GC traités, b) GC non traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB.



Figure 3.24: Profondeur de pénétration d'eau sous pression du mortier de référence.

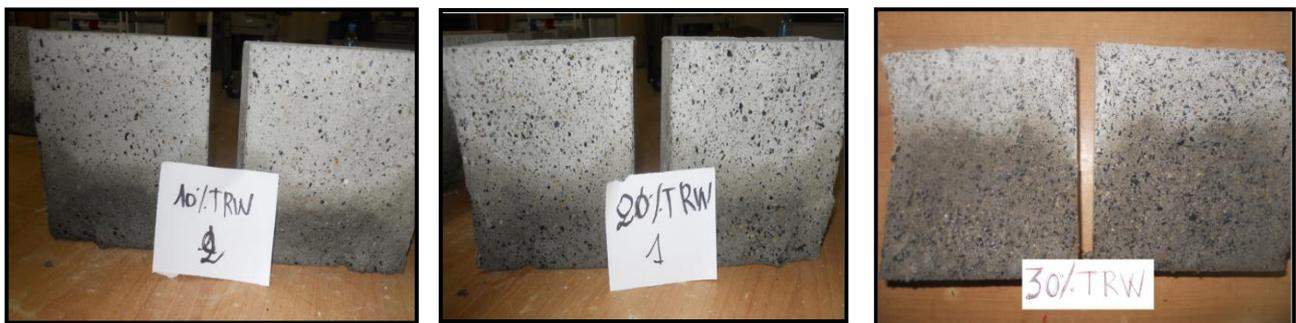


Figure 3.25: Profondeur de pénétration d'eau sous pression des mortiers à base de GC traités.

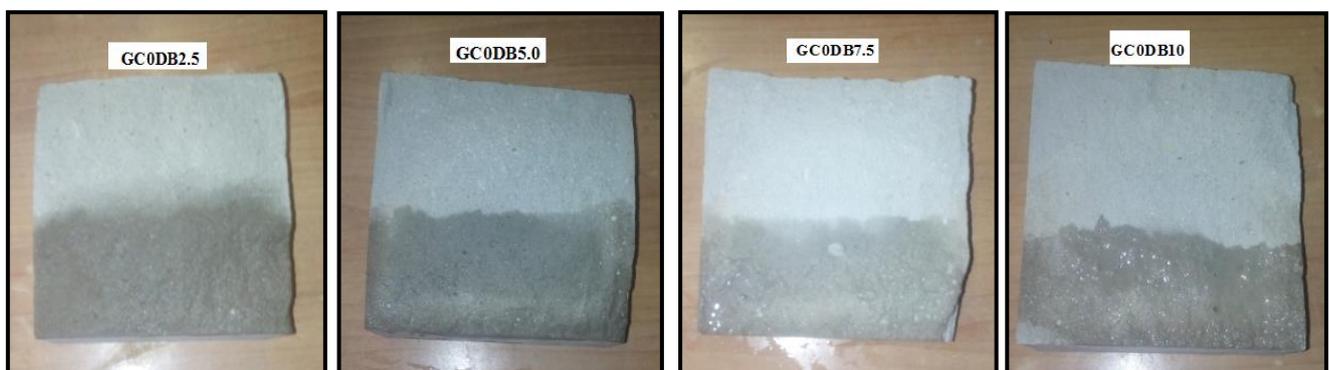


Figure 3.26: Profondeur de pénétration d'eau sous pression des mortiers à base de fillers de DB.

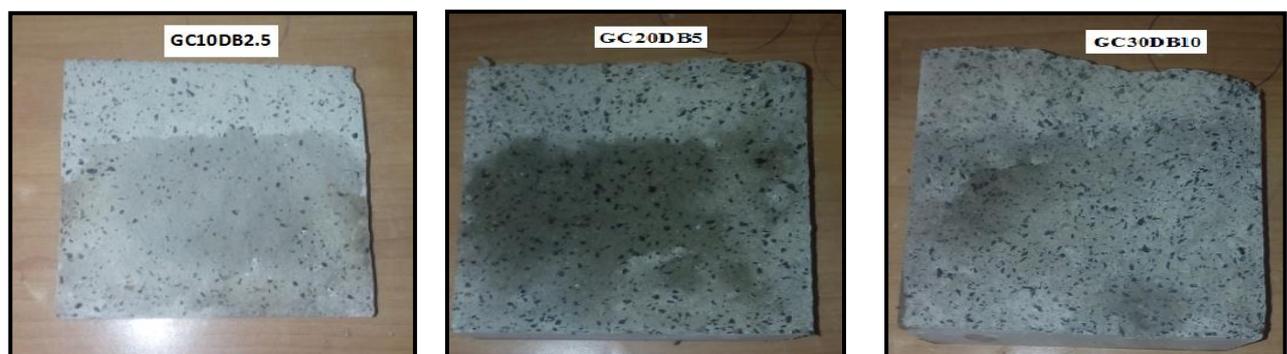


Figure 3.27: Profondeur de pénétration d'eau sous pression de quelques mortiers à base de GC et DB combinés.

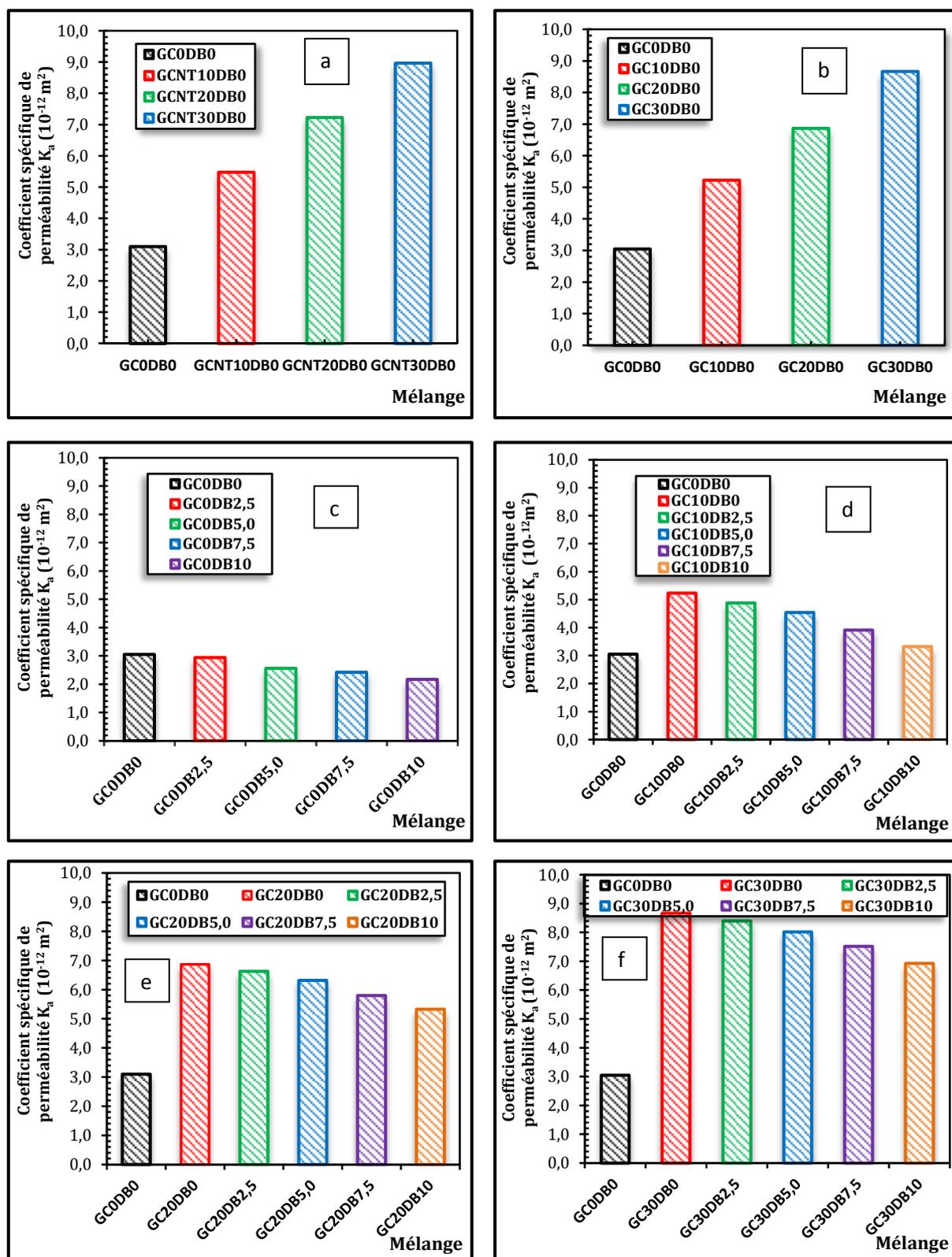
### 2.2.3.2. Perméabilité à l'air

La figure 3.28a présente les valeurs des coefficients de perméabilité à l'air ( $K_a$ ) du mortier de référence et des mortiers caoutchoutés. On peut constater clairement, l'augmentation de la perméabilité à l'air avec l'augmentation des teneurs en caoutchouc non traités qui varie de 10-30%. Cette augmentation est de l'ordre de  $5.5 \times 10^{-12}$ ,  $7.2 \times 10^{-12}$  et  $9.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  par rapport au mortier de référence respectivement, soient des augmentations de 1.77, 2.32 et 2.90 fois plus que le mortier de référence. Le coefficient maximale de perméabilité à l'air a été atteint pour GCNT30DB0 tandis que la valeur minimale a été atteinte sur le mortier GC0DB0, cela est dû à la forte porosité des composites à base de granulats de caoutchouc non traités, qui permet un flux très rapide de l'air à travers les mortiers caoutchouté [222].

La figure 3.28b présente la variation de la perméabilité à l'air en fonction des granulats de caoutchouc traités. D'après les résultats on note une augmentation importante de la perméabilité 1.68, 2.23 et 2.81 fois plus pour les mortiers GC10DB0, GC20DB0 et GC30DB0 respectivement par rapport au mortier de référence. La perméabilité des mortiers incorporant des granulats de caoutchouc non traités est plus importante que celle des mortiers à base de granulats de caoutchouc traités. Les granulats de caoutchouc traités au NaOH améliorent leur adhérence avec la matrice cimentaire [25] permettant une réduction de la taille des vides réduisant en conséquence les micro-conduits par lesquels l'air peut pénétrer.

L'utilisation des déchets de brique améliore la résistance du mortier contre la perméabilité à l'air, le mortier témoin a un coefficient de perméabilité à l'air égale à  $3.1 \times 10^{-12}$ , il a chuté de 6.45, 16.13, 22.58 et 29.90% suite à l'incorporation des déchets de brique avec des taux de 2.5, 5.0, 7.5 et 10% (Figure 3.28c). Ce résultat est attribuable à l'amélioration de la structure des pores par micro-remplissage avec les DB.

Afin de comparer l'effet combiné des GC et de DB en substitution du sable naturel avec leurs effets séparés, les données expérimentales relatives à la perméabilité à l'air de tous les mélanges ont été présentées dans les figures 3.28d, 3.28e et 3.28f. Sur la base de ces résultats, il est établi que l'incorporation combinée des GC et des DB a un effet positif sur la perméabilité à l'air du mortier, la diminution du coefficient de perméabilité représente environ 5.77, 13.46, 25.00 et 36.54% pour les mélanges GC10DB2.5, GC10DB5.0, GC10DB7.5 et GC10DB10 respectivement par rapport à celle du mélange contenant uniquement des GC (GC10DB0), dans le cas des mélanges GC20DB2.5, GC20DB5.0, GC20DB7.5 et GC20DB10, les diminution sont de l'ordre 4.35, 8.70, 15.94 et 23.19%, respectivement par rapport au mortier GC20DB0, la même tendance est notée pour la dernière série, des diminutions de 3.45, 8.05, 13.79 et 20.69% pour les mortiers GC30DB2.5, GC30DB5, GC30DB7.5 et GC30DB10 respectivement par rapport au GC30DB0.



**Figure 3.28:** Perméabilité à l'air des mortiers à base de a) GC traités, b) GC non traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB.

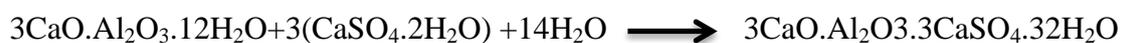
### 2.2.3.3. Attaque des éco-composites élaborés par l'acide sulfurique $H_2SO_4$

Elle a été évaluée par la perte de poids et par l'examen visuel périodique des éprouvettes.

#### a) Perte de poids

Les résultats relatifs aux attaques des mortiers contenant des différents pourcentages de granulats de caoutchouc traités et non traités, DB et une combinaison des 2 déchets dans une solution de 5%  $H_2SO_4$  sont présentés dans la figure 3.29 qui va suivre.

Les endommagements des échantillons ont été observés et évalués par les pertes de poids calculées par rapport au poids des échantillons non attaqués par l'acide et exprimées en pourcentage. La perte de poids a été mesurée sur les mortiers de référence et sur les mélanges dans lesquels une partie de sable a été remplacée par les granulats de caoutchouc après 15, 30, 60, 90, 180 et 270 jours d'immersion dans l'acide sulfurique. Les résultats montrent que plus le temps d'immersion dans  $H_2SO_4$  augmente plus le phénomène de lixivation du mortier est accéléré, la perte de poids est dûe au fait que le ciment après hydratation, a libéré une partie importante d'hydroxyde de calcium libre (CH), celui-ci réagit avec l'acide sulfurique pour former le sulfate de calcium, qui est déposé comme gypse. Pendant que l'attaque se poursuit, tous les composants du ciment sont par la suite décomposés et lixiviés. En outre le sulfate de calcium constitué par la première réaction va réagir avec la phase d'aluminate de calcium dans le ciment pour former le sulfo-aluminate de calcium hydraté (ettringite), qui après cristallisation, peut causer l'expansion du mortier. La couche du gypse précipitée est facilement lixiviée ayant pour résultat une perte de poids importante. La corrosion des composites cimentaires due à l'action de l'acide sulfurique peut être caractérisée par les réactions suivantes [357].



L'augmentation des taux de granulats de caoutchouc diminue la perte de poids des mortiers par rapport au mortier de référence. Des résultats similaires ont été observés par [231, 233, 358].

En ce qui concerne la durabilité des mortiers incorporant des GC non traités contre les agents agressifs, des expériences d'attaque à l'acide ont été effectuées et les résultats de la perte de poids en fonction de la durée d'immersion sont présentés dans la figure 3.29a.

Après 30 jours d'immersion dans l'acide, la perte de poids pour le mélange avec 0% de GC était de 10.94%, dans le mélange avec 10% de GC non traités: 8.75%, dans le mélange avec 20% de GC non traités: 5.58% et 3.56% pour une substitution de 30% de GC non traités. On arrive à la conclusion que les GC non traités améliorent la résistance des mortiers élaborés contre l'attaque à l'acide sulfurique.

Une réduction de la section du mortier témoin était supérieure à celle du mortier caoutchouté non traité, dans le cas du mortier témoin et après 270 jours (9 mois) d'immersion dans  $H_2SO_4$ , on a remarqué que la surface était affectée par une attaque par acide et que la couche superficielle s'est détériorée à 99.29%. Dans le cas du mortier caoutchouté le plus allégé (GCNT30DB0), la surface a été également affectée par l'acide à 92.38%.

Pour les mortiers contenant 0%, 10%, 20% et 30% de GC traités (Figure 3.29b) et pour ceux immergés pendant 270 jours, les pertes de poids enregistrés sont de 99.29%, 97.62%, 94.78 et 91.43% respectivement.

Les GC présents dans le mortier empêchent la progression des fissures et la séparation des autres constituants du mortier, tandis que dans les autres mortiers sans GC les fissures se sont développées et les autres constituants se sont séparés [358].

En comparant l'ensemble des résultats, on peut noter que les échantillons à base de granulats de caoutchouc non traités présentent plus de perte de poids que les échantillons à base de caoutchouc traités quelque soit la durée d'immersion. L'ajout de granulats de caoutchouc traités au NaOH dans le mortier a amélioré la résistance à l'attaque acide [214], on peut aussi attribuer ce phénomène à l'amélioration de l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats de caoutchouc qui a permis de réduire les micro-conduits par lesquels l'acide peut s'infiltrer.

La figure 3.29c montre la variation de la perte de poids des mortiers GC0DB0, GC0DB2.5, GC0DB5.0, GC0DB7.5 et GC0DB10 confectionnés avec et sans déchets de brique avec différents pourcentages, en fonction de la période d'immersion dans la solution de 5%  $H_2SO_4$  pendant 15, 30, 60, 90, 180 et 270 jours. Cette perte est toujours inférieure à celle du mortier à base de granulats de caoutchouc à différents taux. Il est aisé de remarquer que tous les mortiers avec DB accusent des pertes en poids inférieures à celle du mortier témoin (sans déchets de brique) et ceci à toutes les périodes d'immersion. De plus, la perte de poids observée pour l'ensemble des mortiers pouzzolaniques est due au fait que le ciment, après hydratation, libère l'hydroxyde de calcium libre  $Ca(OH)_2$  qui peut être lixiviée à l'extérieur quand elle est soumise à l'attaque par l'acide sulfurique  $H_2SO_4$  en donnant du gypse qui engendre une perte de poids par sa dissolution [359].

---

On peut affirmer que les déchets de brique ont joué un rôle important pour permettre aux mortiers à base de déchets de brique de résister à l'agression de l'acide sulfurique  $H_2SO_4$ . Les pertes de poids sont: (37.07%, 34.49%, 30.65% et 27.18%), (71.72%, 67.51%, 64.06% et 60.02%) et (95.41%, 93.99%, 92.45% et 91.88%) pour les mortiers GC0DB2.5, GC0DB5.0, GC0DB7.5 et GC0DB10 respectivement après 90, 180 et 270 jours d'immersion. C'est le pourcentage de DB de 10% qui permet les pertes de poids les moins élevées. Ceci peut être expliqué par la réaction pouzzolanique qui fixe la chaux, permettant une réduction des pores capillaires par la formation des gels CSH de 2<sup>ème</sup> génération bloquant ainsi l'absorption de la solution acide [360], d'où une réduction de la perte de poids pour l'ensemble des mortiers avec DB par rapport au mortier de référence.

La variation de la perte de poids des mortiers combinés (GC+DB) pour les différents taux est illustrée dans les figures 3.29d, 3.29e et 3.29f. Nous constatons que toutes les éprouvettes ont subi une réduction de la perte du poids, les pertes de poids ont atteint (39.21, 37.72, 36.23 et 34.74%), (73.12, 71.87, 69.05% et 67.93%), (96.94, 94.40, 95.81 et 95.00%) et (20.59, 19.70, 18.63 et 17.32%) pour les mortiers GC10DB2.5, GC10DB5.0, GC10DB7.5 et GC10DB10 respectivement après 90, 180 et 270 jours d'immersion dans  $H_2SO_4$ .

Dans le cas d'un taux moyen de GC (20%), les valeurs de la perte de poids sont (32.80, 31.58, 30.38 et 29.13%), (65.77, 64.32, 62.73 et 61.21) et (93.80, 93.24, 92.33 et 91.51) pour les mortiers GC20DB2.5, GC20DB5.0, GC20DB7.5 et GC20DB10 respectivement après 90, 180 et 270 jours d'immersion dans  $H_2SO_4$ . Après 90, 180 et 270 jours d'exposition, les pertes de poids ont atteint (27.7, 26.38, 24.96 et 23.49%), (59.28, 58.08, 56.78 et 55.53) et (90.80, 90.14, 88.51 et 88.82) pour les mortiers GC30DB2.5, GC30DB5.0, GC30DB7.5 et GC30DB10 respectivement.

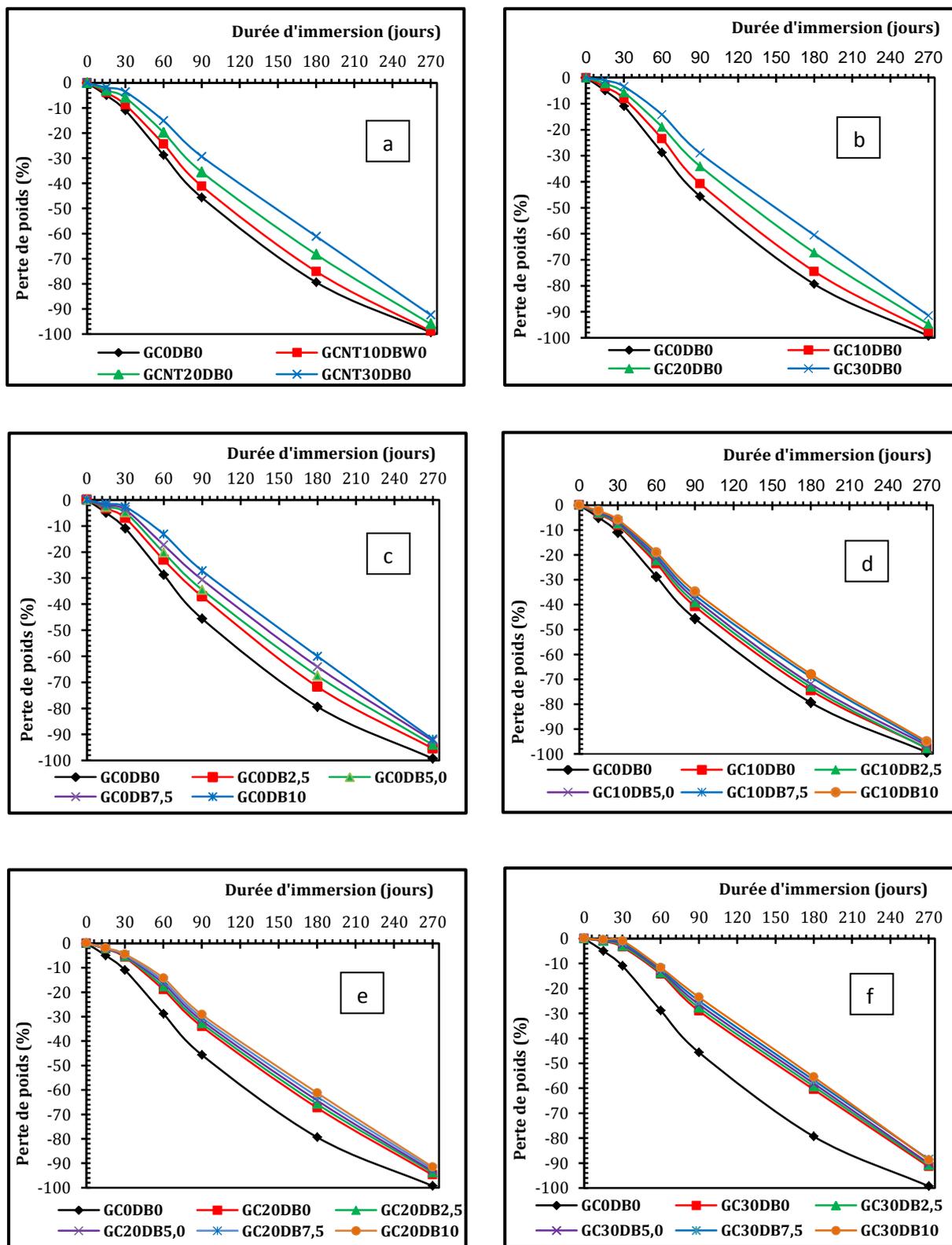


Figure 3.29: Perte de poids des mortiers à base de a) GC traités, b) GC non traités, c) DB d) combinaison des GC (10%) et DB, e) combinaison des GC (20%) et DB, f) combinaison des GC (20%) et DB dans une solution de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (5%).

***b) Examen visuel***

L'examen visuel périodique des éprouvettes en contact avec les solutions de l'acide sulfurique, est un autre moyen pour évaluer la détérioration des propriétés physiques et des dégradations de l'aspect extérieur et peut nous fournir des informations utiles, dans le cadre d'une approche comparative.

Après l'immersion des mortiers d'étude dans des solutions à 5% de  $H_2SO_4$  nous avons observé une lixiviation de la pâte de ciment des mortiers dans la solution d'essai. Dès les premiers jours de vieillissement accéléré, il apparaît du gypse cristallisé, les éprouvettes avaient une couche superficielle de pâte blanche, la couleur blanche indique que l'exposition dans l'acide sulfurique a provoqué la formation étendue de gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), à la surface des éprouvettes, ce qui suggère une précipitation de ce produit formé dans la solution d'essai. Ce phénomène est d'autant plus important que le temps d'immersion est élevé.

Dans les figures 3.30, 3.31 et 3.32 on peut voir l'état dégradé de quelques éprouvettes après 90, 180 et 270 jours d'immersion. Les éprouvettes ont considérablement perdu leur forme prismatique (déformation des coins et des facettes: perte de plus de la moitié de l'échantillon après exposition à 180 et 270 jours pour tous les mélanges). La détérioration causée par l'acide sulfurique peut s'expliquer par la dissolution de la pâte de ciment (l'acide a décapé la pâte de ciment), cela prouve bien que la solution d'acide agit de manière très agressive.

A l'œil nu, nous constatons que le volume de l'échantillon GC0DB0 est inférieur à celui de l'échantillon GC10DB0, GC20DB0 et GC30DB0. La dégradation à long terme est conséquente au point de pouvoir être suivie visuellement.

Les mélanges à base de fillers de DB sont moins affectés par l'acide sulfurique par rapport au mortier de référence et aux mélanges à base de GC aux différents âges.



Figure 3.30: Aspect visuel du mortier de référence après immersion dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

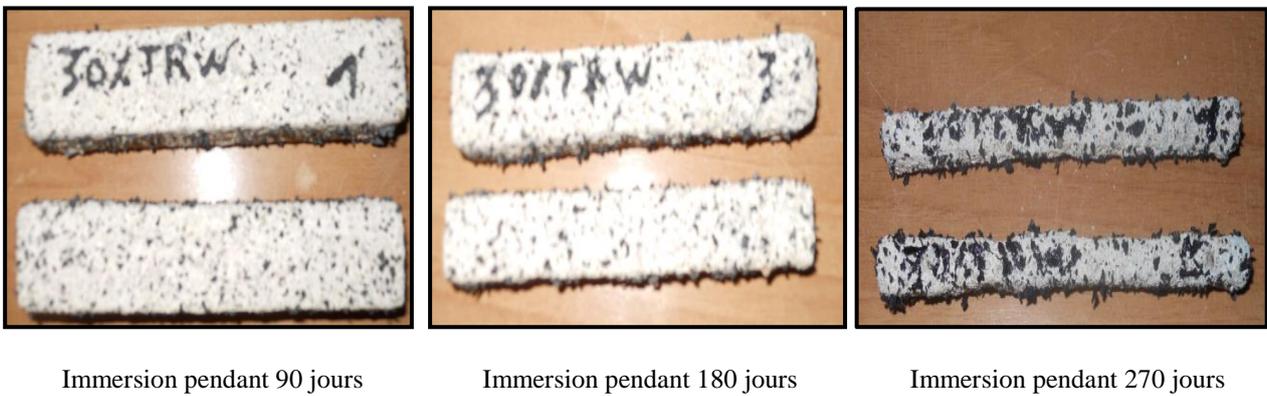


Figure 3.31: Aspect visuel des mortiers à base des GC traités après immersion dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

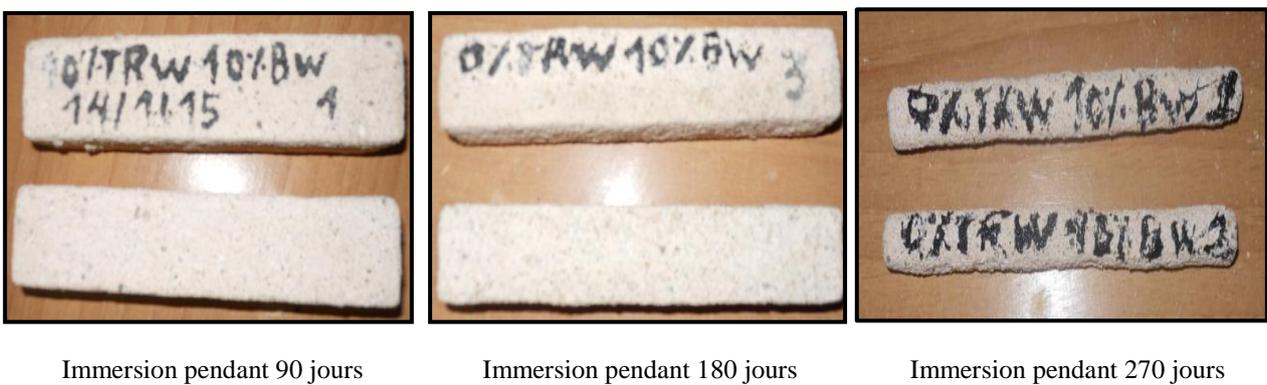


Figure 3.32: Aspect visuel des mortiers à base de fillers de DB après immersion dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

#### 2.2.3.4. Attaque des éco-composites par le sulfate de sodium $\text{Na}_2\text{SO}_4$

Cette attaque a été évaluée par de suivi des résistances à la compression, à celui du coefficient anti corrosion de ces mêmes résistances et par l'expansion subie par les différentes éprouvettes.

##### a) Résistance à la compression

Les conséquences de l'attaque sulfatique par le sulfate de sodium sont exprimées par les chutes de résistances à la compression des éprouvettes immergées dans 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  à différents âges. La figure 3.33 qui suit regroupe l'ensemble des résultats d'essais. Ceux-ci sont comparés aux résultats sur éprouvettes immergées au même moment dans l'eau du robinet.

On peut constater que la résistance à la compression diminue avec la durée d'immersion dans la solution (90, 180 et 270 jours) pour l'ensemble des formulations et que les mortiers de référence (immergés dans l'eau du robinet) présentent la plus grande résistance à la compression. Ceci est lié à la nature élastique des granulats de caoutchouc et à la porosité en raison d'une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau en fonction de la composition de caoutchouc [42].

Les résultats de l'essai de compression obtenus sur les éprouvettes confectionnées à l'aide des GC non traités immergés dans le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sont présentés sur la figure 3.33a. L'effet des GC non traités sur la perte de résistance est positif comme en témoigne les résultats qui suivent: (6.59, 6.22, 5.15 et 3.87%) pour GC0DB0, GCNT10DB0, GCNT20DB0 et GCNT30DB0 respectivement après 90 jours d'immersion, (17.41, 15.57, 12.32 et 8.72%) pour GC0DB0, GCNT10DB0, GCNT20DB0 et GCNT30DB0 respectivement après 180 jours d'immersion et (23.98, 21.78, 17.47 et 12.58%) pour GC0DB0, GCNT10DB0, GCNT20DB0 et GCNT30DB0 respectivement après 270 jours d'immersion. Cet effet positif a été signalé dans l'analyse de l'attaque par le  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (paragraphe 2.2.3.3).

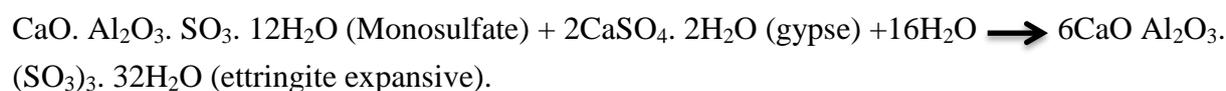
La perte de résistance diminue avec l'incorporation des GC traités. Pour des taux de 0, 10, 20 et 30% les pertes de résistance sont (6.59, 6.13, 5.00 et 3.62%), (17.41, 15.14, 11.73 et 7.91%) et (23.98, 21.27, 16.72 et 11.54%) respectivement avec la durée d'immersion (90, 180 et 270 jours). Des résultats semblables avaient été notés dans des travaux similaires [189, 228, 361, 362].

La perte de la résistance à la compression des mortiers témoins est supérieure par rapport à celle des mortiers à base de granulats de caoutchouc traités pour l'ensemble des mélanges. L'évolution de la perte de résistance est progressive avec la durée d'exposition.

Le mortier préparé avec du caoutchouc traité a connu une amélioration évidente des propriétés mécaniques et de la durabilité par rapport au caoutchouc non traité, ceci est le résultat des meilleures liaisons entre les granulats de caoutchouc et la matrice de ciment. En outre, le caoutchouc traité a dû bloquer l'initiation précoce de fissures internes, ce qui a amélioré la résistance au sulfate [189].

Les résultats présentés dans la figure 3.34 montrent le développement de la résistance à la compression des mortiers incorporant des déchets de brique à l'âge de 90, 180 et 270 jours par rapport au mortier de référence GC0DB0 aux mêmes âges. L'incorporation en pourcentage élevé des fillers de DB réduit considérablement la perte de résistance, les pertes de résistance à la compression notées sont de (2.39%, 2.08%, 1.72% et 1.29%) pour les mortiers contenant des pourcentages de 2.5, 5.0, 7.5 et 10% de DB par rapport à celles des mortiers conservés dans l'eau du robinet après 90 jours d'immersion. Pour celles à l'âge de 180 et 270 jours, les pertes de résistance sont (4.66%, 3.99%, 3.22% et 2.34%) et (7.05%, 6.07%, 4.91% et 3.63%) respectivement. Le taux maximal de 10% de DB donne la résistance à la compression maximale, pour toutes les durées d'immersion. Dans la solution de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, le mortier témoin a une plus grande perte de résistance à la compression que les mortiers à base de déchets de brique. En effet, le gypse et l'ettringite volumineuse sont produits provoquant la fissuration et la détérioration des mortiers [363]. Ce phénomène est moins prononcé dans les mortiers contenant des DB (matériaux pouzzolaniques) car ils sont moins riches en portlandite.

L'attaque de sulfatique est la réaction des ions sulfate avec l'hydroxyde de calcium pour former le gypse et l'ettringite selon les réactions ci-dessous [364]. Ces produits sont volumineux et conduisent à l'expansion, au craquage, à la détérioration et à la déformation des structures des composites cimentaires [365,366].



Une grande résistance à l'attaque sulfatique est normalement associée à une structure discontinue de pores et une faible teneur en hydroxyde de calcium (CH) [268]. L'amélioration de la résistance au sulfate avec la présence de déchets de brique s'explique par le mécanisme suivant, le CH (portlandite) libéré lors de l'hydratation du ciment réagit avec les déchets de brique ajoutés dans un environnement humide et forme le gel CSH secondaire grâce à une réaction pouzzolanique [367, 368], mais le gel secondaire est moins dense que le gel CSH primaire. La réaction pouzzolanique entraîne la consommation de CH, réduisant ainsi la formation d'ettringite et par conséquent moins d'expansion [364].

On peut donc conclure que la formation du CSH secondaire par réaction pouzzolanique contribue à l'amélioration de la résistance mécanique des éprouvettes attaquées par le sulfate [369] par le remplissage et la segmentation de grands pores capillaires en petits pores capillaires discontinus grâce au raffinement de la taille des pores [370].

En plus de la réaction pouzzolanique, l'action de remplissage des DB due à la granulométrie fine densifie la structure des pores des mortiers et améliore la résistance à l'attaque par le sulfate. L'utilisation des déchets de brique et la porosité réduite résultante ne suffisent pas à l'empêcher complètement.

L'évolution de l'effet du milieu sulfatique sur les éprouvettes de mortiers confectionnés avec les GC et les fillers de DB combinés a été examinée à travers les essais de résistance à la compression après 90, 180 et 270 jours. Les résultats sont présentés dans les figures 3.35a, 3.35b et 3.35c.

Les pertes de la résistance ont atteint (5.97, 5.75, 5.46 et 5.16%), (14.62, 13.95, 13.16% et 12.18%) et (20.59, 19.70, 18.63 et 17.32%) pour les mortiers GC10DB2.5, GC10DB5.0, GC10DB7.5 et GC10DB10 respectivement après 90, 180 et 270 jours d'immersion dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Les réductions de la résistance ont atteint (4.82, 4.57, 4.25 et 3.90%), (11.16, 10.45, 9.82 et 8.63%) et (15.97, 15.00, 13.81 et 12.51%) pour les mortiers GC20DB2.5, GC20DB5.0, GC20DB7.5 et GC20DB10 respectivement après 90, 180 et 270 jours d'immersion dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

De plus, après 90, 180 et 270 jours d'exposition dans le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , les réductions de la résistance ont atteint (3.46, 3.16, 2.81 et 2.42%), (7.39, 6.69, 5.84 et 4.91%) et (10.83, 9.85, 8.66 et 7.34%) pour les mortiers GC30DB2.5, GC30DB5.0, GC30DB7.5 et GC30DB10 respectivement. Ces résultats prouvent l'effet positif des DB sur l'évolution de la résistance à la compression des mortiers soumis aux attaques du sulfate. La diminution relativement importante de la perte de la résistance de compression à 90, 180 et 270 jours est due à la modification de la texture des hydrates qui devient plus compacte, probablement à cause de la compacité élevée qui constitue un frein à la pénétration des agents agressifs.

Les travaux de [208] sur l'introduction de deux additions (cendre volante + laitier) dans un béton à base de poudre de caoutchouc ont montré une amélioration remarquable de la résistance contre le sulfate.

---

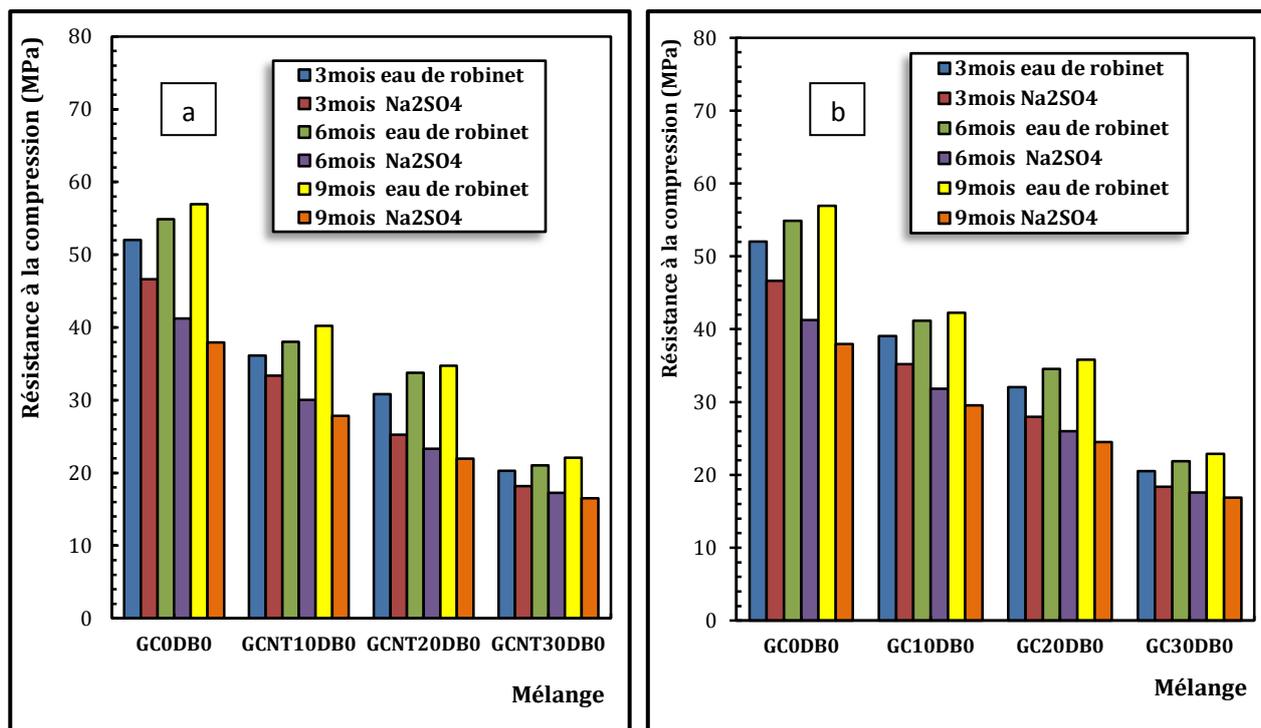


Figure 3.33: Résistance aux sulfates (5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités.

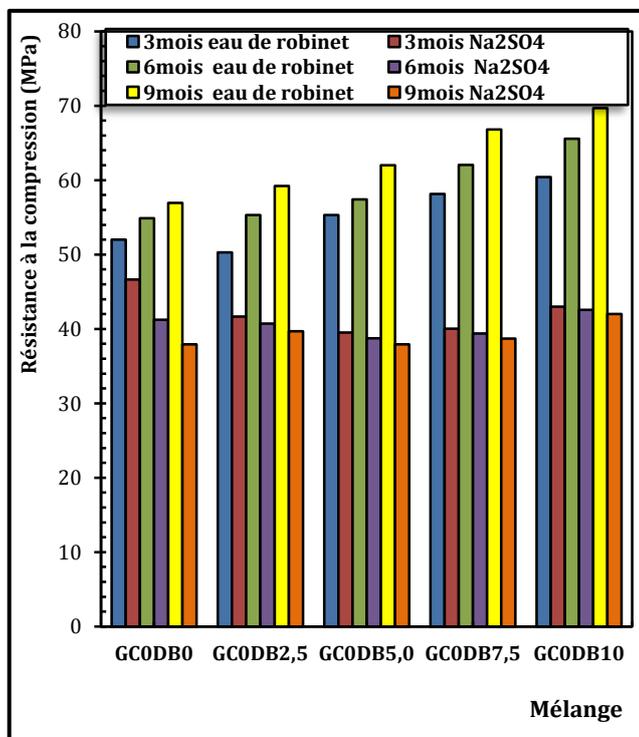


Figure 3.34: Résistance aux sulfates (5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) des mortiers à base de fillers de DB.

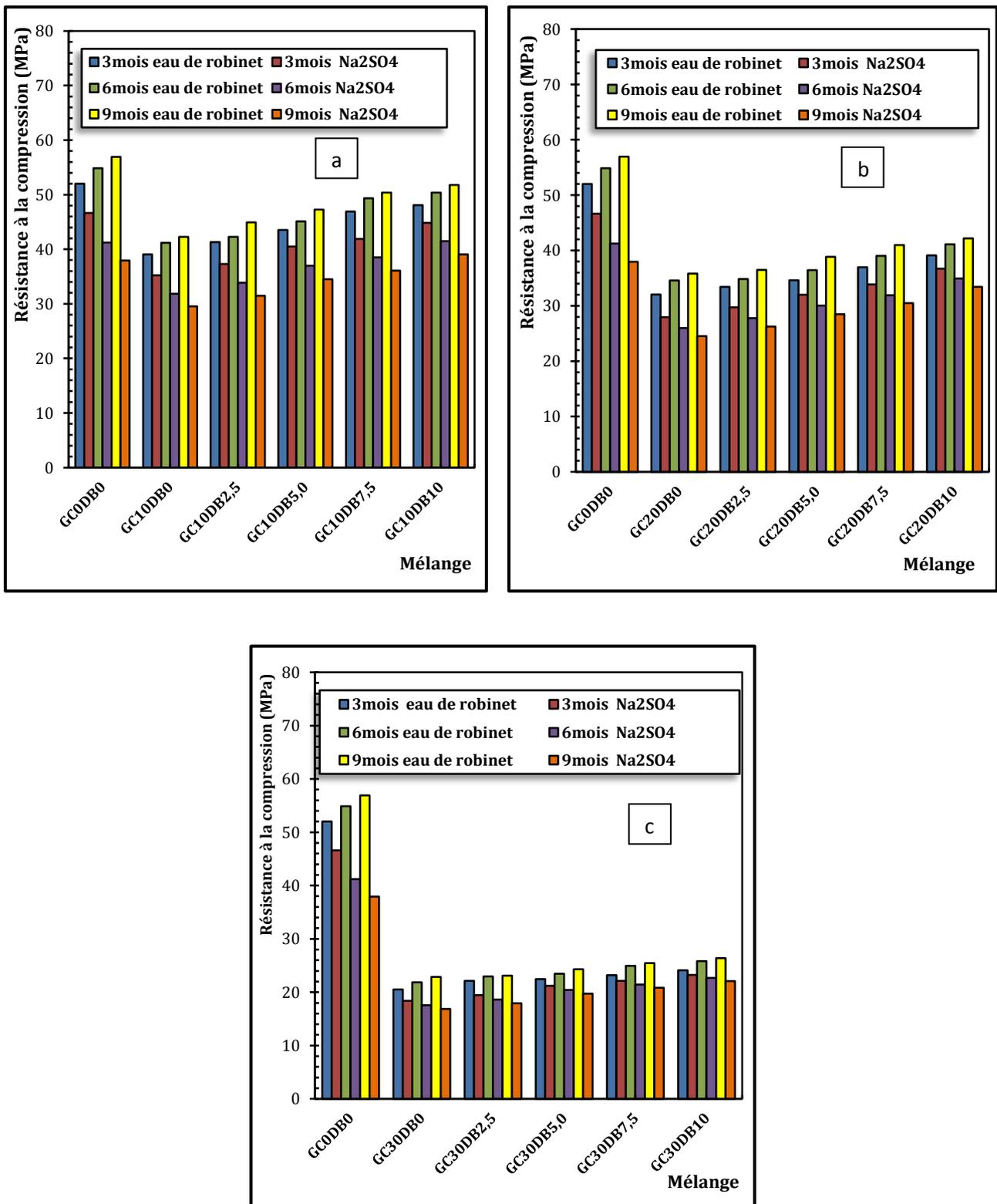


Figure 3.35: Résistance aux sulfates (5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) des mortiers à base de a) combinaison de GC traités (10%) et DB, b) combinaison de GC traités (20%) et DB, c) combinaison de GC traités (30%) et DB.

**b) Coefficient anti corrosion de la résistance à la compression**

Afin de mieux analyser l'effet de l'attaque du sulfate  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la résistance à la compression du mortier à base de caoutchouc et déchets de brique à différents âges, un coefficient anti corrosion  $K_{fi}$  est proposé par l'équation suivante:

$$K_{fi} = \frac{f_{ci}}{f_{c0}} \times 100$$

Avec:  $K_{fi}$ : Coefficient anti corrosion à l'âge  $i$  exprimé en %.

$f_{ci}$ : Résistance à la compression des mortiers à l'âge  $i$  (après immersion dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

$f_{c0}$ : Résistance à la compression à 28 jours (avant immersion dans la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

$K_{fi}$  de différents mortiers en granulats de caoutchouc et en déchets de brique sont présentés dans le tableau 3.7 et la figure 3.36.

**Tableau 3.7:** Coefficient anti corrosion des éco-composites d'étude (%) immergés dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

N°	Mélange	0 jours	90 jours	180 jours	270 jours
01	GC0DB0	100.00	93.41	82.59	76.02
02	GC0DB2.5	100.00	97.61	95.34	92.95
03	GC0DB5.0	100.00	97.92	96.01	93.93
04	GC0DB7.5	100.00	98.28	96.78	95.09
05	GC0DB10	100.00	98.71	97.66	96.37
06	GC10DB0	100.00	93.87	84.86	78.73
07	GC20DB0	100.00	95.00	88.27	83.28
08	GC30DB0	100.00	96.38	92.09	88.46
09	GCNT10DB0	100.00	93.78	84.43	78.22
10	GCNT20DB0	100.00	94.85	87.68	82.53
11	GCNT30DB0	100.00	96.13	91.28	87.42
12	GC10DB2.5	100.00	94.03	85.38	79.41
13	GC10DB5.0	100.00	94.25	86.05	80.30
14	GC10DB7.5	100.00	94.54	86.84	81.37
15	GC10DB10	100.00	94.84	87.82	82.68
16	GC20DB2.5	100.00	95.18	88.84	84.03
17	GC20DB5.0	100.00	95.43	89.55	85.00
18	GC20DB7.5	100.00	95.75	90.18	86.19
19	GC20DB10	100.00	96.10	91.37	87.49
20	GC30DB2.5	100.00	96.54	92.61	89.17
21	GC30DB5.0	100.00	96.84	93.31	90.15
22	GC30DB7.5	100.00	97.19	94.16	91.34
23	GC30DB10	100.00	97.58	95.09	92.66

Le coefficient anti-corrosion a progressivement augmenté avec l'augmentation du pourcentage des granulats de caoutchouc et des déchets de brique dans les mortiers. Dans le cas des mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités, le coefficient anti-corrosion maximal (96.13%) a été enregistré pour le mortier avec 30% de granulats de caoutchouc après une durée d'immersion de 90 jours dans le sulfate, par contre la valeur minimale (91.28%) a été enregistrée pour le mortier avec 0% de granulats de caoutchouc. Ceci est dû au fait que le caoutchouc est un matériau élastique, qui absorbe l'énergie d'expansion causée par l'ettringite évitant ainsi la défaillance de la structure. Il en résulte que les mélanges de forts taux de granulats de caoutchouc dans le mortier peuvent améliorer la résistance à l'attaque par le sulfate [227]. L'effet du temps d'exposition sur les mortiers fait apparaître une diminution de sa résistance au sulfate mais le mortier à base du taux de granulats de caoutchouc le plus élevée reste toujours le plus résistant au sulfate.

Des résultats sont similaires pour l'effet des granulats de caoutchouc traités mais les valeurs du coefficient anti corrosion sont légèrement supérieures par rapport au mélange à base de GC non traités. La valeur maximale (96.38%) est notée pour le mortier GC30DB0 et la valeur minimale (92.09%) pour le mortier GC0DB0. Cette tendance est attribuée à la mauvaise adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats de caoutchouc. Celle-ci est améliorée par le traitement des GC [343].

Les mortiers à base de déchets de brique immergés dans la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  montrent une augmentation du coefficient anti corrosion relativement importante par rapport à celui du mortier de référence à différents âges d'immersion 90, 180 et 270 jours. Ce coefficient augmente avec l'augmentation du taux de déchets de brique. Le coefficient anti-corrosion maximal (98.75%) a été enregistré pour le mortier avec 10% de fillers de DB après une durée d'immersion de 90 jours dans le sulfate, par contre la valeur minimale (97.61%) pour le mortier avec 2.5% de DB. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui devient plus compact, probablement à cause de la compacité élevée qui est un frein à la pénétration des agents agressifs.

La combinaison de 10% à 30% de granulats de caoutchouc avec 2.5 à 10% de déchets de brique a augmenté le coefficient anti corrosion, par conséquent améliore la qualité des mortiers placés dans la solution ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) par rapport à celles de GC10DB0, GC20DB0 et GC30DB0.

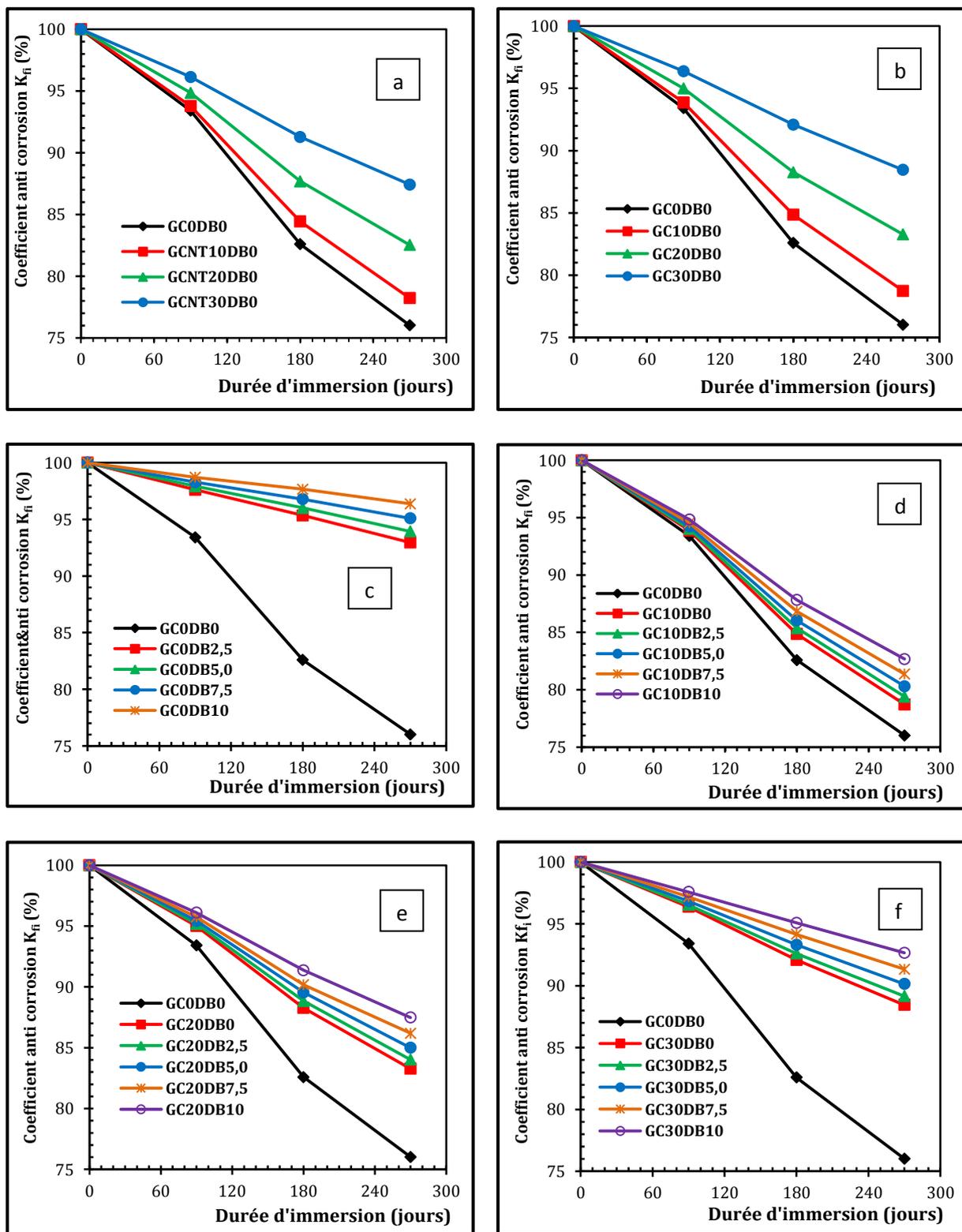


Figure 3.36: Coefficient anti corrosion des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, d) combinaison des GC traités (20%) et DB, e) combinaison des GC traités (30%) et DB dans une solution de 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

*c) Expansion*

L'attaque sulfatique est souvent accompagnée par l'expansion et par la fissuration et il n'y a pas de modèle distinctif de fissure, il est aléatoire.

Les résultats relatifs à l'expansion des mortiers immergés dans la solution contenant 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sont présentés dans les figures 3.37. Les résultats présentés dans la figure 3.37a montrent une expansion moins élevée dans les éprouvettes à base de GC non traités immergées dans la solution de sulfate de sodium comparé à ceux sans granulats de caoutchouc. Pour un mortier sans caoutchouc (mortier de référence) l'expansion après 90 jours d'immersion est de 0.40%. Par contre, les mortiers contenant 10 à 30% de GC non traités présentent une expansion respective de 0.34 à 0.21%, d'où une réduction de l'expansion par rapport au mortier de référence de 14.25 à 47.75%. L'expansion dans les mortiers après 180 jours d'immersion était 0.70 à 0.42%, donc l'incorporation de 10-30 % de GC non traités a réduit l'expansion par rapport au mortier de référence (0.82%) de 14.88 à 48.54% respectivement. Et pour ceux immergés pendant 270 jours, l'expansion varie de 1.01 à 0.62%, soient une réduction de 15.08 à 47.51% en comparaison avec le mortier de référence dont l'expansion est 1.19%.

Les mortiers contenant 0%, 10%, 20% et 30% de granulats de caoutchouc traités présentent une expansion respective de 0.40%, 0.34%, 0.27% et 0.20% pour 90 jours d'immersion, une expansion de 0.82%, 0.69%, 0.55% et 0.41% à l'âge de 180 jours et une expansion de 1.19%, 1.00%, 0.81% et 0.61% à l'âge de 270 jours d'immersion, d'où une réduction de l'expansion respective par rapport au mortier de référence de 16.25%, 33.00% et 50.25% après 90 jours d'immersion. Les mêmes constatations sont observées pour les mortiers d'étude immergés pendant 180 et 270 jours. On a enregistré une réduction de l'expansion par rapport au mortier de référence de l'ordre de 15.73%, 32.68% et 49.88% à l'âge de 180 jours et une réduction de 15.59%, 31.59% et 48.78% à l'âge de 270 jours. On peut conclure que l'incorporation des granulats de caoutchouc dans la matrice cimentaire conduit à une diminution de l'expansion par rapport au mortier de référence ce qui confirme que les GC peuvent empêcher la formation des fissures et empêcher la défaillance des matériaux [189, 227].

Afin d'illustrer l'action des sulfates qui peut prendre la forme d'une expansion du mortier suite à la formation de produits expansifs et d'examiner l'effet positif de la substitution des fillers de brique traduit par une amélioration de la résistance au sulfate, on présente les résultats de l'expansion des mortiers contenant des déchets de brique dans la figure 3.37c. Les mortiers de déchets de brique immergés dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  montrent une amélioration relativement importante de l'expansion avec l'augmentation du taux de substitution. Après une durée d'immersion de 90 jours dans la solution sulfatique, les mortiers contenant 2.5 à 10% de DB présentent une

expansion respective de 0.14 à 0.09%, d'où une réduction de l'expansion par rapport au mortier de référence de 65.00 à 77.5%. L'expansion dans les mortiers après 180 jours d'immersion était 0.29 à 0.23%, donc l'incorporation de 2.5-10 % de DB a réduit l'expansion par rapport au mortier de référence (0.82%) de 64.39 à 71.70 % respectivement.

Et pour ceux immergés pendant 270 jours, l'expansion varie de 0.42 à 0.35%, soient une réduction de 64.45 à 70.18% en comparaison avec le mortier de référence qui a une expansion de 1.19%. Plusieurs recherches [240, 274, 368] ont été effectuées sur des mortiers sans lesquels une partie de ciment a été substituée par des fines de déchet de brique et ont montré l'amélioration de la résistance aux attaques sulfatiques par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

L'ettringite se forme dans l'espace vide, tel celui existant dans la zone de transition matrice-granulats de caoutchouc. C'est ainsi qu'autour des gros granulats, une auréole d'ettringite est souvent observée. La porosité capillaire, cependant, présente un milieu confiné et la pression de formation de l'ettringite y apparaît. Toute la fissuration du composite mène à une réduction de la durabilité des composites cimentaires en augmentant la perméabilité et en facilitant ainsi la pénétration des ions agressifs [371]. La structure plus poreuse du mortier sans DB semble être capable d'accommoder les réactions expansives de formation d'hydrate qui se produisent lors de l'exposition du matériau durci alors que pour les mélanges contenant des déchets de brique, on peut estimer que l'amélioration de l'expansion est due à la modification de la structure des hydrates qui devient plus compact suite à la réaction pouzzolanique, probablement à cause de la compacité élevée qui est un frein à la pénétration des agents agressifs [372].

L'incorporation des granulats de caoutchouc et des déchets de brique simultanément avec différents taux est traduite par une réduction de l'expansion (Figure 3.37d, 3.37e et 3.37f), ce qui explique l'effet conjugué bénéfique des fines de brique dans la densification de la structure poreuse du mélange et dans l'évolution de la réaction pouzzolanique [373] et aussi à l'effet bénéfique des granulats de caoutchouc à empêcher la fissuration des mélanges [227]. Les réductions de l'expansion sont de l'ordre de (3.88 à 19.40%), (3.90 à 19.83%) et (4.19 à 18.76%) pour les mortiers GC10DB2.5 à GC10DB10 respectivement. Pour les mortiers GC20DB2.5 à GC20DB10, les réductions sont de (4.85 à 24.62%), (5.43 à 25.00%) et (5.54 à 24.75%) et des réductions de (5.02 à 31.15%), (6.08 à 29.68%) et (6.09 à 31.08%) pour les mortiers GC30DB2.5 à GC30DB10 respectivement aux âges de 90, 180 et 270 jours.

Les figures 3.38, 3.39 et 3.40 montrent des photos de différentes éprouvettes d'étude immergées dans la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  après 90, 180 et 270 jours d'immersion. Les photos ne révèlent pas de signe significatif de dégradation sur les éprouvettes.

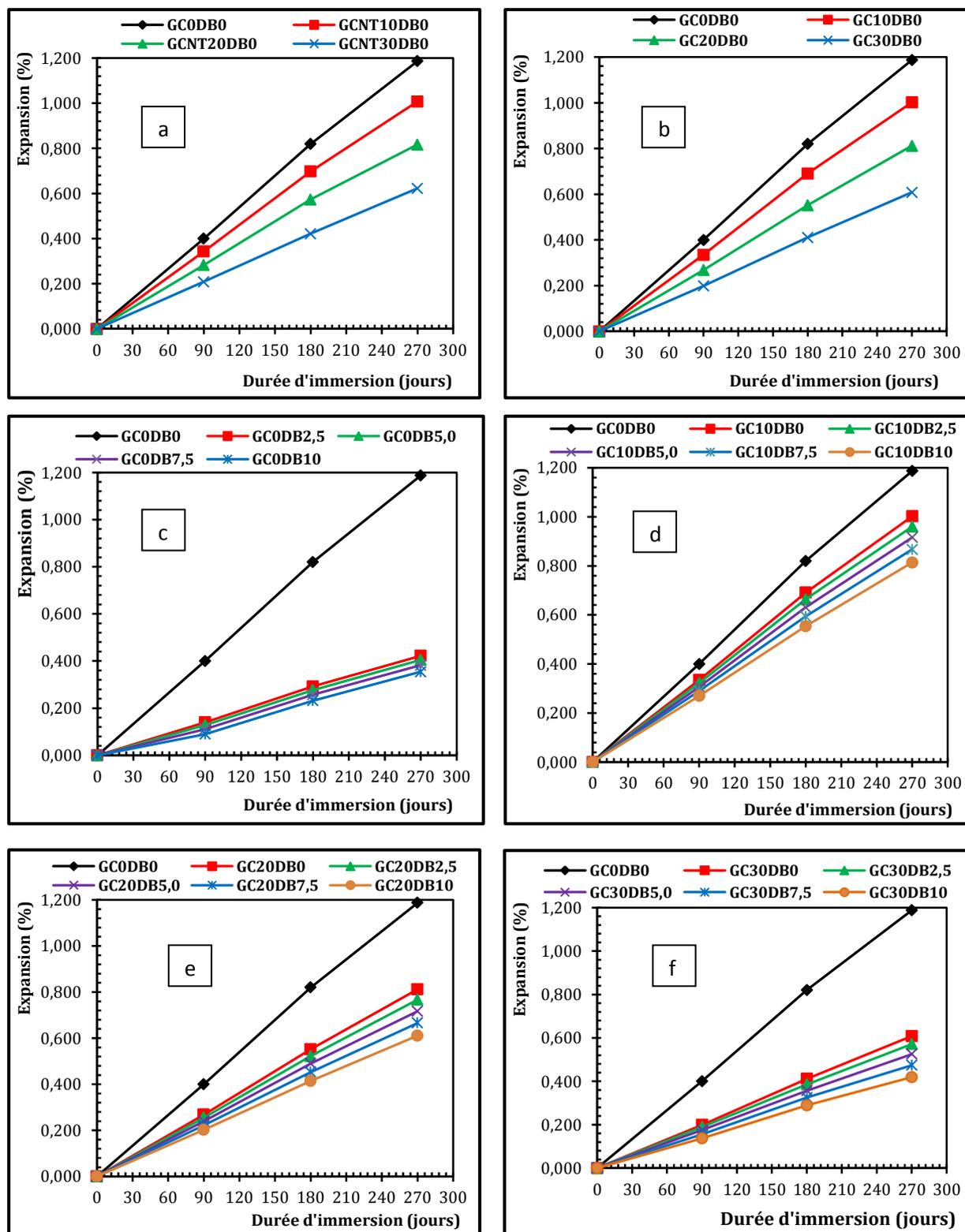


Figure 3.37 : Expansion des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB dans une solution de 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



Immersion pendant 90 jours

Immersion pendant 180 jours

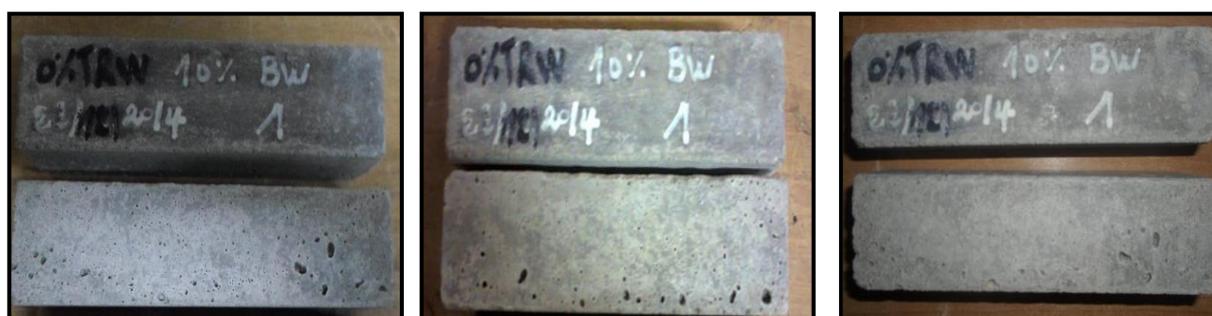
Immersion pendant 270 jours

**Figure 3.38:** Aspect visuel des mortiers de référence après immersion dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Immersion pendant 90 jours

Immersion pendant 180 jours

Immersion pendant 270 jours

**Figure 3.39:** Aspect visuel des mortiers à base de GC traités après immersion dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Immersion pendant 90 jours

Immersion pendant 180 jours

Immersion pendant 270 jours

**Figure 3.40:** Aspect visuel des mortiers à base de fillers de DB après immersion dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

### 2.2.3.5. Attaque des éco-composites par l'eau de mer

Cette attaque a été étudiée à travers l'examen de l'évolution de la résistance à la compression et l'expansion provoquée dans les éprouvettes des différents mortiers élaborés.

On rappelle que l'eau de mer utilisée dans la présente étude est une eau de la mer méditerranée contenant approximativement entre 30 à 40 g/l de sels dissous.

#### *a) Résistance à la compression*

Le comportement du mortier ou béton placé dans un environnement chimiquement agressif dépend de facteurs complexes et multiples liés d'une part, à l'environnement (nature, concentration, renouvellement), d'autre part, à la matrice cimentaire elle-même (nature et dosage des constituants). Les environnements maritimes sont parmi les milieux naturels les plus agressifs vis-à-vis des matériaux cimentaires.

L'attaque chimique que les matériaux cimentaires connaissent lorsqu'ils sont exposés à l'eau de mer est plus complexe que celle sur les matériaux exposés au sulfate de sodium, en raison du nombre de sels dissous présents [374]. L'eau de mer contient typiquement du chlorure de sodium NaCl (30.0g/l) qui est prépondérant, du chlorure de magnésium MgCl<sub>2</sub> (6.0g/l), du carbonate de potassium KHCO<sub>3</sub> (0.2g/l), du sulfate de magnésium MgSO<sub>4</sub> (5.0g/l) et du sulfate de calcium CaSO<sub>4</sub> (1.5g/l) [375].

Les composites cimentaires en présence d'eau de mer sont soumis à plusieurs réactions chimiques faisant intervenir des sulfates, des chlorures et des ions magnésium selon plusieurs mécanismes (cristallisation de sels expansifs, précipitation de composés insolubles, attaques ioniques, dissolution de la portlandite, etc...).

- Action des chlorures:

Les chlorures de magnésium, en combinaison avec la portlandite Ca(OH)<sub>2</sub>, entraînent la formation de chlorures de calcium selon les réactions ci-dessous et provoquant la dissolution (ou lixiviation) de la chaux de Ca(OH)<sub>2</sub> et des C-S-H.



La brucite est insoluble et se dépose à la surface du composites cimentaires. Issus des réactions entre les chlorures de magnésium et de la portlandite, le chlorure de calcium peut dans un deuxième temps se combiner à l'aluminate tricalcique du ciment (C<sub>3</sub>A) pour former du monochloroaluminate de calcium hydraté, appelé également sel de Friedel [376].



Le sel de Friedel ne revêt pas de caractère expansif. Mais en présence d'un apport de sulfates important (interne ou externe), il peut se former des trisulfoaluminates de calcium hydratés (Sel de Candlot = ettringite secondaire) présentant un caractère expansif.

- Action des sulfates:

Le sulfate de magnésium  $MgSO_4$  réagit avec la portlandite  $Ca(OH)_2$  et provoque la dissolution (ou lixiviation) du liant.



Le sulfate de calcium  $CaSO_4$  réagit avec l'aluminate tricalcique C3A (provenant du clinker) et conduit à la formation d'ettringite, gel expansif, d'où gonflement, fissuration et éclatement des composites cimentaires [377].



Contrairement aux autres attaques, l'agressivité des sulfates est accrue dans les climats froids [378].

En général, les mortiers subissent une chute de la résistance à la compression lors de leurs expositions dans l'eau de mer, le suivi du comportement en eau de mer des mortiers a mis en évidence des résultats prévisibles sur la sensibilité des mortiers aux attaques chimiques. En se basant sur les résultats montrés sur les figures 3.41a et 3.41b qui présentent l'effet de l'eau de mer sur l'ensemble des mortiers caoutchoutés, on constate une diminution des caractéristiques des mortiers avec l'introduction des GC, des résultats similaires ont été observés par [235] qui ont travaillé sur les composites cimentaires à base de GC.

La perte de résistance diminue avec l'incorporation des granulats de caoutchouc non traités, pour des taux de 0, 10, 20 et 30%, les pertes de résistance sont de (4.09, 3.90, 3.20 et 2.47%), (8.31, 8.26, 6.67 et 4.69%) et (13.18, 12.50, 9.88 et 7.13%) respectivement avec la durée d'immersion de (90, 180 et 270 jours) par rapport aux valeurs obtenues pendant 28 jours dans l'eau de robinet. La réduction de la résistance à la compression des mortiers de référence est légèrement supérieure à celle des mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités. Il semble que ces derniers supportent mieux l'action du milieu marin par leurs capacités de repousser l'eau bien que la résistance est diminuée [379], donc les granulats de caoutchouc restent intacts et peuvent empêcher la formation de fissures et la séparation des matériaux [358].

Avec le traitement par 10% de NaOH et d'après la figure 3.41b, les mortiers conservés dans l'eau de mer présentent des résistances supérieures à ceux des mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités, ce qui montre l'apport du traitement à améliorer l'adhérence entre la matrice de ciment et les GC traités comme affirmé par [25]. Les mortiers à base de granulats de caoutchouc traités accusent une perte allant de (4.09, 3.85, 3.07 et 2.20%), (8.31, 8.18, 6.29 et 4.14%) et (13.18, 12.21, 9.36 et 6.34%) respectivement avec la durée d'immersion de (90, 180 et 270 jours) par rapport aux valeurs obtenues pendant 28 jours dans l'eau de robinet.

Les valeurs trouvées après immersion dans l'eau de mer sont plus faibles que les valeurs trouvées après immersion dans  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , la réduction de l'agressivité de l'eau saline par rapport au sulfate est liée à la présence des chlorures, ceux-ci accroissent la solubilité du gypse et de l'ettringite qui cristallisent alors, au moins partiellement sous une forme non expansive à partir de la solution [380] et selon [381] cette faible agressivité de l'eau de mer est attribuée à l'action du dioxyde de carbone qui induit la formation d'une couche protectrice dense de carbonate de calcium à la surface du matrice cimentaire.

Les mortiers à base de déchets de brique (Figure 3.42) sont durables dans l'eau de mer, un pourcentage de DB élevé (10%) présente la résistance la plus élevée par rapport au mortier de référence et aux autres mortiers (2.5-5 et 7.5%) de DB. L'augmentation du pourcentage de DB permet de diminuer la perte de résistance aux différentes périodes d'exposition 90, 180 et 270 jours. Cette diminution est de l'ordre de (1.31, 1.05, 0.79 et 0.48%), (2.16, 1.71, 1.23 et 0.69%) et (3.47, 2.75, 2.01 et 1.15%) pour les mortiers GC0DB2.5, GC0DB5.0, GC0DB7.5 et GC0DB10 respectivement par rapport aux valeurs avant immersion dans l'eau de mer. Nous pouvons constater que la présence des déchets de brique contribue à l'amélioration de la résistance en compression grâce à la réaction pouzzolanique.

La combinaison des deux déchets (GC+DB) comme substitution partielle du sable paraît intéressante. Les résultats sont présentés dans les figures 3.43a, 3.43b et 3.43c. Dans cette partie on a fixé le taux de GC traités (10, 20 et 30%) et on a fait varier le pourcentage de fillers de DB (2.5, 5.0, 7.5 et 10%) dans le but d'optimiser le pourcentage de DB qui donne les meilleures résistances contre la pénétration de l'eau de mer.

Les résultats montrent un gain de résistance par rapport au mortier sans déchets de brique quel que soit le taux de GC substitué, les réductions de la résistance ont atteint (3.78, 3.65, 3.48 et 3.24%), (8.06, 7.77, 7.32 et 6.71%) et (11.87, 11.42, 10.78 et 9.94%) pour les mortiers GC10DB2.5, GC10DB5.0, GC10DB7.5 et GC10DB10 respectivement après 90, 180 et 270 jours d'immersion dans l'eau de mer.

Les réductions de la résistance ont atteint (2.97, 2.84, 2.64 et 2.38%), (5.99, 5.64, 5.13 et 4.54) et (8.96, 8.46, 7.75 et 6.93) pour les mortiers GC20DB2.5, GC20DB5.0, GC20DB7.5 et GC20DB10 respectivement après 90, 180 et 270 jours d'immersion dans l'eau de mer.

De plus, après 90, 180 et 270 jours d'exposition, les réductions de la résistance ont atteint (2.13, 1.96, 1.71 et 1.43%), (3.95, 3.58, 3.04 et 2.47) et (6.09, 5.54, 4.75 et 3.90) pour les mortiers GC30DB2.5, GC30DB5.0, GC30DB7.5 et GC30DB10 respectivement.

La diminution de la chaux libre  $\text{Ca(OH)}_2$  dans les mortiers avec l'augmentation de la teneur en DB est attribuée principalement à la consommation de cette chaux lors la réaction pouzzolanique, l'ajout des DB peut changer la structure des pores, faire diminuer le nombre de gros pores et augmenter celui de petits pores. Ce changement est fonction de la finesse des DB, plus les particules sont fines plus leur rôle est efficace. En revanche l'effet des granulats de caoutchouc est de stopper la propagation de fissure, l'effet double des GC et DB est ajouté, ce qui permet encore de diminuer la perte de résistance.

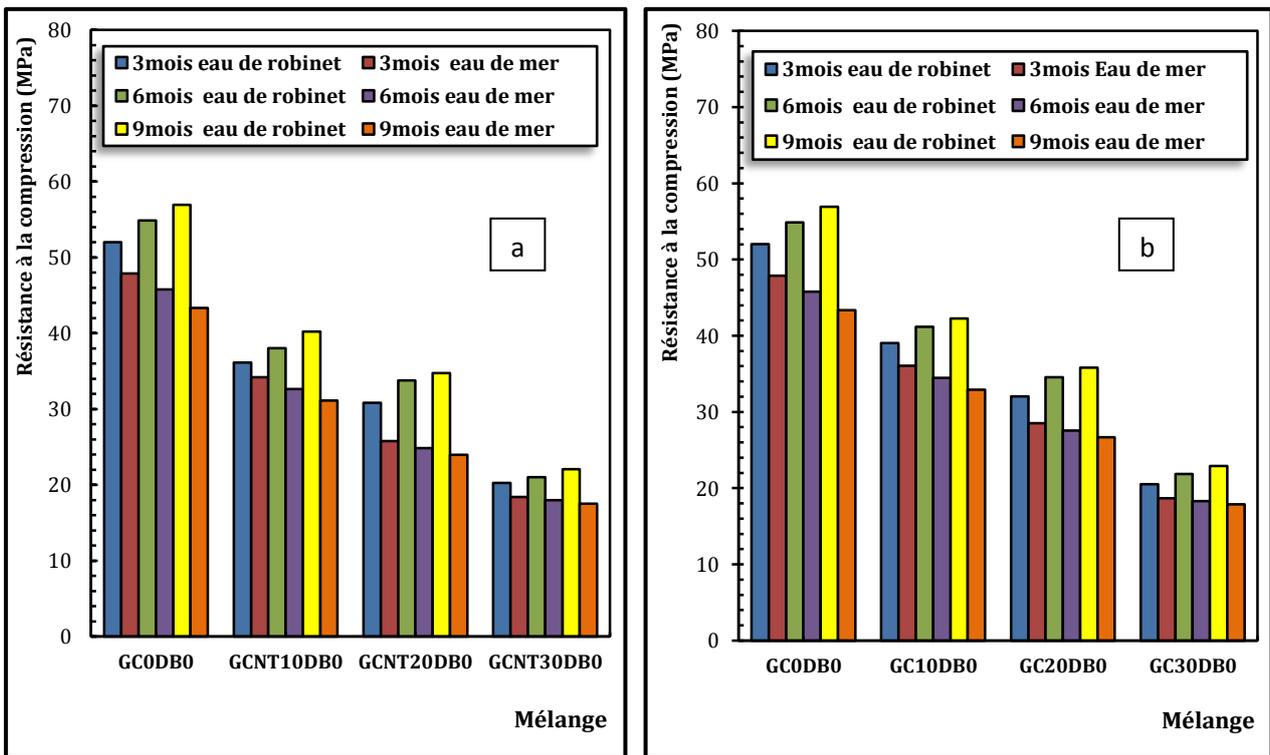


Figure 3.41: Résistance des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités après immersion dans l'eau de mer.

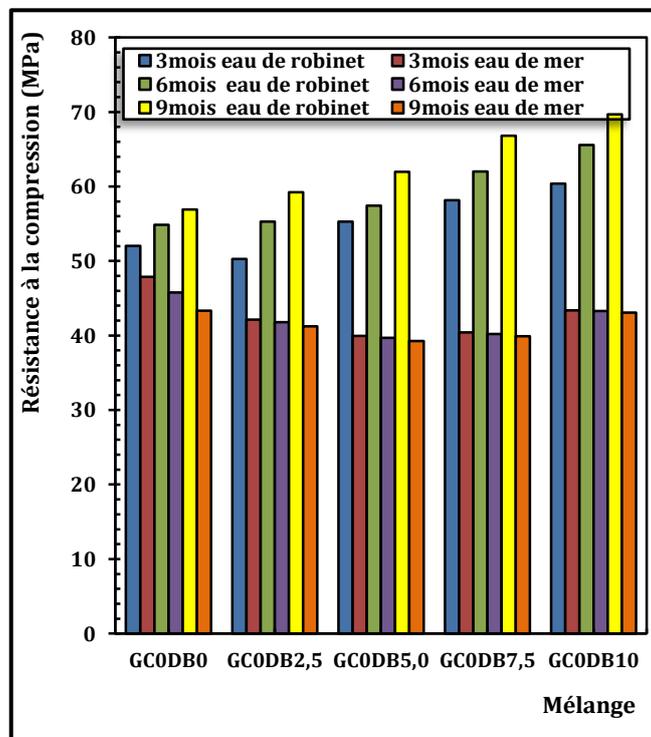


Figure 3.42: Résistance des mortiers à base de fillers de DB après immersion dans l'eau de mer.

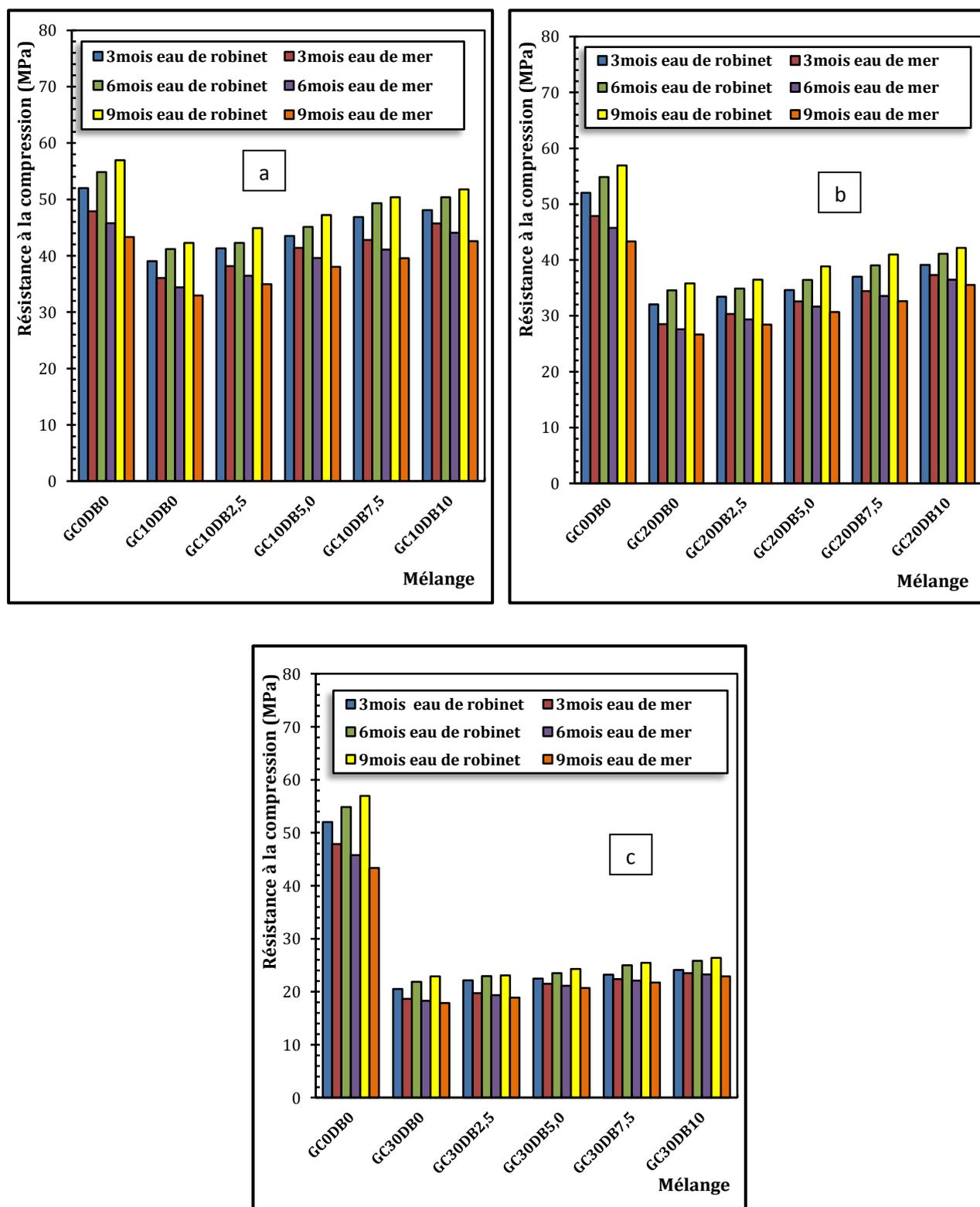


Figure 3.43: Résistance des mortiers à base de a) combinaison des GC traités (10%) et DB, b) combinaison des GC traités (20%) et DB, c) combinaison des GC traités (30%) et DB, après immersion dans l'eau de mer.

*b) Coefficient anti corrosion*

Le tableau 3.8 et la figure 3.44 illustrent les valeurs du coefficient anti corrosion des différents composites confectionnés.

**Tableau 3.8:** Coefficient anti corrosion des éco-composites d'étude (%) immergés dans l'eau de mer.

N°	Mélange	0 jours	90 jours	180 jours	270 jours
01	GC0DB0	100.00	95.91	91.69	86.82
02	GC0DB2.5	100.00	98.69	97.84	96.53
03	GC0DB5.0	100.00	98.95	98.29	97.25
04	GC0DB7.5	100.00	99.21	98.77	97.99
05	GC0DB10	100.00	99.52	99.31	98.85
06	GC10DB0	100.00	96.15	91.82	87.79
07	GC20DB0	100.00	96.93	93.71	90.64
08	GC30DB0	100.00	97.80	95.86	93.60
09	GCNT10DB0	100.00	96.10	91.74	87.50
10	GCNT20DB0	100.00	96.80	93.33	90.12
11	GCNT30DB0	100.00	97.53	95.31	92.87
12	GC10DB2.5	100.00	96.22	91.94	88.13
13	GC10DB5.0	100.00	96.35	92.23	88.58
14	GC10DB7.5	100.00	96.52	92.68	89.22
15	GC10DB10	100.00	96.76	93.29	90.06
16	GC20DB2.5	100.00	97.03	94.01	91.04
17	GC20DB5.0	100.00	97.16	94.36	91.54
18	GC20DB7.5	100.00	97.36	94.87	92.25
19	GC20DB10	100.00	97.62	95.46	93.07
20	GC30DB2.5	100.00	97.87	96.05	93.91
21	GC30DB5.0	100.00	98.04	96.42	94.46
22	GC30DB7.5	100.00	98.29	96.96	95.25
23	GC30DB10	100.00	98.57	97.53	96.10

Le coefficient anti-corrosion est lié à la résistance des mortiers aux attaques chimiques, pour le cas de l'attaque saline, une même tendance que les sulfates a été observée mais les valeurs des coefficients anti corrosion dans ce cas sont légèrement plus importantes à cause du faible effet de l'eau de mer par rapport à la solution sulfatique.

Le mortier de référence GC0DB0 enregistre le plus faible coefficient (95.91%), alors que l'incorporation des GC non traités (Figure 3.44a) ou bien traités (Figure 3.44b) donne un effet positif, donc l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc augmente la résistance des mortiers dans le milieu salin par conséquent augmente le coefficient anti corrosion. Ce dernier a atteint une valeur maximale de (97.53%) et (97.80%) pour un taux maximal de 30% de GC non traités et traités respectivement après une durée d'immersion dans l'eau de mer de 90 jours, c'est la nature élastique des GC qui a permis aux mortiers caoutchoutés de résister à l'eau de mer en empêchant la propagation des fissures.

Dans le cas des mortiers à base de DB (Figure 3.44c), un taux élevé en DB (10%) signifie un coefficient anti corrosion maximal (99.52%) après une immersion de 90 jours dans l'eau saline, la diminution du  $\text{Ca(OH)}_2$  libre résultant de l'hydratation du ciment par une réaction pouzzolanique avec les DB permet de créer un CSH secondaire qui occupe les vides inter granulaires et empêche la pénétration de la solution qui peut créer des endommagements dans les mortiers.

La combinaison de 10% à 30% de granulats de caoutchouc traités avec 2.5 à 10% de déchets de brique (Figure 3.44d, 3.44e et 3.44f), a augmenté le coefficient anti corrosion.

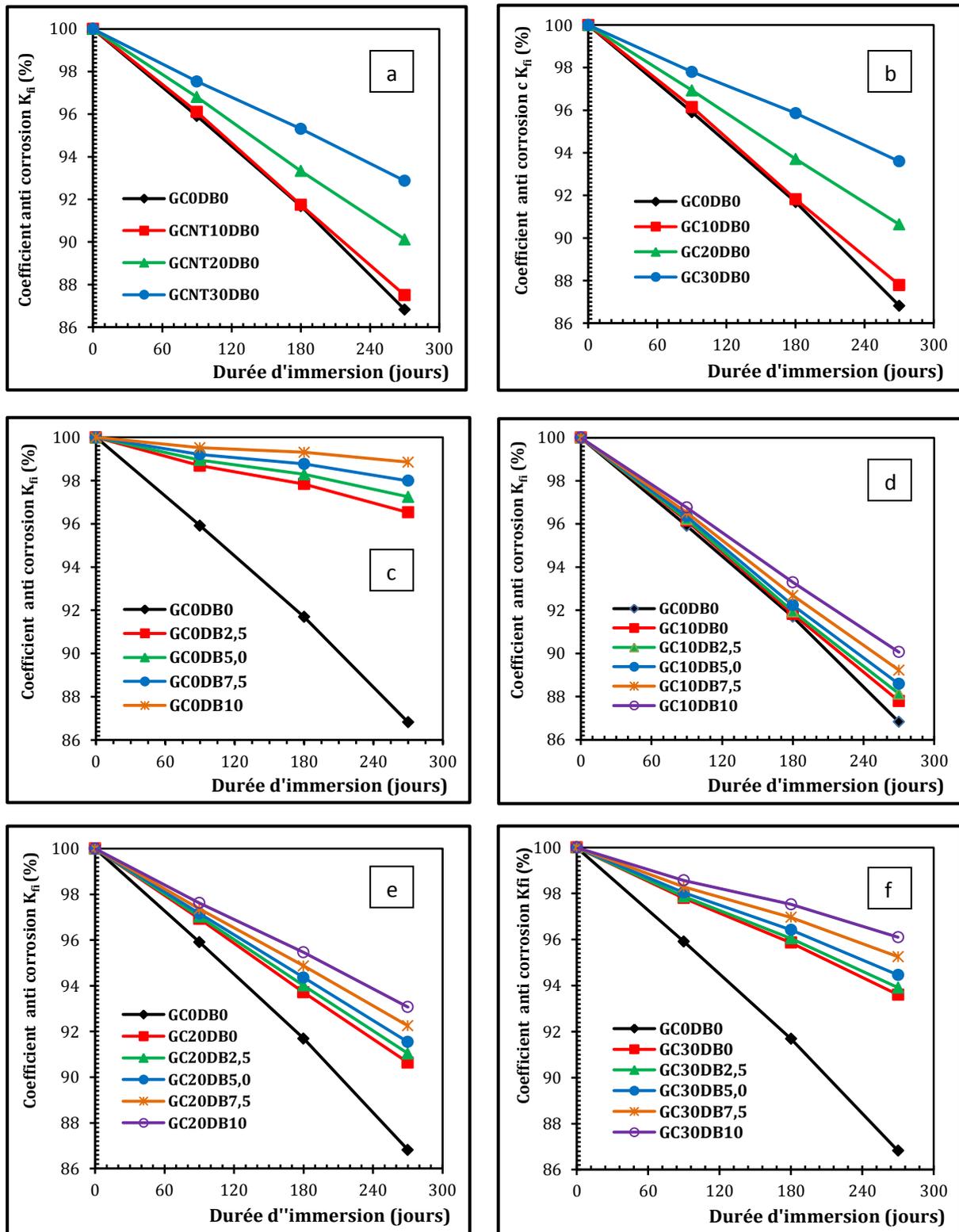


Figure 3.44: Coefficient anti corrosion des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB, dans l'eau de mer.

*c) Expansion*

La figure 3.45a montre l'effet de l'attaque de l'eau de mer sur les mortiers à base de GC non traités après 90, 180 et 270 jours d'immersion. L'incorporation en pourcentage élevé des granulats de caoutchouc réduit considérablement l'expansion à court terme et long terme par rapport au mortier de référence. Pour les mortiers contenant 10%, 20% et 30% de granulats de caoutchouc on a relevé une chute de l'expansion de (14.35%, 34.98% et 56.65%) après 90 jours d'immersion et une chute de (15.47%, 33.58% et 56.03%) et (15.48%, 33.99% et 55.02%) respectivement après 180 et 270 jours d'immersion dans l'eau de mer.

Les résultats relatifs à l'expansion des mortiers à base de granulats de caoutchouc traités par NaOH sont présentés dans la figure 3.45b. Les mortiers contenant 0 %, 10%, 20% et 30 % de granulats de caoutchouc traités présentent une expansion respectivement de 0.26%, 0.22%, 0.16% et 0.10% pour 90 jours d'immersion et une expansion de 0.53%, 0.44%, 0.35% et 0.22% à l'âge de 180 jours et une expansion de 0.76%, 0.63%, 0.49% et 0.33% à l'âge de 270 jours d'immersion, d'où une réduction de l'expansion respective par rapport au mortier de référence de 16.35%, 38.02% et 61.12% après 90 jours d'immersion. Les mêmes constatations ont été observées pour les mortiers d'étude immergées pendant 180 et 270 jours: une réduction de l'expansion par rapport au mortier de référence de l'ordre de 16.41%, 34.52% et 58.49% à l'âge de 180 jours et une réduction de 17.19%, 35.98% et 56.88% à l'âge de 270 jours. On peut constater que l'augmentation des taux de GC a un effet efficace dans la prévention de la matrice cimentaire de la prolongation du fissure. La présence des vides supplémentaires au niveau de l'interface-ciment granulats de caoutchouc non traités explique l'écart entre les valeurs d'expansion des mortiers à base de GC traités et non traités.

On remarque pour l'ensemble des éprouvettes que les mortiers se dilatent moins que ceux soumis à une solution de sulfate. Cela correspond aux observations de [382] qui affirme que le faible expansion dans l'eau de mer peut être attribuée à la solubilité accrue de l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dans l'eau de mer et que la présence de chlorures dans l'eau de mer inhibe généralement les réactions expansives associées à une attaque de sulfate [382]. La faible expansion peut également être attribuée en partie à la réaction entre CH avec  $\text{MgSO}_4$  présent dans l'eau de mer pour produire une brucite insoluble (MH) qui forme une couche protectrice à la surface du mortier [383, 384]. Cette couche est efficace pour réduire les pores inhibant ainsi la pénétration de la solution agressive d'eau de mer.

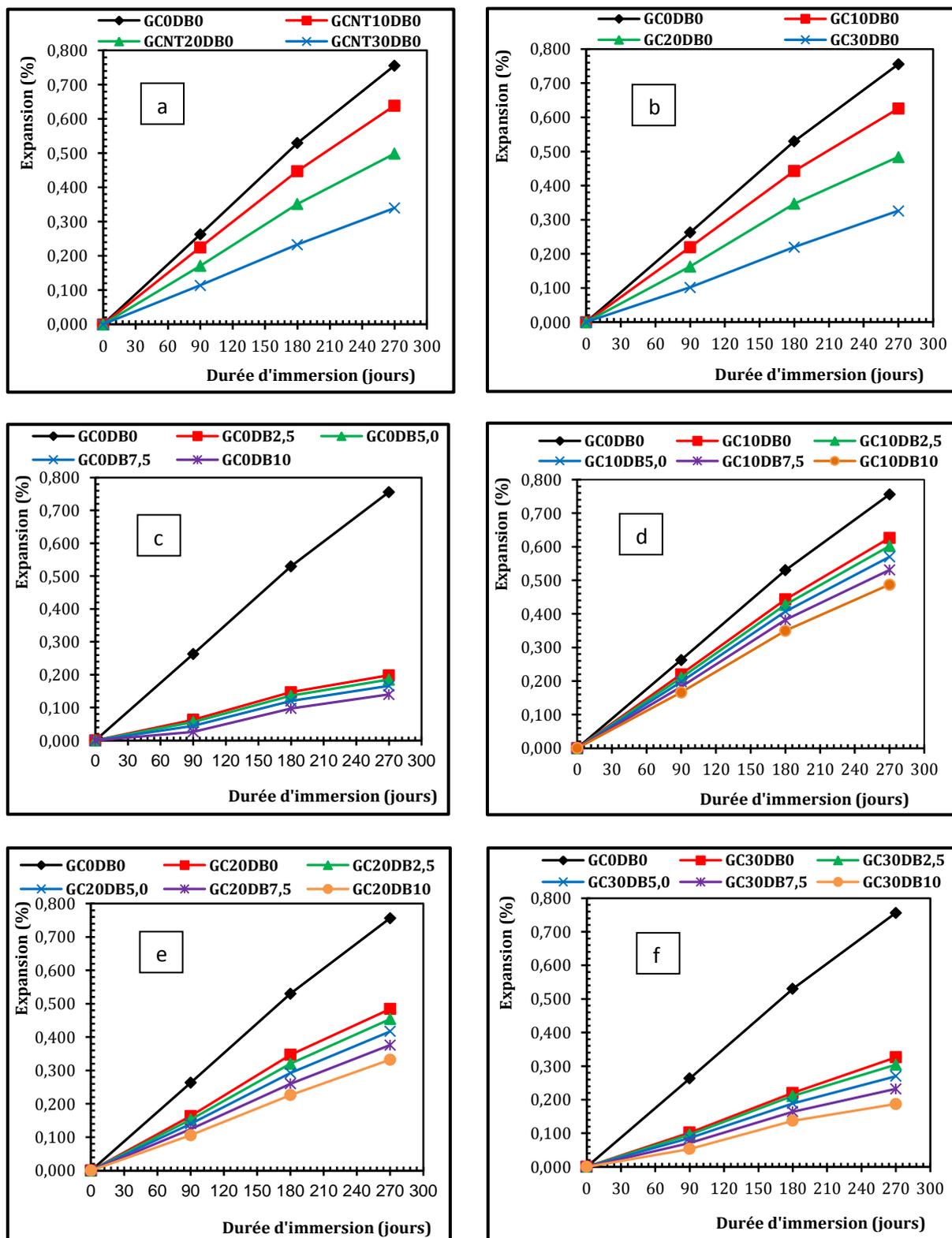
La figure 3.45c présente le comportement de l'expansion des mortiers conservés dans une solution saline. Il s'agit des résultats sur mortier de référence, mortiers à base de déchets de brique à 2.5, 5.0, 7.5 et 10% de substitution. Il faut noter que les valeurs de l'expansion pour les mortiers contenant des taux de DB variant de 2.5 jusqu'à 10% sont: 0.06, 0.05, 0.04 et

0.03% pour 90 jours d'exposition dans l'eau de mer et sont inférieures à celle du mortier de référence qui est de 0.26%. Les mêmes observations pour une durée d'immersion de 180 et 270 jours sont à noter. Par ailleurs l'expansion sur toutes les éprouvettes a continué dans son évolution jusqu'à 270 jours d'immersion justifiant la continuité de la formation d'ettringite. Il serait intéressant dans un travail d'avenir de poursuivre la durée d'immersion au-delà de 270 jours pour atteindre la stabilité de cette déformation. Ces résultats sont similaires à ceux publiés dans les travaux de [374].

Nos résultats montrent que les mortiers témoins (à différentes durées d'immersion) ont une faible capacité d'inhibition de l'expansion, contrairement aux mortiers avec des taux de 2.5, 5.0, 7.5 et surtout 10% de DB. L'explication réside dans l'effet pouzzolanique dû à la formation du CSH supplémentaire en présence des DB et dans l'effet filler dû à la finesse des DB utilisés.

L'incorporation des granulats de caoutchouc et les déchets de brique simultanément avec différents taux est traduite par une réduction de l'expansion (Figures 3.45d, 3.45e et 3.45f). Les réductions de l'expansion sont de l'ordre de (4.54 à 24.54%), (3.61 à 20.99%) et (3.83 à 22.20%) pour les mortiers GC10DB2.5 à GC10DB10 respectivement. Pour les mortiers GC20DB2.5 à GC20DB10, les réductions sont de l'ordre de (6.13 à 34.97%), (7.78 à 34.87%) et (6.20 à 31.40%) et des réductions de l'ordre de (5.88 à 48.04%), (4.09 à 37.72%) et (6.75 à 42.64%) pour les mortiers GC30DB2.5 à GC30DB10 respectivement des immersions de 90, 180 et 270 jours.

Les figures 3.46, 3.47 et 3.48 montrent les photos de différentes éprouvettes d'étude immergées dans l'eau de mer après 90, 180 et 270 jours d'immersion. Ces photos ont été prises pour évaluer les signes de détérioration extérieure des éprouvettes.



**Figure 3.45:** Expansion des mortiers à base de a) GC non traités, b) GC traités, c) DB, d) combinaison des GC traités (10%) et DB, e) combinaison des GC traités (20%) et DB, f) combinaison des GC traités (30%) et DB dans l'eau de mer.



Immersion pendant 90 jours

Immersion pendant 180 jours

Immersion pendant 270 jours

Figure 3.46: Aspect visuel des mortiers de référence dans l'eau de mer.

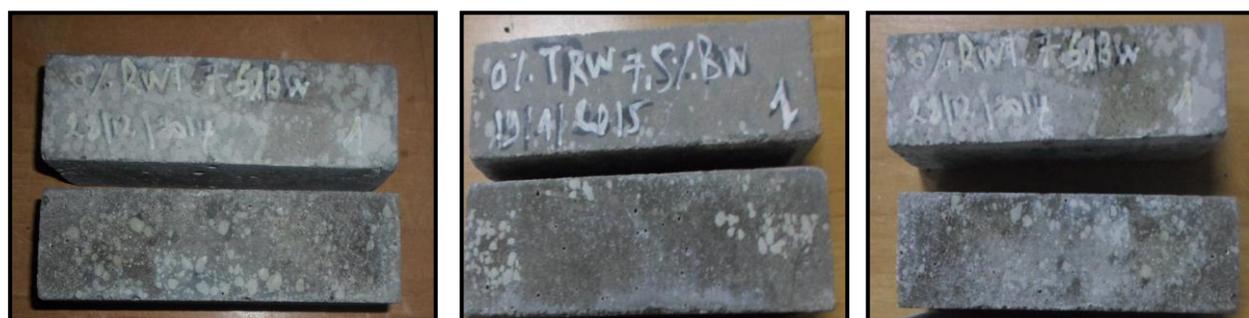


Immersion pendant 90 jours

Immersion pendant 180 jours

Immersion pendant 270 jours

Figure 3.47: Aspect visuel des mortiers à base des GC traités dans l'eau de mer.



Immersion pendant 90 jours

Immersion pendant 180 jours

Immersion pendant 270 jours

Figure 3.48: Aspect visuel des mortiers à base de fillers de DB dans l'eau de mer.

---

### III.3. CONCLUSION

- Les mortiers à base de GC subissent des diminutions dans leurs masses volumiques sèches en raison de la faible masse volumique des granulats de caoutchouc et par l'air occlus entraîné par les GC lors du malaxage.
- L'incorporation de 2.5 à 10% de DB conduit à un allègement systématique des composites en raison de la plus faible masse volumique des DB ( $2500 \text{ Kg/m}^3$ ) comparativement à celle du sable naturel substitué ( $2556 \text{ Kg/m}^3$ ).
- Les fillers de DB améliorent la masse volumique sèche des composites à base de GC seuls.
- La porosité des composites avec GC traités et non traités augmente avec l'augmentation des teneurs en GC. Ceci est lié à la nature non polaire des GC et à l'augmentation de l'air occlus généré pendant le malaxage. On doit noter une plus importante porosité dans le cas des GC non traités.
- Pour les composites à base de fillers de déchets de brique, la porosité est réduite par l'augmentation des taux de DB mis en œuvre, en raison de l'effet "filler" des DB.
- La substitution de 10% à 30% des GC non traités et traités favorise l'absorption d'eau par capillarité et par immersion totale malgré la nature hydrophobe des granulats de caoutchouc, l'apparition des fissures et l'augmentation de l'air occlus dans le mélange favorisent l'absorption d'eau et rendent le mélange caoutchouté plus sensible aux infiltrations d'eau.
- Les mortiers avec granulats de caoutchouc traités présentent toujours une absorption d'eau plus faible que les mortiers avec granulats de caoutchouc non traités, ce qui confirme que le traitement des GC apporte une contribution légèrement positive sur l'absorption par diminution de la zone de transition.
- La présence des DB finement broyés ralentit la progression d'eau par remontée capillaire et par immersion totale dans les mortiers. Ce résultat est dû à une diminution de la porosité des mortiers étudiés avec l'introduction progressive des déchets de brique.
- L'absorption d'eau par capillarité et par immersion totale dans les mortiers à base de granulats de caoutchouc et des fillers de brique combinés avec des différentes teneurs, a également été réduite. Cela est attribué à la densification de la structure par l'effet fillers de brique, ainsi qu'à leur pouzzolanité.
- Les granulats de caoutchouc non traités ont un effet préjudiciable vis-à-vis des résistances mécaniques. Ces dernières sont affaiblies par l'introduction progressive des GC non traités

---

à tous les âges. Cette chute de résistance peut s'expliquer par un développement important de la porosité en présence des GC non traités ainsi qu'à la faible adhérence entre la matrice de ciment et les GC.

- Le traitement des GC par la solution alcaline de l'hydroxyde de sodium (NaOH) a contribué effectivement à une légère augmentation des résistances mécaniques des mortiers en comparaison avec celles des mortiers à base de granulats de caoutchouc non traités.
- Une amélioration dans les résistances mécaniques des mortiers de GC fillérisés avec les DB a été notée sans toutefois atteindre les résistances mécaniques du mortier de référence.
- L'incorporation des granulats de caoutchouc pourrait permettre de relaxer les contraintes, réduisant ainsi la formation et/ou la propagation des fissures (rupture ductile) contrairement au mortier de référence GC0DB0 et les mortiers à base de DB qui subissent une rupture fragile.
- Une nette diminution de la vitesse de propagation ultrasonore dans les mortiers à base de GC traités et non traités a été observée, ce qui prouve la capacité des GC à atténuer les ondes ultrasonores et à amortir les vibrations.
- L'incorporation d'un taux maximum de DB (10%) au mélange s'avère efficace vis-à-vis de la propagation des ondes ultrasonores puisqu'il entraîne une augmentation maximum de la compacité.
- L'introduction des GC s'accompagne par l'augmentation du retrait de séchage à tous les âges en comparaison avec les mélanges sans granulats de caoutchouc, cela est dû à la teneur en air introduite plus élevée. Ce comportement est contraire dans le cas des mortiers à base de DB.
- Une augmentation de la perméabilité à l'eau et à l'air a été mise en évidence. Ceci montre qu'une porosité élevée a été générée et qu'un réseau de microfissures interconnectées a été créé permettant un flux rapide de l'air et de l'eau.
- L'introduction des fillers de DB dans les mortiers élaborés a conduit à une réduction de la profondeur de pénétration de l'eau et de la perméabilité à l'air: la formation d'un gel C-S-H de 2ème génération et le remplissage des pores capillaires du mortier sont les principales raisons de cette diminution.
- L'utilisation des granulats de caoutchouc améliore la durabilité des mortiers dans les environnements acide, sulfatique et saline. Cette amélioration est traduite par une baisse des pertes de poids, des pertes de résistances et de l'expansion. Les pertes sont

proportionnelles au pourcentage de substitution du sable naturel par les GC. Les GC présents dans le mortier empêchent la progression des fissures.

- Les DB améliorent la durabilité des mortiers vis-à-vis des attaques par les sulfates, les acides et l'eau de mer. Ceci peut être expliqué par la réaction pouzzolanique qui fixe la chaux libérée de l'hydratation du ciment, permettant une réduction des pores capillaires et la formation des gels CSH supplémentaires.
- En combinant les deux déchets GC et DB, nous pouvons conclure, qu'à des teneurs en GC et DB déterminées, il est possible d'obtenir une amélioration des différentes caractéristiques physico-mécaniques et de durabilité des mortiers. Les effets bénéfiques de l'un permettent de compenser les inconvénients que pourraient présenter l'autre.

*Chapitre IV*

**Mortier résineux de  
granulats de  
caoutchouc et de fillers  
de déchets de brique**

# Chapitre IV

## *Mortier résineux de granulats de caoutchouc et de fillers de déchets de brique*

---

### IV.1. INTRODUCTION

Dans le présent chapitre, nous exposons les résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur les mortiers incorporant les granulats de caoutchouc et déchets de brique renforcés par une résine aqueuse, conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre II de ce mémoire. Une analyse et une discussion des résultats, suivies d'une comparaison avec ceux recueillis dans la littérature, y sont également présentées.

En fait, cette étape de l'étude constitue la suite de celle présentée aux chapitres 2 et 3. L'objectif étant une tentative d'amélioration de certaines performances physiques et mécaniques des composites étudiés précédemment, à base des deux déchets (GC et DB) incorporés dans une matrice cimentaire non renforcée.

Selon [123], l'introduction de la résine améliore la liaison entre le granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire et par suite participe à l'amélioration de certaines caractéristiques du composite dans lequel elle est incorporée.

### IV.2. FORMULATION DES MORTIERS D'ETUDE

Le tableau 4.1 qui suit présente les 10 compositions d'étude renforcées par la résine aqueuse. Nous devons noter que ces compositions concernent:

- Un mortier résineux à base de granulats de caoutchouc seulement à des proportions de 10% (GC10DB0), 20% (GC20DB0) et 30% (GC30DB0).
- Un mortier à base de déchets de brique seulement à des proportions de 2.5% (GC0DB2.5), 5.0% (GC0DB5.0), 7.5% (GC0DB7.5), 10% (GC0DB10.0).

- Un mortier résineux composé à base de GC et de DB combinés. Une quantité moyenne de GC (20%) ainsi que des taux moyens de DB (5% et 7.5%) ont été adoptés pour préparer les mortiers d'étude. Les mortiers composés sont désignés par GC20DB5.0 et GC20DB7.5.
- Un mortier de référence servant à la comparaison, ne comportant ni GC ni DB.

Il faut noter enfin que le taux de concentration de la résine aqueuse adopté dans ce travail est de 7% du poids de ciment.

**Tableau 4.1:** Composition des mortiers adoptés renforcés par la résine aqueuse (kg/m<sup>3</sup>).

N°	Mortiers	C	SN	E	GC	DB	ST	SP	R
01	GC0DB0	500	1400.00	250	0	0	0.0	07.00	00
02	GC10DB0	500	1260.00	250	51.14	0	0.5	11.00	35
03	GC20DB0	500	1120.00	250	102.28	0	0.5	11.50	35
04	GC30DB0	500	980.00	250	153.34	0	0.5	11.50	35
05	GC0DB2.5	500	1365.00	250	0	34.11	0.5	12.50	00
06	GC0DB5.0	500	1330.00	250	0	68.23	0.5	12.50	00
07	GC0DB7.5	500	1295.00	250	0	102.34	0.5	12.50	00
08	GC0DB10	500	1260.00	250	0	136.45	0.5	12.50	00
09	GC20DB5.0	500	1067.60	250	102.28	54.58	0.5	12.50	35
10	GC20DB7.5	500	1041.00	250	102.28	81.87	0.5	12.50	35

Nomenclature: C= Ciment, SN= Sable naturel, E= Eau de gâchage, GC= Granulats de caoutchouc, DB= Déchets de brique, ST= Stabilisant, SP= Superplastifiant, R= Résine aqueuse.

### IV.3. RESULTATS ET INTERPRETATION DES RESULTATS

#### 3.1. Caractéristiques à l'état frais

Il s'agissait de vérifier que tous les mélanges étudiés avaient une consistance plastique. Le tableau 4.2 et la figure 4.1 permettent de vérifier et de conclure que tous les mélanges ont un étalement de 16±2 cm à la table secousses et par suite une consistance plastique comparable.

Tableau 4.2: Valeurs d'étalement à la table à secousses des mortiers renforcés par la résine

N°	Formulation	Etalement (E) en cm	Moyenne en cm
01	GC0DB0	18.20	16 ± 2
02	GC10DB0	16.55	
03	GC20DB0	16.65	
04	GC30DB0	16.90	
05	GC0DB2.5	15.23	
06	GC0DB5.0	15.42	
07	GC0DB7.5	14.33	
08	GC0DB10	14.10	
09	GC20DB5.0	16.20	
10	GC20DB7.5	16.30	

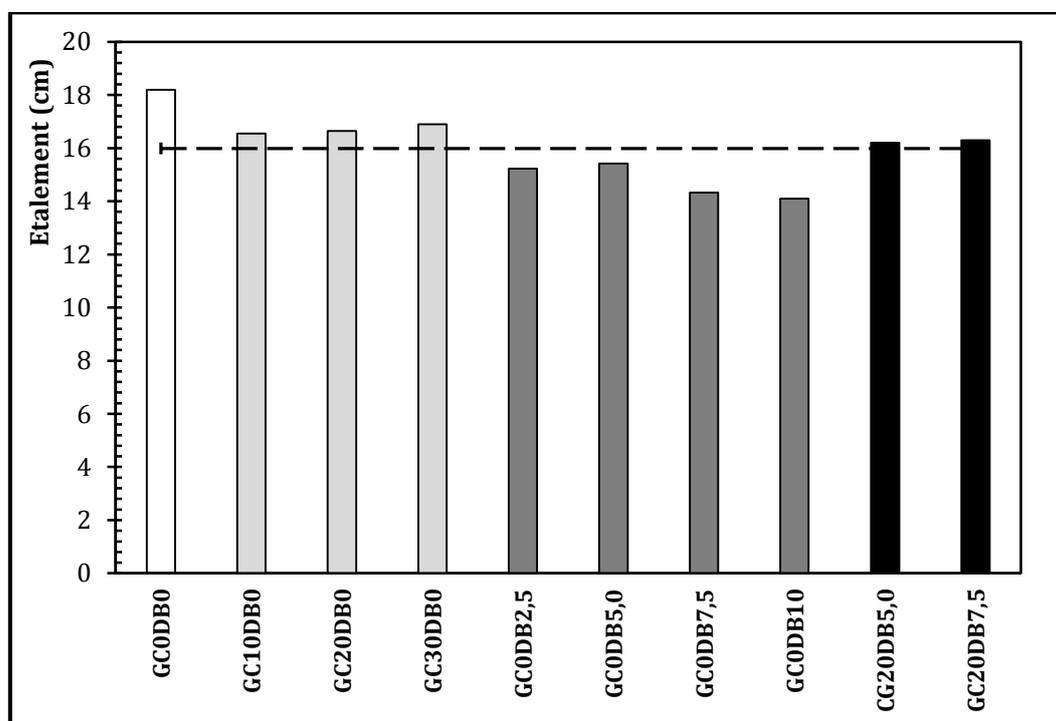


Figure 4.1: Etalement des mortiers d'étude.

La ligne horizontale discontinuée représente la moyenne des étalements à la table à secousses.

### 3.2. Caractéristiques à l'état durci

#### 3.2.1. Masse volumique à l'état durci (Masse volumique sèche)

Toutes les valeurs de la masse volumique sèche des éprouvettes testées sont présentées dans l'histogramme de la figure 4.2, qui est divisée en 4 parties: la première partie correspond au mortier de référence, la deuxième partie au mortier de caoutchouc, la troisième au mortier de déchets de brique et la quatrième partie au mortier composé (combinaison de caoutchouc et de déchets de brique).

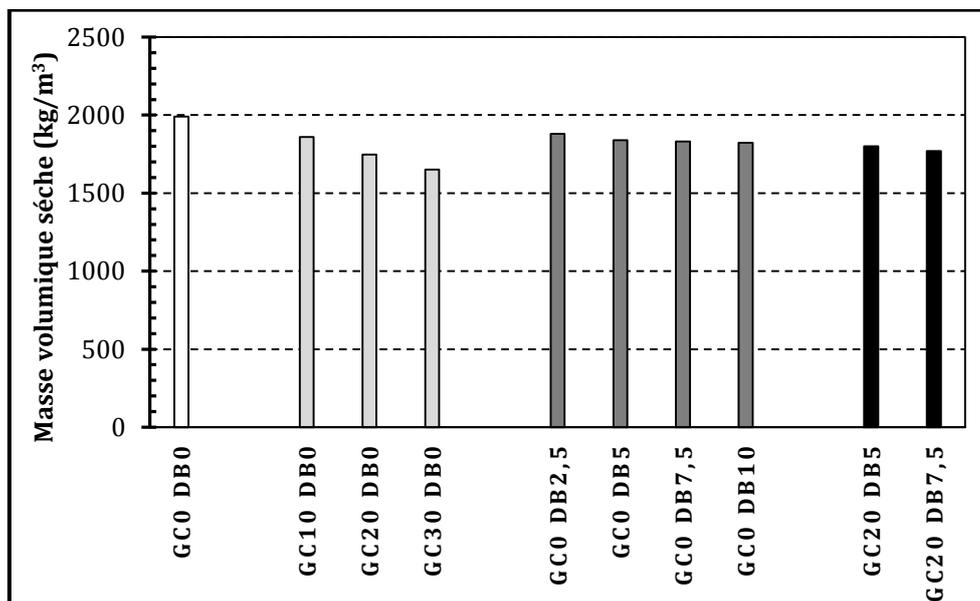


Figure 4.2: Masse volumique sèche des mortiers d'étude.

On peut noter, dans la deuxième partie de la figure, que la masse volumique sèche diminue de  $1990 \text{ kg/m}^3$  (mortier de référence) à  $1650 \text{ kg/m}^3$  pour le mortier GC30DB0, soit une réduction d'environ 17% par rapport au mortier de référence, attribuable à la faible densité absolue des granulats de caoutchouc (0.94). De plus, une augmentation de la teneur en caoutchouc augmente la teneur en air, qui réduit à son tour la masse volumique sèche des éprouvettes [24].

Dans un autre travail [167], les auteurs ont mesuré, à l'aide de la méthode de pression, l'entraînement d'air d'échantillons de mortier de caoutchouc contenant des granulats de caoutchouc allant de 0% à 50% en volume. Ils ont observé que l'augmentation des granulats de caoutchouc tend à augmenter le niveau d'air entraîné de 2% à 17%. Lorsque le caoutchouc est ajouté au mélange, il peut attirer l'air car il a tendance à repousser l'eau. Des observations similaires ont également été constatées par d'autres auteurs [20, 21, 385].

L'effet de la substitution des sables naturels par des déchets de brique sur la masse volumique sèche du mortier peut être observé sur la troisième partie de la figure 4.2. On constate que cette caractéristique diminue de  $1990 \text{ kg/m}^3$  pour le mortier de référence à  $1823 \text{ kg/m}^3$  pour les mortiers contenant 10% de déchets de brique avec l'augmentation de la teneur en déchets de brique. Une diminution de seulement 8.40% a été enregistrée en raison de la faible différence entre la densité absolue du sable ( $2.56$ ) et celle des déchets de brique ( $2.50$ ).

Dans la quatrième partie de la figure 4.2, les valeurs de la masse volumique sèche correspondant au mortier (GC-DB) sont présentées. Ceux-ci sont de  $1800 \text{ kg/m}^3$  et  $1770 \text{ kg/m}^3$  pour les GC20DB5.0 et GC20DB7.5 respectivement et sont inférieurs de 9.55% et 11.16% comparés à ceux du mortier de référence GC0DB0 qui est de  $1990 \text{ kg/m}^3$ .

Par ailleurs on peut noter (Figure 4.3) que la réduction de la masse volumique sèche par rapport à la quantité de granulats de caoutchouc semble être linéaire avec un facteur de corrélation satisfaisant ( $R^2 = 0.996$ ).

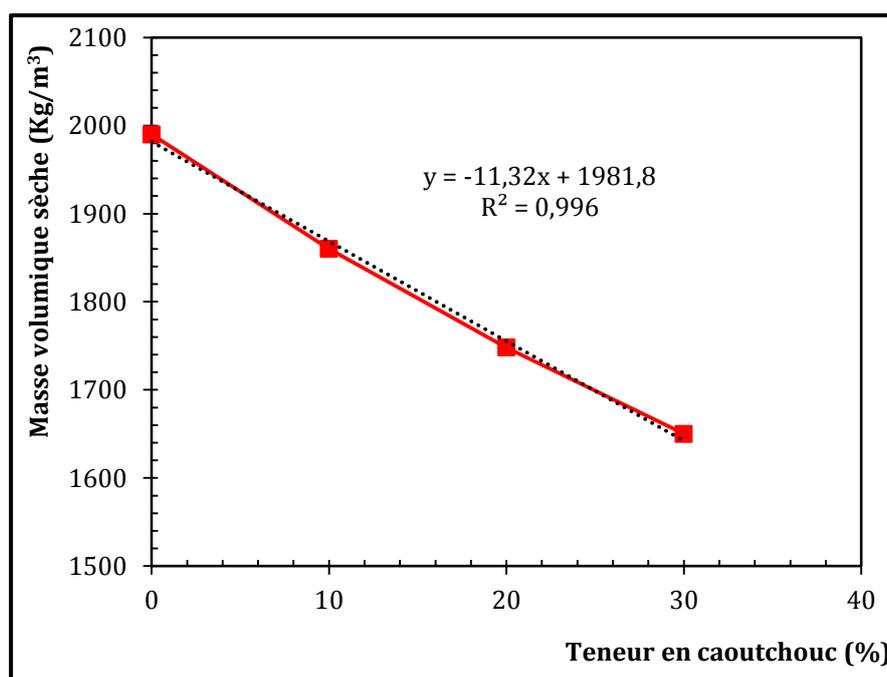


Figure 4.3: Masse volumique sèche en fonction de la teneur en granulats de caoutchouc.

D'autre part, dans la figure 4.4 la réduction de la masse volumique sèche par rapport aux différents taux de déchets de brique semble être linéaire avec un facteur de corrélation satisfaisant ( $R^2 = 0.9541$ ).

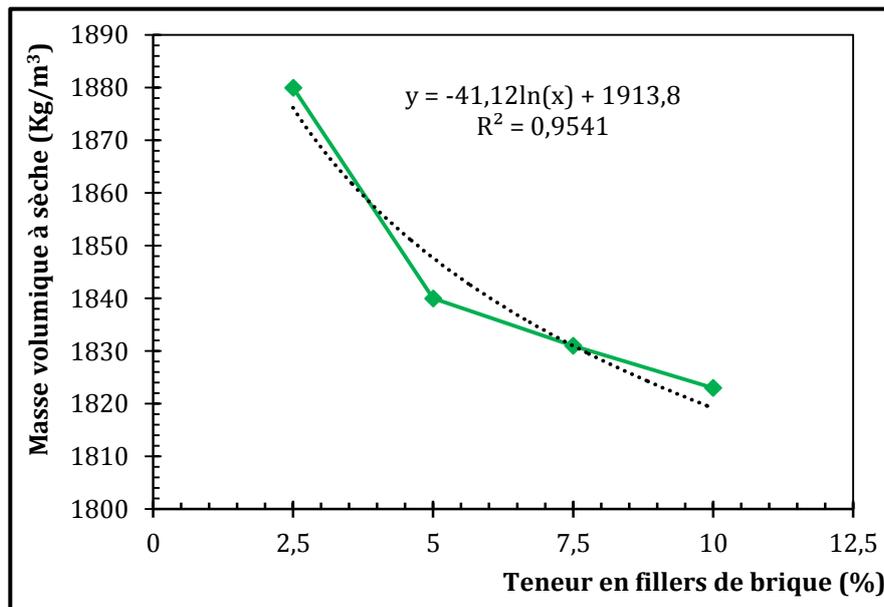


Figure 4.4: Masse volumique sèche en fonction de la teneur en déchets de brique.

On peut conclure que la masse volumique à sèche du mortier composé (GC-DB) constitue un compromis entre ceux des mortiers GC et DB séparés.

### 3.2.2. Résistance à la compression et à la flexion

Les résistances à la compression ( $R_c$ ) à 28 jours à la flexion ( $R_f$ ) à 28 jours en fonction du pourcentage volumique des GC sont présentées dans la figure 4.5.

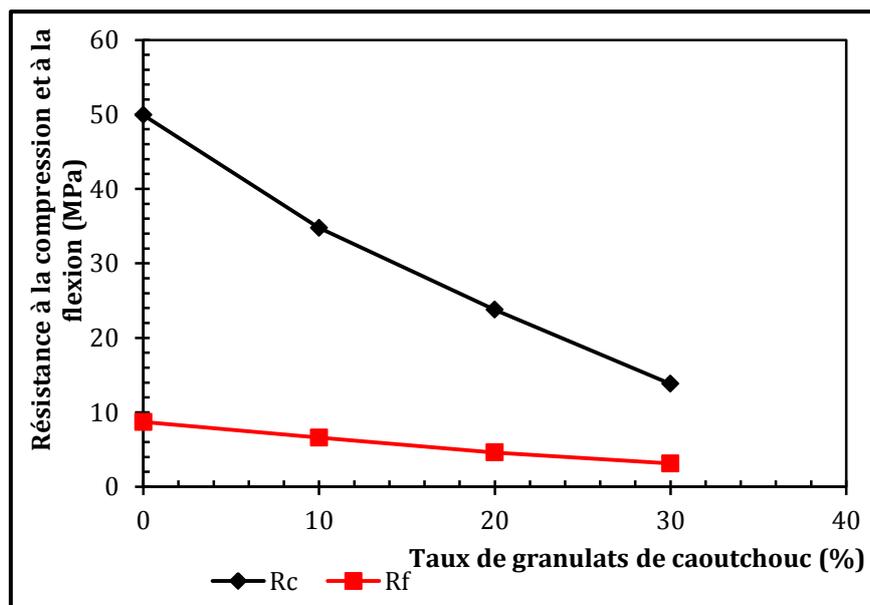


Figure 4.5: Effet des granulats de caoutchouc sur la résistance du mortier à 28 jours.

Les résultats indiquent que l'incorporation des GC provoque des pertes importantes sur la résistance avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc, aussi bien en compression qu'en flexion. Il est à noter que dans la plage étudiée de substitution des sables naturels par les GC, les pertes dans  $R_{c28}$  sont plus importantes que dans  $R_{f28}$ , en particulier dans le cas du mortier GC20DB0 (quantité moyenne des GC) où celles-ci ont atteint 52% et 47% respectivement par rapport au mortier de référence GC0DB0.

La perte de résistance est généralement attribuée à la mauvaise liaison entre les particules de caoutchouc et la matrice de ciment. Une étude antérieure sur les caractéristiques mécaniques du mortier composé des granulats de caoutchouc [28] a rapporté la diminution de la résistance et de la rigidité du mortier de caoutchouc par augmentation de la quantité de caoutchouc dans les mélanges. Les auteurs ont indiqué que la raison principale est que le caoutchouc est un matériau élastique, la pâte de ciment est un matériau fragile, et donc le mélange des deux composants n'a pas une bonne compatibilité sous chargement, ce qui conduit à la faible résistance et à la faible rigidité. Selon une autre étude [386], la diminution de résistance pourrait être due à la plus faible résistance à la compression des granulats de caoutchouc comparativement à celle de la matrice de ciment.

La figure 4.6 montre la variation de la résistance à la compression et à la flexion à 28 jours à divers volumes d'incorporation de fillers de déchets de brique en remplacement du sable naturel. Chaque point de données représente la moyenne de 3 tests.

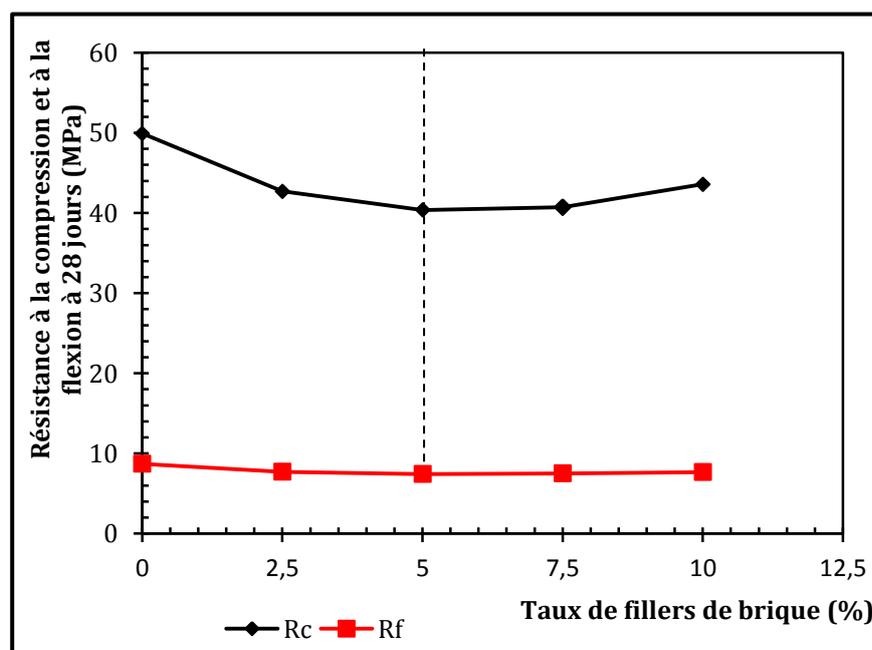


Figure 4.6: Effet des fillers de brique sur la résistance du mortier à 28 jours.

On peut constater, pour les deux caractéristiques, une diminution progressive avec l'augmentation de la teneur en fillers de brique jusqu'à 5%, puis une augmentation sans symétrie jusqu'à 10% de fillers de brique passant par un pic de compression inférieur de 40.37MPa et d'un pic de flexion inférieur de 7.43 MPa.

Lorsque les résultats sont comparés, il semble que les valeurs sont toutes proches les unes des autres, ce qui confirme que l'incorporation des fillers de brique induit une faible diminution de la performance mécanique dans la plage des taux adoptés: une moyenne de 18.17% en flexion et 16.18% en compression à 28 jours. On peut conclure avec prudence que la rigidité de la partie du sable naturel remplacée pourrait être compensée par l'activité pouzzolanique fournie par la très fine portion des fillers de brique. Ce dernier est considéré comme un matériau pouzzolanique puissant [387].

Afin de comparer l'effet combiné des GC et de DB en substitution du sable naturel avec leurs effets séparés, les données expérimentales relatives aux résistances à la compression et à la flexion développées à 28 jours par tous les mélanges ont été regroupées dans l'histogramme de la figure 4.7 qui suit.

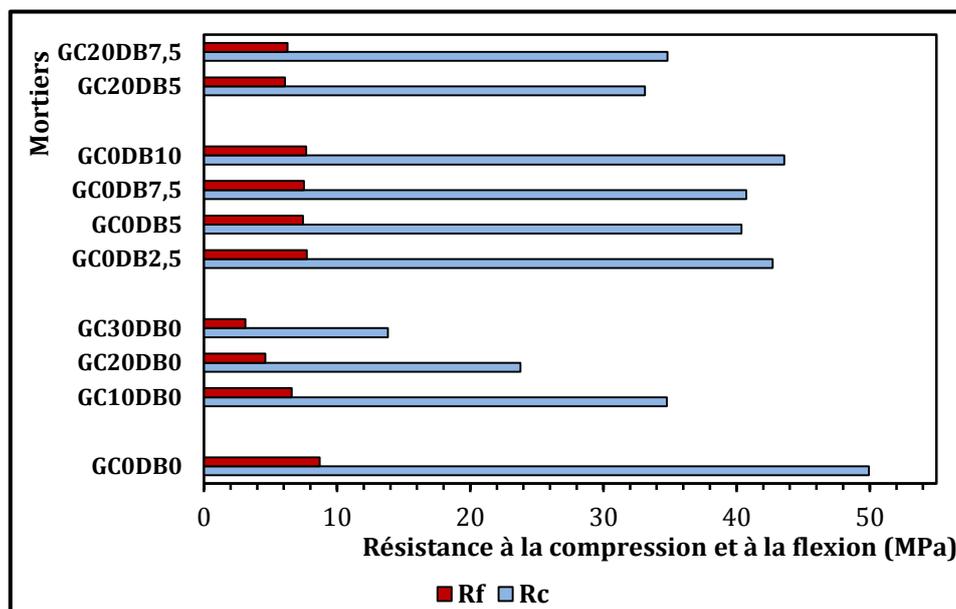


Figure 4.7: Effet de l'incorporation combinée de GC et de DB sur la résistance du mortier à 28 jours.

L'effet combiné des granulats de caoutchouc et des fillers de déchets de brique sur les caractéristiques mécaniques a été évaluée à travers les essais réalisées sur les mortiers GC20DB5.0 et GC20DB7.5. Ces mortiers contiennent en effet un taux moyen de GC (20%) et deux taux moyens de DB (5.0% et 7.5%). Les résultats expérimentaux ont révélé que les résistances mécaniques  $R_{c28}$  et  $R_{f28}$  sont plus élevées que ceux des mélanges contenant

uniquement des GC. La perte dans les résistances induite par l'introduction des GC a été partiellement récupérée par l'incorporation des fillers de DB

En comparaison avec les résistances à la compression et à la flexion à 28 jours des mélanges de référence GC0DB0 qui étaient respectivement de 49.92 MPa et 8.70 MPa, celles de GC20DB7.5 étaient respectivement de 34.80 MPa et 6.29 MPa, c'est-à-dire une perte respective de 30.28% et 27.70%. On peut conclure que la perte de la résistance à la compression et à la flexion à 28 jours du mortier de caoutchouc peut être sensiblement minimisée par l'introduction de fillers de brique en raison de leur capacité à compacter les mélanges et à leur pouzzolanité. Cette explication est fournie avec précaution avant une investigation approfondie sur la microstructure de ce matériau écologique.

### 3.2.3. Retrait

Généralement, le retrait intrinsèque de la pâte de ciment durci est la source du retrait du mortier, mais il est réduit par la quantité et la qualité de l'agrégat fin et grossier [388]. Il est connu également que pour une même formulation, le retrait dépend de l'origine des granulats [389] et de leurs raideurs [390]. Dans ce travail, l'effet du granulat de caoutchouc (GC), des fillers de brique (DB) et de la combinaison des deux a été examiné. Les résultats en fonction du temps des mesures de retrait sont présentés dans les Figures 4.8 à 4.10.

La figure 4.8 présente l'effet de l'incorporation des GC sur les mortiers résineux à 10%, 20% et 30% de la substitution du volume sable naturel.

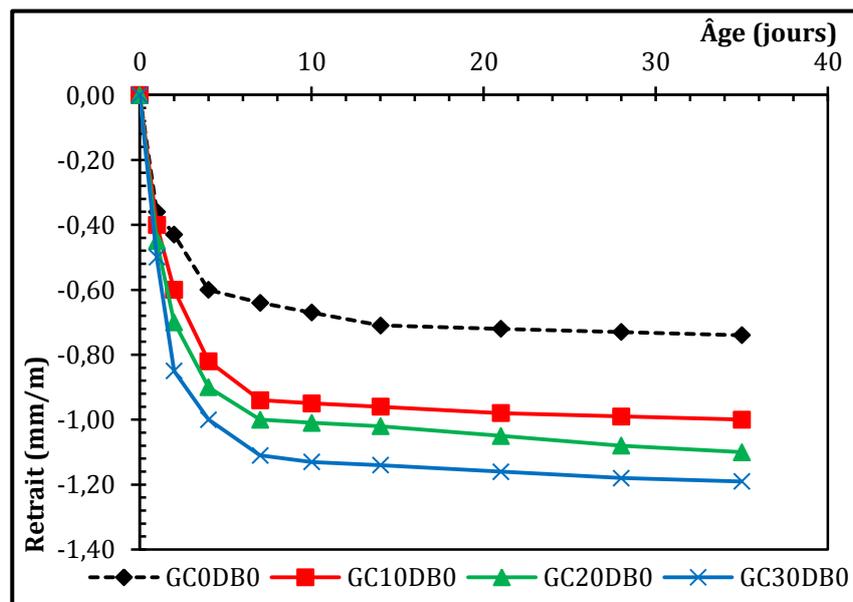


Figure 4.8: Effet de l'incorporation de granulats de caoutchouc sur le retrait de mortier.

On constate clairement que le retrait augmente avec le temps pour tous les mortiers par rapport au mortier de référence (GC0DB0) et à tous les âges. Des résultats similaires ont été obtenus dans d'autres travaux et expliqués par: la faiblesse du module d'élasticité du granulat de caoutchouc [131], sa nature déformable [28] et par sa nature élastique qui amortit les contraintes aux déformations du matériau [42]. Par ailleurs, une tendance similaire des courbes est notée.

D'autre part, le retrait à l'âge de 35 jours a atteint les valeurs de 1.00 mm/m (GC10DB0), 1.10 mm/m (GC20DB0) et 1.19 mm/m (GC30DB0), c'est-à-dire une augmentation d'environ 34%, 49% et 61% respectivement par rapport à celui du mortier de référence (GC0DB0) qui était de 0.74 mm/m. L'essentiel de cette augmentation a été atteint à l'âge de 7 jours, soit environ 9/10 par rapport au retrait total atteint à 35 jours par chaque mélange.

En revanche, les mortiers à base de fillers de DB et l'absence de GC développent moins de retrait. La figure 4.9 montre une diminution du retrait à tous les âges, à mesure que la teneur en brique broyée augmente. Ceci est probablement dû à une éventuelle réaction pozzolanique. Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés par Bektas et al [65]. Après une étude expérimentale similaire, Khatib [62] a également conclu que les particules de brique peuvent agir comme un agent auto-durcissant (self-curing): elles maintiennent l'eau de mélange initialement absorbée dans leurs pores pendant de longues périodes et la libèrent lentement dans le temps.

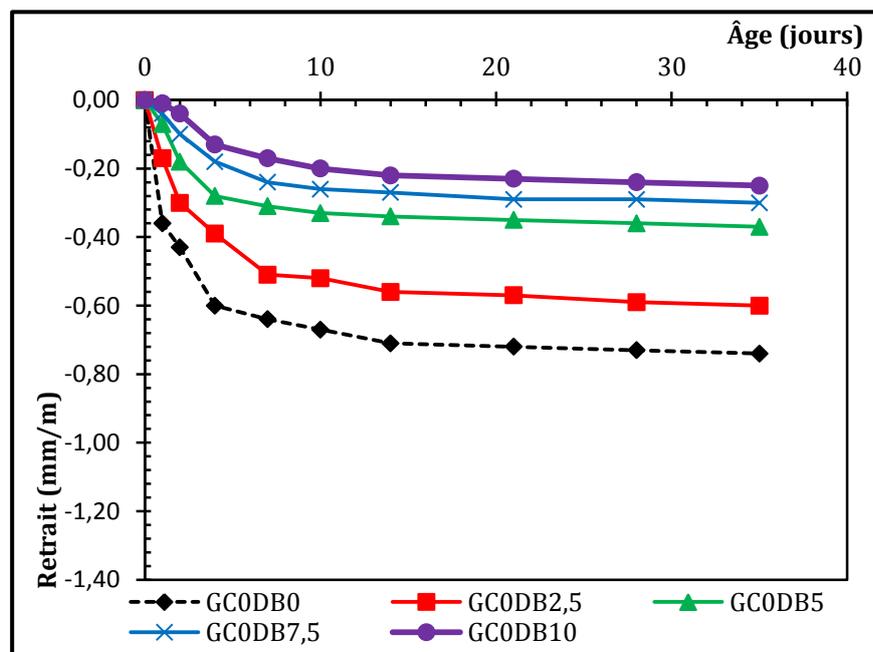


Figure 4.9: Effet de l'incorporation du fillers de brique sur le retrait du mortier.

La figure 4.10 présente les résultats de l'effet combiné de l'incorporation des GC et des DB sur le retrait du mortier. Sur la base de ces résultats, il est établi que l'incorporation combinée des GC et des DB a un effet positif sur le retrait du mortier résineux. Il diminue à tous les âges par rapport à celui du mortier de référence GC0DB0. Par exemple, la diminution du retrait à 35 jours représente environ 11% et 5% pour les mélanges GC20DB5.0 et GC20DB7.5 respectivement. L'introduction des fillers de brique apporte un effet global positif au mortier de caoutchouc-ciment-brique malgré l'effet préjudiciable de l'incorporation des granulats de caoutchouc.

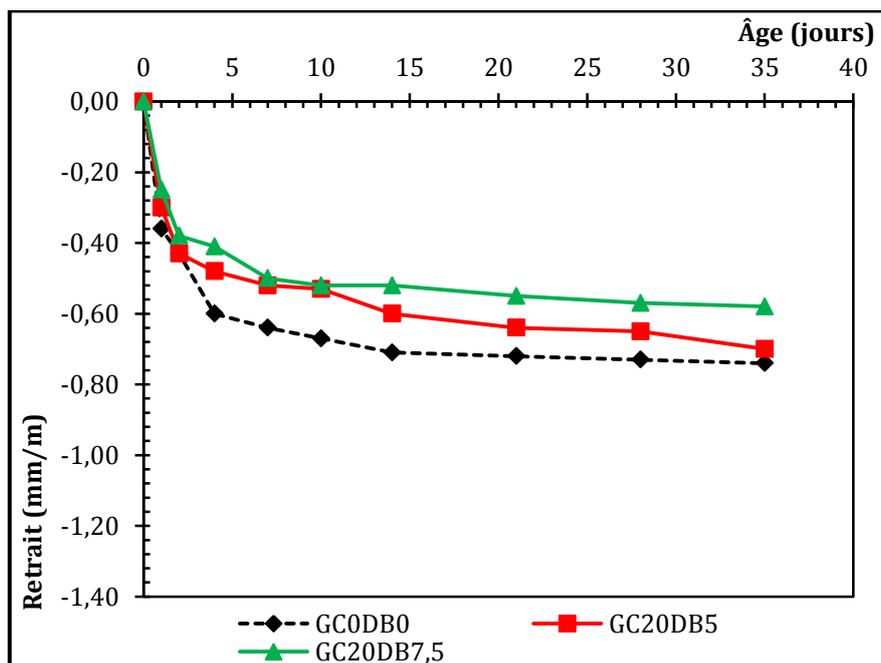


Figure 4.10: Effet combiné des GC et des DB sur le retrait du mortier résineux.

### 3.2.4. Absorption d'eau par capillarité

Les figures 4.11, 4.12 et 4.13 montrent les quantités d'eau cumulées par unité de surface soumise à l'absorption (i) par rapport à la racine carrée du temps ( $t^{1/2}$ ) pour les mortiers contenant :

- Les GC seulement (Figure 4.11).
- Les DB seulement (Figure 4.12).
- Les mélanges de GC-DB (Figure 4.13).

Une baisse générale de la quantité d'eau absorbée a été observée. Dans tous les cas, les courbes se composent de deux portions linéaires avec un point d'inflexion à  $t^{1/2} = 170.41 \text{ s}^{1/2}$ ,

c'est-à-dire environ 8h après l'exposition des éprouvettes dans l'eau. Ce point peut correspondre à l'instant du début de l'effet de la gravité de l'eau absorbée.

La figure 4.11 relative au mortier avec les granulats de caoutchouc seulement, montre que les granulats de caoutchouc (GC) abaissent la quantité d'eau absorbée au fur et à mesure que le taux de GC augmente, étant donné que les granulats de caoutchouc sont hydrophobes. Ce comportement prévisible a déjà été signalé par d'autres chercheurs [25, 43]. Après 8h d'exposition, la quantité d'eau absorbée par les mortiers GC10DB0, GC20DB0 et GC30DB0 diminue respectivement de 22.26%, 37.14% et 55.71% par rapport à celle du mortier de référence GC0DB0. La présence des granulats de caoutchouc tend ainsi à ralentir la montée de l'imbibition capillaire et diminuer la quantité d'eau absorbée.

La figure 4.12 présente les résultats d'essai réalisés sur le mortier contenant uniquement les fillers de déchets de brique (DB). Ils indiquent que l'introduction de fillers de DB réduit considérablement l'absorption d'eau (une réduction moyenne de 64% a été observée après 8 h d'exposition dans l'eau). Cependant, la quantité de DB mis en œuvre dans cette étude (de 0 à 10%) ne semble pas être très significatif puisque la différence moyenne de la quantité d'eau absorbée entre les uns et les autres était de 8.25% seulement (au terme des 8 premières heures d'exposition dans l'eau).

Lorsque les granulats de caoutchouc et les fillers de brique ont été incorporés dans le mortier avec des teneurs moyennes, l'absorption d'eau a également été réduite, comme le montre la figure 4.13. Après 8 h d'exposition, la réduction était de 17.14% dans GC20DB5.0 et de 35.71% dans GC20DB7.5. Cependant, quand on compare les réductions dans les différents mortiers élaborés, on ne peut pas tirer de conclusion évidente quant à l'effet combiné des GC et des DB.

Les coefficients de sorptivité (S) déterminés comme étant la pente de chaque courbe pendant la période initiale d'exposition à l'eau, c'est-à-dire la pente des courbes des figures 4.14, 4.15 et 4.16, sont listées dans le tableau 4.3.

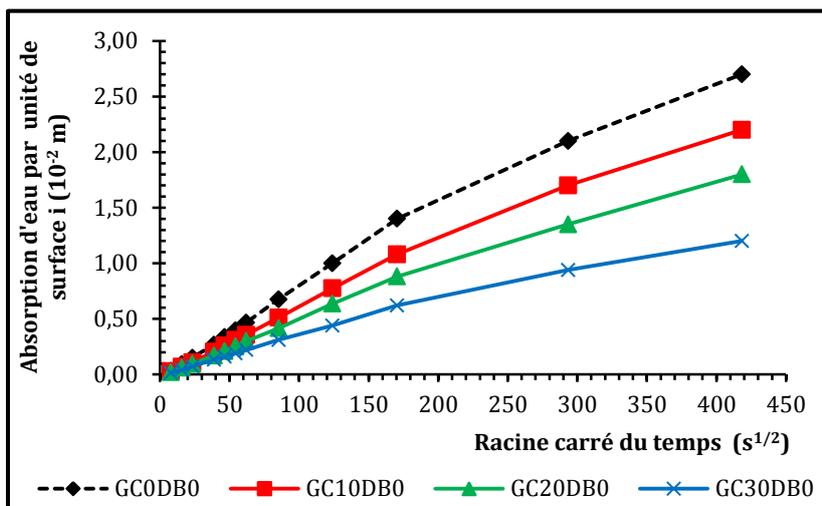


Figure 4.11: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de GC.

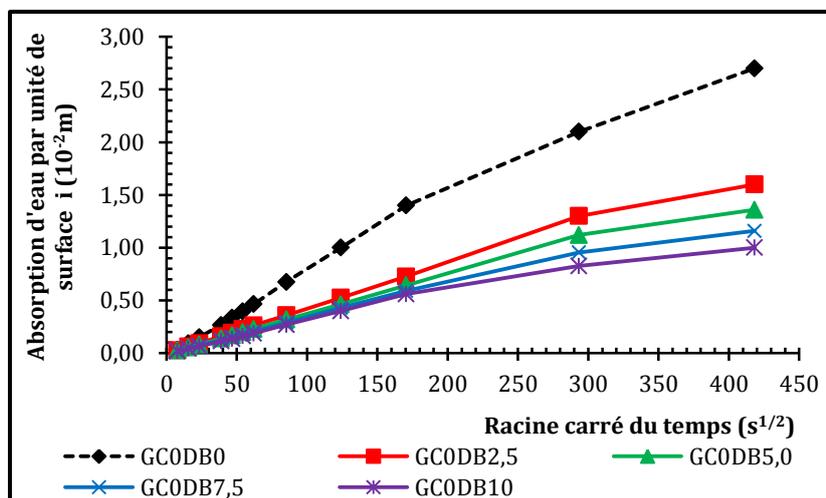


Figure 4.12: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de DB.

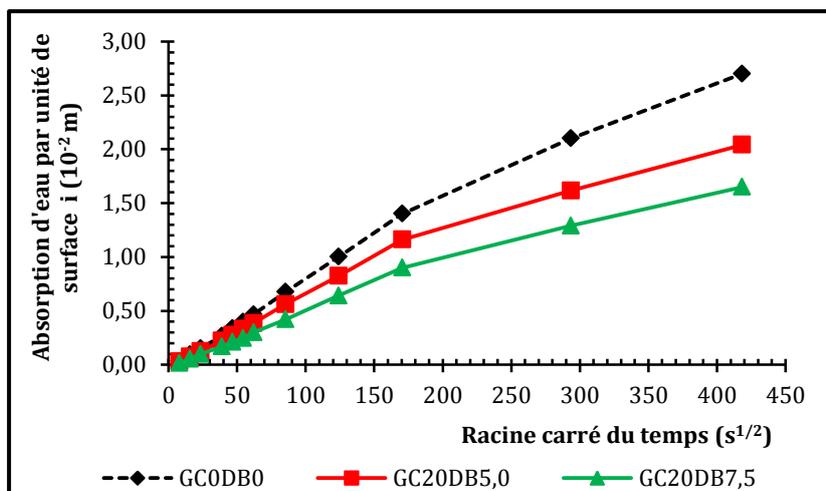


Figure 4.13: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de mélange (GC + DB).

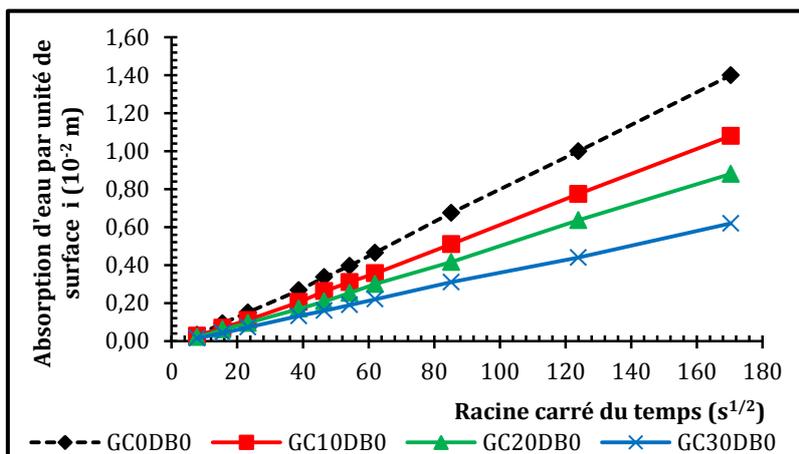


Figure 4.14: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de GC pendant la période initiale d'exposition à l'eau (jusqu'à 8 heures).

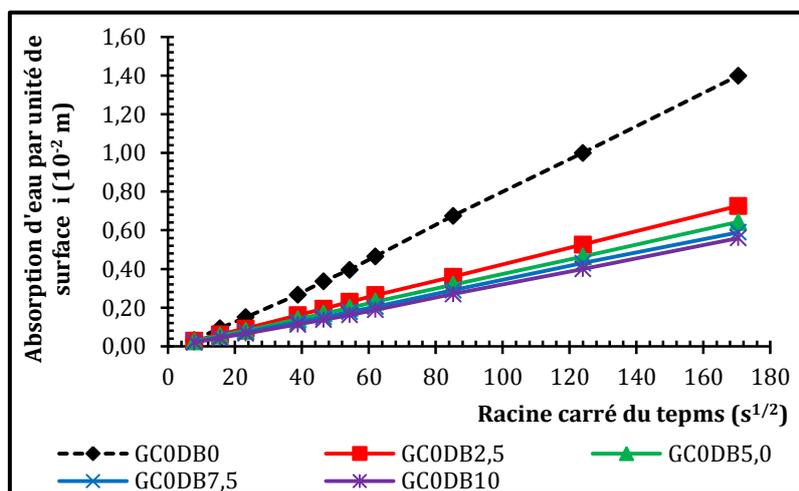


Figure 4.15: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de DB pendant la période initiale d'exposition à l'eau (jusqu'à 8 heures).

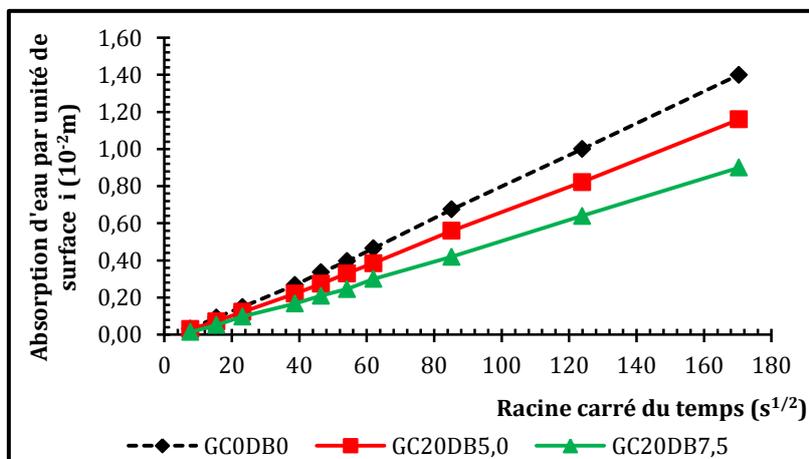


Figure 4.16: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps du mortier de mélange (GC+ DB) pendant la période initiale d'exposition à l'eau (jusqu'à 8 heures).

Tableau 4.3: Sorptivité des mortiers d'étude.

Mortiers	Déchets incorporés		Sorptivité ( $10^{-2} \text{ m/s}^{1/2}$ )
	Granulats de caoutchouc	Fillers de brique	
<b>GC0DB0</b>	-	-	0.0077
<b>GC10DB0</b>	+	-	0.0066
<b>GC20DB0</b>	+	-	0.0050
<b>GC30DB0</b>	+	-	0.0039
<b>GC0DB2.5</b>	-	+	0.0044
<b>GC0DB5.0</b>	-	+	0.0039
<b>GC0DB7.5</b>	-	+	0.0033
<b>GC0DB10</b>	-	+	0.0030
<b>GC20DB5.0</b>	+	+	0.0071
<b>GC20DB7.5</b>	+	+	0.0070

Des valeurs faibles de (S) ont été détectées pour les mortiers résineux préparés avec des fillers de brique. Elles varient entre  $0.0030 \text{ kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$  (GC0DB10) et  $0.0044 \text{ kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$  (GC0DB2.5). Ce comportement pourrait être dû au raffinement dans la structure poreuse des mortiers produits par l'effet combiné de remplissage et l'effet pouzzolanique des fillers de brique.

D'autre part, en examinant les valeurs de la sportivité des mortiers à base de déchets de caoutchouc (sans fillers de brique), on constate qu'ils sont inférieures à celles des mortiers composés (GC20DB5.0 et GC20DB7.5). L'effet de l'hydrophobicité du GC et du double effet du DB ne sont donc pas complémentaires.

### 3.2.5. Absorption d'eau par immersion totale

Les valeurs moyennes d'absorption d'eau par immersion totale mesurée sur tous les mortiers étudiés ont été rassemblées dans le tableau 4.4 qui suit. On constate que les valeurs relatives aux mortiers étudiés sont toutes inférieures à celle du mortier de référence GC0DB0. En considérant l'effet séparé des GC, on peut observer que l'absorption d'eau diminue légèrement avec l'augmentation de la teneur en GC. La diminution maximale dans la fourchette adoptée dans cette étude (0-30%) était de 3.11%.

L'incorporation des granulats de caoutchouc dans la matrice cimentaire tend à limiter l'absorption d'eau du composite [18]. Selon une autre étude [19], l'addition des granulats de caoutchouc abaisse la quantité d'eau absorbée, puisque les granulats de caoutchouc n'absorbent pas l'eau.

En ce qui concerne l'effet séparé des fillers de DB, on peut également observer que l'absorption d'eau diminue légèrement avec l'augmentation de la quantité de DB. La diminution maximale a été obtenue pour l'incorporation maximale de DB (c'est-à-dire 10%), elle a été trouvée égale à 4.71% et peut être due au double effet des fillers de DB: leur pouzzolanicité et leur aptitude à compacter les mélanges.

Les données relatives aux mortiers composés (GC-DB) tendent à prouver que les effets des granulats de caoutchouc séparés et des déchets de brique ont été cumulés. Il est en effet aisément remarquable que la combinaison a conduit à une diminution maximale de l'absorption d'eau: 4.80% et 5.01% respectivement pour les mortiers GC20DB5.0 et GC20DB7.5.

**Tableau 4.4:** Absorption d'eau par immersion totale des mortiers étudiés.

Désignation du mortier	Absorption d'eau (%)	Réduction /GC0DB0 (%)
<b>GC0DB0</b>	9.98	± 0.00
<b>GC10DB0</b>	9.86	- 1.20
<b>GC20DB0</b>	9.80	- 1.80
<b>GC30DB0</b>	9.67	- 3.11
<b>GC0DB2.5</b>	9.72	- 2.60
<b>GC0DB5.0</b>	9.65	- 3.30
<b>GC0DB7.5</b>	9.60	- 3.80
<b>GC0DB10</b>	9.51	- 4.71
<b>GC20DB5.0</b>	9.50	- 4.80
<b>GC20DB7.5</b>	9.48	- 5.01

#### IV.4. CONCLUSION

De la présente étude sur le mortier résineux élaboré à base de granulats de caoutchouc et de fillers de déchets de brique, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- L'augmentation du taux de granulats de caoutchouc abaisse la masse volumique sèche du mortier étudié. Ceci est dû à la faible densité des granulats de caoutchouc comparativement à celle du sable naturel substitué. La relation semble être linéaire avec un coefficient de corrélation satisfaisant ( $R^2 = 0.996$ ). Cependant cette diminution devient plus faible lorsque le sable naturel a été remplacé par les fillers de déchets de brique en raison de la faible différence entre leurs densités (2.56 et 2.50 respectivement).

Il faut noter que la masse volumique sèche des mortiers composés avec granulats de caoutchouc et déchets de brique constitue un compromis entre les masses volumiques séparées des mortiers de granulats de caoutchouc et des mortiers de fillers de déchets de brique.

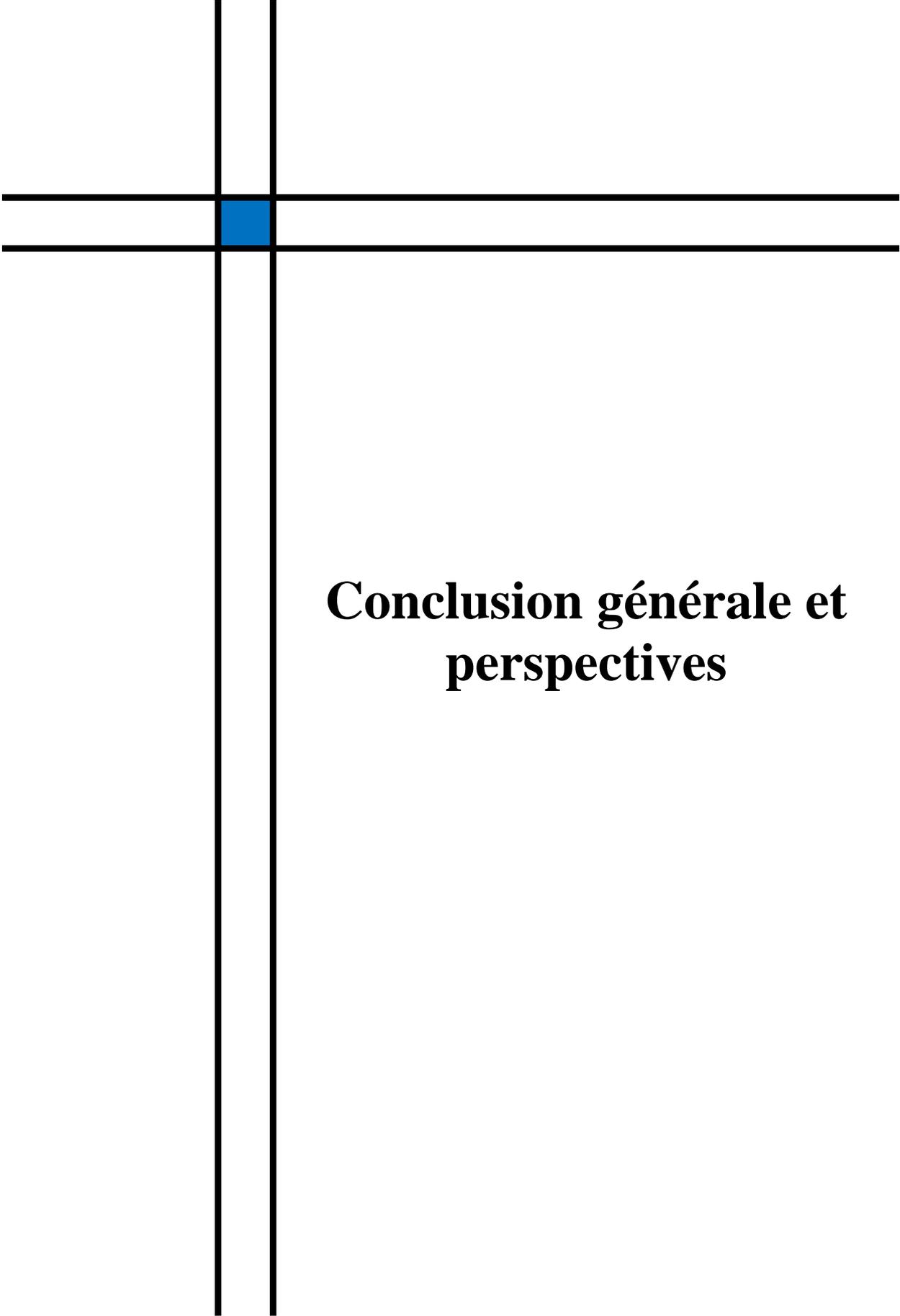
- L'effet de la combinaison des granulats de caoutchouc et des fillers de brique a conduit à une réduction maximale de l'absorption d'eau par immersion totale. Il semble que la réduction de la porosité des mortiers due au remplissage des pores par les fillers sous forme de poudre est responsable de cette réduction. De plus, les granulats de caoutchouc ne sont pas absorbants.

- La chute de la résistance à la compression et à la flexion à 28 jours du mortier de granulats de caoutchouc peut être sensiblement minimisée par l'addition de fillers de déchets de brique dans la matrice. Ceux-ci ont un double effet: ils compactent les mélanges par remplissage des vides intergranulaires et activent la chaux libre du ciment pour développer un gel C-S-H supplémentaire.

- L'incorporation combinée des GC et des DB a un effet positif sur le retrait du mortier résineux étudié. Le retrait diminue en effet à tous les âges comparé à celui du mortier de référence. L'introduction des fillers de DB apporte un effet global positif en dépit de l'effet préjudiciable de l'incorporation des GC.

- Des valeurs faibles de la sorptivité (S) ont été constatées dans les mortiers résineux préparés avec les fillers de DB. Ce comportement pourrait être dû au raffinement de la structure poreuse des mortiers causé par les effets simultanés des fillers de brique: effet de pouzzolanité et effet remplissage (filler).

- En définitive les fillers de DB représentent un ajout important pour améliorer les résistances mécaniques, l'absorption d'eau et le retrait des mortiers à base de GC renforcés par la résine.
  
- Une investigation microscopique est cependant nécessaire pour compléter ce travail, de même qu'une étude sur la porosité générée dans les composites élaborés et sa relation avec les autres caractéristiques.



**Conclusion générale et  
perspectives**

# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

Dans ce travail, les performances d'un éco-mortier à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés ont été évaluées expérimentalement.

Cet éco-mortier est composé de:

- 1<sup>ère</sup> série: sable naturel, ciment CPA CEMI 42.5 répondant à la norme algérienne NA 433/2002, granulats de caoutchouc (0/4 mm) traités à la soude en substitution au sable naturel, stabilisant, superplastifiant et eau de gâchage.
- 2<sup>ème</sup> série: les mêmes composants avec les granulats de caoutchouc non traités.
- 3<sup>ème</sup> série: les mêmes composants avec des fillers de déchets de brique (0/0.063) en substitution au sable naturel.
- 4<sup>ème</sup> série: les mêmes composants avec un mélange combiné de granulats de caoutchouc et de déchets de brique en substitution au sable naturel.
- 5<sup>ème</sup> série: les mêmes composants avec une combinaison de granulats de caoutchouc non traités et des fillers de déchets de brique incorporés dans une matrice cimentaire renforcés par une résine aqueuse.

Les principaux résultats obtenus sont résumés dans ce qui suit:

- Les granulats de caoutchouc allègent sensiblement les mortiers traditionnels et affectent leurs propriétés physiques et leurs performances mécaniques en raison de la porosité supplémentaire apportée par l'introduction progressive des GC dans la matrice cimentaire, de l'air occlus généré pendant le malaxage ainsi que par la faible adhérence avec la matrice. En effet, la masse volumique à sec, le retrait, l'absorption d'eau par immersion et par capillarité des éco-composites élaborés ont été détériorés. De même, les performances mécaniques ont été affaiblies.
-

- La durabilité de ces éco-composites a été par contre globalement améliorée notamment la résistance aux attaques contre le  $H_2SO_4$ , le  $Na_2SO_4$  et l'eau de mer évaluée par la perte de poids, l'expansion et la perte de résistance mécanique à moyen et à long terme (30, 90, 180 et 270 jours), Cependant les indicateurs de durabilité relatifs à la perméabilité à l'eau et à l'air de ces composites ont été affectés et les flux d'eau et d'air se sont rapidement infiltrés.
- Le traitement des GC par la soude NaOH à 10% de concentration a permis une légère amélioration de toutes les propriétés du mortier caoutchouté grâce à l'amélioration de l'adhérence dans la zone de transition GC-matrice de ciment.
- Une autre investigation pour l'amélioration des propriétés physicomécaniques et de durabilité des composites étudiés a été menée à travers l'introduction des fillers de DB dans les mortiers caoutchoutés et a révélé effectivement la minimisation des effets négatifs des GC et le renforcement des propriétés de durabilité déjà améliorés par les GC. Ceci a été rendu possible grâce à l'effet fillers des DB et à la création d'un gel C-S-H de 2<sup>ème</sup> génération par réaction pouzzolanique.
- En introduisant la résine aqueuse dans la matrice cimentaire caoutchouté, les caractéristiques hydriques des composites élaborés ont été améliorées par rapport à celles des composites à base de GC traités au NaOH.
- Lorsque les fillers de DB ont été introduits dans la matrice cimentaire caoutchoutée et résineuse, la combinaison de 20% de DB avec les taux variables de 5.0 et 7.5% a mené à une diminution de l'absorption d'eau et du retrait par rapport au mortier de référence GC0DB0.

En conclusion, une alternative intéressante pour produire un mortier respectant l'environnement par l'utilisation de ces deux déchets a été prouvé par cette étude.

Comme perspectives d'avenir, il serait intéressant de compléter ce travail par une étude microscopique permettant d'évaluer l'adhérence entre le granulats de caoutchouc non traités avec la matrice cimentaire, l'adhérence des granulats de caoutchouc traités au NaOH avec la matrice cimentaire, l'adhérence des granulats de caoutchouc non traités avec la matrice cimentaire renforcée par la résine aqueuse et enfin l'adhérence des granulats de caoutchouc traités et non traités dans la matrice cimentaire contenant les fillers de déchets de brique sous forme de poudre.

Il serait également intéressant de mener une étude comparative sur les performances de ces éco-composites pour évaluer les effets séparés du traitement des GC par NaOH avec l'effet de

---

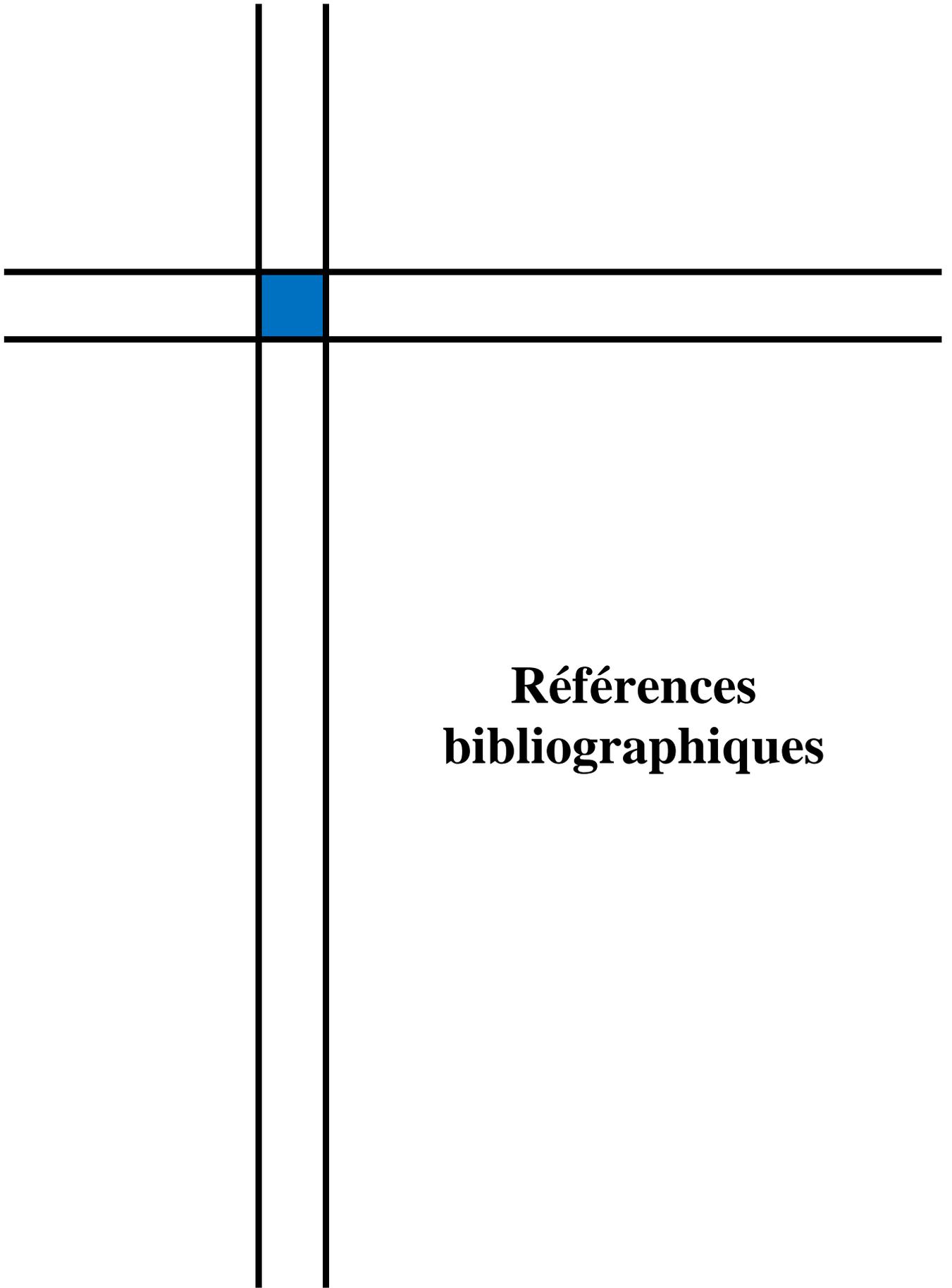
## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

l'introduction de la résine aqueuse. De même il serait intéressant de compléter l'étude sur les mortiers caoutchoutés résineux par des tests de durabilité.

On recommande de l'étude des caractéristiques de l'éco-composite avec granulats de caoutchouc traités au NaOH et la résine aqueuse.

Des études de durabilité sont nécessaires au-delà de 9 mois afin d'atteindre la limite de stabilité.



**Références  
bibliographiques**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [01] Ghazi, O.M. "*Properties of hardened concrete using crushed clay brick as aggregates*". Journal of Engineering (Al-Mustansireah University). 2011, 17(4): 1022-1038.
  - [02] Cenk, K. "*Microstructure properties of waste tire rubber composites: an overview*". Journal of Material Cycles and Waste Management. 2014, 17(3): 1611-8227.
  - [03] Info-Déchets, "*Quelle filière globale pour la valorisation de pneus*". Environ Tech. 1998, 181: 32-35.
  - [04] Gargouri, A., Ellouze, S., Makni, M. "*Amélioration des caractéristiques mécaniques d'un béton de caoutchouc*". Séminaire International, Innovation et Valorisation en Génie Civil et Matériaux de Construction, Rabat, Maroc. Novembre 2011, 23-25.
  - [05] Sukontasukkul, P., Chaikaew, C. "*Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber*". Construction and Building Materials. 2006, 20(7): 450-457.
  - [06] Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A. "*Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete*". Construction and Building Materials. 2009, 23(5): 1828-1836.
  - [07] Jagannadha Rao, K., Abdul Mujeeb, M. "*Effect of crumb rubber on mechanical properties of ternary blended concrete*". International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD). 2013, 3(3): 29-36.
  - [08] Yazdi, M. A., Yang, J., Yihui, L., Su, H. "*A review on application of waste tire in concrete*". International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. 2015, 9(12): 1618-1623.
  - [09] Long, N.T. "*Utilization of used tires in civil engineering-the pneusol "Tyresoil", in: Kamon (Ed.)*". Environmental Geotechnics. Balkema, Rotterdam. 1996.
  - [10] Belabdelouahab, F., Trouzine, H. "*Research and enhancement of used tyres, such as material innovative in Algeria*". Physics Procedia. 2014, 55: 68-74.
  - [11] Tsang, H.H., Lam, N.T.K., Sabegh, S.Y., Sheikh, M.N., Indraratna, B. "*Geotechnical seismic isolation by scrap tire-soil mixtures*". Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Diego California. May 24th - May 29<sup>th</sup>2010.
  - [12] Presti, D.L. "*Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review*". Construction and Building Materials. 2013, 49: 863-881.
  - [13] Cao, W. "*Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process*". Construction and Building Materials. 2007, 21: 1011-1015.
  - [14] Shu, X., Huang, B. "*Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview*". Construction and Building Materials. 2014, 67 Part B: 217-224.
  - [15] Norhidayah, A.H. "*Microstructural characterisation of rubber modified asphalt mixtures*". Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. November 2012.
  - [16] Xiang, Li., Cheng, J., Que, G. "*Microstructure and performance of crumb rubber modified asphalt*". Construction and Building Materials. 2009, 23(12): 3586-3590.
  - [17] Liu, H., Mead, J., Stacer, R. "*Environmental impacts of recycling rubber in light fill applications: summary and Evaluation of existing literature*". University of Massachusetts, Chelsea Center for Recycling and Economic Development. 1998.
  - [18] Nehdi, M., Khan, A. "*Cementitious composites containing recycled tire rubber: an overview of engineering properties and potential applications*". Cement Concrete Aggregate. 2001, 23(1): 3-7.
  - [19] Price, W., Smith, E.D. "*Waste tire recycling: environmental benefits and commercial challenges*". International Journal of Environmental Technology and Management. 2006, 6(3-4): 363-375.
  - [20] Eldin, N.N., Senouci, A.B. "*Rubber tire particles as concrete aggregate*". Journal of Material in Civil Engineering. 1993, 5(4): 478-496.
-

- 
- [21] Topçu, I.B. "The properties of rubberized concretes". Cement and Concrete Research. 1995, 25(2): 304-310.
- [22] Toutanji, H.A. "The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates". Cement and Concrete Composites. 1996, 18(2): 135-139.
- [23] Topçu, I.B., Avcular, N. "Analysis of rubberized concrete as a composite material". Cement and Concrete Research. 1997, 27(8): 1135-1139.
- [24] Khatib, Z.K., Bayomy, F.M. "Rubberized Portland cement concrete". Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE). 1999, 11(3): 206-213.
- [25] Segre, N., Joekes, I. "Use of tire rubber particles as addition to cement paste". Cement and Concrete Research. 2000, 30(9): 1421-1425.
- [26] Benazzouk, A., Mezreb, K., Doyen, G., Goullieux, A., Queneudec, M. "Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates". Cement and Concrete Composites. 2003, 25(7): 711-720.
- [27] Siddique, R., Naik, T.R. "Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview". Waste Management. 2004, 24(6): 563-569.
- [28] Turatsinze, A., Bonnet, S., Granju, J.L. "Mechanical characterization of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres". Building and Environment. 2005, 40(2): 221-226.
- [29] Batayneh, M.K., Marie, I., Asi, I. "Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries". Waste Management. 2008, 28(11): 2171-2176.
- [30] Turki, M., Bretagne, E., Rouis, M.J., Queneudec, M. "Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures". Construction and Building Materials. 2009, 23(7): 2715-2722.
- [31] Aiello, M.A., Leuzzi, F. "Waste tire rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state". Waste Management. 2010, 30(8): 1696-1704.
- [32] Nadjim, K.B., Hall, M.R. "A review of fresh/hardened properties and applications for plain (PRC) and self-compacting rubberized concrete (SCRC)". Construction and Building Materials. 2010, 24(11): 2043-2051.
- [33] Issa, C.A., Salem, G. "Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design". Construction and Building Materials. 2013, 42: 48-52.
- [34] Panda, K.C., Parhi, P.S., Jena, T. "Scrap-Tire-Rubber replacement for aggregate in cement concrete: experimental study". International Journal Earth Science and Engineering 2012, 5: 1692-1701.
- [35] Kardos, J.A. "Beneficial use of crumb rubber in concrete mixtures". A thesis submitted to the University of Colorado Denver in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. 2011.
- [36] Ho, A.C., Turatsinze, A., Abou-Chakra, A., Vu, D.C. "Rubberised concrete for the design of pavement on soil". International Journal of Materials Engineering Innovation. 2012, 3(2): 101-116.
- [37] El-Gammal, A., Abdel-Gawad, A.K., El-Sherbini, Y., Shalaby, A. "Compressive strength of concrete utilizing waste tire rubber". Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS). 2010, 1(1): 96-99.
- [38] Aniruddh, A., Kumar, A., Khan, M.A. "Effect on compressive strength of concrete by using waste rubber as partial replacement of fine aggregate: A review". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2016, 3(3): 86-89.
- [39] Kaloush, K., Way, G., Zhu, H. "Properties of crumb rubber concrete". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2005, 1914: 8-14.
- [40] Granju, J.L., Chausson, H. "Serviceability of fiber-reinforced thin overlays: relation between cracking and debonding in ConChem". Proceeding of the International Exhibition and Conference, Bruxelles. 1995, 133-142.
- [41] Bonnet, S. "Effet de l'incorporation des granulats de caoutchouc sur la résistance à la fissuration des mortiers". XXI<sup>ème</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. 2003, 59-70.
- [42] Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Labbani, F., Roucoult, J.M. "Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment". XIV Colloque National de la Recherche dans les IUT (CNRIUT). Université Claude Bernard Lyon1. France. 29 et 30 mai 2008, 1-9.
- [43] Benazzouk, A., Douzane, O., Quéneudec, M. "Transport of fluids in cement-rubber composites". Cement and Concrete Composites. 2004, 26(1): 21-29.
- [44] Topçu, I.B. "The properties of rubberized concretes". Cement and Concrete Research. 1995, 25(2): 304-310.
- [45] Boudaoud, Z., Beddar, M. "Effects of recycled tires rubber aggregates on the characteristics of cement concrete". Open Journal of Civil Engineering. 2012, 2(4): 193-197.
- [46] Skripkiūnas, G., Grinys, A., Černius, B. "Deformation properties of concrete with rubber waste additives". Materials Science (Medžiagotyra). 2007, 13(3): 219-223.
-

- [47] Hao, R.X., Dong, S.F., Guo, X.Y. "The research of scrap tire rubber powder effect on the performance of cracking mortar". *Advanced Materials Research*. 2012, 472-475: 1777-1781.
- [48] Debieb, F. "Valorisation des déchets de brique et béton de démolition comme agrégats de béton". Mémoire de Magister de l'université de Blida, Algérie. Novembre 1999.
- [49] Kenai, S., Debieb, F., Azzouz, L. "Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled aggregates". In: International congress for challenges of concrete construction. University of Dundee, UK. 2002, 383-92.
- [50] Lahmadi, A., Zeghichi, L., Benghazi, Z. "L'influence de la substitution des granulats naturels par les déchets de brique sur le comportement mécanique du béton". ACMA. Fès, Maroc. 09-12 Mai 2012.
- [51] Harbi, R. "Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base des déchets de brique". Mémoire de magistère. Université de Guelma, Algérie. 2009.
- [52] Wild, S., Khatib, J., Sabir, B.B., Addis, S.D. "The potential of fired brick clay as partial cement replacement material". In: R.K. Dhir, T.D. Dyer (Eds.), *Concrete for environment enhancement and protection*, E&FN SPON. London. 1996, 685-696.
- [53] Naceri, A., Hamina, M.C. "Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar". *Waste Management*. 2009, 29(8): 2378-2384.
- [54] Toledo Filho, R.D., Gonçalves, J.P., Americano, B.B., Fairbairn, E.M.R. "Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil". *Cement and Concrete Research*. 2007, 37(9): 1357-1365.
- [55] Heidari, A., Hasanpour, B. "Effects of waste bricks powder of Gachsaran company as a pozzolanic material in concrete". *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*. 2013, 14(5): 755-763.
- [56] Uddin, M.K. "Use of brick dust in concrete as mineral admixture and partial replacement of cement". *Journal of Civil Engineering (IEB)*. 2004, 32(1): 69-78.
- [57] Ge, Z., Gao, Z., Sun, R., Zheng, L. "Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method". *Construction and Building Materials*. 2012, 31: 289-293.
- [58] Khalaf, F.M., DeVenny, A.S. "Properties of new and recycled clay brick aggregates for use in concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2005, 17(4): 456-464.
- [59] Kenai, S., Debieb, F. "Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés". *Materials and Structures*. 2011, 44(4): 815-824.
- [60] Kasi, R., Malasani, P. "Usage of recycled brick as coarse aggregate in concrete". *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2016, 3(9): 95-100.
- [61] Subramani, T., Kumaran, S. "Experimental investigation of using concrete waste and brick waste as a coarse aggregate". *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*. 2015, 4(5): 294-303.
- [62] Khatib, J.M. "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate". *Cement and Concrete Research*. 2005, 35(4): 763-769.
- [63] Brian, J.O., Mutuku, R.N., Kabubo, C.K. "Mechanical characteristics of normal concrete partially replaced with crushed clay bricks". *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2015, 6(1): 62-75.
- [64] Cachim, P.B. "Mechanical properties of brick aggregate concrete". *Construction and Building Materials*. 2009, 23(3): 1292-1297.
- [65] Bektas, F., Wang, K., Ceylan, H. "Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability". *Construction and Building Materials*. 2009, 23(5): 1909-1914.
- [66] Padmini, A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M.S. "Behaviour of concrete with low-strength bricks as lightweight coarse aggregate". *Magazine of Concrete Research*. 2001, 53(6): 367-375.
- [67] Debieb, F., Kenai, S. "The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete". *Construction and building materials*. 2008, 22(5): 886-893.
- [68] Bazaz, J.B., Khayati, M., Akrami, N. "Performance of concrete produced with crushed bricks as the coarse and fine aggregate". *IAEG2006*, 616: 1-10.
- [69] Kallak, F.S. "Use of crushed bricks as coarse aggregate in concrete". *Tikrit Journal of Engineering, Sciences*. 2009, 16(3): 64-69.
- [70] Khaloo, A.R. "Crushed tile coarse aggregate concrete". *Cement Concrete and Aggregates*. 1995, 17(2): 119-125.
- [71] Khalaf, F.M., DeVenny, A.S. "Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete". *Review Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004, 16(4): 331-340.
- [72] Khalaf, F.M. "Using crushed clay brick as aggregate in concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2006, 18(4): 518-526.
- [73] Correia, J.R., DeBritto, J., Pereira, A.S. "Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates". *Materials and Structures*. 2006, 39(2): 169-177.

- [74] De-Britto, J., Pereira, A.S., Correia, J.R. "Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates". Cement and Concrete Composites. 2005, 27(4): 429-433.
- [75] Sheen, Y.N., Wang, H.Y., Juang, Y.P., Le, D.H. "Assessment on the engineering properties of ready-mixed concrete using recycled aggregates". Construction and Building Materials. 2013, 45: 298-305.
- [76] Jankovic, K. "Using recycled brick as concrete aggregate". In: Proceedings of Fifth Triennial International Conference on Challenges in Concrete Construction. Dundee.UK. 2002, 231-240.
- [77] Devenny, A., Khalaf, F.M. "The Use of Crushed Brick as Coarse Aggregate in concrete". Masonry International. 1999, 12(3): 81-84.
- [78] Hansen, T.C. "Recycling of demolished concrete and masonry". In Report of technical committee 37DRC. Demolition and Reuse of Concrete. RILEM: E&FN Spon, London. 1992.
- [79] London, E., Spoon, F.N. "Recycling of demolished concrete and masonry". T.C.Hansen Editor. RILEM. 1992.
- [80] Journal Officiel de la République Algérienne: Loi n 01/19 Relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.12/12/2001.
- [81] Saadani, S. "Comportement des bétons à base de granulats recyclés". Mémoire de magistère. Université des frères Mentouri-Constantine, Algérie, 2009.
- [82] <http://www.guide-dechets-paca.com/spip.php?rubrique7>, consulté le 27-09-2016.
- [83] <http://www.economiedenergie.fr/Les-dechets--les-typologies.html>, consulté le 9-10-2016.
- [84] <http://www.emag.suez-environnement.com/dechets-activites-soins-13810>, consulté le 9-10-2016.
- [85] Guide pratique un appui technique pour la gestion des déchets de l'industrie de l'ameublement. Edition 2010.
- [86] [www.emag.suez-environnement.com/dechetsdangereux13831](http://www.emag.suez-environnement.com/dechetsdangereux13831), consulté le 10-10-2016.
- [87] <http://www.dechets.picardie.fr/spip.php?rubrique69>, consulté le 14-11-2016.
- [88] <http://www.guide-dechets-paca.com/spip.php?rubrique5>, consulté le 13-11-16.
- [89] Rapport du Commissaire Enquêteur, "Décision du tribunal administratif de Rouen du 22 septembre 2015(n° E15 000 088/76) demande d'autorisation relative à l'exploitation d'une unité de broyage de pneumatiques usagés et de caoutchoucs techniques". Janvier 2016.
- [90] "Directives techniques révisées pour la gestion écologiquement rationnelle des pneus usés et des déchets de pneus". Conférence des Parties à la Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination. Dixième réunion Cartagena, Colombie, 17-21 octobre 2011.
- [91] <http://www.ordimip.com/dechets?id=6>, consulté le 1-11-16.
- [92] Belferrag, A. "Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes". Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie. 23 Mai 2016.
- [93] Sadaka, F. "Etude de la dégradation contrôlée de polydiènes: application au recyclage des déchets pneumatiques". Thèse doctorat de l'université du Maine, France. 2010.
- [94] Aoudia, K. "Recyclage et revalorisation des élastomères usages". Mémoire de magistère. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie. 2014.
- [95] Mavridou, S., Oikonomou, N., Kalofotias, A. "Worldwide survey on best (and worse) practices concerning rubberized asphalt mixtures implementation (number of different cases, extent of application)". AUT- LBM. PRESTE Deliverable 2.1.1. 2010.
- [96] Roche, N. "Comportement vibro-acoustique de matériaux et structures à base de poudrettes de pneumatiques recycle". Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon, France. 2010.
- [97] Ait Idir, A. "Du pneu usagé au caoutchouc recycle". Publié le 4 mai 2016, <https://www.linkedin.com/pulse/du-pneu-usage%C3%A9-au-caoutchouc-recycle%C3%A9-abdelhalim-ait-idir?trk=mp-reader-card>, consulté le 9-10-2016.
- [98] Trouzine, T.H., Asroun, A., Belabdouahab, F., Long, N.T. "Problématique des pneumatiques usagés en Algérie". Revue Nature et Technologie. 2011, 5: 28-35.
- [99] <http://clg.sarthe.perso.sfr.fr/dee/www.arepc.com/guide/dib/pneu.html>, consulté le 26-11-2016.
- [100] Lazizi, A., Trouzine, H., Asroun, A., Zadjou, A., Belabdelouahab F. "Approche analytique par changement d'échelle du comportement dynamique du multi matériaux pneus usés-sol". XXIX<sup>ème</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, Algérie. 29 au 31Mai 2011.
- [101] Cuong, M.H.A. "Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés: Application aux éléments de grande surface". Thèse de doctorat. Université Toulouse, France. Juillet 2010.
- [102] Bensbaa, A. "Plan de gestion global d'un projet de conception et d'édification d'une entreprise industrielle, œuvrant dans le cadre de la logistique inverse étude de cas: recyclage et pré-valorisation des pneus en fin de vie". Pour l'obtention du grade de Maître des sciences (M.Se.). Université Laval Québec, Canada. 2009.

- [103] Long, N.T. "*Le pneusol: Recherche\_réalisation\_perspective*". Thèse de doctorat. L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France. 1993.
- [104] Prost, E., Hénaff, S. "*Filière de valorisation des pneumatiques usagés à La Réunion*".
- [105] "*Éco-organisme leader de la valorisation des pneus usagés*". Aliapur. Avril 2014, 1-11.
- [106] Moreau, S. "*Valorisation des pneumatiques usagés dans la conception de nouveaux sols équestres*". Journée technique nationale. 16 octobre 2007.
- [107] Journal officiel de la République Algérienne n°77 du 15/12/2001.
- [108] Journal officiel de la République Algérienne n°13 du 05/03/2006.
- [109] Belabdelouhab, F., Djidjli, Z. "*Recherche-Valorisation pneumatiques usagés dans la protection de l'environnement*". 19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique. Marseille. 2009.
- [110] Ait Idir, A. "*Gisement des pneumatiques usagés en Algérie, problématique et filières de valorisation*". Publié le 19 mars 2016 <https://www.linkedin.com/pulse/gisement-des-pneumatiques-usag%C3%A9s-en-alg%C3%A9rie-et-de-abdelhalim-ait-idir>, consulté le 10-11-2016.
- [111] Bouali, k. "*Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires*". Mémoire de magistère. Université M'hamed Bougara-Boumerdès, Algérie. 2014.
- [112] Nigri, G., Cherait, Y., Benouis, H. "*Valorisation des déchets de briques dans l'industrie cimentaire*". Séminaire International, Innovation & Valorisation en Génie Civil & Matériaux de Construction. Rabat - Maroc. 23-25 Novembre 2011, 1-6.
- [113] Barkat, A. "*Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton*". Mémoire de magistère. Université Kasdi Merbah-Ouargla, Algérie. 2006.
- [114] La brique de terre cuite le choix de la construction durable Fédération Belge de la brique. Juin 2006.
- [115] Jambou, M. "*Valorisation des déchets inertes du BTP, suivant le principe d'écologie industrielle et territoriale*". Maîtrise en environnement université Sherbrooke, master ingénierie et management de l'environnement et du développement durable. Université technologique de Troyes, France. Janvier 2015.
- [116] Benakli, S. "*Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçant obtenu par ajout des déchets de construction*". Mémoire de magistère. Université Mouloud Mammeri-Tizi Ouzou, Algérie. 2013.
- [117] Mama, B. "*Elaboration d'un éco-ciment pouzzolanique à base de vase de barrage hydraulique traitée et déchet de brique de construction*". Mémoire de magister. Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf-Oran Algérie. Juin 2011.
- [118] Kesegić, I., Netinger, I., Bjegović, D. "*Recycled clay brick as an aggregate for concrete: Overview*". Technical Gazette. 2008, 15: 35-40.
- [119] Al-Akhras, N.M., Samadi, M.M. "*Properties of tire rubber ash mortar*". Cement and Concrete Composites. 2004. 26(7): 821-826.
- [120] Hieu, N.T. "*Durabilité des réparations à base cimentaire: analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation*". Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, France. 12 Juillet 2010.
- [121] Garros, M. "*composites cimentaires incorporant des granulats de caoutchouc issus du broyage de pneus usagés: optimisation de la composition et caractérisation*". Thèse de doctorat. Université Paul Sabathier-Toulouse. France. 12 juin 2007.
- [122] Wang, H.Y., Chen, B.T., Wu, Y.Wu. "*A study of the fresh properties of controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSR/LC)*". Construction and Building Materials. 2013, 41: 526-531.
- [123] Oikonomou, N., Stefanidou, M., Mavridou, S. "*Improvement of the bonding between rubber tire particles and cement paste in cement products*". In 15th Conference of the Technical Chamber of Greece. Alexandroupoli, Greece. 25-27 October (2006) (in Greek), 234-242.
- [124] Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J.L., Hernández, M. "*Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: destructive and non-destructive testing*". Composite Structures. 2005, 71(3-4): 439-446.
- [125] Eldin, N.N., Senouci, A.B., Cairns, R., Kew, H., Kenny, M. "*The use of recycled rubber tyres in concrete construction*". Final Report: The Onyx Environmental Trust. University of Strathclyde, Glasgow. 2004.
- [126] Holmes, N., Dunne, K., O'Donnell, J. "*Longitudinal shear resistance of composite slabs containing crumb rubber in concrete toppings*". Construction and Building Materials. 2014, 55: 365-378.
- [127] Grdić, Z., Topličić-Curčić, G., Ristić, N., Grdić, D., Mitković, P. "*Hydro-abrasive resistance and mechanical properties of rubberized concrete*". GRAĐEINAR. 2014, 66(1): 11-20.
- [128] Ozbay, E., Lachemi, M., Sevim, U.K. "*Compressive strength, abrasion resistance and energy absorption capacity of rubberized concretes with and without slag*". Materials and Structures. 2011, 44(7): 1297-1307.
- [129] Fedroff, D., Ahmad, S., Savas, B. "*Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber*". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1996, 1532: 66-72.

- 
- [130] Aziz, F.N.A.A., Bida, S.M., Nasir, N.A.M., Jaafar, M.S. "Mechanical properties of lightweight mortar modified with oil palm fruit fibre and tire crumb". Construction and Building Materials. 2014, 73: 544-550.
- [131] Fiore, A., Marano, G.C., Marti, C., Molfetta, M. "On the Fresh/Hardened Properties of Cement Composites Incorporating Rubber Particles from Recycled Tires". Advances in Civil Engineering. 2014, 1-12.
- [132] Youssf, O., El Gaeady, M.A., Mills, J.E., Ma, X. "An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes". Construction and Building Materials. 2014, 53: 522-532.
- [133] Meherier, M.S. "Investigation of mechanical and durability properties of cement mortar and concrete with varying replacement levels of crumb rubber as fine aggregate". A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science in the college of graduate studies (Civil Engineering). University of British Columbia (Okanagan). June 2016.
- [134] Reda Taha, M.M., ASCE, M., El-Dieb, A.S., AbdEl-Wahab, M.A., Abdel-Hameed, M.E. "Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete". Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE). 2008, 20(10): 640-649.
- [135] Mavroulidou, M., Figueiredo, J. "Discarded tyre rubber as concrete aggregate: A possible outlet for used tyres". Global Nest Journal. 2010, 12(4): 359-367.
- [136] Thirupathi, R. "Discarded tyre rubber as concrete aggregate: A possible outlet for used tyres". International Conference on Current Trends in Engineering and Technology (ICCTET). 2013, 202-207.
- [137] Khaloo, A.R., Dehestani, M., Rahmatabadi, P. "Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles". Waste Management. 2008, 28(12): 2472-2482.
- [138] Balaha, M.M., Badawy, A.A.M., Hashish, M. "Effect of using ground tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes". Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS). 2007, 14(6): 427-435.
- [139] Azmi, N.J., Mohammed, B.S., Al-Mattaeneh, H.M.A. "Engineering properties of concrete containing recycled tire rubber". ICCBT, B.2008, 34: 373-382.
- [140] Bignozzi, M.C., Sandrolini, F. "Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete". Cement and Concrete Research. 2006, 36(4): 735-739.
- [141] Bravo, M., De Brito, J. "Concrete made with used tyre aggregate: Durability related performance". Journal of Cleaner Production. 2012, 25: 42-50.
- [142] Ganesan, N., Bharati Raj, J., Shashikala, A.P. "Flexural fatigue behavior of self-compacting rubberized concrete". Construction and Building Materials. 2013, 44: 7-14.
- [143] Rahman, M.M., Usama, M., Al-Ghalib Ali, A., "Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC)". Construction and Building Materials. 2012, 36: 630-637.
- [144] Bharati Raj, J., Ganesan, N., Shashikala, A.P. "Engineering properties of self-compacting rubberized concrete". Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2011, 30(23): 1923-1930.
- [145] Raghavan, D., Huynh, H., Ferraris, C. "Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite". Journal of Materials Science. 1998, 33(7): 1745-1752.
- [146] Ali, N.A., Amos, A.D., Roberts, M. "Use of ground rubber tires in Portland cement concrete. In: Dhir, R.K. (Ed.)". Proceedings of the International Conference on Concrete. University of Dundee, Scotland.UK. 2000, 379- 390.
- [147] Emiroglu, M., Kelestemur, M.H., Yildiz. S. "An investigation on ITZ microstructure of the concrete containing waste vehicle tire". Proceedings of 8th International Fracture Conference. Istanbul, Turkey. 7-9 November 2007, 453-459.
- [148] Al-Akhras, N.M., Samadi, M.M. "Properties of tire rubber ash mortar". TRB Annual Meeting. 2003.
- [149] Youssf, O., Elgawady, M.A. "An overview of sustainable concrete made with scrap rubber". From Materials to Structures: Advancement through Innovation. 2013, 1039-1044.
- [150] Sgobba, S., Marano, G.C., Borsa, M., Molfetta, M. "Use of rubber particles from recycled tires as concrete aggregate for engineering applications". In 2<sup>nd</sup> International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. 2010.
- [151] Sukontasukkul, P. "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel". Construction and Building Materials.2009, 23(2): 1084-1092.
- [152] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Kalla, P., Cseteneyi, L. "Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates". Construction and Building Materials. 2014, 59: 204-212.
- [153] Pedro, D., De Brito, J., Veiga, R. "Mortars made with fine granulate from shredded tires". Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE). 2013, 25(4): 519-529.
- [154] Zheng, L., Huo, X.S., Yuan, Y. "Strength, modulus of elasticity, and brittleness index of rubberized concrete". Journal of Materials in Civil Engineering.2008, 20(11): 692-699.
-

- 
- [155] Mahmud, H.M., Aznieta, A.A.F.N., Gatea, S.J. "Evaluation of rubberized fibre mortar exposed to elevated temperature using destructive and non-destructive testin". *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2016, 21(4): 1347-1358.
- [156] Fadiel, A., Al Rifaie, F., Abu-Lebdeh, T., Fini, E. "Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement-based materials". *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014, 7(1): 1-11.
- [157] Papakonstantinou, C.G., Tobolski, M. J. "Use of waste tire steel beads in portland cement concrete". *Cement and Concrete Research*. 2006, 36 (9): 1686-1691.
- [158] Lee, B. I., Burnett, L., Miller, T., Postage, B., Cuneo, J. "Tire rubber cement matrix composites". *Journal of Material Science Letter*. 1993, 12(13): 967-968.
- [159] Aules, W.A. "Utilization of crumb rubber as partial replacement in sand for cement mortar". *European Journal of Scientific Research*. 2011, 51(2): 203-210.
- [160] Antil, E.Y. "An Experimental Study on rubberized concrete". *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2014, 4(2): 309 -316.
- [161] Ho, A.C., Turatsinze, A., Hameed, R., Vu, D.C. "Effects of rubber aggregates from grinded used tyres on the concrete resistance to cracking". *Journal of Cleaner Production*. 2012, 23(1): 209-215.
- [162] Nadjim, K.B., Hall, M.R. "Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete". *Construction and Building Materials*. 2012, 27(1): 521-530.
- [163] Kotresh, K.M., Belachew, M.G. "Study on waste tyre rubber as concrete aggregates". *International Journal of Scientific Engineering and Technology*. 2014, 3(4): 433-436.
- [164] Valadares, F., Bravo, M., Brito, J. "Concrete with used tire rubber aggregates: mechanical performance". *ACI Materials Journal*. 2012, 109(3): 283-292.
- [165] Turgut, P., Yesilata, B. "Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber-added bricks". *Energy and Buildings*. 2008, 40: 679-688.
- [166] Atahan, A.O., Yücel, A.Ö. "Crumb rubber in concrete: static and dynamic evaluation". *Construction and Building Materials*. 2012, 36: 617-622.
- [167] Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezzeb, K., Roucoult, J.M., Quéneudec, M. "Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes". *Cement and Concrete Composites*. 2007, 29(10): 732-740.
- [168] Silvestravičiūtė, I., Šleinotaitė-Budrienė, L. "Possibility to use scrap tires as an alternative fuel in cement industry environmental research". *Engineering and Management*. 2002, 3(21): 38-48.
- [169] Li, G., Stubblefield, M.A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Huang, B. "Development of waste tire modified concrete". *Cement and Concrete Research*. 2004, 34(12): 2283-2289.
- [170] Mohammadi, I. "Investigation on the use of crumb rubber concrete (CRC) for rigid pavements", Thesis submitted for fulfilment of requirements for the degree of Master of Engineering. University of Technologie Sydney. June 2014.
- [171] Eldin, N.N., Senouci, A.B. "Measurement and prediction of the strength of rubberized concrete". *Cement and Concrete Composites*. 1996, 18(2): 135-139.
- [172] Vu, D.C., Turatsinze, A., Ho, A.C. "On the potential of rubber aggregates obtained by grinding end-of-life tyres to improve the strain capacity of concrete". 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCR-2). Cape Town, South Africa. 24-26 November 2008.
- [173] Richardson, A., Coventry, K., Dave, U., Pienaar, J. "Freeze/thaw performance of concrete using granulated rubber crumb". *Journal of Green Building*. 2011, 6(1): 83-92.
- [174] Mansoor Ali, A., Saravanan, A. "Experimental study on concrete by partial replacement of fine aggregate with crumb rubber". *International Conference on Engineering Trends, Science and Humanities (ICETSH-2015)*.
- [175] Li, Z., Li, F., Li, J. "Properties of concrete incorporating rubber tyre particles". *Magazine of Concrete Research*. 1998, 50(4): 297-304.
- [176] Abdel-Wahab, M.M., Abdel-Hameed M.E. "Concrete using rubber tyre particles as aggregates". *International Symposium Recycling and Reuse of Used Tyres*. Dundee, UK. 2001, 251-259.
- [177] Benaddi, E. "Formulation et Caractérisation des Bétons Autonivelants pour les Travaux de Réparation". Thèse de magistère. Université de Biskra. 2008.
- [178] Khalil, E., Abd-elmohsen, M., A.M. Anwar, "Impact resistance of rubberized self-compacting concrete". *Water Science*. 2015, 29(1): 45-53.
- [179] Ismail, M., Forouzani, P., Farahmandpour, O., Hassan, I.O., Mehmannaavaz, T., Yusuf, T.O., Noruzman, A.H. "Engineering properties of concrete incorporating scrap rubber tire as aggregate replacement with palm oil fuel ash as partial replacement of ordinary portland cement". *The Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13)*. Sapporo, Japan. September 11-13, 2013.
-

- 
- [180] Grinys, A., Sivilevičius, H., Daukšys, M. "Type Rubber additive effect on concrete mixture strength". Journal of Civil Engineering and Management. 2012, 18 (3): 393-401.
- [181] Su, H., Yang, J., Ling, T., Ghataora, G.S., Dirar, S. "Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes". Journal of Cleaner Production. 2015, 91: 288-296.
- [182] Yilmaz, A., Degirmenci, N. "Possibility of using waste tire rubber and fly ash with portland cement as construction materials". Waste Management. 2009, 29(5): 1541-1546.
- [183] Onuaguluchi, O. "Effects of surface pre-coating and silica fume on crumb rubber-cement matrix interface and cement mortar properties". Journal of Cleaner Production. 2015, 104: 339-345.
- [184] Gisbert, A.N., Borrell, J.M.G., García, F.P., Sanchis, E.J., Amorós, J.E.C., Alcaraz, J.S., Vicente, F.S. "Analysis behaviour of static and dynamic properties of Ethylene-Propylene-Diene-Methylene crumb rubber mortar". Construction and Building Materials. 2014, 50: 671-682.
- [185] Sallam, H.E.M., Sherbibi, A.S., Seleem, M.H., Balaha, M.M. "Impact resistance of rubberized concrete". Engineering Research Journal (ERJ). 2008, 31(3): 265-271.
- [186] Bennett, A.R. "The Influence of Shredded Tyres on the strength of concrete", Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET). 2015, 3(2A): 134-137.
- [187] Khorami, M., Ganjian, E., Vafaii, A. "Mechanical properties of concrete with waste tire rubbers as coarse aggregates". In Proceedings of the Special Sections on International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Coventry University. 2007, 85-90.
- [188] Ismail, M.K., De Grazia, M.T., Hassan, A.A.A. "Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete with Different Supplementary Cementing Materials". Proceedings of International Conference on Transportation and Civil Engineering (ICTCE'15) London. March 21-22, 2015, 68-75.
- [189] Liu, H., Wang, X., Jiao, Y., Sha, T. "Experimental Investigation of the Mechanical and Durability Properties of Crumb Rubber Concrete". Materials. 2016, 9(3): 1-12.
- [190] Turatsinze, A., Garros, M. "On the modulus of elasticity and strain capacity of self-compacting concrete incorporating rubber aggregates". Resources, Conservation and Recycling. 2008, 52(10): 1209-1215.
- [191] Abdulla, A.I., Aules, W.A., Ahmed, S.H. "Cement mortar properties contain crumb rubber treated with alkaline materials". Modern Applied Science. 2010, 4(12): 156-163.
- [192] Ling, T.C., Nor, H.M., Hainin, M.R. "Properties of crumb rubber concrete paving blocks with SBR latex". Road Materials and Pavement Design. 2009, 10(1): 213-222.
- [193] Evangelista, L., de Brito, J. "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates". Cement and Concrete Composites. 2007, 29(5): 397-401
- [194] Sukontasukkul, P., Tiamlom, K. "Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size". Construction and Building Materials. 2012, 29: 520-526.
- [195] Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T.A., Bernardin, A.M. "Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition". Journal of Cleaner Production. 2011, 19(6-7): 757-763.
- [196] Lydon, F.D., Balendran, R.V. "Some observations on elastic properties of plain concrete". Cement and Concrete Research. 1986, 16(3): 314-324.
- [197] Nadjim, K.B., Hall, M.R. "Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberized concrete (SCRC)". Materials and Structures. 2013, 46(12): 2029-2043.
- [198] Bennett, A.R. "Mechanical properties of concrete containing waste rubber particles". Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences. 2014, 4(3): 2599-2610.
- [199] Xu, J.H., Feng, X.T., Chen, S.L., Shi, C.Y. "Fundamental mechanical performances of rubber concrete". Applied Mechanics and Materials. 2012, 193-194: 1401-1404.
- [200] Goulias, D.G., Ali, A.H. "Non-destructive evaluation of rubber modified concrete". Proceedings of Special Conference, ASCE. New York. 1997, 111-120.
- [201] Uygunoglu, T., Topçu, I.B. "The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars". Construction and Building Materials. 2010, 24(7): 1141-1150.
- [202] Ranaivomanana, N. "Etudes expérimentale et numérique des interactions entre le fluage en traction et l'endommagement du béton". Thèse de doctorat. Université Toulouse, France. 21 Mai 2013.
- [203] Gadri, K. "Contribution à l'étude d'un béton de sable avec fibres et résine destinée pour la réparation mince des structures". Mémoire de magistère, Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie. 2007.
- [204] Itim, A., Ezziane, K., Kadri, E. "Etude des déformations de retrait d'un mortier contenant différentes additions minérales". Symposium International sur la Construction en Zone Sismique "SICZS". Université Hassiba Benbouali, Chlef. 26 - 27 octobre 2010.
- [205] Jingfu, K., Chuncui H., Zhenli, Z. "Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives". Materials and Structures. 2009, 42(8): 1117-1124.
- [206] Li, T., Zhang, Y.M., Zhu, Z.G. "Influence of crumb rubber on the drying shrinkage and plastic shrinkage cracking of AASM". Materials Science Forum. 2013, 743-744: 161-165.
-

- 
- [207] Wang J., Li Y., Zhang M.Z. "Shrinkage performance and cracking resistance mechanism of rubberized lightweight aggregate concrete with Polymer". Key Engineering Materials. 2008, 385-387: 817-820.
- [208] Chen, C.J, Tang, Y.M., Tseng, S.S., Wang, H.Y. "A Study of the engineering properties on concrete with the application of pozzolanic material and waste tire rubber powder". Proceeding the 6th Civil Engineering Conference in Asia Region: Embracing the Future through Sustainability. 20-22 August, 2013, 55-63.
- [209] Rana, J., Rughooputh, R. "Partial replacement of fine aggregates by rubber in concrete". Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS). 2014, 5(5): 312-317.
- [210] Turatsinze, A. "Incorporation de granulats en caoutchouc dans le béton". Innovation 54. 2006, 1-9.
- [211] Canova, J.A., De Angelis Neto, G., Bergamasco, R. "Mortar with unserviceable tire residues". Journal of Urban and Environmental Engineering. 2009, 3(2): 63-72.
- [212] Ma, Q.W., Yue, J.W. "Effect on mechanical properties of rubberized concrete due to pretreatment of waste tire rubber with NaOH". Applied Mechanics and Materials. 2013, 357-360: 897-904.
- [213] Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Laidoudi, B., Queneudec, M, "Thermal conductivity of cement composites containing rubber wastes particles: experimental study and modeling". Construction and Building Materials. 2008, 22(4): 573-579.
- [214] Segre, N., Galves, A.D., Rodrigues, J.A., Monteiro, P.J.M., Joekes, I. "Use of tyre rubber particles in slag-modified cement mortars". Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). Durban, South Africa. 11-16 May 2003, 1546-1554.
- [215] Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., de Aguiar, J.B., Camões, A. "Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes". Construction and Building Materials. 2012, 34: 186-191.
- [216] Meherier, M.S., Alam, M.S., Banthia, N. "Mechanical behavior of cement mortar with varying replacement level of crumb rubber". 5th International Conference on Construction Materials, ConMat'15. Whistler, BC, Canada. 2015, 1-11.
- [217] Shah, S.F.A., Naseer, A., Shah, A.A., Ashraf, M. "Evaluation of thermal and structural behavior of concrete containing rubber aggregate". Arabian Journal for Science Engineering. 2014, 39(10): 6919-6926.
- [218] Dodoo-Arhin, D., Mensah, S.A, Yaya, A., Agyei-Tuffour, B. "Application of discarded rubber car tyres as synthetic coarse aggregates in light weight pavement concretes". American Journal of Materials Science. 2015, 5(4): 75-83.
- [219] Khorami, M., Vafai, A., Khalilitabas, A., Desai, C.S., Majedi Ardakani, M.H. "Experimental investigation on mechanical characteristics and environmental effects on rubber concrete". International Journal of Concruction Structures and Materials. 2010, 4(1): 17-23.
- [220] Gesoğlu, M., Güneyisi, E. "Permeability properties of self-compacting rubberized concretes". Construction and Building Materials. 2011, 25(8): 3319-3326.
- [221] Tang, W.C., Cui, H.Z., Lo, Y. "Properties of concrete containing scrap-tire chips". Advanced Materials Research. 2012, 399-401: 1251-1256.
- [222] Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Mermerdaş, K., İpek, S. "Experimental investigation on durability performance of rubberized concrete". Advances in Concrete Construction. 2014, 2(3): 193-207.
- [223] Anwar, U., Masood, H., Bashir, O., Mehmood, Y. "Permeability and strength properties of rubberized concrete". University of Engineering and Technology. Lahore, Pakistan. 1-11.
- [224] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., Ipek, S. "Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers". Construction and Building Materials. 2014, 63: 206-213.
- [225] Ganesan, N., Bharati Raj, J., Shashikala, A.P. "Strength and durability studies of self-compacting rubberized concrete". The Indian Concrete Journal. 2012, 15-24.
- [226] Bassuoni, M.T., Nehdi, M.L. "Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction". Cement and Concrete Research. 2007, 37(7): 1070-1084.
- [227] Xu, J., Chen, S., Yu, H., Wang, Y. "Crumb rubber concrete deterioration caused by sulphate attack". 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering (IC3ME 2015). 2015, 539-542.
- [228] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Panicker, V.J. "Experimental and Modeling studies on high strength concrete containing waste tire rubber". Sustainable Cities and Society. 2015, 19: 68-73.
- [229] Rahimi, R.S., Nikbin, I.M., Allahyari, H., Habibi, T.S. "Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack". Journal of Cleaner Production. 2016, 126: 166-177.
- [230] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Mehra, P., Kumar, S. "Performance of high strength rubberized concrete in aggressive Environment". Construction and Building Materials. 2015, 83: 320-326.
-

- 
- [231] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Mehra, P., Kumar, S. "Resistance to acid attack of cement concrete containing discarded tire rubber". UKIERI Concrete Congress Concrete Research Driving Profit and Sustainability. 2015, 1235-1242.
- [232] Sotiriadis, K., Tupý, M., Žižková, N., Petránek, V. "Acid attack on cement mortars modified with rubber aggregates and EVA polymer binder". World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. 2014, 8(6): 616-620.
- [233] Segre, N., Joekes, I., Galves, A.D., Rodrigues, J.A. "Rubber-mortar composites: effect of composition on properties". Journal of Materials Science. 2004, 39(10): 3319-3327.
- [234] Attiogbe, E.K., Rizkalla, S.H. "Response of concrete to sulfuric acid attack". ACI Materials Journal. 1988, 481-488.
- [235] Topçu, İ.B., Demir, A. "Durability of Rubberized Mortar and Concrete". Journal of Materials in Civil Engineering. 2007, 19(2): 173-178.
- [236] Padmini, A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M.S. "Relative moisture movement through recycled aggregate concrete". Magazine of Concrete Research. 2002, 54(5): 377-384.
- [237] Rani, M.U., Jenifer, J.M. "An experimental study on partial replacement of sand with crushed brick in concrete". International Journal of Science Technology and Engineering (IJSTE). 2016, 2(8): 316-322.
- [238] Chen, H.J., Yen, T., Chen, K.H. "Use of building rubbles as recycled aggregates". Cement and Concrete Research. 2003, 33(1): 125-132.
- [239] Katz, A. "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete". Cement and Concrete Research. 2003, 33(5): 703-711.
- [240] Wild, S., Khatib, J.M., O'Farrell, M. "Sulphate resistance of mortar, containing ground brick clay calcined at different temperatures". Cement and Concrete Research. 1997, 27(5): 697-709.
- [241] Mansur, M.A., Wee, T.H., Cheran, L.S. "Crushed bricks as coarse aggregate for concrete". ACI Materials Journal. 1999, 96(4): 478-484.
- [242] Khaloo, A.R. "Properties of concrete using crushed clinker brick as coarse aggregate". ACI Materials Journal. 1994, 91(2): 401-407.
- [243] Akhtaruzzaman, A.A., Hasnat, A. "Properties of concrete using crushed brick as aggregate". Concrete International: Design and Construction. 1983, 5(2): 58-63.
- [244] Hasan, M.K., Khan, M.M.U., Uddin, M.S. "Properties of concretes obtained replacing stone chips by brick aggregates". B. Sc. Engineering thesis. Dhaka University of Engineering and Technology (DUET), Gazipur, Bangladesh. September 2007.
- [245] Bektas, F. "Use of ground clay brick as a supplementary cementitious material in concrete hydration characteristics, mechanical properties, and ASR durability". A dissertation submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. Iowa State University, USA. 2007.
- [246] Bazaz, J.B., Khayati, M. "Properties and performance of concrete made with recycled low-quality crushed brick". Journal of Materials in Civil Engineering. 2012, 24(4): 330-338.
- [247] Kumavat, H.R., Sonawane, Y.N. "Feasibility Study of Partial Replacement of Cement and Sand in Mortar by Brick Waste Material". International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2013, 2(4): 17-20.
- [248] Sadek, D.M. "Physico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates". Journal of Advanced Research. 2012, 3(3): 253-260.
- [249] Hachana, A. "Etude des bétons à base des agrégats de démolition". Mémoire de magistère, Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie. 2008.
- [250] Zakaria, M., Cabrera, J.G. "Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay aggregates". Waste Management. 1996, 16(1-3): 151-158.
- [251] Afify, M.R. Soliman, N.M. "Improvement properties of recycle concrete using clay brick as a coarse aggregate". International Journal of Current Engineering and Technology. 2014, 4(1):119-127.
- [252] Yang, J., Du, Q., Bao, Y. "Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks". Construction and Building Materials. 2011, 25(4): 1935-1945.
- [253] Miličević, I., Štirmer, N., Bjegović, D. "Optimisation of concrete mixtures made with crushed clay bricks and roof tiles". Magazine of Concrete Research. 2015, 67(3): 109-120.
- [254] Aliabdo, A.A., Abd-Elmoaty, A.E.M., Hassan, H.H. "Utilization of crushed clay brick in concrete industry Alexandria". Engineering Journal. 2014, 53(1): 151-168.
- [255] Hamina, M.C. "Influence de l'ajout pouzzolnique (argile cuite) sur les caractéristique physico-chimiques des ciments". Mémoire de magistère. Université de Mohamed Boudiaf-Msila, Algérie. 2004.
-

- 
- [256] Praveen, K., Sathyan, D., Mini, K.M. "Study on performance of concrete with over-burnt bricks aggregates and micro-silica admixture". Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, 149: 1-7.
- [257] Tavakoli, D., Heidari, A., Pilehrood, S.H. "Properties of concrete made with waste clay brick as sand incorporating nano  $SiO_2$ ". Indian Journal of science and Technology. 2014, 7(12): 1899-1905.
- [258] Kumutha, R., Vijai, K. "Strength of concrete incorporating aggregates recycled from demolition waste". ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2010, 5(5): 64-71.
- [259] Cabrera, F., Gómez, J., Almaral, J., Arredondo, S., Corral, R. "Mechanical properties of mortars containing recycled ceramic as a fine aggregate replacement". Journal of construction. 2015, 14(3): 22-29.
- [260] Giniewek J. "Réactivité des montmorillonites calcinées: utilisation dans le génie civil". Thèse de doctorat en chimie. INSA de Lyon, France. 1987.
- [261] Baronio, G., Binda, L. "Study of the pouzzolanicity of some bricks and clays". Construction and Building Materials. 1997, 11(1): 41-46.
- [262] Ambroise, J. "Elaboration de liants pouzzolaniques à moyenne température et étude de leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques". Thèse d'état Génie civil. INSA de Lyon, France. 1984.
- [263] Bessa A., Bigas J.P., Gallias J.L. "Influence des additions minérales naturelles et industrielles sur les principaux paramètres de formulation de mortiers". XXI<sup>ème</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. 2003.
- [264] De-vries, P. "Concrete recycled: crushed concrete as aggregate". Concrete. 1993, 27(3): 9-13.
- [265] Liu, Z.Z., Xiao, B., Liu, Y., Li, X.L. "Impact study on mechanical properties of recycled concrete based on waste brick aggregates". Advanced Materials Research. 2011, 261-263: 24-28.
- [266] Termkhajornkit, P., Nawa, T., Nakai, M., Saito, T. "Effect of fly ash on autogenous shrinkage". Cement and Concrete Research. 2005, 35(3): 473-482.
- [267] Vieira, T., Alves, A., de Brito, J., Correia, J.R., Silva, R.V. "Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware". Materials and design. 2016, 90: 767-776.
- [268] Torii, K., Taniguchi, K., Kawamura, M. "Sulphate resistance of high fly ash content concrete". Cement and Concrete Research. 1995, 25(4): 759-768.
- [269] Malhotra, V.M., Carrette, G.G., Sivasundaram, V. "Role of silica fume in concrete: a review". In Proceedings of the Symposium on Advanced in Concrete Technology, Athens, Greece. 1992.
- [270] Torii, K., Kawamura, M. "Effects of fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulphuric acid and sulphate attack". Cement and Concrete Research. 1994, 24(2): 361-370.
- [271] Akoz, F., Turker, F., Koral, S., Yuzer, N. "Effects of sodium sulphate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume". Cement and Concrete Research. 1995, 25: 1360-1368.
- [272] Locher, F.W. "The problem of the sulphate resistance of slag cements". Zement- Kalk-Gips. 1966, 19(9): 395-401.
- [273] Bakker, R.F.M. "On the cause of increased resistance of concrete made from blast furnace cement to alkali-silica reaction and to sulphate corrosion". Doctorate thesis, T.H.Aachen, Germany. 1980.
- [274] O'Farrell, M., Sabir, B.B., Wild, S. "Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments". Cement and Concrete Composites. 2006, 28(9): 790-799.
- [275] Mehta, P.K. "Supplementary cementing materials for concrete". In: V.M. Malhotra (Ed.), CANMET (SP-86-8E). 1987.
- [276] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. "Concrete, Microstructure, Properties and Materials". Third ed. Mc Graw Hill. New York, 2006.
- [277] Ambroise, J., Martin-Calle, S., Pera, J. "Pozzolan behaviour of thermally activated kaolin". Proceedings of the 4th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete (Ed. V.M. Malhotra). 1992, 132: 731-748.
- [278] Ambroise, J., Murat, M., Pera, J. "Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: V. extension of the research and general conclusions". Cement and Concrete Research. 1985: 15(2): 261-268.
- [279] Ambroise, J., Murat, M. and Pera, J. "Investigations of synthetic binders obtained by middle-temperature thermal dissociation of clay minerals". Silicate Industrials. 1986, 51(7-8): 99-107.
- [280] Wild, S. "Observations on the use of ground waste clay brick as a cement replacement material", Building Research and Information. 1996, 24 (1): 35-40.
-

- [281] Anwar Hossain, M. "Parametric study on permeability of concrete made of brick chips". Master of engineering in civil engineering (Structural). Bangladesh University of Engineering and Technology. 2011.
- [282] Tanvir Hossain, M.A.S., Kader, M.A. "Pervious concrete using brick chips as coarse aggregate: An experimental study". Journal of Civil Engineering (IEB). 2012, 40(2): 125-137.
- [283] Notice technique: "MEDAPLAST SP 40, super plastifiant –haut réducteur d'eau". Granitex. 93.
- [284] Notice technique: "MEDACOL BSE, adjuvants pour bétons et mortiers coulés dans l'eau", Granitex. 45.
- [285] Bonnet, S. "Matériaux cimentaires à haute déformabilité par incorporation de granulats issus du broyage de pneus usagés". Thèse de doctorat. Université de Toulouse, France. 2004.
- [286] Fiche technique, "SikaLatex, Résine à mélanger à l'eau de gâchage des mortiers". Sika. 1-5.
- [287] Guettala, A., Abibsi, A., Houari, H. "Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure". Construction and Building Materials. 2006, 20: 119-127.
- [288] <http://www.sigmaldrich.com/catalog/product/sigald/06203?lang=en&region=DZ>, consulté le 22-10-2016.
- [289] Aiello, M.A., Leuzzi, F., Centonze, G., Maffezzoli, A. "Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: pull-out behaviour, compressive and flexural strength". Waste Management. 2009, 29(6): 1960-1970.
- [290] Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Quéneudec, M. "Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste". Cement and Concrete Composites. 2006, 28(7): 650-657.
- [291] Rashwan, E.F. "Effects of pre-treated recycled tire rubber on fresh and mechanical properties of concrete". Research Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of science in Civil Engineering Design and Rehabilitation of Structures. The Islamic University of Gaza, Palestine. 2016.
- [292] Cairns, R.A., Kew, H.Y., Kenny, M.J. "The use of recycled rubber tyres in concrete construction". Final Report, the Onyx Environmental Trust. University of Strathclyde, Glasgow. 2004.
- [293] Mohammadi, I., Khabbaz, H., Vessalas, K. "In-depth assessment of crumb rubber concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements". Construction and Building Materials. 2014, 71: 456-471.
- [294] Mohammadi, I., Khabbaz, H. "Shrinkage performance of crumb rubber concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements". Cement and Concrete Composites. 2015, 62: 106-116.
- [295] Tian, S., Zhang, T., Li, Y. "Research on modifier and modified process for rubber-particle used in rubberized concrete for road". Advanced Materials Research. 2011, 243-249: 4125-4130.
- [296] Rostami, H., Lepore, J., Silverstraim, T., Zundi, I. "Use of recycled rubber tires in concrete". In: Dhir, R.K. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Concrete 2000. University of Dundee, Scotland, UK. 1993, 391-399.
- [297] Marques, A.C., Akasaki, J.L., Trigo, A.P.M., Marques, M.L. "Influence of the surface treatment of tire rubber residues added in mortar". Ibracon Structures and Materials Journal. 2008, 1(2): 113-120.
- [298] Danko, M., Cano, E., Pena, J. "Use of Recycled Tires as Partial replacement of Coarse Aggregate in the Production of Concrete". Calumet: Purdue University. 2006, 1-14.
- [299] Cepeda-Jimenez, C.M., Pastor-Blas, M.M., Ferrandiz-Gomez, T.P., Martin-Martinez, J.M. "Influence of the styrene content of thermoplastic styrene butadiene rubbers in the effectiveness of the treatment with sulfuric acid", International Journal of Adhesion and Adhesives. 2001, 21: 161-172.
- [300] Zhang, Z.Y., Niu, H.J., Zhang, J.J., Cui, Y.Y. "Influence of the Treatment with Sulfuric Acid on Adhesion of Natural Rubber and Cast Polyurethane Elastomers". Advanced Materials Research. 2012, 452-453: 86-90.
- [301] Bjegovica, D., Baricevica, A., Lakusicb, S., Damjanovicc, D., Duvnjakc, I. "Positive Interaction of Industrial and Recycled Steel Fibres in Fibre Reinforced Concrete". Journal of Civil Engineering and Management. 2013, 19 (Supplement1): S50-S60.
- [302] Muñoz-Sánchez, B., Arévalo-Caballero, M.J., Pacheco-Menor, M.C. "Influence of acetic acid and calcium hydroxide treatments of rubber waste on the properties of rubberized mortars". Materials and Structures. 2017, 50(75): 1-16.
- [303] Rivas-vázquez, L.P., Suárez-orduña, R., Hernández-torres, J., Aquino-bolaños, E. "Effect of the surface treatment of recycled rubber on the mechanical strength of composite concrete/rubber". Materials and Structures. 2015, 48(9): 2809-2814.
- [304] Chou, L.H., Lin, C.N., Lu, C.K., Lee, C.H., Lee, C.T. "Improving rubber concrete by waste organic sulfur compounds". Waste Management Research. 2010, 28(1): 29-35.
- [305] Biel, T., Lee, H. "Magnesium oxychloride cement concrete with recycled tire rubber". Journal of Transportation Research Board. 1996, 1561: 6-12.

- [306] Ossola, G., Wojcik, A. "UV modification of tire rubber for use in cementitious composites". Cement and Concrete Composites. 2014, 52: 34-41.
- [307] Segre, N., Monteiro, P.J.M., Sposito, G. "Surface characterization of recycled tire rubber to be used in cement paste matrix". Journal of Colloid and Interface Science. 2002, 248(2): 521-523.
- [308] Turki, M., Zarrad, I., Bretagne, E., Quéneudec, M. "Influence of filler addition on mechanical behavior of cementitious mortar-rubber aggregates: experimental study and modeling". Journal of Materials in Civil Engineering. 2012, 24(11): 1350-1358.
- [309] Jo, B.W., Kim, C.H., Tae, G.H., Park, J.B. "Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles". Construction and Building Materials. 2007, 21(6): 1351-1355.
- [310] Sohrabi, M.R., karbalaie, M. "An experimental study on compressive strength of concrete containing crumb rubber". International Journal of Civil and Environmental Engineering IJCEE-IJENS. 2011, 11(03): 23-27.
- [311] Dreux, G., Festa, J. "Nouveau guide du béton". Edition EYROLLES. Paris. Mai 1998.
- [312] NF EN 1015-3. "Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie3: détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses)". Octobre 1999.
- [313] NF EN 1015-6. "Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie6: détermination de la masse volumique apparente du mortier frais". Octobre 1999.
- [314] NF EN 12390-7. "Essai pour béton durci-Partie 7: masse Volumique du béton ". Avril 2012.
- [315] NF EN 196-1. "Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques Indice de classement". Avril 2006: P15-471-1.
- [316] NF EN 1015-11. "Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie11: détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci". 2000.
- [317] Dupain, R., Lanchon, R., Saint Arroman, J.C. "Granulats, sols, ciments et bétons – caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire". Collection CAPLIEZ, édition CASTEILLA, V235. Paris 2000.
- [318] Cherait Y, Nafa Z. "Eléments de matériaux de construction et essais". Collection : le livre de génie civil. Direction de la publication universitaire de Guelma.
- [319] NF EN 12504-4. "Essais pour béton dans les structures-Partie4: détermination de la vitesse de propagation du son". Mai 2005.
- [320] NF P15-433. "Méthodes d'essais des ciments: détermination du retrait et du gonflement". Février 1994.
- [321] NF EN 480-5. "Adjuvants pour Béton, Mortier et Coulis - Méthodes d'Essai -Partie5: détermination de l'Absorption Capillaire". Janvier 2006.
- [322] Hall, C. "Water movement in porous building materials. I. unsaturated flow theory and its applications". Building and Environment. 1977, 12(2): 117-125.
- [323] NBN B 15-215. "Essais des bétons: absorption d'eau par immersion". janvier 1989.
- [324] <http://doc.lerm.fr/salinité-l'eau-mer>, consulté le 18-10-2016.
- [325] ASTM C 1012. "Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution". Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Structures. 2004.
- [326] ASTM C 267. "Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacing and polymer concretes". Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Structures. June 1996.
- [327] NF EN 18-459. "Béton - Essai pour béton durci: essai de porosité et de masse volumique". Mars 2010.
- [328] "Manuel d'utilisation : appareil pour mesurer la perméabilité à l'air (compte-bulles)". Controlab. 2006.
- [329] "Association Française de Génie Civil, méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité". Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des Bétons ». AFGC, 1997.
- [330] Kollek, J.J. "The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method - a recommendation". Materials and Structure. 1989, 22(3): 225-230.
- [331] Picandet, V. "Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons". Thèse de Doctorat. Université De Nantes, France. 2001.
- [332] Laghcha, A. "Contribution à l'étude des transferts gazeux et liquide au sein des parois en béton endommagées sous sollicitation thermo-hydrique". Thèse de Doctorat en Génie civil. INSA de Lyon, France. 2006.
- [333] Picandet, V., Khelidj, A., Bastian, G. "Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high-performance concrete". Cement and Concrete Research. 2001, 31(11): 1525-1532.
- [334] NF EN 12390-8. "Essais pour béton durci-Partie 8: profondeur de pénétration d'eau sous pression". octobre 2001.

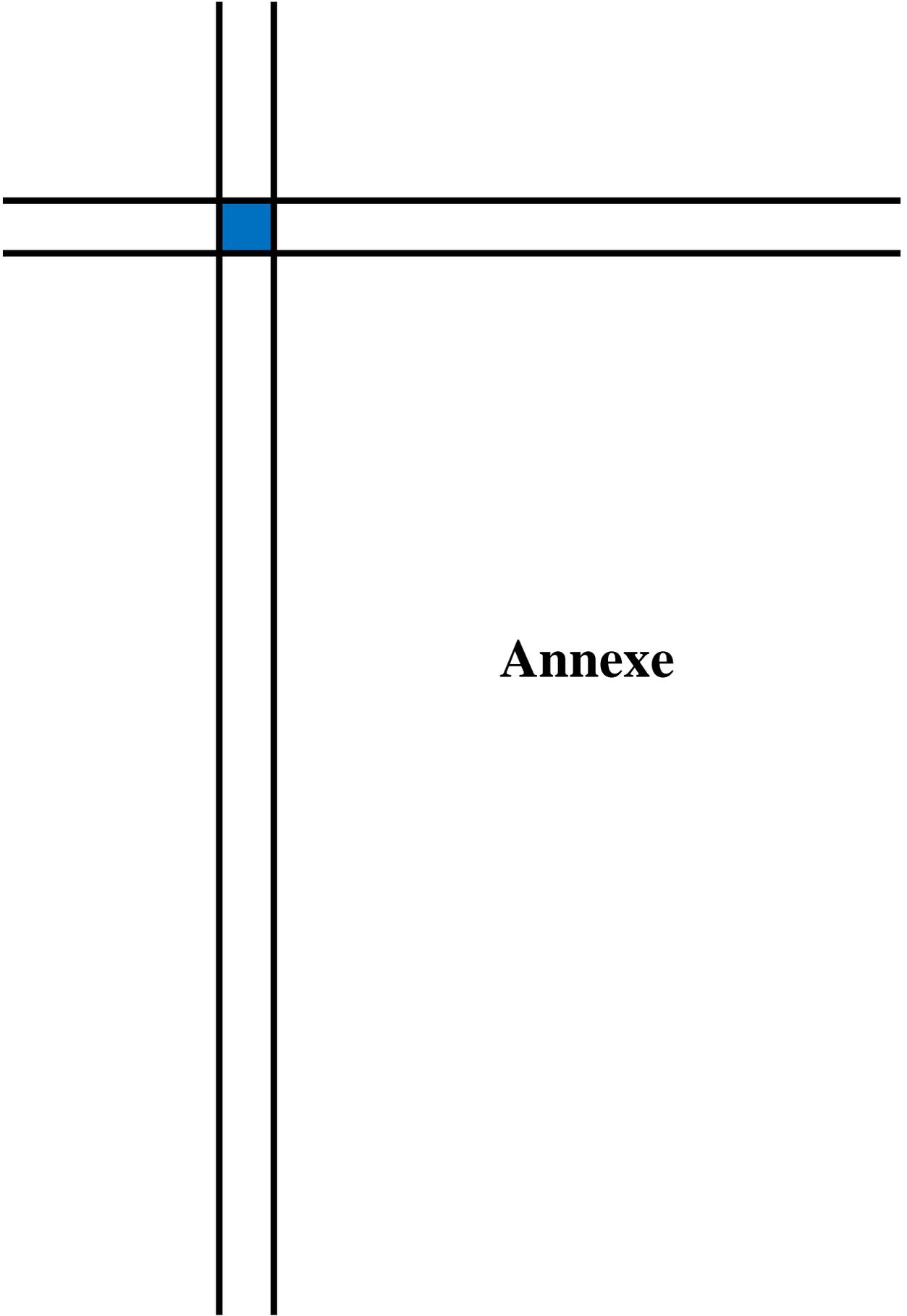
- 
- [335] Deshpande, N., Kulkarni, S.S., Pawar, T., Gunde, V. "Experimental investigation on strength characteristics of concrete using tyre rubber as aggregates in concrete". International Journal of Applied Engineering Research and Development (IJAERD). 2014, 4(2): 97-108.
- [336] Eiras, J.N., Segovia, F., Borrachero, M.V., Monzó, J., Bonilla, M., Payá, J. "Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires". Materials and Design. 2014, 59: 550-557.
- [337] Hernandez-Olivares, F., Barluenga, G. "Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete". Cement and Concrete Research. 2004, 34(1): 109-117.
- [338] Karahan, O., Özbay, E., Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Atis, C.D. "Fresh, mechanical, transport, and durability properties of self-consolidating rubberized concrete". ACI Materials Journal. 2012, 109(4): 413-420.
- [339] Onuaguluchi, O., Panesar, D.K. "Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume". Journal of Cleaner Production. 2014, 82: 125-131.
- [340] Si, R., Guo, S., Dai, Q. "Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles". Construction and Building Materials. 2017, 153: 496-505.
- [341] Nacif, G.L., Panzera, T.H., Strecker, K., Christoforo, A.L., Paine, K. "Investigations on cementitious composites based on rubber particle waste additions". Materials Research. 2013, 16(2): 259-268.
- [342] Mohammed, B.S., Hossain, K.M.A., Swee, J.T.E., Wong, G., Abdullahi, M. "Properties of crumb rubber hollow concrete block". Journal of Cleaner Production. 2012, 23(1): 57-67.
- [343] Mohammadi, I., Khabbaz, H., Vessalas, K. "Enhancing mechanical performance of rubberized concrete pavements with sodium hydroxide treatment". Materials and Structures. 2016, 49: 813-827.
- [344] Poon, C.S., Chan, D. "Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick". Construction and Building Materials. 2006, 20(8): 569-577.
- [345] Tishmack, J., Olek, J., Diamond, S. "Characterization of high-calcium fly ashes and their potential influence on ettringite formation in cementitious systems". Cement Concrete and Aggregates. 1999, 21: 82-92.
- [346] Matschei, T., Lothenbach, B., Glasser, F.P. "The AFm phase in Portland cement". Cement and Concrete Research. 2007, 37(2): 118-130.
- [347] Adamu, M., Uche, O.A.U. "Durability properties of concrete containing scrap tyre as fine and coarse aggregate in Concrete". International Journal of Scientific and Engineering Research. 2014, 5(11): 628-634.
- [348] Lutz M.P., Monteiro, P.J.M., Zimmerman, R.W. "Inhomogeneous interfacial transition zone model for the bulk modulus of mortar". Cement and Concrete Research. 1997, 27(7): 1113-1122.
- [349] Youssf, O., Mills, J.E., Hassanli, R. "Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete". Construction and Building Materials. 2016, 125: 175-183.
- [350] Saidi, M., Safi, B., Bouali, K., Benmounah, A., Samar, M. "Improved behaviour of mortars at a high temperature by using refractory brick wastes". International Journal of Microstructure and Materials Properties. 2015, 10 (5-6): 366-380.
- [351] Lavat, A., Trezza, M., Poggi, M. "Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture". Waste Management. 2009, 29: 1666-1674.
- [352] Bjegović, D., Baričević, A., Serdar, M. "Durability Properties of Concrete with Recycled Waste Tyres". International Conferences on Durability of Building Materials and Composites. Porto, Portugal. April 12<sup>th</sup> 15<sup>th</sup>, 2011, 1-9.
- [353] Gesoglu, M., Guneyisi, E. "Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume". Materials and Structures. 2007, 40(9): 953-964.
- [354] Abg Adenan, D.S.Q., Kamaruddin, K. "Durability Performance of Polymeric Waste Crumb Rubber as Fine Aggregates Replacement in Concrete". Advanced Materials Research. 2015, 1129: 508-515.
- [355] Su, H., Ghataora, G.S., Dirar, S., Yang, J. "Surface modified used rubber tyre aggregates: effect on recycled concrete performance". Magazine of Concrete Research. 2015, 67(12): 680-691.
- [356] Kartini, K., Rohaidah, M.N., Zuraini, Z.A. "Performance of Ground Clay Bricks as Partial Cement Replacement in Grade 30 Concrete". World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. 2012, 6(8): 569-572.
- [357] Bassuoni, M.T., Nehdi, M.L. "Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction". Cement and Concrete Research. 2007, 37(7): 1070-1084.
- [358] Thomas, B.S. "Strength and durability of concrete containing discarded crumb rubber tire". This thesis is submitted as a partial fulfilment of the degree of Doctor of Philosophy. Malaviya National Institute of Technology. Jaipur, India. 2012.
-

- [359] Mouli, M., Senhadji, Y., Benosman, A.S., Khelafi, H. "*Résistance aux acides et à la pénétration des ions chlorures des mortiers avec pouzzolane et fine calcaire*". Communication Science and technologie N° 8. 2010, 57-63.
- [360] Laoufi, L., Senhadji, Y., Benazzouk, A., Langlet, T., Mouli, M., Laoufi, I., Benosman, A.S. "*Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique (Assessment of pozzolanic mortars sustainability exposed to chemical attack)*". Journal of Materials and Environmental Science. 2016, 7(5): 1835-1845.
- [361] Yung, W.H., Yung, L.C., Hua, L.H. "*A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete*". Construction and Building Materials. 2013, 41: 665-672.
- [362] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Panicker, V.J. "*Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance*". Journal of Cleaner Production. 2016, 112: 504-513
- [363] Benabed, B., Azzouz, L., Kadri, E.H., Belaidi, A.S.E., Soualhi, H. "*Propriétés physicomécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes*". In: XXXe Rencontres AUGC-IBPSA. Chambéry, France. 6-8 juin 2012, 1-11.
- [364] Kallel, T., Kallel, A., Samet, B. "*Durability of mortars made with sand washing waste*". Construction and Building Materials. 2016, 122: 728-735.
- [365] Al-Akhras, N.M. "*Durability of metakaolin concrete to sulfate attack*". Cement and Concrete Research. 2006, 36(9): 1727-1734.
- [366] Ikotun, B.D., Ikotun, A.G. "*Effect of a Modified Pozzolan on the Sulphate Attack Resistant of Mortar*". IACSIT International Journal of Engineering and Technology. 2014, 6(1): 55-59.
- [367] Sabir, B.B., Wild S., Bai J. "*Metakoalin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*". Cement and Concrete Composites. 2001, 23: 441-454.
- [368] O'Farrell M., Wild, S., Sabir, BB. "*Resistance attack of ground brick-PC mortar: Part I Sodium Sulphate Solution*". Cement and Concrete Research. 1999, 29(11): 1781-1790.
- [369] Wee, T.H., Suryavanshi, A.K., Wong, S.F., Anisur Rahman, A.K.M. "*Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures*". ACI Materials Journal. 2000, 97(5): 536-549.
- [370] Chihaoui, R., Khelafi, H., Mouli, M., Senhadji, Y. "*Effets de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des mortiers exposés aux attaques sulfatiques*". 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in developing Countries (SBEIDCO). ENSET Oran, Algeria. 2009.
- [371] Petrov, N., Tagnit-Hamou, A. "*Approche holistique de la formation différée de l'ettringite*". Université de Sherbrooke. Québec, Canada. 2006, 147-160.
- [372] Demir, I., Yaprak, H., Simsek, O. "*Performance of cement mortars replaced by ground waste brick in different aggressive conditions*" Ceramics - Silikáty. 2011, 55 (3): 268-275.
- [373] Kaid, N., Ayed, K., Abi Delah, A., Khelafi, H., Kerdal, D. "*Etude de la durabilité des mortiers pouzzolaniques face aux milieux agressifs*". Symposium International sur la Construction en Zone Sismique "SICZS". Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie. 26-27 octobre 2010, 1-10.
- [374] M., O'Farrell, S., Wild, B.B. Sabir "*Resistance to chemical attack of ground brick-PC mortar Part II: Synthetic seawater*". Cement and Concrete Research. 2000, 30(5): 757-765.
- [375] Mehta, P.K. "*Performance of concrete in marine environment*". ACI SP- 65. 1980, 1-20.
- [376] Duval, R., Hornain, H. "*La durabilité des bétons vis à vis des eaux agressives*". Presses de l'ENPC. 1992.
- [377] Guanshu, L. "*Etude du phénomène de l'expansion sulfatique dans les bétons: comportement des enrobés de déchets radioactifs sulfates*". Thèse de doctorat. L'école nationale des ponts et chaussées. 1994.
- [378] Escadeillas, G., Hornain, H. "*La durabilité des bétons vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs*". Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées. 2008.
- [379] Nurazuwa M.N., Hamada, H., Sagawa, Y., Yamamoto, D. "*Effect of crumb rubber on concrete strength and chloride ion penetration resistance*". Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering). 2015, 77(32): 171-178.
- [380] Costa, U., Massaza, F. "*From materials science to construction materials engineering*". Proceeding: 1st International Rilem congress. Versailles. 1987.
- [381] Locher, F.W. "*Influence of chloride and hydrocarbonate on the sulfate attack*". 5th international symposium on the chemistry of cement. Tokyo. 1968, 3: 328-335.
- [382] Lea, F.M. "*The Chemistry of Cement and Concrete*". 3d ed., Edward Arnold Ltd. Glasgow. 1970.
- [383] Rasheeduzzafar, Al-Amoudi, O.S.B., Abduljauwad, S.N., Maslehuddin, M. "*Magnesium-sodium sulphate attack in plain and blended cements*". Journal of Materials in Civil Engineering. 1994, 6(2) 201-222.
- [384] Cohen, M.D., Bentur, A. "*Durability of Portland cement-silica fume pastes in magnesium sulphate and sodium sulphate solutions*". ACI Materials Journal. 1988, 85(3): 148-157.
- [385] Dhir, R.K., Limbachia, M.C., Paine, K.A. "*Recycling and Reuse of Used Tires*". Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd. London E14 4JD. Dundee. 2001.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [386] Güneyisi, E., Gesoglu, M., Oturan, T. "*Properties of rubberized concretes containing silica fume*". Cement and Concrete Research. 2004, 34(12): 2309-2317.
- [387] Lin, K.L., Wu, H.H., Shie, J.L., Hwang, C.L. Cheng, A. "*Recycling waste brick from construction and demolition of buildings as pozzolanic materials*", Waste Management Research. 2010, 28(7): 653-659.
- [388] Brooks, J.J. "*Shrinkage of concrete*". Concrete and Masonry Movements. Butterworth-Heinemann. 2015, 137-185.
- [389] Neville, A.M. "Properties of Concrete". Fifth ed. ELBS. 2011.
- [390] Hobbs, D.W. "*The dependence of the bulk modulus. Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration*". Materials and construction. 1971, 4(2): 107-114.
-



**Annexe**



# SCIMAT

## SOCIETE DES CIMENTS DE AIN TOUTA FILIALE DU GROUPE GICA

SPA AU CAPITAL SOCIAL DE 2.250.000 000 DA  
CERTIFIEE ISO 9001 :2008 & ISO 14001 :2004

### CIMENT POUR TRAVAUX DANS LES MILIEUX FORTEMENT AGGRESSIF

## CPA-CEM I 42.5 ES

#### TYPE ET COMPOSITION DU CIMENT

##### Désignation :

Ciment pour travaux en milieux fortement agressifs.

##### Identification :

CPA-CEM I 42,5 ES

##### Composition :

- ✓ Clinker : au moins 97%.
- ✓ Ajouts : la proportion de constitutions secondaires est limitée à 03%.

##### Conditionnement :

- ✓ Vrac : camion 20T / wagon 50T
- ✓ Sac : de 50 Kg

#### SPECIFICATIONS MECANQUES ET PHYSIQUES

Le ciment CPA- CEM I 42.5 ES de l'ERCE répond aux exigences de la norme NA 433 :2002

##### Caractéristiques Physiques :

- ✓ Temps de début de prise mesuré sur pâte pure  $\geq 60$  minutes.
- ✓ Retrait à 28 jours d'âge sur mortier normal  $\leq 1000 \mu\text{m} / \text{m}$ .
- ✓ Stabilité mesurée sur éprouvette de pâte pure  $\leq 05 \text{ mm}$ .

##### Caractéristiques Mécaniques :

Les résistances mécaniques à la compression font apparaitre une valeur moyenne des résultats à 28 jour voisine de  $52,5 \text{ N} / \text{mm}^2$ .

Les valeurs limitées garanties sont :  $\geq 10,0 \text{ N} / \text{mm}^2$  à 02 jours.  
 $\geq 40,0 \text{ N} / \text{mm}^2$  à 28 jours.

## CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

<b>Ciment</b>	<b>SO3 (si C3A ≤ 3%)</b>	<b>≤ 3,5%</b>
	<b>SO3 (si C3A ≤ 5%)</b>	<b>≤ 2,5%</b>
	<b>PAF</b>	<b>≤3,0%</b>
	<b>Rés.Ins</b>	<b>≤0,75%</b>
	<b>MgO</b>	<b>≤4,0%</b>
<b>Clinker</b>	<b>C3A</b>	<b>≤5,0%</b>
	<b>C4AF+2(C3A)</b>	<b>≤20,0%</b>

### Emplois Habituels

Le ciment **CPA-CEM I 42,5 ES** est adapté aux travaux en milieux fortement agressif\*. Il convient pour :  
Travaux de fondation souterrains, d'assainissement, en contact avec sols et eau c  
Pour plus de détail se référer à la norme NA 778.

### Environnement

Pour préserver notre environnement :

- ✓ Eviter de déverser de ciment en quantité importante dans les égouts et dans les eaux de surface
- ✓ Eviter les envolées de poussières du ciment lors de sa manipulation par l'utilisation de moyen approprié

### Sécurité

Le ciment n'est pas classé comme préparation dangereuse néanmoins :

- ✓ Eviter le contact prolongé avec la peau et les yeux.
- ✓ Utiliser des gants, des lunettes appropriées et des masques anti-poussière.

Tenir hors de portée des enfants.

## RECOMMANDATION ET CONSEILS D'UTILISATION

### Mise en œuvre

- ✓ Pour les travaux sous la pluie, par temps chaud, par grand vent ou par temps de gel utiliser des adjuvants normalisés et appropriés.
- ✓ Les coulées doivent être régulières et continues par couches de faible épaisseur.
- ✓ La hauteur de chute du béton ne doit pas dépasser 1 mètre de hauteur, de façon à éviter toute ségrégation. Au-delà de cette hauteur il est indispensable de prévoir l'utilisation d'une goulotte d'amenée à hauteur convenable, ou d'une cheminée d'alimentation.
- ✓ Adapter la vibration du béton à sa consistance pour obtenir une compacité optimale sans ségrégation
- ✓ Veiller respecter des temps de prise lors de la livraison du béton frais.

### Préparation

- ✓ Quelque soit les moyens choisis pour le dosage, (grand seau, petit seau, brouette, etc.), il est impératif qu'ils restent identiques pour chaque ingrédient.
- ✓ Les surfaces destinées à recevoir le mortier ou le béton doivent être bien nettoyées et humidifiées.
- ✓ S'assurer de la propreté des constituants entrant dans le mélange, à savoir le sable et les granulats.
- ✓ S'assurer que l'eau de gâchage est propre, claire et exempte des matières nocives. De préférence utiliser de l'eau potable.
- ✓ Le dosage des différents constituants doit être respecté en fonction des applications.  
Le rapport eau/ciment doit être le plus faible possible, compatible avec une bonne rhéologie du béton frais ( $E/C \approx 0,5$ ).

### Durcissement

- ✓ Protéger l'ouvrage par temps de gel.
- ✓ Réaliser une cure du béton par arrosage en temps chaud.

Eviter le décoffrage prématuré

### Stockage

Pour conserver les propriétés du ciment, le stocker à l'abri des intempéries et notamment l'humidité :

- ✓ Sac : entreposage sur des palettes en bois, la hauteur des sacs déposés ne doit pas dépasser le nombre de 10.
- ✓ Vrac : stockage dans des silos étanches.

### Contrôle de la Qualité

La fabrication du ciment **CPA-CEM I 42 .5 ES** par l'ERCE est soumise au contrôle stricte et continu de la qualité. Nos laboratoires exercent en continu ce contrôle de la qualité du produit ainsi que les essais de conformité aux normes en vigueur.

# MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1 , 3.1 et 3.2 NA 774

## Super plastifiant - haut réducteur d'eau

### DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

### DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

### PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

#### Sur béton frais :

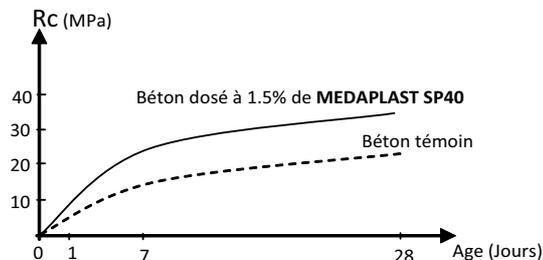
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

#### Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

### CARACTÉRISTIQUES

- Aspect ..... Liquide
- Couleur ..... Marron
- pH ..... 8,2
- Densité .....  $1,20 \pm 0,01$
- Teneur en chlore .....  $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec ..... 40%



Evolution des résistances en compression

### MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

### DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

### CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

#### Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ( $5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$ ).

### PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : [www.granitex-dz.com](http://www.granitex-dz.com)

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex-dz.com](http://www.granitex-dz.com) - E-mail: [granitex@granitex-dz.com](mailto:granitex@granitex-dz.com)



# MEDACOL BSE

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 4.

## Adjuvant pour bétons et mortiers coulés dans l'eau

### DESCRIPTION

Le **MEDACOL BSE** est un adjuvant en poudre destiné à la confection de bétons et mortiers coulés dans l'eau.

### DOMAINES D'APPLICATION

- Travaux en milieux marins
- Caissons immergés
- Alvéoles pour blocs de quais
- Colmatage de cavernes pour digues à talus
- Coulis d'injection
- Bétons de pieux dans terrains absorbants

### PROPRIÉTÉS

Le **MEDACOL BSE** rend le béton plus plastique voire visqueux, ce qui facilite le bétonnage sous l'eau, sans lessivage ni ségrégation.

Avec l'ajout d'un super plastifiant, le même béton peut être pompé avec un rapport E/C très bas par rapport à un béton témoin pompé dans les mêmes conditions.

### CARACTÉRISTIQUES

Le **MEDACOL BSE** est composé essentiellement d'agents colloïdaux et de micro silice ultra fine.

- Aspect ..... poudre grisâtre
- Densité ..... 0,5

### MODE D'EMPLOI

Le **MEDACOL BSE** doit être mélangé à sec avec tous les composants du béton (ciment, sable et agrégats) avant introduction de l'eau de gâchage.

Introduire l'eau de gâchage en une seule fois, puis malaxer pendant au moins 2 minutes pour permettre une bonne répartition de tous les constituants du béton.

La consistance du béton doit être fluide ; les résultats recherchés sont :

- Étalement (table DIN) ..... 600 mm
  - Affaissement au cône d'Abrams ..... 200 mm
- Il est nécessaire de procéder à des essais de convenance afin de déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire.

### CONSOMMATION

A titre indicatif, la consommation du **MEDACOL BSE** sera :

#### 1- Pour béton coulé dans l'eau :

- Eau stable : 0,8% par rapport au poids du ciment
- Eau faiblement agitée : 1,6 % par rapport au poids du ciment
- Eau fortement agitée : 2,4 % par rapport au poids du ciment

#### 2- Pour coulis d'injection

- 0.3 à 2% par rapport au poids de ciment

Le dosage dépendra de la viscosité recherchée du coulis.

### CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Sacs en papier kraft de 10 kg et de 20 kg.

#### Durée de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri de l'humidité et de la chaleur.

### PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : [www.granitex-dz.com](http://www.granitex-dz.com)

*Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.*



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex-dz.com](http://www.granitex-dz.com) - E-mail: [granitex@granitex-dz.com](mailto:granitex@granitex-dz.com)



# SIKALATEX®

Résine à mélanger à l'eau de gâchage des mortiers.

## Présentation

Le SIKALATEX est une dispersion aqueuse de résine synthétique qui se présente sous la forme d'un liquide laiteux concentré.

Parfaitement miscible, il s'ajoute directement à l'eau de gâchage des mortiers de ciment.

## Domaines d'application

### Enduits et chapes

- Barbotines pour accrochage des enduits et chapes de ciment.
- Enduits imperméables pour réservoirs et piscines d'eau douce et d'eau de mer.
- Chapes de haute résistance à l'usure même en présence d'eau : seuils sous vanne, radiers soumis à des efforts d'érosion.

### Jointoiements

- Joints de maçonnerie durables et étanches.
- Joints de prédalles et de panneaux préfabriqués.

### Ragréages et réparations

- Reprofilages et réparations d'épaufrures de béton, béton armé ou précontraint.

### Travaux de finition de couverture

- Embarrures et crêtes de tuiles faitières.
- Raccords d'enduits des maçonneries et solins de rives.
- Enduits de souches et solins.

### Collages et durcissement des plâtres

- Collage par barbotine conformément au DTU 25.1
- Réalisation de plâtres durs et étanches.

### Reprises de bétonnage

- Reprises entre coulées successives de béton par incorporation de SIKALATEX dans un mortier de liaison.

## Caractères généraux

Le SIKALATEX :

- améliore fortement l'adhérence du mortier sur tout support, même lisse (béton, pierre, brique, métaux ferreux, verre et céramique),
- rend le mortier plastique et facile à mettre en œuvre,
- augmente les résistances à la traction,
- limite le risque de fissuration,
- améliore l'imperméabilisation,
- améliore la dureté de surface,
- réduit l'usure et le poussierage.

Le SIKALATEX conserve ses qualités, même en milieu humide ou en immersion.

Le SIKALATEX est compatible avec tous les ciments, la chaux et le plâtre.

## Caractéristiques

### Coloris

Liquide laiteux

### Conditionnement

- Sachet de 500 ml
- Bidons de 2 litres, 5 litres et 20 litres
- Carton de 10 litres



<b>Stockage</b>	A l'abri du gel et d'une chaleur excessive.
<b>Conservation</b>	Dans son emballage d'origine intact : <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 12 mois pour les sachets et les bidons</li> <li>■ 18 mois pour les cartons</li> </ul>
<b>Données techniques</b>	
<b>Densité</b>	Environ 1
<b>Matières actives</b>	Environ 50 %
<b>Conditions d'application</b>	
<b>Consommation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ En couche d'accrochage : 0,120 l / m<sup>2</sup> et mm d'épaisseur.</li> <li>■ En mortier : 0,600 l / m<sup>2</sup> et cm d'épaisseur.</li> </ul>
<b>Préparation du support</b>	Ils seront sains, propres et débarrassés des parties non adhérentes. Ils seront largement imbibés d'eau mais non ruisselants.
<b>Mise en oeuvre</b>	
<b>Préparation du mélange</b>	Préparation de la solution SIKALATEX <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1 volume de SIKALATEX.</li> <li>■ 2 volumes d'eau.</li> </ul> Préparation de la barbotine SIKALATEX <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1 volume de ciment.</li> <li>■ 1 volume de sable.</li> </ul> Gâcher jusqu'à consistance crémeuse avec la solution SIKALATEX. Préparation du mortier SIKALATEX <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1 volume de ciment.</li> <li>■ 2 volumes de sable 0-3.</li> </ul> Gâcher jusqu'à consistance voulue avec la solution SIKALATEX. Malaxage <ul style="list-style-type: none"> <li>■ A la main comme un mortier ordinaire.</li> <li>■ Avec une bétonnière ou un malaxeur verser le mortier dès qu'il est homogène afin d'éviter tout malaxage prolongé.</li> <li>■ Le mortier peut être accéléré en ajoutant 0,5 à 1 litre de DROSPRINT (voir notice technique 12.70) selon la température et l'effet recherché, par sac de 35 kg de ciment.</li> </ul>
<b>Nettoyage des outils</b>	Nettoyage des outils à l'eau avant durcissement.
<b>Mise en oeuvre</b>	<b>Enduits</b> <p>Pour obtenir une bonne adhérence des enduits sur béton brut ou lisse et sur toutes maçonneries :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ après préparation du support, faire un gobetis à l'aide du mortier SIKALATEX réalisé avec un sable grenu pour obtenir une surface d'accrochage rugueuse,</li> <li>■ laisser tirer le gobetis (dur à l'ongle) avant d'enduire la paroi,</li> <li>■ appliquer l'enduit proprement dit, dresser à la règle, garder une surface rugueuse,</li> <li>■ faire la couche de finition.</li> </ul>

## **Chapes**

Pour obtenir une bonne adhérence des chapes :

- après préparation du support, étaler la barbotine SIKALATEX en couche mince de quelques millimètres d'épaisseur au balai de cantonnier (utiliser le même sable),
- sur cette barbotine encore fraîche et poisseuse, exécuter la chape proprement dite.

Pour obtenir une chape présentant une bonne résistance à l'usure et peu sensible à l'action des huiles et graisses :

- procéder comme ci-dessus pour la barbotine,
- sur la barbotine encore fraîche et poisseuse, exécuter une chape avec un mortier SIKALATEX gâché avec la solution spéciale suivante :
  - 1 volume de SIKALATEX,
  - 3 volumes d'eau,
- protéger contre la dessiccation en pulvérisant sur la chape la solution SIKALATEX dès le virage au mat du mortier, puis en humidifiant la chape après 24 heures.

## **Joints de maçonnerie**

Pour réaliser des joints apparents durables, procéder ainsi :

- si nécessaire, refouiller les joints horizontaux et verticaux sur quelques centimètres de profondeur,
- les laver au jet d'eau sous pression,
- garnir les joints encore humides avec le mortier SIKALATEX, gâché assez ferme, pour obtenir une bonne adhérence et une étanchéité améliorée des joints,
- éviter les joints saillants ou trop profonds (DTU 20.1).

## **Ragréages - Réparations**

Pour procéder à des ragréages solides et nets :

- après préparation du support, réaliser un mortier SIKALATEX gâché ferme avec un sable assez fin,
- imprégner la partie à ragréer avec la solution SIKALATEX,
- avant séchage de cette imprégnation, appliquer et serrer le mortier SIKALATEX,
- finir aussitôt les ragréages, reprofilages d'arêtes, recharges de dressement.

Les trous laissés par les broches d'écartement des coffrages seront obturés efficacement et de façon durable avec un mortier SIKALATEX.

## **Travaux de finition de couverture**

- Après préparation du support appliquer le mortier SIKALATEX de la même manière que le mortier habituel.
- Protéger contre la dessiccation en pulvérisant la solution SIKALATEX.

## **Collages des plâtres - Plâtres imperméables**

Pour traiter les plâtres soumis à l'humidité :

- gâcher le plâtre avec la solution SIKALATEX spéciale à 1 volume de SIKALATEX pour 4 volumes d'eau,
- faire un gobetis rugueux en couche d'accrochage,
- le plâtre gâché avec la solution SIKALATEX devient dur plus rapidement et imperméable.

## **Reprises de bétonnage**

Pour obtenir une bonne liaison du béton frais sur béton durci et prévenir les défauts d'imperméabilisation de la surface de reprise :

- laver au jet d'eau sous pression le béton de la surface de reprise,
- préparer un mortier SIKALATEX gâché à consistance plastique,
- répandre le mortier SIKALATEX sur la surface humide en couche de 2 à 3 centimètres,
- couler aussitôt le béton,
- vibrer soigneusement la zone de reprise pour une bonne interpénétration du mortier et du béton,
- utiliser une hauteur de banches compatible avec les moyens de serrages utilisés sur le chantier.

## Précautions d'emploi

Pour les précautions d'emploi et l'élimination des déchets, consulter la fiche de données de sécurité disponible sur Internet [www.sika.fr](http://www.sika.fr)

## Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika France S.A.  
84, rue Edouard Vaillant – BP 104  
93351 Le Bourget Cedex  
France

Tel. : 01 49 92 80 00  
Fax : 01 49 92 80 21  
[www.sika.fr](http://www.sika.fr)