

Université 20 Août 1955-Skikda

Faculté de Technologie

Département : Génie civil

Ref : D012125017D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم: الهندسة المدنية

المرجع : D012125017D

Thèse présentée en vue de l'obtention  
du diplôme de  
**Doctorat LMD**  
En génie civil  
Option : Géo-matériaux

## Titre

**Performance des bétons à base de déchets dans les milieux agressifs**

Présentée par :

**BELMOUHOUB Ameer**

Dirigée par

**Dr. ABDELOUAHED Assia**

Soutenue publiquement le : 07/05/2025

**Devant le jury composé de :**

Président	Pr. Hebhouh Houria	Pr. Univ. 20 Aout 1955-Skikda
Rapporteur	Dr. Abdelouahed Assia	M.C.A. Univ. 20 Aout 1955-Skikda
Co-rapporteur	Dr. Noui Ammar	M.C.A. Univ- Bordj Bou Arreridj
Examineur	Dr. Boughamsa Ouassila	M.C.A. Univ- 20 Aout 1955-Skikda
Examineur	Dr. Kherraf Leila	M.C.A. Univ. 20 Aout 1955-Skikda
Examineur	Dr. Kechkar Chiraz	M.C.A. Univ- Guelma
Examineur	Pr. Belachia Mouloud	Pr. Univ- Guelma

## *Dédicaces*

*Je consacre ce petit travail :*

*À mes proches les plus précieux du monde :*

*"À mes parents, pour leur soutien sans faille tout au long de ce parcours académique."*

*"À mes amis, qui ont été mes piliers dans les moments de doute et de fatigue."*

*"À mon encadrant de recherche, pour ses conseils éclairés et son accompagnement précieux."*

*"À mes frères qui m'ont soutenu dans la réalisation de mes recherches par leur soutien financier et moral"*

## *Remerciements*

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Mon Superviseur, Abdelouahed Assia, pour ses précieux conseils, ses conseils avisés et son soutien indéfectible tout au long de ce projet de recherche,*

*J'adresse également mes remerciements au Superviseur Adjoint Noui Ammar pour son aide et ses encouragements, ainsi qu'à l'Université de Skikda pour m'avoir offert cette opportunité d'apprentissage et de développement.*

*Je tiens également à remercier Madame Habhoub Houria, professeur à l'Université de Skikda, Madame Boughamsa Ouassila, maitre de conférences A à l'Université de Skikda, Madame Kherraf Leila, maitre de conférences A à l'Université de Skikda, Madame Kechkar Chiraz, maitre de conférences A à l'Université de Guelma, et Monsieur Belachia Mouloud, professeur à l'Université de Geulma, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner ce travail. Je leur exprime toute ma reconnaissance pour l'intérêt qu'ils ont porté à la lecture et la critique de ma thèse.*

*Enfin, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma famille et à mes amis pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leur amour qui m'ont permis de mener à bien ce travail.*

*Merci à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de cette thèse. Votre aide a été précieuse et votre soutien est inestimable.*

*Belmouhoub Ameur.*



## RESUME

---

Récemment, il y a eu une grande consommation de matériaux cimentaires, et pour cette raison, de nombreuses recherches scientifiques se sont tournées vers la recherche de nouveaux matériaux utilisés pour réduire la consommation de ciment et de granulats. Compte tenu de la présence de nombreux déchets dans l'environnement, nous avons essayé d'utiliser l'un de ces déchets dans cette étude.

Dans ce travail, nous avons incorporé les déchets de plastique et de caoutchouc dans le béton afin d'obtenir un béton respectueux de l'environnement et résistant aux environnements agressifs. Au début, la poudre de caoutchouc est utilisée comme substitut dans le ciment avec des pourcentages de 0 %, 2 %, 4 %, 6 % et 8 %. Après les résultats de l'essai de résistance à la compression, on a fait le choix sur les bétons qui présentent les meilleurs résultats (2 % et 4 %). Après cela, dans ces bétons, le plastique a été incorporé comme substitut au sable avec des proportions de 2 %, 4 % et 6 %, et on a choisi deux natures différentes de plastique (forex et faux plafond). Les essais réalisés pour déterminer les propriétés physiques étaient l'ouvrabilité, la densité et l'air occlus, tandis que les essais réalisés pour les propriétés mécaniques étaient la densité sec, la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la vitesse ultrasonique, et les essais de durabilité (absorption d'eau par immersion totale et par capillarité, l'essai de porosité et les essais des pertes des masses).

Les résultats montrent une diminution de l'ouvrabilité, de la densité, de la résistance à la compression, de la résistance à la flexion et de la perte de poids lorsque l'on augmente le pourcentage de caoutchouc et plastique utilisé. L'ouvrabilité diminue de 8 à 2 cm et la masse volumique diminue de 2380 à 2200 kg/m<sup>3</sup>; les résistances à la compression et à la flexion, respectivement, ont diminué jusqu'à 38 % et 20.5 % à 28 jours par rapport au béton témoin. De plus, la perte de poids diminue jusqu'à 25 % par rapport au béton témoin. De plus, le SEM a indiqué que l'ajout de déchets de caoutchouc et de plastique augmente les vides tout en réduisant les attaques chimiques dans le béton. Cela permet de maintenir l'intégrité et la durabilité du béton face à des environnements agressifs. Les résultats des tests ont été soumis à des analyses de variance afin de déterminer la signification des facteurs d'influence et de leurs interactions sur les réponses choisies. Les résultats montrent que le coefficient  $R^2$  se situe entre 0.89 et 0.99, ce qui indique une bonne corrélation entre les modes prédits et expérimentaux.

---

**MOTS CLES** : Caoutchouc, Plastique, Propriétés physiques, Propriétés mécaniques, Durabilité, Plan factoriel complet.

## ملخص

في الأونة الأخيرة، كان هناك استهلاك كبير للمواد الأسمنتية، ولهذا السبب، اتجه العديد من الباحثين إلى البحث عن مواد جديدة تستخدم لتقليل استهلاك الأسمنت والركام. ونظراً لوجود العديد من النفايات في البيئة، حاولنا استخدام أحد هذه النفايات في هذه الدراسة.

في هذا العمل، قمنا بدمج نفايات البلاستيك والمطاط في الخرسانة للحصول على خرسانة صديقة للبيئة ومقاومة للبيئات العدوانية. في البداية، تم استخدام مسحوق المطاط كبديل للأسمنت بنسب 0٪، 2٪، 4٪، 6٪، و 8٪. بعد نتائج اختبار قوة الضغط، تم الاختيار على الخرسانة التي قدمت أفضل النتائج (2٪ و 4٪). بعد ذلك، في هذه الخرسانة، تم دمج البلاستيك كبديل للرمال بنسب 2٪، 4٪، و 6٪، وتم اختيار طبيعتين مختلفتين من البلاستيك (الفوركس والسقف الزائف).

كانت الاختبارات التي أجريت لتحديد الخصائص الطازجة هي قابلية التشغيل والكثافة والهواء المحبوس، في حين كانت الاختبارات التي أجريت لخصائص المعالجة هي الكثافة الجافة وقوة الضغط وقوة الانحناء وسرعة الموجات فوق الصوتية واختبارات المتانة (امتصاص الماء عن طريق الغمر الكلي والعمل الشعري واختبار المسامية واختبارات فقدان الكتلة).

تظهر النتائج انخفاضاً في قابلية التشغيل والكثافة وقوة الضغط وقوة الانحناء وفقدان الوزن عند زيادة نسبة المطاط و البلاستيك المستخدمة. تنخفض قابلية التشغيل من 8 إلى 2 سم، وتنخفض الكثافة من 2380 إلى 2200 كجم/م<sup>3</sup>؛ كما انخفضت قوى الضغط والانحناء على التوالي بنسبة تصل إلى 38% و 20.5% عند 28 يوماً مقارنة بالخرسانة الضابطة. علاوة على ذلك، ينخفض فقدان الوزن بنسبة تصل إلى 25% مقارنة بالخرسانة الضابطة. وبالإضافة إلى ذلك، أفاد تقرير SEM أن إضافة النفايات المطاطية والبلاستيكية يؤدي إلى زيادة الفراغات مع تقليل الهجوم الكيميائي في الخرسانة. يساعد هذا في الحفاظ على سلامة ومتانة الخرسانة في البيئات العدوانية. خضعت نتائج الاختبار لتحليل التباين من أجل تحديد أهمية عوامل التأثير وتفاعلاتها على الاستجابات المختارة. تظهر النتائج أن معامل  $R^2$  يتراوح بين 0.89 و 0.99، مما يشير إلى وجود ارتباط جيد بين الوضعان المتوقع والتجريبي.

## ABSTRACT

---

Recently, there has been a high consumption of cementitious materials, and for this reason, many scientific researchers have turned to the search for new materials used to reduce the consumption of cement and aggregates. Considering the presence of many wastes in the environment, we tried to use one of these wastes in this study.

In this work, we incorporated plastic and rubber waste into concrete to obtain environmentally friendly concrete resistant to aggressive environments. At first, rubber powder is used as a substitute for cement with percentages of 0%, 2%, 4%, 6%, and 8%. After the compressive strength test results, the choice was made on the concretes that presented the best results (2% and 4%). After that, in these concretes, plastic was incorporated as a substitute for sand with proportions of 2%, 4%, and 6%, and two different natures of plastic were chosen (forex and false ceiling). The tests performed to determine fresh properties were workability, density and entrained air, while the tests performed for cured properties were dry density, compressive strength, flexural strength, ultrasonic velocity, and durability tests (water absorption by total immersion and capillary action, porosity test and mass loss tests).

The results show a decrease in workability, density, compressive strength, flexural strength, and weight loss when increasing the percentage of rubber and plastic was used. The workability decreases from 8 to 2 cm, and the density decreases from 2380 to 2200 kg/m<sup>3</sup>; the compressive and flexural strengths, respectively, decreased by up to 38% and 20.5% at 28 days compared to the control concrete. Moreover, the weight loss decreases by up to 25% compared to the control concrete. Additionally, the SEM reported that adding rubber and plastic waste increases voids while reducing chemical attack in the concrete. This helps maintain the integrity and durability of the concrete in aggressive environments. The test findings were subjected to analyses of variance in order to determine the significance of the influence factors and their interactions on the chosen responses. The results show that the coefficient R<sup>2</sup> ranges between 0.89 and 0.99, which indicates a good correlation between the predicted and experimental modes.

---

**KEYWORDS:** Rubber, Plastic, Fresh properties, Hardened properties, Durability, Full factorial design.

Thèse de doctorat- A.BELMOUHOU

## TABLE DES MATIERES

RESUME.....	I
ملخص .....	II
ABSTRACT .....	III
Table des matières .....	IV
Liste des figures .....	V
Liste des tableaux .....	VI
Introduction générale.....	1

### CHAPITRE I

#### SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction .....	6
I.2 Déchets de plastique et déchets de caoutchouc.....	7
I.2.1 Déchets de plastique.....	7
I.2.1.1 Les plastiques les plus couramment utilisés .....	7
I.2.1.2 Classification de plastique .....	7
I.2.1.3 Classification de plastique suivant la taille .....	10
I.2.1.4 Les différents types de plastique utilisés en génie civil.....	11
I.2.1.5 Les étapes de recyclage des déchets de plastique .....	11
I.2.1.6 Méthode de valorisation du plastique. ....	12
I.2.1.7 L'impact des déchets de plastique sur l'environnement .....	13
I.2.1.8 Les avantages d'utilisations des déchets plastiques au domaine de génie civil .....	13
I.3 Effets des déchets de plastique sur les propriétés du béton à l'état frais et durci .....	13
I.3.1 Propriétés des bétons à l'état frais .....	13
I.3.1.1 Affaissement .....	13
I.3.1.2 Densité frais .....	14
I.3.1.3 Lair occlus .....	15
I.3.2 Propriétés du béton a l'état durci .....	16

I.3.2.1	Résistance a la compression .....	16
I.3.2.2	Résistance a la flexion .....	17
I.3.2.3	Vitesse ultrason. ....	18
I.3.3.4	L'absorption d'eau par capillarité .....	18
I.2.2	Déchets de caoutchouc .....	19
I.2.2.1	Les étapes de production de fines particules de caoutchouc .....	20
I.2.2.2	Méthode de broyage de caoutchouc .....	21
I.2.2.3	Composition des pneus .....	21
I.2.2.4	L'impact des déchets de caoutchouc sur l'environnement .....	21
I.2.2.5	Les avantages des déchets de caoutchouc .....	22
I.2.2.6	Application au béton à base de déchets de caoutchouc .....	22
I.4	Effets des déchets de caoutchouc sur les propriétés du béton .....	23
I.4.1	Propriétés du béton à l'état frais .....	23
I.4.1.1	Affaissement.....	23
I.4.1.2	Densité frais .....	23
I.4.1.3	Lair occlus .....	24
I.4.2	Propriétés du béton à l'état durci .....	25
I.4.2.1	Masse volumique à l'état sec .....	25
I.4.2.2	Résistance à la compression .....	26
I.4.2.3	Résistance à la flexion .....	27
I.4.2.4	Vitesse ultrason .....	28
I.4.2.5	Absorption d'eau par capillarité .....	29
I.4.2.6	Perte de masse .....	30
I.5	Conclusion. ....	31
<b><u>CHAPITRE II</u></b>		
<b>MODELISATION DE PLAN DEXPERENCE JMP</b>		
II.1	Introduction .....	33
II.1.1	Définition le plan d'expérience .....	33

II.1.2 La démarche méthodologique est la suivante .....	33
II.1.3 Principaux avantages du plan d'expérience.....	34
II.1.4 Notion d'espace expérimental .....	34
II.1.5 Notion d'espace mathématique .....	35
II.1.6 Erreur expérimental .....	35
II.1.7 Notion d'interaction .....	36
II.1.8 Les surfaces de réponse .....	36
II.1.9 Les types du plan d'expérience .....	37
II.1.9.1 Plan de criblage .....	37
II.1.9.2 Plan pour surface de réponse .....	37
II.1.9.3 Plan factoriel complet. ....	37
II.1.9.4 Plan de mélange .....	37
II.1.10 Variation de la corrélation .....	38
II.1.11 Coefficient de détermination .....	38
II.1.12 Coefficient de détermination R carré ajusté .....	38
II.1.13 Prob.> F .....	39
II.1.14 L'erreur quadratique moyenne .....	39
II.1.14.1 Comment calculer l'erreur quadratique moyenne .....	39
II.1.14.2 Exemple d'application .....	40
II.1.15 Les étapes de l'utilisation de la conception factorielle .....	41
II.2 Conclusion .....	43

### **CHAPITRE III**

#### **CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES**

III.1 Introduction .....	45
III.2 Les matériaux utilisés .....	45
III.2.1 Ciment .....	45
III.2.2 Poudre de caoutchouc.....	46

III.2.3 Déchet de plastique .....	47
III.2.4 Sable .....	48
III.2.5 Gravier .....	48
III.2.6 L'eau .....	49
III.2.7 Hydroxyde de sodium .....	49
III.2.8 Nitrate d'ammonium .....	50
III.2.9 Acide sulfurique .....	51
III.3 Essais sur les granulats .....	51
III.3.1 Analyse granulométrique par tamisage .....	51
III.3.1.1 Plastique faux plafond .....	52
III.3.1.2 Plastique forex .....	52
III.3.1.3 Sable 0/3 .....	54
III.3.1.4 Gravier 3/8 .....	55
III.3.1.5 Gravier 8/15 .....	56
III.3.2 Module de finesse .....	57
III.3.3 Equivalent de sable .....	57
III.3.4 La masse volumique .....	59
III.3.4.1 La masse volumique apparente .....	59
III.3.4.2 La masse volumique absolue .....	60
III.3.5 Degré d'absorption d'eau .....	60
III.3.6 Résultats des essais de caractérisation .....	61
III.4 Formulation du béton .....	62
III.4.1 Objectives visés par l'étude .....	62
III.4.2 Confection des éprouvettes .....	65
III.4.4 Moulage et démoulage .....	66
III.5 Présentation des essais .....	67
III.5.1 Essais effectués sur le béton frais .....	67

III.5.1.1 Air occlus .....	67
III.5.1.2 Densité .....	67
III.5.1.3 Ouvrabilité .....	68
III.5.2 Essais effectués sur le béton durci .....	69
III.5.2.1 Masse volumique à l'état sec .....	69
III.5.2.2 Essai de compression .....	69
III.5.2.3 Essai de traction par flexion .....	70
III.5.2.4 Essai d'ultrason .....	71
III.5.2.5 Essai absorption d'eau par capillarité .....	71
III.5.2.6 Porosité accessible à l'eau .....	72
III.5.2.7 Essai d'absorption d'eau par immersion total .....	73
III.5.2.8 Essai d'attaques chimiques .....	74
III.5.2.9 Essai diffraction des rayons x .....	76
III.5.2.10 Analyse microstructurale .....	76
III.6 Conclusion .....	77

#### **CHAPITRE IV**

### **PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DE BETON CONTENANT DES FINES DE CAOUTCHOUC**

IV.1 Introduction .....	79
IV.2 Résultats et interprétation .....	79
IV.2.1 A l'état frais .....	79
IV.2.1.1 Essais d'affaissement .....	79
IV.2.1.2 Masse volumique à l'état frais .....	80
IV.2.1.3 Teneur en air occlus .....	81
IV.2.2 A l'état durci .....	82
IV.2.2.1 Masse volumique à sec .....	82

IV.2.2.2 Résistance à la compression à 28 j .....	83
IV.2.2.3 Vitesse ultrason à 28 j .....	84
IV.2.2.4 Relation entre la résistance à compression et vitesse ultrason à 28 j .....	85
IV.2.2.5 Résistance à traction par flexion à 28 j .....	85
IV.2.2.6 Relation entre la résistance à flexion et résistance à la compression à 28 j .....	86
IV.3 Conclusion .....	87

## CHAPITRE V

### **PERFORMANCE DU BETON A BASE DES FINES DE CAOUTCHOUC ET SABLE DE PLASTIQUE FOREX, ET FAUX PLAFOND**

#### **Partie A** : Propriétés du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique forex

V.1 Introduction .....	88
V.2 Résultats et interprétation .....	88
V.2.1 Propriétés du béton à l'état frais .....	88
V.2.1.1 Essai d'affaissement .....	89
V.2.1.2 Masse volumique à l'état frais .....	90
V.2.1.3 Teneur en air occlus .....	91
V.2.2 Propriétés du béton à l'état durci .....	92
V.2.2.1 Masse volumique à l'état sec .....	92
V.2.2.2 Résistance à la compression à 7, 28, et 60 j .....	94
V.2.2.3 Résistance à traction par flexion à 7, 28, et 60 j .....	95
V.2.2.4 Vitesse ultrason à 28 j .....	97
V.2.2.5 Relation entre vitesse ultrason et résistance de compression à 28 j .....	98
V.2.2.6 Corrélation entre vitesse ultrason et résistance de flexion à 28 j .....	99
V.2.3 Les essais de durabilité du béton .....	100
V.2.3.1 Essai de porosité .....	100
V.2.3.2 Corrélation entre vitesse ultrason et la porosité à 28 j .....	101
V.2.3.3 Essai d'absorption d'eau par immersion totale .....	102
V.2.3.4 Absorption d'eau par capillarité .....	103

V.2.3.5 Attaque au l'acide sulfurique .....	104
V.2.3.6 Attaque au nitrate d'ammonium .....	106
V.2.3.7 Attaque au chlorure de calcium .....	108
V.2.3.8 Résistance à la compression après 60 j de conservation au milieu de NaCl .....	110
V.2.3.9 Résistance à la compression après 60 j de conservation au milieu de $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .....	111
<b>Partie B</b> : Propriétés du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique faux plafond	
V.3 Résultats et interprétation .....	113
V.2.7 A l'état frais .....	113
V.2.7.1 Essai d'affaissement .....	113
V.2.7.2 Masse volumique à l'état frais .....	114
V.2.7.3 Teneur en air occlus .....	115
V.2.8 Caractéristiques mécaniques .....	116
V.2.8.1 Masse volumique à l'état sec .....	116
V.2.8.2 Développement de résistance de compression à 7, 28, et 60 j .....	117
V.2.8.3 Développement de résistance de flexion à 7, 28, et 60 j .....	118
V.2.8.4 Vitesse ultrason à 28 j .....	119
V.2.9 Les résultats des essais de durabilité du béton .....	120
V.2.9.1 Essai de porosité .....	120
V.2.9.2 Essai d'absorption d'eau par immersion totale .....	121
V.2.9.3 Essai d'absorption d'eau par capillarité .....	122
V.2.9.4 Essai de perte de masse au milieu $\text{H}_2\text{SO}_4$ .....	123
V.2.9.5 Essai gain de masse au milieu NaCl .....	124
V.2.9.6 Essai gain de masse au milieu $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .....	125
V.2.9.7 Résistance à la compression après 60 j au milieu NaCl .....	126
V.2.9.8 Résistance à la compression après 60 j au milieu $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .....	127
V.3 Conclusion .....	128

**CHAPITRE VI****MODELISATION DE PLAN D'EXPERIENCE JMP**

**Partie A** : Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc

VI.1 Introduction .....	129
VI.2 Réalisation de plan d'expérience au laboratoire .....	129
VI.2.1 Analyse des résultats .....	130
VI.2.2 Modélisation de la réponse physique et mécanique .....	130
VI.2.2.1 Etude statistique avec une approche factorielle .....	130
VI.2.2.2 Corrélation .....	130
VI.2.2.3 Vérification de la validité des modèles proposés .....	131
VI.2.2.4 Affaissement .....	133
VI.2.2.5 Lair occlus .....	134
VI.2.2.6 Densité frais .....	134
VI.2.2.7 Résistance à la compression .....	135
VI.2.2.8 Résistance à la flexion .....	136
VI.2.2.9 Vitesse ultrason .....	137
VI.2.2.10 Comparaison des valeurs prédites avec les valeurs expérimentales .....	137

**Partie B** : Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique forex

VI.3 Réalisation du plan d'expérience au laboratoire .....	140
VI.3.1 Modélisation de la réponse physique et mécanique .....	140
VI.3.2 Analyse de la variance .....	140
VI.3.3 Affaissement .....	142
VI.3.4 Densité frais .....	144
VI.3.5 Résistance de compression à 28 j .....	146
VI.3.6 Perte de masse à (60j).....	147

**Partie C** : Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base de déchets de caoutchouc et plastique faux plafond

VI.4 Réalisation du plan d'expérience au laboratoire .....	149
VI.4.1 Modélisation de la réponse physique et mécanique .....	149
VI.4.2 Analyse de la variance .....	151
VI.4.3 Affaissement .....	152
VI.4.4 Densité frais .....	153
VI.4.5 Résistance de compression à (28 j) .....	154
VI.4.6 Perte de masse à (60 j).....	155
VI.5 Conclusion .....	156

**CHAPITRE VII****LA MICROSTRUCTURE DU BETON**

VII.1 Introduction .....	157
VII.2 Analyse microstructurale .....	157
VII.3 Analyse de l image J .....	160
VII.4 Les résultats de DRX .....	161
VII.4.1 Spectrogramme DRX du béton ordinaire et béton à base de déchets de plastique et caoutchouc au milieu acide sulfurique .....	161
VII.4.2 Spectrogramme DRX du béton ordinaire et béton à base de déchets de plastique et caoutchouc au milieu nitrate d'ammonium .....	164
VII.5 Conclusion .....	167
Conclusion générale et recommandation.....	168
Les références .....	172

**LISTE DES FIGURES****CHAPITRE I.**

Figure I.1 Types des plastiques utilisées en marché .....	7
Figure I.2 Bouteilles en PET .....	8
Figure I.3 Film en PET .....	8
Figure I.4 Isolant en PVC .....	8
Figure I.5 Tuyaux en PVC .....	8
Figure I.6 Emballage alimentaire en PP .....	8
Figure I.7 Parechoc en PP .....	8
Figure I.8 Goblet(PS) .....	9
Figure I.9 Emballage(HIPS) .....	9
Figure I.10 Emballage (PSE) .....	9
Figure I.11 Caoutchouc élastomères .....	9
Figure I.12 Pneus élastomères .....	9
Figure I.13 Classification des déchets de plastique .....	9
Figure I.14 Les différents types des agrégats plastiques utilisés dans le béton et mortier .....	10
Figure I.15 Type des fibres plastiques utilisées dans le béton / mortier .....	10
Figure I.16 Centre de tri des déchets de plastique .....	12
Figure I.17 Variation de maniabilité en fonction du pourcentage de plastique .....	14
Figure I.18 Variation de densité fraîche en fonction du pourcentage de plastique .....	15
Figure I.19 Variation de l'air occlus en fonction du pourcentage de plastique .....	15
Figure I.20 Variation de résistance de compression .....	16
Figure I.21 Variation de résistance a la flexion en fonction des pourcentages de plastique .....	17
Figure I.22 Variation de vitesse ultrason .....	18
Figure I.23 La sportivité du béton à différents volumes de granulats HIPS .....	19
Figure I.24 Différentes tailles de caoutchouc granulé .....	20
Figure I.25 Déchiquetage des pneus usagés .....	20

Figure I.26 Matières premières des pneus .....	21
Figure I.27 Utilisation des déchets de caoutchouc .....	23
Figure I.28 Variation de l'affaissement en fonction de pourcentage de caoutchouc .....	24
Figure I.29 Variation de densité en fonction de pourcentage de caoutchouc .....	25
Figure I.30 Variation de l'air occlus en fonction de pourcentage de caoutchouc .....	25
Figure I.31 Densité par rapport au taux de substitution du granulat fin par des miettes de caoutchouc .....	26
Figure I.32 La résistance de compression en fonction de pourcentage de caoutchouc .....	27
Figure I.33 Variation de la résistance de flexion en fonction de pourcentage de caoutchouc .....	28
Figure I.34 variation d'ultrason en fonction de taux de substitution .....	29
Figure I.35 Absorption d'eau par capillarité du béton a base de déchets de caoutchouc en fonction de temps .....	30
Figure I.36 variation de perte de masse en fonction du taux de caoutchouc u milieu acide sulfurique .....	31

## CHAPITRE II.

Figure II.1 Diagramme de traitement général des plans d'expériences .....	34
Figure II.2 Le niveau bas, le niveau haut et le domaine d'un facteur .....	34
Figure II.3 Les niveaux expérimentaux sur l'espace .....	35
Figure II.4 Les points expérimentaux dans un domaine d'étude .....	35
Figure II.5 Courbe d'intrication entre les facteurs .....	36
Figure II.6 Surfaces de réponse .....	36
Figure II.7 Triangle de Féret, 1892.....	37
Figure II.8 Variation de la corrélation entre les valeurs mesurées et les prévisions .....	38
Figure II.9 Calcule l'erreur quadratique moyenne .....	40

## CHAPITRE III.

Figure III.1 Sac de ciment CRS .....	45
Figure III.2 Les étapes de traitement de poudre de caoutchouc .....	47
Figure III.3 Déchets de plastique .....	47

Figure III.4 SEM du plastique et du caoutchouc .....	48
Figure III.5 Sable (0/3) .....	48
Figure III.6 a) Gravier 3/8 b) Gravier 8/15 .....	49
Figure III.7 Hydroxyde de sodium .....	49
Figure III.8 Fiche technique de nitrate d'ammonium .....	50
Figure III.9 Acide sulfurique .....	51
Figure III.10 Essai de l'analyse granulométrique .....	51
Figure III.11 Courbe d'analyse granulométrique de plastique faux plafond .....	52
Figure III.12 Courbe d'analyse granulométrique de plastique forex .....	53
Figure III.13 Courbe d'analyse granulométrique du sable (0/3). .....	54
Figure III.14 Courbe d'analyse granulométrique du gravier (3/8) .....	55
Figure III.15 Courbe d'analyse granulométrique du sable (8/15) .....	56
Figure III.16 Essai d'équivalent de sable .....	58
Figure III.17 Mesure la masse volumique apparente des matériaux .....	59
Figure III.18 Mesure la masse volumique absolue des matériaux .....	60
Figure III.19 Tracé de la courbe de référence .....	63
Figure III.20 Malaxeur de béton .....	65
Figure III.21 Les étapes de fabrication des éprouvettes .....	66
Figure III.22 Appareil d'un aéromètre .....	67
Figure III.23 La densité du béton frais .....	68
Figure III.24 L'affaissement au cône d'Abrams .....	68
Figure III.25 Masse volumique sec .....	69
Figure III.26 Presse de la résistance à la compression .....	70
Figure III.27 a) Machine de traction par flexion. b) Les éprouvettes après décrassement .....	70
Figure III.28 Appareil d'ultrason .....	71
Figure III.29 Essai absorption d'eau par capillarité .....	72
Figure III.30 Essai de porosité par pesée hydrostatique .....	73

Figure III.31 Essai absorption d'eau par immersion total .....	74
Figure III.32 Solution nitrate d'ammonium avec des éprouvettes .....	75
Figure III.33 Solution acide sulfurique avec des éprouvettes .....	75
Figure III.34 Appareil de Ph mètre .....	75
Figure 3.35 Appareil de DRX .....	76
Figure III.36 Appareil de MEB QUANTA 650.....	76

## CHAPITRE IV.

Figure IV.1 Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de caoutchouc .....	80
Figure IV.2 Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution .....	80
Figure IV.3 Valeurs de l'air occlus en fonction du taux de substitution .....	81
Figure IV.4 Valeurs de la masse volumique en fonction des pourcentages de caoutchouc .....	82
Figure IV.5 Résistances en compression des bétons .....	83
Figure IV.6 Vitesse ultrasonique des bétons .....	84
Figure IV.7 Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrason.....	85
Figure IV.8 Résistances à la traction par flexion des bétons .....	86
Figure IV.9 Corrélation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression .....	87

## CHAPITRE V.

### **Partie A** : Propriétés du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique forex

Figure V.1 Variation de l'affaissement en fonction des taux de substitution .....	89
Figure V.2 Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution .....	91
Figure V.3 Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution .....	92
Figure V.4 Variation de masse volumique en fonction du taux de substitution .....	93
Figure V.5 Variation de résistance a la compression en fonction du taux de substitution .....	94
Figure V.6 Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution .....	95
Figure V.7 Échantillons cubiques après essai de résistance à la flexion .....	97
Figure V.8 Variation de vitesse ultrasonique en fonction du taux de substitution .....	98

Figure V.9 Relation entre la vitesse d'ultrason et la résistance a la compression à 28 jours .....	99
Figure V.10 Relation entre la vitesse d'ultrason et la résistance a la flexion à 28 jours .....	98
Figure V.11 Variation de porosité en fonction du taux de substitution .....	100
Figure V.12 Relation entre la vitesse d'ultrason et la porosité a 28 jours .....	101
Figure V.13 Variation de l'absorption d'eau par immersion totale en fonction du taux de substitution .....	102
Figure V.14 Variation de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du taux de substitution..	103
Figure V.15 Variation de perte de masse des bétons étudiés dans une solution $H_2SO_4$ .....	105
Figure V.16 Variation de gain de masse des bétons étudiés dans une solution $NH_4 NO_3$ .....	107
Figure V.17 Variation de gain de masse des bétons étudiés dans une solution $NaCl$ .....	109
Figure V.18 Variation de résistance a la compression dans une solution $NaCl$ .....	110
Figure V.19 Variation de résistance à la compression au milieu nitrate d'ammonium en fonction des taux de substitutions .....	112
 <b>Partie B : Propriétés du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique faux plafond</b>	
Figure V.20 Variation de l'affaissement en fonction des taux de substitution .....	113
Figure V.21 Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution .....	114
Figure V.22 Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution .....	115
Figure V.23 Variation de masse volumique en fonction du taux de substitution .....	116
Figure V.24 Variation de résistance à la compression en fonction du taux de substitution .....	117
Figure V.25 Variation de résistance à la flexion en fonction du taux de substitution .....	118
Figure V.26 Variation de vitesse ultrasonique en fonction du taux de substitution .....	119
Figure 5.27 Variation de porosité en fonction du taux de substitution .....	120
Figure V.28 Variation de l'absorption d'eau par immersion totale en fonction du taux de substitution .....	121
Figure V.29 Variation de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du taux de substitution..	122
Figure V.30 Variation de perte de masse des bétons étudiés dans une solution $H_2SO_4$ .....	123
Figure V.31 Variation de gain de masse des bétons étudiés dans une solution $NaCl$ .....	124
Figure V.32 Variation de gain de masse des bétons étudiés dans une solution $NH_4 NO_3$ .....	125

Figure V.33 Variation de résistance a la compression dans une solution Nacl .....126

Figure V.34 Variation de résistance a la compression dans une solution  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  .....127

## CHAPITRE VI.

### **Partie A** : Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton a base des fines de caoutchouc

Figure VI.1 Corrélation entre les réponses observées et prédites : maniabilité, densité fraîche, teneur en air, résistance à la compression, résistance à la flexion et vitesse d'impulsion ultrasonore. ....132

Figure VI.2 (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites .....133

Figure VI.3 (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites .....134

Figure VI.4 (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites .....135

Figure VI.5 (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites .....136

Figure VI.6 (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites .....136

Figure VI.7 (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites .....137

### **Partie B** : Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique forex

Figure VI.8 Corrélation entre les réponses observées et prédites : affaissement, densité fraîche, résistance à la compression, perte de masse..... 142

Figure VI.9: (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de maniabilité ..... 143

Figure VI.10: (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de maniabilité... ..... 144

Figure VI.11: (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de densité..... 145

Figure VI.12 (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de densité.....145

Figure VI.13 (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de résistance à la compression

.....	146
Figure VI.14 (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de résistance à la compression .....	147
Figure VI.15 (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de la perte de masse .....	148
Figure VI.16 (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de la perte de masse.....	148

**Partie C : Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique faux plafond**

Figure VI.17 Corrélation entre les réponses observées et prédites : affaissement, densité fraîche, résistance à la compression, perte de masse.....	151
Figure VI.18: (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de maniabilité.....	152
Figure VI.19: (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de maniabilité.....	152
Figure VI.20: (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de densité.....	153
Figure VI.21 (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de densité.....	153
Figure VI.22 (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de résistance à la compression .....	154
Figure VI.23 (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de résistance à la compression .....	154
Figure VI.24 (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de la perte de masse .....	155
Figure VI.25 (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de la perte de masse.....	155

## CHAPITRE VII.

### LA MICROSTRUCTURE DU BETON

Figure VII.1 MEB (a) et EDS (b) du béton ordinaire (x1600) .....	158
Figure VII.2 MEB (a) EDS (b) de béton contenant 2% de caoutchouc et 2% de plastique (x800).....	159

---

Figure VII.3 MEB (a), (b) et (c) de béton exposé a 5% de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	159
Figure VII.4 Examen visuel des échantillons .....	160
Figure VII.5 Images MEB montrant le BO après l'analyse de image J .....	160
Figure VII.6 Images MEB montrant le B1 après l'analyse de image J .....	161
Figure VII.7 Spectrogramme DRX du béton ordinaire au milieu d'acide sulfurique .....	162
Figure VII.8 Spectrogramme DRX du béton B1.....	163
Figure VII.9 Corrélation Spectrogramme DRX du béton BA.....	163
Figure VII.10 Spectrogramme DRX du béton ordinaire au milieu nitrate d'ammonium.....	164
Figure VII.11 Spectrogramme DRX du béton B1 au milieu nitrate d'ammonium.....	165
Figure VII.12 Spectrogramme DRX du béton BA au milieu nitrate d'ammonium.....	166

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE III.

Tableau III.1 Composition chimique du ciment.....	46
Tableau III.2 Composition physique du ciment .....	46
Tableau III.3 Composition chimique du NaOH .....	50
Tableau III.4 Analyse granulométrique de plastique faux plafond .....	52
Tableau III.5 Analyse granulométrique de plastique forex .....	53
Tableau III.6 Analyse granulométrique de sable (0/3) .....	54
Tableau III.7 Analyse granulométrique de gravier (3/8) .....	55
Tableau III.8 Analyse granulométrique de gravier (8/15) .....	56
Tableau III.9 Module de finesse du sable .....	57
Tableau III.10 Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ES ...	58
Tableau III.11 Les résultats de l'équivalent de sable .....	59
Tableau III.12 Masse volumique apparent des matériaux .....	60
Tableau III.13 Masse volumique absolue des matériaux .....	60
Tableau III.14 Degré d'absorption d'eau .....	61
Tableau III.15 Composition du béton .....	63
Tableau III.16 Quantité du béton dans 1m <sup>3</sup> pour fine de caoutchouc.....	64
Tableau III.16 Quantité du béton dans 1m <sup>3</sup> pour fine de caoutchouc et sable de plastique forex.....	64
Tableau III.16 Quantité du béton dans 1m <sup>3</sup> pour fine de caoutchouc et sable de plastique faux plafond.....	64
Tableau III.17 Noms des mélangés utilisés .....	65

### CHAPITRE IV.

Tableau IV.1 Valeurs de l'affaissement du béton a base des déchets de caoutchouc .....	79
Tableau IV.2 Masses volumiques des bétons étudiées .....	80
Tableau IV.3 Valeurs de l'air occlus pour les cinq formulations de bétons .....	81
Tableau IV.4 Valeurs de la masse volumique pour les cinq formulations de bétons ....	82

Tableau IV.5 Résistances à la compression pour les cinq formulations de bétons.....	83
Tableau IV.6 Vitesse ultrasonique pour les cinq bétons étudiées .....	84
Tableau IV.7 Résistance à la traction par flexion à 28 jours .....	86

## CHAPITRE V.

### **Partie A** : Propriétés du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique forex

Tableau V.1 Valeurs de l'affaissement pour les bétons étudiés .....	89
Tableau V.2 Masses volumiques des bétons étudiés .....	90
Tableau V.3 Lair occlus des bétons étudiés .....	91
Tableau V.4 Masse volumique sec des bétons étudiés .....	93
Tableau V.5 Résistance à la compression des bétons étudiés .....	94
Tableau V.6 Résistance à la flexion des bétons étudiés .....	95
Tableau V.7 Vitesse ultrasonique pour les sept bétons étudiés .....	97
Tableau V.8 Porosité pour les bétons étudiés .....	100
Tableau V.9 Absorption d'eau pour les bétons étudiés. ....	102
Tableau V.10 les résultats d'absorption d'eau par capillarité pour les bétons étudiés .....	103
Tableau V.11 Les résultats de perte de masse au milieu $H_2SO_4$ pour les bétons étudiés .....	104
Tableau V.12 Les résultats de gain de masse au milieu $NH_4NO_3$ pour les bétons étudiés ...	106
Tableau V.13 Les résultats de gain de masse du béton dans un milieu NaCl .....	108
Tableau V.14 Les résultats de résistance à la compression du béton dans un milieu NaCl .....	110
Tableau V.15 Les résultats de résistance à la compression du béton dans un milieu $NH_4NO_3$ .....	111

### **Partie B** : Propriétés du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique faux plafond

Tableau V.16 Les résultats de l'affaissement pour les bétons étudiés .....	113
Tableau V.17 Masses volumiques des bétons étudiés .....	114
Tableau V.18 Lair occlus des bétons étudiés .....	115
Tableau V.19 Masse volumiques à l'état sec des bétons étudiés.....	116
Tableau V.20 Développement de résistance à la compression des bétons étudiés .....	117

Tableau V.21 Développement de résistance à la flexion des bétons étudiés .....	118
Tableau V.22 Vitesse ultrasonique pour les sept bétons étudiés .....	119
Tableau V.23 Porosité pour les sept bétons étudiés .....	120
Tableau V.24 Absorption d'eau par immersion totale pour les sept bétons étudiés .....	121
Tableau V.25 Absorption d'eau par capillarité pour les sept bétons étudiés .....	122
Tableau V.26 Perte de masse au milieu d'acide sulfurique pour les sept bétons étudiés .....	123
Tableau V.27 Gonflement du béton au milieu NaCl pour les sept bétons étudiés .....	124
Tableau V.28 Gonflement du béton au milieu $\text{NH}_4\text{NO}_3$ pour les sept bétons étudiés .....	125
Tableau V.29 Résistance a la compression après 60 jours de conservation au milieu NaCl ... ..	126
Tableau V.30 Les résultats de résistance à la compression au milieu $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . .....	127

## CHAPITRE VI.

### **Partie A** : Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton a base des fines de caoutchouc

Tableau VI.1 Synthèse de plan d'expérience .....	130
Tableau VI.2 Résultats expérimentaux .....	131
Tableau VI.3 Résultats expérimentaux des essais de caractérisation .....	133
Tableau VI.4 Affaissement .....	137
Tableau VI.5 Densité frais .....	138
Tableau VI.6 Lair occlus .....	138
Tableau VI.7 Résistance de compression .....	138
Tableau VI.8 Résistance de flexion .....	138
Tableau VI.9 Vitesse ultrason .....	139

### **Partie B** : Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique forex

Tableau VI.10 Synthèse de plan d'expérience .....	140
Tableau VI.11 Expérimental résultats .....	141
Tableau VI.12 les résultats de l'ajustement .....	141

Tableau VI.13 Analyse de variance (ANOVA) pour les modèles dérivés .....142

**Partie C** : Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique faux plafond

Tableau VI.14 Synthèse de plan d'expérience .....149

Tableau VI.15 Expérimental résultats .....150

Tableau VI.16 Les résultats de l'ajustement .....150

Tableau VI.17 Analyse de variance (ANOVA) pour les modèles dérivés .....151

## **CHAPITRE VII.**

Tableau VII.1 % de surface des pores de BO et B6 à partir de l'analyse de l'image J .....161

## Liste des abréviations

**PVC** : Le polychlorure de vinyle

**PP** : Le polypropylène

**PE** : Le polyéthylène

**PEHD** : Le polyéthylène haut densité

**PEBD** : Le polyéthylène à faible densité

**PS** : Le polystyrène

**PET** : Le polyéthylène téréphtalate

**R<sup>2</sup>** : Coefficient de détermination

**EQM** : L'erreur quadratique moyenne

**SSB** : Surface Spécifique Blaine

**ES<sub>v</sub>** : Equivalant de sable vu esille

**ES<sub>p</sub>** : Equivalant de sable avec piston

**γ**: Masse volumique apparente

**ρ** : Masse volumique absolue

**PR** : Plastique forex

**PF** : Plastique faux plafant

**A** : Degré d'absorption d'eau

**BO** : Béton ordinaire

**BC** : Béton a base de déchets de caoutchouc

**DRX** : Essai diffraction des rays X

---

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

---

## INTRODUCTION GENERAL

Le béton est un matériau de construction très utilisé dans l'industrie du bâtiment en raison de sa résistance, de sa durabilité et de sa polyvalence. Il est composé principalement de ciment, de sable, de granulats et d'eau, formant ainsi une masse solide capable de supporter de lourdes charges. Le coût du béton peut varier en fonction de différents facteurs tels que la quantité de matières premières utilisées, la localisation géographique, la complexité de la structure à construire et bien d'autres. Cependant, généralement, le coût du béton est déterminé par le prix du ciment, qui est le composant le plus cher dans sa composition. Cependant, une alternative intéressante pour réduire le coût du béton consiste à incorporer des déchets plastiques et caoutchouc dans sa composition.

Les déchets de plastique et de caoutchouc dans le monde représentent environ 6.5 milliards de tonnes par an [1] un gaspillage excessif de caoutchouc et plastique a des conséquences sur l'environnement et la santé humaine [2,3], et d'autre part les déchets de caoutchouc et de plastique ne sont pas biodégradables et ,lorsqu'ils sont brûlés, produisent des fumées toxiques pour la santé humaine [4,5] ,ces déchets ont augmenté ces dernières années, un groupe de chercheurs a étudié la possibilité d'utiliser ces déchets dans le domaine du génie civil [6,7] ou 46% de ces déchets ont été utilisés comme combustible pour la production d'électricité, 36% ont été éliminés dans des décharges et 21% ont été utilisés dans le domaine de génie civil [8] .En effet, le plastique et caoutchouc recyclé peut être utilisé comme substitut partiel des granulats traditionnels, réduisant ainsi la quantité de sable et de gravier nécessaires. Cela permet non seulement de diminuer les coûts de production, mais également de valoriser les déchets plastiques et caoutchoucs et de contribuer à la préservation de l'environnement.

Par conséquent, l'objectif de cette étude est de fabriquer du béton respectueux de l'environnement au moindre coût tout en améliorant ses propriétés fraîches et durcies, ainsi que sa durabilité vis-à-vis des milieux agressifs, en incorporant des déchets de caoutchouc et de plastique dans le béton pour remplacer respectivement le ciment et le sable à l'aide de la méthode générale de conception factorielle complète, de comparer les résultats de laboratoire avec les résultats du programme d'essais pilotes JMP et de déterminer s'il existe une correspondance entre les résultats. Deux facteurs, le plastique et le caoutchouc, ont été utilisés. Le ciment a été remplacé par le caoutchouc comme substitut de masse dans des

proportions de 2 % et 4 %, et le sable a été remplacé par le plastique comme substitut de masse dans des proportions de 2 %, 4 %, et 6 %. Les essais utilisés à l'état frais (l'affaissement, la densité fraîche et l'air occlus) et les essais utilisés à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la flexion, vitesse ultrason, porosité, absorption d'eau par immersion totale et par capillarité et les pertes de masse), ainsi que des examens en microscopie électronique à balayage (MEB, EDX, image J) et DRX.

Afin de réaliser les objectifs que nous avons établis, notre étude sera organisée en sept chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse de la littérature sur les déchets, en commençant par les types de déchets, puis en examinant les déchets utilisés dans cette étude. Les déchets de plastique et de caoutchouc : Nous abordons d'abord les déchets de plastique, leur recyclage, leur valorisation, leur impact sur l'environnement et leur utilisation dans le génie civil. Ensuite, nous examinons les effets des déchets de plastique sur les caractéristiques du béton frais et durci. Deuxièmement, nous examinons les déchets de caoutchouc. Nous examinons comment ils sont fabriqués, comment ils sont broyés, comment ils affectent l'environnement, comment ils sont utilisés dans les travaux civils et géotechniques, comment ils sont bénéfiques et comment ils affectent les propriétés du béton frais et durci. Le chapitre se termine par une conclusion qui examine la possibilité d'utiliser ces déchets dans le génie civil et l'impact des déchets en plastique et en caoutchouc sur les propriétés du béton. Le deuxième chapitre présente une synthèse de la littérature sur le plan d'expérience, y compris une introduction, les étapes de travail d'un plan d'expérience JMP, une définition du plan d'expérience JMP, les principaux avantages du plan d'expérience, les notions de plan d'expérience JMP, les types, Les étapes de la conception factorielle et la conclusion sur plan d'expérience. Le troisième chapitre aborde les matériaux utilisés, leurs caractéristiques, la formulation des bétons étudiés, les méthodes d'essais et la conclusion. Le quatrième chapitre qui étudie les propriétés du béton à base de déchets de caoutchouc, y compris une introduction, les résultats et l'analyse des expériences. Le chapitre cinquième : qui étudie les propriétés du béton à base de déchets de plastique forex et caoutchouc, y compris une introduction, des résultats et une interprétation, et finalement la conclusion. Le chapitre six : elle est organisée en deux grandes parties. La partie A présente les propriétés physiques, et mécaniques du béton à base de caoutchouc et de plastique de type PVC forex, et la partie B, qui étudie les mêmes propriétés du béton à base de caoutchouc et de plastique de type faux plafond. Ces parties qui contiennent : des résultats, interprétation, et conclusion. Le chapitre

sept, elle est organisée en trois parties. Parties A : qui étudie la modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base de déchets de caoutchouc, y compris une introduction, réalisation du plan d'expérience au laboratoire, et analyse des résultats. Partie B : qui étudie la modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base de déchets de caoutchouc et de plastique forex, y compris une réalisation du plan d'expérience au laboratoire, modélisation de la réponse physique et mécanique, et analyse de la variance. Partie C : qui étudie la modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base de déchets de caoutchouc et plastique faux plafond, y compris une réalisation du plan d'expérience au laboratoire, modélisation de la réponse physique et mécanique, analyse de la variance, et conclusion. Chapitre sept qui étudie la microstructure du béton, y compris une introduction, analyse microstructure, analyse de l'image J, les résultats de DRX, et finalement, la conclusion.

---

---

## **CHAPITRE I. Synthèse bibliographique**

---

---

# CHAPITRE I

## GENERALITE SUR LES PLASTIQUES ET LES CAOUTCHOUCS

### I.1 Introduction :

Un déchet est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, tout produit ou tout bien abandonné ou destiné à être abandonné par son détenteur [9]. Il existe différents types de déchets, classés en fonction de leur nature et de leur composition :

- Les déchets inertes comprennent le béton, la brique, la céramique, le verre, la terre et d'autres matériaux qui ne se décomposent pas facilement et ne provoquent pas de réactions chimiques importantes [10-11].
- Les déchets électroniques ; Ce sont les équipements électroniques en fin de vie tels que les téléphones portables, les ordinateurs, les appareils électroménagers [12].
- Les déchets toxiques, Ce type de déchets a des effets nocifs et dangereux sur la santé humaine et l'environnement, comme les piles, les ampoules, les acides, les peintures, les boues, les hydroxydes métalliques, etc. [12].
- Les déchets médicaux, ce sont les déchets provenant des établissements de santé, comme les gants, les seringues et les médicaments périmés, etc.

Les déchets recyclables, ce sont les matériaux pouvant être recyclés, comme le papier, le plastique, le verre, le caoutchouc, etc [12].

Dans ce chapitre, nous fournirons un aperçu général sur les déchets de plastique et de caoutchouc, ainsi que des travaux et des recherches sur l'utilisation des déchets de plastique et de caoutchouc recyclés comme granulats (fins ou grossiers) dans la fabrication des bétons.

## I.2 Déchets de plastique et déchets de caoutchouc :

Les déchets de plastique et de caoutchouc que nous avons utilisés dans cette étude, ce sont des déchets inertes et recyclables.

### I.2.1 Déchets de plastique :

Le plastique est un matériau synthétique fabriqué à partir de polymères et dérivé du pétrole ou de la biomasse et utilisé dans le domaine déferant, notamment l'emballage, l'automobile, la construction, l'électronique et la santé [13].

#### I.2.1.1 Les plastiques les plus couramment utilisés :

Il existe six principaux types utilisés sur le marché, comme le montre l'image I.1.

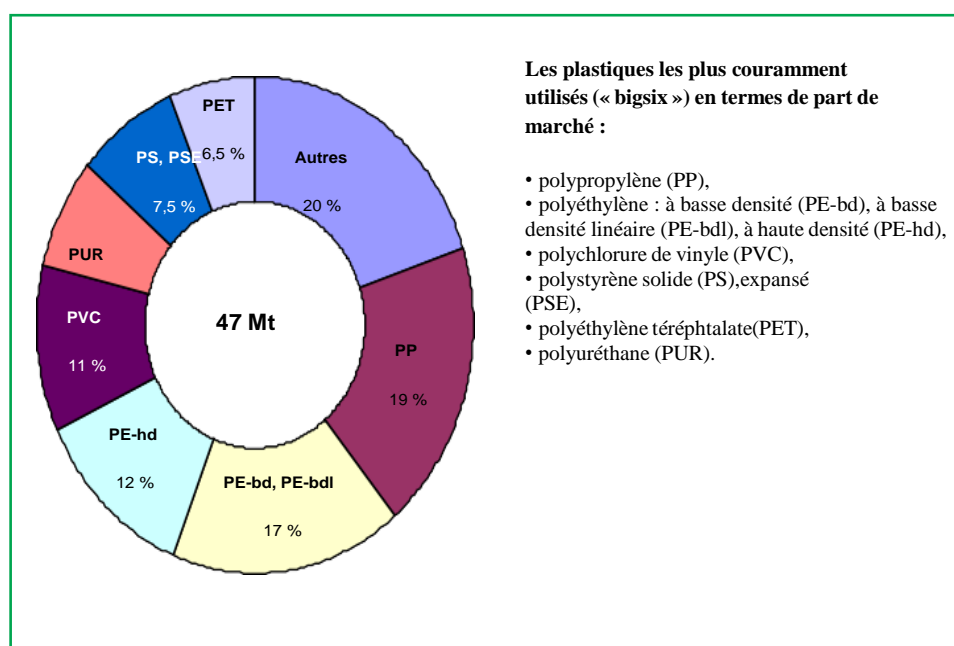


Figure I.1 : Types des plastiques utilisées en marché [14].

#### I.2.1.2 Classification de plastique :

Les matières plastiques peuvent être classées en trois sous-familles suivant la (figure I.13): les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

##### a) Les thermoplastiques :

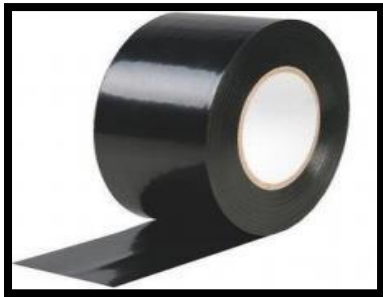
Le polymère est thermoformé par chauffage puis moulé dans des formes spécifiques, telles que la conception de moules, et se durcit en se refroidissant de manière réversible. Exemple : polypropylène (PP), polyéthylène (PE), nylon, acide poly lactique (PLA), polystyrène, chlorure de polyvinyle (PVC) et polyéthylène téréphtalate (PET), ils sont utilisés dans de nombreux domaines tels qu'emballage, automobile, électronique, tuyauterie, textile [15].



**Figure I.2:** Bouteilles en PET.



**Figure I.3:** Film en PET.



**Figure I.4:** Isolant en PVC.



**Figure I.5:** Tuyaux en PVC.



**Figure I.6:** Emballage alimentaire en PP.



**Figure I.7:** Parechoc en PP.

**b) Les thermodurcissables :**

Le plastique thermodurcissable est un matériau polymère qui après une réaction chimique devient dur, infusible et insoluble comme les polyesters, les résines époxy, les phénoplastes ou les aminoplastes. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines tels que l'industrie aéronautique, électronique, industrie médicale, construction [15].



**Figure I.8:** Goblet(PS). **Figure I.9:** Emballage(HIPS). **Figure I.10:** Emballage (PSE).

### c) Les élastomères :

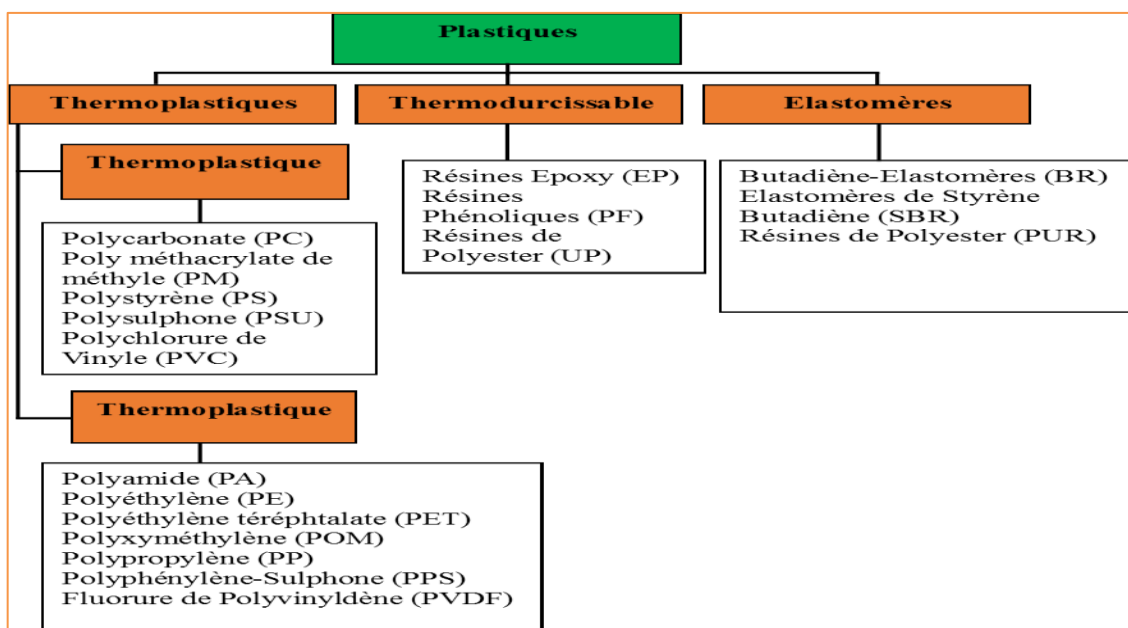
Le plastique élastomère, également connu sous le nom de caoutchouc thermoplastique (TPR), est un matériau qui combine les caractéristiques d'un plastique et d'un élastomère. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines tels que l'automobile, l'industrie, l'électronique et les produits de consommation [15].



**Figure I.11:** Caoutchouc élastomères.



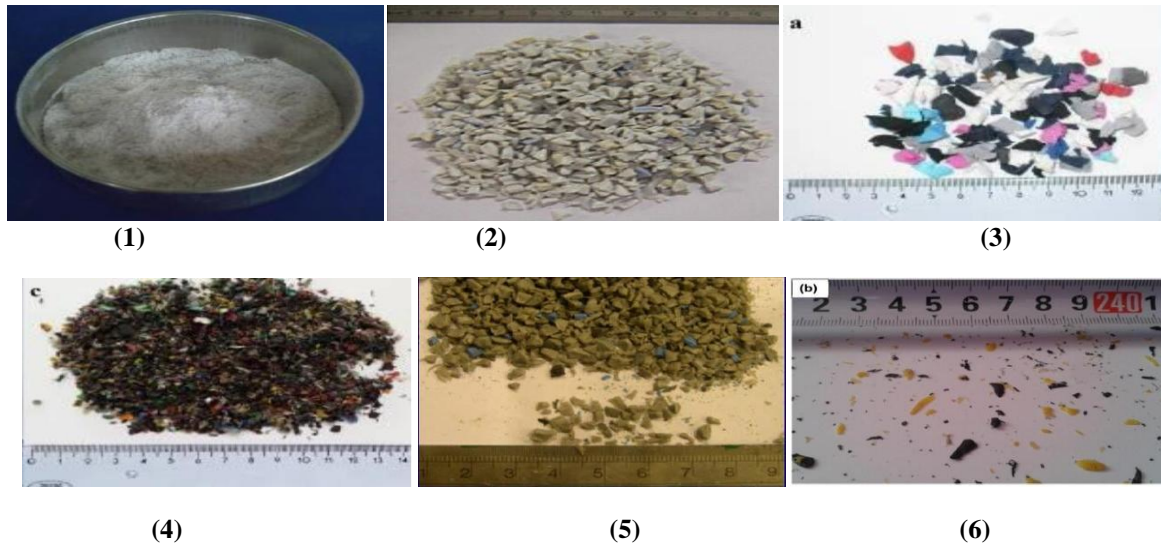
**Figure I.12:** Pneus élastomère



**Figure I.13 :** Classification des déchets de plastique [16].

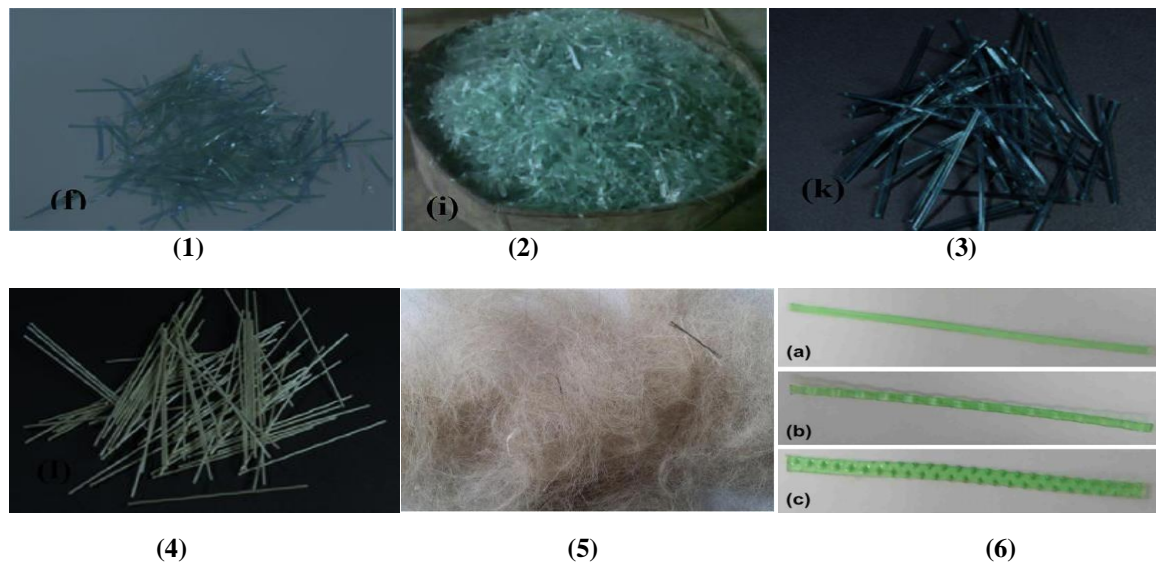
### I.2.1.3 Classification de plastique suivant la taille :

- Nanoplastiques : taille des particules  $< 0.0001$  mm
- Microplastiques de petite taille : taille des particules  $0.00001-1$  mm
- Microplastiques de grande taille : taille des particules  $1-4.75$  mm
- Mésoplastiques : granulométrie  $4.76-200$  mm
- Macroplastiques : taille des particules  $>200$  mm [17]



**Figure I.14:** Les différents types des agrégats plastiques utilisés dans le béton et mortier.

- (1) Polyéthylène téréphtalate (PET) ( $<1$ mm). (2) Polycarbonate (PC) ( $<5$ mm). (3) Ethylène-acétate de vinyle - (EVA) (4/8 mm). (4) Câbles en polychlorure de vinyle (PVC) (0/4 mm). (5) Tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC) ( $<5$  mm). (6) Polyéthylène à haute densité (PEHD) [18].



- 1) Fibres de PET laminaires courtes, (2) fibre de PET coupée à la main, (3,4) PET, (5) fibre de déchets de moquette, (6) fibres de PET de longueur de 50 mm, [18].

**Figure I.15 :** Type des fibres plastiques utilisées dans le béton / mortier.

#### I.2.1.4 Les différents types de plastique utilisés en génie civil :

- Le polyéthylène haute densité (PEHD) est un matériau relativement dur et rigide qui peut être utilisé pour fabriquer des meubles en bois de construction en plastique, des tables, des chaises et d'autres types de meubles.
- Le polyéthylène à faible densité (PEBD) est un matériau flexible et souple qui pourrait être utilisé dans la fabrication de blocs et de briques.
- Le polypropylène (PP) est dur et flexible, et en raison de ces propriétés, il peut être utilisé comme agrégat dans les mélanges d'asphalte.
- Le polystyrène (PS) est dur et cassant. Qui peut être utilisé comme des matériaux d'isolation.
- Le polychlorure chlorure de polyvinyle (PVC) est dur et rigide, ce qui indique son utilisation potentielle comme agrégat dans les matériaux à base de ciment.
- Le PET, quant à lui, est dur et flexible et l'application secondaire la plus courante est celle des fibres dans les matériaux à base de ciment. L'application secondaire la plus courante est celle des fibres dans les composites à base de ciment [19].

#### I.2.1.5 Les étapes de recyclage des déchets de plastique:

Le recyclage du plastique comprend généralement les étapes suivantes [20]:

- a) **Collecte** : Les plastiques sont collectés auprès des foyers, des entreprises et des centres de tri.
- b) **Triage** : Une fois collectés, les plastiques sont triés en fonction de leur type. Les principaux types de plastiques recyclés comprennent le polyéthylène téréphtalate (PET), le polyéthylène haut densité (HDPE), le polypropylène (PP) et le polychlorure de vinyle (PVC).
- c) **Lavage** : Les plastiques triés sont ensuite lavés pour éliminer les impuretés telles que la saleté, les étiquettes, les résidus alimentaires, etc. Ce processus de lavage permet d'obtenir une matière plastique propre et prête à être transformée.
- d) **Broyage** : Après le lavage, les plastiques sont broyés en petits morceaux appelés "granulés". Ces granulés facilitent le traitement ultérieur du plastique et permettent de le transformer en nouvelles matières premières.
- e) **Fusion** : Les granulés de plastique sont ensuite fondus à haute température pour obtenir une matière plastique liquide homogène. Cette fusion se fait généralement dans des extrudeuses ou des granulateurs.
- f) **Moulage** : Le plastique fondu est ensuite moulé dans différentes formes et formats, en utilisant des moules spécifiques. Cette étape peut comprendre l'injection, le soufflage, l'extrusion, le thermoformage, etc. Selon le type de plastique et le produit final souhaité.

g) **Refroidissement et durcissement** : Une fois moulé, le plastique est refroidi pour durcir et prendre sa forme définitive. Ce processus peut se faire à l'air libre ou à l'aide de dispositifs de refroidissement spécifiques.

h) **Recyclage final** : Une fois durci, le produit en plastique recyclé est prêt à être utilisé dans de nouvelles applications. Il peut être transformé en emballages, en meubles, en fibres textiles, en accessoires automobiles, etc. Cela contribue à économiser les ressources naturelles et à réduire les déchets plastiques dans l'environnement. Il convient de noter que les étapes exactes du recyclage du plastique peuvent varier en fonction du type de plastique, du processus utilisé et des différentes installations de recyclage.

### 2.1.6 Méthodes de valorisation du plastique :

Il existe trois méthodes de valorisation des déchets de plastique :

a) **La valorisation énergétique** : Ce processus est effectué en brûlant des déchets plastiques pour obtenir de la chaleur. Le pétrole, qui contribue à l'utilisation de l'énergie, est le principal composant du plastique. Ces déchets sont réduits grâce à ce processus.

b) **La valorisation matière**: également appelée valorisation mécanique, ce processus consiste à recycler les déchets plastiques pour créer de nouveaux matériaux et produits.

c) **La valorisation chimique**: Cette méthode transforme les plastiques en composants de base qui peuvent être utilisés pour la pétrochimie ou la fabrication de nouveaux plastiques [21].

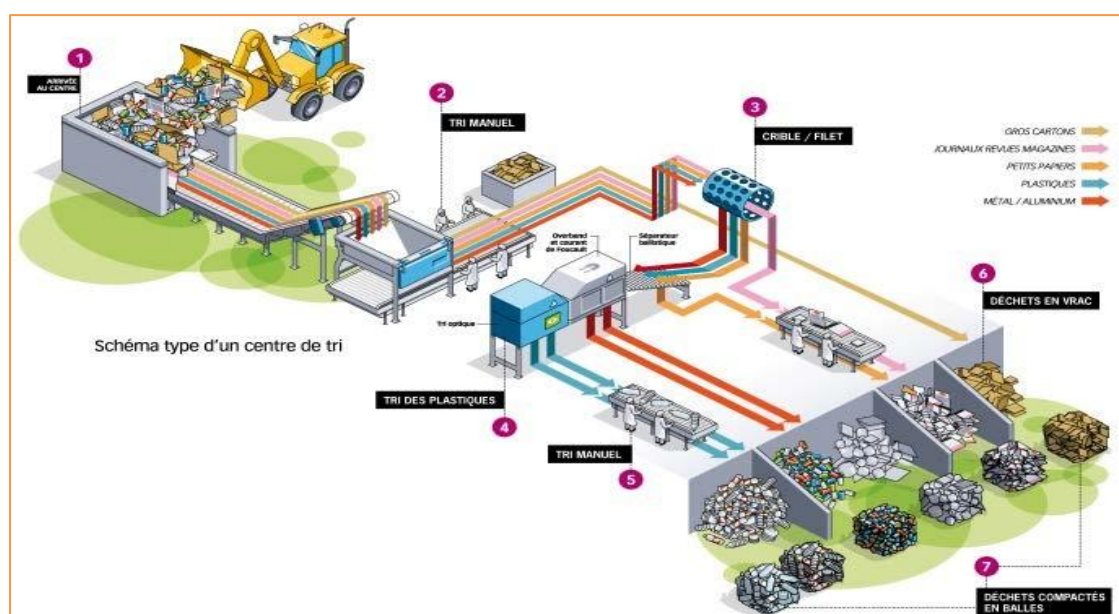


Figure I.16 : Centre de tri des déchets de plastique [20].

**I.2.1.7 L'impact des déchets de plastique sur l'environnement :**

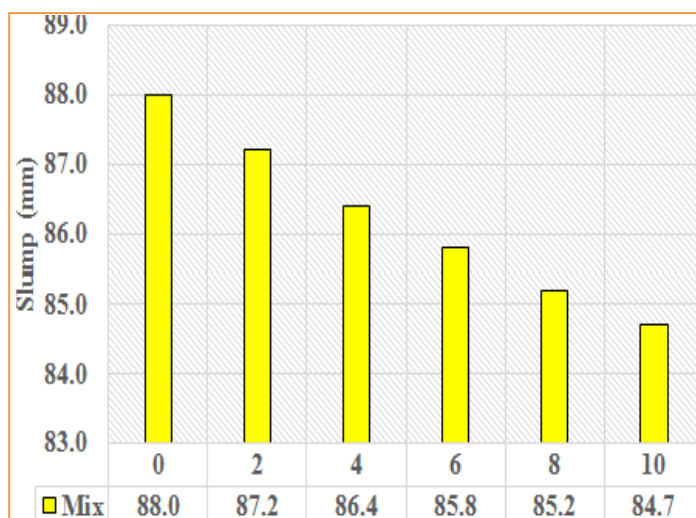
- Les déchets plastiques tels que le polychlorure de vinyle PVC et le polycarbonate PC ne sont pas biodégradables, ce qui entraîne la libération de composés toxiques dans l'air.
- Les déchets plastiques polluent l'air et le sol, ce qui a des effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement.
- Jeter des déchets plastiques présente des risques pour la fertilité des sols et un danger pour les animaux et les oiseaux, ainsi que la pollution des souterraines [22].

**I.2.1.8 Les avantages d'utilisations des déchets plastiques au domaine de génie civil :**

- L'utilisation de plastique dans le béton, qui offre une bonne isolation contre le froid, la chaleur et le bruit.
- Le plastique est économique et a une durée de vie plus longue.
- Les matériaux en plastique recyclé peuvent être utilisés au béton pour fabriquer des matériaux très durables à des environnements agressifs.
- Les matériaux en plastique recyclé sont souvent plus légers que les matériaux traditionnels, ce qui facilite leur transport et leur mise en œuvre sur les chantiers [23].

**I.3 Effets des déchets de plastique sur les propriétés du béton à l'état frais et durci :****I.3.1 Propriétés des bétons à l'état frais :****I.3.1.1 Affaissement :**

De nombreux auteurs ont étudié l'affaissement du béton à base de déchets de plastique, comme Saikia et al. [24] qui ont observé que l'affaissement diminue avec l'augmentation des pourcentages de plastiques. Manjunatha et al. [25] ont utilisé la poudre de plastique type PVC dans des proportions de (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % et 30 %). Les résultats obtenus montrent qu'à chaque fois, augmenter le pourcentage de poudre de plastique entraîne une diminution de l'affaissement. Guendouz et al [26] ont utilisé deux types de plastique, plastique (PET) et plastique (LDPE) comme fibre et poudre pour remplacer le sable. Le taux de remplacement du poudre et fibre de plastique respectivement est de (10 %, 20 %, 30 % et 40 %) et de (0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 %), ils ont constaté que l'affaissement augmente avec l'augmentation des pourcentages de poudre de plastique (LDPE), et d'autre part, l'affaissement diminue avec l'augmentation des pourcentages de fibre de plastique (PET). Qasim et Jassam [27] ont utilisé des granulats de plastique dans des proportions de 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 %. Les résultats montrent que la maniabilité diminue avec l'augmentation des taux de substitution. La maniabilité diminue de 3.9 %, 7.8 %, 11.6 %, 15.5 % et 19.1 %, lorsque les pourcentages du granulat de plastique augmentent de 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 %, respectivement, comme le montre la figure I.17.

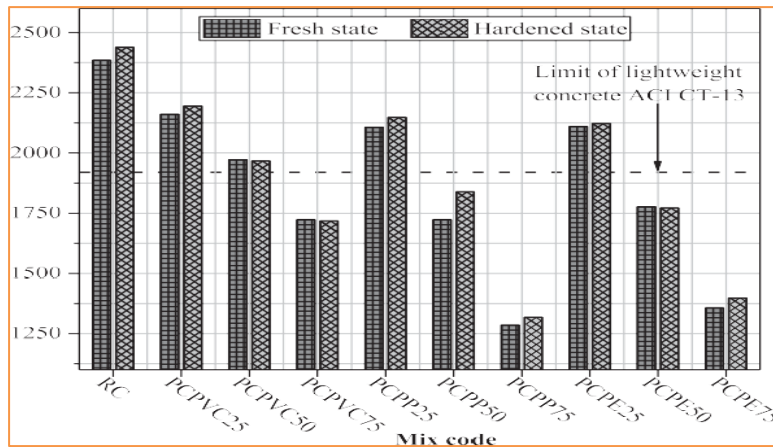


**Figure I.17:** Variation de maniabilité en fonction du pourcentage de plastique [27].

### I.3.1.2 Densité frais :

Plusieurs auteurs ont observé que la densité du béton diminue avec l'augmentation du pourcentage de plastique dans le béton, comme Al-Manaseer et al. [28] ont observé que la densité diminue de 13 % pour le béton contenant 50 % de plastique. Chusilp et al [29] ont utilisé le plastique (RHDPE) avec une teneur de (0 %, 20 %, 40 % et 60 %) pour remplacer le sable. Ils ont constaté que la densité diminue avec l'augmentation des taux de plastiques. Coppola et al. [30] ont utilisé le plastique pour remplacer le sable dans des proportions de (10 %, 25 % et 50 %), ont observé que la masse volumique diminue de 2.4 g/cm<sup>3</sup>, 2 g/cm<sup>3</sup>, 1.8 g/cm<sup>3</sup> et 1.5 g/cm<sup>3</sup> pour le béton contenant de (10 %, 25 % et 50 %) de plastique, respectivement. Ismail et Al-Hashmi [31] ont utilisé les déchets de plastique comme substitution de sable dans des proportions de (0 %, 10 %, 15 % et 20 %). Les résultats indiquent que la densité fraîche diminue de 5 %, 7 %, 8 %, respectivement, par rapport au béton ordinaire. Cette diminution à cause de la forme de plastique angulaire et non uniforme entraine moins de fluidité. Silva et al. [32] ont utilisé des déchets plastiques polyéthylène téréphtalate (PET) dans des proportions de 0 %, de 7.5 % et de 15 %. Les résultats obtenus montrent que la densité diminue lorsque la quantité de plastique PET augmente, et d'autre part, le remplacement du sable par du plastique par Bartolomeo et al. [33], dans des proportions de 10 %, 25 % et 50 %, les résultats ont montré que la densité diminue de 8, 16 et 36 % pour les bétons contenant 10 %, 25 % et 50 % de plastique par rapport au béton ordinaire. Belmokaddem et al. [34] ont utilisé trois types de plastique (plastique PVC, plastique PE et plastique PP), les résultats indiquant qu'à chaque fois qu'augmente le

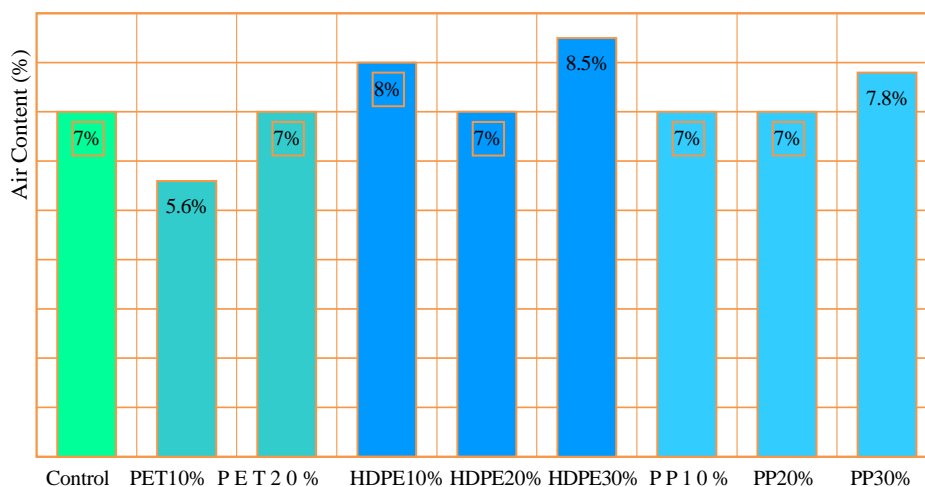
pourcentage de plastique, la densité diminue, comme le présente la figure I.18, cette diminution due à ce que la densité du plastique est inférieure à la densité du granulats naturel.



**Figure I.18:** Variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de plastique [34].

### I.3.1.3 Lair occlus:

Le béton incorporant des granulats de plastique entraîne une augmentation de l'air occlus par rapport au béton ordinaire. Ces résultats ont été vus par plusieurs auteurs, comme Setyn et al. [35] qui ont utilisé trois types de déchets (LDPE, caoutchouc et verre) dans des proportions (15 % et 30 %) qui ont été remplacés aux granulats fins. Les résultats montrent que ces déchets augmentent l'air occlus. Colangelo et al. [36] ont démontré que l'augmentation des déchets de plastique s'accompagne d'une augmentation de l'air occlus. Abu-Saleem et al. [37] ont utilisé trois types de plastique, polyéthylène téréphtalate (PET), polyéthylène haute densité (PEHD) et polypropylène (PP). Les résultats indiquent que l'air occlus dans le béton contient 10 % de plastique PET était inférieur que le béton contenant 20 % de plastique PET, comme le présente la figure I.19.



**Figure I.19 :** Variation de l'air occlus en fonction du pourcentage de plastique [37].

### I.3.2 Propriétés des bétons à l'état durci :

#### I.3.2.1 Résistance à la compression :

La résistance de compression est une propriété très importante dans le béton. Par contre la résistance de compression diminue avec l'augmentation du taux de plastique dans le béton, donc les granulats de plastique ont des effets négatifs sur la résistance de compression. Les résultats sont les mêmes et ont été observés par plusieurs auteurs, comme Khou et al. [38], ont utilisé des granulés de polychlorure de vinyle (PVC) à 5 %, 15 %, 30 % et 45 % en volume pour remplacer le sable et ont observé que la résistance à la compression diminuait lorsque le pourcentage de plastique (PVC) augmentait, où elle diminuait de 9.1 %, 18.6 %, 21.8 % et 47.3 % pour le béton contenant respectivement 5 %, 15 %, 30 % et 45 % de PVC plastique par rapport au béton de référence (P0). Guo et al. [40] ont noté que cette baisse de résistance est probablement le résultat du fait que les molécules de polymère ont un module d'élasticité inférieur par rapport aux produits d'hydratation du ciment. Mohammed et al. [41] ont utilisé le plastique PVC comme granulats grossiers et granulats fins. Selon les résultats, le remplacement des granulats grossiers par des agrégats de PVC entraînera une réduction de résistance à la compression plus importante que le remplacement des granulats fins.

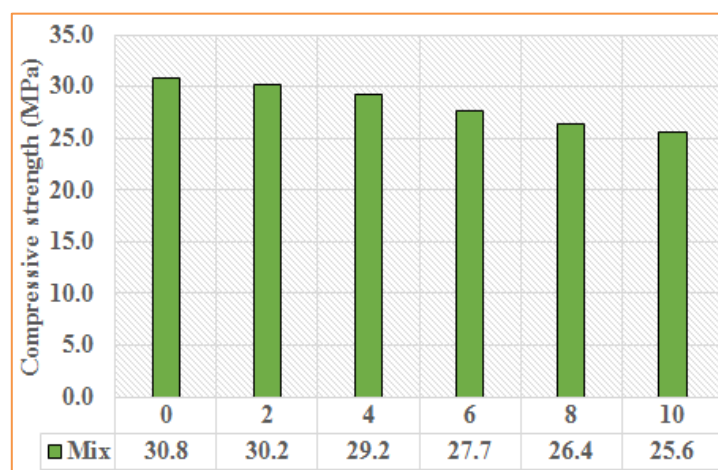


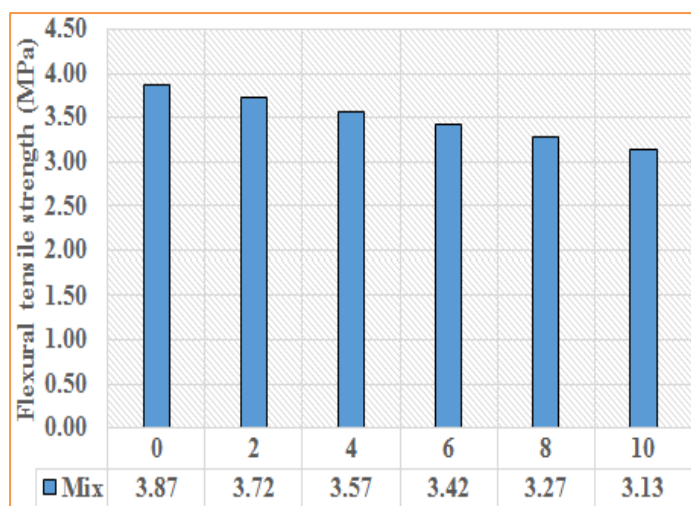
Figure I.20 : Variation de résistance de compression [43].

Zinab et al. [42] ont utilisé le déchet de plastique comme substitut de sable à différents pourcentages: 0%, 10%, 15%, and 20%. Les résultats suggèrent une diminution de la résistance à la compression. La valeur minimale de la résistance à la compression est de 17.24 MPa pour le béton contenant 20% de plastique. Aussi, la résistance à la flexion diminue lorsqu'elle augmente le pourcentage de plastique. Cette diminution peut être attribuée à la faible liaison entre les granulats. Pelisser et al. [43] ont utilisé le plastique PET dans des proportions 1%, 3%, 5%, 7%, et 10%, ce déchet substitue du ciment. Les résultats obtenus

montrent une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation du pourcentage de plastique PET. La valeur minimale enregistrée est de 25.60 MPa pour un béton contenant 10 % de plastique PET, comme le présente dans la figure I.20.

### I.3.2.2 Résistance à la flexion :

L'incorporation de déchets plastiques dans le béton peut en effet diminuer la résistance à la flexion; ces résultats ont été vus par plusieurs auteurs. Batayneh et al. [44] ont observé la diminution de la résistance à la flexion avec l'augmentation du pourcentage de plastique. Ismail et Al-Hashmi [31] ont utilisé le plastique comme agrégat dans des proportions de 10%, de 15%, et de 20% en substitution des granulats naturels, les résultats indiquant que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du pourcentage de plastique dans le béton. Hannawi et al. [45] ont utilisé le plastique PET dans des proportions de 20% et 50%. Les résultats montrent une diminution de résistance à la flexion de 9.5% et de 17.9% pour un béton content de 20% et 50% de plastique PET, respectivement. Yang et al. [46] ont utilisé les déchets plastiques dans des pourcentages de 0, 0.5, 1, 2, 3, et 5% en masse et ont observé que la valeur maximale de résistance à la flexion est de 3.55 MPa pour un béton content de 0.5% de plastique à 28 jours. Kou et al. [38] ont observé que la résistance de traction par flexion diminue avec l'augmentation du taux de plastique PVC dans le béton comme le présente dans la figure I.21.



**Figure I.21:** Variation de résistance à la flexion en fonction des pourcentages de plastique [38].

### I.3.2.3 Vitesse ultrasonique :

La vitesse ultrasonore des matériaux varie en fonction de leur densité et de leur élasticité. Quand on incorpore des déchets de plastique dans le béton, cela entraîne une augmentation de la porosité du matériau, ce qui entraîne une baisse de sa densité et de sa rigidité. Ainsi, la présence de ces déchets diminue la vitesse à laquelle les ondes ultrasonores se propagent dans le matériau, ce qui explique la baisse de la vitesse ultrasonore lorsque le pourcentage de ces déchets augmente. Ces résultats ont été vus par plusieurs auteurs, comme Albano et al. [47], qui ont observé que la vitesse ultrasonique diminue avec l'augmentation du pourcentage de plastique par rapport au béton ordinaire. Rahmani et al. [48] ont utilisé le plastique PET dans le béton, les résultats montrent qu'à chaque fois qu'augmente le pourcentage de plastique PET, la vitesse ultrasonique diminue. Cette diminution de vitesse ultrason due aux granulats de plastique rend le béton poreux. Akçaözöğlü et al. [49] ont utilisé trois types de plastique (PE, PP, and PVC) in proportions of 25%, 50%, and 75%. Les résultats indiquent qu'à chaque fois qu'augmentent les pourcentages de ces déchets, la vitesse ultrason diminue comme dans la figure I.22.

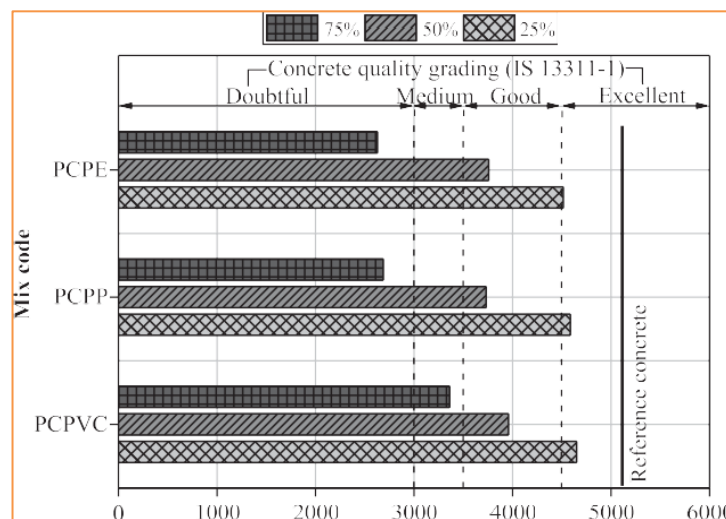


Figure I.22 : Variation de vitesse ultrason [49].

### I.3.2.4 L'absorption d'eau par capillaire :

Le fait que le béton à base de déchets de plastique absorbe davantage d'eau avec l'augmentation des pourcentages de ces déchets peut être expliqué par le fait que ces matériaux ont tendance à être poreux. Les quantités de ces matériaux dans le mélange augmentent les risques de formation de vides ou de pores à l'intérieur du béton. Ces espaces vides peuvent donc faciliter l'infiltration de l'eau dans le matériau, ce qui accroît son

absorption d'eau par capillarité. Chidiac et Mihaljevic [50] ont observé que l'absorption d'eau par capillarité augmente avec l'augmentation du pourcentage du plastique PEHD (polyéthylène à haute densité) et du plastique LDPE (polyéthylène à faible densité). Albano et al. [47] ont trouvé que l'absorption d'eau est plus élevée pour le béton contenant du plastique PET par rapport au béton témoin. Senthil et al. [51] ont utilisé des E-plastiques dans des proportions (0, 10, 20, 30, 40 et 50 %) de substitution des agrégats grossiers naturels en volume. Les résultats montrent qu'à chaque fois que l'E-plastique dans le béton augmente, l'absorption d'eau par capillaire augmente par rapport au béton témoin, comme le montre la figure I.23. Corinaldesi et al. [52] ont utilisé le plastique PET dans des mortiers et de la poussière de GFRP en substitution de sable, les résultats indiquant que l'absorption d'eau par capillarité augmente avec l'augmentation des pourcentages de plastique PET et de poussière de GFRP. L'incorporation de 6 % de GFRP a entraîné une augmentation de l'absorption d'eau d'environ 80 %.

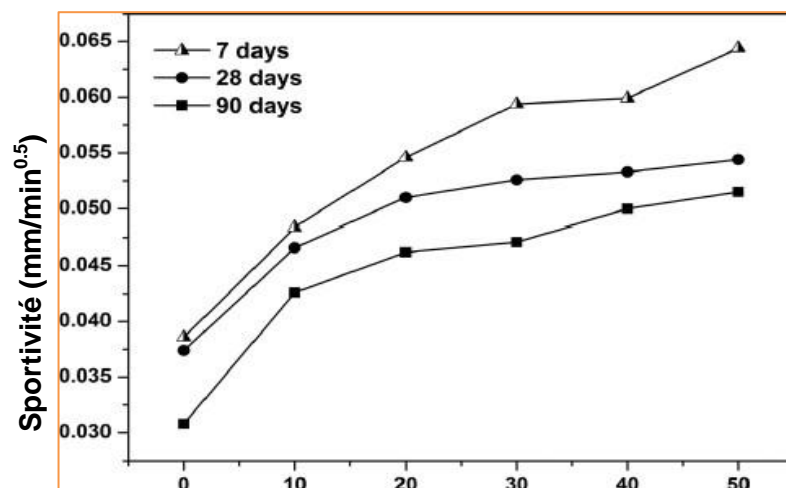


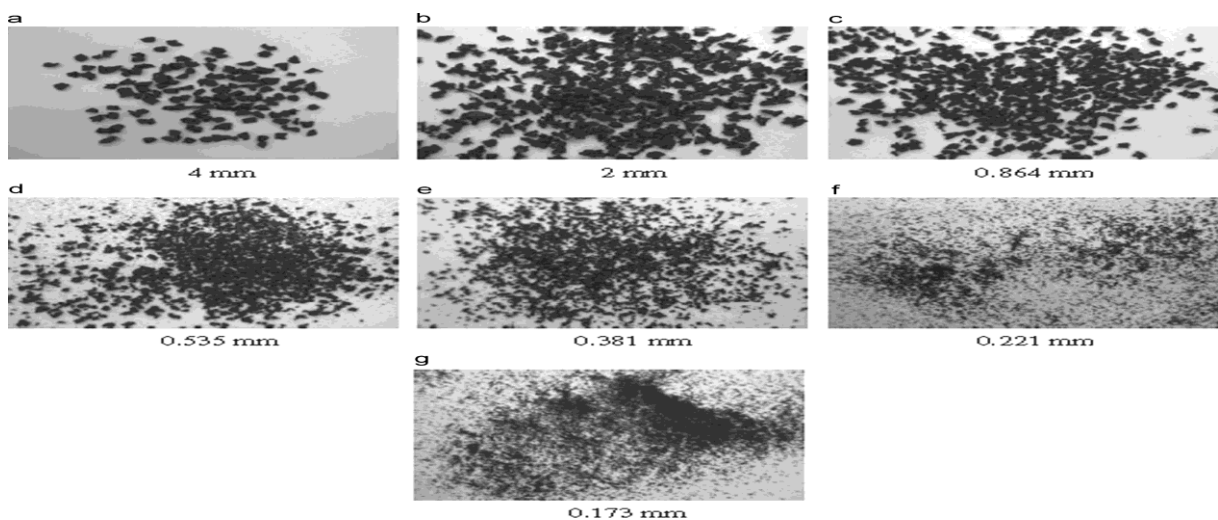
Figure I.23 : La sportivité du béton à différents volumes de granulats HIPS [51].

### I.2.2 Déchets de caoutchouc :

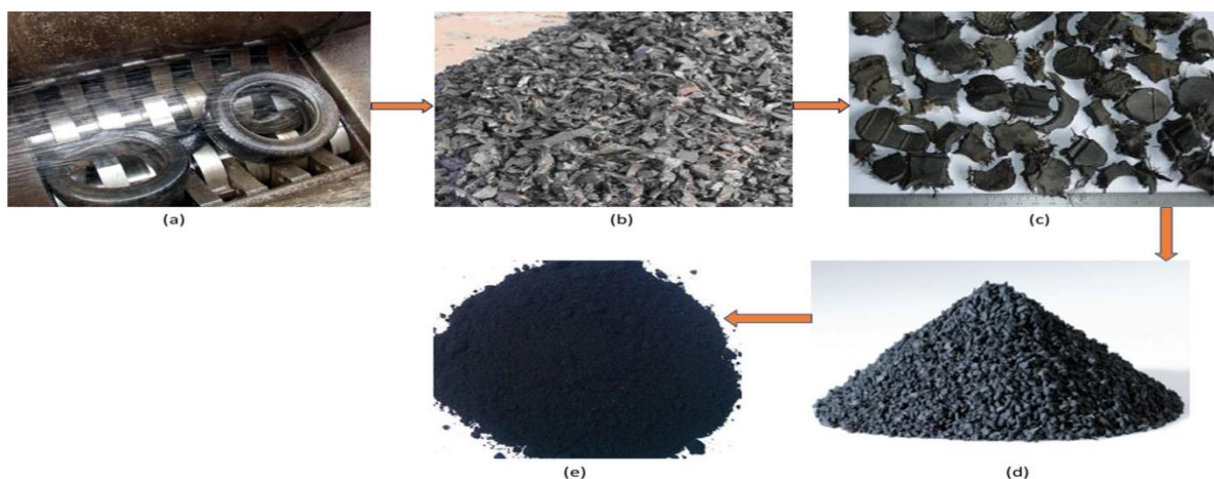
Le caoutchouc est un matériau élastique naturel ou synthétique qui est principalement constitué de polymères d'isoprène. Le caoutchouc recyclé peut également être utilisé dans la fabrication de chaussures, de sacs, de tuyaux, de joints d'étanchéité et bien d'autres produits. Son utilisation contribue à réduire la dépendance à l'égard des matières premières vierges et à limiter les impacts environnementaux liés à l'extraction et à la production de nouveaux matériaux [53].

### I.2.2.1 Les étapes de production de fines particules de caoutchouc :

1. Réduction primaire coupe les matériaux volumineux en morceaux de 10 à 15 cm pour le stockage et la manipulation.
2. Réduction secondaire Les pièces de réduction primaire ont encore été réduites à des morceaux de moins 16 mm avant d'être réduites à moins 2 mm.
3. Séparation des fibres au cours des différentes étapes de réduction, les fibres d'acier qui se trouvaient dans le matériau ont été éliminées.
4. broyage humide après cela, un broyage humide a été utilisé pour créer des particules fines de différentes tailles à partir des particules de moins 2 mm.
5. Séchage, emballage et expédition [54].



**Figure I.24:** Différentes tailles de caoutchouc granulé [55].



**Figure I.25:** Déchiquetage des pneus usagés (a) pneu mis au rebut en cours de déchiquetage (b) lambeaux de pneus de grande taille (c) pneu ébréché (d) caoutchouc en miettes (e) caoutchouc broyé fin édité dans [56].

### I.2.2.2 Méthode de broyage de caoutchouc :

- Broyage mécanique.
- Broyage cryogénique.
- Broyage humide.
- Broyage au jet d'eau [56].

### I.2.2.3 Composition des pneus :

Les pneus contiennent plusieurs compositions, comme le montre la figure I.26.

- La partie du pneu qui a le contact direct avec le sol est appelée bande de roulement. Elle est constituée d'une couche de gomme résistante à l'usure.
- Les nappes à ceinture se trouvent sous la bande de roulement.

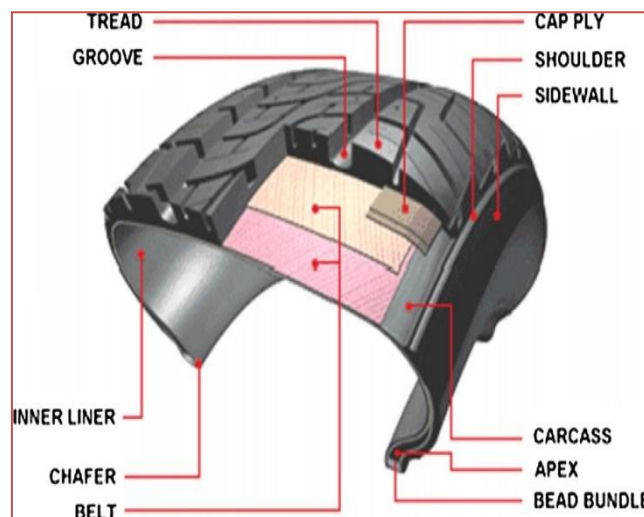


Figure I.26: Matières premières des pneus [57].

- La carcasse est identique à l'ossature du pneu. En d'autres termes, c'est elle qui améliore la capacité du véhicule à supporter la charge.
- Les tringles sont utilisées pour maintenir le pneu sur la roue. Elles sont constituées de petits câbles métalliques tressés et inextensibles pour assurer cette fonction.
- Les flancs du pneu se trouvent entre la bande de roulement et les talons. Ils protègent la carcasse. [57].

**I.2.2.4 L'impact des déchets de caoutchouc sur l'environnement :**

- Lors de la combustion des déchets de caoutchouc, des gaz toxiques et des huiles sont libérés, ce qui affecte les sols et les eaux.
- L'accumulation de déchets de caoutchouc entraîne la multiplication des insectes et des moustiques, ce qui affecte la santé humaine.
- Le styrène, un composant très toxique du caoutchouc des pneus et extrêmement nocif pour l'homme [58].

**I.2.2.5 Utilisation des déchets de caoutchouc :**

- Utiliser du caoutchouc dans le domaine génie civil pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> tout en maintenant un environnement vert.
- Ajout de caoutchouc dans le béton pour produire des structures légères et réduire les coûts en réduisant l'utilisation d'agrégats naturels.
- Le remplacement du sable par du caoutchouc de 10 à 30% a entraîné une diminution du poids unitaire de 14 à 28% [59-60-61].

**I.2.2.6 Application au béton à base de déchets de caoutchouc :**

- L'une des principales utilisations du béton caoutchouté est dans les revêtements de sol en extérieur, tels que les pistes de course, les aires de jeux, les trottoirs, les terrains de sport et les parcs de stationnement. En raison de sa composition élastique, il offre une meilleure absorption des chocs et réduit les risques de blessures en cas de chute.
  - Le béton caoutchouté peut être utilisé pour la construction de murs antibruit le long des routes et des autoroutes afin de réduire la transmission du bruit vers les zones résidentielles.
  - Le béton caoutchouté est également utilisé dans la construction de structures sujettes à des vibrations, telles que les ponts et les voies de chemin de fer. Sa capacité d'absorption des vibrations en fait un choix idéal pour réduire les nuisances sonores et les dommages structurels causés par les charges mobiles.
  - Application plus large dans les chaussées, pour amélioration des aspects de sécurité liés au dérapage.
  - Utilisés pour la construction de sols, de murs de soutènement.
- Il est utilisé pour les toitures prétendant être plus résistantes au froid.
- Utilisé dans les chemins de fer [59-61].



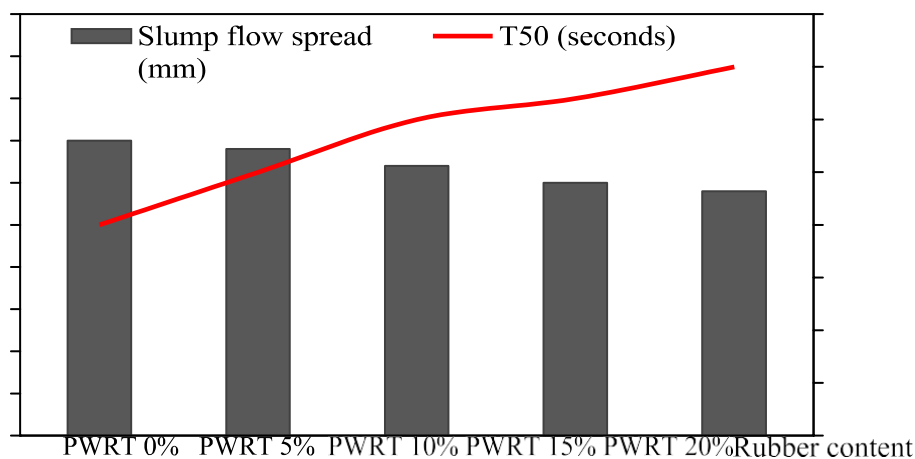
**Figure I.27:** Utilisation des déchets de caoutchouc.

#### **I.4 Effets des déchets de caoutchouc sur les propriétés du béton:**

##### **I.4.1 Propriétés du béton à l'état frais :**

###### **I.4.1.1 Affaissement :**

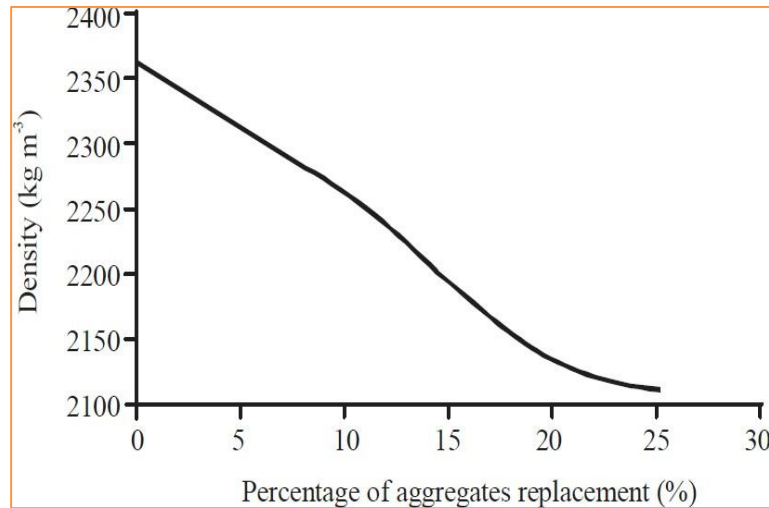
Les déchets de caoutchouc dans le béton réduisent l'affaissement du béton en raison de leur propriété élastique. Ces résultats ont été vus par plusieurs auteurs. Bisht et Ramana [62] ont utilisé le caoutchouc comme poudre dans le béton dans des proportions de (4 %, 4.5 %, 5 % et 5.5 %), ont remarqué que l'affaissement avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc. Rahul et al. [63] ont utilisé le caoutchouc comme granulats fins dans des proportions de 10 %, 15 %, 20 %, 25 % et 30 % de substitution des granulats fins. Les résultats montrent qu'à chaque fois que le pourcentage de caoutchouc augmente, l'affaissement diminue. Ofuyatan et al. [64] ont observé que l'affaissement du béton diminue avec l'augmentation du taux de caoutchouc. Cette diminution est due au fait que le caoutchouc a besoin d'une grande quantité d'eau pour l'hydratation et l'homogénéité avec les composants en béton. Leurs résultats sont illustrés sur la figure I.28. Et d'autres auteurs [65–66] ont observé que l'affaissement augmente avec l'augmentation des pourcentages de caoutchouc par rapport au béton témoin. Cette augmentation de la maniabilité est due à la surface lisse du caoutchouc et à sa nature, qui n'absorbe pas l'eau.



**Figure I.28** : Variation de l'affaissement en fonction de pourcentage de caoutchouc [64].

#### I.4.1.2 Densité :

La présence de déchets de caoutchouc dans le béton peut réduire sa densité en raison de sa légèreté et de sa porosité, ce qui peut être utilisé comme substitut à une partie des agrégats traditionnels plus denses dans le mélange de béton. Il est possible que cela entraîne une réduction de la masse totale du béton, ce qui se manifeste par une densité globale réduite. Pelisser et al. [67] le béton caoutchouté avait une densité inférieure de 13 % par rapport au mélange de référence. DJEBIEN et al. [68] Il a été observé que la masse volumique à l'état frais diminuait avec l'augmentation du pourcentage de poudre de caoutchouc ; la densité a diminué de 3.3 % pour le béton contenant 4 % de caoutchouc par rapport au béton ordinaire. D'après Siddika et al. [69], cette diminution de la densité est le résultat du fait que le caoutchouc a une densité inférieure à celle des granulats naturels. Rahul et al. [70] ont utilisé des miettes de caoutchouc de pneus avec des teneurs de 10 %, 15 %, 20 %, 25 % et 30 % afin de remplacer les granulats partiellement fins dans le béton. Ils ont découvert qu'à mesure que la quantité de caoutchouc dans le mélange augmentait, la densité diminuait. Zheng et al. [71] ont remarqué que le poids unitaire est passé de 2399 g/cm<sup>3</sup> de l'ensemble témoin à 2245 g/cm<sup>3</sup>, 2130 g/cm<sup>3</sup> et 2050 g/cm<sup>3</sup> avec le remplacement des granulats grossiers par de la poudre de caoutchouc de 15 %, 30 % et 45 %, respectivement. Ben Nakhai et Alhumoud J.M. [72] ont utilisé des granulats de caoutchouc dans des pourcentages de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 30 %, les résultats indiquant que la masse volumique à l'état frais diminuait avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc par rapport au béton de référence. Leurs résultats sont illustrés sur la figure I.29, et les mêmes résultats trouvés par Malek K. Batayneh et al [73].

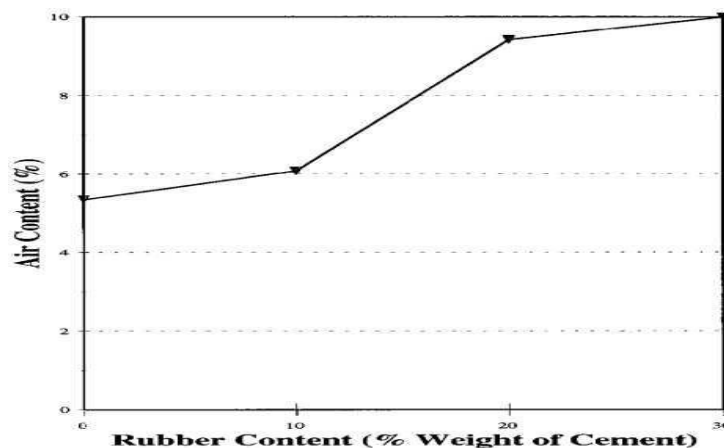


**Figure I.29:** Variation de densité en fonction de pourcentage de caoutchouc [73].

#### I.4.1.3 Lair occlus :

L'incorporation de déchets de caoutchouc dans le béton peut entraîner une augmentation de la porosité du matériau. Cela peut se produire en raison de la nature des particules de caoutchouc qui ne se lient pas aussi fermement que les agrégats traditionnels dans le béton. Cette porosité accrue peut entraîner une plus grande perméabilité à l'air, ce qui signifie que l'air peut être piégé à l'intérieur du béton.

Chylk et al. [74] ont observé qu'utiliser la poudre caoutchouc au béton cause une augmentation de l'air occlus. Dong et al [75] ont rapporté que le béton contenant 30 % de caoutchouc a enregistré un pourcentage élevé dans l'air par rapport au béton contenant 15 %. Khatib et Bayomy [76] ont remarqué que l'augmentation de la teneur de caoutchouc entraîne une teneur de l'air occlus élevée dans le mélange de béton. Fedroff et al. [77] ont remarqué que l'air occlus du béton augmente avec l'augmentation du taux de caoutchouc, leurs résultats sont illustrés sur la figure I.30.

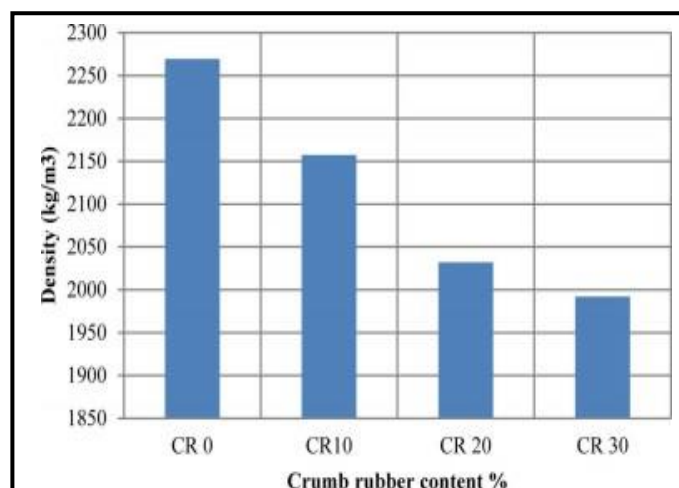


**Figure I.30:** Variation de l'air occlus en fonction de pourcentage de caoutchouc [77].

## I.4.2 Propriétés des bétons à l'état durci :

### I.4.2.1 Masse volumique à l'état sec :

Les déchets de caoutchouc dans le béton agissent comme un agent de remplissage léger, ce qui signifie qu'ils remplacent une partie des agrégats plus lourds dans le mélange de béton. En conséquence, cela diminue la masse sèche globale du béton, car le caoutchouc est moins dense que les agrégats traditionnels tels que le gravier ou le sable. Mahmoud et al. [78] ont remarqué que la densité sec diminue de 4.9 %, 10.5 % et 12.2 % pour un béton contenant du caoutchouc dans des proportions de 10 %, 20 % et 30 % respectivement, par rapport au béton témoin. Comme la montre la figure I.31, et d'autres auteurs [79-80] ont observé que la densité diminue avec l'augmentation du taux de caoutchouc, cette diminution due à la densité des caoutchoucs plus faibles par rapport aux granulats naturels.

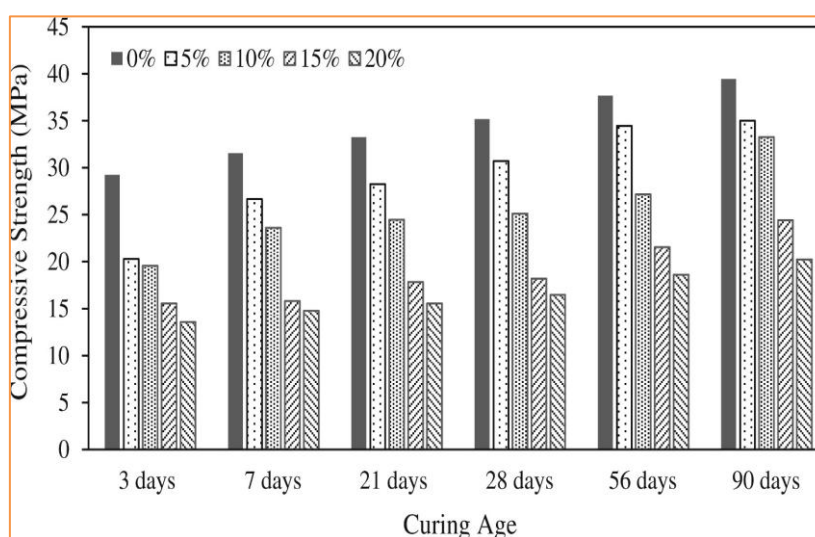


**Figure I.31:** Densité par rapport au taux de substitution du granulat fin par des miettes de caoutchouc [78].

### I.4.2.2 Résistance à la compression :

Les déchets de caoutchouc dans le béton peuvent diminuer la résistance de compression du béton car le caoutchouc est moins rigide que les agrégats traditionnels tels que le gravier ou le sable. Cela peut entraîner une réduction de la cohésion entre les particules de béton et une diminution de sa capacité à supporter des charges de compression. De plus, la présence de déchets de caoutchouc peut créer des vides dans le béton, ce qui peut affaiblir sa structure globale. Ces résultats ont été vus par plusieurs auteurs. Bisht et Ramana [62] ont utilisé le caoutchouc comme poudre dans le béton dans des proportions de (4 %, 4.5 %, 5 % et 5.5 %), ont remarqué que la résistance à la compression diminue lorsqu'il a l'augmentation le pourcentage de caoutchouc, où la résistance à la compression a diminué de 3.79 % et de 17.8 % dans le béton CR4 et CR5.5, respectivement à 28 jours. Maher Al-Tayeb et al. [81] ont

utilisé la poudre de caoutchouc par remplacements de 2.5 %, 5 % et 10 % en volume pour le ciment, les résultats ont indiqué que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la quantité de caoutchouc. La résistance à la compression diminue de 19 %, 32 % et 53 % pour le béton contenant 2.5 %, 5 % et 10 % de caoutchouc, respectivement. Cole an al. [82] a utilisé le caoutchouc par 5 % de substitution de l'agrégat grossier naturel. Les résultats ont indiqué que la résistance à la compression diminue de 29.5 MPa à 12.5 MPa par rapport au béton ordinaire, Comme le montre la figure I.32. Ofuyatan et al. [64] ont observé que la résistance de compression augmente avec l'âge de conservation dans l'eau et diminue avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc dans le béton en comparaison du béton de référence.

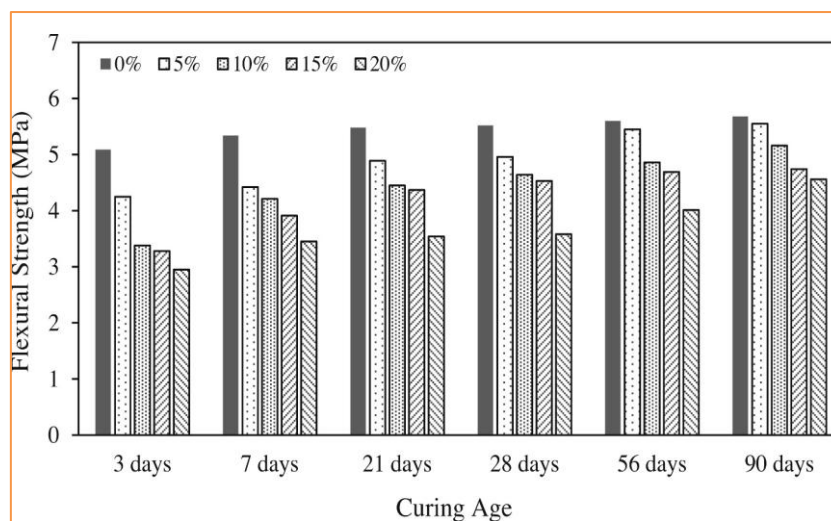


**Figure I.32** : La résistance de compression en fonction de pourcentage de caoutchouc [82].

#### I.4.2.3 Résistance à la flexion :

Les déchets de caoutchouc dans le béton peuvent diminuer la résistance de flexion du béton car le caoutchouc a une faible adhérence à la matrice de béton. Cela peut entraîner des espaces vides entre le caoutchouc et le béton, ce qui affaiblit la structure globale. De plus, le caoutchouc peut avoir des propriétés de déformation différentes du béton, ce qui peut entraîner des contraintes incompatibles et finalement réduire la résistance de flexion du béton. Ces résultats ont été vus par plusieurs auteurs. Gupta et al. [83] indiquent que le remplacement de 20 % de l'agrégat fin naturel par de la cendre de caoutchouc entraîne une diminution de la résistance à la flexion de 28.77 % et 32.87 %, respectivement. Bisht et Ramana [62] ont utilisé de la poudre de caoutchouc dans le béton dans un rapport de 0 %, 4 %, 5% et 5.5 %. Ils ont observé que la résistance à la flexion diminuait de 2.9 % et de 16.5 %

pour le béton contenant respectivement 4 % et 5.5 % de poudre de caoutchouc. Kumar et Dev [84] ont utilisé le caoutchouc comme poudre dans des proportions (0, 10, 15, 20, 25, et 30 %) et le diamètre des particules entre 0.6-2.36 mm. Par substitution des granulats fins, ils ont trouvé que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du taux de substitution dans un pourcentage de 15 %. La résistance à la flexion diminue de 28 % à 28 jours. Najim et al. [85] quand le pourcentage est de 5 % de caoutchouc, la résistance de flexion diminue de 11 %, et quand le pourcentage de caoutchouc est de 15 %, la résistance diminue de 39 %. Cole et al. [82] utilisent le caoutchouc comme substitution pour l'agrégat grossier naturel. Les résultats ont indiqué que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation des pourcentages de caoutchouc par rapport au béton ordinaire, comme le montre la figure I.33.



**Figure I.33 :** Variation de la résistance de flexion en fonction de pourcentage de caoutchouc [82].

#### I.4.2.4 Vitesse ultrason :

Les déchets de caoutchouc ajoutés au béton agissent comme des particules qui absorbent et dispersent les ondes ultrasonores, ce qui réduit la vitesse à laquelle ces ondes se propagent à travers le matériau. Cela peut entraîner une diminution de la vitesse ultrasonore du béton, car les ondes sont dispersées et absorbées par les particules de caoutchouc, ce qui affecte la cohérence et la structure du matériau. Ces résultats ont été vus par plusieurs auteurs. Najim et Hall [85] ont remplacé les granulats fins et grossiers ainsi qu'une combinaison des deux par des granulés de caoutchouc de 5 % à 15 %. Les résultats ont indiqué que la vitesse d'impulsion ultrasonique diminuait à mesure que la quantité de caoutchouc de remplacement augmentait. Pavankalyan et al. [86] ont utilisé des granulés de caoutchouc comme substitut aux granulats fins de 5 % à 20 %. Les résultats obtenus montrent que la vitesse d'impulsion

ultrasonique diminue avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc. Kumar et Dev [84] ont utilisé le caoutchouc comme poudre dans des proportions (0, 10, 15, 20, 25, et 30 %) et le diamètre des particules entre 0.6-2.36 mm substitution des granulats fins ont trouvé que la vitesse ultrasonique diminue avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc, la vitesse ultrasonique est de 4.25 km/s pour un béton contenant de 15 % de caoutchouc, parce que le caoutchouc fait des vides dans le béton, ce qui augmente le temps qui entraîne une diminution de la vitesse ultrason. Si et al [87] ont trouvé la vitesse ultrason avec des déchets de caoutchouc qui varie entre 4006 m/s et 4037 m/s, ce qui est inférieur aux 4308 m/s pour un béton témoin. Comme l'on voit dans figure I.31.

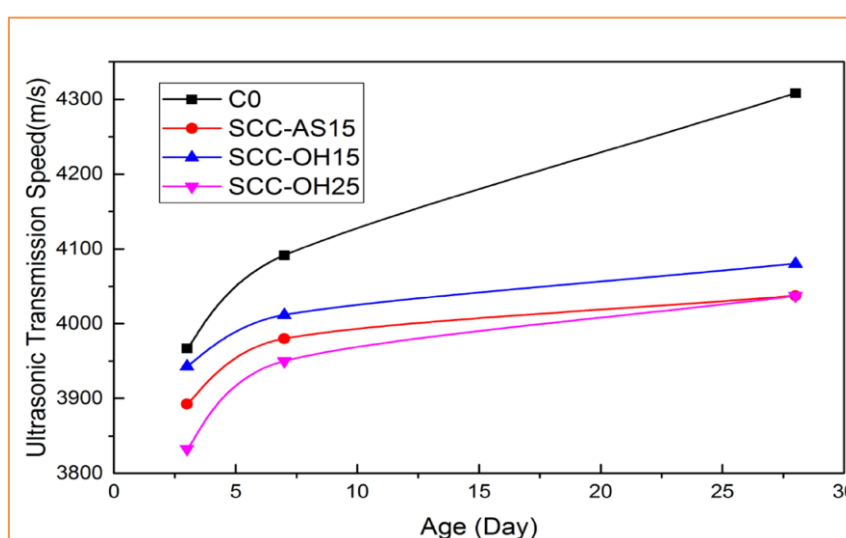
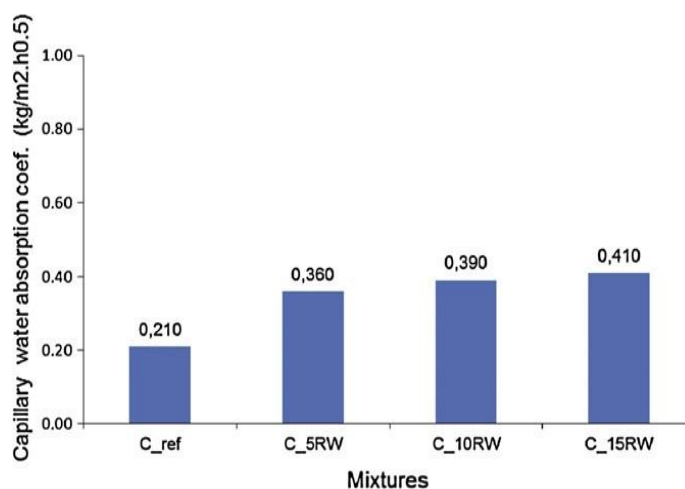


Figure I.34 : variation d'ultrason en fonction de taux de substitution [89].

#### I.4.2.5 Absorption d'eau par capillarité :

Les déchets de caoutchouc dans le béton augmentent l'absorption d'eau du béton en raison de la structure poreuse du caoutchouc. Lorsque des déchets de caoutchouc sont incorporés dans le béton, ils remplissent les vides ou les espaces vides présents dans le matériau. Cela conduit à une augmentation du nombre de pores dans le béton, ce qui augmente sa capacité à absorber l'eau. L'augmentation de l'absorption d'eau par capillarité peut avoir des avantages, tels qu'une amélioration de la résistance aux chocs et une réduction du poids du matériau, mais cela peut également affecter d'autres propriétés du béton. Ces résultats ont été vus par plusieurs auteurs.

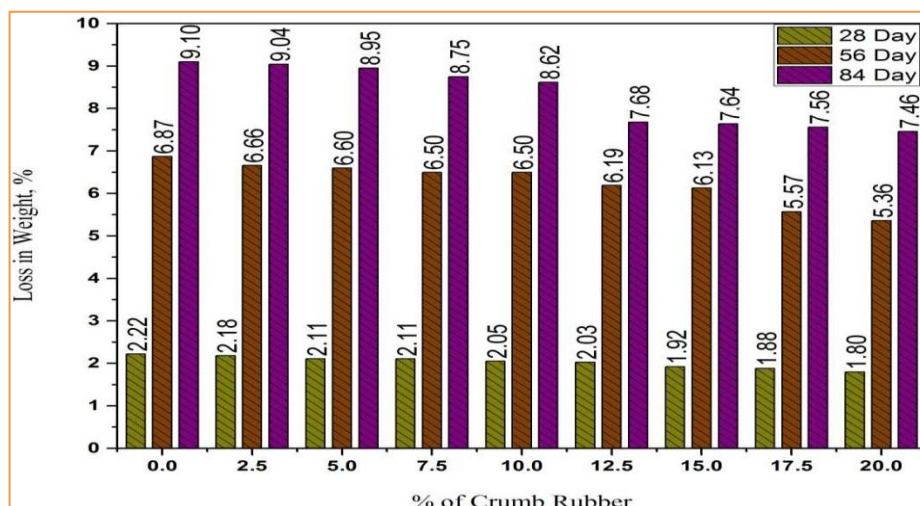


**Figure I.35 :** Absorption d'eau par capillarité du béton à base de déchets de caoutchouc en fonction de temps [88].

Blessen et coll. [88] ont mené une étude dans laquelle ils ont incorporé de la poudre de caoutchouc dans des proportions variables (0 à 15%) pour remplacer les granulats fins dans un mélange. Leurs résultats ont révélé que la sorptivité du mélange a augmenté par rapport au mélange témoin, atteignant une valeur maximale de 0.7 mm avec une substitution de 15%, comme le montre la figure I.35. Ils ont observé que l'absorption d'eau augmente d'environ 8% pour un béton content de 15% de caoutchouc à 28 jours par rapport au béton ordinaire [89–90].

#### I.4.2.6 Perte de masse :

Bisht et Ramana [62] pour remplacer les granulats fins dans le béton à 4 %, 4.5 %, 5 % et 5.5 %. Ils ont découvert qu'après avoir exposé les échantillons à un environnement acide, la perte de masse diminuait à mesure que la quantité de caoutchouc augmentait. Après 90 et 180 jours d'exposition à l'acide, des pertes de poids maximales de 9.06 % et 15 % ont été observées pour des échantillons de béton ordinaire (CR0), et 2.32 % et 3.01 % ont été observées pour des échantillons de béton contenant 5.5 % de caoutchouc. Thomas et al. [91] ont observé que la perte de poids du béton diminuait avec l'inclusion de poudre de caoutchouc, jusqu'à 20 % au niveau de remplacement de 2.5 %. Cette diminution de la perte de poids est due à la bonne adhérence entre la poudre de caoutchouc et les éléments en béton, comme le montre la figure I.36.



**Figure I.36** : variation de perte de masse en fonction du taux de caoutchouc u milieu acide sulfurique [91].

Thomas et Gupta [92] ont observé que la perte de poids diminuait avec l'augmentation du niveau de caoutchouc, ce qui indique qu'une augmentation du niveau de caoutchouc de 0 % à 20 % dans le béton entraîne une diminution de la perte de poids de 7.24 % à 8.5 %, respectivement, à 84 jours.

### I.5 Conclusion :

Les déchets comme le plastique et le caoutchouc ont des effets négatifs sur l'environnement et la santé humaine. Un groupe de chercheurs a étudié la possibilité d'utiliser ces déchets dans le domaine du génie civil pour remplacement des granulats naturels comme le sable et le ciment.

Les résultats indiqués dans les cas généraux à l'état frais : l'affaissement et la densité diminuent, et l'air occlus augmente avec l'augmentation des pourcentages de plastique et de caoutchouc, et à l'état durci, comme la masse volumique, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la vitesse ultrason diminuent avec l'augmentation du taux de plastique et de caoutchouc incorporés. Ainsi, les essais de durabilité comme l'absorption d'eau par immersion totale et par capillarité et porosité augmentent avec l'augmentation du pourcentage de plastique et de caoutchouc.

Cette synthèse bibliographique nous oriente dans notre recherche pour incorporer ces déchets dans le béton et fabriquer un nouveau matériau écologique et améliore les propriétés du béton frais et durci, ainsi que la durabilité vis-à-vis des milieux agressifs.

---

## **CHAPITRE II. MODELISATION DE PLAN D'EXPERENCE**

---

## **CHAPITRE II**

### **MODELISATION DE PLAN D'EXPERIENCE JMP**

#### **II.1 Introduction :**

Un plan d'expérience est une approche systématique qui permet d'identifier les facteurs ayant un impact significatif sur les résultats d'une expérience et d'optimiser les processus. JMP facilite la prise de décision en offrant une gamme d'outils puissants pour la conception et l'analyse de plans d'expérience. Le plan d'expérience est une méthode utilisée dans la recherche et les statistiques pour optimiser les processus et les expérimentations. Les chercheurs peuvent contrôler et mesurer efficacement les différentes variables qui peuvent influencer les résultats d'une expérience en utilisant un plan d'expérience. Cela permet d'identifier les facteurs clés et de comprendre comment ils affectent les résultats [93].

#### **II.1.1 Définition le plan d'expérience JMP:**

JMP est un logiciel statistique interactif créé par l'institut SAS créé dans les années 1980. Il est principalement utilisé pour l'exploration des données, l'analyse statistique, la visualisation graphique et l'établissement de bonnes conclusions. (Norme ISO 3534-3) [94].

#### **II.1.2 La démarche méthodologique est la suivante :**

En fonction du type d'expérience et des objectifs de recherche, les étapes de travail d'un plan d'expérience peuvent varier. Néanmoins, voici une liste générale des procédures courantes :

1. Choisissez le plan d'expérience avec lequel vous souhaitez travailler
2. Entrez les facteurs avec le nombre de niveaux pour chaque facteur
3. Construire la table de données
4. Entrez les réponses avec des valeurs de chaque interaction
5. Analysez des résultats
6. Finalement, trier les conclusions

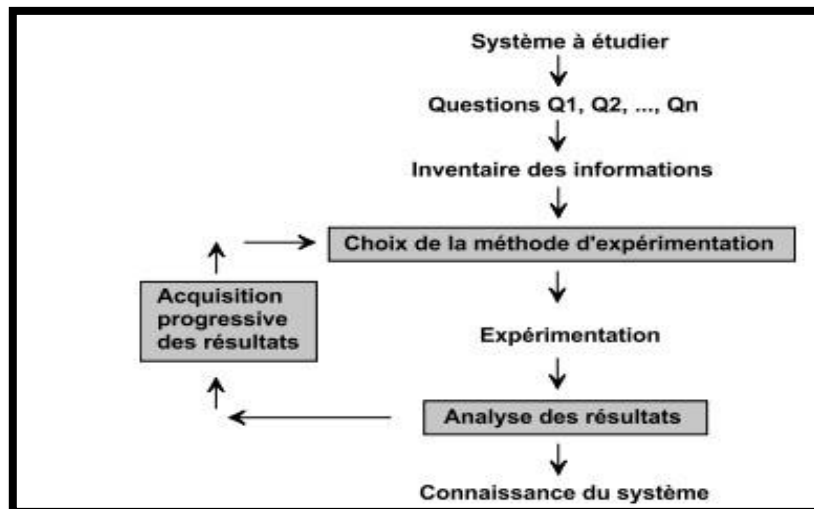


Figure II.1: Diagramme de traitement général des plans d'expériences [95].

### II.1.3 Principaux avantages du plan d'expérience :

- Réduire le nombre d'essais.
- La possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- Détection du facteur le plus influent sur la réponse.
- Il est possible d'obtenir des résultats précis et fiables. Les erreurs expérimentales sont minimisées, ce qui permet une meilleure interprétation des données.
- Obtenir des résultats plus objectifs et d'éviter les conclusions erronées basées sur des expérimentations mal conçues [96].

### II.1.4 Notion d'espace expérimental :

Les facteurs sont les paramètres qui influencent sur les réponses. Chaque facteur contient deux niveaux, les niveaux sont représentés par (niveau bas avec un signe négatif et niveau haut avec un signe positif).

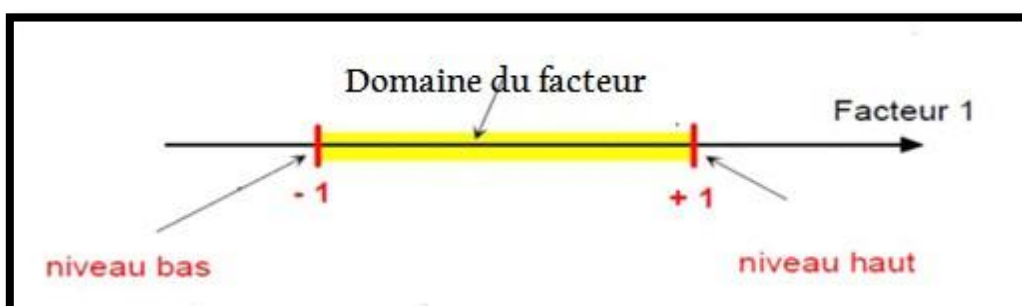


Figure II.2: Le niveau bas, le niveau haut et le domaine d'un facteur [94].

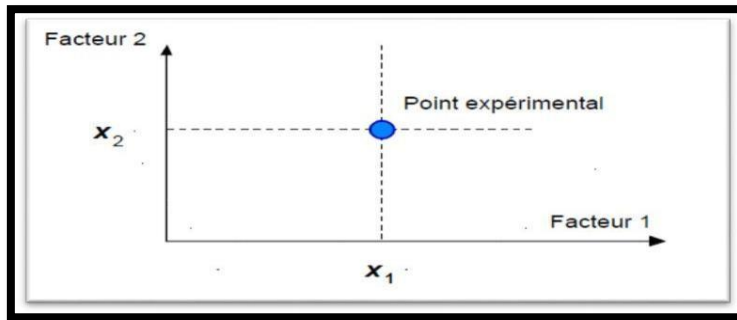


Figure II.3 : Les niveaux expérimentaux sur l'espace.

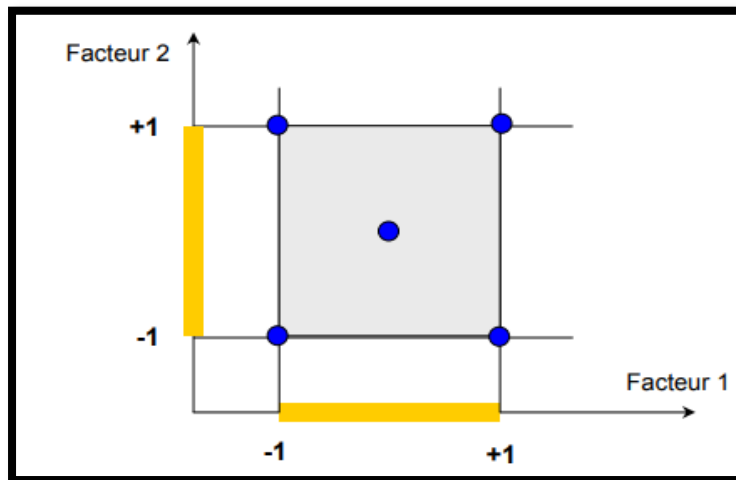


Figure II.4: Les points expérimentaux dans un domaine d'étude [94].

Ces figures représentent les facteurs étudiés avec des niveaux et définissent le domaine d'étude pour faire des essais.

### II.1.5 Notion de modélisation mathématique:

Cette fonction mathématique relie la réponse aux facteurs et est donnée par la relation suivante :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij} = x_i x_j \dots x_z$$

Avec :

- Y : c'est la réponse des essais.

-  $x_i$ : représente le niveau attribué au facteur  $i$  par l'expérimentateur pour réaliser un essai.

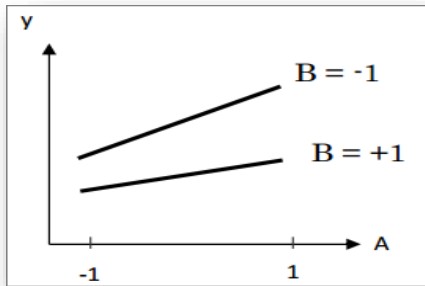
-  $a_0$ ,  $x_i$ ,  $a_{ij}$ ,  $a_{ii}$ : sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

### II.1.6 Erreur expérimental

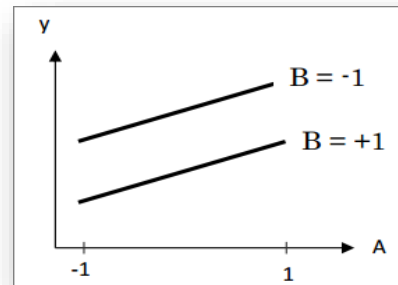
La moyenne arithmétique est généralement utilisée comme valeur centrale et l'écart-type est utilisé pour mesurer la dispersion [94].

### II.1.7 Notion d'interaction :

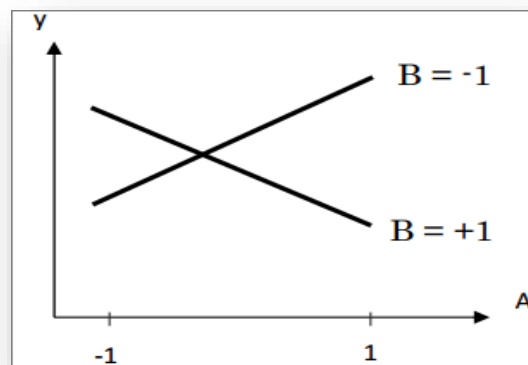
Dans cette partie, on va voir l'effet d'interaction entre les facteurs.



a) Faible d'intrication entre les facteurs



b) Pas d'interaction entre les facteurs

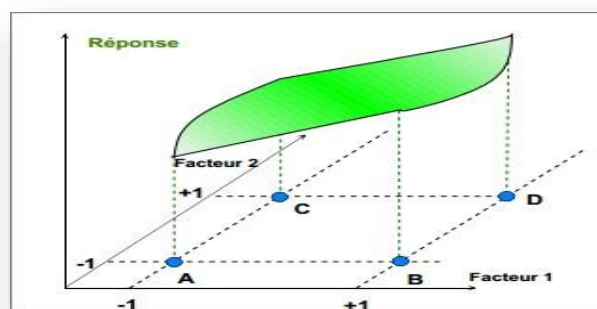


c) Fort d'intrication entre les facteurs

**Figure II.5 :** Courbe d'intrication entre les facteurs [94].

### II.1.8 Les surfaces de réponse :

La surface de réponse est une technique statistique qui permet de représenter la relation entre les variables d'entrée et les résultats observés.



**Figure II.6:** Surfaces de réponse [94].

## II.1.9 Les types du plan d'expérience :

Il existe différents types de plans d'expériences, voici quelques plans :

### II.1.9.1 Plan de criblage :

Le plan de criblage, également appelé plan d'expérience, est une approche systématique utilisée en statistiques et en recherche pour sélectionner et organiser les tests ou les expériences à mener. En sélectionnant judicieusement les valeurs des variables indépendantes à tester, le plan de criblage permet de réduire le nombre d'expériences nécessaires [97].

### II.1.9.2 Plan pour surface de réponse :

Un outil de recherche expérimentale utilisé en statistique est le plan de surface de réponse, parfois appelé plan d'expériences. Le plan pour la surface de réponse contient deux niveaux, niveau min et niveau max [98].

### II.1.9.3 Plan factoriel complet :

Un plan factoriel complet, est un plan expérimental utilisé en statistiques pour étudier simultanément les effets de plusieurs facteurs sur une réponse donnée. Dans ce plan, tous les niveaux possibles de chaque facteur sont combinés entre eux afin de considérer toutes les interactions potentielles [99].

### II.1.9.4 Plan de mélange :

Le terme "plan de mélange" est utilisé pour décrire comment différentes variables affectent un résultat donné.

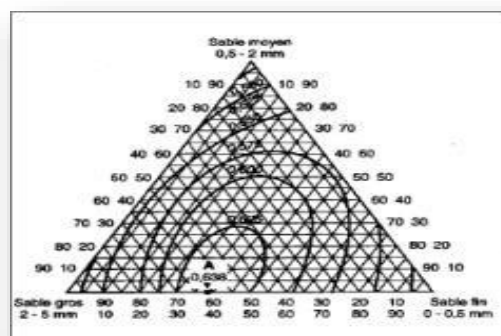
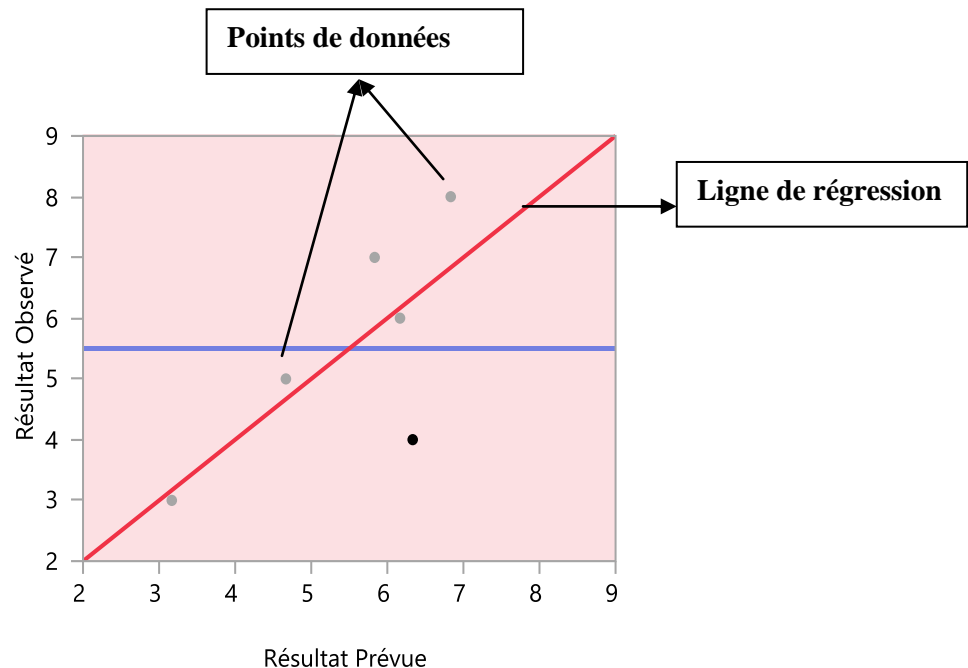


Figure II.7 : Triangle de Féret, 1892[94].

### II.1.10 Variation de la corrélation :

La variation de la corrélation c'est la corrélation entre les résultats mesurés et les résultats observés.



**Figure II.8 :** Variation de la corrélation entre les valeurs mesurées et les prévisions.

### II.1.11 Coefficient de détermination ( $R^2$ ) :

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) est une mesure statistique utilisée dans un modèle de régression pour évaluer la part de la variance de la variable dépendante expliquée par les variables indépendantes. En d'autres termes, cela met en évidence l'adaptation des données au modèle de régression. Lorsqu'un coefficient de détermination est proche de 1, cela indique que le modèle s'ajuste parfaitement aux données, tandis qu'un coefficient proche de 0 indique que le modèle ne peut pas expliquer correctement la variance présente dans les données [100].

### II.1.12 Coefficient de détermination R-carré ajusté :

Le **R-carré ajusté** est une version modifiée du R-carré qui s'ajuste au nombre de prédicteurs dans un modèle de régression [101].

Il est calculé comme suit :

$$R^2 \text{ ajusté} = 1 - [(1-R^2) * (n-1) / (nk-1)]$$

Où:

- $R^2$  : Le  $R^2$  du modèle
- $n$  : Le nombre d'observations
- $k$  : Le nombre de variables prédictives

### II.1.13 Prob.> F :

La signification de "Prob.> F" dans le logiciel JMP peut se rapporter à un test statistique connu sous le nom de "F-test" ou "F-distribution". Dans le cadre d'une analyse de variance (ANOVA) réalisée dans JMP, le test F est employé pour évaluer si les moyennes de plusieurs groupes sont équivalentes. Lorsque vous examinez les résultats de cette analyse, "Prob.> F" indique la probabilité associée à la statistique F calculée. Cette probabilité est utilisée pour déterminer si le test est statistiquement significatif. En particulier, si la valeur de "Prob.> F" est inférieure à un seuil prédéfini de signification (généralement 0.05), il est conclu qu'il existe une différence statistiquement significative entre les moyennes des groupes. En revanche, si "Prob.> F" est supérieur à ce seuil, alors on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les moyennes sont égales [102].

### II.1.14 L'erreur quadratique moyenne :

L'erreur quadratique moyenne (EQM) est un indicateur de vérification de la fiabilité d'un modèle. Cet outil étudie les écarts entre les valeurs réellement observées et les valeurs prédites par le modèle.

L'erreur quadratique est une valeur toujours positive. Plus les valeurs obtenues avec le modèle sont proches des valeurs observées, plus les écarts sont faibles et l'erreur quadratique proche de zéro [103].

#### II.1.14.1 Calculer l'erreur quadratique moyenne :

Sa formule est la suivante :

$$EQM = \frac{\sum_{i=0}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}$$

$n$  : nombre de mesure.

$y_i$  : valeurs prédites par le modèle.

$y_i$  : valeurs observées.

### II.1.14.2 Exemple d'application:

Les points bleus représentent les valeurs observées et la régression orange est le modèle de comportement établi par le Data Scientist. Calculons l'erreur quadratique moyenne du modèle:

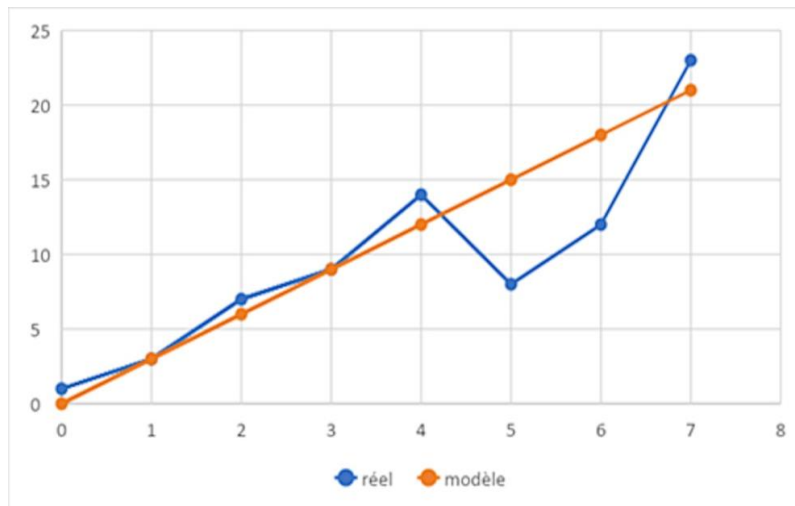
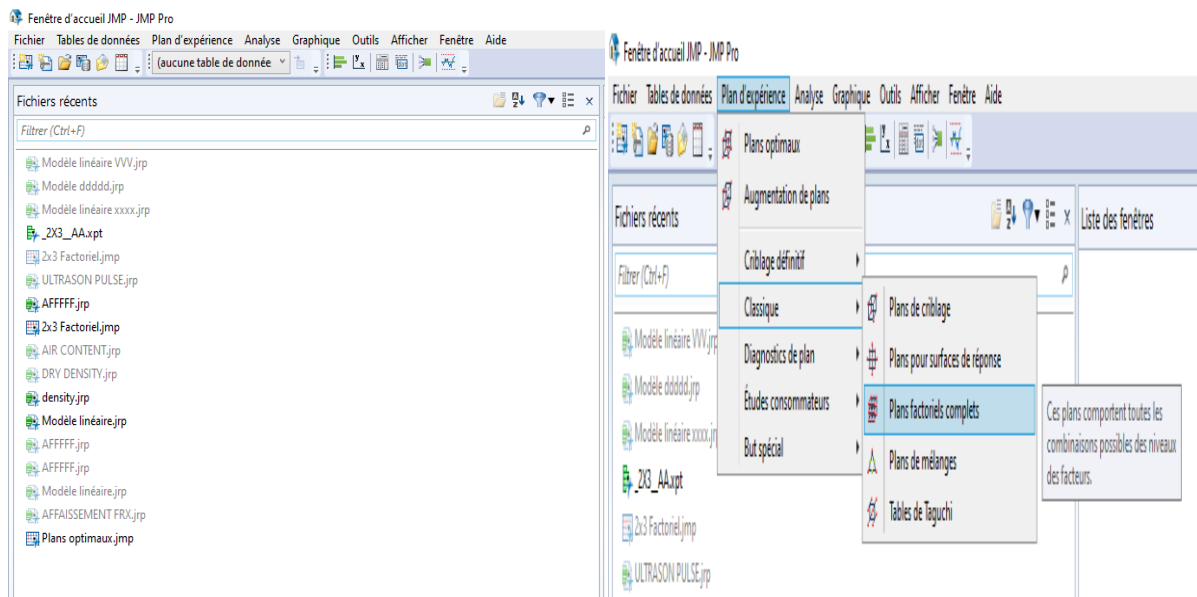


Figure II.9 : Calcule l'erreur quadratique moyenne.

$i$	$y_i$	$\hat{y}_i$	$\hat{y}_i - y_i$	$(\hat{y}_i - y_i)^2$
0	1	0	-1	1
1	3	3	0	0
2	7	6	-1	1
3	9	9	0	0
4	14	12	-2	4
5	8	15	7	49
6	12	18	6	36
7	23	21	-2	

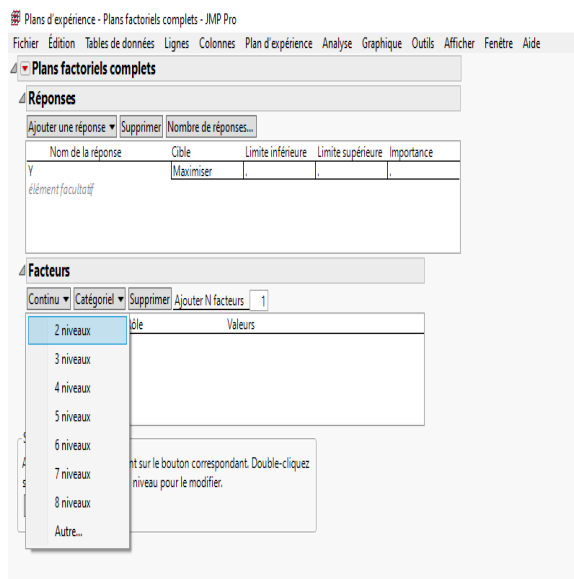
$$EQM = \frac{1+1+4+19+36+4}{7} = 13.6$$

### II.1.15 Les étapes de l'utilisation de la conception factorielle :

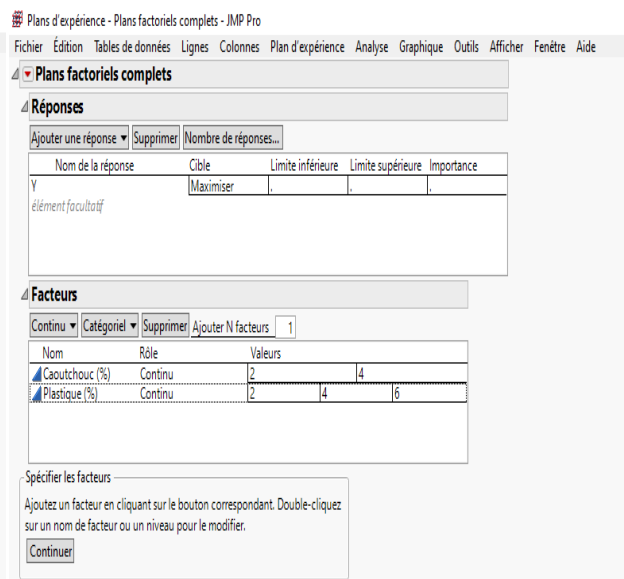


1)

2)



3)



4)

Plans d'expérience - Plans factoriels complets - JMP Pro

Fichier Édition Tables de données Lignes Colonnes Plan d'expérience Analyse Graphique Outils Afficher Fenêtre Aide

Plans factoriels complets

Réponses

Ajouter une réponse Supprimer Nombre de réponses...

Nom de la réponse	Cible	Limite inférieure	Limite supérieure	Importance
élément facultatif	Maximiser	.	.	.

Facteurs

Nom	Rôle	Valeurs
Caoutchouc (%)	Continu	2 4
Plastique (%)	Continu	2 4 6

Options de sortie

Ordre des essais: Randomiser

Nombre d'essais: 6

Nombre de points centraux: 0

Nombre de répétitions: 0

Construire la table de données

Précédent

5)

2x3 Factoriel - JMP Pro

Fichier Édition Tables de données Lignes Colonnes Plan d'expérience Analyse Graphique Outils Afficher Fenêtre Aide

2x3 Factoriel

Configuration	Caoutchouc (%)	Plastique (%)	Y
1 +1	4	2	.
2 -1	2	2	.
3 -2	2	4	.
4 -3	2	6	.
5 +3	4	6	.
6 +2	4	4	.

6)

2x3 Factoriel - JMP Pro

Fichier Édition Tables de données Lignes Colonnes Plan d'expérience Analyse Graphique Outils Afficher Fenêtre Aide

2x3 Factoriel

Configuration	Caoutchouc (%)	Plastique (%)	Affaissement (cm)
1 +1	4	2	3
2 -1	2	2	4
3 -2	2	4	3
4 -3	2	6	2
5 +3	4	6	2
6 +2	4	4	3

7)

2x3 Factoriel - JMP Pro

Fichier Édition Tables de données Lignes Colonnes Plan d'expérience Analyse Graphique Outils Afficher Fenêtre Aide

Analyse

- Distribution
- Ajuster Y en fonction de X
- Mettre en tableau
- Explorateur de texte
- Modèle linéaire
  - Régressions multilinéaires. Régression pas à pas, régression logistique, Manova, Modèle linéaire généralisé.
- Modélisation prédictive
- Modélisation spécialisée
- Criblage
- Méthodes multivariées
- Classification
- Qualité et procédés
- Fiabilité et survie
- Études consommateurs

8)

2x3 Factoriel - Ajustement par moindres carrés - JMP Pro

Réponse Affaissement (cm)

Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

Résumé des effets

Source	LogWorth	P-value
Plastique (%) (2,6)	1,455	0,03510
Caoutchouc (%) * Plastique (%)	0,647	0,22540
Caoutchouc (%) (2,4)	0,533	0,29289

Graphique des résidus en fonction des valeurs prévues

9)

2x3 Factoriel - Ajustement par moindres carrés - JMP Pro

Réponse Affaissement (cm)

Résumé de l'ajustement

- Estimations
- Criblage
- Profils des facteurs
- Diagnostique de lignes
- Enregistrer dans les colonnes de la table de données
- Boîte de dialogue du modèle
- Résumé des effets
- Estimations des paramètres
- Tests des effets
- Détails des effets
- Défaut d'ajustement
- Afficher tous les intervalles de confiance
- AICc

Résumé des effets

Source	LogWorth	P-value
Plastique (%) (2,6)	1,455	0,03510
Caoutchouc (%) * Plastique (%)	0,647	0,22540
Caoutchouc (%) (2,4)	0,533	0,29289

Graphique des résidus en fonction des valeurs prévues

10)

**II.2 CONCLUSION :**

Le plan d'expérience est une approche utilisée pour structurer une investigation ou une étude afin de garantir des conclusions précises et significatives. Il vise à maximiser la fiabilité et la pertinence des résultats en se basant sur des méthodes statistiques et des schémas expérimentaux spécifiques. En outre, le plan d'expérience simplifie l'analyse et l'interprétation des données d'une manière accessible et efficace, ce qui favorise la prise de décisions éclairées.

---

---

## **CHAPITRE III. CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES**

---

---

## CHAPITRE III

# CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

### III.1 Introduction :

Ce chapitre décrit les différents matériaux utilisés dans la partie expérimentale réalisée au niveau du laboratoire de matériaux dans les universités de Skikda et de Bordj Bou Arreridj, ainsi que les essais physiques, mécaniques et de durabilité réalisés conformément aux normes européennes et françaises sur l'ensemble des variantes étudiées.

### III.2. Les matériaux utilisés :

Dans ce travail, plusieurs matériaux ont été utilisés pour réaliser les différents essais : le ciment, le caoutchouc, le sable (0/3), le gravier (3/8), le gravier (8/15) et l'eau pour confectionner le béton et d'autres matériaux secondaires comme l'hydroxyde de sodium, le nitrate d'ammonium et l'acide sulfurique.

#### III.2.1 Ciment :

Le ciment utilisé est de type CRS-CEMI-42.5 comme le montre la figure III.1, et provient de la société Ain Kebira, située à Sétif-Algérie. Les caractéristiques chimiques et physiques de ce ciment sont indiquées dans le tableau III.1 et le tableau III.2, respectivement.



**Figure III.1:** Sac de ciment CRS.

**Tableau III.1 :** Composition chimique et minéralogique du ciment.

Designation	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl	SO <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
<b>Content (%)</b>	62.04	4.59	5.08	23.41	1.74	0.17	0.34	0.05	1.46	36.50	39.90	3.50	15.40

**Tableau III.2:** Propriétés physique du ciment.

Designation	Valeur
<b>Masse volumique apparent (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3.10
<b>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.05
<b>SSB (cm<sup>2</sup>/g)</b>	2800.2
<b>Temps de prise initial (min)</b>	90
<b>Temps de prise final (min)</b>	260

### **III.2.2 Poudre de caoutchouc :**

Les déchets de caoutchouc utilisés se présentaient sous forme de poudre d'un diamètre inférieur à 0.08 mm, avec un SSB de 2270.7 (cm<sup>2</sup>/g). Il a été apporté de l'usine d'El Hachimia, située à Bouira-Algérie. La morphologie du caoutchouc a été analysée à l'aide de la microscopie électronique à balayage (MEB), qui a révélé que les particules de caoutchouc apparaissaient sous forme de fins agrégats, densément compactés et présentant une texture lisse, comme le montrent les images MEB (figure III.4).

La surface de caoutchouc est lisse donc a été traité avec 10 % de NaOH pendant 20 minutes. Après l'avoir extrait de cette solution, il est nettoyé à l'eau puis séché à l'air [104].

Le but de ce traitement est d'augmenter l'adhérence du caoutchouc pour former une liaison forte entre le caoutchouc et le ciment. La figure III.2 présente les étapes de traitement de poudre de caoutchouc.

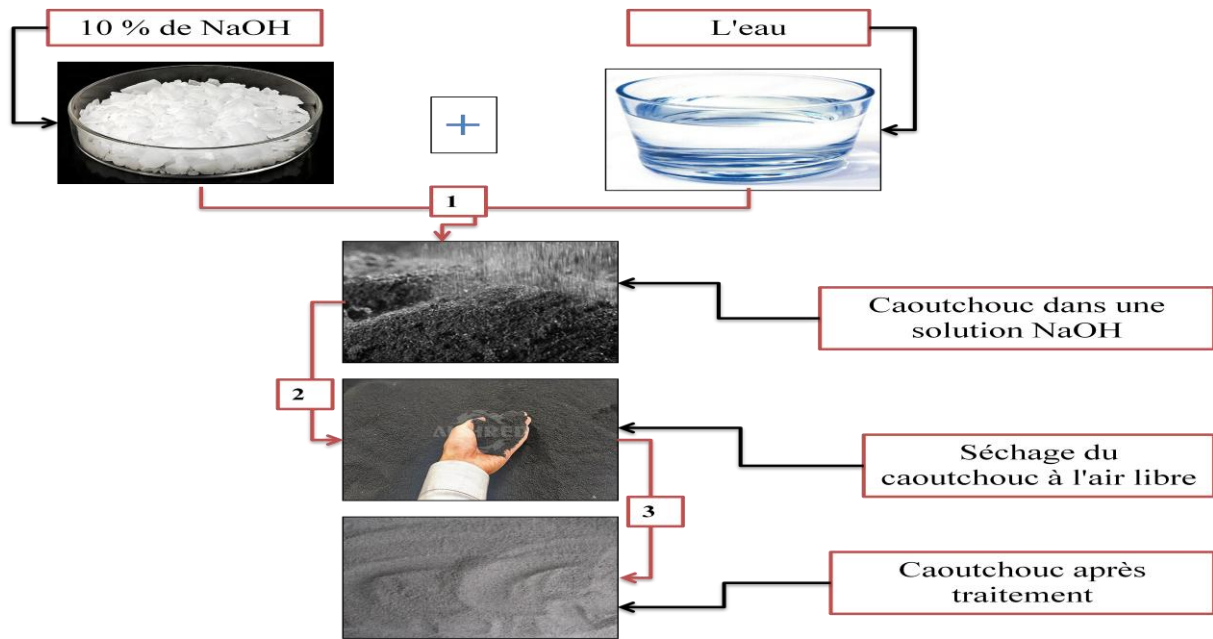


Figure III.2 : Les étapes de traitement de poudre de caoutchouc.

### III.2.3 Déchet de plastique :

Dans ce travail, nous avons utilisé deux types de plastique, plastique forex et plastique faux plafond. Ils sont utilisés comme granulats fins d'un diamètre de 1 mm, pris de l'usine d'AIN ARENET-Sétif-Algérie. La microscopie électronique à balayage permet d'examiner la morphologie des granulés de plastique, qui présente une forme angulaire irrégulière avec une texture hétérogène, comme le montre la figure III.4. Les analyses granulométriques de ces plastiques sont indiquées dans les figures III.11 et III.12, respectivement.

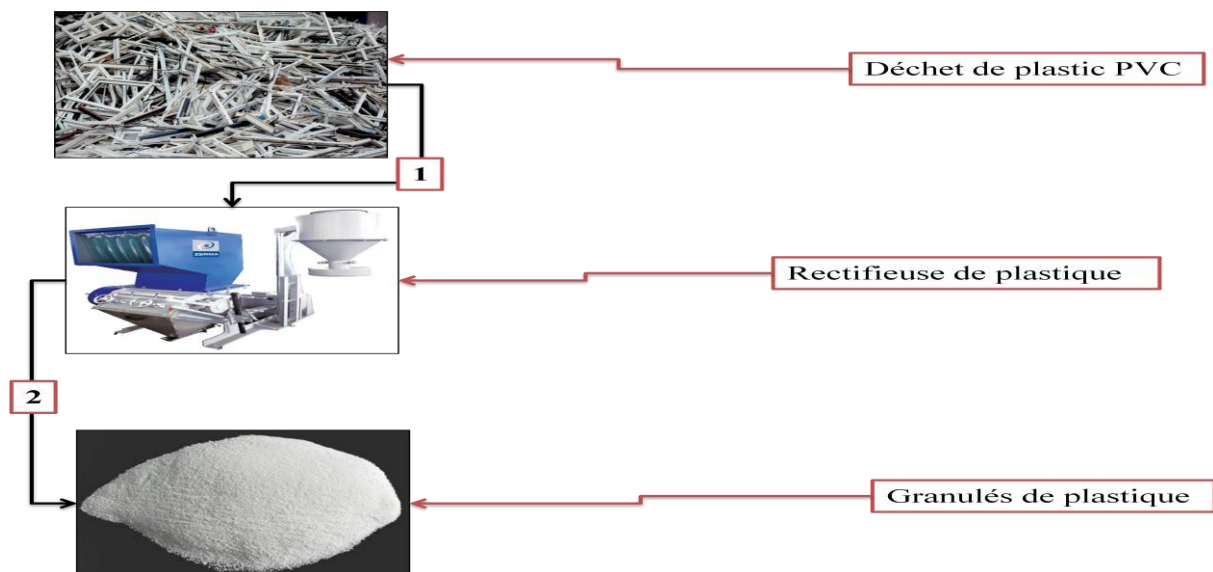
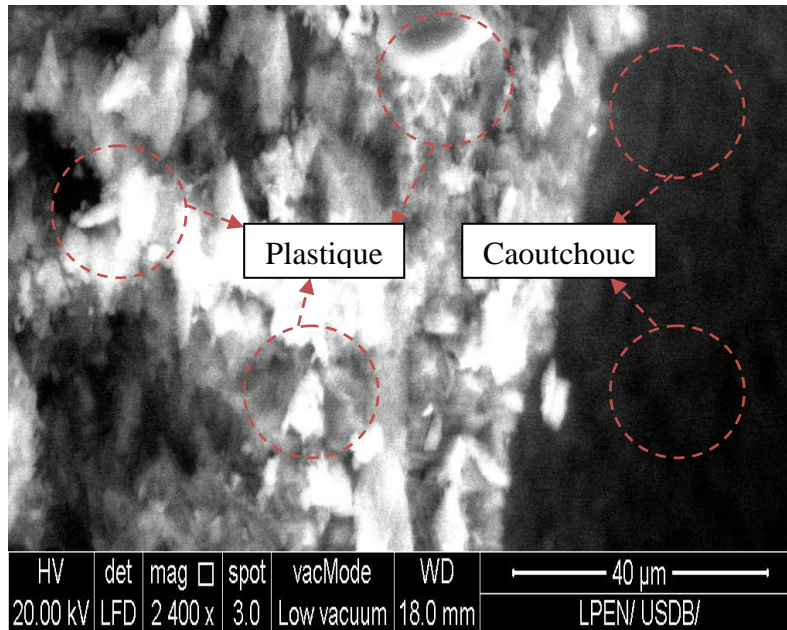


Figure III.3 : Déchets de plastique.



**Figure III.4 :** SEM du plastique et du caoutchouc.

### III.2.4 Sable :

Le sable utilisé dans cette recherche, sable de dune classe 0/3 comme le montre la figure III.5, a été apporté d'Oued Souf-Algérie. L'analyse granulométrique de ce sable est indiquée dans la figure III.13.



**Figure III.5 :** Sable (0/3).

### III.2.5 Gravier :

Le gravier utilisé dans ce gravier de recherche 3/8 et 8/15 a été apporté de la carrière de Laala Aci-Mazara-Ain Lahdjar-Sétif-Algérie. Les analyses granulométriques de ces graviers sont indiquées dans les figures III.14 et III.15, respectivement.



Figure III.6 : a) Gravier 3/8 b) Gravier 8/15.

### III.2.6 L'eau :

Dans cette recherche, de l'eau potable a été utilisée dans tous les mélanges.

### III.2.7 D'hydroxyde de sodium (NaOH) :

L'hydroxyde de sodium (NaOH) est un composé chimique inorganique. Il se présente sous forme de cristaux blancs solides très solubles dans l'eau. L'hydroxyde de sodium est une base forte qui réagit avec les acides pour former des sels et de l'eau, comme le montre la figure III.7, et Les compositions chimiques de NaOH sont indiquées dans le tableau III.3.

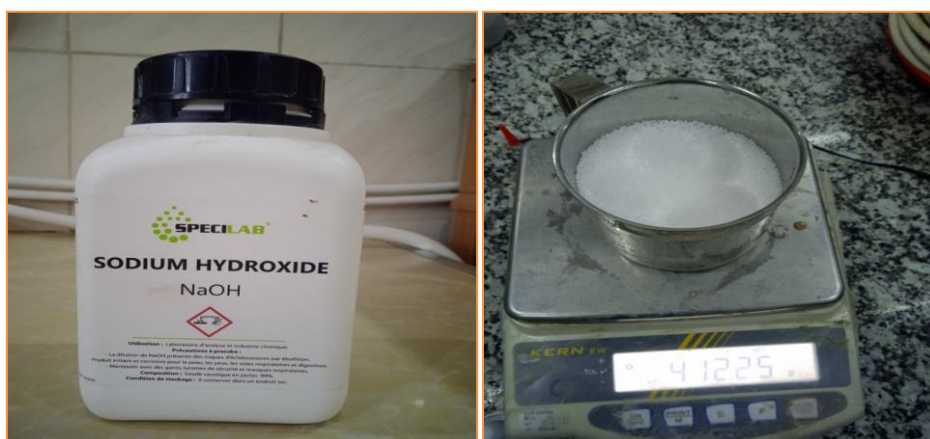


Figure III.7 : Hydroxyde de sodium.

Tableau III.3: Composition chimique du NaOH [105].

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

### III.2.8 Nitrate d'ammonium :

Le nitrate d'ammonium est un composé chimique composé d'ions ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et d'ions nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), comme le montre la figure III.8. Il est généralement utilisé en tant qu'engrais dans l'agriculture.

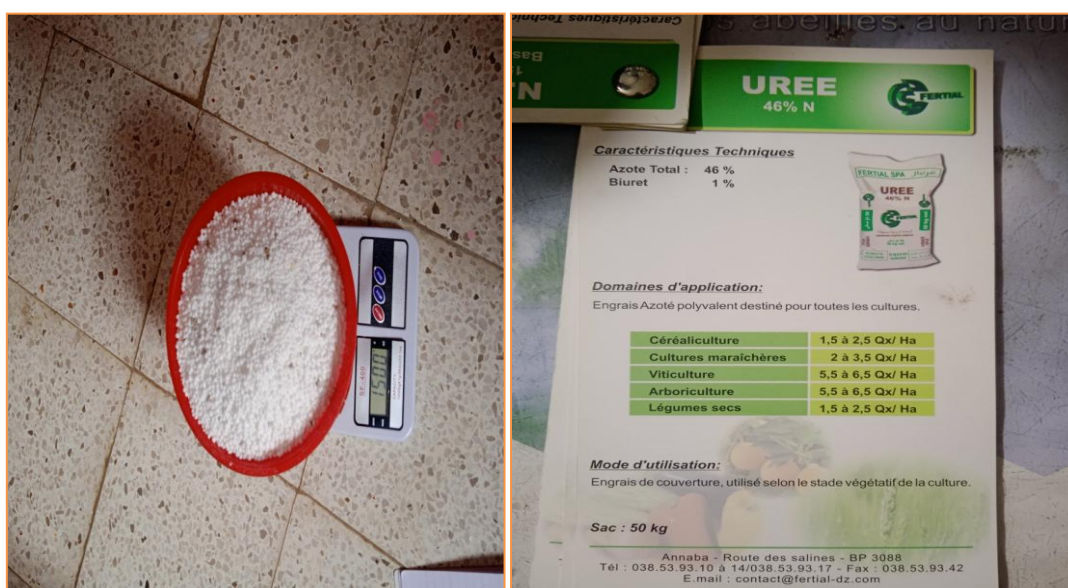


Figure III.8 : Fiche technique de nitrate d'ammonium.

### III.2.9 Acide sulfurique :

L'acide sulfurique c'est un liquide incolore et très dense, qui réagit fortement avec l'eau, la formule chimique de l'acide sulfurique est  $H_2SO_4$ , comme le montre la figure III.9.



Figure III.9 : Acide sulfurique.

### III.3 Essais sur les granulats :

Les essais sur les granulats sont des procédures et des méthodes spécifiques utilisées pour évaluer les propriétés et la qualité des granulats. Dans cette partie, nous allons voir les différents essais utilisés pour les granulats.

#### III.3.1 Analyse granulométrique par tamisage :

Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme NA EN 933-5 [106], l'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages des différents grains constituant l'échantillon.



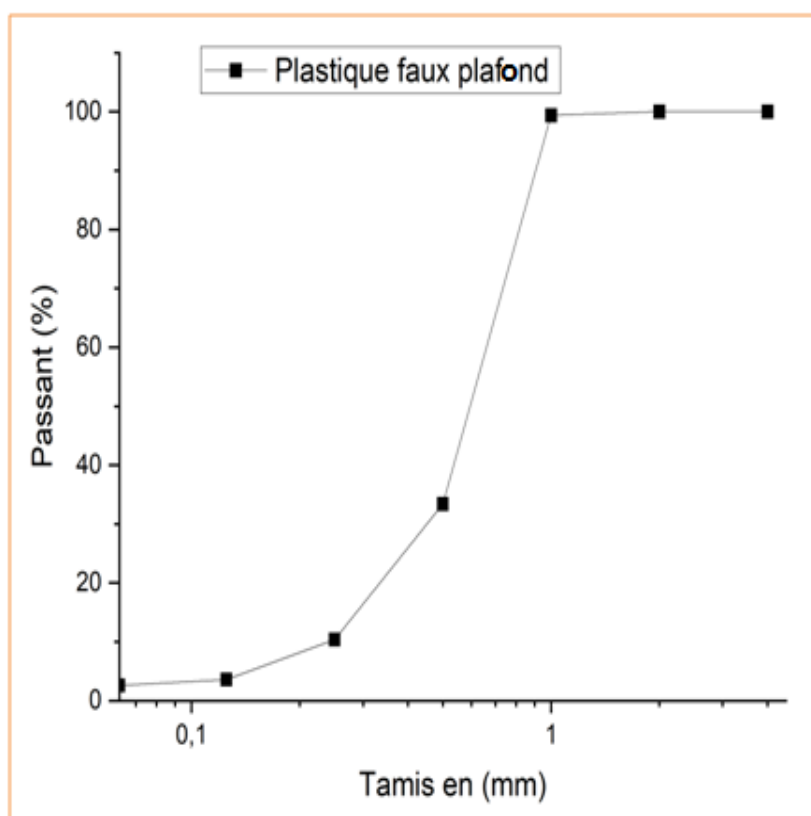
Figure III.10 : Essai de l'analyse granulométrique.

**III.3.1.1 Plastique faux plafond : (masse=1000g)**

Le tableau III.4, présente les résultats de l'analyse granulométrique de plastique faux plafond.

**Tableau III.4** : Analyse granulométrique de plastique faux plafond

Tamis (mm)	Refus cumules (%)	Tamisât (%)
4	0	100
2	0	100
1	0.6	99.4
0.5	66.6	33.4
0.25	89.6	10.4
0.125	96.4	3.6
0.063	97.4	2.6
Fond	99	1



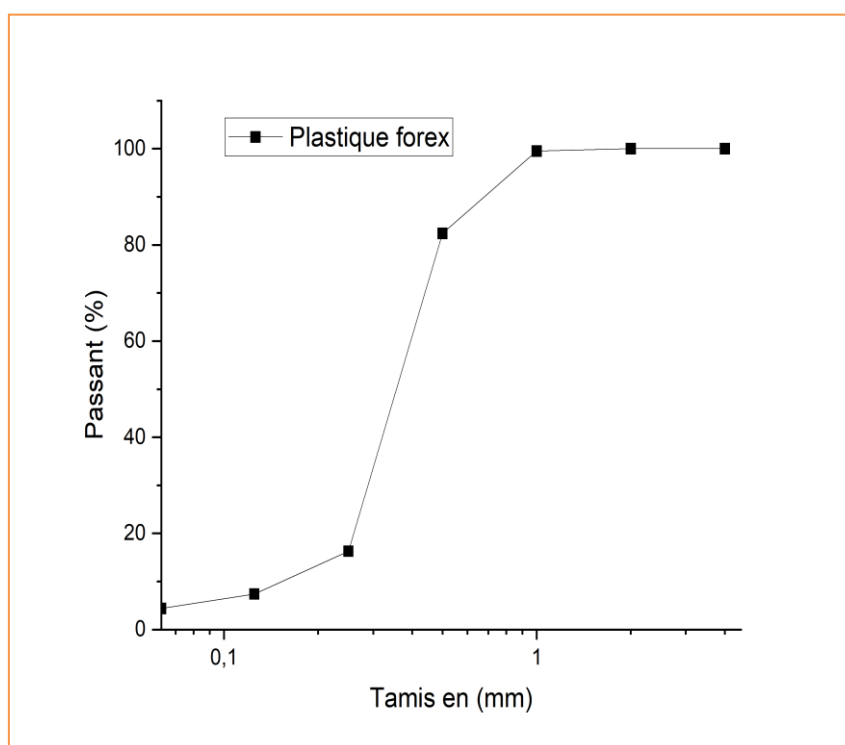
**Figure III.11** : Courbe d'analyse granulométrique de plastique faux plafond.

III.3.1.2 Plastique forex : (masse=1000g)

Le tableau III.5, présente les résultats de l'analyse granulométrique de plastique forex.

**Tableau III.5** : Analyse granulométrique de plastique forex.

Tamis	Refus cumules (%)	Tamisât (%)
4	0	100
2	0	100
1	0.5	99.5
0.5	17.6	82.4
0.25	83.7	16.3
0.125	92.6	7.4
0.063	95.6	4.4
Fond	99.3	0.7



**Figure III.12** : Courbe d'analyse granulométrique de plastique forex.

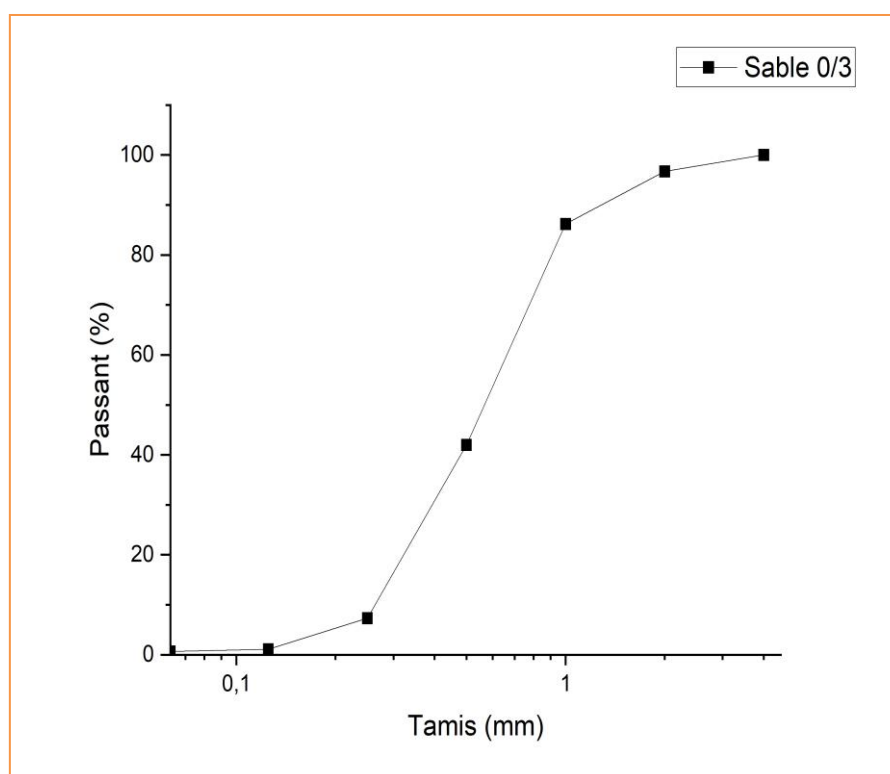
III.3.1.3 Sable 0/3 :

Masse totale sèche :  $M_s = 1000$  g

Le tableau III.6, présente les résultats de l'analyse granulométrique de sable (0/3).

**Tableau III.6.** Analyse granulométrique de sable (0/3).

Tamis	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	8	0.8	99.2
2	33	3.3	96.7
1	138	13.8	86.2
0.5	580	58	42
0.25	927	92.7	7.3
0.125	989	98.9	1.1
0.063	993	99.3	0.7
Fond	993	99.3	0.7



**Figure III.13 :** Courbe d'analyse granulométrique du sable (0/3).

III.3.1.4 Gravier 3/8 :

Gravier 3/8 Masse totale sèche :  $M_s = 1600$  g.

Le tableau III.7, présente les résultats de l'analyse granulométrique de gravier (3/8).

Tableau III.7. Analyse granulométrique de gravier (3/8).

Tamis	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
10	0	0	100
8	22	1.37	98.63
6.3	505	31.56	68.44
4	1488	93	7
2	1598	99.87	0.13
Fond	1598	99.87	0.13

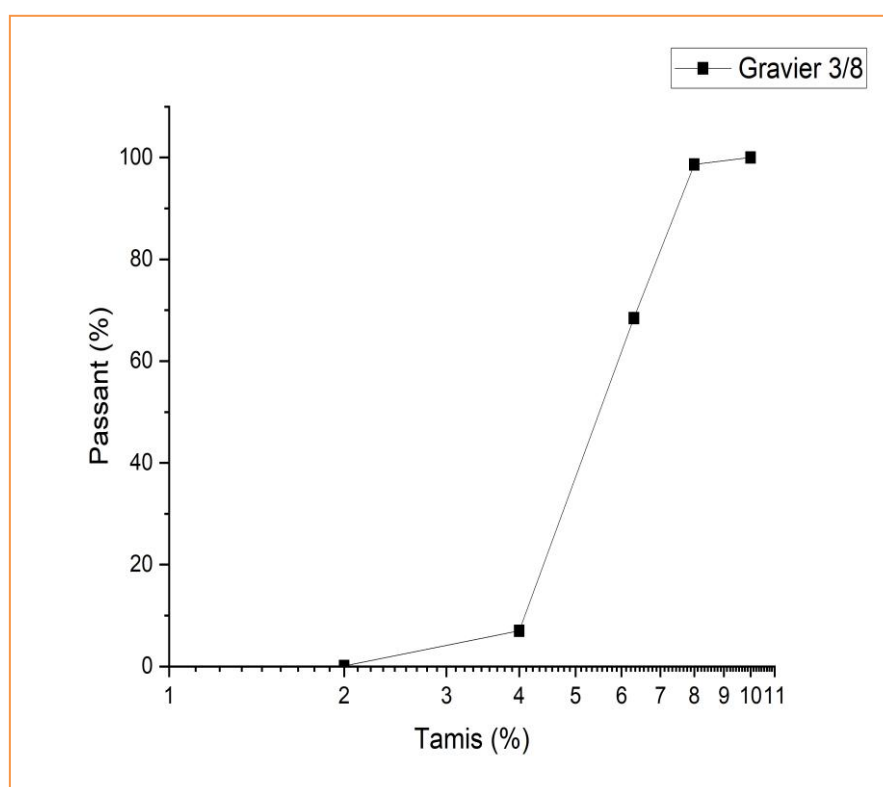


Figure III.14 : Courbe d'analyse granulométrique du gravier (3/8).

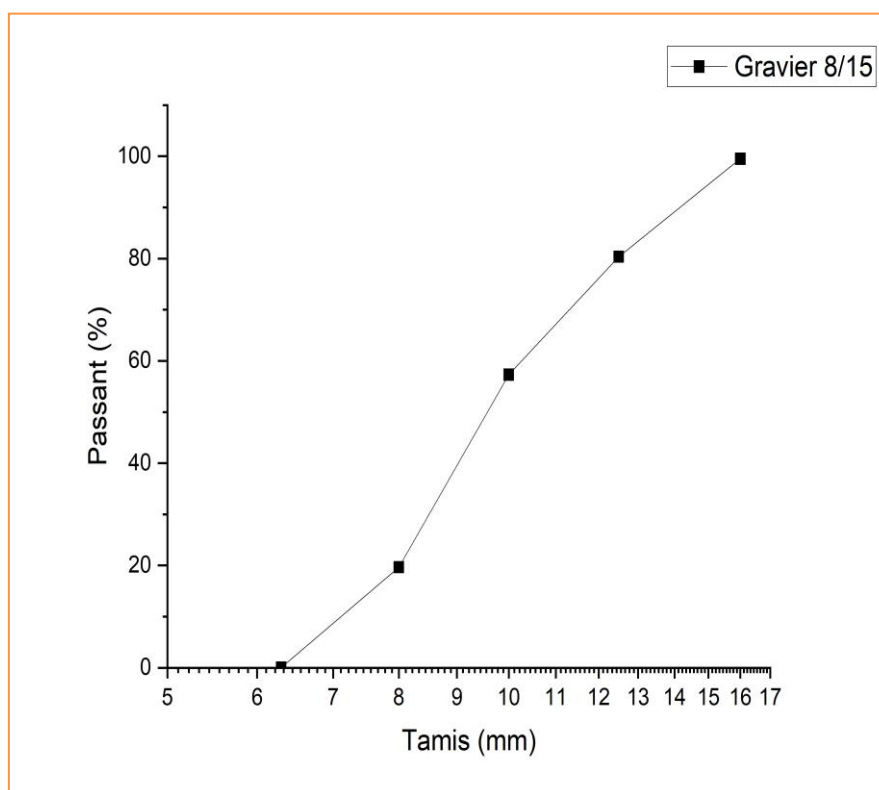
**III.3.1.5 Gravier 8/15 :**

Masse totale sèche : Ms = 3000 g.

Le tableau III.8, présente les résultats de l'analyse granulométrique de gravier (8/15).

**Tableau III.8 :** Analyse granulométrique de gravier (8/15).

Tamis	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	15	0.5	99.5
12.5	589	19.63	80.37
10	1281	42.7	57.3
8	2410	80.33	19.67
6.3	2998	99.93	0.07
Fond	2988	99.93	0.07



**Figure III.15 :** Courbe d'analyse granulométrique du gravier (8/15).

**III.3.2 Module de finesse [NA EN 12620] [107] :**

Le module de finesse de sable est calculé en déterminant la distribution des tailles de particules à l'intérieur de l'échantillon de sable, qui est égale au 1/100 de la somme des refus cumulés en pourcentage sur les différents tamis.

**Tableau III.9 : Module de finesse du sable.**

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	>2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

$$MF = (1/100) \Sigma (\text{refus cumulés en \% des tamis } \{0.063-0.125-0.25-0.50-1-2 \})$$

Après l'analyse granulométrique, on trouve que le module de finesse du sable, plastique forex, et plastique faux plafond testé est égal à :

$$MF (\text{sable}) = 2.34 \quad MF \leq 2.5 \text{ (C'est un sable moyen).}$$

$$MF (\text{plastique forex}) = 2.10 \text{ (c'est un sable de plastique moyen).}$$

$$MF (\text{plastique faux plafond}) = 1.5 \text{ (c'est un sable de plastique très fin).}$$

**III.3.3 Equivalent de sable : [NA EN 455] [108]**

C'est une mesure de la proportion et la finesse des grains de sable dans un matériau, donnée par la relation suivante :

$$Esv = (h_2/h_1)100\% \text{ Avec :}$$

**h<sub>1</sub>** : hauteur du sable plus flocculat.

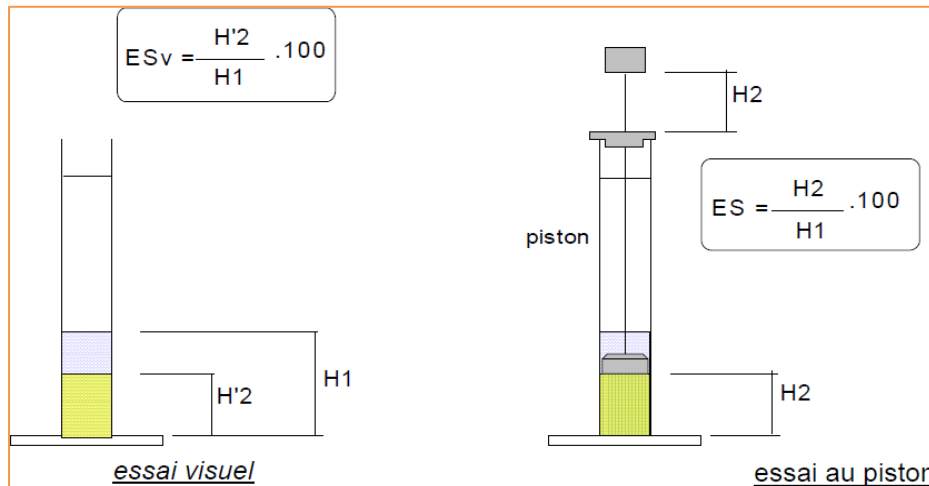
**h<sub>2</sub>** : hauteur du sable.

Insère le piston dans l'éprouvette, puis abaisse-le lentement jusqu'à ce qu'il repose sur le sable.

$$Esp = (h_2/h_1) X 100\% \text{ Avec :}$$

$h_1$  : hauteur du sable plus flocculat.

$h_2$  : hauteur du sable.



**Figure III.16:** Essai d'équivalent de sable.

**Tableau III.10 :** Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ES

Es <sub>v</sub>	Es <sub>p</sub>	Nature et qualité de sable
<b>Es &lt; 65</b>	Es < 65	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
<b>65 &lt; Es &lt; 75</b>	65 < Es < 80	Sable légèrement argileux de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
<b>75 ≤ Es ≤ 85</b>	70 ≤ Es ≤ 80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
<b>Es ≥ 85</b>	Es > 85	Sable très propre ; l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau III.11 : Les résultats de l'équivalent de sable.

	H1	H2	ES	Nature de sable
Sans piston (cm)	10.5	8.7	82.28	81.61(%) Sable très propre
Avec piston (cm)	10.5	8.5	80.95	

### III.3.4 La masse volumique :

C'est la masse d'un corps par unité de volume, on distinguera :

#### III.3.4.1 La masse volumique apparente ( $\gamma$ ) [NF P18-554] [109]:

C'est la masse d'un corps sur le volume apparent. L'unité en ( $\text{g}/\text{cm}^3$  ;  $\text{kg}/\text{m}^3$  ;  $\text{t}/\text{m}^3$ ). La formule de la masse volumique apparente est la suivante :

$$\gamma = (M_2 - M_1) / V$$

$M_1$  : masse du récipient vide.

$M_2$  : masse du récipient et sable.

$V$  : volume de récipient.



Figure III.17 : Mesure la masse volumique apparente des matériaux.

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau suivant :

Tableau III.12 : Masse volumique apparent des matériaux.

Les matériaux	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Sable	Plastique		Caoutchouc
				PR	PF	
$\gamma_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.36	1.42	1.62	0.33	0.44	0.34

### III.3.4.2 La masse volumique absolue ( $\rho$ ) NF P18-558 [110] :

C'est la masse d'un corps sur le volume absolu. Unité en (t/m<sup>3</sup>, kg/dm<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>). La formule de masse volumique absolue est la suivante :

- ✓  $\rho = M / (V_2 - V_1)$ .
- ✓ Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau  $V_1$ .
- ✓ Peser une masse  $M$  du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- ✓ Lire le nouveau volume  $V_2$ .
- ✓ La masse volumique absolue  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>).



Figure III.18 : Mesure la masse volumique absolue des matériaux.

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau suivant :

Tableau III.13 : Masse volumique absolue des matériaux.

Les matériaux	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Sable	Plastique		Caoutchouc
				PR	PF	
$\gamma_{abs}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.66	2.66	2.55	1.67	1.78	0.94

PR : Plastique forex, PF : Plastique faux plafond

**III.3.5 Absorption d'eau [NA EN 1097-6] [111] :**

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle est exprimée en % et définie par la formule :

$$A (\%) = [(M_H - M_S)/M_S].100$$

$M_H$  : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

$M_S$  : La masse du matériau sec en (g).

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau III.14 :** Degré d'absorption d'eau.

Fraction	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Absorption (%)
Sable	512	500	2.5
G3/8	505	500	1
G8/15	505	500	1
Caoutchouc	102	100	0.2
Plastique (PR, PF)	102	100	0.2

**III.3.6 Résultats des essais de caractérisation :**

**Pour la densité :**

La densité des fines de caoutchouc  $\leq$  densité de ciment

La densité de sable de PFR, et PFP  $\leq$  la densité de sable

Ce qui indique les fines de caoutchouc, sable de PFR, et PFP diminue la densité du béton.

**Pour le SSB :**

Le SSB des fines de caoutchouc  $\leq$  le SSB de ciment

Ce qui indique les fines de caoutchouc diminue la résistance mécanique du béton.

**Pour l'absorption d'eau :**

Absorption d'eau de sable PFR, et  $PPF \leq$  absorption d'eau de sable

Ce qui indique une augmentation de l'eau liber qui influencé sur les propriétés mécaniques du béton.

**III.4 Formulation du béton :**

Étudier la composition d'un béton implique de trouver le bon équilibre entre les différents granulats, ainsi que le dosage optimal de ciment et d'eau, pour obtenir un béton aux caractéristiques recherchées pour la construction souhaitée. Il existe plusieurs méthodes de formulation telles que Caquot, Faury, Dreux-Gorisse, Baron-Lesage, chacune reposant sur ses propres hypothèses. Dans notre cas, nous avons choisi la méthode Dreux-Gorisse en raison de sa simplicité d'utilisation et de ses résultats satisfaisants.

**III.4.1 Objectifs visés par l'étude :**

Nous visons la résistance caractéristique à la compression du béton 30 MPa à 28 jours et un affaissement au cône d'Abram's de 8 cm. La dimension maximale des granulats utilisés est  $D_{max} = 15$  mm et le dosage en ciment est fixé à  $400 \text{ kg/m}^3$ . La figure III.19 présente le traçage de la courbe de référence et le tableau III.15 présente les résultats des calculs relatifs à cette étude.

Dans cette étude, la méthode Dreux-Gorisse a été utilisée avec un rapport eau/ciment fixe de 0.5. Le ciment a été partiellement remplacé par du caoutchouc dans des proportions de 2 % et 4 %, tandis que le sable a été remplacé par du plastique dans des proportions de 2 %, 4 % et 6 %. Le processus de préparation impliquait de mettre séquentiellement (gravier 8/15, gravier 3/8, sable, granulats plastiques et poudre de caoutchouc) dans le mélangeur. Pour assurer une dispersion uniforme des granulats de caoutchouc et de plastique dans les composants du béton, un mélange à sec a été effectuée pendant trois minutes. Ensuite, du ciment a été introduit dans le mélange, suivi d'une minute supplémentaire de malaxage. De l'eau a ensuite été ajoutée et les composants ont été mélangés jusqu'à homogénéité pendant deux minutes. Les compositions des différents mélanges étudiés sont détaillées dans le tableau III.16, et tableau III.17. Après mélange, les éprouvettes ont été placées dans des moules à une température de  $20^\circ\text{C}$  pendant 24 heures. Les échantillons ont été retirés des moules après cette période et stockés dans l'eau jusqu'aux tests. Les moules utilisés avaient des dimensions de  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  et  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ .

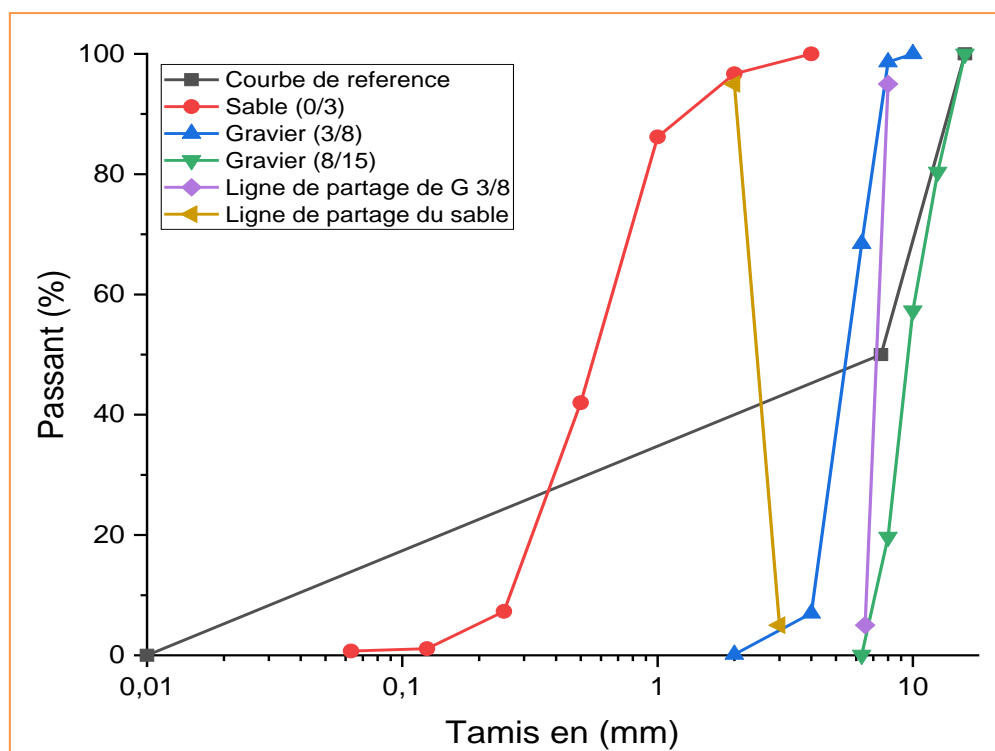


Figure III.19 : Tracé de la courbe de référence.

Tableau III.15 : Composition du béton.

G/S	E/C	V granulats	V sable	V gravillon
<b>1.2</b>	<b>0.5</b>	<b>632.0</b>	<b>290.71</b>	<b>341.26</b>
Composant	(%)	V absolue (L)	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	Composition (kg)
<b>Gravier 8/15</b>	41%	259.11	2.66	<b>689</b>
<b>Gravier 3/8</b>	13%	82.16	2.66	<b>219</b>
<b>Sable 0/3</b>	46%	290.71	2.55	<b>741</b>
<b>Ciment</b>	/	129.03	3.10	<b>400</b>
<b>Eau</b>	/	219	1	<b>219</b>
<b>Total</b>	100%	980	/	<b>2268</b>

**Tableau III.16.** Quantité du béton (kg/m<sup>3</sup>) dans un 1 m<sup>3</sup> pour fine de caoutchouc.

Les mélanges	BO	BC 2%	BC 4%	BC 6%	BC 8%
Ciment	400	392	384	376	368
Sable	741	741	741	741	741
G3/8	219	219	219	219	219
G8/15	689	689	689	689	689
Eau	219	219	219	219	219
Caoutchouc	0	8	16	24	32

**Tableau III.17.** Quantité du béton (kg/m<sup>3</sup>) dans un 1 m<sup>3</sup> pour fine de caoutchouc sable de plastique forex.

Les mélanges	BO	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<b>Ciment</b>	400	392	392	392	384	384	384
<b>Sable</b>	741	726.18	711.36	681.72	726.18	711.36	681.72
<b>G3/8</b>	219	219	219	219	219	219	219
<b>G8/15</b>	689	689	689	689	689	689	689
<b>Eau</b>	219	219	219	219	219	219	219
<b>Caoutchouc</b>	0	8	8	8	16	16	16
<b>Plastique</b>	0	14.82	29.64	59.28	14.82	29.64	59.28
<b>E/C</b>	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
<b>G/S</b>	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

**Tableau III.18.** Quantité du béton (kg/m<sup>3</sup>) dans un 1 m<sup>3</sup> pour fine de caoutchouc et sable de plastique faux plafond.

Les mélanges	BO	BA	BB	BC	BD	BE	BF
<b>Ciment</b>	400	392	392	392	384	384	384
<b>Sable</b>	741	726.18	711.36	681.72	726.18	711.36	681.72
<b>G3/8</b>	219	219	219	219	219	219	219
<b>G8/15</b>	689	689	689	689	689	689	689
<b>Eau</b>	219	219	219	219	219	219	219
<b>Caoutchouc</b>	0	8	8	8	16	16	16
<b>Plastique</b>	0	14.82	29.64	59.28	14.82	29.64	59.28
<b>E/C</b>	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
<b>G/S</b>	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

**III.4.2 Confection des éprouvettes :**

Conformément à la norme NA 2600 [112], et pour les besoins de notre étude et selon la nature de l'essai à réaliser. Le malaxage a été exécuté à l'aide d'un malaxeur normalisé.



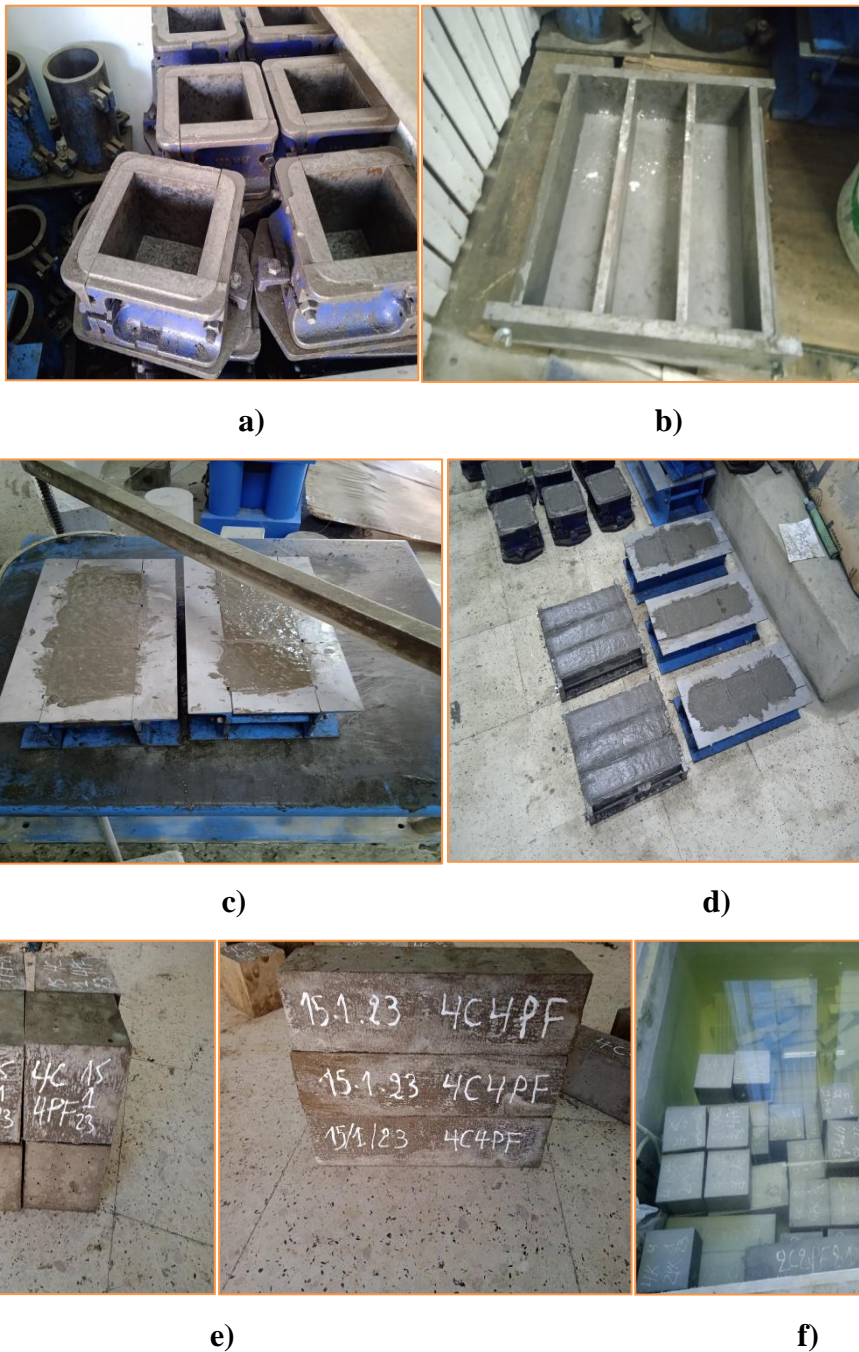
**Figure III.20 :** Malaxeur de béton.

**Tableau III.18 :** Noms des mélanges utilisés.

Les abréviations	Les bétons
<b>B0</b>	Béton ordinaire
<b>BC 2%</b>	Béton contenant 2% de caoutchouc
<b>BC 4%</b>	Béton contenant 4% de caoutchouc
<b>BC 6%</b>	Béton contenant 6% de caoutchouc
<b>BC 8%</b>	Béton contenant 8% de caoutchouc
<b>B1</b>	Béton contenant 2 % de caoutchouc et 2 % de plastique forex
<b>B2</b>	Béton contenant 2 % de caoutchouc et 4 % de plastique forex
<b>B3</b>	Béton contenant 2 % de caoutchouc et 6 % de plastique forex
<b>B4</b>	Béton contenant 4 % de caoutchouc et 2 % de plastique forex
<b>B5</b>	Béton contenant 4% de caoutchouc et 4 % de plastique forex
<b>B6</b>	Béton contenant 4 % de caoutchouc et 6 % de plastique forex
<b>BA</b>	Béton contenant 2 % de caoutchouc et 2 % de plastique faux plafond
<b>BB</b>	Béton contenant 2 % de caoutchouc et 4 % de plastique faux plafond
<b>BC</b>	Béton contenant 2 % de caoutchouc et 6 % de plastique faux plafond
<b>BD</b>	Béton contenant 4 % de caoutchouc et 2 % de plastique faux plafond
<b>BE</b>	Béton contenant 4 % de caoutchouc et 4 % de plastique faux plafond
<b>BF</b>	Béton contenant 4 % de caoutchouc et 6 % de plastique faux plafond

**III.4.3 Moulage et démoulage :**

Après l'opération de malaxage, le béton est introduit dans des moules préalablement graissés par de l'huile et démoulé après 24 heures de leur coulage. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai.



**Figure III.21** Les étapes de fabrication des éprouvettes.

### **III.5 Présentation des essais :**

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés de béton témoin et des bétons modifiés par des fines de caoutchouc et sable de plastique forex et faux plafond.

#### **III.5.1 Essais effectués sur le béton frais :**

##### **III.5.1.1 Air occlus :**

Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme **NFP18-583 [113]**. L'essai a été réalisé à l'aide d'un aéromètre, qui indique directement le pourcentage de la teneur en air occlus.



**Figure III.22 :** Appareil d'un aéromètre.

##### **III.5.1.2 Masse volumique :**

Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme **NA -436 [114]**. L'essai de la masse volumique est un essai réalisé sur le béton frais. Cet essai consiste à remplir un récipient de volume  $V$  ( $m^3$ ) et de masse  $M$  (kg) d'un échantillon de béton frais en trois couches tassées par vibration 30 secondes et ensuite laisser la surface du béton à l'aide d'une régale. En pesant le récipient, on calcule la masse volumique selon la formule suivante :

$$D = (M - M_0) / V \text{ (Kg/m}^3\text{)}.$$

**D:** la masse volumique en ( $Kg/m^3$ ).

**M:** la masse du récipient plein en **Kg**.

**M<sub>0</sub>:** la masse de récipient vide en **Kg**.

**V :** volume de récipient en  $m^3$ .



**Figure III.23 :** La masse volumique du béton frais.

### **III.5.1.3 Ouvrabilité :**

Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme **NF P18-451 [115]**. Pour réaliser cet essai, une plaque et un cône d'Abrams sont utilisés : Le cône légèrement huilé est rempli de béton en trois couches ; chaque couche est piquée par 25 coups de façon répartie jusqu'à la couche sous-jacente s'il y a lieu. Le cône est arasé en faisant rouler la tige de piquage. Le cône de béton est démoulé. Le béton s'affaisse selon sa consistance. L'affaissement du béton est mesuré en cm à l'aide du réglage sur portique. Cet affaissement est la hauteur entre le haut du cône et le point le plus haut du béton affaissé.



**Figure III.24 :** L'affaissement au cône d'Abrams.

### III.5.2 Essais effectués sur le béton durci :

#### III.5.2.1 Masse volumique à l'état sec

La masse volumique du béton durci est déterminée pour les différents bétons confectionnés, conformément à la norme européenne **NF EN 12390-7 [116]**. 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  $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$  ayant subit une cure dans l'eau pendant 28 jours.

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



Figure III.25 : Masse volumique sec.

#### III.5.2.2 Essai de compression :

Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme **NF EN 12390-3 [117]**.

Elle la mesure par presse hydraulique. On applique une charge croissante sur des éprouvettes jusqu'à la rupture et ensuite, on lit le résultat. La résistance à la compression : elle est la force sur la surface de l'éprouvette. On calcule la résistance à la compression par la relation :  $R_c = \frac{F}{S}$

**R<sub>c</sub>** : résistance à la compression (MPa).

**F** : la charge de rupture (N).

**S** : section de l'éprouvette ( $\text{mm}^2$ ).



Figure III.26 : Presse de la résistance à la compression.

### III.5.2.3 Essai de traction par flexion:

L'essai doit être réalisé au moyen d'une machine d'essais conforme à la norme **NF EN 12390-4**, [118] sur des éprouvettes 7 x 7 x 28 cm en centrant les éprouvettes sur une machine de flexion et ensuite application d'une charge jusqu'au moment de la rupture et on obtient la résistance de traction par flexion. La résistance en traction par flexion est donnée par

l'équation suivante :  $F_{cj} = \frac{3(F.L)}{2(d_1.d_2^2)}$  Où :

$F_{cj}$ : est la résistance en traction par flexion, en méga pascals (newtons par millimètre carré).

$F$  : est la charge maximale, en newtons.

$L$  : est l'écartement entre les rouleaux d'appui, en millimètres.

$d_1$  et  $d_2$  : sont les dimensions latérales de l'éprouvette, en millimètres.



Figure III.27 : a) Machine de traction par flexion. b) Les éprouvettes après décrassement.

### III.5.2.4 Essai d'ultrason :

Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme **NF EN 12504-4 [119]**. Est une méthode de détermination de la vitesse du son dans le béton durci. Elle consiste à mesurer le temps de propagation des ondes ultrasons à travers une épaisseur d'un béton et est donnée par la formule suivante :

$V=L/T$  avec :

**V**: la vitesse de propagation du son en (Km/s).

**L**: la distance de parcours en (mm).

**T**: le temps de propagation en (s).



Figure III.28 : Appareil d'ultrason.

### III.5.2.5 Essai absorption d'eau par capillarité :

Cet essai a été effectuée aux prescriptions de la norme **NF P 18-404 [120]**, l'essai absorption deau par capillarité pour determiner labsorption deau par la capillarité ,après démoulage les éprouvettes sont conservées jusqu'a lage 28 j dans leau ,ensuit extraites de deau et conservées dans une étuve a 70 C° pendant 24 h, les surfaces des éprouvettes en dessous du niveau de leau ont été protégées par un papier d'aluminium ou par une paraffine pour obtenir un écoulement unidirectionnel , le niveau deau dans la cuve est maintenu a environ 3 mm au dessus du fond de léprouvettes , le temps du coefficient dabsorption capillaire sont calculées pour les échéances suivantes :

[ 0 masse initiale-10 min-15 min-30 min-45 min-1 h-24 h], le coefficient d'absorption capillaire (C) exprimé en (kg/m<sup>2</sup>) est calculé par relation suivante :  $C = \frac{M_t - M_i}{A}$

**M<sub>i</sub>**: la masse initiale.

**M<sub>t</sub>**: la masse mesurée suivant le temps.

**A**: la surface en contact avec l'eau en mm<sup>2</sup> respectivement.



**Figure III.29** : Essai absorption d'eau par capillarité.

### **III.5.2.6 Porosité accessible à l'eau :**

Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme **NF EN 18-459 [121]**. L'essai de porosité accessible à l'eau permet la mesure de la porosité par pesée hydrostatique. Après conservation des éprouvettes (10 x 10 x 10) cm<sup>3</sup> dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours et en utilisant une balance hydrostatique, soit :

-**M<sub>eau</sub>**: la masse de l'éprouvette immergée dans l'eau.

-**M<sub>air</sub>**: la masse de l'éprouvette dans l'air alors qu'il est encore imbibé (masse saturée dans l'air).

-**M<sub>sec</sub>**: la masse de l'éprouvette après séchage à une température 105C jusqu'à masse constante.

### **Expression des résultats de la porosité du béton :**

La porosité accessible à l'eau  $\epsilon$ , exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100.$$



Figure III.30 : Essai de porosité par pesée hydrostatique.

### III.5.2.7 Essai d'absorption d'eau par immersion total :

L'essai d'absorption d'eau par immersion total est déterminée selon la norme **NBN B 15- 215 :1989, [122]** est utilisé pour mesurer la porosité du béton et sa capacité à absorber l'eau. Pour effectuer cet essai, un échantillon de béton est pesé et plongé complètement dans l'eau pendant une période de 24 heures à une température de 20°C. Une fois la période d'immersion terminée, l'échantillon est retiré de l'eau, séché et pesé à nouveau. La différence entre le poids initial et le poids final représente la quantité d'eau absorbée par le béton.

**Absorption d'eau (%) = [(M2-M1) / M1] x 100** où:

- **M1** : est la masse initiale de l'échantillon de béton sec.
- **M2** : est la masse de l'échantillon de béton saturé d'eau après immersion totale dans l'eau pendant une période spécifique.



**Figure III.31 :** Essai absorption d'eau par immersion total.

### III.5.2.8 Essai d'attaques chimiques : ASTM C267-96 [123]

Après 24 h de démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à 28 jours. Les éprouvettes de béton de  $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$  ont été pesées pour déterminer la masse ( $M_1$ ) avant d'être soumises à l'immersion durant 7, 14, 28, et 60 jours dans des différents types de solutions d'attaque :

- Une solution d'acide sulfurique  $\text{H}_2 \text{SO}_4$  concentrée à 5 %.
- Une solution de nitrate d'ammonium  $\text{NH}_4 \text{NO}_3$  concentrée à 5 %.
- Une solution de chlorure de calcium  $\text{NaCl}$  concentrée à 5 %.

Les solutions d'attaques ont été renouvelées chaque 14 jour. La perte en masse est calculée par la relation suivante :

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

$M_1$  : la masse initiale en (g) avant immersion dans le milieu agressif.

$M_2$  : la masse en (g) après sortir dans le milieu agressif.

Les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau pour éliminer le béton altéré. Après une demi-heure, une pesée est enregistrée.



Figure III.32 : Solution nitrate d'ammonium avec des éprouvettes.



Figure III.33 : Solution acide sulfurique avec des éprouvettes.



Figure III.34 : Appareil de Ph mètre.

**III.5.2.9 Essai diffraction des rayons x :**

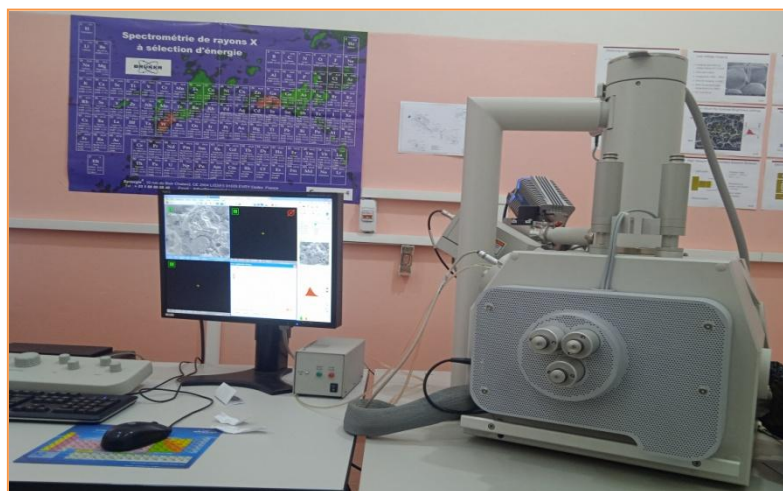
Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme **NF EN 15305 [124]**. L'essai de diffraction des rayons X est une technique utilisée en science des matériaux pour déterminer la structure cristalline d'un matériau.



**Figure III.35 :** Appareil de DRX.

**III.5.2.10 Analyse microstructurale :**

La microscopie électronique à balayage est une technique d'imagerie qui utilise un faisceau d'électrons pour visualiser des échantillons à très petite échelle.



**Figure III.36:** Appareil de MEB QUANTA 650.

### **III.6. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés et les essais réalisés.

- Les essais sur les matériaux, pour déterminer les propriétés physiques des matériaux qui sont de la masse volumique apparente, absolue et des analyses granulométriques.
- Les essais sur le béton, les essais à l'état frais comme : l'affaissement, la densité fraîche et l'air occlus .Les essais à l'état durci comme : la densité durcie, la résistance à la compression, la résistance de flexion, la vitesse ultrason et les essais de durabilité.
- Les essais de la microstructure comme DRX, MEB, et EDX.

---

---

## **CHAPITRE IV RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSES**

---

---

## CHAPITRE IV

### Propriétés physiques et mécaniques de béton contenant des fines de caoutchouc

#### IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on a essayé de comprendre l'influence de caoutchouc sur les propriétés de béton. Et pour atteindre cet objectif, nous avons étudié les propriétés du béton à base de déchets de caoutchouc à l'état frais et à l'état durci, et présenter l'ensemble des résultats trouvés et leurs interprétations.

#### IV.2. Résultats et interprétation :

##### IV. 2.1. A l'état frais :

##### IV.2.1.1 Essai d'affaissement :

Les résultats des essais d'affaissement sont présentés dans le tableau IV.1, et la figure IV.1.

**Tableau IV.1** : Valeurs de l'affaissement du béton à base des déchets de caoutchouc.

	Désignation des bétons				
Les bétons	BO	BC 2%	BC 4%	BC 6%	BC 8%
L'affaissement (cm)	8	8.5	9	10	14.5

La figure IV.1 montre l'évolution de l'ouvrabilité du béton en fonction des pourcentages de caoutchouc, à travers la figure IV.1, on constate une interaction non linéaire entre le pourcentage de substitution en caoutchouc et l'augmentation de l'ouvrabilité du béton, cette constatation est due à l'aspect rhéologique du caoutchouc qui favorise le glissement de particules fines en augmentant l'ouvrabilité. Avec un taux de substitution de 6 à 8 %, l'ouvrabilité augmente d'une façon très significative, Ces résultats sont en accords avec ceux obtenus par certains auteurs [125-126].

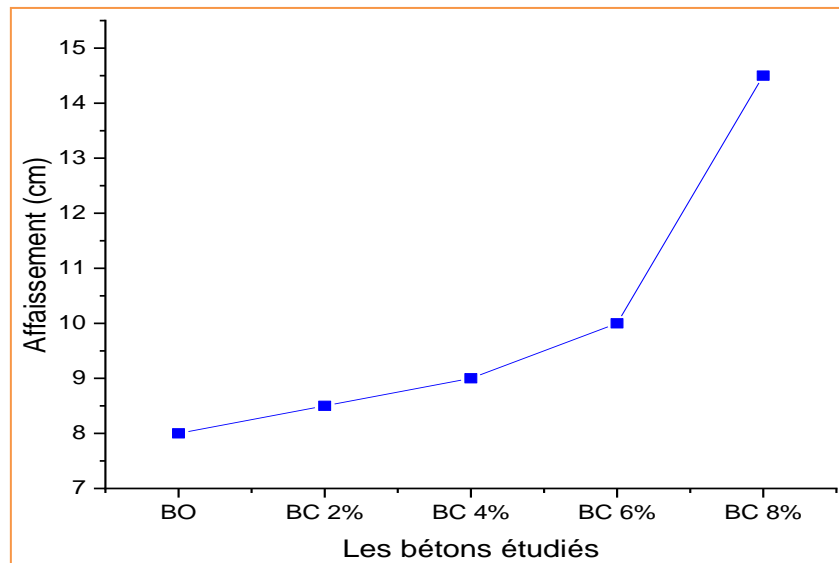


Figure IV.1 : Variation de l’affaissement en fonction du pourcentage de caoutchouc.

IV.2.1.2 Masse volumique à l’état frais :

Les résultats de la masse volumique à l’état frais sont présentés dans le tableau IV.2 et la figure IV.2

Tableau IV.2 : Masses volumiques à l’état frais des bétons étudiés.

Désignation des bétons					
Les bétons	BO	BC 2%	BC 4%	BC 6%	BC 8%
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2380	2330	2310	2250	2200

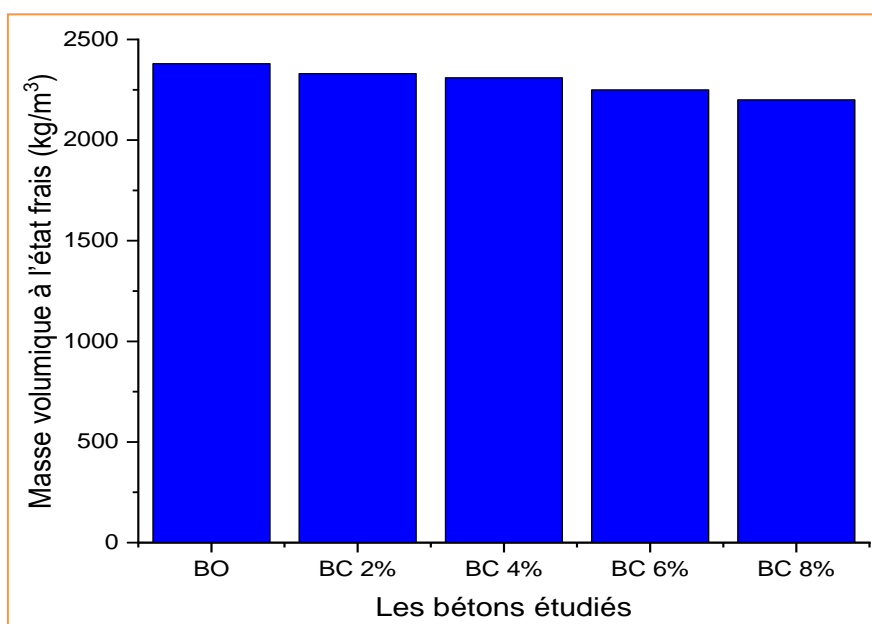


Figure IV.2 : Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution.

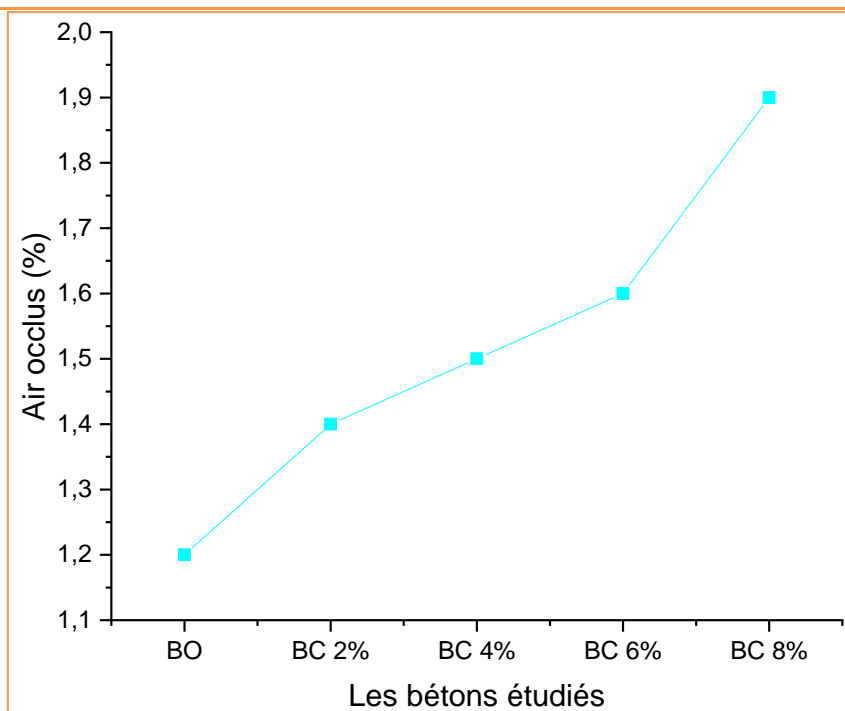
La figure IV.2, montre les changements de la masse volumique frais en fonction des taux de substitution de caoutchouc, on remarque que les masses volumiques des bétons de caoutchouc (BC2 %, BC4 %, BC6 % et BC8 %) diminuent avec l’augmentation des pourcentages de caoutchouc, la masse volumique plus élevée observée est de 2380 kg/m<sup>3</sup> pour le béton ordinaire (BO), et la masse volumique plus faible observée est de 2200 kg/m<sup>3</sup> pour le béton contenant 8 % de caoutchouc. Cette diminution est due au fait que la densité des granulats de caoutchouc est beaucoup plus légère par rapport à la densité de ciment. Ces résultats sont en accords avec ceux obtenus par certains auteurs [127-128].

**IV.2.1.3 Teneur en air occlus :**

Les résultats de l’air occlus sont présentés dans le tableau IV.3 et la figure IV.3.

**Tableau IV.3 :** Valeurs de l’air occlus pour les cinq formulations de bétons.

Désignation des bétons					
Les bétons	BO	BC 2%	BC 4%	BC 6%	BC 8%
Air occlus (%)	1.2	1.4	1.5	1.6	1.9



**Figure IV.3 :** Valeurs de l’air occlus en fonction du taux de substitution.

La figure IV.3, illustre l’évolution de l’air occlus en fonction du taux de substitution de caoutchouc, on remarque que les pourcentages de l’air occlus augmentent avec l’augmentation des pourcentages de caoutchouc. Cette augmentation est due à la faible liaison

entre les poudres de caoutchouc et la pâte cimentaire qui entraine les vides entre des particules, donc l'air occlus augmente, ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par certains auteurs [129-130].

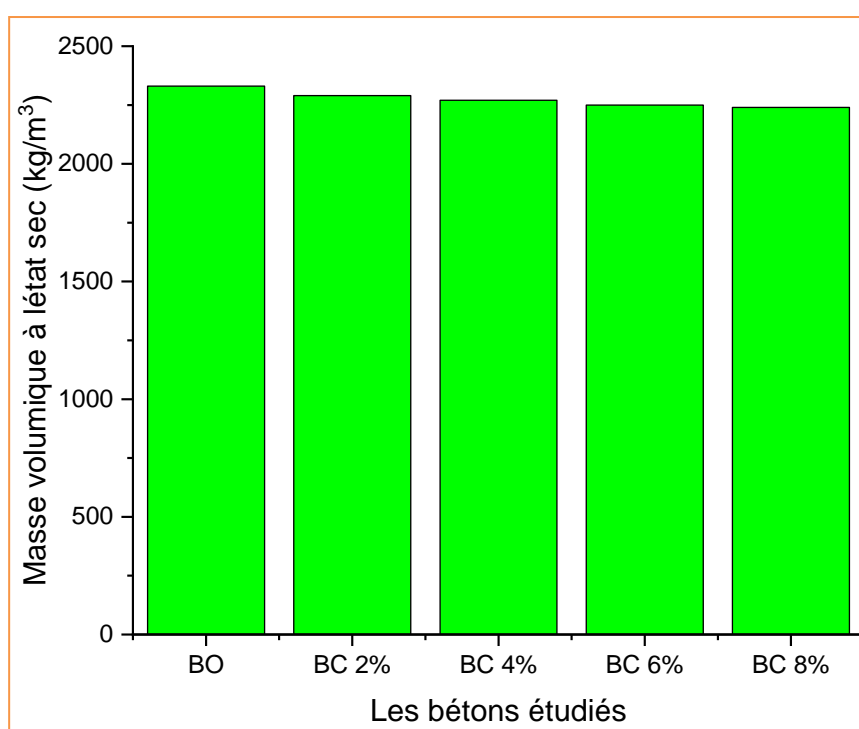
**IV.2.2 A l'état durci :**

**IV.2.2.1 Masse volumique à l'état sec :**

Dans le tableau IV.4 et la figure IV.4 nous avons reporté les résultats des mesures de la masse volumique à sec pour les cinq formulations de bétons d'étude.

**Tableau IV.4 :** Valeurs de la masse volumique à sec pour les cinq formulations des bétons.

Désignation des bétons					
Les bétons	BO	BC 2%	BC 4%	BC 6%	BC 8%
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2330	2290	2270	2250	2240



**Figure IV.4 :** Valeurs de la masse volumique en fonction des pourcentages de caoutchouc.

La figure IV.4, montre l'évolution de la masse volumique a l'état sec en fonction des taux de substitution de caoutchouc, on remarque que les masses volumiques à l'état durci diminuent avec l'augmentation des pourcentages de caoutchouc, les masses volumiques diminuent de

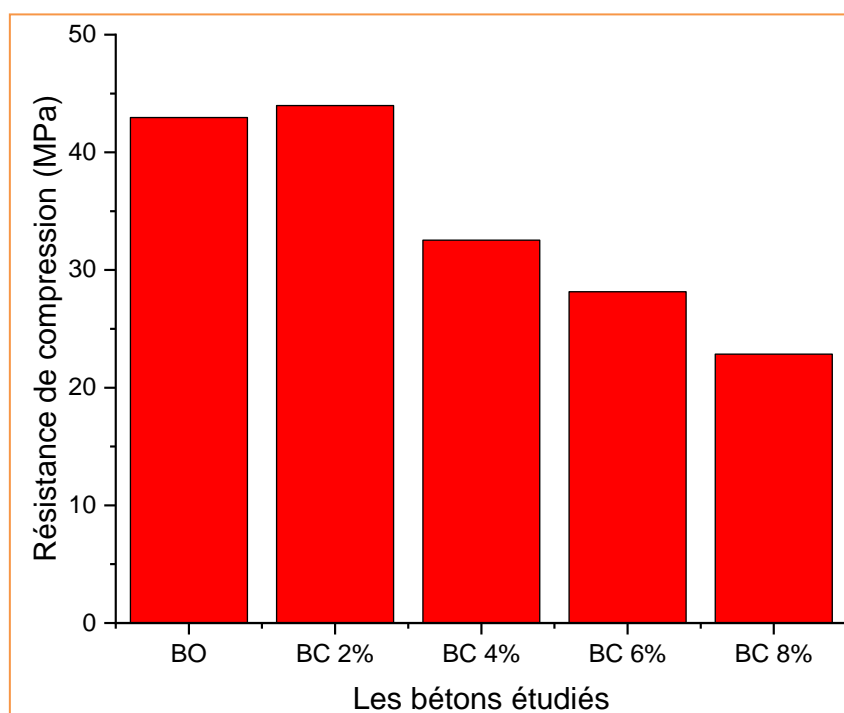
3.78%, 4.62%, 5.46%, et 5.88% pour un béton BC 2%, BC 4%, BC 6%, et BC 8%, respectivement. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par certains auteurs [131-132].

**IV.2.2.2 Résistance à la compression à 28 jours :**

Les valeurs de la résistance à la compression à 28 jours sont présentées dans le tableau IV.5 et la figure IV.5.

**Tableau IV.5 :** Résistances à la compression pour les cinq formulations.

Désignation des bétons					
Les bétons	BO	BC 2%	BC 4%	BC 6%	BC 8%
Résistance à la compression en (MPa)	42.96	43.97	32.54	28.15	22.85



**Figure IV.5 :** Résistances en compression des bétons.

Figure IV.5, Montre les valeurs de la résistance à la compression des bétons étudiés en fonction des taux de substitution du caoutchouc. La valeur maximale de résistance à la compression est de 43.97 MPa pour le béton contenant 2 % de caoutchouc par rapport au béton ordinaire ; après ce pourcentage, la résistance à la compression diminue jusqu’à 22.85 MPa pour le béton contenant 8 % de caoutchouc. Cette baisse de la résistance à la compression peut être attribuée à la faible cohésion entre les déchets de caoutchouc et le

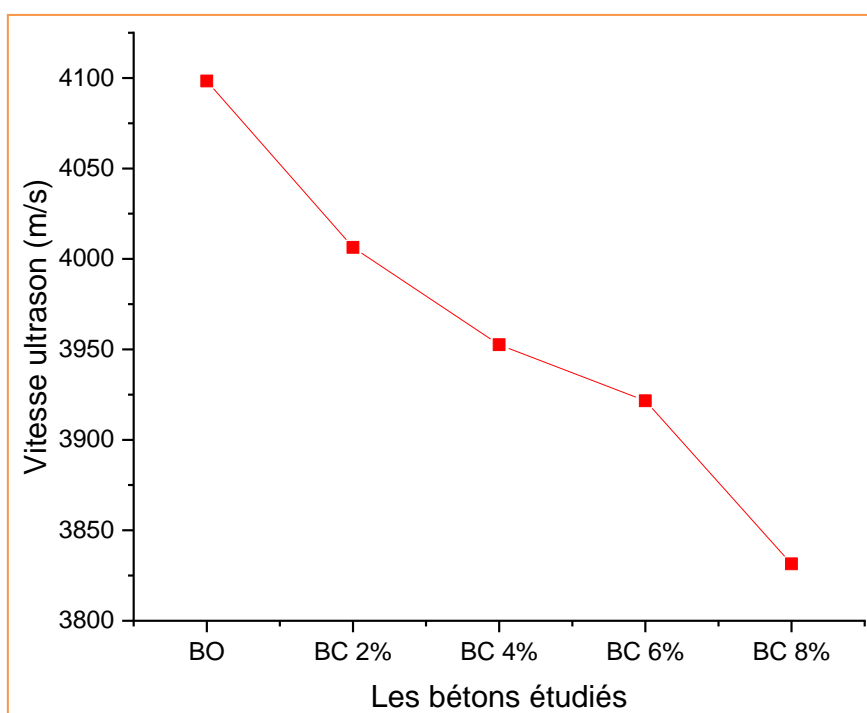
ciment, d'autre part le caoutchouc a faible rigidité par rapport aux granulats naturels. Ces résultats sont en accords avec ceux obtenus par certains auteurs [133-134], et d'autres auteurs montre que la résistance à la compression démunie si le pourcentage de caoutchouc dépasser 10% à 20% [135].

**IV.2.2.3 Vitesse ultrasonique à 28 jours :**

Les résultats des essais de vitesse ultrasonique sont présentés dans la figure IV.6, et tableau IV.6.

**Tableau IV.6 :** Vitesse ultrasonique pour les cinq bétons étudiés.

Désignation des bétons					
Les bétons	BO	BC 2%	BC 4%	BC 6%	BC 8%
Vitesse ultrasonique (m/s)	4098.36	4006.41	3952.57	3921.57	3831.42



**Figure IV.6 :** Vitesse ultrasonique des bétons.

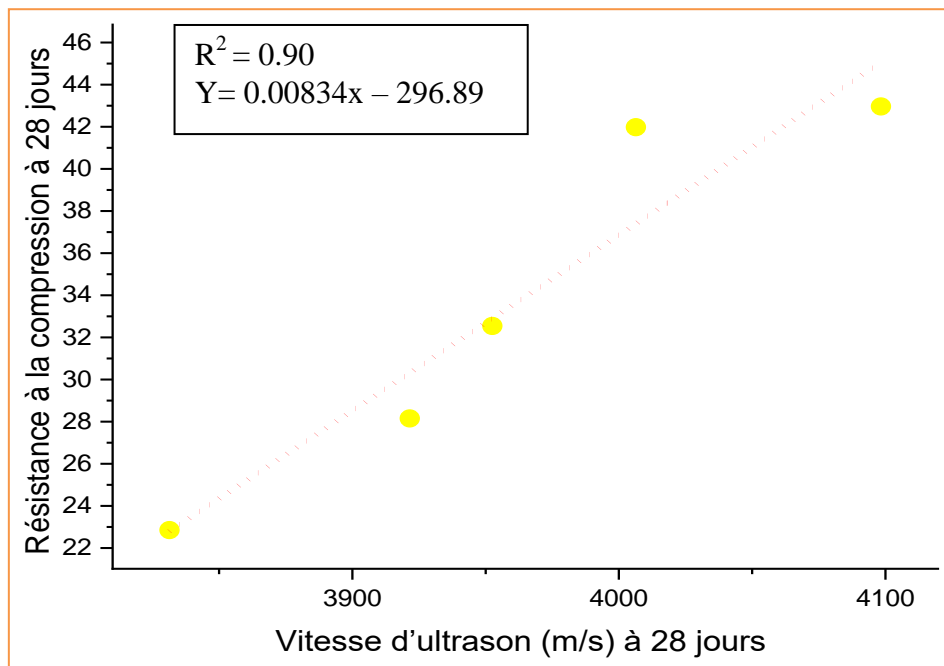
La figure IV.6, montre l'évolution de vitesse d'impulsion ultrasonique (VMU) des bétons étudiés (B0, BC 2 %, BC 4 %, BC 4 %, BC 6 % et BC 8 %) en fonction des taux de substitution de caoutchouc. À chaque fois qu'on augmente le pourcentage de caoutchouc, on enregistre une chute de vitesse ultrasonique. La chute de la vitesse de propagation des ondes

ultrasoniques est expliquée par une plus grande teneur en eau et en air présente dans les composites, qui entraîne une augmentation du temps des ondes ultrasoniques. Cette augmentation réduit la vitesse de propagation. Ces résultats sont en accords avec ceux obtenus par certains auteurs [136-137], ont démontré que la vitesse d'impulsion ultrasonore avec le temps, diminuait avec l'augmentation de la quantité de caoutchouc.

**IV2.2.4 Relation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrason à 28 jours :**

Les résultats entre la résistance à la compression et la vitesse d'ultrason sont présentés dans la figure IV.7.

Comme on peut le voir sur la figure IV.7, il y a un bon coefficient de corrélation,  $R^2 = 0.90$ , qui est proche de 1. Cela montre une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion des ultrasons, ce qui indique que la poudre de caoutchouc a une grande influence sur la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion des ultrasons [138].



**Figure IV.7 :** Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrason.

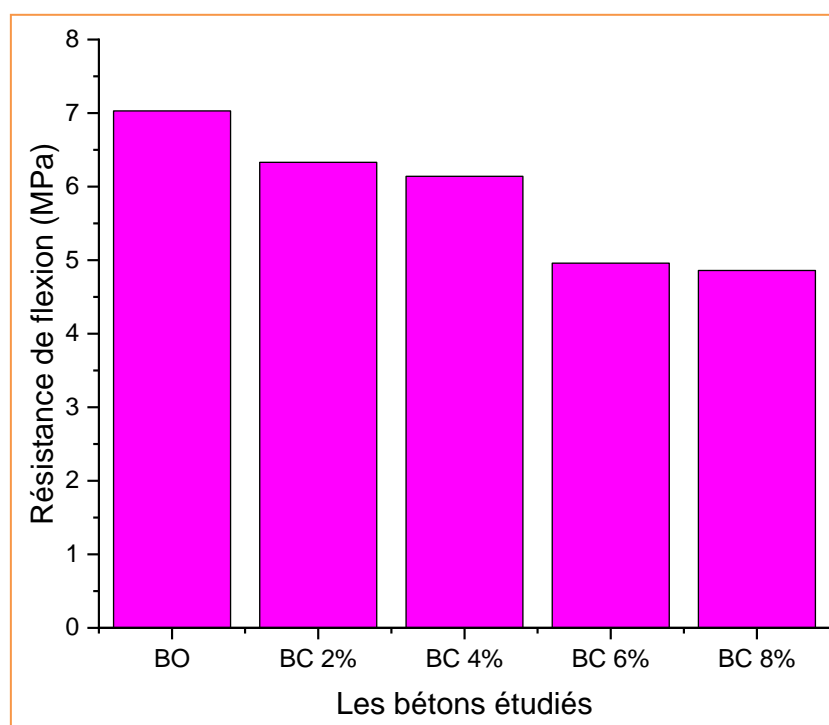
**IV.2.2.5 Résistance à la traction par flexion à 28 jours :**

Les résultats de la résistance à la traction par flexion à l'âge de 28 jours sont présentés dans le tableau IV.7 et la figure IV.8 suivants :

**Tableau IV.7 :** Résistances de traction par flexion pour les cinq formulations.

Désignation des bétons					
Les bétons	BO	BC 2%	BC 4%	BC 6%	BC 8%
Résistance à la traction par flexion en (MPa)	7.03	6.33	6.14	4.96	4.86

La figure IV.8, montre l'évolution de la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution de caoutchouc, on remarque que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation des pourcentages de caoutchouc. La résistance à la flexion diminue de 7.03 à 4.86 MPa de 31 %, pour un béton B0 et BC 8 %, respectivement. Ces résultats sont en accords avec recherche précédente [139-140].



**Figure IV.8 :** Résistances à la traction par flexion des bétons.

**IV.2.2.6 Relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression à 28 jours :**

La figure IV.9, montre qu'il existe une bonne relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression, avec un coefficient de corrélation  $R^2$  égal à 0.86 qui est proche de 1. Cela indique que la poudre de caoutchouc a une grande influence sur la résistance à la flexion et à la compression [138].

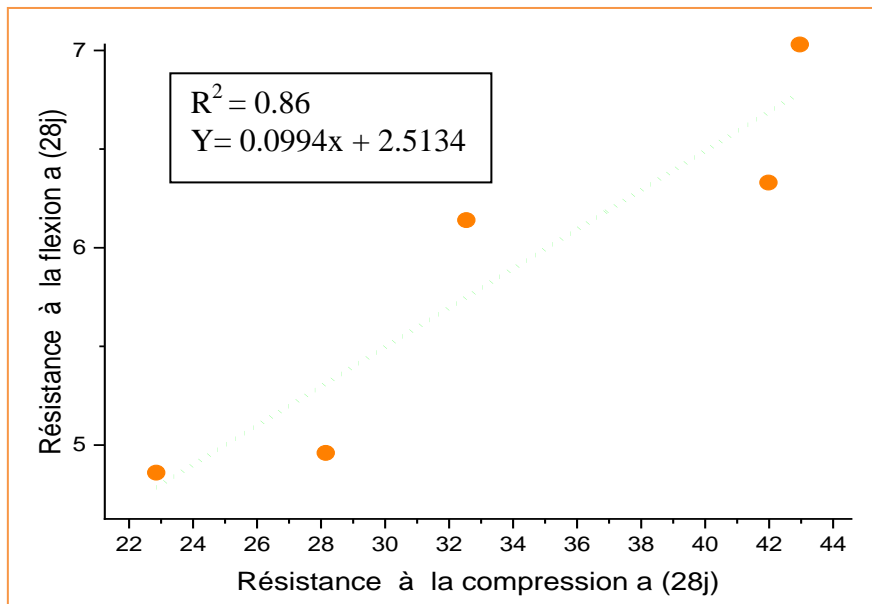


Figure IV.9 : Corrélation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression.

### IV.3 Conclusion :

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus dans l'étude actuelle du béton contenant des déchets de caoutchouc dans les proportions de 0 %, 2 %, 4 %, 6 % et 8 %, les conclusions suivantes ont été tirées :

- L'ouvrabilité et la teneur en air du béton augmentent avec l'augmentation des niveaux des fines de caoutchouc. Le remplacement partiel du ciment par des fines de caoutchouc à 2 %, 4 %, 6 % et 8 % a conduit à une diminution de la densité fraîche de 2.10 %, 2.94 %, 5.46 % et 7.56 %, respectivement, par rapport au béton de référence.
- L'utilisation des fines de caoutchouc dans le béton diminue la résistance à la compression avec une augmentation de la quantité de caoutchouc, la diminution de la résistance à la compression est de 47 % pour le béton contenant 8 % de caoutchouc par rapport au béton de référence.
- La résistance à la flexion diminue de 10 %, 13 %, 29.44 % et 30.86 % pour des niveaux de remplacement des fines de caoutchouc de 2 %, 4 %, 6 % et 8 %, respectivement, par rapport au béton de référence.
- À mesure que le taux de remplacement des fines de caoutchouc dans le béton augmente, la vitesse d'impulsion ultrasonore diminue de 2.24 %, 3.55 %, 4.31 % et 6.51 % pour des niveaux de remplacement des fines de caoutchouc de 2 %, 4 %, 6 % et 8 %, respectivement, par rapport au béton de référence.
- L'ajout de 2 % des fines de caoutchouc au béton lui a conféré une bonne résistance, supérieure à la résistance normale du béton.

## **CHAPITRE V**

# PERFORMANCE DU BETON A BASE DU FINE DE CAOUTCHOUC, SABLE DE PLASTIQUE FOREX, ET FAUX PLAFOND

### **V.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous avons choisi les bétons qui présentent des meilleures résistances à la compression étudiées dans le chapitre précédent où le caoutchouc était de pourcentage de 2 % et 4 %, et on fait la substitution de plastique dans le sable avec des pourcentages de 2 %, 4 % et 6 % afin d'obtenir un béton avec deux déchets (caoutchouc substitué dans le ciment et plastique substitué dans le sable).

Ce chapitre est divisé en deux parties : la partie A présente les propriétés physiques, et mécaniques du béton à base de caoutchouc et de plastique de type PVC forex, et la partie B, qui étudie les mêmes propriétés des bétons à base de caoutchouc et de plastique de type faux plafond.

### **Partie A : Propriétés du béton à base de la fine de caoutchouc et sable de plastique forex**

Dans cette recherche, le sable a été partiellement remplacé par du plastic forex dans des proportions de 2 %, 4 % et 6 %, et le ciment a été partiellement remplacé par du caoutchouc dans des proportions de 2 % et 4 %.

Les abréviations des mélanges des bétons B0, B1, B2, B3, B4, B5, B6 utilisés sont présentés dans le tableau III.17.

### **V.2 Résultats et interprétation :**

#### **V.2.1 Propriétés du béton à l'état frais :**

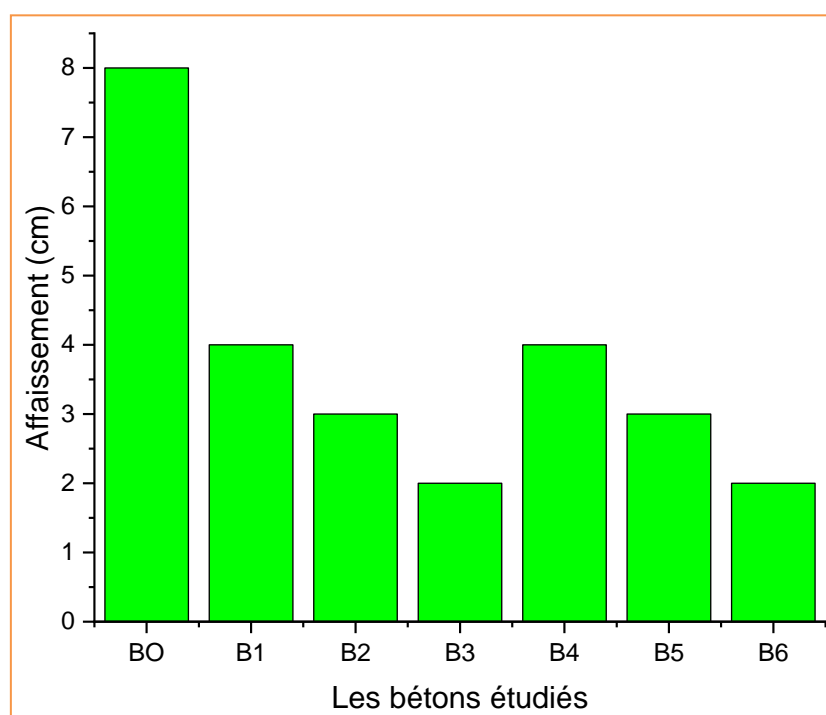
Dans cette section, trois tests sont utilisés : la maniabilité, la masse volumique à l'état frais, et l'air occlus.

### V.2.1.1 Essai d'affaissement :

Le tableau V.1 et la figure V.1 montrent les résultats de l'affaissement.

**Tableau V.1 :** Valeurs de l'affaissement pour les bétons étudiés.

Les bétons	L'affaissement (cm)
<b>B0</b>	8
<b>B1</b>	4
<b>B2</b>	3
<b>B3</b>	2
<b>B4</b>	4
<b>B5</b>	3
<b>B6</b>	2



**Figure V.1:** Variation de l'affaissement en fonction des taux de substitution.

Dans la figure V.1, on observe une réduction notable de l'ouvrabilité du béton lorsque des additifs en caoutchouc et en plastique sont augmentés [140-141]. Le béton ordinaire (B0) présente la valeur d'ouvrabilité la plus élevée de 8 cm, par contre, les mélanges du béton B3 et B6, qui ont les pourcentages les plus élevés de ces additifs, présentent les valeurs d'ouvrabilité minimales de 2 cm. Il y a eu une baisse significative de l'ouvrabilité entre les bétons B0 et B1 jusqu'à 50 %. Au-delà de cette valeur, l'ouvrabilité a diminué de valeurs similaires lorsque le niveau de plastique était compris entre 2 % et 4 % et le caoutchouc de 2 %. Les bétons B4 et

B5 présentent la même diminution de 3 cm, lorsque le niveau de plastique était compris entre 2 % et 6 % et le caoutchouc de 4 %, ce qui indique que l'effet du plastique sur l'ouvrabilité est supérieur à l'effet du caoutchouc. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs. Qasim et Jassam (2022) [142] ont indiqué qu'à mesure que le pourcentage de déchets plastiques augmentait de 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 %, la maniabilité diminuait respectivement de 3.9 %, 7.8 %, 11.6 %, 15.5 % et 19.1 %. De plus, Bisht et Raman (2019) [143] ont remarqué que la maniabilité diminuait lorsque le pourcentage de caoutchouc de pneu augmentait. La maniabilité du béton est influencée par la forme des particules de plastique et de caoutchouc. Lorsque les particules possèdent des formes irrégulières et non informes, la valeur d'affaissement diminue [144-145-146]. D'autre part, la raison de la diminution de la maniabilité peut être attribuée à la substitution de certains agrégats par des granulés de PVC, qui ont une forte proportion de particules fines. Cela conduit à une augmentation de la surface totale par rapport au poids, nécessitant une teneur en eau supplémentaire pour envelopper ces particules. Comme le rapport eau/ciment reste constant dans tous les mélanges, le rapport eau/ciment effectif diminue, ce qui entraîne une réduction de la maniabilité [147].

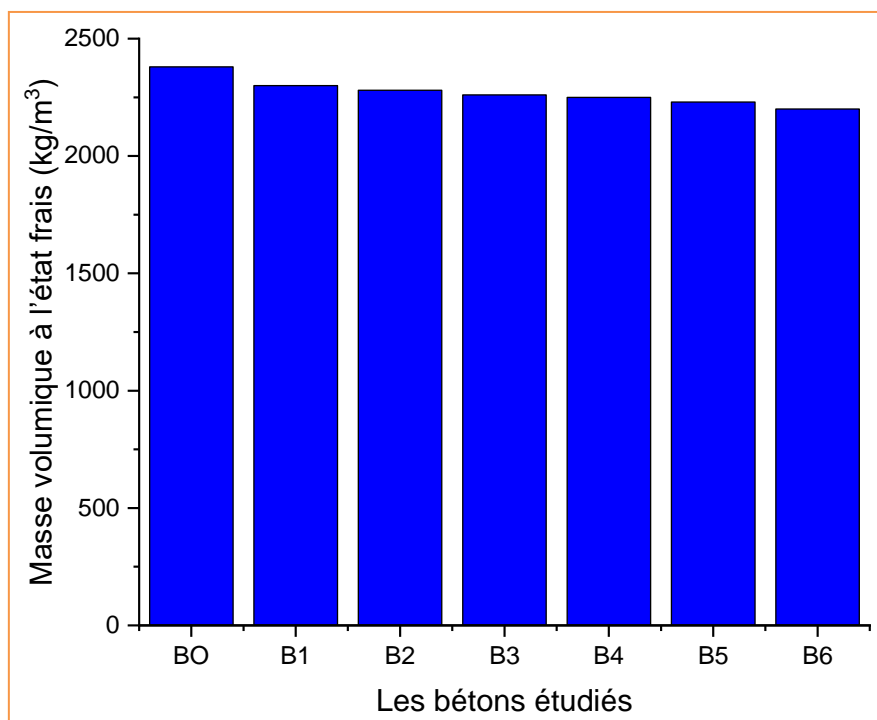
### V.2.1.2 Masse volumique à l'état frais :

Les résultats de masse volumique à l'état frais sont présentés dans le tableau V.2 et la figure V.2.

**Tableau V.2** : Masses volumiques des bétons étudiés.

Les bétons	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
<b>B0</b>	2380
<b>B1</b>	2300
<b>B2</b>	2280
<b>B3</b>	2260
<b>B4</b>	2250
<b>B5</b>	2230
<b>B6</b>	2200

À travers la figure V.2, on constate une diminution de la masse volumique à l'état frais avec l'augmentation des pourcentages de plastique et de caoutchouc par rapport au mélange témoin. La densité diminue de 3.36 %, 4.20 %, 5.04 %, 5.46 %, 7.98 %, et 10.92 % pour un béton B1, B2, B3, B4, B5, et B6, respectivement. Cette réduction peut être attribuée à ce que la densité des granulats de caoutchouc et de plastique est beaucoup plus légère par rapport à la densité des granulats naturels.



**Figure V.2 :** Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution.

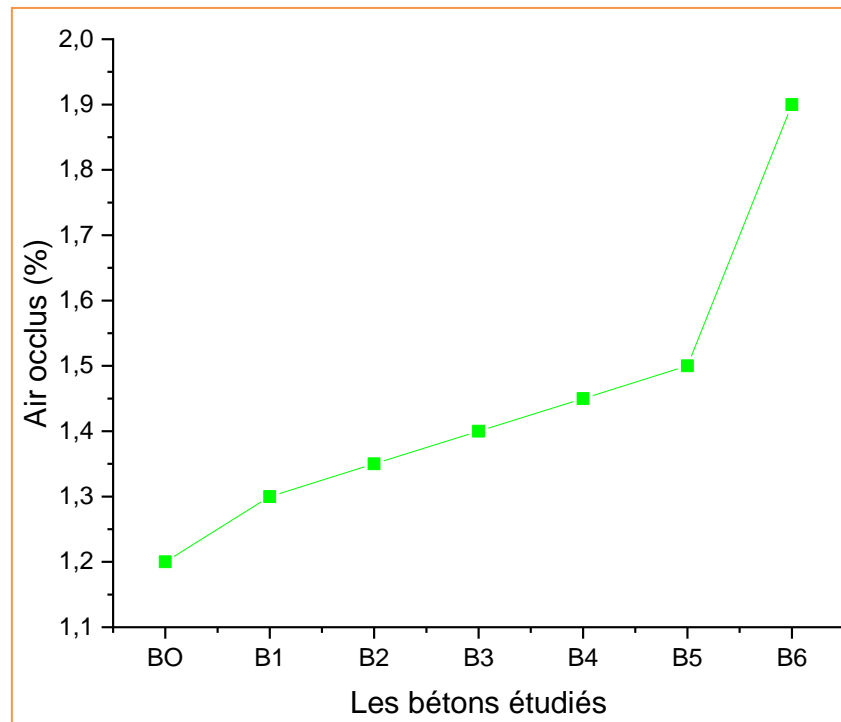
Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs. Ismaïl et Al-Hashmi [148] ont utilisé des déchets plastiques comme agrégat fin dans le béton dans des proportions de 10 %, de 15 % et de 20 %, les résultats indiquant que la densité diminuait respectivement de 5 %, de 7 % et de 8 % par rapport au béton témoin et d'autre part, DJEBIEN et al. [138] ont observé que la masse volumique à l'état frais diminue avec l'augmentation des pourcentages de caoutchouc.

### V.2.1.3 Teneur en air occlus :

Dans le tableau V.3 et la figure V.3, nous avons reporté les résultats des mesures de l'air occlus pour les sept formulations de bétons d'étude.

**Tableau V.3 :** Lair occlus des bétons étudiés.

Les bétons	Air occlus (%)
<b>BO</b>	1.20
<b>B1</b>	1.30
<b>B2</b>	1.35
<b>B3</b>	1.40
<b>B4</b>	1.45
<b>B5</b>	1.50
<b>B6</b>	1.90



**Figure V.3 :** Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution.

D'après la figure précédente, on remarque que l'air occlus augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc et en plastique. Là où l'on remarque qu'entre un béton B5 et un béton B6, l'air occlus augmente d'une façon très significative. La valeur maximale de l'air occlus est de 1,9 % pour un béton B6 et la valeur minimale de l'air occlus est de 1,2 % pour un béton B0. Cette augmentation est due à la faible liaison entre le plastique et le caoutchouc avec le ciment qui crée les vides entre les particules, donc l'air augmente au sein du béton. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs [129-130].

### V.2.2. Propriétés du béton à l'état durci :

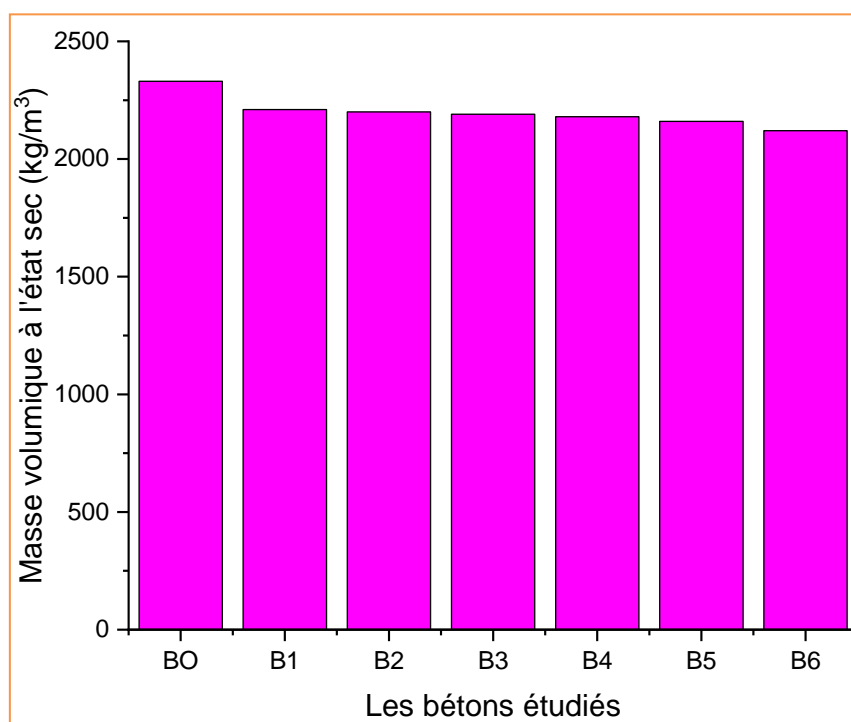
Dans cette section, on va voir ces tests : la densité durcie, les développements des résistances des compressions et des flexions, la vitesse ultrason, relation entre la vitesse ultrason et la résistance de compression, et relation entre vitesse ultrason et la résistance de flexion à 28 jours.

#### V.2.2.1 Masse volumique à l'état sec :

Dans le tableau V.4 et la figure V.4, nous avons reporté les résultats des mesures de la masse volumique à sec pour les sept formulations de bétons d'étude.

**Tableau V.4** : Masse volumique sec des bétons étudiés.

Les bétons	Masse volumique à sec (kg/m <sup>3</sup> )
<b>BO</b>	2330
<b>B1</b>	2210
<b>B2</b>	2200
<b>B3</b>	2190
<b>B4</b>	2180
<b>B5</b>	2160
<b>B6</b>	2120

**Figure V.4** : Variation de masse volumique en fonction du taux de substitution.

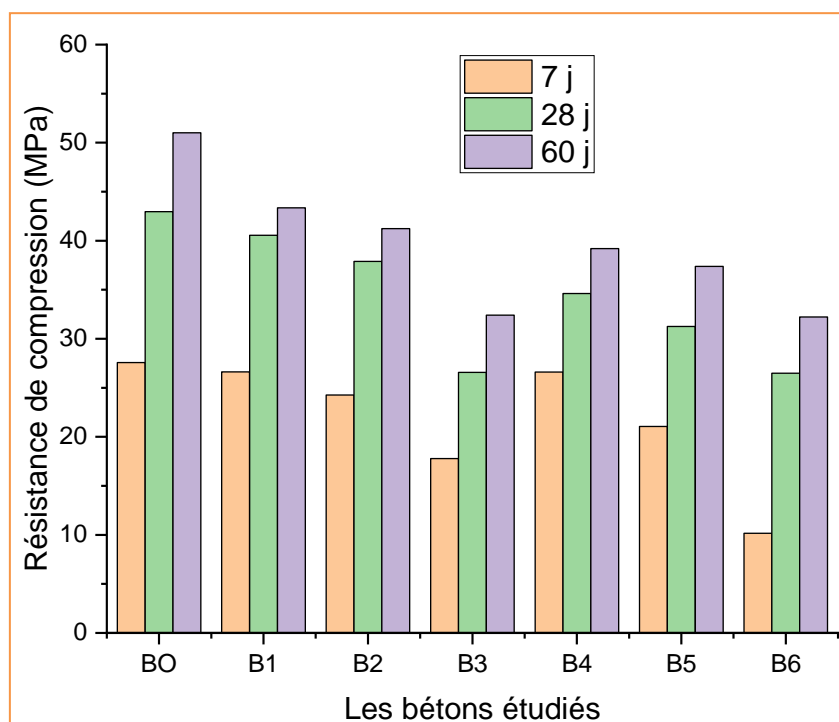
D'après la figure précédente, on remarque que la masse volumique à l'état sec diminue progressivement avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc et en plastique, Entre un béton BO et B1 la densité durcie diminue d'une façon très significative. On remarque également que la cinétique de l'évolution de la masse volumique varie entre le béton témoin et le béton à base de déchets de plastique et de caoutchouc. Par exemple, le béton (B1) a connu une baisse de 5 % tandis que le béton (B6) a connu une baisse de 9 %.

**V.2.2.2 Résistance à la compression à 7, 28, et 60 jours :**

Les valeurs de la résistance à la compression à 7, 28, et 60 jours par un essai destructif sur presse hydraulique sont présentées à la figure V.5 et au tableau V.5.

**Tableau V.5** Résistance à la compression des bétons étudiés.

Les bétons	RC (7J)	RC (28J)	RC (60J)
<b>B0</b>	27.57	42.96	51
<b>B1</b>	26.63	40.56	43.35
<b>B2</b>	24.27	37.89	41.24
<b>B3</b>	17.79	26.57	32.41
<b>B4</b>	26.61	34.62	39.20
<b>B5</b>	21.06	31.26	37.38
<b>B6</b>	10.17	26.48	32.22



**Figure V.5 :** Variation de résistance a la compression en fonction du taux de substitution.

D'après la figure V.5, on peut observer que la résistance à la compression augmente avec le temps et diminue lorsque l'on augmente le pourcentage de caoutchouc et de plastique [144-42 -149]. Il a été remarqué qu'il y avait une baisse de résistance à la compression de 3 % à 63 % à 7 jours, et diminue de 6 % à 38 % à 28 jours, et diminue de 15 % à 37 % à 60 jours, pour le béton B1 et B6 respectivement par rapport au béton ordinaire. Cette diminution est due à ce que les granulats de plastique et de caoutchouc ont faible adhérence par rapport aux granulats

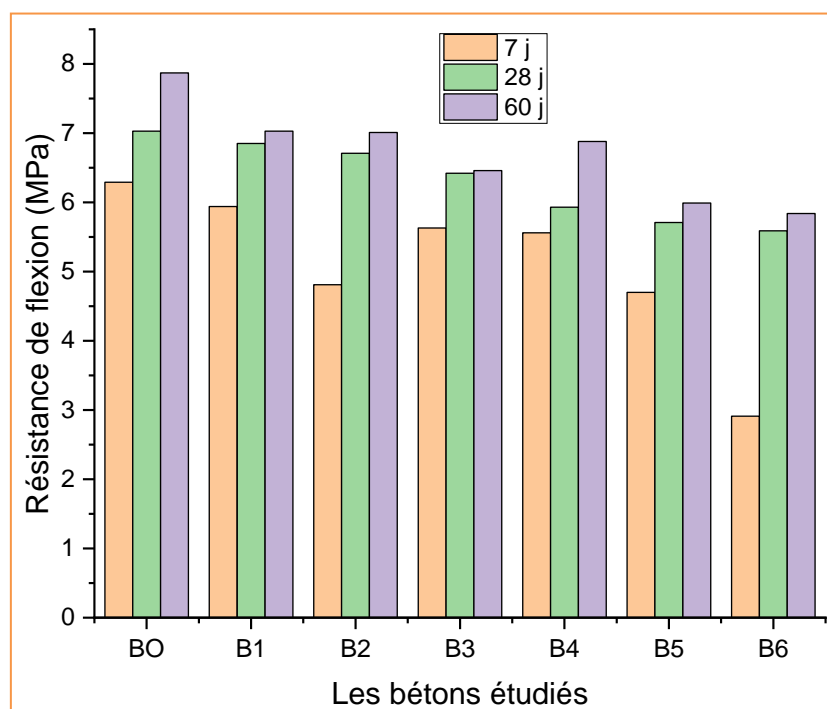
naturels. Cela peut entraîner une liaison moins solide entre les différents composants de la structure du béton, ce qui conduit à une résistance réduite [150]. D'autre part, les granulats de plastique et de caoutchouc créent des pores dans la structure du béton, donc les pores augmentent, la résistance à la compression diminue. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs [83-151].

**V.2.2.3 Résistance à la flexion à 7, 28, et 60 jours :**

Les valeurs de la résistance à la flexion à 7, 28, et 60 jours par un essai destructif sur presse hydraulique sont présentées à la figure V.6 et au tableau V.6.

**Tableau V.6 :** Résistance à la flexion des bétons étudiés.

Les bétons	RF (7J)	RF (28J)	RF (60J)
<b>B0</b>	6.29	7.03	7.87
<b>B1</b>	5.94	6.85	7.03
<b>B2</b>	4.81	6.71	7.01
<b>B3</b>	5.63	6.42	6.46
<b>B4</b>	5.56	5.93	6.88
<b>B5</b>	4.70	5.71	5.99
<b>B6</b>	2.91	5.59	5.84



**Figure V.6 :** Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution.

À l'âge de 7 jours, les mélanges B1 et B6 ont respectivement montré une diminution de résistance à la flexion de 10% et 20% par rapport au béton témoin B0. En revanche, les mélanges B3 et B4 montrent une légère diminution allant jusqu'à 5% et 6% respectivement par rapport au béton de référence.

Comme prévu, le mix de contrôle B0, a produit la résistance la plus élevée sur 28 jours de 7.03 MPa ; en revanche, la résistance à la flexion la plus faible de 5.59 MPa a été enregistrée pour le mélange avec des teneurs élevées en plastique et en caoutchouc dans le mélange de béton B6. Les pourcentages de diminution de la résistance à la flexion étaient de 2.5 %, 4.5 %, 9 %, 16 %, 19 %, 20.5 %, pour les mélanges B1, B2, B3, B4, B5, B6, respectivement, par rapport au mélange témoin.

À l'âge de 60 jours, on note également que la cinétique de l'évolution de la résistance à la flexion varie entre le béton témoin et le béton à base de déchets de plastique et de caoutchouc. Par exemple, la valeur minimale de la résistance à la flexion est de 5.84 MPa pour un béton B6 et la valeur maximale de la résistance à la flexion est de 7.87 MPa pour un béton B0. Cette diminution de la résistance à la flexion peut être attribuée au fait que les granulats de plastique et de caoutchouc ont une faible adhérence par rapport aux granulats naturels. Cela peut entraîner une liaison moins solide entre les différents composants de la structure du béton, ce qui conduit à une diminution de la résistance [152]. De plus, lorsque de fines particules de cendre de caoutchouc ont été utilisées pour remplacer partiellement les granulats fins, cela a conduit à un emboîtement inadéquat, provoquant une baisse de la résistance à la flexion [151]. De plus, les granulats de plastique et de caoutchouc créent des pores dans la structure du béton, de sorte que les pores augmentent et la résistance à la flexion diminue, comme le montre la figure V.7. Les effets des fissures sur les échantillons de béton. Plus les niveaux de caoutchouc et de plastique ne sont élevés, plus le diamètre des fissures est grand, ce qui entraîne une diminution de la résistance à la flexion.

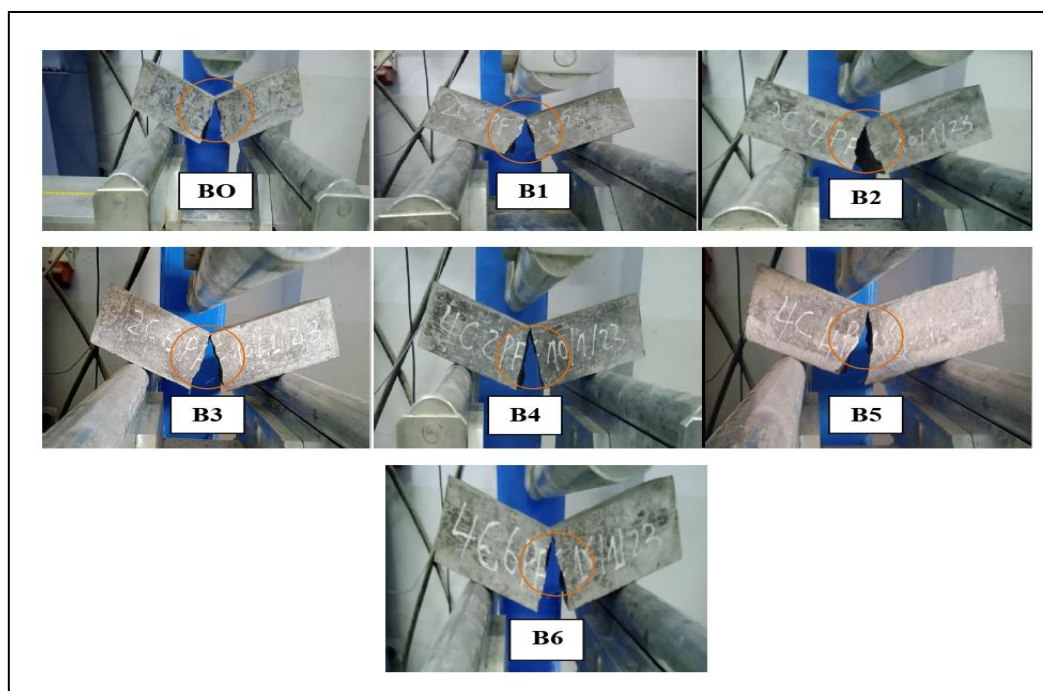


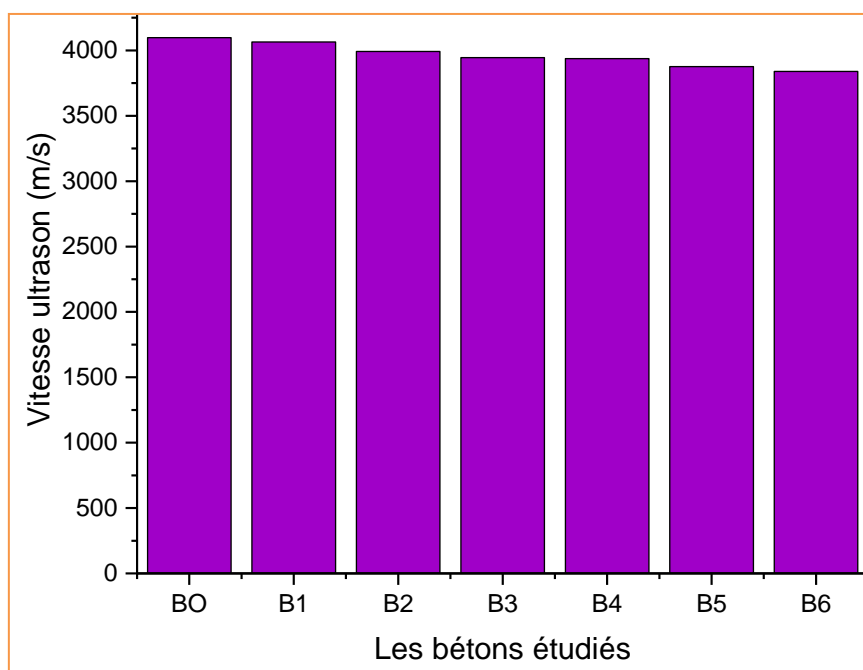
Figure V.7 : Échantillons cubiques après essai de résistance à la flexion

V.2.2.4 Vitesse ultrasonique à 28 jours :

Les résultats de vitesse ultrasonique sont présentés au tableau V.7 et à la figure V.8.

Tableau V.7 : Vitesse ultrasonique pour les sept bétons étudiés

Les bétons	Vitesse ultrasonique (m/s)
<b>BO</b>	4098.36
<b>B1</b>	4065.04
<b>B2</b>	3992.03
<b>B3</b>	3944.79
<b>B4</b>	3937.01
<b>B5</b>	3876.20
<b>B6</b>	3838.90



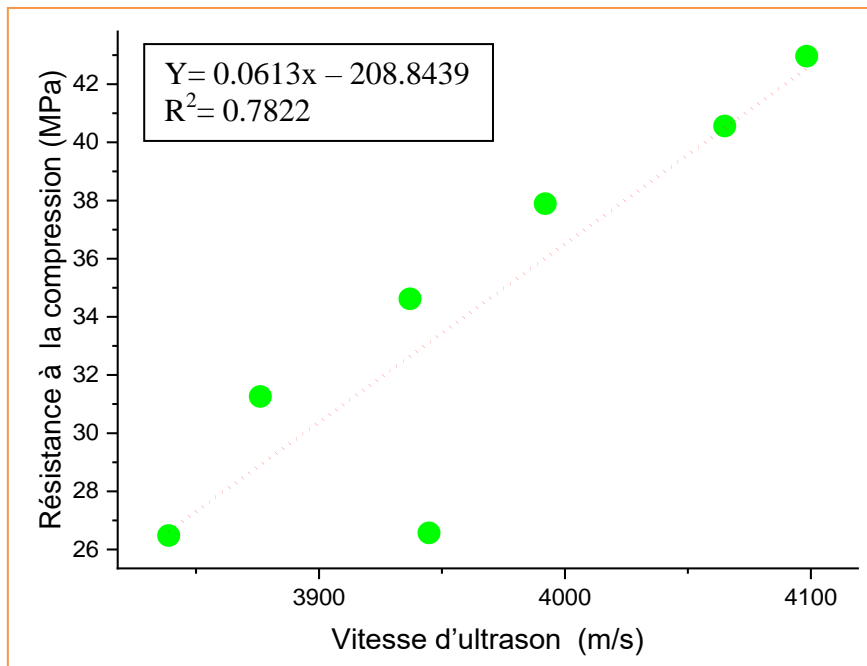
**Figure V.8 :** Variation de vitesse ultrasonique en fonction du taux de substitution.

Dans la figure V.8, on remarque que l'augmentation du pourcentage de caoutchouc et de plastique entraîne une diminution de la vitesse ultrasonique. La valeur la plus élevée est de 4098.36 (m/s) pour un béton B0 (béton ordinaire) et la valeur la plus basse est de 3838.90 (m/s) pour un béton B6, la vitesse ultrasonique diminue de 1 %, 3 %, 3.5 %, 4 %, 5.5 % et 6 % pour un béton B1, B2, B3, B4, B5 et B6, respectivement par rapport au béton ordinaire (B0). Cette diminution de la vitesse ultrasonique s'explique par les teneurs de l'air plus élevées dans le mélange du béton. Cette augmentation de l'air entraîne une réduction de la vitesse ultrasonique. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs [42-152-153].

#### **V.2.2.5 Relation entre la vitesse ultrason et la résistance de compression à 28 jours :**

Après 28 jours de durcissement, la relation entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion ultrasonique du béton a été déterminée par une équation de régression linéaire créée en analysant les résultats des tests à l'aide du logiciel « Origin ».

La relation entre la vitesse d'ultrason et la résistance à la compression est illustrée à la figure V.9. L'équation de cette réponse est  $f_c = 0.0613 x - 208.8439$ . La résistance à la compression et la vitesse d'impulsion ultrason ont une bonne corrélation, avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0.78$ .

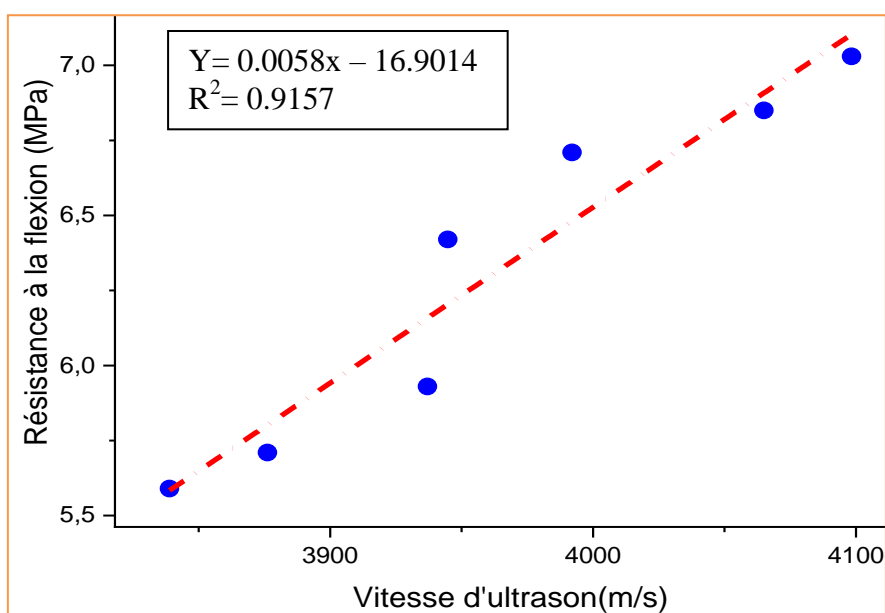


**Figure V.9 :** Relation entre la vitesse d’ultrason et la résistance a la compression à 28 jours.

Cela suggère que la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion des ultrasons sont directement et linéairement influencées par le caoutchouc et le plastique.

**V.2.2.6 Corrélation entre la vitesse ultrason et la résistance de flexion à 28 jours :**

La figure V.10, montre l’intersection entre la vitesse ultrason et résistance à la flexion à 28 jours. L’équation de cette réponse est :  $f_c = 1.41x + 4.61$ .



**Figure V.10 :** Relation entre la vitesse d’ultrason et la résistance a la flexion à 28 jours.

Il montre une relation élevée entre les résultats, avec un coefficient de corrélation de  $R^2$  égal à 0.67. La régression est positive, ce qui indique que l'augmentation de la résistance à la flexion entraîne une augmentation de la vitesse ultrason. Cela indique que la poudre de caoutchouc et plastique a une grande influence sur la résistance à la flexion et à la vitesse ultrason.

### V.2.2 Les résultats des essais de durabilité du béton :

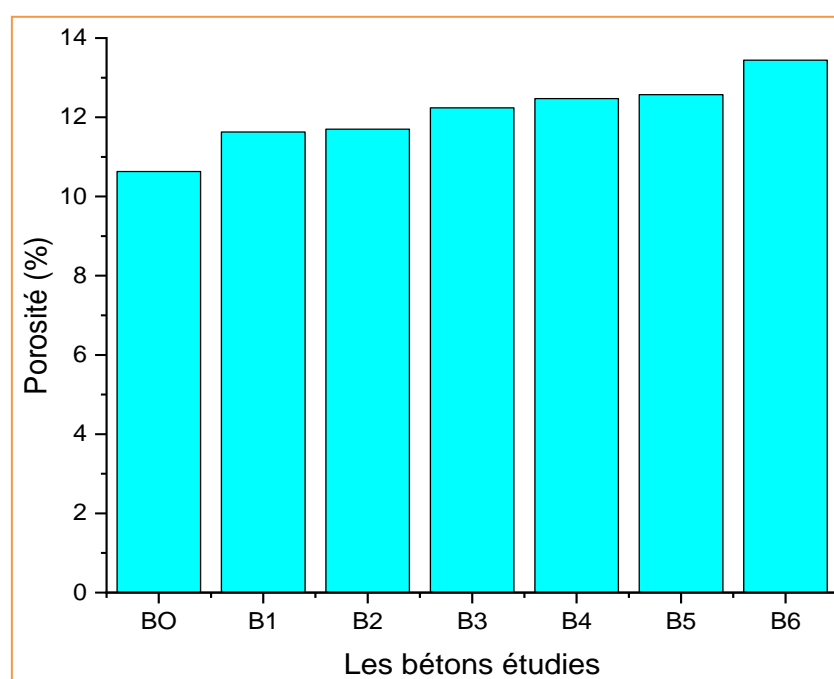
Les tests suivants seront examinés dans cette section : la porosité, la relation entre vitesse ultrason et porosité à 28 jours, l'essai d'absorption d'eau par immersion totale, l'essai d'absorption d'eau par capillarité et les essais d'attaques chimiques.

#### V.2.2.1 Essai de porosité :

La figure V.11 et le tableau V.8 montrent l'évolution de la porosité des différents bétons.

**Tableau V.8** : Porosité pour les bétons étudiés.

Les bétons	Porosité (%)
<b>BO</b>	10.63
<b>B1</b>	11.63
<b>B2</b>	11.70
<b>B3</b>	12.24
<b>B4</b>	12.47
<b>B5</b>	12.57
<b>B6</b>	13.44



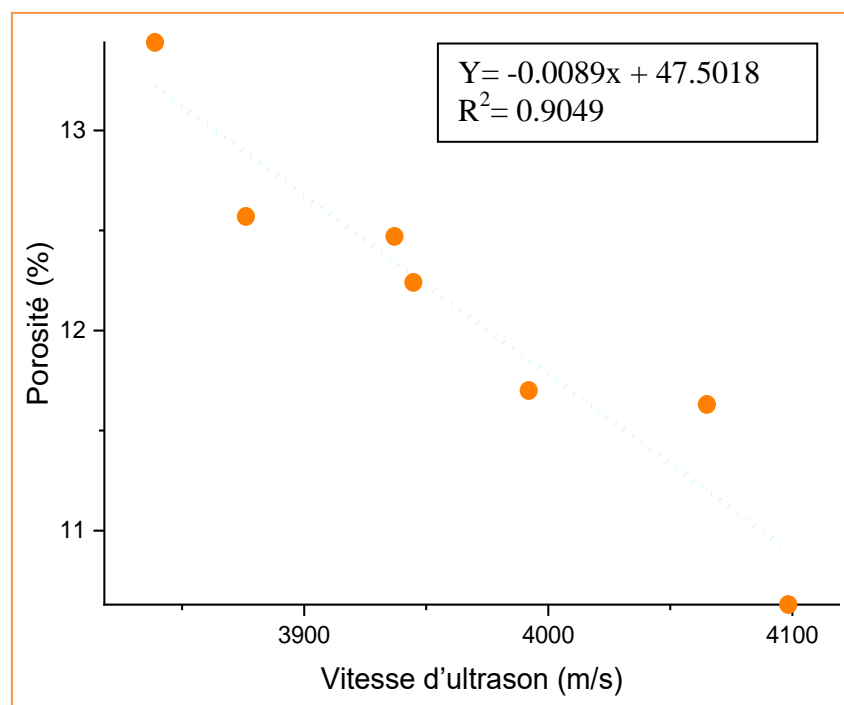
**Figure V.11** : Variation de porosité en fonction du taux de substitution.

Suivant la figure V.11, on remarque que la porosité du béton augmente avec l'augmentation des pourcentages de plastique et de caoutchouc. Par exemple, pour un béton BO, la porosité est de 10.63 % et pour le béton B6, la porosité est de 13.44 %. L'introduction de caoutchouc et de plastique dans le mélange du béton a contribué à l'augmentation de la porosité en créant de petits vides ou bulles dans le béton. Ces vides ou bulles agissent comme des espaces dans le béton qui augmentent sa porosité globale, permettant ainsi à des niveaux d'air plus élevés de traverser le béton. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs [40-154-155].

### V.2.3.2 Corrélation entre la vitesse ultrason et la porosité à 28 jours :

L'intersection entre la porosité et la vitesse ultrasonique est illustrée à la figure V.12. La réponse est l'équation suivante :  $f_c = -0.0089x + 47.5018$ .

La vitesse d'impulsion ultrason et la porosité ont une bonne corrélation, avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0.90$ . Cela suggère que la vitesse ultrason et la porosité sont directement et linéairement influencées par le caoutchouc et le plastique.



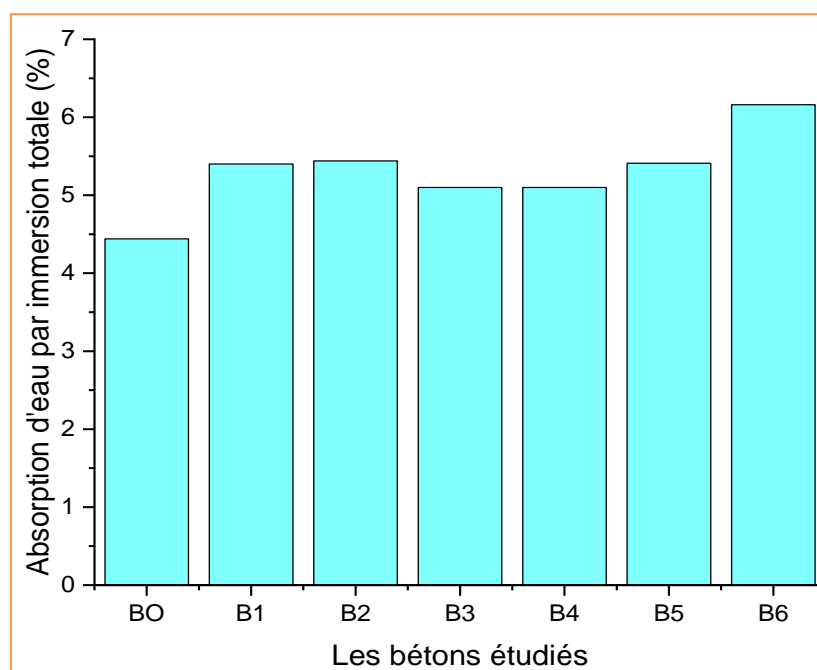
**Figure V.12 :** Relation entre la vitesse d'ultrason et la porosité a 28 jours.

### V.2.3.3 Essai d'absorption d'eau par immersion totale :

La figure V.13 et le tableau V.9 présentent les valeurs d'absorption d'eau par immersion totale.

**Tableau V.9** : Absorption d'eau par immersion totale pour les bétons étudiés.

Les bétons	Absorption d'eau (%)
<b>BO</b>	4.44
<b>B1</b>	5.40
<b>B2</b>	5.44
<b>B3</b>	5.10
<b>B4</b>	5.10
<b>B5</b>	5.41
<b>B6</b>	6.16



**Figure V.13** : Variation de l'absorption d'eau par immersion totale en fonction du taux de substitution.

Comme on peut le voir, l'augmentation du pourcentage de plastique et de caoutchouc entraîne une augmentation de l'absorption d'eau. Seuls les bétons B3 et B4 ont connu une légère diminution de l'absorption d'eau, tandis que le béton B6 a connu une absorption d'eau élevée de 6.10 % par rapport au béton ordinaire. Cette augmentation peut être attribuée au fait que le plastique et le caoutchouc créent des vides ou des pores dans le mélange de béton. Ces pores

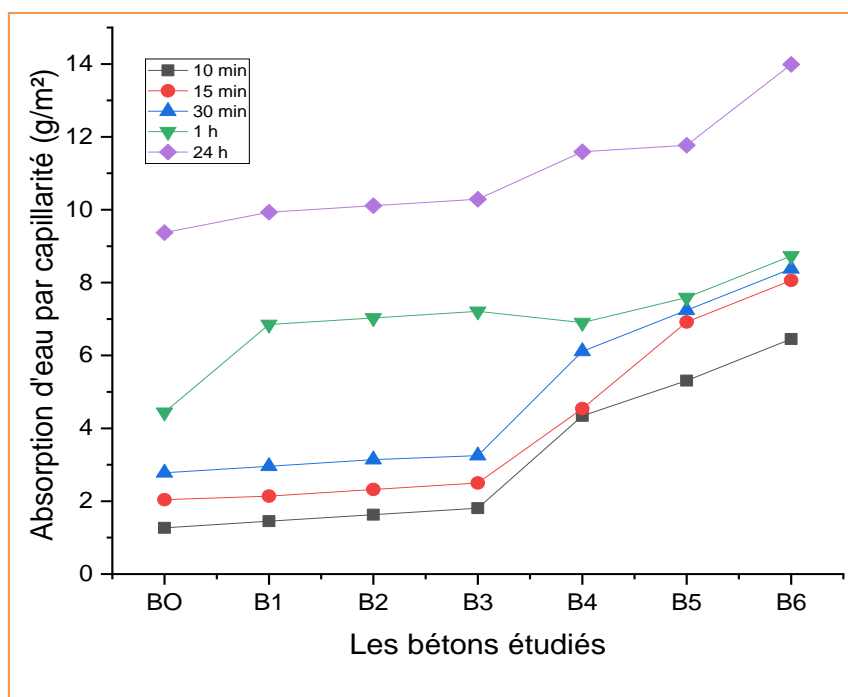
supplémentaires permettent à l'eau de pénétrer plus facilement dans le béton, augmentant ainsi son absorption. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs. Silva et al. [156] ont observé qu'à chaque fois qu'augmente le pourcentage de plastique, l'absorption d'eau par immersion augmente par rapport au béton de référence. De même, Akçaözoglu et al. [155] ont trouvé les mêmes résultats, Gupta et al. [83] ont observé que l'absorption d'eau du béton contenant du caoutchouc augmentait avec l'augmentation du pourcentage de cendres de caoutchouc. L'absorption d'eau est passée de 1.08 % à 1.26 % pour les bétons contenant respectivement 0 % et 20 % de cendres de caoutchouc, avec le même rapport E/C à 28 jours.

**V.2.3.4 Absorption d'eau par capillarité :**

La figure V.14 et le tableau V.10 présentent les résultats de l'absorption d'eau par capillarité.

**Tableau V.10 :** les résultats d'absorption d'eau par capillarité pour les bétons étudiés.

Temps	10 min	15 min	30 min	1 h	24 h
<b>B0</b>	1.27	2.04	2.78	4.44	9.37
<b>B1</b>	1.45	2.14	2.96	6.85	9.93
<b>B2</b>	1.63	2.32	3.14	7.03	10.11
<b>B3</b>	1.81	2.50	3.25	7.21	10.29
<b>B4</b>	4.34	4.54	6.11	6.90	11.59
<b>B5</b>	5.31	6.92	7.24	7.59	11.77
<b>B6</b>	6.45	8.06	8.38	8.73	13.99



**Figure V.14 :** Variation de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du taux de substitution.

Dans la figure V.14, il est noté que l'absorption d'eau par capillarité augmente progressivement avec le temps et en fonction de la proportion de plastique et de caoutchouc présente. La valeur la plus élevée d'absorption d'eau enregistrée est de 13.99 (g/m<sup>2</sup>) à 24 heures pour un béton B6, tandis que la valeur la plus basse est de 1.27 (g/m<sup>2</sup>) à 10 minutes pour un béton ordinaire (BO). Cette augmentation peut être attribuée au fait que le plastique et le caoutchouc ne se lient pas avec les composants du béton, donc le plastique et le caoutchouc créent des vides dans le mélange de béton. Ces vides supplémentaires permettent à l'eau de pénétrer plus facilement dans le béton, donc l'absorption d'eau par capillarité est augmentée. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs [40-157]. Thomas et al. [91], ont mené une étude dans laquelle ils ont incorporé de la poudre de caoutchouc dans des proportions variables (0 à 20 %) pour remplacer les granulats fins dans un béton. Leurs résultats ont révélé que la sorptivité du mélange a augmenté par rapport au mélange témoin.

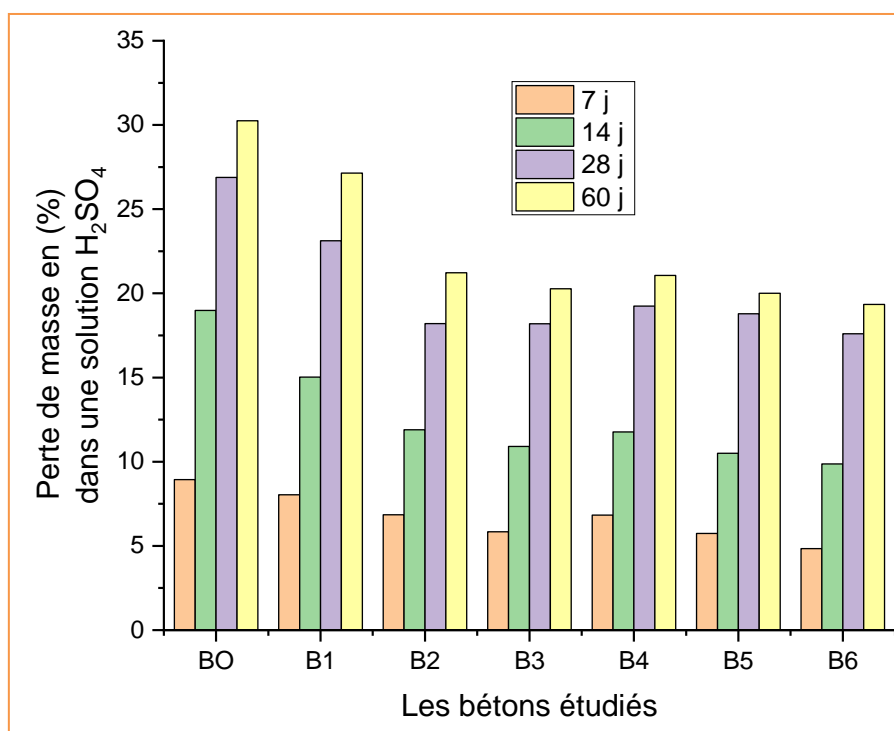
#### V.2.3.5 Attaque au l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:

##### a) Perte de masse :

Après 28 jours de conservation des éprouvettes dans l'eau, elles sont extraites et immergées dans un milieu acide (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) de concentration 5 % pendant une durée de 7,14, 28 et 60 jours. Les résultats de perte de masse au milieu d'acide sulfurique sont présentés à la figure V.15 et au tableau V.11.

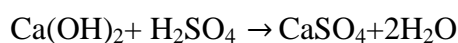
**Tableau V.11** : Les résultats de perte de masse au milieu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pour les bétons étudiés.

Les bétons	7jours	14 jours	28 jours	60 jours
<b>B0</b>	8.94%	18.98%	26.88%	30.25%
<b>B1</b>	8.04%	15.03%	23.12%	27.14%
<b>B2</b>	6.85%	11.90%	18.20%	21.22%
<b>B3</b>	5.84%	10.91%	18.19%	20.27%
<b>B4</b>	6.83%	11.77%	19.24%	21.06%
<b>B5</b>	5.74%	10.50%	18.79%	20%
<b>B6</b>	4.84%	9.87%	17.60%	19.34%



**Figure V.15 :** Variation de perte de masse des bétons étudiés dans une solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

La figure V.15 montre la variation de perte de masse en fonction des jours. On remarque que la perte de masse augmente avec les jours d'immersion et diminue avec l'augmentation du pourcentage de plastique et de caoutchouc. La valeur maximale de perte de masse qui a été enregistrée est de 30.25 % dans le béton ordinaire (B0) à 60 jours, et la valeur minimale de la perte de masse est de 5.84 % dans le béton B6 à 7 jours. La réduction de la perte de masse pour un béton B1 et B6 de 10 à 35 %, de 21 à 37 %, de 14 à 31 %, de 10 à 33 % à 7, 14, 28 et 60 jours respectivement. Cette perte est due à la pénétration du gypse dans les pores du béton qui résulte de l'équation suivante :



Le gypse réagit avec la phase d'aluminate de calcium pour former le sulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite secondaire), cette ettringite causera l'expansion du béton, donc le gypse précipitera facilement dans le béton, formant une couche blanche sur la surface du béton ce qui conduit à une augmentation de la perte de masse. Suivant la réaction ci-dessous



D'une manière générale, une augmentation du taux de caoutchouc et de plastique gêne l'infiltration de la solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dans le béton, ce qui entraîne une diminution de la perte de

masse. Par conséquent, nous concluons que ces déchets ont un bon comportement vis-à-vis des milieux acides. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs. Bisht et Ramana [4] ont utilisé les déchets de caoutchouc dans le béton, dans des proportions de 4 %, 4.5 %, 5 % et 5.5 %. Les résultats montrent qu'à chaque fois qu'augmente le pourcentage de caoutchouc, la perte de masse diminue. À 90 et 180 jours, la perte de masse au béton ordinaire est de 9.06 % et de 15 %, respectivement, et au béton contenant 5.5 % de caoutchouc, la perte de masse est de 2.32 % et de 3.01 %, respectivement. Ainsi que Ghernouti et Rabehi [157] ont montré les mêmes résultats.

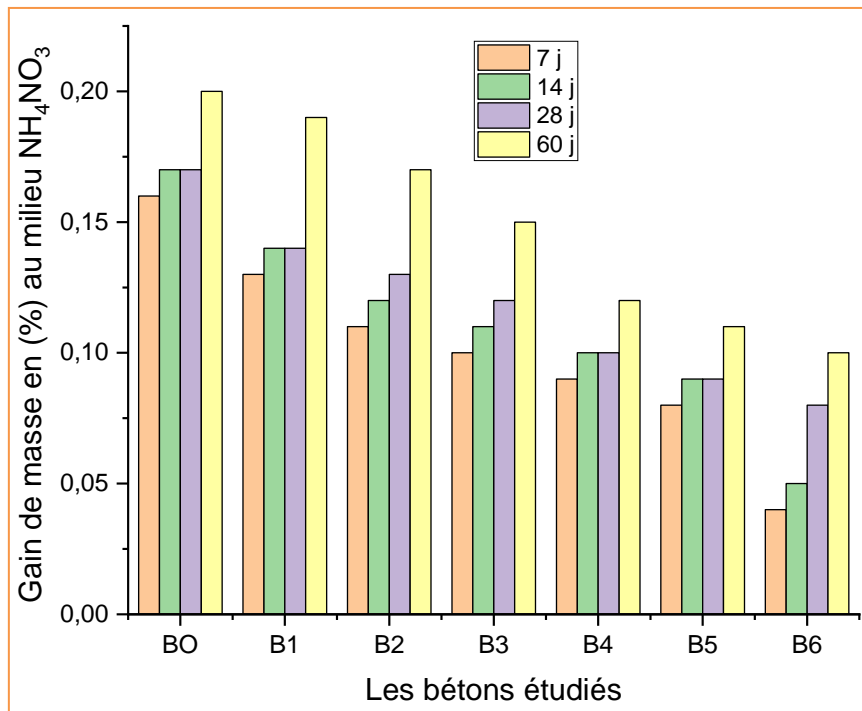
### V.2.3.6 Attaque au nitrate d'ammonium $\text{NH}_4\text{NO}_3$ :

#### a) Gain de masse :

Après avoir été conservées les éprouvettes dans l'eau pendant 28 jours, ensuite retirées et plongées les éprouvettes dans un milieu contenant 5 % de nitrate d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) pour des périodes de 7, 14, 28 et 60 jours. Les variations de masse observées dans le milieu contenant du nitrate d'ammonium sont représentées dans la figure V.16 et le tableau V.12.

**Tableau V.12** : Les résultats de gain de masse au milieu  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  pour les bétons étudiés.

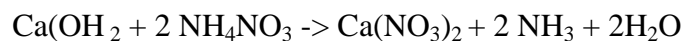
Les bétons	7 jours	14 jours	28 jours	60 jours
B0	0.16%	0.17%	0.17%	0.20%
B1	0.13%	0.14%	0.14%	0.19%
B2	0.11%	0.12%	0.13%	0.17%
B3	0.10%	0.11%	0.12%	0.15%
B4	0.09%	0.10%	0.10%	0.12%
B5	0.08%	0.09%	0.09%	0.11%
B6	0.04%	0.05%	0.08%	0.10%



**Figure V.16 :** Variation de gain de masse des bétons étudiés dans une solution NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>.

Dans la figure V.16, on remarque que la gain de masse augmente avec les jours et diminue avec l'augmentation des pourcentages de plastique et caoutchouc, la valeur minimale de gain de masse est de 0.04% a 7 jours au béton B6 et la valeur maximale de gain de masse est de 0.2% a 60 jours au béton BO, et comme on voit, entre 14 jours et 28 jours, le changement de masse est presque égal. Les réactions chimiques entraînent la formation de cristaux expansifs de nitrate de calcium Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> à l'intérieur des pores du béton. Ces cristaux qui sont soluble dans l'eau, ce qui peut provoquer une augmentation de volume du béton. Ce phénomène est connu sous le nom de "gonflement du béton" suivant les réactions dessous :

- Le nitrate d'ammonium réagit avec la portlandite pour former du nitrate de calcium, qui est soluble dans l'eau, de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et de l'eau (H<sub>2</sub>O). L'équation chimique de cette réaction est la suivante :



L'augmentation du pourcentage de plastique dans le béton au milieu de nitrate d'ammonium entraîne une réduction du gain de masse du béton en raison de plusieurs facteurs.

1. Le plastique et caoutchouc peut agir comme un agent de séparation entre les grains de ciment, ce qui peut entraîner une diminution de la densité du béton et donc une réduction du gain de masse.

2. Le plastique et caoutchouc peut également réduire l'adhérence entre les particules de ciment, ce qui peut affaiblir la structure globale du béton et entraîner une diminution de sa masse.

3. Le plastique et caoutchouc peut avoir une densité plus faible que les autres composants du béton, ce qui donne lieu à une moins grande masse du béton final.

### V.2.3.7 Attaque au chlorure de calcium NaCl :

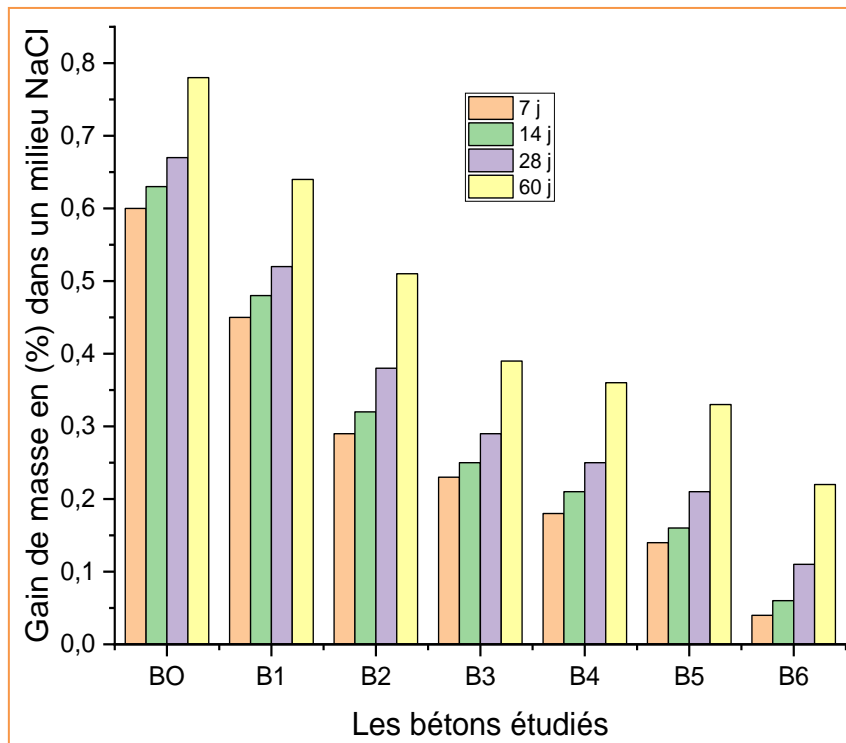
#### a) Gain de masse :

Les résultats de l'essai du gain de masse sont présentés à la figure V.17 et tableau V.13.

Dans la figure V.17, on remarque que la gain de masse augmente avec les jours et diminue avec l'augmentation des pourcentages de plastique et caoutchouc, la valeur minimale de gain de masse est de 0.04 % a 7 jours au béton B6 et la valeur maximale de gain de masse est de 0.78% a 60 jours au béton B0.

**Tableau V.13** : Les résultats de gain de masse du béton dans un milieu NaCl.

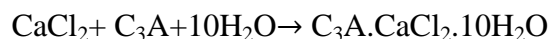
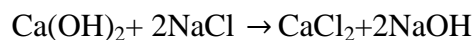
Les bétons	7jours	14 jours	28 jours	60 jours
<b>B0</b>	0.60%	0.63%	0.67%	0.78%
<b>B1</b>	0.45%	0.48%	0.52%	0.64%
<b>B2</b>	0.29%	0.32%	0.38%	0.51%
<b>B3</b>	0.23%	0.25%	0.29%	0.39%
<b>B4</b>	0.18%	0.21%	0.25%	0.36%
<b>B5</b>	0.14%	0.16%	0.21%	0.33%
<b>B6</b>	0.04%	0.06%	0.11%	0.22%



**Figure V.17 :** Variation de gain de masse des bétons étudiés dans une solution NaCl.

Lorsque du chlorure de calcium est utilisé dans le mélange de béton, le gain de masse du matériau peut augmenter progressivement en raison de la réaction chimique continue entre le chlorure de calcium et les composants du béton, renforçant ainsi sa solidité. Cependant, l'introduction de quantités plus importantes de déchets plastiques et de caoutchouc peut affaiblir la structure générale du béton, réduisant ainsi sa résistance et durabilité. Cet affaiblissement peut expliquer la diminution du gain de masse observée.

- La portlandite réagit avec le chlorure de sodium pour former de l'hydroxyde de sodium (NaOH) soluble dans l'eau.



Chlorure de calcium + Aluminate de calcium + L'eau → Monochloroaluminate de calcium

Sel très soluble qui entraîne le gonflement du béton.

Cette diminution du gain de masse du béton en raison des déchets de plastique et de caoutchouc ne réagit pas chimiquement avec le ciment dans le béton de la même manière que les autres agrégats conventionnels. Lorsque le pourcentage de déchets de plastique et

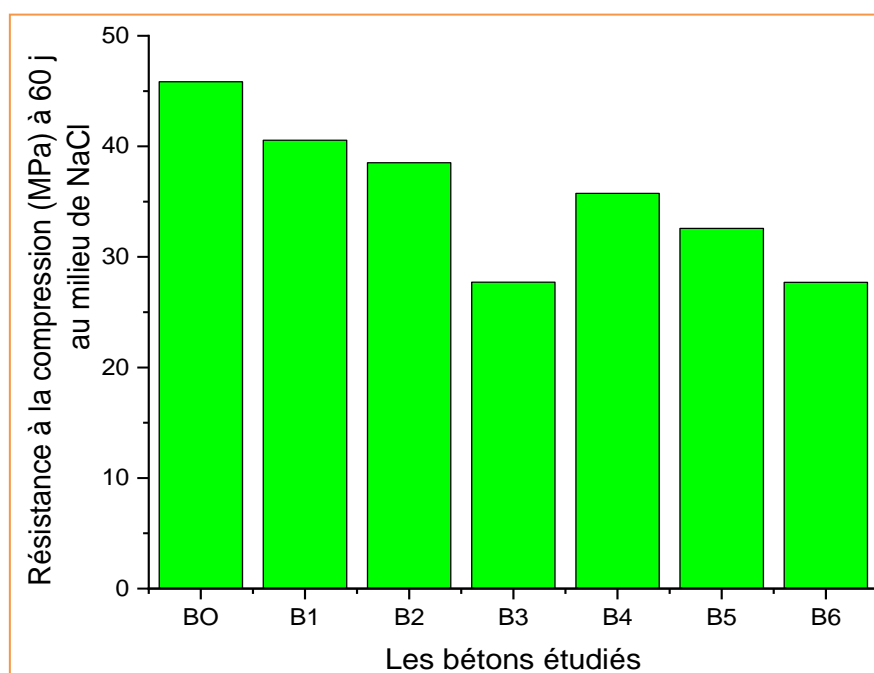
caoutchouc dans le béton augmente, cela peut entraîner une diminution de la résistance globale du matériau. De plus, la présence de sel (NaCl) peut également contribuer à une plus grande détérioration du béton, car le sel peut provoquer des réactions chimiques qui affaiblissent la structure.

#### V.2.3.8 Résistance à la compression après 60 jours de conservation au milieu de NaCl :

Les résultats de résistance à la compression au milieu NaCl à 60 jours sont présentés dans le tableau V.14 et la figure V.18.

**Tableau V.14** : Les résultats de résistance à la compression du béton dans un milieu NaCl.

Les bétons	RC a (60J)
<b>B0</b>	45.84
<b>B1</b>	40.55
<b>B2</b>	38.52
<b>B3</b>	27.72
<b>B4</b>	35.74
<b>B5</b>	32.58
<b>B6</b>	27.70



**Figure V.18** : Variation de résistance à la compression des bétons étudiés dans une solution NaCl.

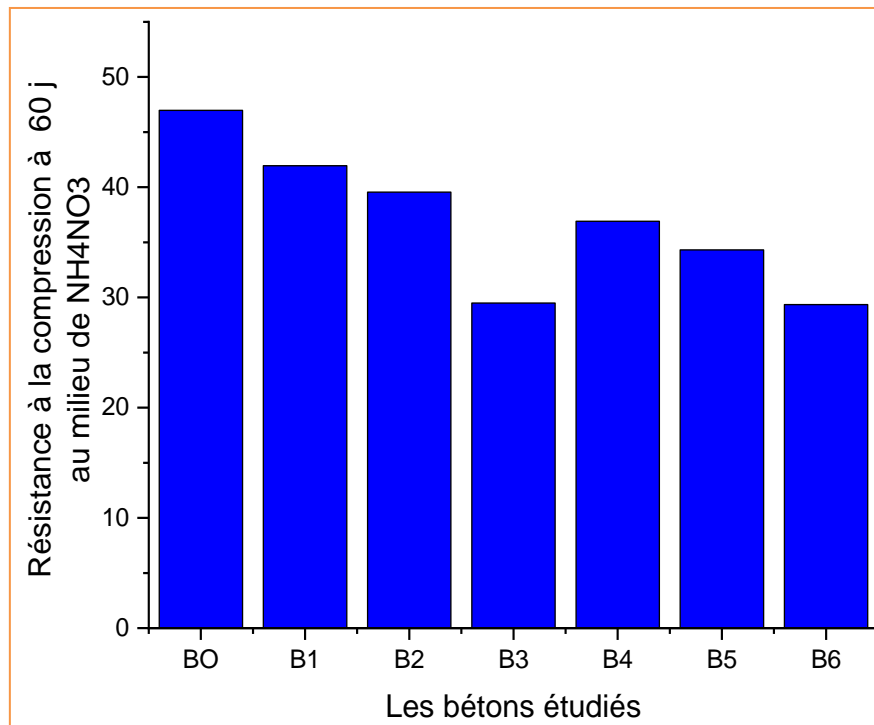
Dans la figure V.18, on remarque que la résistance à la compression au milieu de chlorure de sodium diminue avec l'augmentation du taux de plastique et de caoutchouc. La résistance diminue de 45.84 MPa à 27.70 MPa, correspondant respectivement à une diminution de 40 % pour un béton B0 et B6. La résistance à la compression du béton à base de déchets de plastique et de caoutchouc diminue en présence de chlorure de sodium en raison des déchets de plastique et de caoutchouc affaiblissant les liaisons entre les particules de ciment. De plus, le chlorure de sodium peut s'infiltrer dans le béton et réagir avec ses composants, ce qui entraîne des effets négatifs sur sa structure et sa résistance. Ces interactions peuvent conduire à une diminution de la résistance à la compression du béton.

#### V.2.3.9 Résistance à la compression après 60 jours de conservation au milieu de $\text{NH}_4\text{NO}_3$ :

Les résultats de résistance au décaissement aux milieux de nitrate d'ammonium sont présentés à la figure V.19 et au tableau V.15.

**Tableau V.15** : Les résultats de résistance à la compression du béton dans un milieu  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .

Les bétons	RC a (60J) en (MPa)
<b>B0</b>	46.98
<b>B1</b>	41.95
<b>B2</b>	39.56
<b>B3</b>	29.49
<b>B4</b>	36.91
<b>B5</b>	34.32
<b>B6</b>	29.35



**Figure V.19 :** Variation de résistance à la compression au milieu nitrate d’ammonium en fonction des taux de substitutions.

Selon la représentation graphique, il est observé que la résistance à la compression du milieu de nitrate d'ammonium diminue lorsque le pourcentage de plastique et de caoutchouc augmente. Seuls les bétons B4 et B5 ont enregistré une légère augmentation de résistance. Ensuite, la résistance à la compression a continué à diminuer avec l'augmentation du taux de caoutchouc et de plastique. Le béton B6 présente une valeur la plus basse de 29.35 MPa, ce qui représente une baisse de 37.50 % par rapport au béton ordinaire. La résistance du béton à base de plastique et de caoutchouc diminue en raison de la nature moins rigide du plastique et caoutchouc par rapport aux matériaux traditionnels tels que le ciment. De plus, l'utilisation de nitrate d'ammonium peut également affaiblir la résistance du béton, car le nitrate d'ammonium fait un gonflement du béton ce gonflement peut provoquer des microfissures dans la structure du béton, ce qui affaiblit sa résistance globale du béton.

**Partie B** : Propriétés du béton à base du fine de caoutchouc et sable de plastique faux plafond

Dans cette partie, le sable a été partiellement remplacé par du plastique PVC faux plafond dans des proportions de 2 %, 4 % et 6 %, et le ciment a été partiellement remplacé par du caoutchouc dans des proportions de 2 % et 4 %. Les abréviations des mélanges des bétons B0, BA, BB, BC, BD, BE, BF utilisés sont présentés dans le tableau III.17.

**V.3 Résultats et interprétation :**

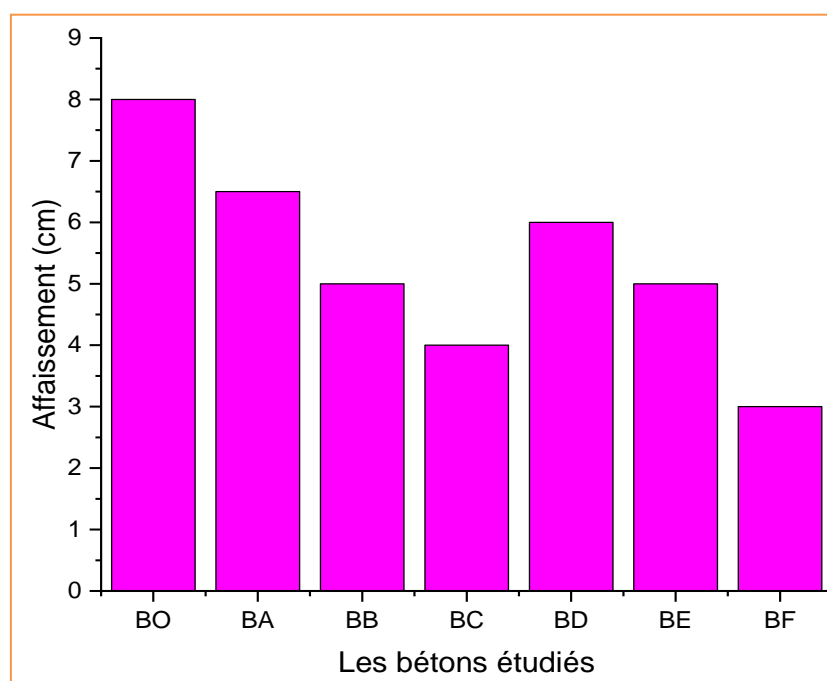
**V.2.7. A l'état frais :**

**V.2.7.1 Essai d'affaissement :**

Les résultats de l'essai d'affaissement sont présentés à la figure V.20 et tableau V.16.

**Tableau V.16** : Les résultats de l'affaissement pour les bétons étudiés.

Les bétons	L'affaissement (cm)
<b>BO</b>	8
<b>BA</b>	6.5
<b>BB</b>	5
<b>BC</b>	4
<b>BD</b>	6
<b>BE</b>	5
<b>BF</b>	3



**Figure V.20** : Variation de l'affaissement en fonction du taux de substitution.

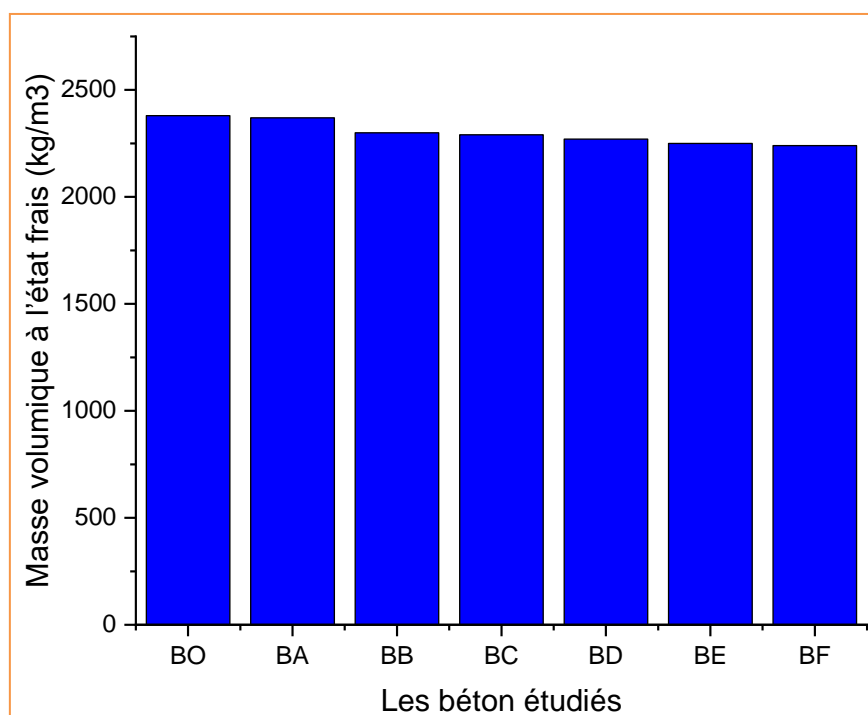
La figure V.20, présente les affaissements des bétons contenant différents pourcentages de plastique (faux plafond) et de caoutchouc. Les résultats de l'affaissement ont diminué avec l'augmentation de la quantité du plastique et du caoutchouc [140-141], comme le montre la figure V.20. Par exemple, l'affaissement pour un BO et un BF était de 8 cm et de 3 cm respectivement. Cette réduction était attendue les granulés de plastique ont une forme irrégulière qui entraîne un manque de liquidité et diminue donc l'ouvrabilité. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs [144-145-146].

**V.2.7.2 Masse volumique à l'état frais :**

Les résultats de l'essai masse volumique à l'état frais sont présentés à la figure V.21 et au tableau V.17.

**Tableau V.17 :** Masses volumiques des bétons étudiées.

Les bétons	Masse volumique à l'état frais (kg/m <sup>3</sup> )
<b>BO</b>	2380
<b>BA</b>	2370
<b>BB</b>	2300
<b>BC</b>	2290
<b>BD</b>	2270
<b>BE</b>	2250
<b>BF</b>	2240



**Figure V.21 :** Variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du taux de substitution.

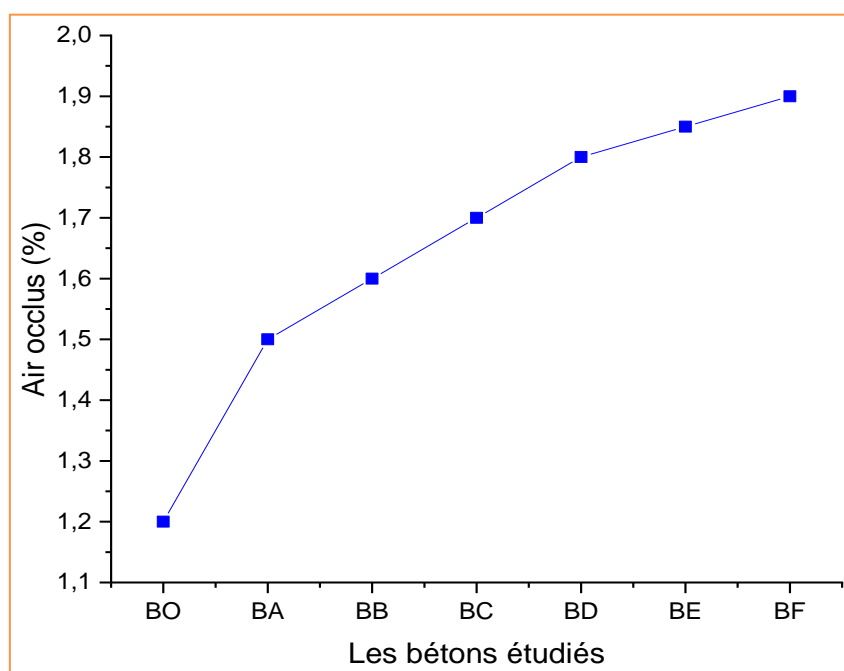
La figure V.21 présente la variation de masse volumique à l'état frais en fonction des pourcentages de plastique et de caoutchouc. On remarque que la masse volumique diminue progressivement avec l'augmentation du pourcentage de plastique et de caoutchouc. La masse volumique diminue de 0.5 %, 3 %, 4 %, 5 %, 5.5 % et 6 % pour un béton BA, BB, BC, BD, BE et BF, respectivement par rapport au béton ordinaire BO. Cette diminution est due au fait que la densité de plastique et de caoutchouc est très légère par rapport à la densité des granulats naturels et, d'autre part, les déchets de plastique et de caoutchouc entraînent des vides au mélange de béton, donc la densité diminue [138,148].

**V.2.7.3 Teneur en air occlus :**

Dans le tableau V.18 et la figure V.22, nous avons reporté les résultats des mesures de l'air occlus.

**Tableau V.18 :** Lair occlus des bétons étudiés.

Les bétons	Air occlus (%)
<b>BO</b>	1.2
<b>BA</b>	1.5
<b>BB</b>	1.6
<b>BC</b>	1.7
<b>BD</b>	1.8
<b>BE</b>	1.85
<b>BF</b>	1.9



**Figure V.22 :** Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution.

D'après la figure V.22, on remarque que le pourcentage de l'air occlus augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc et en plastique [129,130]. Entre un béton BO et BA, l'air occlus augmente d'une manière très significative. On remarque également que la cinétique de l'évolution de l'air occlus varie entre le béton témoin et le béton à base de déchets de plastique et de caoutchouc. Par exemple, la valeur minimale de l'air occlus est de 1.2 % pour un béton ordinaire et la valeur maximale de l'air occlus est de 1.9 % pour un béton BF.

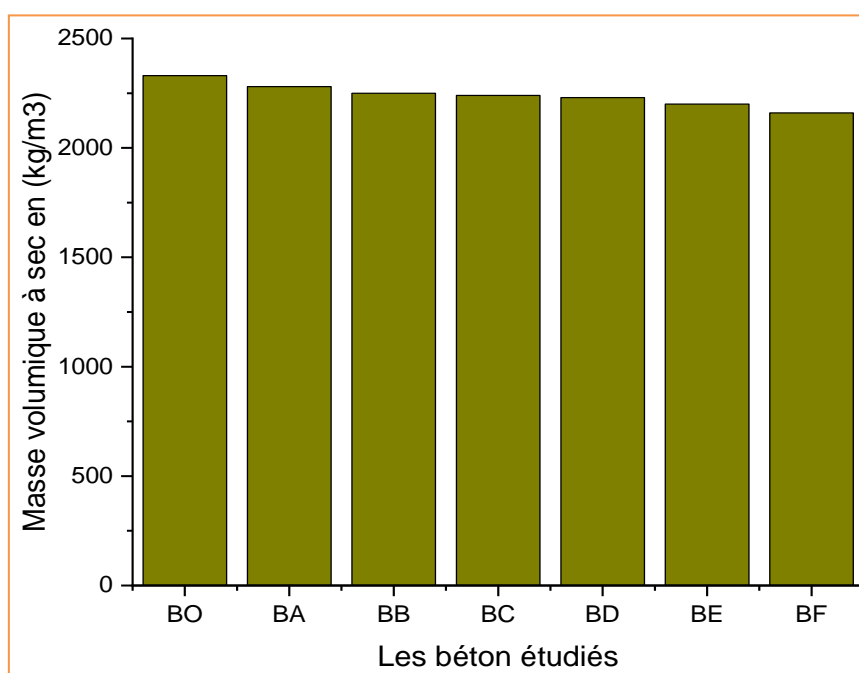
**V.2.8 Caractéristiques mécaniques :**

**V.2.8.1 Masse volumique à l'état sec :**

Les résultats de masse volumique à l'état sec sont présentés à la figure V.23 et tableau V.19.

**Tableau V.19 :** Masses volumiques à l'état sec des bétons étudiés.

Les bétons	Masse volumique à sec en (kg/m <sup>3</sup> )
<b>BO</b>	2330
<b>BA</b>	2280
<b>BB</b>	2250
<b>BC</b>	2240
<b>BD</b>	2230
<b>BE</b>	2200
<b>BF</b>	2160



**Figure V.23 :** Variation de masse volumique a sec en fonction du taux de substitution

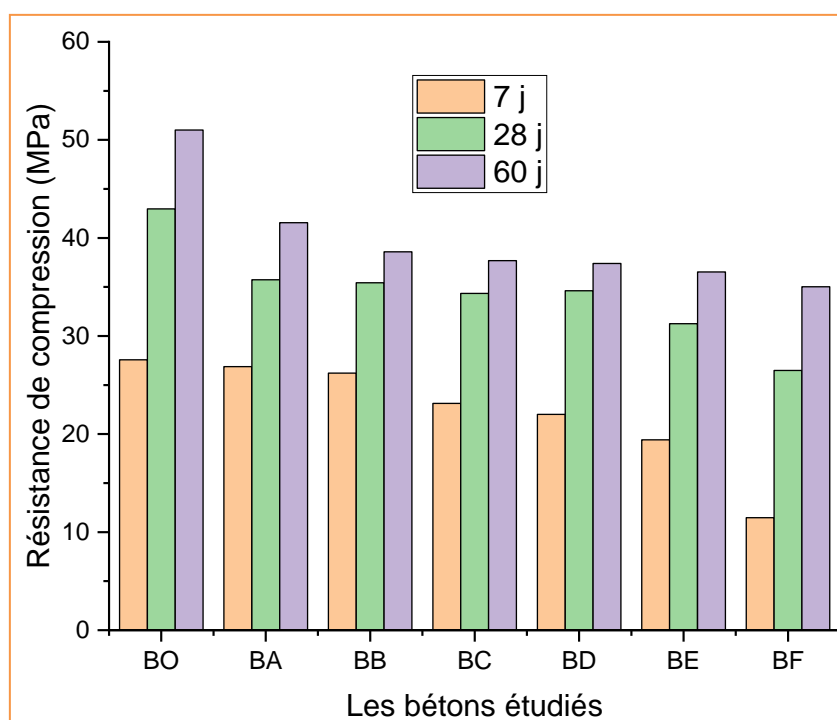
On peut observer que la masse volumique à l'état sec diminue avec l'augmentation du pourcentage de plastique et de caoutchouc. La masse volumique la plus élevée est de 2.33 kg/m<sup>3</sup> pour le béton témoin, et la masse volumique la plus faible enregistrée est de 2.16 kg/m<sup>3</sup> pour le béton BF (content de 4 % de caoutchouc et 6 % de plastique faux plafond). Cette diminution de la masse volumique est due au fait que la masse volumique du plastique et du caoutchouc est plus faible que celle des granulats naturels.

**V.2.8.2 Développement de résistance à la compression à 7, 28, et 60 jours :**

Dans le tableau V.20 et la figure V.24, nous avons rassemblé les résultats des mesures des résistances à la compression à des jours 7, 28 et 60 jours.

**Tableau V.20 :** Développement de résistance à la compression des bétons étudiés.

Les bétons	RC (7J)	RC (28J)	RC (60J)
<b>B0</b>	27.57	42.96	51
<b>BA</b>	26.87	35.73	41.55
<b>BB</b>	26.21	35.43	38.59
<b>BC</b>	23.13	34.34	37.69
<b>BD</b>	22	34.62	37.40
<b>BE</b>	19.42	31.26	36.53
<b>BF</b>	11.47	26.48	35.03



**Figure V.24 :** Variation de résistance à la compression en fonction du taux de substitution

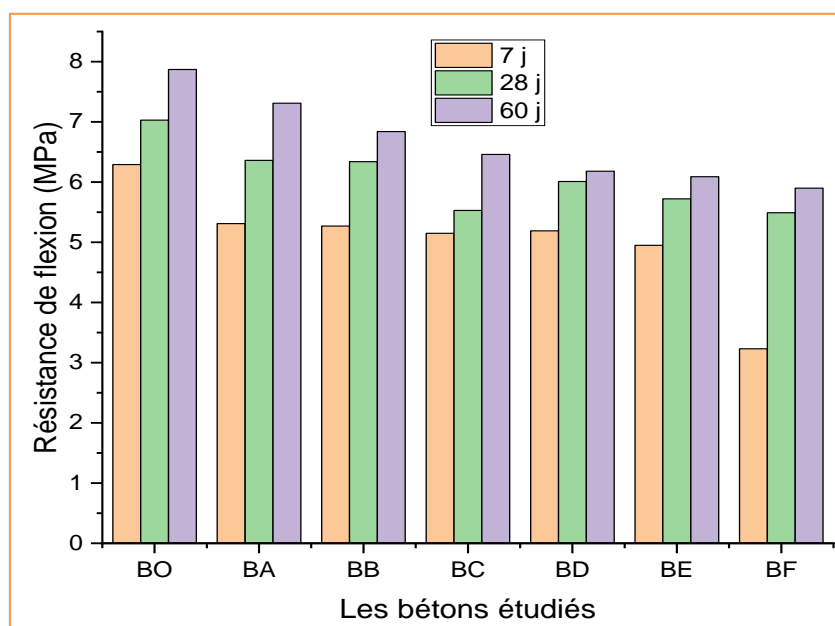
Il a été observé que la résistance à la compression augmente avec l'âge de conservation et diminue avec l'augmentation le pourcentage de plastique et caoutchouc, la valeur minimal de la résistance à la compression est de 11.47 MPa pour un béton BF a 7 jours et la valeur maximal de résistance à la compression est de 51 MPa pour un béton témoin a 60 jours ,la résistance à la compression diminue jusqu'à 2.5 % et 58% pour un béton BA et BF respectivement à 7 jours et diminue jusqu'à 17% et 38% pour un béton BA et BF respectivement à 28 jours ,et diminue jusqu'à 18.5 % et 31% pour un béton BA et BF respectivement à 60 jours par rapport au béton ordinaire [144-42 -149].

**V.2.8.3 Résistance à la flexion à 7, 28, et 60 jours :**

Les résultats des tests destructifs effectués sur une presse hydraulique présentent les valeurs de résistance à la flexion à 7, 28 et 60 jours. Vous pouvez les retrouver dans la figure V.25 et le tableau V.21.

**Tableau V.21 : Résistance à la flexion des bétons étudiés.**

Les bétons	RF (7J)	RF (28J)	RF (60J)
<b>B0</b>	6.29	7.03	7.87
<b>BA</b>	5.31	6.36	7.31
<b>BB</b>	5.27	6.34	6.84
<b>BC</b>	5.15	5.53	6.46
<b>BD</b>	5.19	6.01	6.18
<b>BE</b>	4.95	5.72	6.09
<b>BF</b>	3.23	5.49	5.90



**Figure V.25 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution.**

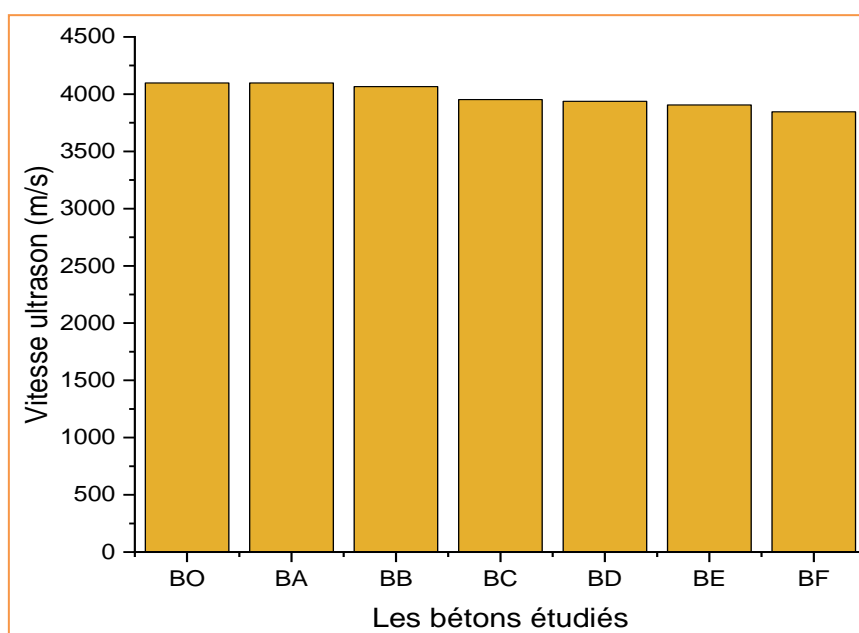
D'après la figure V.25, il est observé que la résistance à la flexion des bétons varie en fonction des jours de conservation dans l'eau ainsi que du pourcentage de plastique et de caoutchouc. Le béton BF affiche une résistance minimale de 3.23 MPa à 7 jours, tandis que le béton B0 atteint une valeur maximale de 7.87 MPa à 60 jours. La résistance diminue de 16 % à 49 % pour les bétons BA et BF respectivement à 7 jours, de 9.5 % à 22 % pour les bétons B0 et B6 respectivement à 28 jours, et de 7 % à 25 % pour les bétons B0 et B6 respectivement à 60 jours. Cette baisse de résistance est attribuée à une faible adhérence entre les granulats de caoutchouc et de plastique et la pâte de ciment, créant des vides dans le mélange de béton, ce qui conduit à une diminution de la résistance. De plus, la rigidité du plastique et du caoutchouc est inférieure à celle de l'agrégat naturel [151,152].

**V.2.8.4 Vitesse ultrasonique à 28 jours :**

Les résultats de l'essai de vitesse ultrasonique sont présentés à la figure V.26 et tableau V.22.

**Tableau V.22 :** Vitesse ultrasonique pour les sept bétons étudiés.

Les bétons	Vitesse ultrasonique (m/s)
<b>BO</b>	4098.36
<b>BA</b>	4098.36
<b>BB</b>	4065.64
<b>BC</b>	3952.62
<b>BD</b>	3937.25
<b>BE</b>	3906.25
<b>BF</b>	3846.15



**Figure V.26 :** variation de la vitesse ultrasonique en fonction de taux de substitution

D'après la figure V.26, qui montre l'évolution de la vitesse ultrasonique des bétons étudiés en fonction du taux de substitution. On remarque que la valeur maximale de la vitesse ultrasonique est de 4098.36 m/s pour un béton BO et BA. Après cette valeur, la vitesse ultrasonique continue à baisser en augmentation du pourcentage de plastique et de caoutchouc. La valeur minimale enregistrée est de 3846.15 m/s pour un béton BF. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs [42-152-153].

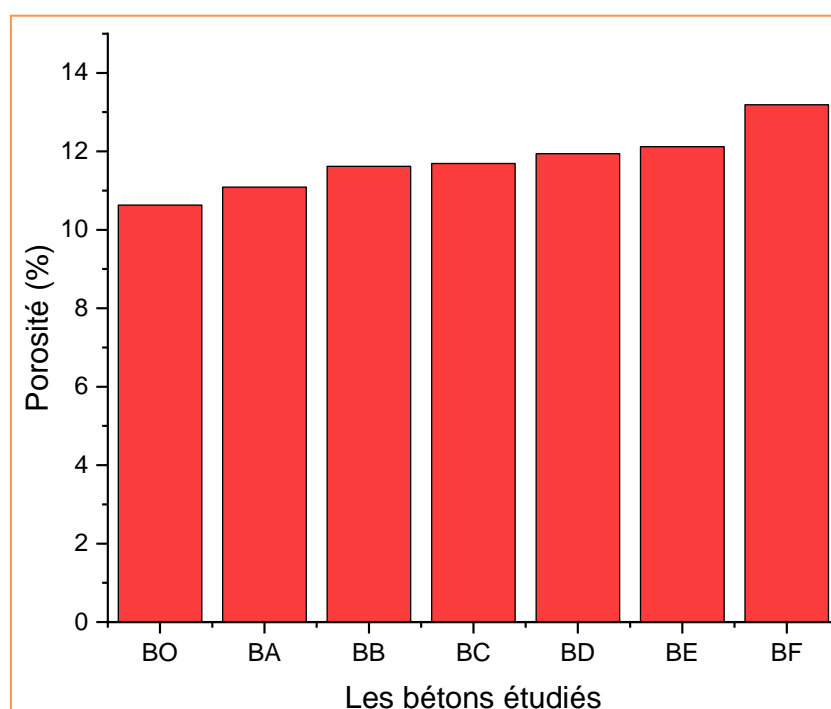
**V.2.9 Les résultats des essais de durabilité du béton :**

**V.2.9.1 Essai de porosité :**

Les résultats de l'essai de vitesse ultrasonique sont présentés à la figure V.27 et tableau V.23.

**Tableau V.23 : Porosité pour les sept bétons étudiés.**

Les bétons	Porosité (%)
<b>BO</b>	10.63
<b>BA</b>	11.09
<b>BB</b>	11.62
<b>BC</b>	11.69
<b>BD</b>	11.94
<b>BE</b>	12.12
<b>BF</b>	13.19



**Figure V.27 : Variation de porosité en fonction de taux de substitution**

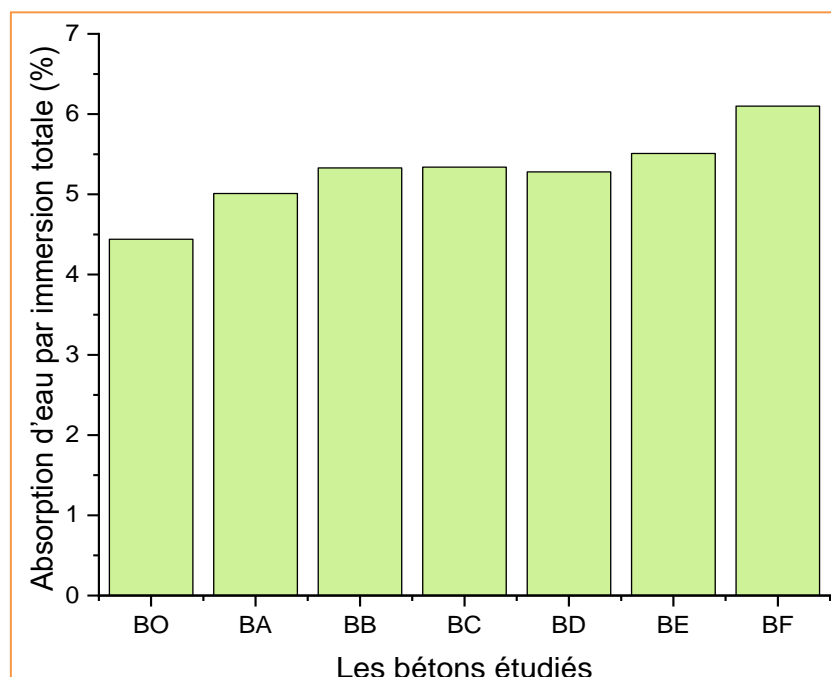
Suivant la figure V.27, on remarque que la porosité du béton augmente avec l'augmentation des pourcentages de plastique faux plafond et de caoutchouc. La porosité augmente de 10.63 % à 13.19 % pour un béton B0 et BF respectivement. Cette augmentation est causée par le plastique ou du caoutchouc incorporé dans le mélange de béton, créant de petits espaces vides ou des bulles à l'intérieur de la structure du béton. Ces espaces vides peuvent augmenter la porosité du béton. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs [40-154-155].

### V.2.9.2 Essai d'absorption d'eau par immersion totale :

Dans cette partie, les valeurs d'absorption d'eau par immersion totale sont présentées à la figure V.28 et au tableau V.24.

**Tableau V.24 :** Absorption d'eau par immersion totale pour les sept bétons étudiés.

Les bétons	Absorption d'eau (%)
<b>BO</b>	4.44
<b>BA</b>	5.01
<b>BB</b>	5.33
<b>BC</b>	5.34
<b>BD</b>	5.28
<b>BE</b>	5.51
<b>BF</b>	6.10



**Figure V.28 :** Variation de l'absorption d'eau par immersion totale en fonction de taux de substitution

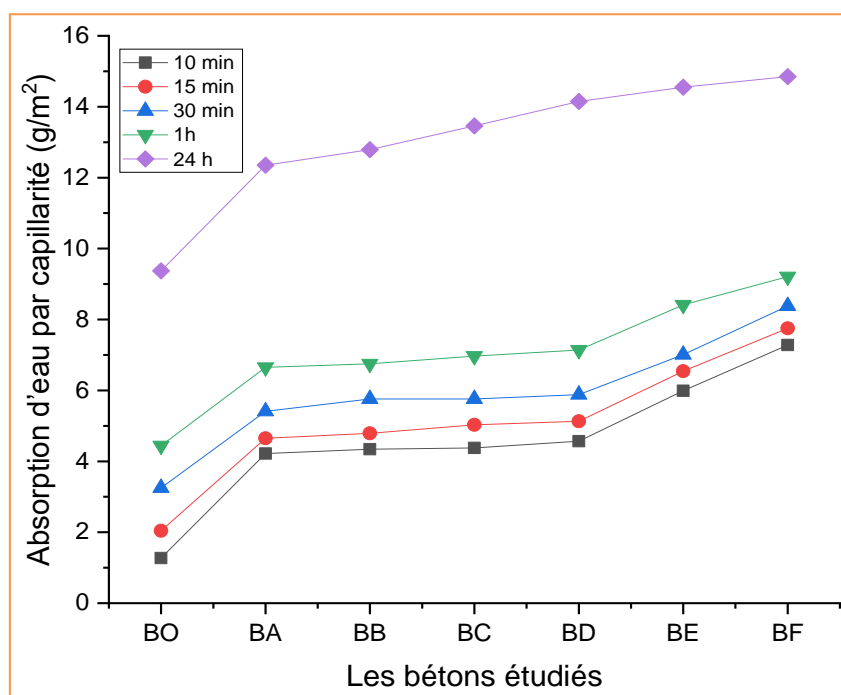
Suivant la figure V.28, on remarque que l'absorption d'eau par immersion totale du béton augmente avec l'augmentation des pourcentages de plastique faux plafond et de caoutchouc. L'absorption d'eau augmente de 4.44 % à 6.10 % pour un béton B0 et BF respectivement. Cette augmentation est causée par le plastique ou du caoutchouc incorporé dans le mélange de béton, créant de petits espaces vides ou des bulles à l'intérieur de la structure du béton. Ces espaces vides peuvent augmenter l'absorption d'eau du béton [155, 156].

### V.2.9.3 Absorption d'eau par capillarité :

Les données sur l'absorption d'eau par capillarité sont fournies dans la figure V.29 et le tableau V.25.

**Tableau V.25 :** Absorption d'eau par capillarité pour les sept bétons étudiés.

Temps	10 min	15 min	30 min	1 h	24 h
<b>B0</b>	1.27	2.04	3.25	4.44	9.37
<b>BA</b>	4.22	4.65	5.41	6.65	12.35
<b>BB</b>	4.34	4.79	5.76	6.75	12.79
<b>BC</b>	4.38	5.03	5.76	6.97	13.46
<b>BD</b>	4.57	5.13	5.88	7.14	14.15
<b>BE</b>	5.99	6.54	7.01	8.41	14.55
<b>BF</b>	7.28	7.75	8.38	9.21	14.85



**Figure V.29 :** Variation de l'absorption d'eau par capillarité en fonction de taux de substitution

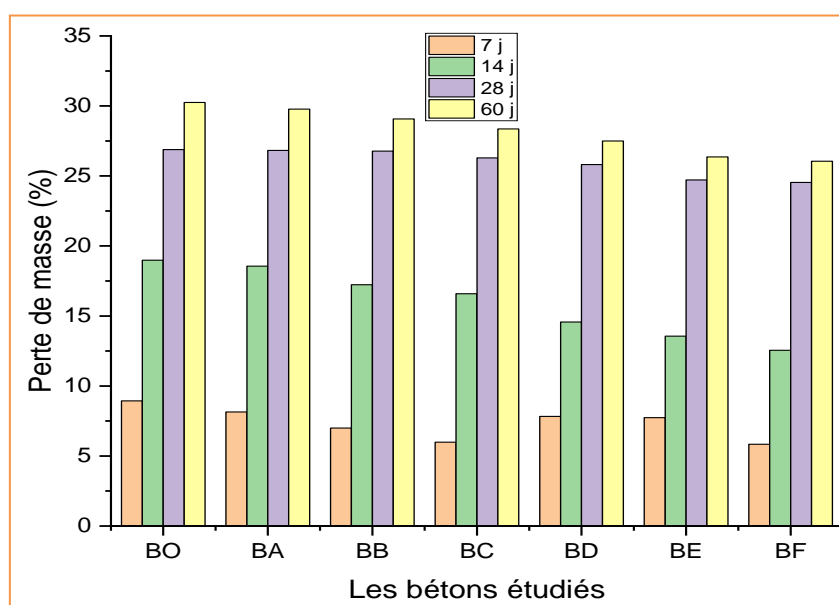
D'après la figure précédente, on peut noter que l'absorption d'eau par capillarité augmente avec le temps et aussi l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation des pourcentages de plastique et de caoutchouc. La valeur minimale de l'absorption d'eau est de  $1.27 \text{ g/m}^2$  pour un béton ordinaire à 10 min et la valeur maximale de l'absorption d'eau est de  $14.85 \text{ g/m}^2$  pour un béton BF à 24 heures. On remarque qu'entre un béton BO et BA, l'absorption d'eau par capillarité augmente d'une façon très significative. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par certains auteurs [40-157].

**V.2.9.4 Essai perte de masse au milieu d'acide sulfurique :**

Après 28 jours de conservation des éprouvettes dans l'eau, elles sont extraites et immergées dans un milieu acide ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de concentration 5 % pendant une durée de 7,14, 28 et 60 jours. Les résultats de perte de masse au milieu acide sulfurique sont présentés à la figure V.30 et au tableau V.26.

**Tableau V.26 :** Perte de masse au milieu d'acide sulfurique pour les sept bétons étudiés.

Les bétons	7jours	14 jours	28 jours	60 jours
<b>B0</b>	8.94%	18.98%	26.88%	30.25%
<b>BA</b>	8.15%	18.56%	26.82%	29.77%
<b>BB</b>	7%	17.23%	26.77%	29.07%
<b>BC</b>	5.99%	16.59%	26.29%	28.36%
<b>BD</b>	7.83%	14.57%	25.81%	27.50%
<b>BE</b>	7.74%	13.56%	24.72%	26.36%
<b>BF</b>	5.84%	12.55%	24.54%	26.05%



**Figure V.30 :** Variation de perte de masse des bétons étudiés dans une solution  $\text{H}_2\text{SO}_4$

La figure V.30, montre que la perte de masse diminue avec l'augmentation des pourcentages de plastique et de caoutchouc, tandis que la perte de masse augmente avec le temps. Le béton ordinaire (B0) a connu une perte de masse maximale de 30.25 % à 60 jours, tandis que le béton B6 a connu une perte de masse minimale de 5.84 % à 7 jours. Les déchets de plastique et de caoutchouc réduisent la pénétration du gypse dans les pores, ce qui signifie qu'ils réduisent la pénétration du gypse et la perte de masse [157]. En conséquence, les déchets de plastique et de caoutchouc ont un comportement favorable dans les milieux acides.

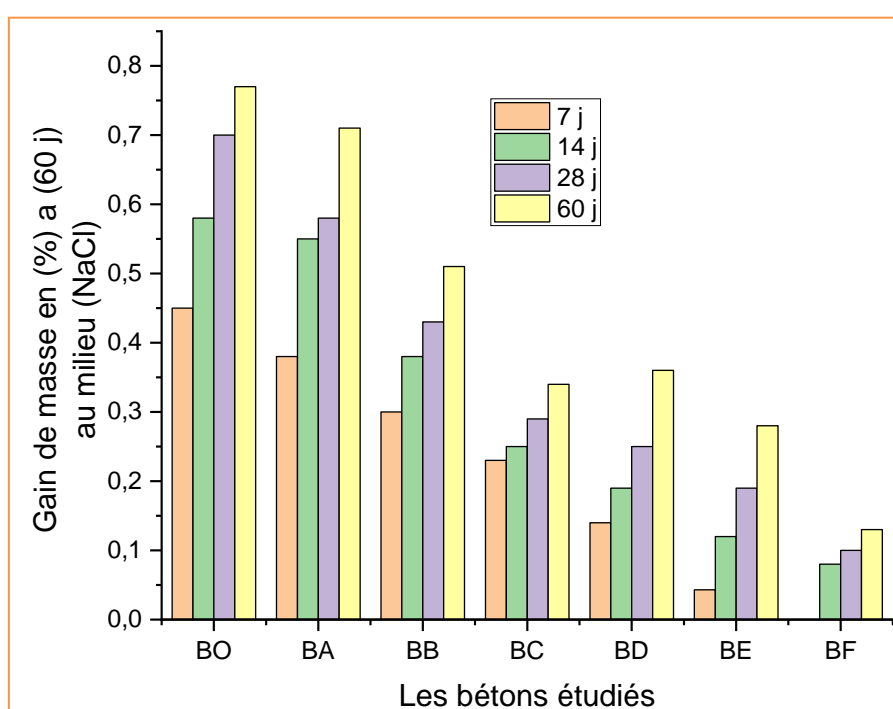
**V.2.9.5 Essai gain de masse dans un milieu chlorure de calcium (NaCl) :**

**a) Sel NaCl :**

Les résultats de l'essai de la perte de masse sont présentés à la figure V.31 et tableau V.27.

**Tableau V.27 :** Gonflement du béton au milieu NaCl pour les sept bétons étudiés.

Les bétons	7jours	14 jours	28 jours	60 jours
<b>BO</b>	0.45%	0.58%	0.70%	0.77%
<b>BA</b>	0.38%	0.55%	0.58%	0.71%
<b>BB</b>	0.30%	0.38%	0.43%	0.51%
<b>BC</b>	0.23%	0.25%	0.29%	0.34%
<b>BD</b>	0.14%	0.19%	0.25%	0.36%
<b>BE</b>	0.043%	0.12%	0.19%	0.28%
<b>BF</b>	0%	0.08%	0.10%	0.13%



**Figure V.31 :** Variation de gain de masse des bétons étudiés dans une solution NaCl

D'après la figure V.31, on remarque que le gain de masse augmente avec les jours et diminue avec l'augmentation des pourcentages de plastique et caoutchouc. Entre 28 jours et 60 jours, le gain de masse augmente d'une manière très significative. On remarque également que la cinétique de l'évolution de gain de masse varie entre le béton témoin et le béton à base de déchets de plastique et de caoutchouc. Par exemple, la valeur minimale du gain de masse est de 0% pour un béton BF à 7 jours, et la valeur maximale de gain de masse est de 0.77% pour un béton BO à 60 jours.

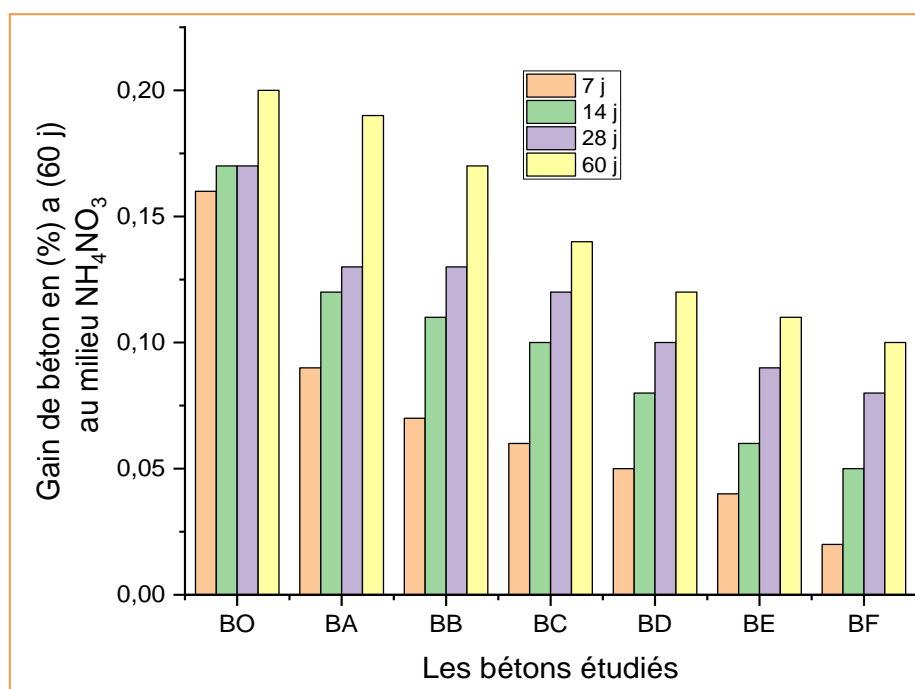
**V.2.9.6 Essai gain de masse dans un milieu nitrate d'ammonium (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) :**

**a) Nitrate d'ammonium NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> :**

Les résultats de l'essai de la perte de masse sont présentés à la figure V.32 et tableau V.28.

**Tableau V.28 :** Gonflement du béton au milieu NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> pour les sept bétons étudiés.

Les bétons	7jours	14 jours	28 jours	60 jours
BO	0.16%	0.17%	0.17%	0.20%
BA	0.09%	0.12%	0.13%	0.19%
BB	0.07%	0.11%	0.13%	0.17%
BC	0.06%	0.10%	0.12%	0.14%
BD	0.05%	0.08%	0.10%	0.12%
BE	0.04%	0.06%	0.09%	0.11%
BF	0.02%	0.05%	0.08%	0.10%



**Figure V.32 :** Variation de gain de masse des bétons étudiés dans une solution NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>

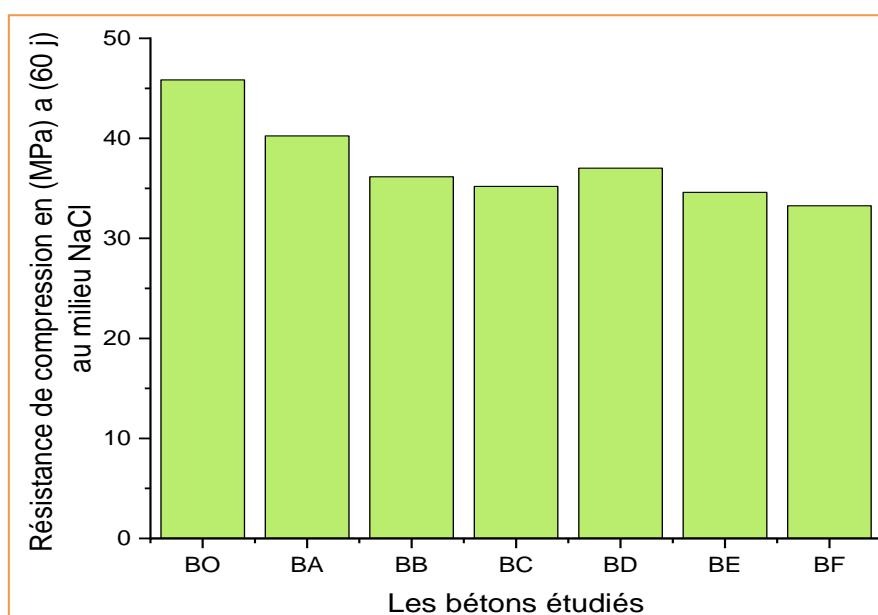
Dans la figure V.32, il est observé que le gain de masse augmente progressivement avec le temps et diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de plastique et de caoutchouc. Le gain de masse le plus bas est de 0.02% à 7 jours pour le béton BF, tandis que le gain de masse le plus élevé est de 0.20% à 60 jours pour le béton BO. De plus, il est noté que le changement de masse entre 14 et 28 jours est pratiquement équivalent. Les réactions chimiques pendant la formation de cristaux expansifs de nitrate de calcium à l'intérieur du béton peuvent causer un gonflement du béton en raison de leur solubilité dans l'eau. Ce phénomène, connu sous le nom de "gonflement du béton", est causé par la réaction du nitrate d'ammonium avec la portlandite pour former du nitrate de calcium, de l'ammoniac et de l'eau.

**V.2.9.7 Résistance à la compression après 60 jours de conservation au milieu NaCl :**

Les résultats de l'essai de résistance à la compression au milieu NaCl sont présentés à la figure V.33 et tableau V.29.

**Tableau V.29 :** Résistance a la compression après 60 jours de conservation au milieu NaCl

Les bétons	RC a (60J)
<b>B0</b>	45.84
<b>BA</b>	40.24
<b>BB</b>	36.15
<b>BC</b>	35.20
<b>BD</b>	37.02
<b>BE</b>	34.60
<b>BF</b>	33.26



**Figure V.33 :** Variation de résistance de compression au milieu de NaCl

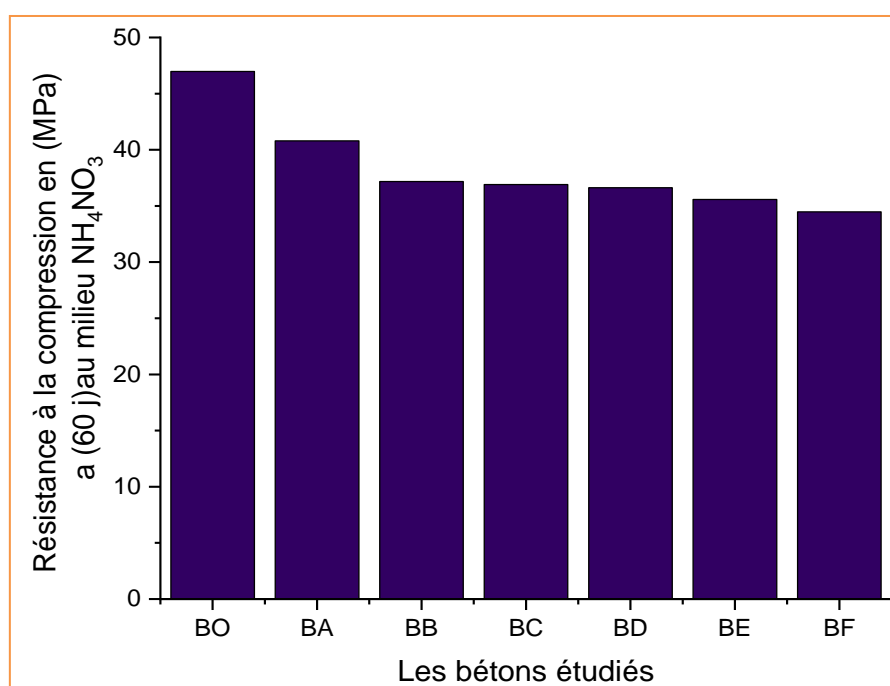
D'après la figure V.33, on remarque que la résistance à la compression au milieu de chlorure de sodium diminue avec l'augmentation des pourcentages de plastique faux plafond et de caoutchouc. Par exemple, la valeur maximale de résistance à la compression est de 45.84 MPa pour un béton ordinaire et la valeur minimale de résistance à la compression est de 33.26 MPa pour un béton BF.

**V.2.9.8 Résistance à la compression après 60 jours de conservation au milieu nitrate d'ammonium :**

Les résultats de l'essai de résistance à la compression au milieu  $NH_4NO_3$  sont présentés à la figure V.34 et tableau V.30.

**Tableau V.30 :** Les résultats de résistance à la compression au milieu  $NH_4NO_3$ .

Les bétons	RC a (60J)
<b>B0</b>	46.98
<b>BA</b>	40.79
<b>BB</b>	37.17
<b>BC</b>	36.91
<b>BD</b>	36.63
<b>BE</b>	35.57
<b>BF</b>	34.48



**Figure V.34 :** Variation de résistance à la compression au milieu de nitrate d'ammonium en fonction des taux de substitutions

Suivant la figure V.34, on remarque que la résistance à la compression au milieu de nitrate d'ammonium diminue avec l'augmentation du pourcentage de plastique et de caoutchouc. La valeur maximale de résistance est de 63.85 MPa au béton ordinaire, et la valeur minimale de résistance est de 45.85 MPa au béton qui contient 4% caoutchouc et 6% de plastique faux plafond.

### V.3 Conclusion :

Sur la base des résultats expérimentaux à l'état frais et durci obtenus, les conclusions suivantes ont été tirées :

- L'ajout des fines de caoutchouc et sable de plastique PVC type forex ou faux plafond dans le béton diminue l'affaissement, la densité fraîche et augmente l'air occlus.
- L'augmentation des pourcentages des fines de caoutchouc et sable de plastique PVC type forex ou faux plafond dans le béton conduit à une diminution de la masse volumique à l'état durci.
- L'ajout des fines de caoutchouc et sable de plastique PVC type forex ou faux plafond dans le béton a un effet négatif sur la résistance de compression et de traction par flexion : plus le pourcentage de caoutchouc et plastique augmente, plus ces résistances chutent.
- La vitesse ultrasonique diminue avec l'augmentation des pourcentages de caoutchouc et de deux types de plastique.
- La porosité, l'absorption d'eau par capillarité et l'absorption d'eau par immersion totale augmentent avec l'augmentation des pourcentages de ces additives.
- La perte de masse dans le milieu acide sulfurique diminue avec l'augmentation des pourcentages de ces additives, donc on conclut que ces déchets ont un effet positif dans un environnement sulfurique.
- Pour augmenter le pourcentage de ces additives, on registre une diminution de gain de masse dans les milieux nitrate d'ammonium et chlorure de calcium.
- Les pertes de résistances dans les milieux nitrates d'ammoniums et chlorures de calcium sont diminuées avec l'augmentation des pourcentages de ces additives.

## CHAPITRE VI

### MODELISATION DE PLAN D'EXPERIENCE JMP

#### VI.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons comparer les résultats de laboratoire avec les résultats du programme d'essais pilotes JMP et déterminer s'il existe une correspondance entre les résultats.

Ce chapitre est divisé en trois parties : la partie A, sur la modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc, la partie B présente sur la modélisation des réponses physiques, et mécaniques des bétons à base des fines de caoutchouc et sable de plastique forex, et la partie C, sur la modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique faux plafond.

**Partie A :** Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc

#### VI.2 Réalisation du plan d'expérience au laboratoire :

Dans notre étude, on a choisi 1 facteur et 6 réponses :

- Le pourcentage de caoutchouc (substitution du ciment)

Les réponses étudiées sont :

- L'affaissement
- La masse volumique à l'état frais
- Lair occlus
- La résistance à la compression à 28 jours
- La résistance à la flexion à 28 jours
- La vitesse ultrason

Tableau VI.1: Synthèse de plan d'expérience.

Facteur	Les déchets de caoutchouc				
Niveau 1, (caoutchouc %)	0	2	4	6	8
Réponse 1	L'affaissement				
Réponse 2	Masse volumique				
Réponse 3	Lair occlus				
Réponse 4	Résistance à la compression a (28J)				
Réponse 5	Résistance à la flexion a (28J)				
Réponse 6	Vitesse ultrason				

### VI.2.1 Analyse des résultats :

Pour l'analyse des résultats, nous avons utilisé le logiciel spécialisé en statique et plan d'expérience JMP 7.

### VI.2.2 Modélisation de la réponse physique et mécanique :

#### VI.2.2.1 Étude statistique avec une approche factorielle :

Le plan factoriel est une approche statistique efficace pour organiser des études expérimentales et évaluer les impacts primaires et secondaires entre les variables et les variables d'effet indépendantes. [158-159-160]. La réponse attendue est extraite de l'équation mathématique suivante :

$$Y = X_0 + X_1R \quad (1)$$

Où : (Y) est la réponse attendue et ( $X_0$ ,  $X_1$ ) sont les coefficients du modèle, et R est le caoutchouc (%).

**VI.2.2.2 Corrélation :** (Maniabilité, densité, teneur en air, résistance à la compression, résistance à la flexion et vitesse d'impulsion ultrasonique).

Les résultats des essais expérimentaux présentés dans le tableau VI.2. Nous avons cinq expériences proposées par plan factoriel complet.

**Tableau VI.2 : Résultats expérimentaux.**

Test	Caoutchouc (%)	AF (cm)	DN (kg/m <sup>3</sup> )	LO (%)	RC (MPa)	RF (MPa)	UL (m/s)
1	0	8	2.38	1.2	42.96	7.03	4098.36
2	2	8.5	2.33	1.4	43.97	6.33	4006.41
3	4	9	2.31	1.5	32.54	6.14	3952.57
4	6	10	2.25	1.6	28.15	4.96	3921.57
5	8	14.5	2.20	1.9	22.85	4.96	3831.42

Où, Af : Affaissement, MV : Masse volumique, LO : Lair occlus, RC : Résistance à la compression, RF : Résistance à la flexion, UL : Vitesse ultrason

### VI.2.2.3 Vérification de la validité des modèles proposés :

La corrélation entre les valeurs observées et prédites est présentée à la figure VI.1, et les résultats expérimentaux des essais de caractérisation sont présentés dans le tableau VI.3. D'après la figure VI.1, on peut voir qu'il existe une forte relation entre les résultats observés et les résultats prévus. On peut dire que les modèles appliqués sont très précis dans la prédiction du comportement du caoutchouc dans les propriétés physiques et mécaniques du béton, et d'après le tableau VI.3. On peut observer que les coefficients de corrélation sont compris entre 0.76 et 0.97 et sont proches de 1, ce qui indique une bonne corrélation entre le modèle prédit et le modèle expérimental.

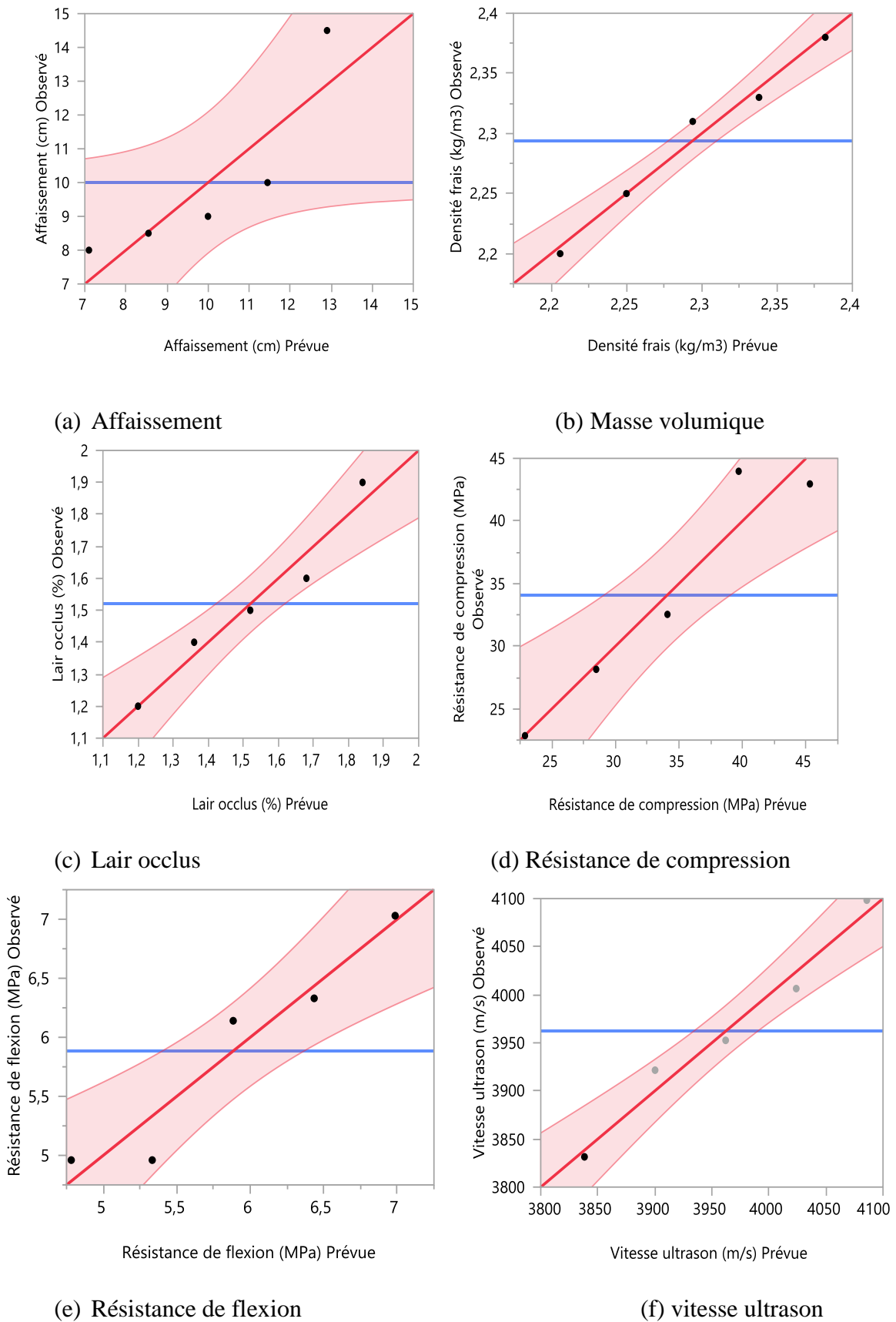


Figure VI.1 : Corrélation entre les réponses observées et prédites

Tableau VI.3 : Résultats expérimentaux des essais de caractérisation.

	AF	MV	LO	RC	RF	VU
<b>R<sup>2</sup></b>	0.76	0.98	0.95	0.92	0.93	0.97
<b>R<sup>2</sup> ajusté</b>	0.68	0.97	0.94	0.89	0.91	0.96
<b>Racine de l'erreur quadratique moyenne</b>	1.46	0.01	0.06	2.95	0.26	18.79
<b>Moyenne de la réponse</b>	10	2.29	1.52	34.09	5.86	3962.06

VI.2.2.4 Affaissement :

La figure VI.2 (a) montre les principaux diagrammes d’effets pour la réponse de maniabilité du béton, en tenant compte des facteurs de teneur en caoutchouc (%). On peut voir que l’affaissement passe de 7.1 à 12.9 cm en raison de la variation du pourcentage de caoutchouc de 0 à 8%. Il a également été constaté que la teneur en poudre de caoutchouc a un effet positif sur cette réponse. Ces résultats sont en accord avec l’équation mathématique, Eq.2 :

$$Affaissement (cm) = 10 + 2.9 \left( \frac{Caoutchouc - 4}{4} \right) \tag{2}$$

Sur la figure des résidus en fonction des valeurs prédites (figure 6.2 b), on peut voir que les résidus normalisés sont supérieurs a +1.5 et inférieurs a -1.5. Cela suggère qu’il y a un léger écart entre les résultats attendus et les résultats expérimentaux dans le graphique.

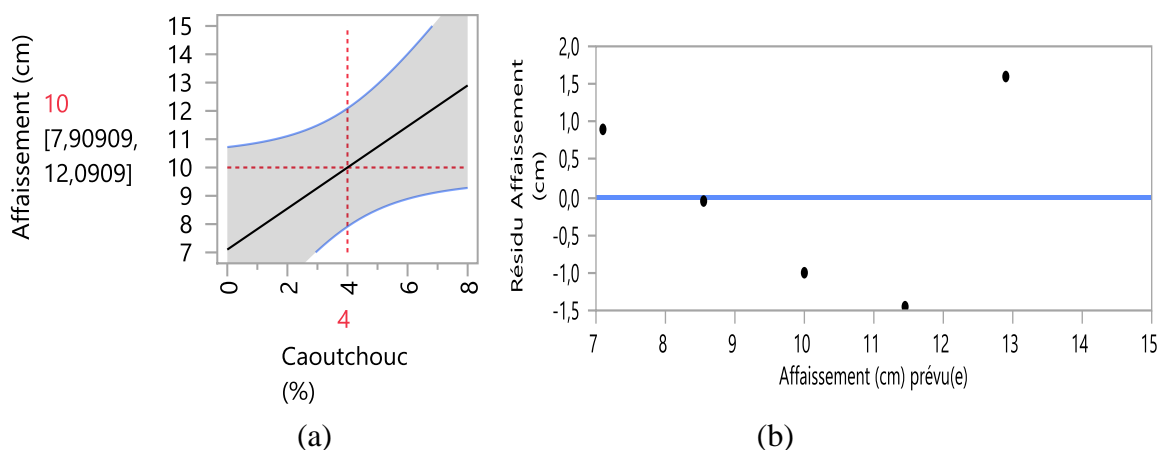


Figure VI.2 : (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites

2.2.5 Lair occlus :

D’après la figure VI.3 (a), on peut noter que la teneur en air augmente de 1.2 à 1.8 % avec une augmentation du pourcentage de caoutchouc de 0 à 8 %. Alors que l’augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc a une légère influence sur la teneur en air. Ces résultats sont en accord avec l’équation mathématique Eq. 3 :

$$\text{Air occlus (\%)} = 1.52 + 0.32 \left( \frac{\text{Caoutchouc} - 4}{4} \right) \tag{3}$$

Il est assez évident, d’après la figure 6.3(b) montrant les résidus en fonction des valeurs attendues, que les résidus normalisés sont supérieurs à +0.05 et inférieurs a -0.1. Il indique que les points sont répartis de manière cohérente le long de la diagonale. Cela indique la convergence des résultats expérimentaux et numériques.

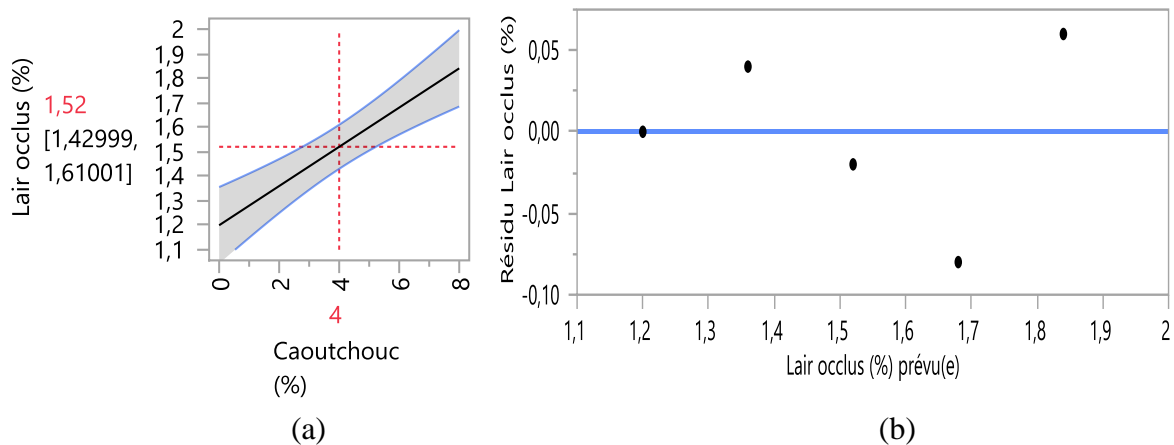


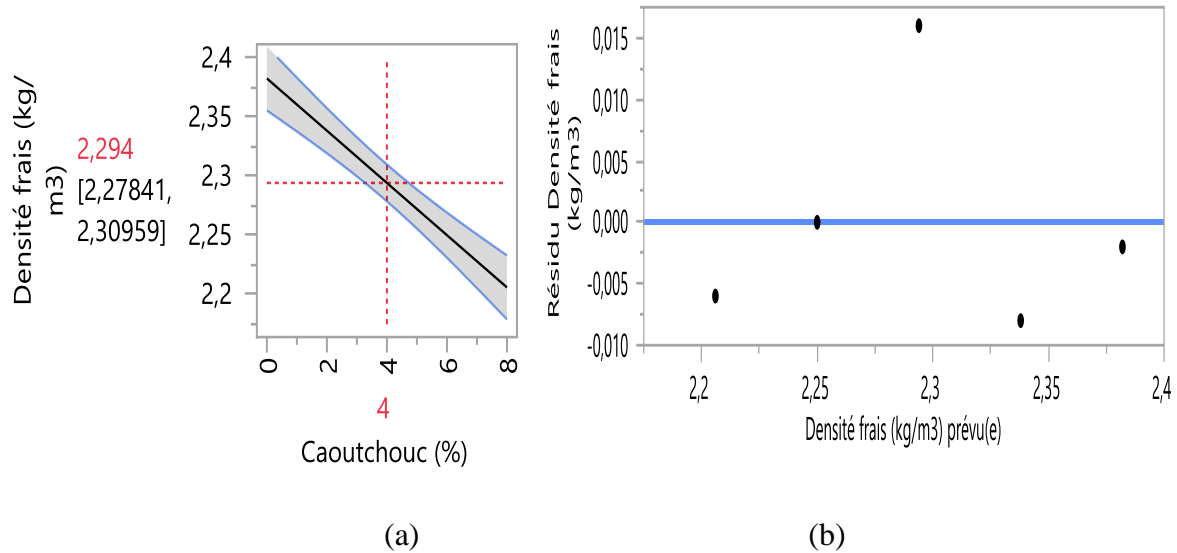
Figure VI.3 : (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites

VI.2.2.6 Masse volumique a l’état frais:

La figure VI.4 (a) montre les principaux diagrammes d’effets pour la réponse de la masse volumique frais du béton. On peut noter qu’avec une augmentation du pourcentage de caoutchouc de 0 à 8%, la masse volumique diminue de 2.38 à 2.20 kg/m<sup>3</sup>. Il a également été observé que la teneur de fine de caoutchouc a une influence négative sur la réponse, ce qui montre que lors de l’augmentation de la quantité de caoutchouc, la masse volumique diminue. Ces résultats sont en accord avec l’équation mathématique Eq. 4 :

$$\text{Masse volumique (kg/m}^3\text{)} = 2.294 - 0.088 \left( \frac{\text{Caoutchouc} - 4}{4} \right) \tag{4}$$

D’après la figure 6.4 (b) des résidus en fonction des valeurs prédites, il est tout à fait clair que les résidus normalisés sont supérieurs à +0.015 et inférieurs à -0.010. Le modèle indique une différence négligeable entre la valeur expérimentale et la valeur ajustée.



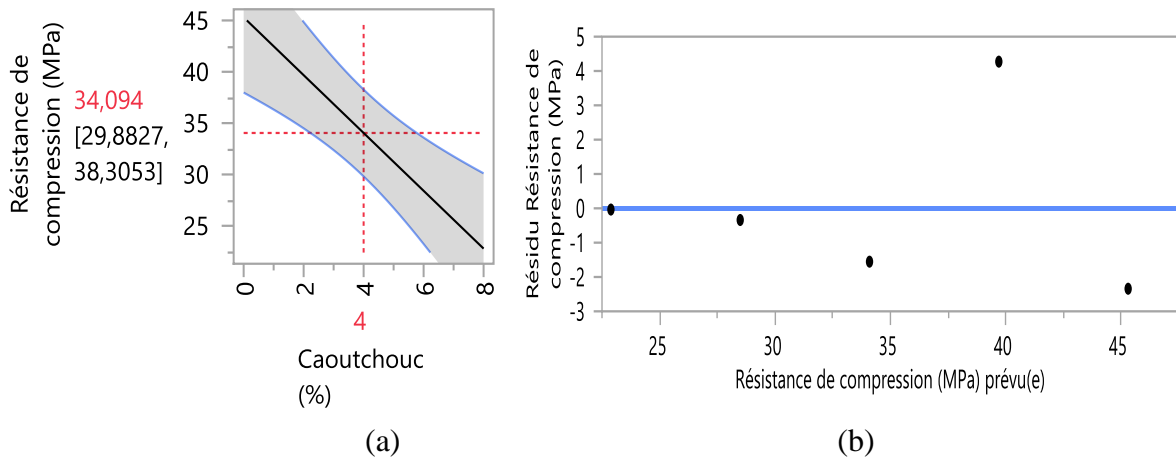
**Figure VI.4 :** (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites

**VI.2.2.7 Résistance à la compression :**

La figure VI.5 (a) montre les principaux diagrammes d’effet pour la réponse de résistance à la compression du béton. Montrer clairement que l’augmentation de la poudre de caoutchouc diminue la résistance à la compression ; remarquablement, en effet, la teneur en poudre de caoutchouc présente un effet négatif élevé sur la réponse. Comme on peut le voir, il y a eu une diminution significative de la résistance à la compression de 45.30 à 22.88 MPa en raison du changement du pourcentage de caoutchouc de 0 à 8%. Ces résultats sont en accord avec l’équation mathématique Eq. 5 :

$$R\acute{e}sistance\ de\ compression\ (MPa) = 34.094 - 11.208 \left( \frac{Caoutchouc - 4}{4} \right) \tag{5}$$

D’après la figure VI.5 (b), qui montre les résidus en fonction des valeurs prédites, il est tout à fait clair que les résidus normalisés sont supérieurs a +4 et inférieurs a -3. Il n’y a pas de points dispersés et les points sont répartis de manière cohérente le long de la diagonale.



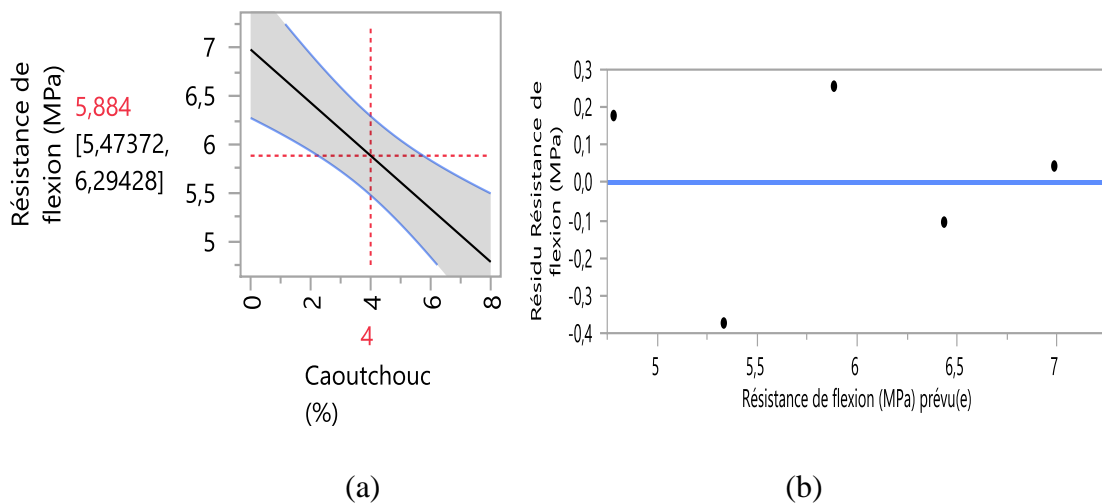
**Figure VI.5 :** Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites

**VI.2.2.8 Résistance à la flexion :**

La figure VI.6 (a) montre les principaux diagrammes d’effet de la réponse à la résistance à la flexion. On peut noter que la résistance à la flexion diminue de 7 à 4.72 MPa avec l’augmentation du pourcentage de caoutchouc de 0 à 8%. On peut noter que la poudre de caoutchouc a un petit effet négatif sur cette réponse. Ces résultats sont en accord avec l’équation mathématique Eq. 6 :

$$\text{Résistance de flexion (MPa)} = 5.864 - 1.142 \left( \frac{\text{Caoutchouc} - 4}{4} \right) \tag{6}$$

D’après la figure des résidus en fonction des valeurs prédites (figure VI.6 b), on a vu que les résidus normalisés étaient supérieurs à +0.3 et inférieurs à -0.4. Le modèle indique une différence négligeable entre la valeur expérimentale et la valeur ajustée.



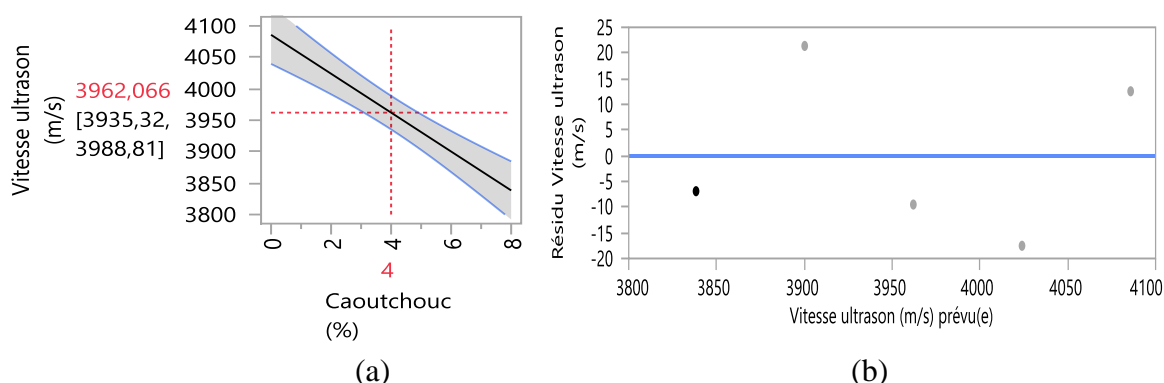
**Figure VI.6 :** (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédites

**VI.2.2.9 Vitesse d’impulsion ultrasonique :**

La figure VI.7 (a) montre les principaux diagrammes d’effet de la réponse ultrasonore à la vitesse d’impulsion du béton, en tenant compte des facteurs de la teneur en caoutchouc (%). On peut voir que la vitesse d’impulsion ultrasonique diminue de 4085.81 à 3838.32 m/s avec l’augmentation du pourcentage de caoutchouc de 0 à 8%. L’augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc a une faible influence sur la réponse. Ces résultats sont en accord avec l’équation mathématique Éq. 7 :

$$Vitesse\ ultrason\ (m/s) = 3962.066 - 123.744 \left( \frac{Caoutchouc - 4}{4} \right) \tag{7}$$

D’après la figure des résidus en fonction des valeurs prédites (figure VI.7 b), on a vu que les résidus normalisés étaient supérieurs à +20 et inférieurs à -20. Ainsi, le modèle planifié spécifie un écart insignifiant entre la valeur ajustée et la valeur expérimentale.



**Figure VI.7 :** (a) Graphique des principaux effets, (b) graphique des résidus en fonction des valeurs prédite

**VI.2.2.10 Comparaison des valeurs prédites avec les valeurs expérimentales à l’aide du modèle JMP :**

Après avoir présenté les résultats, il est noté que l’écart entre les valeurs de prédiction et les valeurs expérimentales est acceptable.

**Tableau VI.4 :** Affaissement.

N	Caoutchouc (%)	AF (cm)	Prévue AF (cm)	Résidu AF (cm)
1	0	8	7.1	0.9
2	2	8.5	8.55	-0.05
3	4	9	10	-1
4	6	10	11.45	-1.45
5	8	14.5	12.9	1.6

**Tableau VI.5:** Masse volumique a l'état frais.

N	Caoutchouc (%)	MV (kg/m <sup>3</sup> )	Prévue DN (kg/m <sup>3</sup> )	Résidu DN (kg/m <sup>3</sup> )
1	0	2.380	2.382	-0.002
2	2	2.330	2.338	-0.008
3	4	2.310	2.294	0.016
4	6	2.250	2.250	0
5	8	2.200	2.206	-0.006

**Tableau VI.6:** Lair occlus.

N	Caoutchouc (%)	LO (%)	Prévue LO (%)	Résidu LO (%)
1	0	1.2	1.20	0
2	2	1.4	1.36	0.04
3	4	1.5	1.52	-0.02
4	6	1.6	1.68	1.68
5	8	1.9	1.84	0.06

**Tableau VI.7:** Résistance de compression.

N	Caoutchouc (%)	RC (MPa)	Prévue RC (MPa)	Résidu RC (MPa)
1	0	42.96	45.302	-2.342
2	2	43.97	39.698	4.272
3	4	32.54	34.094	-1.554
4	6	28.15	28.480	-0.340
5	8	22.85	22.886	-0.036

**Tableau VI.8:** Résistance de flexion.

N	Caoutchouc (%)	RF (MPa)	Prévue RF (MPa)	Résidu RF (MPa)
1	0	7.03	7.006	0.024
2	2	6.33	6.435	-0.105
3	4	6.14	5.864	0.0276
4	6	4.96	5.293	-0.333
5	8	4.86	4.722	0.138

**Tableau VI.9:** Vitesse ultrason.

N	Caoutchouc (%)	UL (m/s)	Prévue UL (m/s)	Résidu UL (m/s)
1	0	4098.36	4085.810	12.55
2	2	4006.41	4023.938	-17.528
3	4	3952.57	3962.066	-9.496
4	6	3921.57	3900.066	21.376
5	8	3831.42	3838.322	-6.902

**Partie B :** Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique forex

**VI.3 Réalisation du plan d’expérience au laboratoire :**

Dans notre étude, on a choisi (02) facteurs :

- Le pourcentage de caoutchouc (substitution du ciment)
- Le pourcentage de plastique (substitution de sable)

Les réponses étudiées sont :

- L’affaissement.
- La masse volumique fraîche.
- La résistance à la compression à 28 jours.
- La perte de masse au milieu d’acide sulfurique à 60 jours.

**Tableau VI.10:** Synthèse de plan d’expérience.

Facteur	Les déchets de caoutchouc et plastique		
Niveau 1, (caoutchouc %)	2	4	4
Niveau 2, (plastique %)	2	4	6
Réponse 1	L’affaissement		
Réponse 2	Densité frais		
Réponse 3	Résistance à la compression		
Réponse 4	Perte de masse au milieu H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		

**VI.3.1 Modélisation de la réponse physique et mécanique** (l’affaissement, densité frais, résistance a la compression, et perte de masse)

Le tableau VI.11 montre les résultats des tests expérimentaux. Un plan factoriel complet nous propose six essais ; le tableau VI.12 rassemble les résultats de l'ajustement, qui montrent une valeur élevée des coefficients de corrélation. Le tableau VI.12 et la figure VI.8 montrent un bon coefficient de corrélation,  $R^2 = 0.941, 0.999, 0.876,$  et  $0.831,$  respectivement, pour l'affaissement, la densité fraîche, la résistance à la compression et la perte de masse. Les valeurs de ( $R^2$ ) et ( $R^2$  adj) sont proches de 1, ce qui indique une forte corrélation entre les modèles expérimentaux et prédits.

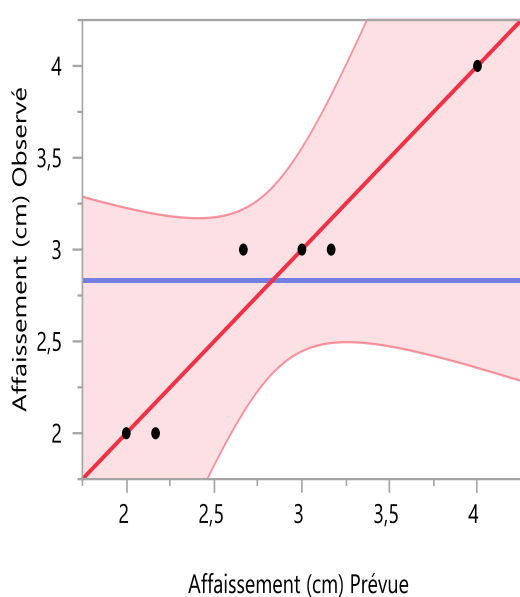
Tableau VI.11 : Expérimental résultats.

Mixes	Caoutchouc (%)	Plastique (%)	AF(cm)	DF(kg/m <sup>3</sup> )	RC(MPa) à (28j)	PM (%) (60j)
B1	2	2	4	2.30	40.56	27.14
B2	2	4	3	2.28	37.89	21.22
B3	2	6	2	2.26	26.57	20.27
B4	4	2	3	2.25	34.62	24.18
B5	4	4	3	2.23	31.26	22.26
B6	4	6	2	2.20	26.48	20.34

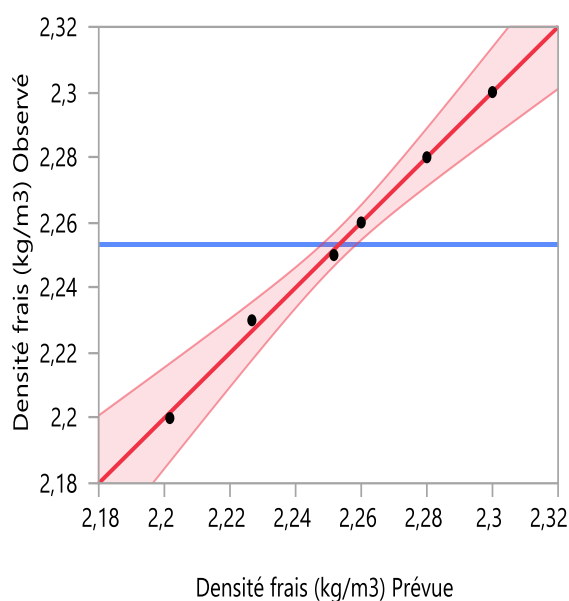
Où, AF : Affaissement, MV : Masse volumique, RC : Résistance à la compression, PM : Perte de masse.

Table VI.12: Les résultats de l'ajustement.

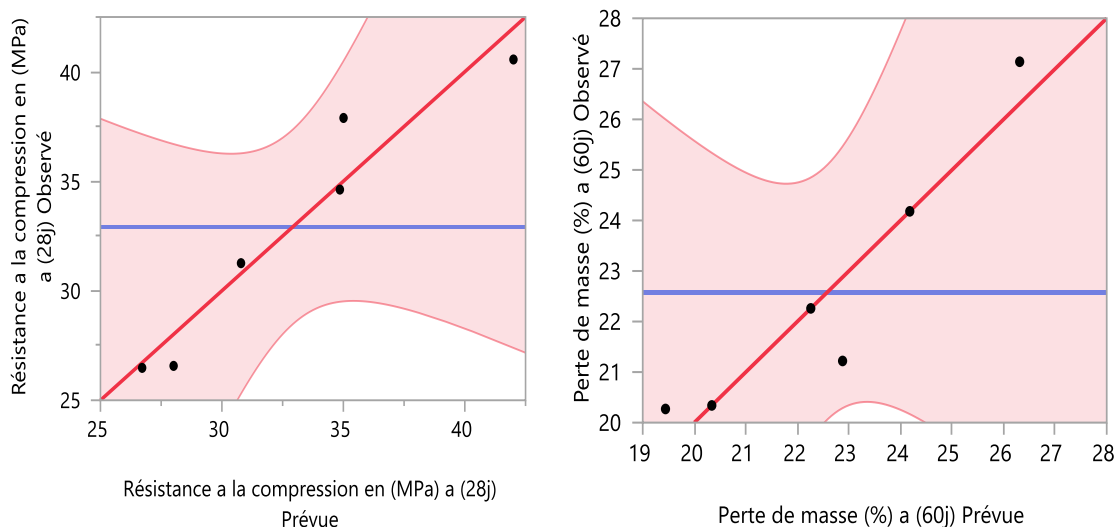
Tests	AF (cm)	MV (kg/m <sup>3</sup> )	RC (MPa)	PM (%)
R <sup>2</sup>	0.941	0.999	0.876	0.831
R <sup>2</sup> ajusté	0.852	0.998	0.809	0.772
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0.288	0.002	3.884	3.297
Moyenne de la réponse	2.833	2.233	30.533	15.887



a) l'affaissement



b) Masse volumique frais



b) Résistance a la compression

d) Perte de masse

**Figure VI.8 :** Corrélation entre les réponses observées et prédites : affaissement, Masse volumique frais, résistance à la compression, perte de masse.

**VI.3.2 Analyse de la variance :**

Les résultats de l’analyse de la variance sont présentés dans le tableau VI.13. Nous voyons que les valeurs de probabilité (Prob.> F) pour l’affaissement, la résistance à la compression et la perte de poids sont respectivement de 0.0869, 0.1105 et 0.1681, supérieure a 5%, ce qui indique plus d’un effet sur la réponse, à l’exception de la densité frais, qui est de 0.0039, inférieure à 5 %, ce qui indique un seul effet sur la réponse.

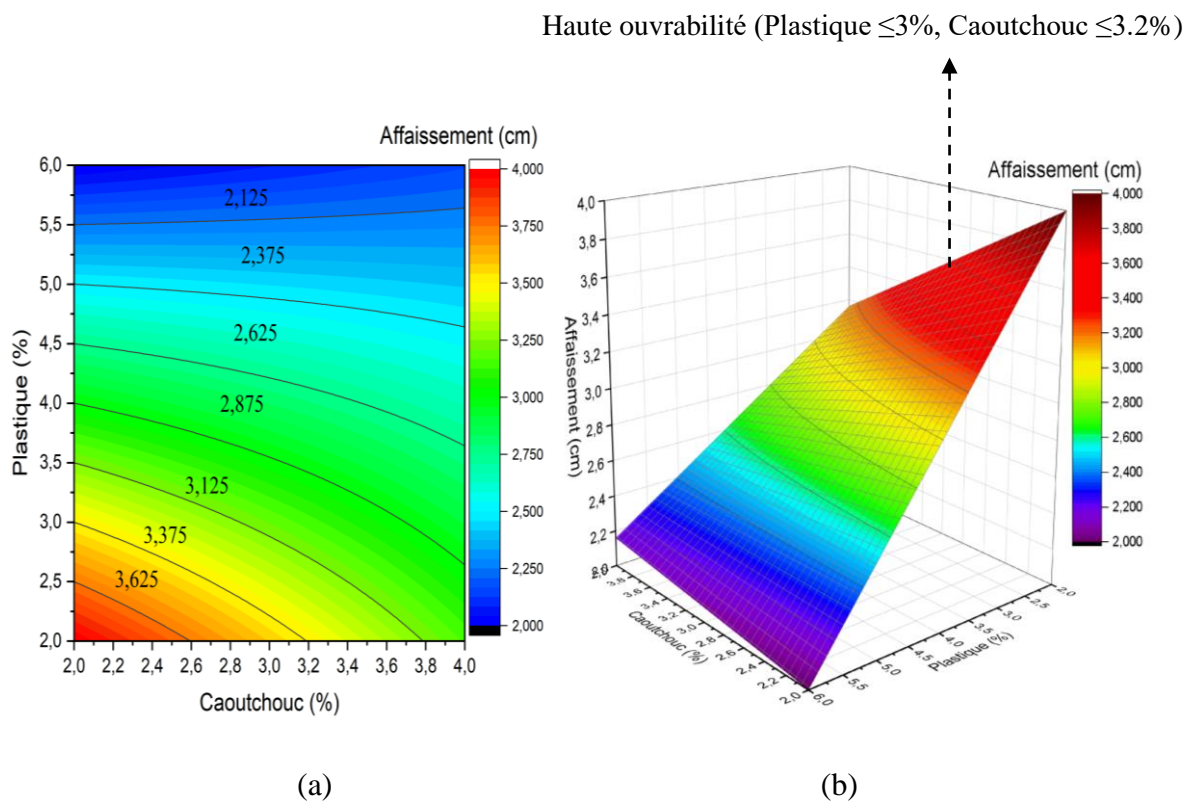
**Tableau VI.13 :** Analyse de variance (ANOVA) pour les modèles dérivés.

Tests	Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
<b>AF (cm)</b>	Total des erreurs de modèle	3	2.6666667	0.888889	10.6667
		2	0.1666667	0.083333	Prob. > F
		5	2.8333333		0.0869
<b>MV (kg/m<sup>3</sup>)</b>	Total des erreurs de modèle	3	0.00631667	0.002106	252.6667
		2	0.00001667	8.333	Prob. > F
		5	0.00633333		0.0039*
<b>RC (MPa)</b>	Total des erreurs de modèle	3	157.70245	52.5675	8.2095
		2	12.80648	6.4032	Prob. > F
		5	170.50893		0.1105
<b>PM (%)</b>	Total des erreurs de modèle	3	31.541667	10.5139	5.1078
		2	4.116817	2.0584	Prob. > F
		5	35.658483		0.1681

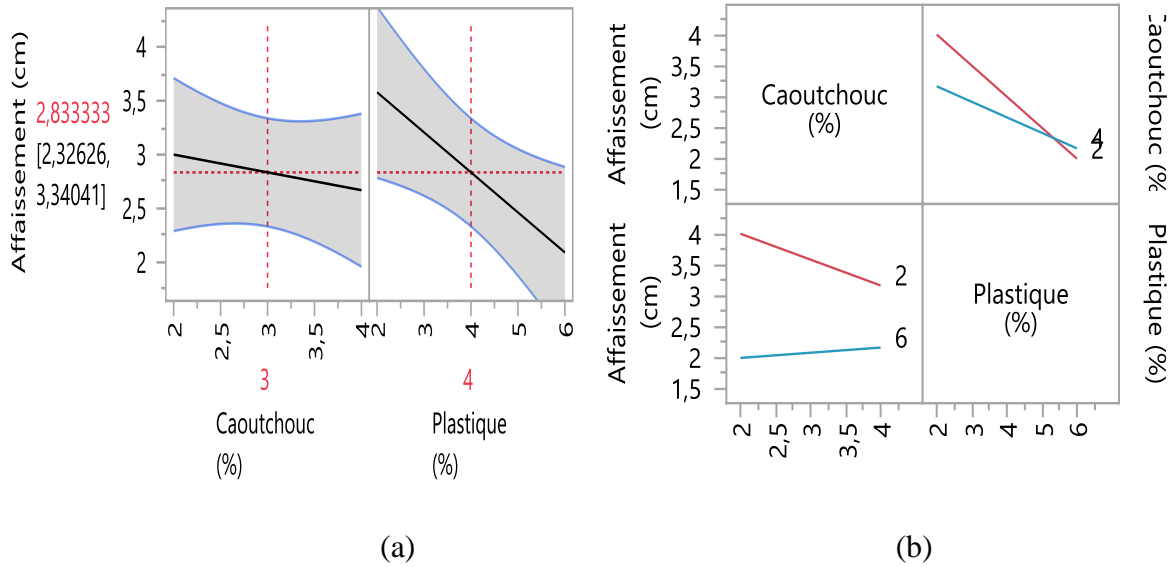
**VI.3.3 L'affaissement :**

Les figures VI.9 (a) et (b) montrent l'iso-réponse et la réponse de surface ; l'augmentation de la quantité de caoutchouc et de plastique entraîne une diminution de l'ouvrabilité. On peut également noter que la plus faible maniabilité a été enregistrée lorsque le pourcentage de caoutchouc et de plastique était inférieur à 3.4 % et 4.5 %, respectivement. La figure VI.10 (a) montre les courbes d'interaction de l'ouvrabilité. L'ouvrabilité diminue de 3 à 2.5 cm avec une augmentation du pourcentage de caoutchouc de 2 à 4 %, et en même temps, l'ouvrabilité diminue de 3 à 2 cm avec une augmentation du pourcentage de plastique de 2 à 6 %. Les coefficients du caoutchouc et du plastique sont respectivement (-0.17) et (-0.75). Ce qui indique que l'effet du plastique est quatre fois supérieur à celui du caoutchouc sur l'ouvrabilité. Les tracés d'interaction pour l'ouvrabilité sont présentés dans la figure VI.10 (b). L'intersection des deux lignes indique que l'interaction des facteurs a un effet considérable sur cette maniabilité. L'équation de cette réponse est la suivante :

$$AF = 2.83 - 0.17 (Caoutchouc - 3) - 0.75 \left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) + (caoutchouc - 3) \left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) 0.25 \tag{8}$$



**Figure VI.9 :** (a) Courbes d'isoreponse et (b) surfaces de réponse de maniabilité



**Figure VI.10 :** (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de maniabilité

### VI.3.4 Masse volumique a l'état frais:

Les figures VI.11 (a) et (b) montrent l'iso-réponse et la réponse de surface pour une densité fraîche. Cela indique qu'avec une augmentation du niveau de caoutchouc et de plastique, la masse volumique diminue. La figure VI.12 (a) montre les principaux tracés des effets pour la masse volumique. Il a été observé que la masse volumique frais diminue légèrement de 2.25 à 2.20 kg/m<sup>3</sup> lorsque le taux de caoutchouc augmente de 2 à 4 (%). Par contre, une diminution de la masse volumique frais est observée de 2.30 à 2.17 kg/m<sup>3</sup>. Lorsque le niveau de plastique passe de 2 à 6 (%). Le mélange à 4 % de caoutchouc et 6 % de plastique présente une faible densité fraîche de 11 % par rapport au mélange à 2 % de caoutchouc et 2 % de plastique. Le plastique et le caoutchouc ont des coefficients de (-0.02). Cela suggère que l'impact du plastique et du caoutchouc sur la masse volumique est égal. Dans la figure VI.12 (b), le graphique montre que les lignes représentant les deux facteurs sont parallèles et ne se croisent pas. Cela suggère que les effets d'interaction entre les deux facteurs sont insignifiants, ce qui signifie que l'impact du facteur caoutchouc sur la réponse de la masse volumique n'est pas influencé par les changements du facteur plastique. Le modèle mathématique des masses volumiques frais est écrit dans l'équation (9) :

$$MV = 2.25 - 0.02 (Caoutchouc - 3) - 0.02 \left( \frac{Plastique - 4}{2} \right) + (Caoutchouc - 3) \left( \frac{Plastique - 4}{2} \right) (-0.0025) \quad (9)$$

Haute masse volumique (plastique  $\leq 4.5$  %, caoutchouc  $\leq 3.3$  %)

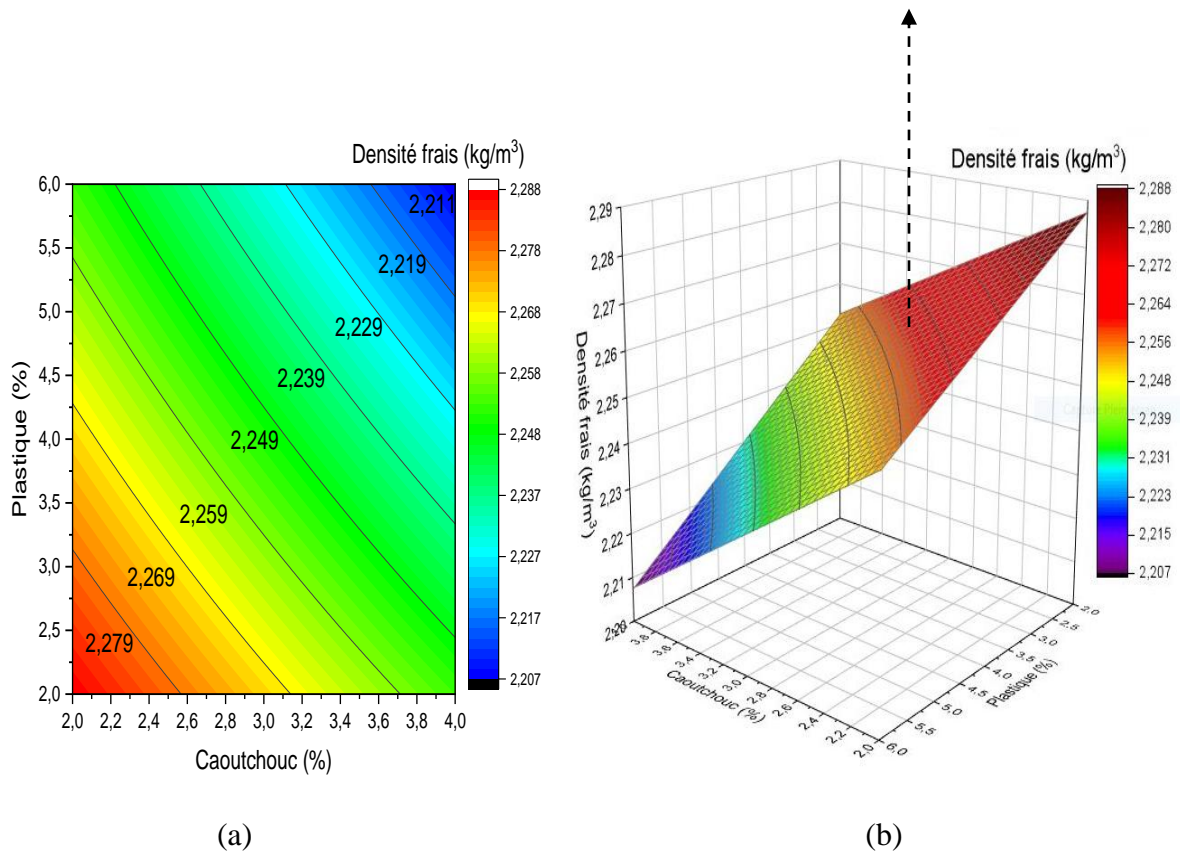


Figure 6.11 : (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de la masse volumique

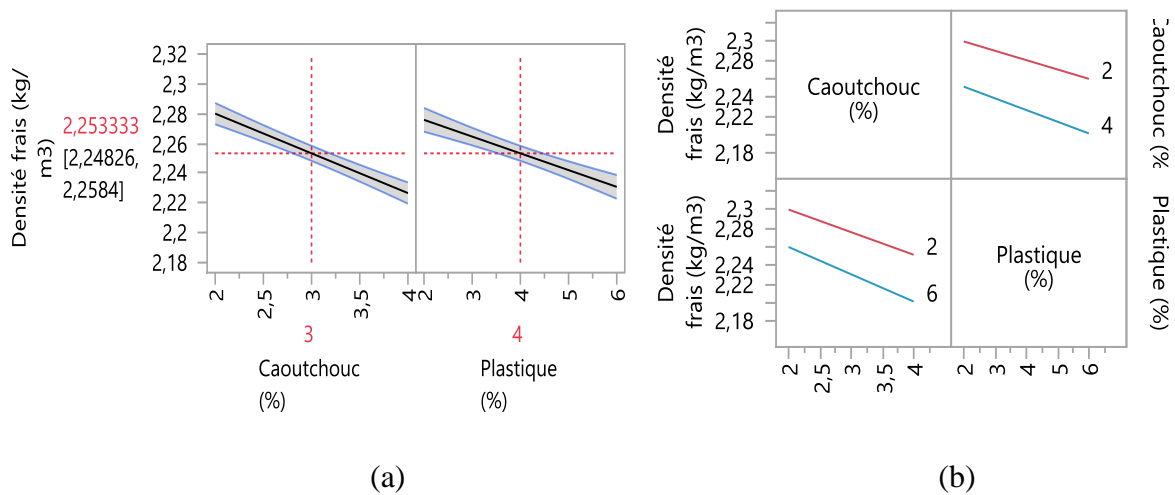


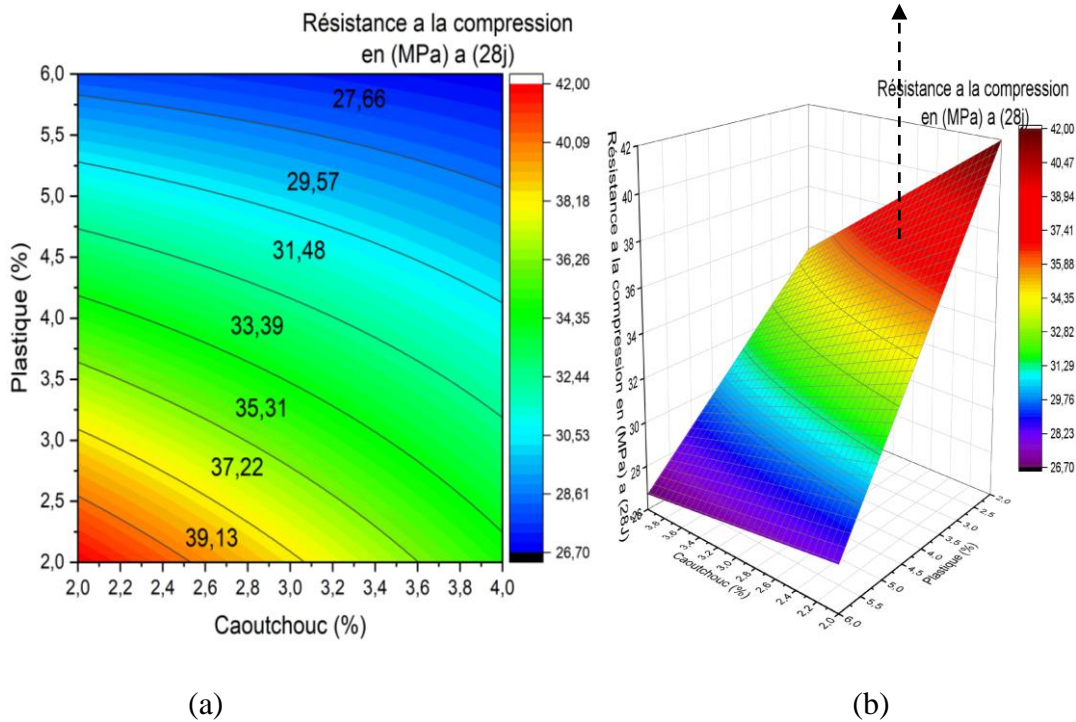
Figure VI.12 : (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de masse volumique

**VI.3.5 Résistance à la compression à (28 j) :**

Les figures VI.13 (a), (b) et 14 (a) montrent les tracés de l'iso-réponse, de la réponse de surface et des principaux effets pour la résistance à la compression à 28 jours, où il est noté que l'augmentation du niveau de caoutchouc et le plastique diminue la résistance à la compression. Le mélange, qui contient 2 % de caoutchouc et 2 % de plastique, présente une résistance à la compression plus élevée que le mélange composé de 4 % de caoutchouc et de 6 % de plastique. Les coefficients du caoutchouc et du plastique sont respectivement (-2.11) et (-5.53), ce qui indique que le caoutchouc et le plastique ont un impact négatif sur la réponse. L'effet du plastique est trois fois plus important que celui du caoutchouc sur la résistance à la compression. Les tracés d'interaction de la résistance à la compression sont présentés sur la figure VI.14 (b). Il a été observé que les deux lignes se croisent étroitement, ce qui suggère une légère influence des facteurs sur la réponse. Le modèle mathématique de la résistance à la compression est écrit dans l'équation (10) :

$$RC = 32.89 - 2.11(Caoutchouc - 3) - 5.53\left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) + (Caoutchouc - 3)\left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) 1.4 \tag{10}$$

Meilleure résistance (Plastique ≤ 3%, Caoutchouc ≤ 3%)



**Figure VI.13 :** (a) Courbes d'isoresponse et (b) surfaces de réponse de résistance à la compression

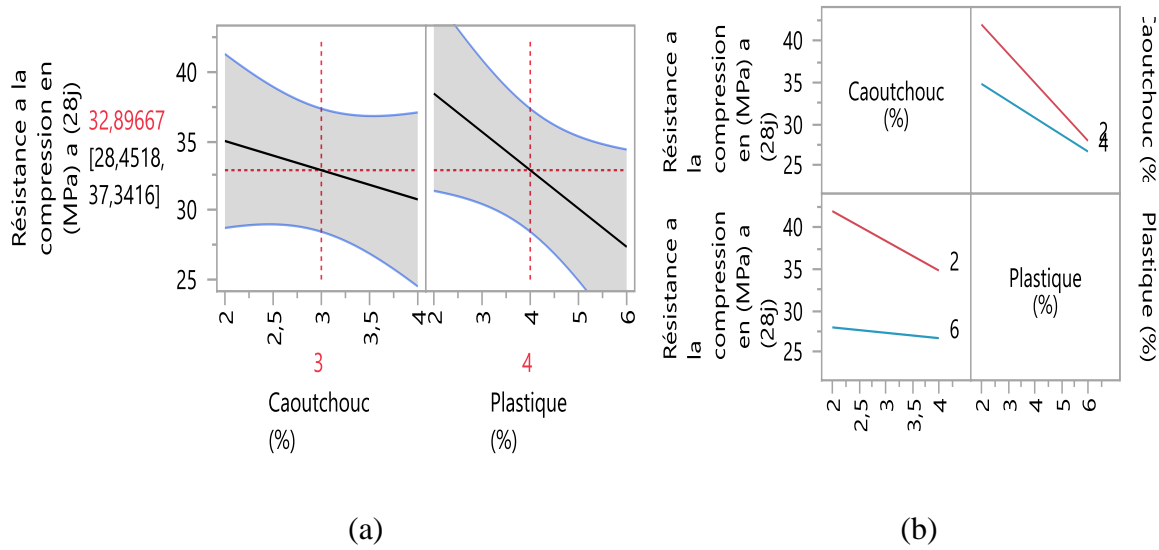


Figure VI.14 : (a) Diagrammes d’effets principaux et (b) Diagrammes d’interaction de résistance à la compression

VI.3.6 Perte de masse à (60 j) :

Les figures VI.15 (a) et (b) montrent l’iso-réponse et les réponses de surface pour la perte de poids. On peut noter qu’à mesure que le niveau de caoutchouc et de plastique augmente, la perte de poids diminue. De plus, on peut constater que l’effet du caoutchouc sur la perte de poids est léger comparativement à l’effet du plastique, qui était significatif. La figure VI.16 (a) montre les principaux tracés des effets de la perte de poids et montre que l’augmentation de la teneur en plastique de 2 % à 6 % entraîne une diminution de la perte de poids de 20 % à 15 %. Les coefficients du caoutchouc et du plastique sont respectivement (-0.30) et (-2.67). Ce qui indique que l’effet du caoutchouc et du plastique est négatif sur la réponse. Les tracés d’interaction pour la perte de poids sont présentés sur la figure VI.16 (b). Il a été constaté que les deux lignes se croisaient. L’intersection des deux lignes indique que l’interaction des facteurs a un effet considérable sur cette réponse. Le modèle mathématique de perte de poids est écrit dans l’équation (11):

$$PM = 22.56 - 0.30(Caoutchouc - 3) - 2.67\left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) + (Caoutchouc - 3)\left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) 0.75 \tag{11}$$

Haute perte de masse (Plastic  $\leq 3.6\%$ , Rubber  $\leq 3\%$ )

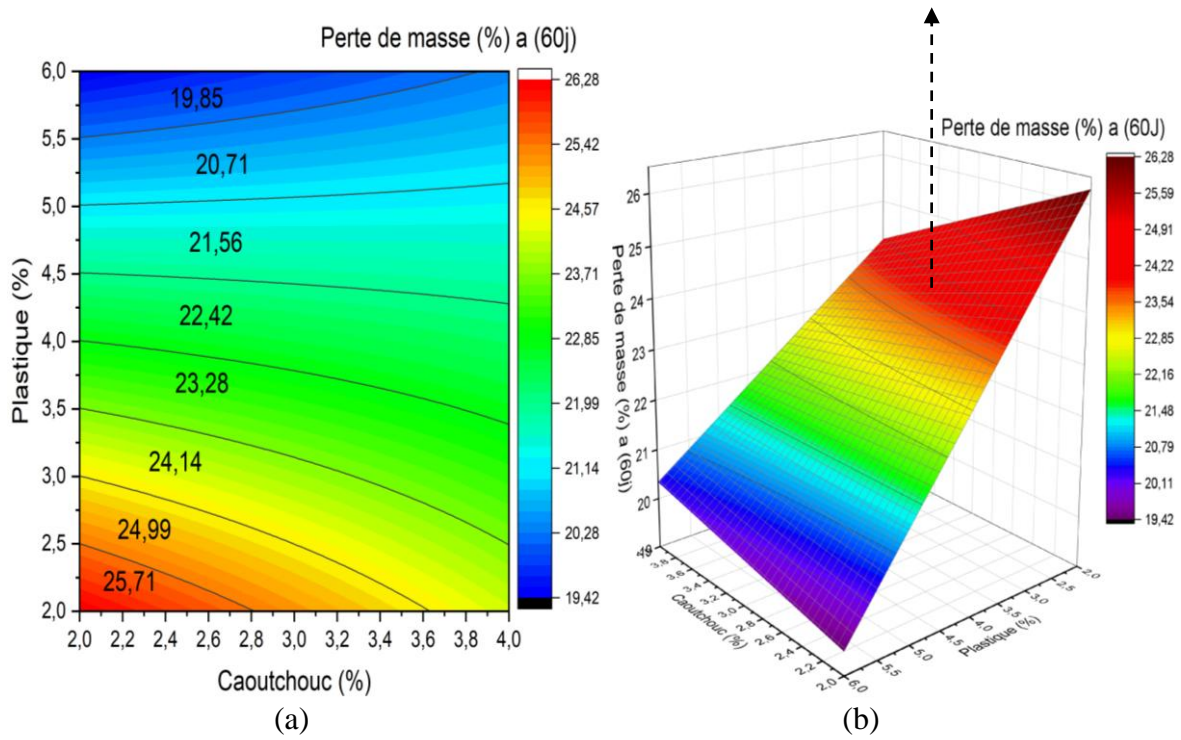


Figure VI.15 : (a) Courbes disoréponse et (b) surfaces de réponse de la perte de masse

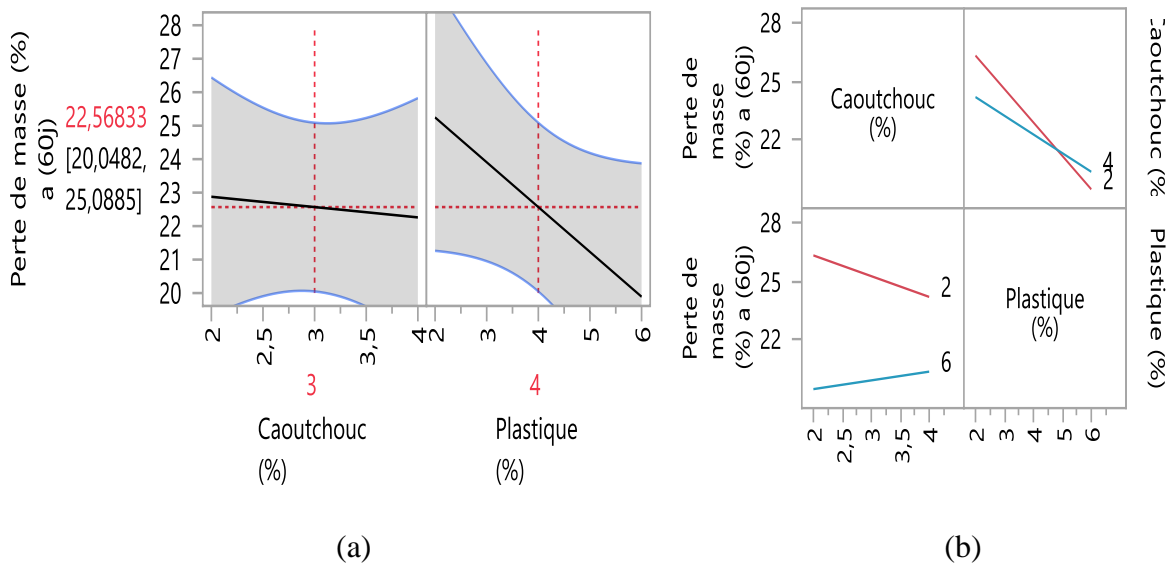


Figure VI.16 : (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de la perte de masse

**Partie C :** Modélisation des réponses physiques et mécaniques du béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique faux plafond

**VI.4 Réalisation du plan d’expérience au laboratoire :**

Dans notre étude, on a choisi (02) facteurs :

- Le pourcentage de caoutchouc (substitution du ciment)
- Le pourcentage de plastique (substitution de sable)

Les réponses étudiées sont :

- L’affaissement
- La masse volumique fraîche
- La résistance à la compression à (28 j)
- La perte de masse au milieu d’acide sulfurique à (60j)

**Tableau VI.14:** Synthèse de plan d’expérience.

Facteur	Les déchets de caoutchouc et plastique		
Niveau 1, (caoutchouc %)	2	4	
Niveau 2, (plastique %)	2	4	6
Réponse 1	L’affaissement		
Réponse 2	Densité frais		
Réponse 3	Résistance à la compression a (28j)		
Réponse 4	Perte de masse au milieu H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a (60j)		

**VI.4.1 Modélisation de la réponse physique et mécanique** (l’affaissement, densité frais, résistance a la compression, et perte de masse)

Il y a six expériences au total, avec deux niveaux pour le caoutchouc et trois pour le plastique présentés dans le tableau VI.15, et le résumé des ajustements est présenté dans le tableau VI.16.

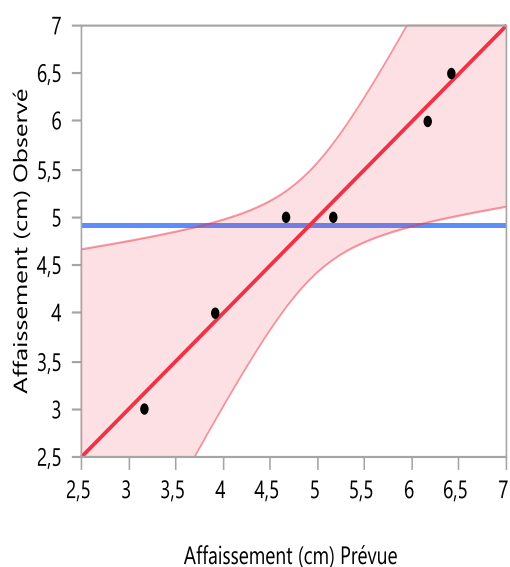
D’après le tableau VI.16 et la figure VI.17, les coefficients de corrélation ( $R^2 > 0.89$ ) pour l’affaissement, la densité fraîche, la résistance à la compression, et la perte de masse. Cela démontre une forte corrélation entre les enregistrements du modèle et les réponses obtenues expérimentalement.

**Table VI.15 :** Expérimental résultats.

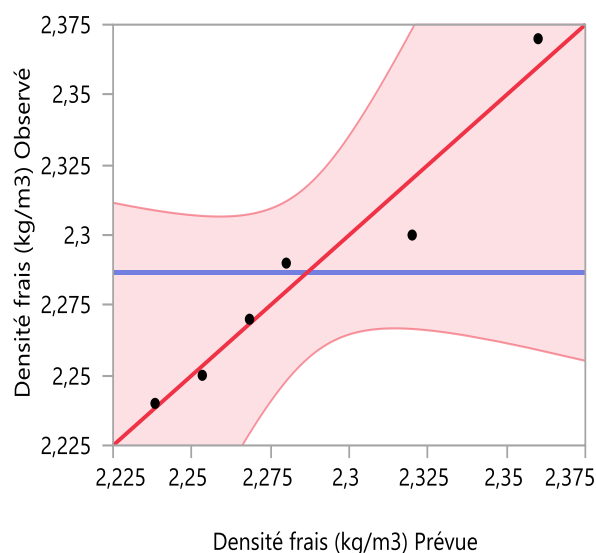
Mixes	Caoutchouc (%)	Plastique (%)	AF(cm)	MV(kg/m <sup>3</sup> )	RC(MPa) à (28j)	PM (%) (60j)
<b>B1</b>	2	2	6.5	2.37	42.96	29.77
<b>B2</b>	2	4	5	2.30	35.73	29.07
<b>B3</b>	2	6	4	2.29	35.43	28.36
<b>B4</b>	4	2	6	2.27	34.34	27.50
<b>B5</b>	4	4	5	2.25	31.26	26.36
<b>B6</b>	4	6	3	2.24	26.48	26.05

**Table VI.16:** les résultats de l'ajustement.

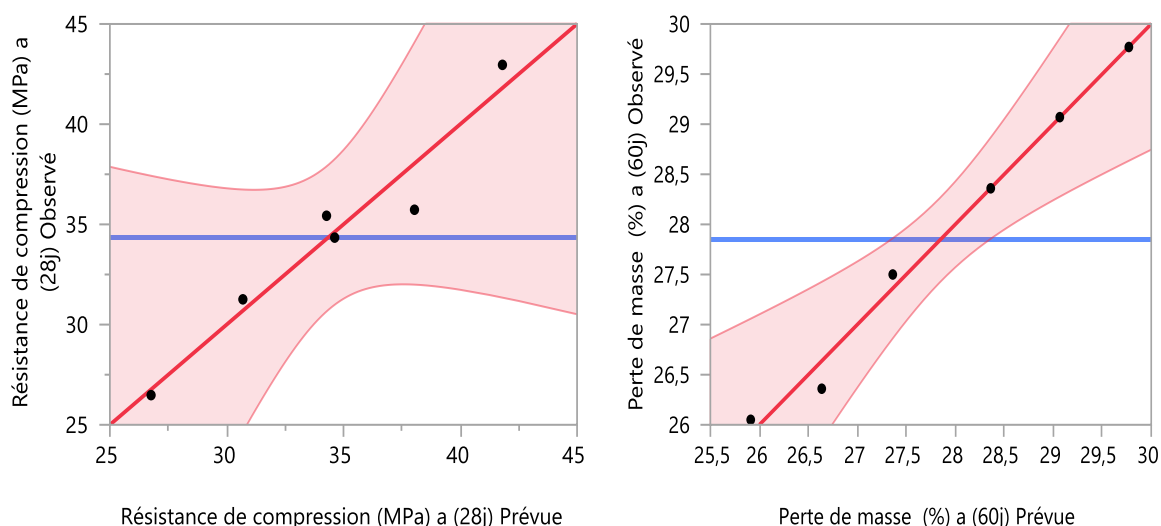
Tests	AF (cm)	MV (kg/m <sup>3</sup> )	RC (MPa)	PM (%)
<b>R<sup>2</sup></b>	0.974	0.999	0.942	0.890
<b>R<sup>2</sup> ajusté</b>	0.936	0.998	0.857	0.730
<b>Racine de l'erreur quadratique moyenne</b>	0.322	0.002	2.059	0.239
<b>Moyenne de la réponse</b>	4.916	2.233	34.366	17.851



(a)



(b)



**Figure VI.17 :** Corrélation entre les réponses observées et prédites : affaissement, Masse volumique fraîche, résistance à la compression, perte de masse.

**VI4.2 Analyse de la variance :**

Les résultats de l’analyse de la variance sont présentés dans le tableau VI.17. Nous voyons que les valeurs de probabilité (Prob.> F) pour l’affaissement et la perte de masse sont respectivement de 0.0378 et 0.0156, soit moins de 5 %, ce qui indique un seul effet sur les résultats, à l’exception de la densité et de la résistance de compression qui est de 0.0834 et 0.0844, respectivement supérieure à 5 %, ce qui indique plus d’un effet sur la densité et la résistance à la compression.

**Tableau VI.17 :** Analyse de variance (ANOVA) pour les modèles dérivés.

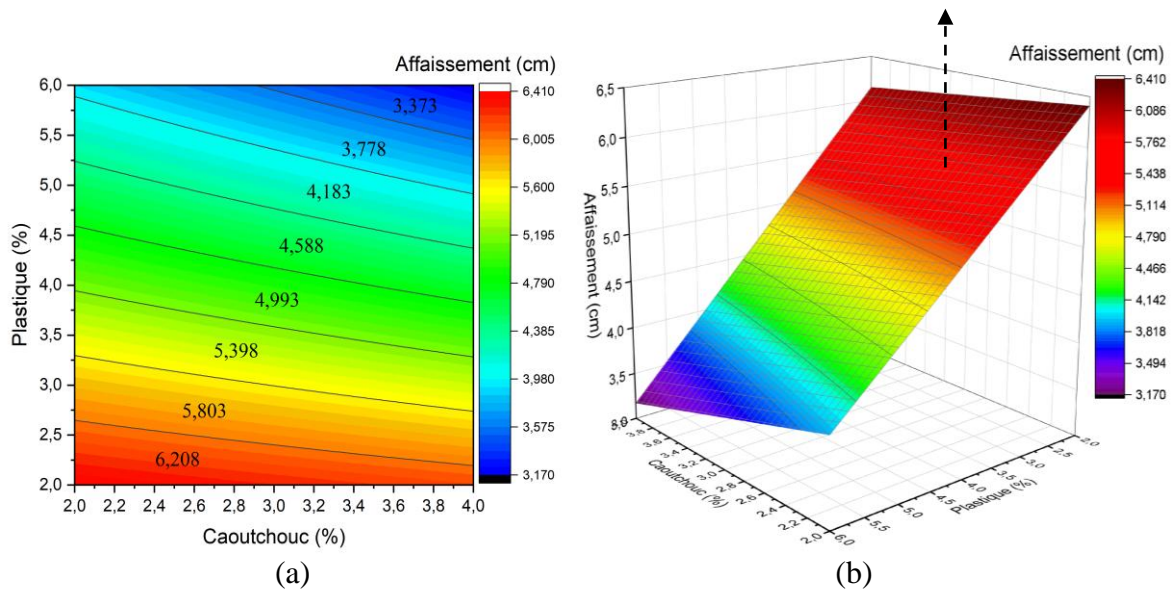
Tests	Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
<b>AF (cm)</b>	Total des erreurs de modèle	3	8.0000000	2.66667	25.6000 Prob. > F 0.0378*
		2	0.2083333	0.10417	
		5	8.2083333		
<b>MV (kg/m<sup>3</sup>)</b>	Total des erreurs de modèle	3	0.01031667	0.003439	11.1532 Prob. > F 0.0834
		2	0.000061667	0.000308	
		5	0.000061667		
<b>RC (MPa)</b>	Total des erreurs de modèle	3	0,01093333	46.7335	11.0145 Prob. > F 0.0844
		2	140.20052	4.2429	
		5	8.48582		
<b>PM (%)</b>	Total des erreurs de modèle	3	10.902650	3.63422	63.2955 Prob. > F 0.0156*
		2	0.114833	0.05742	
		5	11.017483		

**VI.4.3 L'affaissement :**

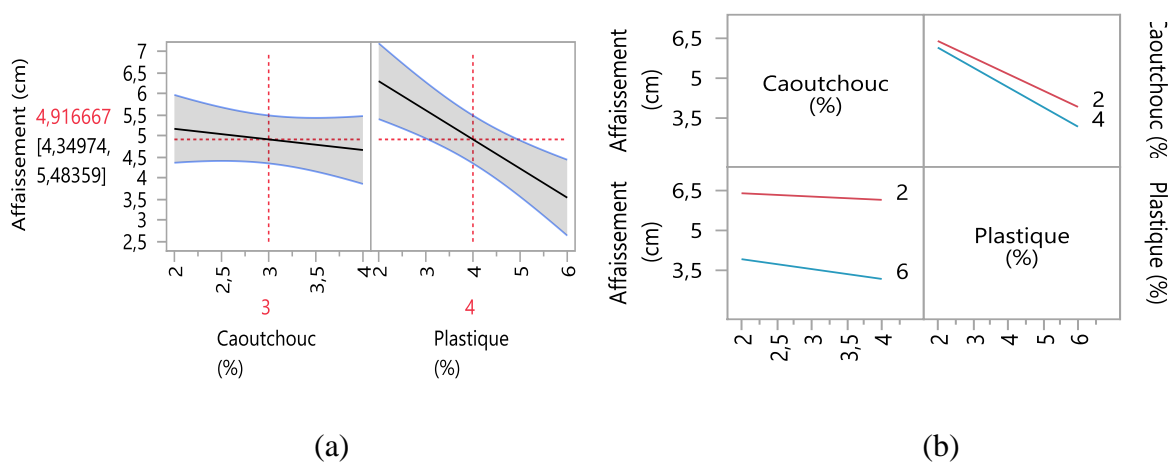
À partir de la figure VI.18 (a) et (b), il a été observé que l'affaissement diminue de VI.2 à 3.3 cm en raison du changement du niveau de caoutchouc de 2 % à 4 % et du niveau de plastique de 2 % à 6%. À partir de la figure VI.19 (a) l'effet de plastique sur l'affaissement est plus grand par rapport à l'effet de caoutchouc. La figure VI.19 (b) montre les courbes d'interaction de l'ouvrabilité. L'intersection des deux lignes suggère que l'interaction des facteurs a un impact significatif sur la réponse. Est de La réponse est l'équation suivante :

$$AF = 4.91 - 0.25 (Caoutchouc - 3) - 1.37 \left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) + (Caoutchouc - 3) \left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) (-0.12) \tag{12}$$

Haute ouvrabilité (Plastique ≤ 4%, Caoutchouc ≤ 4%)



**Figure VI.18 :** (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de l'affaissement



**Figure VI.19 :** (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de l'affaissement

4.4 Masse volumique frais

À partir des graphiques du profileur de prévision et du profileur d'isoréponses, la masse volumique fraîche diminue avec l'augmentation de la quantité de caoutchouc et plastique. Augmentation du pourcentage de plastique de 2 à 6 % et de caoutchouc de 2 à 4 %, ce qui a entraîné une diminution de la masse volumique fraîche de 2.32 à 2.25 kg/m<sup>3</sup>. Les diagrammes d'interaction pour la masse volumique fraîche sont présentés à la figure 6.21. Il a été observé que les deux lignes se croisent étroitement, ce qui suggère une légère influence des facteurs sur la réponse. Le modèle mathématique des masses volumiques fraîches est écrit dans l'équation (13):

$$MV = 2.28 - 0.03 (Caoutchouc - 3) - 0.02 \left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) + (Caoutchouc - 3) \left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) (0.01) \tag{13}$$

Haute masse volumique (Plastique ≤ 4%, Caoutchouc ≤ 2.8%)

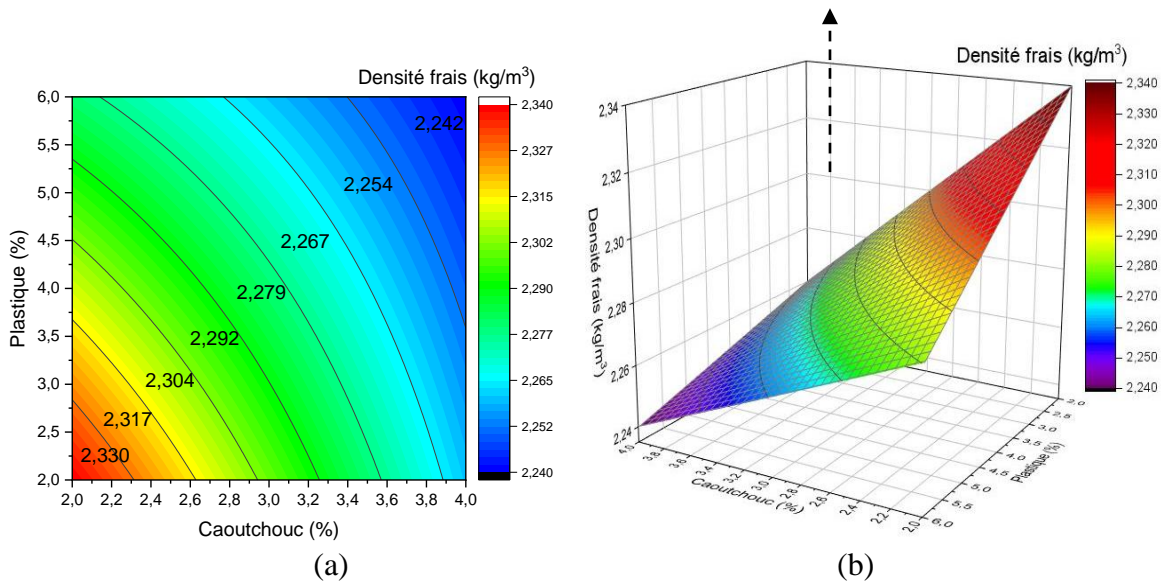


Figure VI.20 : (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de la masse volumique

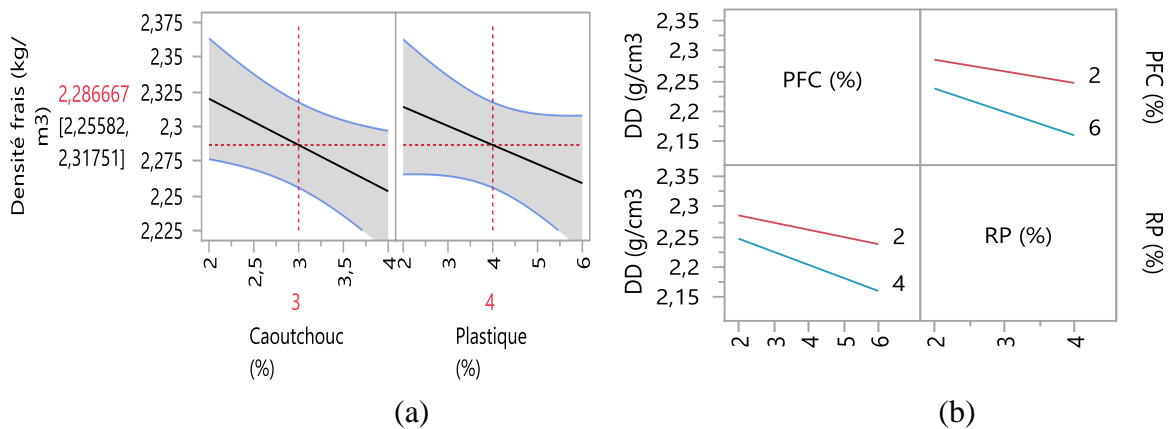


Figure VI.21: (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de la masse volumique

VI.4.5 Résistance à la compression à (28 j)

D'après la figure VI.22 du profileur de prévision et la figure VI.23 du profileur d'isoréponses, on observe que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation des pourcentages de plastique et de caoutchouc. La résistance à la compression diminue de 37.5 à 30 MPa avec l'augmentation des pourcentages de plastique et de caoutchouc. L'effet du plastique et du caoutchouc est négatif sur la résistance à la compression. Les diagrammes d'interaction pour la résistance à la compression sont présentés à la figure VI.23 (b). Nous observons que les lignes ne se croisent pas, ce qui indique une légère influence des facteurs sur la réponse. Le modèle mathématique des résistances de compression est écrit dans l'équation (14).

$$RC = 34.36 - 3.67(Caoutchouc - 3) - 3.84\left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) + (Caoutchouc - 3)\left(\frac{Plastique - 4}{2}\right)(-0.08) \quad (14)$$

Haute résistance de compression (Plastique ≤ 4.5%, Caoutchouc ≤ 3.2%)

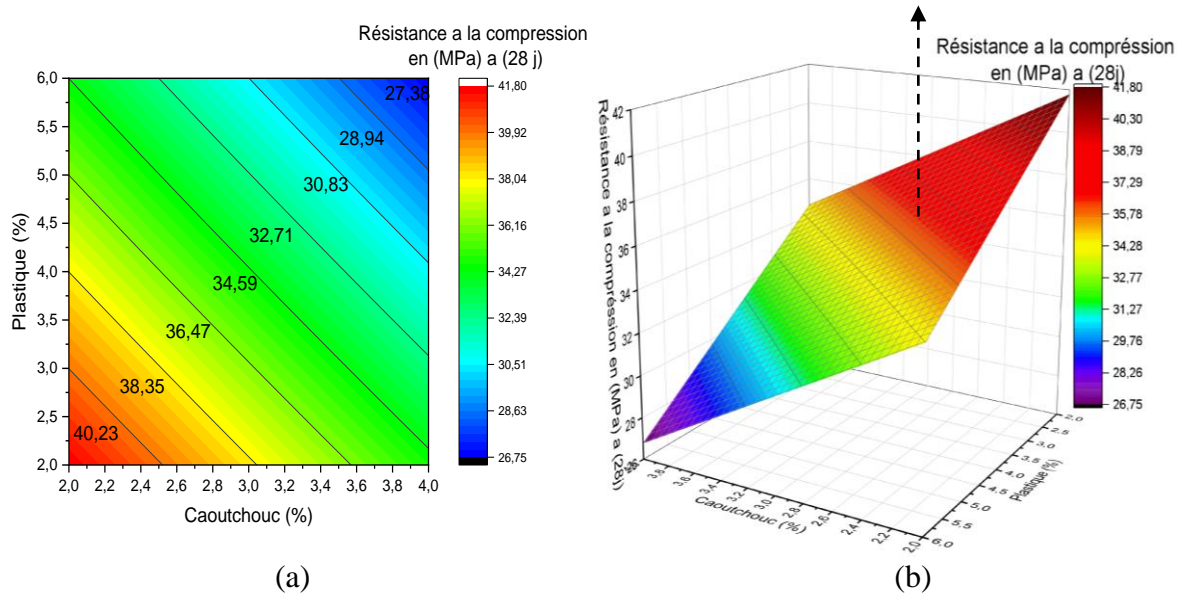


Figure VI.22 : (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de la résistance de compression

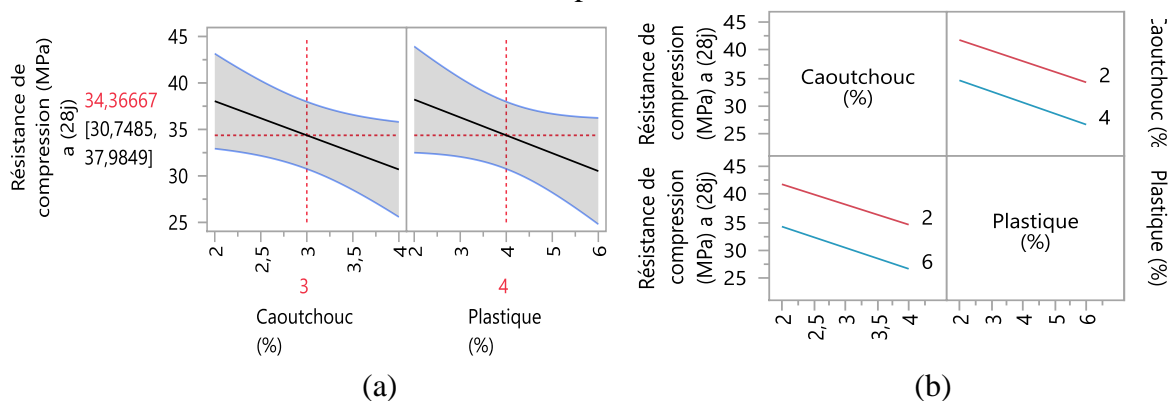


Figure VI.23: (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de la résistance de compression

VI.4.6 Perte de masse à (60 j)

D'après la figure VI.24 du profileur de prévision, et la figure VI.25 du profileur d'isoréponses, nous remarquons que la perte de masse diminue avec l'augmentation des pourcentages de caoutchouc et de plastique. La perte de masse diminue de 29 % à 26.5 % lorsque les pourcentages de caoutchouc augmentent de 2 à 4 %, et diminue de 28.5 % à 27 % lorsque les pourcentages de plastique augmentent de 4 à 6 %. Ainsi, comme nous pouvons le constater, l'effet du caoutchouc sur la perte de masse est plus important que celui du plastique. Le modèle mathématique de la perte de masse est écrit dans l'équation (15) :

$$PM = 27.85 - 1.21 (Caoutchouc - 3) - 0.71 \left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) + (Caoutchouc - 3) \left(\frac{Plastique - 4}{2}\right) (-0.01) \tag{15}$$

Haute perte de masse (Plastique ≤ 4.75%, Caoutchouc ≤ 3%)

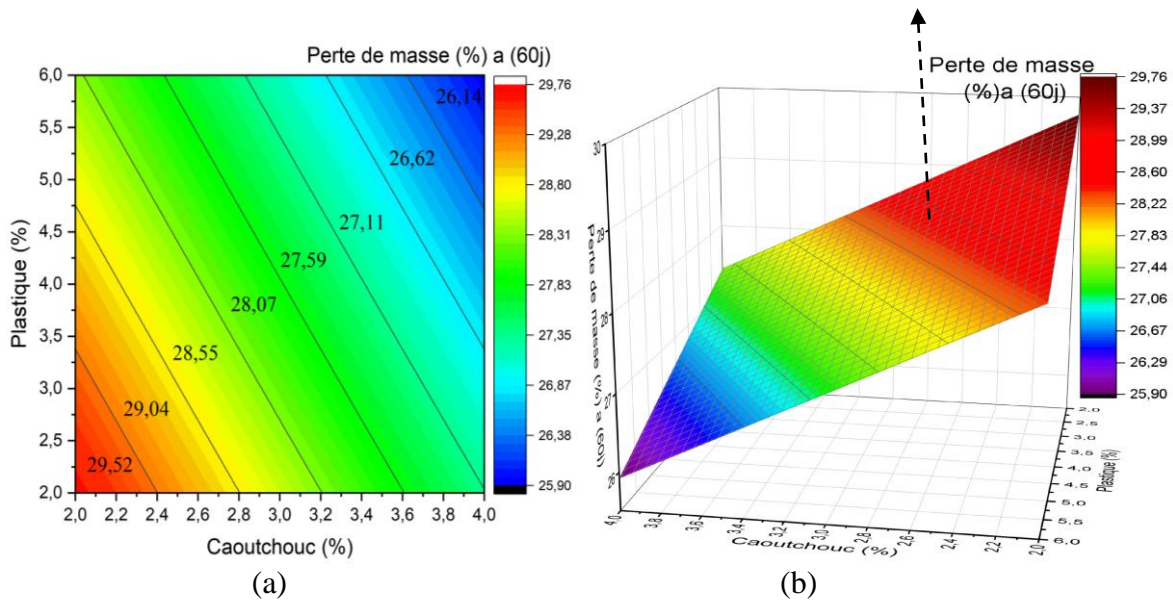


Figure VI.24 : (a) Courbes d'isoréponse et (b) surfaces de réponse de la perte de masse

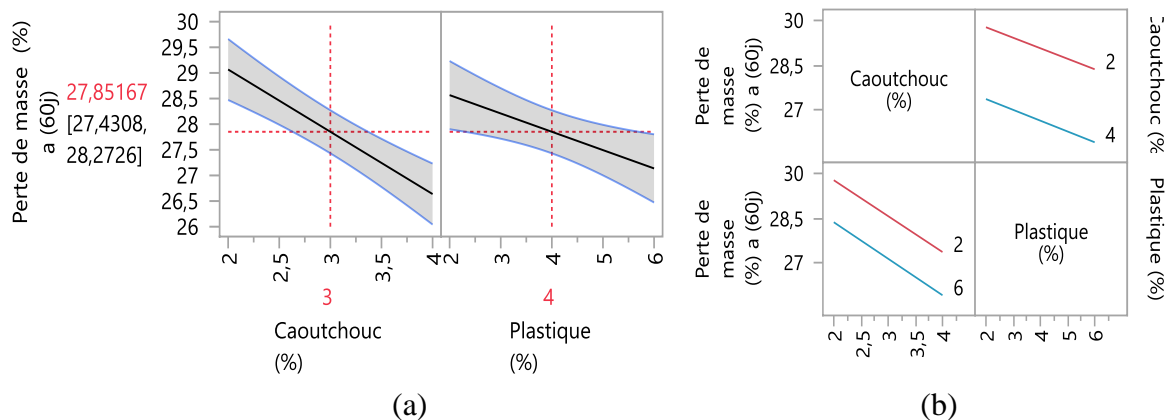


Figure VI.25: (a) Diagrammes d'effets principaux et (b) Diagrammes d'interaction de la perte de masse

#### IV.5 Conclusion

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus et de la modélisation numérique de l'étude actuelle du béton, les conclusions suivantes ont été tirées :

- Les paramètres statistiques montrent de bons coefficients de corrélation ( $R^2$  : 0.76 ; 0.98 ; 0.95 ; 0.92 ; 0.93 ; et 0.97) pour l'ouvrabilité, la masse volumique a l'état frais, l'air occlus, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la vitesse d'impulsion ultrasonique respectivement pour un béton à base des fines de caoutchouc.
- Les valeurs de ( $R^2$ ) sont proches de 1, ce qui montre une bonne corrélation entre les modèles prédit et expérimental. Cela nous amène à la conclusion que le modèle utilisé est fiable et efficace pour prédire l'effet des fines de caoutchouc sur le béton qui a été examiné pour ses propriétés mécaniques et physiques.
- Les analyses des paramètres statistiques montrent de bons coefficients de corrélation ( $R^2=$  0.941 ; 0.999 ; 0.876 ; et 0.831) pour l'ouvrabilité, la masse volumique a l'état frais, la résistance à la compression et la perte de poids, respectivement. Les valeurs de ( $R^2$ ) sont proches de 1, ce qui montre une bonne corrélation entre les modèles prédit et expérimental, pour un béton a base des fines de caoutchouc et sable de plastique forex.
- Les coefficients de corrélation ( $R^2=$  0.974 ; 0.999 ; 0.942 ; et 0.890) sont assez élevés pour l'ouvrabilité, la masse volumique a l'état frais, la résistance à la compression et la perte de poids, respectivement, selon les analyses des paramètres statistiques. La corrélation entre les modèles prédit et expérimental est proche de 1, ce qui démontre une corrélation positive entre les valeurs de ( $R^2$ ) pour un béton à base des fines de caoutchouc et sable de plastique faux plafond.

## CHAPITRE VII

### LA MICROSTRUCTURE DU BETON

#### VII.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'étude des microstructures DRX et MEB du béton contenant différents types de plastiques (forex, faux plafond) et de caoutchouc, de plus une étude EDX du béton pour déterminer les compositions chimiques de ces matériaux et analyses d'images de MEB avec un logiciel d'imagerie (image J) pour déterminer le pourcentage de vides dans la structure du béton et compléter ce chapitre par une conclusion.

#### VII.2 Analyse microstructurale

Concernant les résultats de la microstructure, on a choisis des échantillons pour présenter leurs structures internes, les échantillons choisis sont ceux qui ont présenté des meilleures résistances mécaniques :

D'après les figures VII.1 (b) et VII.2 (b), l'analyse EDS a indiqué la présence de Si, Ca et Al en grandes proportions dans des échantillons du béton. Il s'agit de la composition du C-S-H (silicate de calcium hydraté) provenant des réactions de mouillage du ciment [161]. Analyse chimique EDS indiquant la présence de carbone et de chlore, indiquant la présence de plastique. Il a également évoqué la présence d'aluminium, de soufre et de fer, ce qui indique la présence de caoutchouc.

D'après les figures VII.1 (a) et VII.2 (a), le microscope électronique à balayage (MEB) a montré que lorsque des déchets de caoutchouc et de plastique sont ajoutés au béton, de grosses bulles d'air se forment à l'intérieur de la structure en béton par rapport au béton ordinaire, dans lequel les bulles d'air sont petites. Ces résultats sont similaires à ceux donnés par (Gupta et al.2021) [162]. Le précipité blanc à la surface des échantillons est du gypse, comme le montre la figure VII.3 (a), résultant de la réaction de la portlandite avec l'acide sulfurique. Le gypse réagit avec l'aluminat de calcium pour former du sulfaluminat de calcium hydraté (secondaire ettringite), comme le montre la figure VII.3 (b). Cette réaction provoque la fissuration du béton, comme le montre la figure VII.3 (c). Cette incorporation de déchets peut agir comme une barrière empêchant la pénétration de la solution de  $H_2SO_4$  (acide sulfurique) dans le béton. En conséquence, la présence de déchets de caoutchouc et de plastique dans le béton peut réduire la perte de masse qui se produirait généralement en cas

d'exposition à des substances corrosives comme l'acide sulfurique. Ce comportement protecteur est attribué aux caractéristiques physiques du caoutchouc et du plastique, qui servent de couche protectrice à l'intérieur de la matrice du béton, empêchant l'acide d'atteindre et de dégrader la structure interne. En résumé, l'utilisation de les déchets de caoutchouc et de plastique utilisés comme additifs dans les mélanges de béton peuvent améliorer la résistance du matériau aux attaques chimiques, telles que l'acide sulfurique, en créant une barrière qui limite la pénétration des substances corrosives et, en fin de compte, réduit la perte de masse. L'inspection visuelle d'échantillons de béton réalisés après une exposition de 60 jours au  $H_2SO_4$  fournit des preuves supplémentaires en faveur de l'hypothèse précédente (figure VII.4). Il est intéressant de noter que les échantillons témoins ont subi une perte notable en masse, contrairement à ceux en plastique et en caoutchouc, qui conservent leur forme.

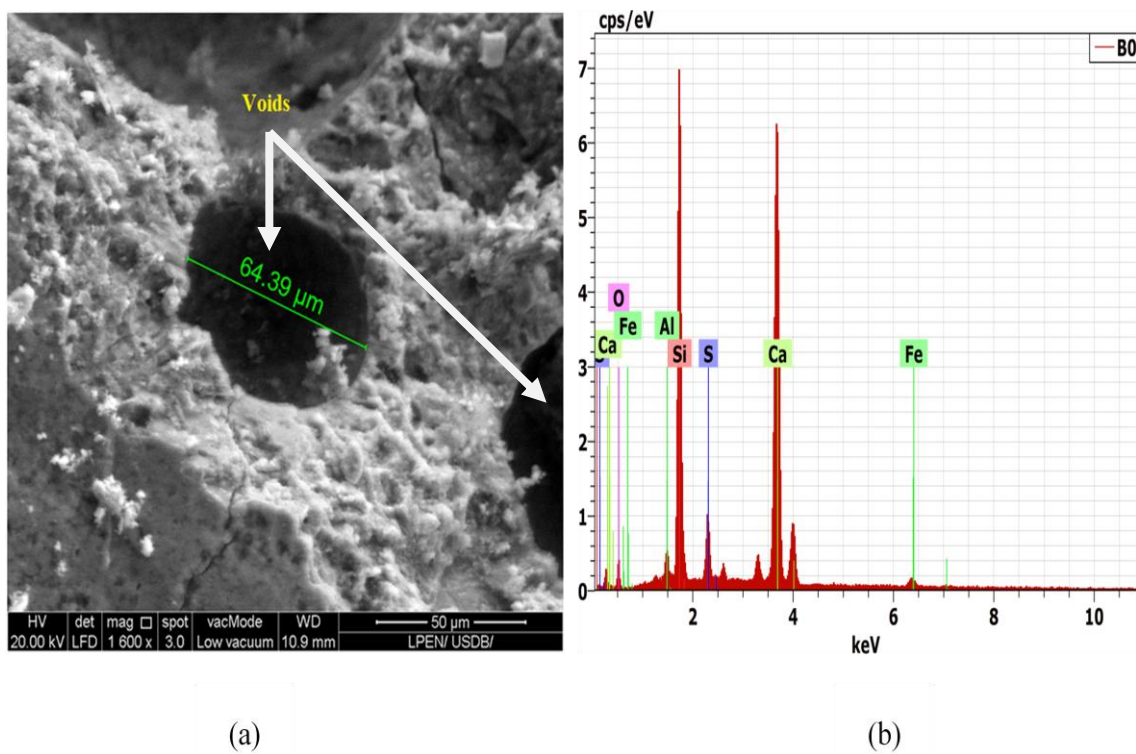


Figure VII.1 : MEB (a) et EDS (b) du béton ordinaire (x1600)

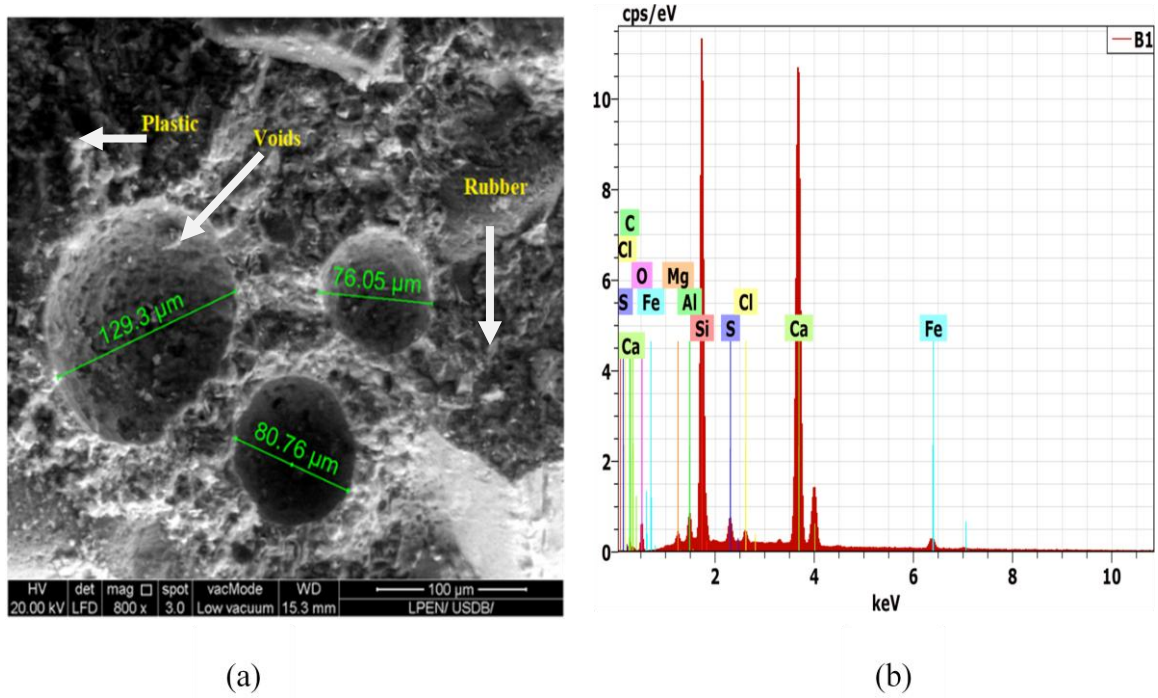


Figure VII.2 : MEB (a) et EDS (b) de béton contenant 2 % de caoutchouc et 2 % de plastique (x800)

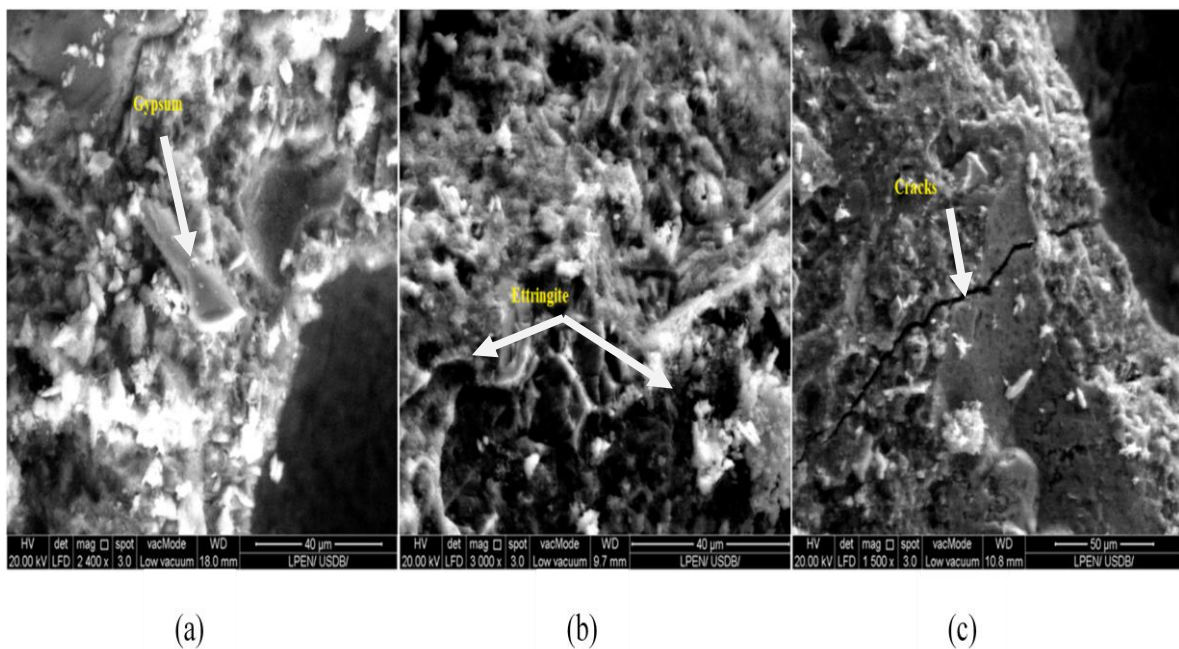


Figure VII.3 : MEB (a), (b) et (c) de béton exposé à 5 % de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pendant 60 jours



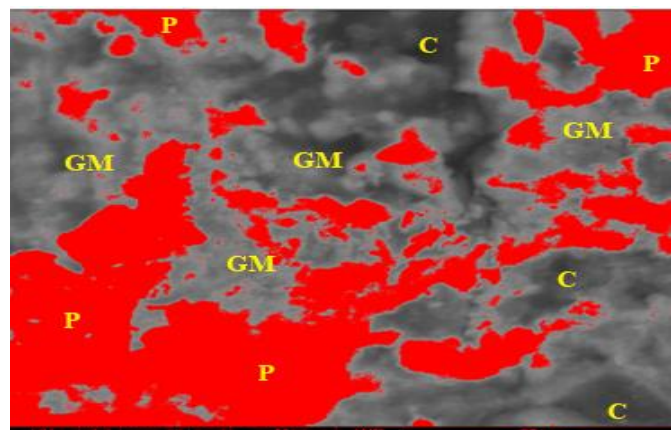
**Figure VII.4 :** Examen visuel des échantillons après leur immersion dans une solution à 5%  $H_2SO_4$  pour 60 jours.

### VII.3 Analyse de l'image J

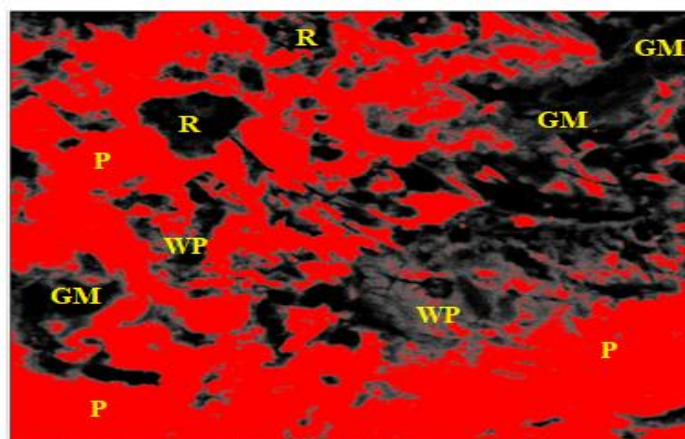
Dans cette étude, des images SEM de béton conventionnel et de béton mélangé à des matières résiduelles en caoutchouc et en plastique sont examinées à l'aide du logiciel Image J.

La surface occupée par les pores des échantillons de béton peut être trouvée par analyse à l'aide de l'image J [163], un programme de traitement d'image Java du domaine public.

Les résultats pour les échantillons de béton sont présentés dans les figures VII.5 et VII.6 et les résultats pour la surface des pores des différents échantillons sont obtenus dans le tableau VII.1. Ces résultats ont montré que le pourcentage de pores dans le béton ordinaire était inférieur à celui du béton contenant du plastique et du caoutchouc. Dans le béton ordinaire (BO), le pourcentage de pores est de 2.862 %, et dans le béton contenant 2 % de caoutchouc et 2 % de plastique (B1), le pourcentage de pores est de 6.502 %. Le plastique et le caoutchouc étant non adhérents, ils peuvent créer des cavités dans le béton. Ces substances pourraient ne pas se lier correctement au matériau cimentaire environnant lorsqu'elles sont ajoutées au béton frais, ce qui augmenterait le pourcentage de porosité du béton.



**Figure VII.5:** Images MEB montrant le BO après l'analyse de l'image J (GM : matériau granulaire, sable/gravier ; P : pore ; C : ciment)



**Figure VII.6:** Images MEB montrant le B1 après l’analyse de l’image J (GM : matériau granulaire, sable/gravier ; P : pore ; C : ciment ; R : caoutchouc ; WP : plastique)

**Tableau VII.1:** % de surface des pores de BO et B1 à partir de l'analyse de l'image J.

Specimens	% de la surface des pores
<b>BO</b>	2.862
<b>B1</b>	6.502

#### VII.4 Les résultats de DRX

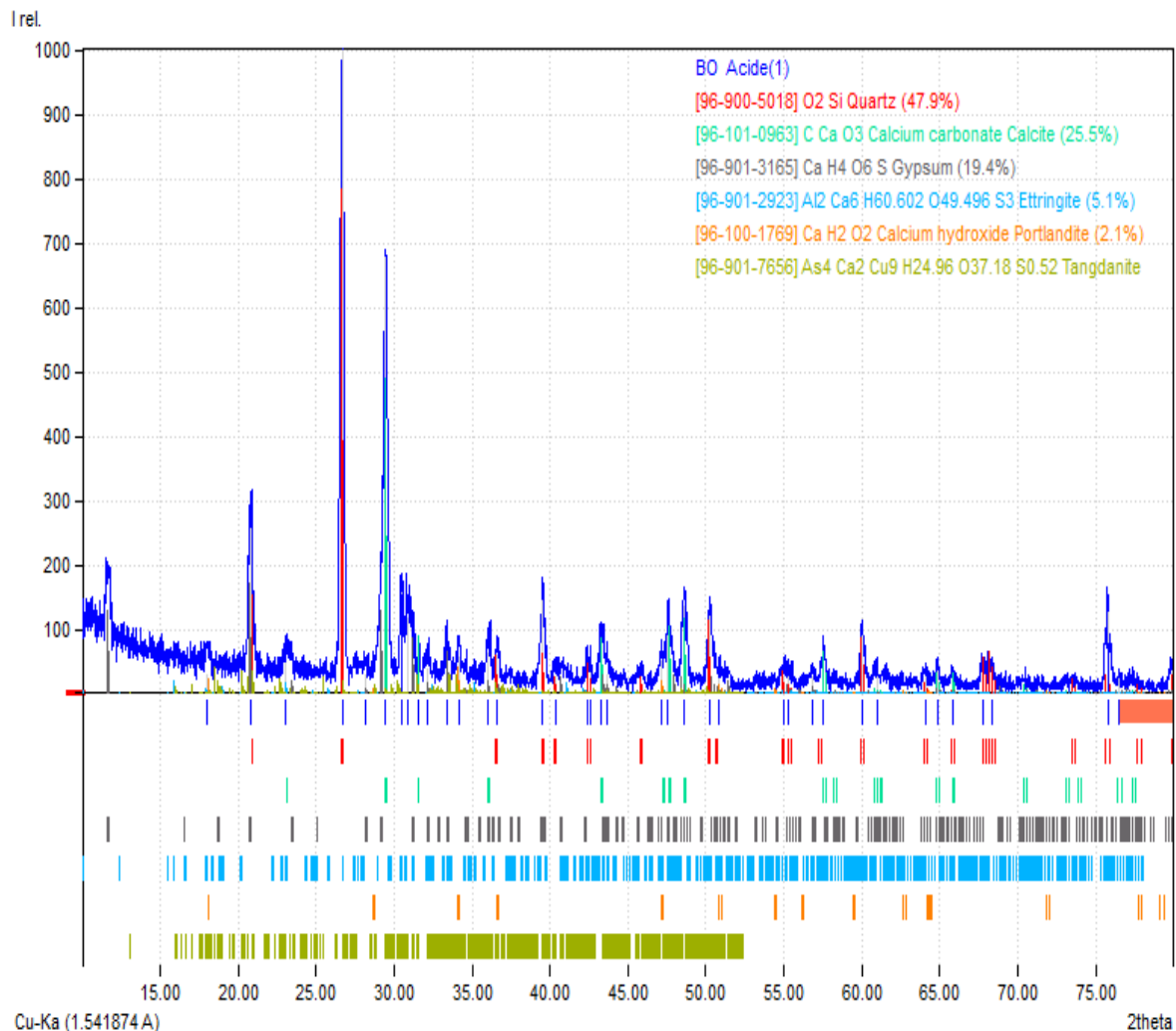
Dans cette section, la poudre a été pulvérisée à une taille inférieure à 0.08 mm et une analyse minéralogique a été réalisée par diffraction des rayons X pour identifier les composants formés dans le béton 60 jours après sa mise en milieu acide sulfurique, et milieu nitrate d’ammonium. Pour déterminer les composants formés, le logiciel match a été utilisé.

##### VII.4.1 Spectrogramme DRX du béton ordinaire et béton à base de déchets de plastique et caoutchouc au milieu acide sulfurique

Les résultats de DRX du béton ordinaire et du béton à base de déchets de plastique (forex, faux plafond) et caoutchouc sont présentés dans la figure VII.7, la figure VII.8, et figure VII.9.

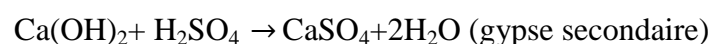
La figure VII.7 illustre la présence de SiO<sub>2</sub> (quartz), CaCO<sub>3</sub> (calcite), Ca(OH)<sub>2</sub> (portlandite), CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O (gypse), et Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)12.26H<sub>2</sub>O (ettringite), à plusieurs positions de 2 thêta, notamment 26.66, 29.49,30.89, 20.76, et 9.06. Chacune de ces positions 2 théta correspond aux pics (1 0 1), (2 1 1), (-1 2 1), (0 2 1), et (1 0 0) qui sont les résultats des réactions d'hydratation de ciment. Les paramètres pour le quartz, calcite, portlandite, gypse et

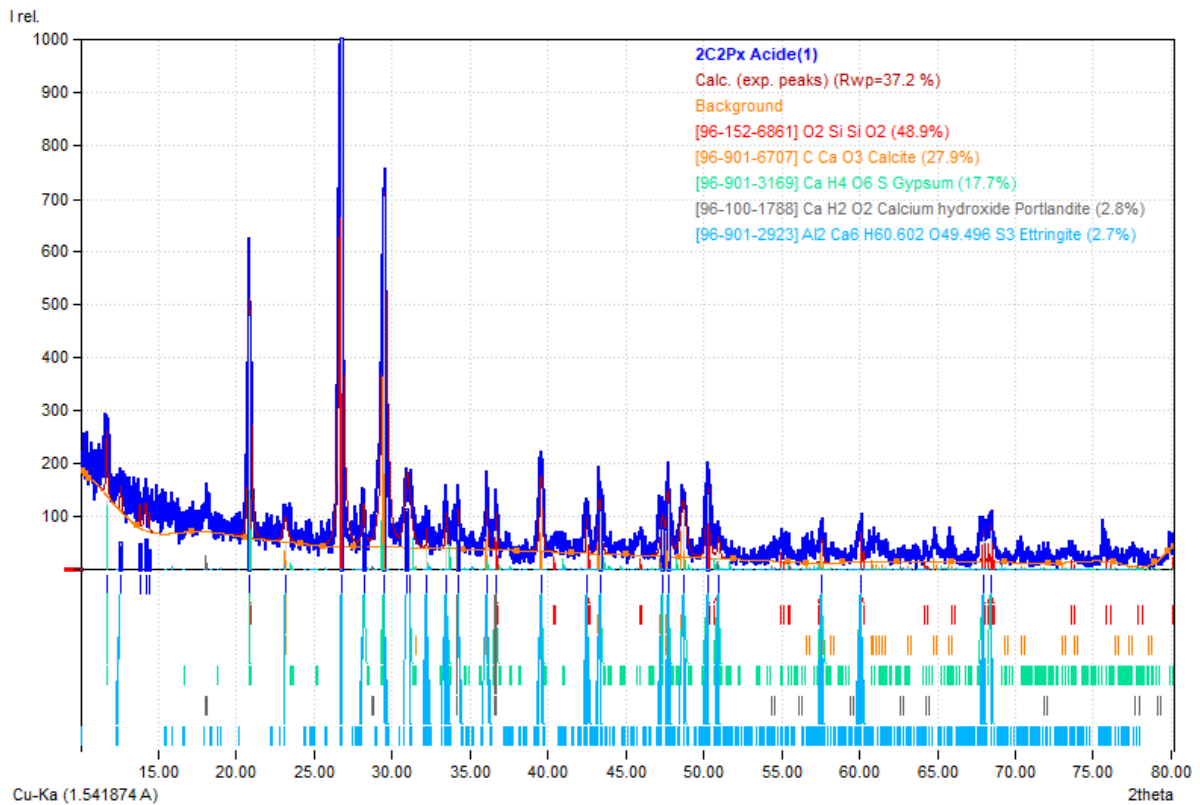
ettringite observés en diffraction des rayons DRX peuvent être comparés aux codes de référence [96-900-5018], [96-101-0963], [96-100-1769], [96-901-3165] et [96-901-2923], respectivement, avec un système cristallin hexagonal, la hauteur de pointe distincte à la position 2 thêta de 26.66 correspondant au plan cristallin (1 0 1). Une étude similaire a été menée par [164].



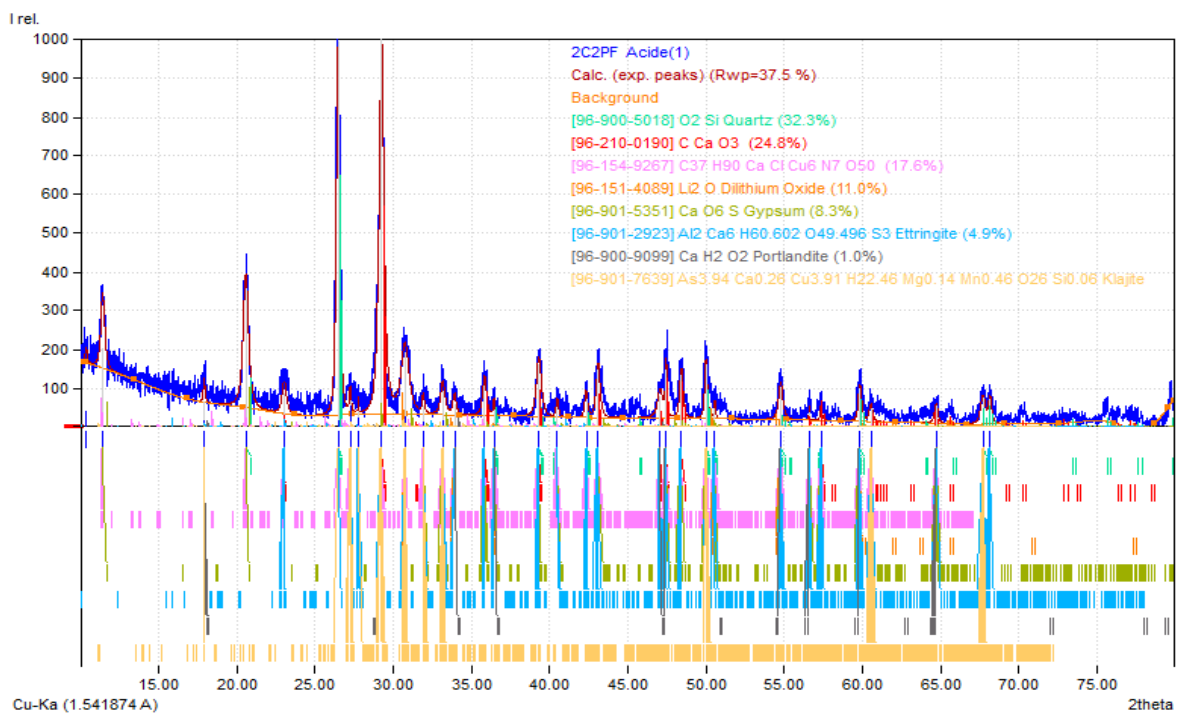
**Figure VII.7 :** Spectrogramme DRX du béton ordinaire au milieu d’acide sulfurique.

Lorsque le béton est exposé à un milieu acide sulfurique, il peut entraîner la formation de gypse et d’ettringite en réagissant avec ses composants. Le gypse se forme par la réaction du sulfate de l’acide sulfurique avec le calcium du ciment, tandis que l’ettringite résulte de la réaction de l’aluminat de calcium du ciment avec le sulfate, suivant les réactions ci-dessous :





**Figure VII.8 :** Spectrogramme DRX du béton a base de déchets de plastique (forex) et caoutchouc au milieu d'acide sulfurique.

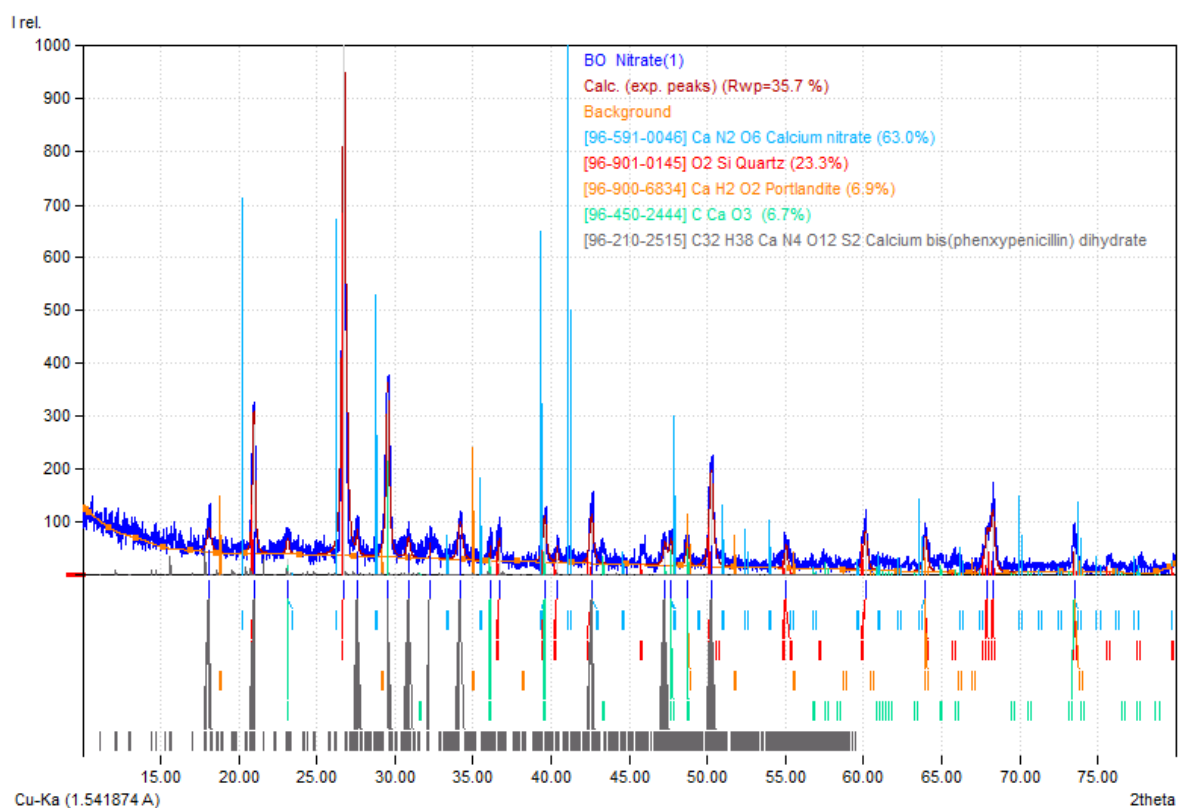


**Figure VII.9 :** Spectrogramme DRX du béton a base de déchets de plastique (faux plafond) et caoutchouc au milieu d'acide sulfurique.

La figure VII.8, et figure VII.9 montre que  $\text{SiO}_2$  (quartz),  $\text{CaCO}_3$  (calcite),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandite),  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (gypse) et  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})12 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$  (ettringite) sont présents à différentes positions de 2 thêta, telles que 26.71, 29.46, 34.13, 20.89 et 9.14. Chacune de ces positions 2thêta correspond aux pics (1 0 1), (1 0 4), (1 0 1), (0 2 1) et (1 0 0) engendrés par les réactions d'hydratation du ciment. Dans de telles conditions, le pourcentage de gypse et d'ettringite dans le béton ordinaire augmente, car les sulfates attaquent les constituants du béton, favorisant ainsi la formation de ces minéraux. Cependant, dans le béton fabriqué à partir de déchets de plastique (forex ou faux plafond) et de caoutchouc, ces matériaux servent de barrières de protection, réduisant l'action corrosive du sulfure et limitant ainsi la formation de gypse et d'ettringite.

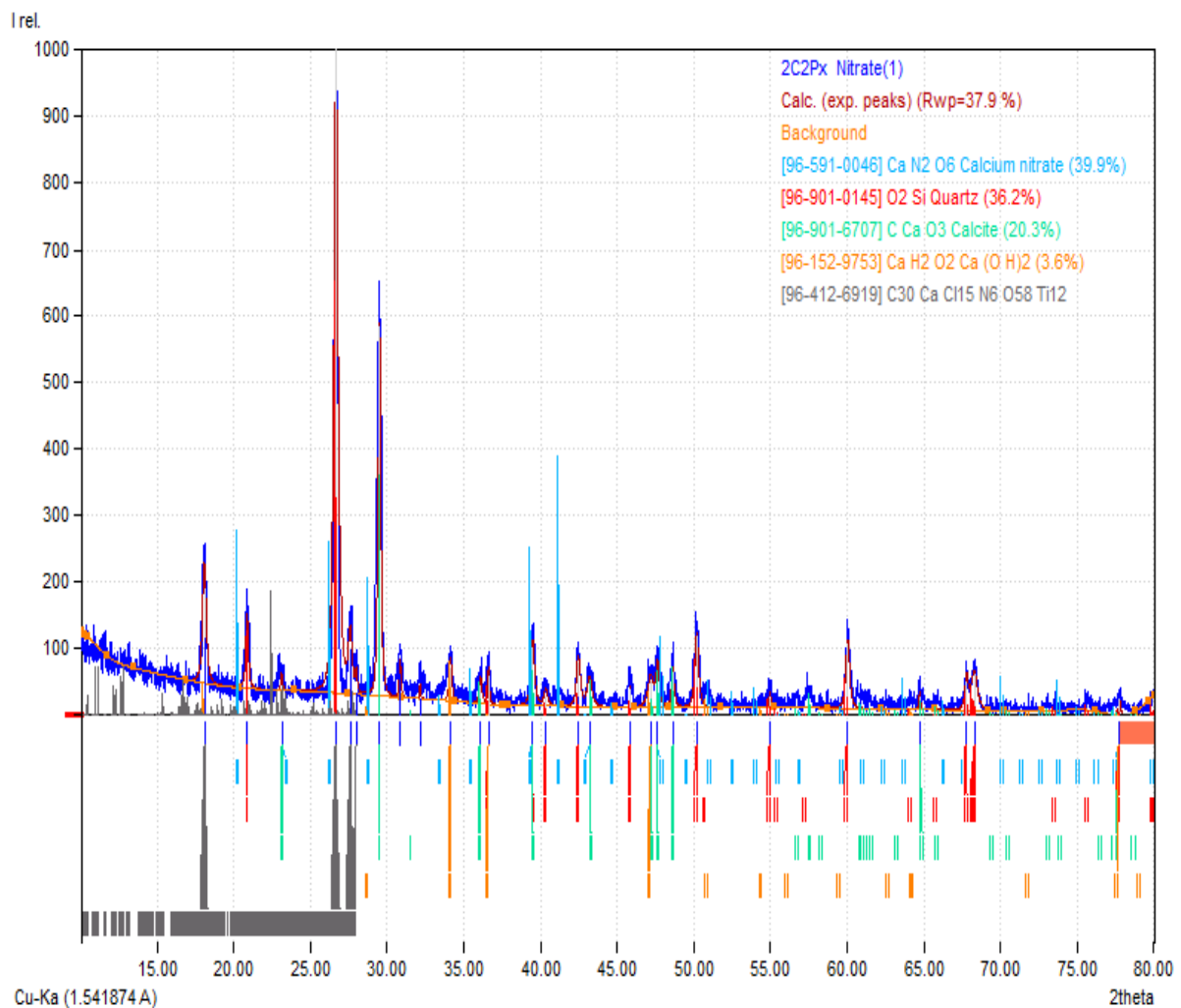
#### VII.4.2 Spectrogramme DRX du béton ordinaire et béton à base de déchets de plastique et caoutchouc au milieu nitrate d'ammonium

Les résultats de DRX du béton ordinaire et du béton à base de déchets de plastique forex et caoutchouc sont illustrés à la figure VII.10 et figure VII.11.

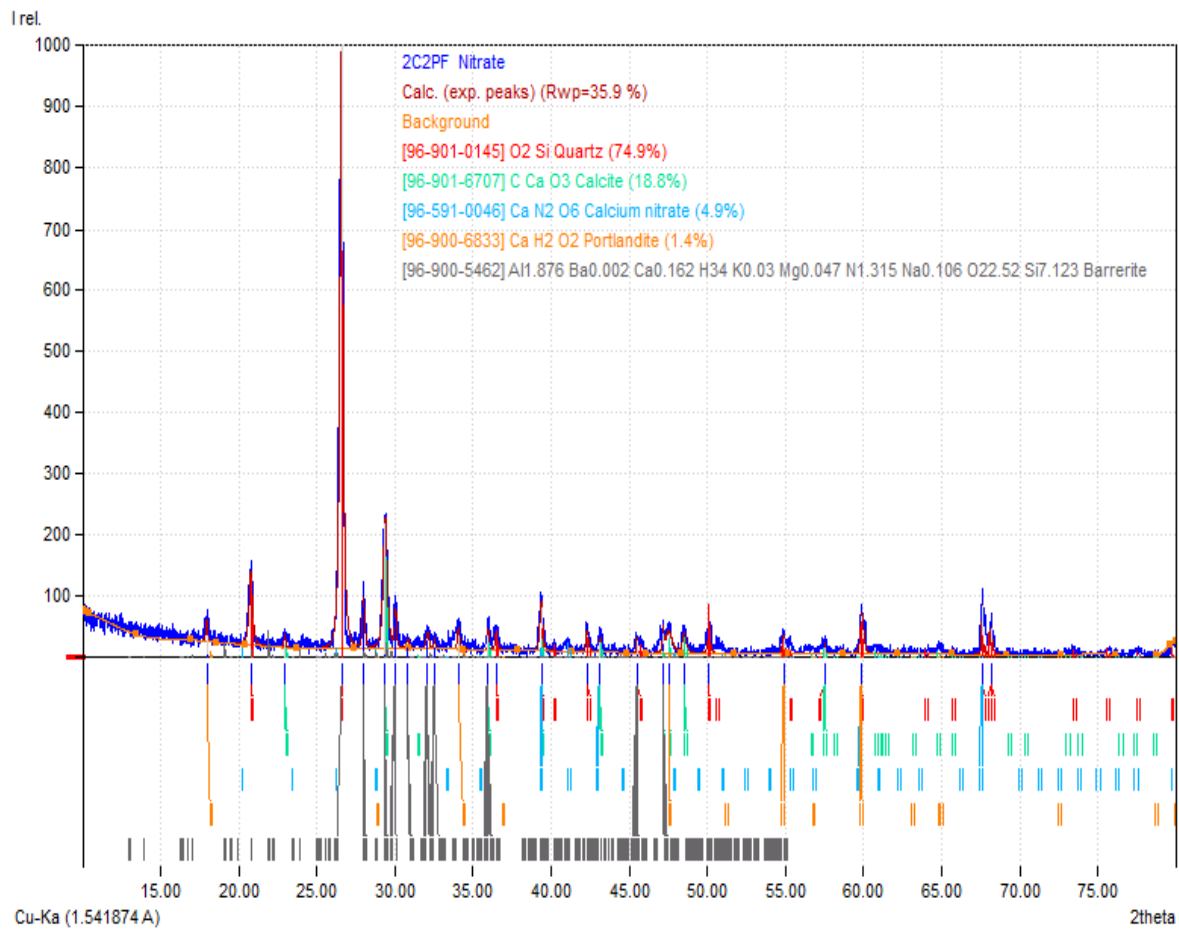


**Figure VII.10 :** Spectrogramme DRX du béton ordinaire au milieu nitrate d'ammonium.

La figure VII.10, illustre la présence de  $\text{SiO}_2$  (quartz),  $\text{CaCO}_3$  (calcite),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandite), et  $\text{CaN}_2\text{O}_6$  (calcium nitrate) , à plusieurs positions de 2

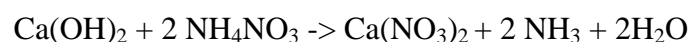


**Figure VII.11 :** Spectrogramme DRX du béton à base de déchets de plastique (forex) et de caoutchouc au milieu nitrate d’ammonium.



**Figure VII.12 :** Spectrogramme DRX du béton à base de déchets de plastique (faux plafond) et de caoutchouc au milieu nitrate d’ammonium.

L'analyse DRX du béton a base de déchets de plastique (forex ou faux plafond) et caoutchouc, (figure VII.11, et figure VII.12) a suggéré la présence de quartz (SiO<sub>2</sub>), calcite (CaCO<sub>3</sub>), portlandite Ca(OH)<sub>2</sub>, et calcium nitrate (CaN<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) aux valeurs 2θ, 26.62, 29.46, 34.05, et 41.14. Chacune de ces positions correspond à des plans cristallins spécifiques tels que (1 0 1), (1 0 4), (1 0 1), et (2 2 2). Qui correspond à un système cristallin hexagonal. Lorsque le béton est exposé à un milieu nitrate d’ammonium, le nitrate d'ammonium réagit avec la portlandite pour former du nitrate de calcium, qui est soluble dans l'eau. L'équation chimique de cette réaction est la suivante :



La portlandite est une phase hydratée du ciment, qui peut influencer sur les propriétés du béton. Dans le cas du béton ordinaire, le pourcentage de portlandite est généralement plus élevé par rapport au béton à base de déchets de plastique et caoutchouc. Cela est dû au fait que le béton à base de déchets de plastique et caoutchouc nécessite moins de ciment pour sa

production, ce qui conduit à une plus faible quantité de portlandite formée dans le matériau final. Comme le voir dans la figure 7.10, le pourcentage de nitrate de calcium dans le béton ordinaire est plus élevé par rapport au béton à base de déchets de plastique en raison des différents composants utilisés. Le béton ordinaire est généralement fabriqué en mélangeant du ciment, des granulats, de l'eau et éventuellement des adjuvants. Le ciment contient du calcaire, qui peut réagir avec le nitrate d'ammonium pour former du nitrate de calcium. D'autre part, le béton à base de déchets de plastique et de caoutchouc remplace une partie des granulats traditionnels par des granulats de plastique et de caoutchouc recyclés. Le plastique et le caoutchouc n'ont pas la capacité de réagir avec le nitrate d'ammonium pour former du nitrate de calcium, ce qui explique la diminution du pourcentage de nitrate de calcium du béton à base de déchets de plastique et de caoutchouc.

### VII.5 Conclusion :

Les résultats expérimentaux de microstructure (MEB), l'image J et le spectrogramme DRX obtenus ont permis d'obtenir les conclusions suivantes :

- L'ajout des fines de caoutchouc et sable de plastique au béton entraîne la formation de bulles d'air plus grosses dans la structure que le béton ordinaire, comme le révèlent les analyses SEM et Image J. Cette différence est due au fait que les agrégats de plastique et de caoutchouc n'adhèrent pas aux composants du béton, ce qui entraîne une augmentation de la taille des bulles d'air.
- Ces déchets empêchent la solution  $H_2SO_4$  de s'infiltrer dans le béton, ce qui réduit les pertes de masse. Cela suggère que les déchets plastiques et le caoutchouc se comportent bien avec le  $H_2SO_4$ .
- Cette étude apporte de précieuses informations sur la réutilisation de ces déchets dans le domaine du génie civil afin de réduire ces déchets grâce à la fabrication de bétons respectueux de l'environnement et résistant aux environnements agressifs.

---

---

# **CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS**

---

---

**Conclusion générale et recommandations :**

L'objectif de cette étude était de développer un béton respectueux de l'environnement à moindre coût, tout en améliorant ses propriétés fraîches et durcies, ainsi que sa durabilité face aux milieux agressifs. Cela a été réalisé en remplaçant le ciment et le sable par des déchets de caoutchouc et de plastique respectivement, en utilisant la méthode générale de conception factorielle complète. Les résultats de laboratoire ont été comparés avec ceux du programme d'essais pilotes JMP pour déterminer si une corrélation existait entre les deux. Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- À l'état frais, les faibles ouvrabilités ont été données par les mélanges B6 et BF (avec 4 % de caoutchouc et 6 % de plastique).
- Les mélanges BC8 %, B6 % et BF qui ont marqué les faibles densités fraîches et plus grandes de l'air occlus.
- À l'état durci, les meilleures résistances mécaniques à la compression ont été obtenues avec un taux de substitution de 2 % de caoutchouc, et de faibles résistances ont été obtenues avec un taux de substitution de 4 % de caoutchouc et 6 % de plastique, tandis que la résistance à la traction par flexion était meilleure avec le béton témoin.
- La vitesse ultrasonique diminue avec l'augmentation du taux de substitution.
- La porosité et l'absorption d'eau par capillarité augmentent avec l'augmentation du taux de substitution.
- L'augmentation du taux de substitution au milieu acide sulfurique diminue la perte de masse du béton. Une perte de masse minimum est donnée dans le mélange qui contient 4 % de caoutchouc et 6 % de plastique.
- L'augmentation du taux de substitution au milieu de nitrate d'ammonium et chlorure de calcium entraîne la diminution du gain de masse du béton. Un minimum de gain de masse est donné dans le mélange qui contient 4 % de caoutchouc et 6 % de plastique.
- Les pertes des résistances au milieu NaCl et  $\text{NH}_4 \text{NO}_3$  diminuent avec l'augmentation du taux de substitution.

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus et de la modélisation numérique de l'étude actuelle du béton, les conclusions suivantes ont été tirées :

- Les données statistiques indiquent des valeurs élevées de corrélation ( $R^2$ ) pour différents paramètres : 0.76 pour l'ouvrabilité, 0.98 pour la densité fraîche, 0.95 pour

l'air occlus, 0.92 pour la résistance à la compression, 0.93 pour la résistance à la flexion, et 0.97 pour la vitesse d'impulsion ultrasonique, dans le cas d'un béton à base de poudre de caoutchouc.

- Les valeurs de ( $R^2$ ) se rapprochent de 1, ce qui indique une forte corrélation entre les modèles prédits et expérimentaux. Ainsi, on peut conclure que le modèle employé est fiable et efficace pour anticiper l'influence des déchets de caoutchouc sur les propriétés mécaniques et physiques du béton étudié.
- Les analyses statistiques montrent des coefficients de corrélation élevés ( $R^2= 0.941$  ;  $0.997$  ;  $0.924$  ; et  $0.884$ ) pour l'ouvrabilité, la densité fraîche, la résistance à la compression et la perte de masse respectivement, dans le cas d'un béton composé de sable de plastique forex et fine de caoutchouc. Ces valeurs de  $R^2$  étant proches de 1, indiquent une excellente corrélation entre les modèles prédits et les résultats expérimentaux.
- Les coefficients de corrélation ( $R^2= 0.974$  ;  $0.999$  ;  $0.942$  ; et  $0.890$ ) sont considérablement élevés pour les propriétés d'ouvrabilité, de densité fraîche, de résistance à la compression et de perte de poids, respectivement, d'après les analyses statistiques des paramètres. La forte corrélation entre les modèles prédits et les données expérimentales, se rapprochant de 1, indique une corrélation positive entre les valeurs de  $R^2$  pour un béton contenant de sable de plastique faux plafond et fine de caoutchouc.

Les résultats expérimentaux de microstructure (MEB), l'image J et le spectrogramme DRX obtenus ont permis d'obtenir les conclusions suivantes :

- Lorsque des fines de caoutchouc et sable de plastique sont ajoutés au béton, les analyses SEM et Image J ont montré que cela entraîne la formation de bulles d'air plus larges dans la structure par rapport au béton ordinaire. Cette augmentation de taille des bulles d'air est due au fait que les sables de plastique et des fines de caoutchouc ne se lient pas aux composants du béton.
- Ces déchets agissent comme une barrière, empêchant ainsi la solution  $H_2SO_4$  de pénétrer dans le béton, ce qui permet de limiter les pertes de masse. Il semble que les déchets plastiques et le caoutchouc se montrent efficaces en présence de  $H_2SO_4$ .
- Cette recherche fournit des informations essentielles sur la manière dont les déchets peuvent être réutilisés dans le domaine du génie civil pour réduire les déchets en

fabriquant des bétons respectueux de l'environnement et résistants aux conditions environnementales agressifs.

Compte tenu des résultats obtenus jusqu'à présent et des perspectives d'avenir, il serait crucial de poursuivre et d'élargir ce travail en :

- Étude de la durabilité du béton à long terme.
- Ajouter d'autres tests de durabilité à l'étude, tels que les tests de carbonatation.
- Les auteurs suggèrent également d'étudier les performances du béton ordinaire contenant des déchets de plastique et de caoutchouc dans des cycles de gel-dégel. La résistance au gel-dégel est une propriété essentielle pour le béton utilisé dans des climats où les fluctuations de température sont extrêmes. Comprendre comment les déchets comme le plastique et le caoutchouc affectent la capacité du béton à résister aux cycles répétés de gel et de dégel pourrait permettre de déterminer s'il est adapté à une utilisation dans des régions sujettes à de telles conditions.

---

---

## REFERENCES

---

---

**Les references:**

- [1] Li, X., Ling, T. C., & Hung Mo, K. (2020). Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 240, 117869.
- [2] Oikonomou, N., Mavridou, S. (2009). The use of waste tyre rubber in civil engineering works, Sustainability of Construction Materials, *Sustainability of Construction Materials, Elsevier*, pp. 213–238.
- [3] Narayan, P. (2001). Analysing Plastic Waste Management in India. Case study of Polybags and PET bottles. *IIIEE Reports*, 11.
- [4] Bisht, K., & Ramana, P. (2017). Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 811–817.
- [5] Fanny, T. (2009). Mise en place d'une unité de transformation de sacs plastiques en pavés. Rapport de stage à l'Association pour un Avenir Ensoleillé (PAE) TOGO, *Université Pierre Mendès-France*.
- [6] Khelaifa, H., Boudaoud, Z., & Benouis, A. (2021). Effect of adding rubber aggregates on the behaviour of compacted sand concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(3).
- [7] Senhadji, Y., Escadeillas, G., Benosman, A., Mouli, M., Khelafi, H., & Ould Kaci, S. (2015). Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29(7), 625–640.
- [8] Dong, Q., Huang, B., & Shu, X. (2013). Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent. *Construction and Building Materials*, 48, 116–123.
- [9] <https://www.ecologie.gouv.fr/differentes-categories-dechets>
- [10] 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.
- [11] <http://www.guide-dechets-paca.com/spip.php?rubrique7>, consulté le 27-09-2016
- [12] United Nations Environment Programme (UNEP). (n.d.). Electronic Waste. Récupéré sur <https://www.unenvironment.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/sustainable-economy/e-waste>
- [13] Does it matter that ScienceDaily republishes press releases? (2013, April 3) *Physics Today*. <https://doi.org/10.1063/pt.5.010217>

- [14] GAUTRON, P. (1993). Valorisation et recyclage des déchets. *Plastiques Et Composites*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-a3830>
- [15] Mohan, H. T., Jayanarayanan, K., & Mini, K. (2021). Recent trends in utilization of plastics waste composites as construction materials. *Construction and Building Materials*, 271, 121520.
- [16] ABDELLI, H. (2021). Contribution à l'étude de la valorisation des déchets industriels dans l'amélioration des performances du béton. THÈSE Présentée au Département de Génie Civil Pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT Domaine : *Sciences et Technologie*, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIFI, Algérie ,119 pages.
- [17] Lamba, P., Kaur, D. P., Raj, S., & Sorout, J. (2021). Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57), 86156–86179.
- [18] Latroch, N. (2018). Effet des agrégats a base de déchets des matériaux composites mortier-polymère. *Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem*, Faculté des Sciences et de la Technologie.
- [19] Da Silva, T. R., de Azevedo, A. R. G., Cecchin, D., Marvila, M. T., Amran, M., Fediuk, R., Vatin, N., Karelina, M., Klyuev, S., & Szelag, M. (2021). Application of Plastic Wastes in Construction Materials: A Review Using the Concept of Life-Cycle Assessment in the Context of Recent Research for Future Perspectives. *Materials*, 14(13), 3549.
- [20] Christelle, H. (2015). Proposition de scénarios de gestion raisonnées des déchets en vue de leur valorisation énergétique.
- [21] Traore, B., Elaboration. (2018). Elaboration et caractérisation d'une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés) : amélioration de la résistance par des charges en argiles, *thèse de doctorat*, université de bourgogne France –come en science pour l'ingénieur, microtechniques.
- [22] Patil, P.S. (2016). Use of Waste Plastic in Concrete Mixture as Aggregate Replacement. (2016). *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 3(12), 115–118.
- [23] GOUASMI, M. (2013). EFFETS D'AGREGATS LEGERS A BASE DE POLYTEREPHTALATE D'ETHYLENE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS.
- [24] Saikia, N., & de Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236–244.
- [25] Manjunatha, M., Seth, D., KVG D, B., & Chilukoti, S. (2021). Influence of PVC waste powder and silica fume on strength and microstructure properties of concrete: An experimental study. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00610.

- [26] Guendouz., M., F. Debieb, O. Boukendakdji, EH. Kadri, M. Bentchikou, H. Soualhi. (2016). Use of plastic waste in sand concrete. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (2), 382-389.
- [27] Qasim, O. A., & Jassam, S. H. (2022). Experimental Investigation of Plastic Waste Effect on Concrete Mechanical and Durability Properties. *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, 13(3), 190.
- [28] Al-Manaseer A.A, Dalal T.R. (1997). Concrete containing plastic aggregates, *Concr. Int.*, 19 47–52.
- [29] Chusilp, N. (2022). EFFECT OF RECYCLED PLASTIC CONTENT AS FILLERS ON MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE. *International Journal of GEOMATE*, 22(92).
- [30] Coppola, B., Courard, L., Michel, F., Incarnato, L., Scarfato, P., & Di Maio, L. (2018). Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made with foamed plastic waste aggregates. *Construction and Building Materials*, 170, 200–206.
- [31] Ismail, Z. Z., & AL-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management*, 28(11), 2041–2047.
- [32] Silva, R., de Brito, J., & Saikia, N. (2013). Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23–31.
- [33] Coppola, B., Courard, L., Michel, F., Incarnato, L., Scarfato, P., & Di Maio, L. (2018). Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made with foamed plastic waste aggregates. *Construction and Building Materials*, 170, 200–206.
- [34] Belmokaddem, M., Mahi, A., Senhadji, Y., & Pekmezci, B. Y. (2020). Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. *Construction and Building Materials*, 257, 119559.
- [35] Steyn, Z., Babafemi, A., Fataar, H., & Combrinck, R. (2021). Concrete containing waste recycled glass, plastic and rubber as sand replacement. *Construction and Building Materials*, 269, 121242.
- [36] Colangelo, F., Cioffi, R., Liguori, B., & Iucolano, F. (2016). Recycled polyolefins waste as aggregates for lightweight concrete. *Composites Part B: Engineering*, 106, 234–241.
- [37] Abu-Saleem, M., Zhuge, Y., Hassanli, R., Ellis, M., Rahman, M., & Levett, P. (2021). Evaluation of concrete performance with different types of recycled plastic waste for kerb application. *Construction and Building Materials*, 293, 123477.
- [38] Kou, S., Lee, G., Poon, C., & Lai, W. (2009). Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*, 29(2), 621–628.

- [39] S. Benosman, S., Taïbi, H., Mouli, M., Senhadji, Y., Belbachir, M., Bahlouli, I. M., & Houivet, D. (2015). L'effet de l'ajout du PET sur les performances mécaniques des matériaux Composites Mortier-PET (Effect of addition of PET on the mechanical performance of PET-Mortar Composite materials), *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (2), 559-571.
- [40] Guo S-Y, Zhang X, Chen J-Z. (2020). Mechanical and interface bonding properties of epoxy resin reinforced Portland cement repairing mortar. *Constr Build Mater*, 264: 120715.
- [41] Mohammed, A. A., Mohammed, I. I., & Mohammed, S. A. (2019). Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. *Construction and Building Materials*, 201, 232–245.
- [42] Ismail, Z. Z., & AL-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management*, 28(11), 2041–2047.
- [43] Pelisser, F., Montedo, O. R. K., Gleize, P. J. P., & Roman, H. R. (2012). Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. *Materials Research*, 15(4), 679–686.
- [44] Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27(12), 1870–1876.
- [45] Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*, 30(11), 2312–2320.
- [46] Yang, S., Yue, X., Liu, X., & Tong, Y. (2015). Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. *Construction and Building Materials*, 84, 444–453.
- [47] Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., & Gutiérrez, A. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, 29(10), 2707–2711.
- [48] Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M., Allahyari, H., & Nikbin, I. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302–1308.
- [49] Akçaözoğlu, S., Atiş, C. D., & Akçaözoğlu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30(2), 285–290.
- [50] Chidiac, S., & Mihaljevic, S. (2011). Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 855–863.
- [51] Senthil Kumar, K., Premalatha, P. V., & Baskar, K. (2016). Evaluation of Transport Properties of Concrete Made With E-Waste Plastic. *Journal of Testing and Evaluation*, 45(5), 20160008.

- [52] Corinaldesi, V., Donnini, J., & Nardinocchi, A. (2015). Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. *Construction and Building Materials*, 94, 337–345.
- [53] Aoudia, K. (2014). Recyclage et revalorisation des élastomères usages. Mémoire de magistère. *Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou*, Algérie.
- [54] Fedroff, D., Ahmad, S., & Savas, B. Z. (1996). Mechanical Properties of Concrete with Ground Waste Tire Rubber. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1532(1), 66–72.
- [55] Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1323–1333.
- [56] Bala, A., & Gupta, S. (2021). Thermal resistivity, sound absorption and vibration damping of concrete composite doped with waste tire Rubber: A review. *Construction and Building Materials*, 299, 123939.
- [57] <https://www.1001pneus.fr/cms/FR-FR/conception-des-pneus.html>. Consulté le 10/05/2020
- [58] Kaewunruen, S., Li, D., Chen, Y., & Xiang, Z. (2018). Enhancement of Dynamic Damping in Eco-Friendly Railway Concrete Sleepers Using Waste-Tyre Crumb Rubber. *Materials*, 11(7), 1169.
- [59] Zhang, Z., Ma, H., & Qian, S. (2015). Investigation on Properties of ECC Incorporating Crumb Rubber of Different Sizes. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(5), 241–251.
- [60] Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., Barroso de Aguiar, J., & Camões, A. (2012). Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes. *Construction and Building Materials*, 34, 186–191.
- [61] Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M. T., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104679.
- [62] Bisht, K., & Ramana, P. (2019). Waste to resource conversion of crumb rubber for production of sulphuric acid resistant concrete. *Construction and Building Materials*, 194, 276–286.
- [63] Kumar, R., & Dev, N. (2021). Mechanical and Microstructural Properties of Rubberized Concrete After Surface Modification of Waste Tire Rubber Crumb. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(4), 4571–4587.

- [64] Ofuyatan, O. M., Muhit, I. B., Babafemi, A. J., & Osibanjo, I. (2023). Evaluation of self-compacting rubberized concrete properties: Experimental and machine learning approach. *Structures*, 58, 105423.
- [65] Al-Tayeb, M. M., Abu Bakar, B. H., Akil, H. M., & Ismail, H. (2012). Effect of Partial Replacements of Sand and Cement by Waste Rubber on the Fracture Characteristics of Concrete. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51(6), 583–589.
- [66] Wang, H. Y., Chen, B. T., & Wu, Y. W. (2013). A study of the fresh properties of controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC). *Construction and Building Materials*, 41, 526–531.
- [67] Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T. A., & Bernardin, A. M. (2011). Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 757–763.
- [68] Djebien, R., Bouabaz, A., & Abbas, Y. (2022). Effect of Recycled Tire Rubber and Marble Waste on Fresh and Hardened Properties of Concrete. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 32(1), 218–239.
- [69] Siddika, A., Mamun, M. A. A., Alyousef, R., Amran, Y. M., Aslani, F., & Alabduljabbar, H. (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 224, 711–731.
- [70] Kumar, R., & Dev, N. (2021). Mechanical and Microstructural Properties of Rubberized Concrete After Surface Modification of Waste Tire Rubber Crumb. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(4), 4571–4587.
- [71] Zheng, L., Sharon Huo, X., & Yuan, Y. (2008). Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 22(5), 939–947.
- [72] Ben Nakhai, A., & M. Alhumoud, J. (2019). Properties of Concrete Containing Scrap (Recycled) Tire-Rubber. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(2), 653–658.
- [73] Batayneh, M. K., Marie, I., & Asi, I. (2008). Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. *Waste Management*, 28(11), 2171–2176.
- [74] Chylík, R., Trtík, T., Fládr, J., & Bílý, P. (2017). Mechanical properties and durability of crumb rubber concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 236, 012093.
- [75] Dong, Q., Huang, B., & Shu, X. (2013). Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent. *Construction and Building Materials*, 48, 116–123.
- [76] Khatib, Z. K., & Bayomy, F. M. (1999). Rubberized Portland Cement Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(3), 206–213.

- [77] Fedroff, D., Ahmad, S., & Savas, B. Z. (1996). Mechanical Properties of Concrete with Ground Waste Tire Rubber. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1532(1), 66–72.
- [78] Mahir Mahmud, H., Farah Nora Aznieta, A. A., & Gatea, S. J. (2016). Evaluation of rubberized fibre mortar exposed to elevated temperature using destructive and non-destructive testing. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(4), 1347–1358.
- [80] Fadiel. (2014). USE OF CRUMB RUBBER TO IMPROVE THERMAL EFFICIENCY OF CEMENT-BASED MATERIALS. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(1), 1–11.
- [81] Al-Tayeb, M. M., Abu Bakar, B. H., Akil, H. M., & Ismail, H. (2012). Effect of Partial Replacements of Sand and Cement by Waste Rubber on the Fracture Characteristics of Concrete. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51(6), 583–589.
- [82] Cole, L., Bakheet, R., & Akib, S. (2020). Influence of Using Waste Plastic and/or Recycled Rubber as Coarse Aggregates on the Performance of Pervious Concrete. *Eng, 1(2)*,
- [83] Gupta, T., Chaudhary, S., & Sharma, R. K. (2014). Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 73, 562–574.
- [84] Kumar, R., & Dev, N. (2021). Mechanical and Microstructural Properties of Rubberized Concrete After Surface Modification of Waste Tire Rubber Crumb. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(4), 4571–4587.
- [85] Najim, K. B., & Hall, M. R. (2012). Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. *Construction and Building Materials*, 27(1), 521–530.
- [86] Pavankalyan, K., Durga Prasad, R., & Pradeep Kumar, S. (2022). Mechanical and Durability Studies on Concretes Containing Crumb Rubber Fine Aggregate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1086(1), 012013.
- [87] Si, R., Wang, J., Guo, S., Dai, Q., & Han, S. (2018). Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 180, 823–831.
- [88] Thomas, B. S., Gupta, R. C., Kalla, P., & Cseteneyi, L. (2014). Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 59, 204–212.
- [89] Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., Barroso de Aguiar, J., & Camões, A. (2012). Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes. *Construction and Building Materials*, 34, 186–191.
- [90] Shah, S. F. A., Naseer, A., Shah, A. A., & Ashraf, M. (2014). Evaluation of Thermal and Structural Behavior of Concrete Containing Rubber Aggregate. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(10), 6919–6926.

- [91] Thomas, B. S., Gupta, R. C., & Panicker, V. J. (2016). Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*, 112, 504–513.
- [92] Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2015). Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 102, 78–87.
- [93] SAS Institute. (n.d.). JMP Software. Récupéré sur [https://www.jmp.com/en\\_us/home.html](https://www.jmp.com/en_us/home.html)
- [94] Jacques GOUPY, «LES PLANS D'EXPERIENCES».
- [95] K. Sandrine. (2004). ' Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt ', *thèse de doctorat*, Université de LIMOGES.
- [96] REMADNIA, M. (2012). ' Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants ', *thèse de doctorat*, Université de 08 Mai 1945 Guelma.
- [97] Tinsson, W. (2010). Plans d'expérience: constructions et analyses statistiques. *Springer Science & Business Media*. [http://books.google.ie/books?id=sTWohxxiMHMC&printsec=frontcover&dq=Plan+de+criblage&hl=&cd=1&source=gbs\\_api](http://books.google.ie/books?id=sTWohxxiMHMC&printsec=frontcover&dq=Plan+de+criblage&hl=&cd=1&source=gbs_api)
- [98] Goupy, J. (1999). *Plans d'expériences pour surfaces de réponse*. [http://books.google.ie/books?id=AUCDPQAACAAJ&dq=PLANS+DE+SURFACE+DE+R%C3%89PONSE&hl=&cd=1&source=gbs\\_api](http://books.google.ie/books?id=AUCDPQAACAAJ&dq=PLANS+DE+SURFACE+DE+R%C3%89PONSE&hl=&cd=1&source=gbs_api)
- [99] Hasler, D. (2014). *Plans d'expériences - Design of Experiments. Avec plan factoriel complet et utilisation des équations structurelles*. GRIN Verlag. [http://books.google.ie/books?id=6B4sDQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Plan+factoriel+complet&hl=&cd=1&source=gbs\\_api](http://books.google.ie/books?id=6B4sDQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Plan+factoriel+complet&hl=&cd=1&source=gbs_api)
- [100] [https://www.bing.com/ck/a?!&&p=386a74443ef75babJmltdHM9MTcxODMyMzlwMCZpZ3VpZD0yMDMwYWZiZS1mZGJlLTZjNzQtMDMxMy1iZGZhZmMwYTZkZGUmaW5zaWQ9NTE5OA&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=2030afbe-fdbe-6c74-0313-bdfafc0a6dde&psq=Coefficient+de+d%C3%A9termination+\(R2\)+%3a&u=a1aHR0cHM6Ly9mci53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvQ29lZmZpY2llbnRfZGVfZCVMYVBOXRlcm1pbmF0aW9u&ntb=1](https://www.bing.com/ck/a?!&&p=386a74443ef75babJmltdHM9MTcxODMyMzlwMCZpZ3VpZD0yMDMwYWZiZS1mZGJlLTZjNzQtMDMxMy1iZGZhZmMwYTZkZGUmaW5zaWQ9NTE5OA&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=2030afbe-fdbe-6c74-0313-bdfafc0a6dde&psq=Coefficient+de+d%C3%A9termination+(R2)+%3a&u=a1aHR0cHM6Ly9mci53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvQ29lZmZpY2llbnRfZGVfZCVMYVBOXRlcm1pbmF0aW9u&ntb=1)
- [101] <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=4f3e874f244d5d56JmltdHM9MTcxNTkwNDAwMCZpZ3VpZD0yMDMwYWZiZS1mZGJlLTZjNzQtMDMxMy1iZGZhZmMwYTZkZGUmaW5zaWQ9NTE5Mg&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=2030afbe-fdbe-6c74-0313-bdfafc0a6dde&psq=D%C3%A9finition+R2+ajust%C3%A9+avec+exemple+d'explication&u=a1aHR0cHM6Ly9zdGF0b3JpYWxzLm9yZy9pbmRlcnByeXZXRhdGlvb1yLWNhcnJlLWVfZGdXNOZWUv&ntb=1>

- [102] <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=6bb39e17a3a3fe49JmltdHM9MTcxODMyMzlwMCZpZ3VpZD0yMDMwYWZiZS1mZGJILTZjNzQtMDMxMy1iZGZhZmMwYTZkZGUmaW5zaWQ9NTIyOA&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=2030afbe-fdbe-6c74-0313-bdfafc0a6dde&psq=Prob.%3e+F&u=a1aHR0cHM6Ly9zdGF0cy5zdGFja2V4Y2hhbmdlLmNvbS9xdWVzdGlvb2N1bWVzNDYxL2xhcmlkLXByb2ItZi1pbi1yZWdyZXNzaW9u&ntb=1>
- [103] <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=b61230e881c0c0a6JmltdHM9MTcxNTkwNDAwMCZpZ3VpZD0yMDMwYWZiZS1mZGJILTZjNzQtMDMxMy1iZGZhZmMwYTZkZGUmaW5zaWQ9NTIwMA&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=2030afbe-fdbe-6c74-0313-bdfafc0a6dde&psq=d%c3%a9finition+Racine+de+1%27erreur+quadratique+moyenne&u=a1aHR0cHM6Ly9kYXRhc2NpZW50ZXN0LmNvbS9lcnJldXItdXVhZmVhdGlxdWUtbW95ZW5uZQ&ntb=1>
- [104] Kumar, R., & Dev, N. (2021). Mechanical and Microstructural Properties of Rubberized Concrete After Surface Modification of Waste Tire Rubber Crumb. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(4), 4571–4587. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06154-w>
- [105] <http://www.sigmaldrich.com/catalog/product/sigald/06203?lang=en&region=DZ>, consulté le 22-10-2016.
- [106] Norme NA EN 933-5 : pour déterminer l'analyse granulométrique par tamisage.
- [107] Norme NA EN 12620: pour déterminer module de finesse.
- [108] Norme NA EN 933-8 : pour déterminer l'équivalent de sable.
- [109] Norme NF P18-554 : pour déterminer La masse volumique apparente.
- [110] Norme NF P18-558: pour déterminer la masse volumique absolue.
- [111] Norme NA EN 1097-6 : pour déterminer le degré d'absorption d'eau.
- [112] Norme NA 2600 : pour déterminer la confection des éprouvettes.
- [113] Norme NFP18-583 : pour déterminer l'air occlus.
- [114] Norme NA -436 : pour déterminer la densité du béton à l'état frais.
- [115] Norme NF P18-451 : pour déterminer l'ouvrabilité du béton.
- [116] NF EN 12390-7: pour déterminer la masse volumique à l'état sec.
- [117] Norme NF EN 12390-3 : pour déterminer la résistance à la compression.
- [118] Norme NF EN 12390-4 : pour déterminer la résistance de traction par flexion.
- [119] Norme NF EN 12504-4 : pour déterminer la vitesse ultrason.
- [120] Norme NF P 18-404 : pour déterminer l'absorption d'eau par capillarité.
- [121] Norme NF EN 118-459 : pour déterminer la porosité accessible a l'eau.
- [122] Norme NBN B 15-215 :1989 : pour déterminer d'absorption d'eau par immersion total.
- [123] Norme ASTM C 267-96 : pour déterminer la perte de masse dans une attaque chimique.

- [124] Norme NF EN 15305 : pour déterminer la diffraction des rays x.
- [125] Kotresh, K.M and Belachew, M.G. (2014). Study on waste tyre rubber as concrete aggregates. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*. Volume 3, 433-436.
- [126] Alawais, A., & West, R. P. (2019). Ultra-violet and chemical treatment of crumb rubber aggregate in a sustainable concrete mix. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 4(3), 144–152.
- [127] Kumar, R., & Dev, N. (2021). Assessment of Mechanical and Impact Resistance Properties of Rubberized Concrete After Surface Modification of Rubber Crumb. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(4), 2855–2871.
- [128] Ohemeng, E. A., & Yalley, P. P. K. (2013). Models for predicting the density and compressive strength of rubberized concrete pavement blocks. *Construction and Building Materials*, 47, 656–661.
- [129] Dong, Q., Huang, B., & Shu, X. (2013). Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent. *Construction and Building Materials*, 48, 116–123.
- [130] Chylík, R., Trtík, T., Fládr, J., & Bílý, P. (2017). Mechanical properties and durability of crumb rubber concrete. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 236, 012093.
- [131] Nadal Gisbert, A., Gadea Borrell, J., Parres García, F., Juliá Sanchis, E., Crespo Amorós, J., Segura Alcaraz, J., & Salas Vicente, F. (2014). Analysis behaviour of static and dynamic properties of Ethylene-Propylene-Diene-Methylene crumb rubber mortar. *Construction and Building Materials*, 50, 671–682.
- [132] Asutkar, P., Shinde, S., & Patel, R. (2017). Study on the behaviour of rubber aggregates concrete beams using analytical approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(1), 151–159.
- [133] Ghaly, A. M., & Cahill IV, J. D. (2005). Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(6), 1075–1081.
- [134] Snelson, D., Kinuthia, J., Davies, P., & Chang, S. R. (2009). Sustainable construction: Composite use of tyres and ash in concrete. *Waste Management*, 29(1), 360–367.
- [135] Mehrani, S. A., Bhatti, I. A., Bhatti, N. B., Jhatial, A. A., & Lohar, M. A. (2019). Utilization of Rubber Powder of Waste Tyres in Foam Concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 9(1), 87–90.
- [136] Si, R., Wang, J., Guo, S., Dai, Q., & Han, S. (2018). Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 180, 823–831.

- [137] Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J., & Hernández, M. (2005). Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing. *Composite Structures*, 71(3–4), 439–446.
- [138] Djebien, R., Bouabaz, A., & Abbas, Y., (2022). Effect of Recycled Tire Rubber and Marble Waste on Fresh and Hardened Properties of Concrete. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 32(1), 218–239.
- [139] Sofi, A. (2018). Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 2691–2700.
- [140] Bravo, M. Brito, J. (2012). Concrete made with used tyre aggregate: durability related performance, *J. Cleaner Prod.* 25, 42–50.
- [141] Batayneh, M. K., Marie, I., & Asi, I. (2007). Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. *Waste Management*, 28(11), 2171–2176.
- [142] Qasim, O. A. and Jassam, S. H. (2022), Experimental Investigation of Plastic Waste Effect on Concrete Mechanical and Durability Properties, *International Review of Civil Engineering (IRECE)*., 13(3), 190.
- [143] Bisht, K. and Ramana, P. (2019), Waste to resource conversion of crumb rubber for production of sulphuric acid resistant concrete, *Construction and Building Materials*., 194, 276–286.
- [144] Moolchandani, K., Sharma, A., & Kishan, D. (2024). Enhancing Concrete Performance with Crumb Rubber and Waste Materials: A Study on Mechanical and Durability Properties. *Buildings*, 14(1), 161.
- [145] Saikia, N., & De Brito, J. (2013). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236–244.
- [146] Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2006). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27(12), 1870–1876.

- [147] Mohammed, A. A., Mohammed, I. I., & Mohammed, S. A. (2019). Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. *Construction and Building Materials*, 201, 232–245.
- [148] Ozbay, E., Lachemi, M. and Sevim, U. K. (2010), “Compressive strength, abrasion resistance and energy absorption capacity of rubberized concretes with and without slag”, *Materials and Structures.*, 44(7), 1297– 1307.
- [149] Senhadji, Y., Escadeillas, G., Benosman, A., Mouli, M., Khelafi, H. and Ould Kaci, S. (2015), “Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete”, *Journal of Adhesion Science and Technology.*, 29(7), 625–640.
- [150] Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu, O., Etili, S. and Alhassan, M. (2017), “Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder”, *Construction and Building Materials.*, 140, 562–569.
- [151] Ganjian, E., Khorami, M., & Maghsoudi, A. A. (2008). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1828–1836.
- [152] Najim, K. B., & Hall, M. R. (2012). Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. *Construction and Building Materials*, 27(1), 521–530.
- [153] Belmokaddem, M., Mahi, A., Senhadji, Y., & Pekmezci, B. Y. (2020). Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. *Construction and Building Materials*, 257, 119559.
- [154] Akçaözoğlu, S., Atiş, C. D., & Akçaözoğlu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30(2), 285–290.
- [155] BOUKOUR S. (2017). Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco-composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés. *Thèse de doctorat*, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie.

- [156] Silva, R., de Brito, J., & Saikia, N. (2013). Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23–31.
- [157] Ghernouti, Y., & Rabehi, B. (2012). Strength and Durability of Mortar Made with Plastics Bag Waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(3), 145–153.
- [158] Belmouhoub, A., Abdelouahed, A., & Noui, A. (2023). Experimental and factorial design of the mechanical and physical properties of concrete containing waste rubber powder. *Research on Engineering Structures & Materials*.
- [159] Nordstokke D, Colp S.M.(2014). Factorial Design Encyclopedia of Quality of Life and WellBeing Research, 2144-2145. *Springer, Dordrecht*.
- [160] Gelis K, Ozbek K, Celik, A.N, Ozyurt O. (2021). A novel cooler block design for photovoltaic thermal systems and performance evaluation using factorial design. *J. Build. Eng*; 48, 10.
- [161] Richardson, I., Groves, G. (1997). The structure of the calcium silicate hydrate phases present in hardened pastes of white Portland cement/blast-furnace slag blends, *J. Mater. Sci.* 32 (18) 4793–4802.
- [162] Gupta, T., Siddique, S., Sharma, R. K. and Chaudhary, S. (2021), Investigating mechanical properties and durability of concrete containing recycled rubber ash and fibers, *Journal of Material Cycles and Waste Management.*, 23(3), 1048–1057.
- [163] Nanes, B. A. (2015). Slide Set: Reproducible image analysis and batch processing with ImageJ. *BioTechniques*, 59(5), 269–278.
- [164] Muttashar, H. L., Ali, N. B., Ariffin, M. a. M., & Hussin, M. W. (2018). Microstructures and physical properties of waste garnets as a promising construction materials. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 87–96.

Les annexes :**Match! Phase Analysis Report**

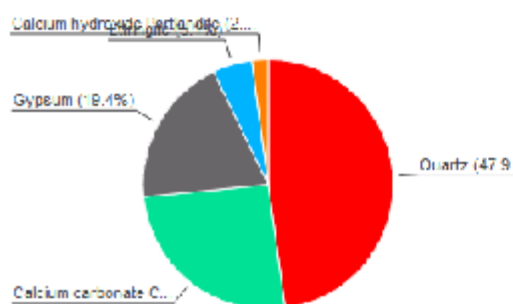
Sample: BO Acide(1)

**Sample Data**

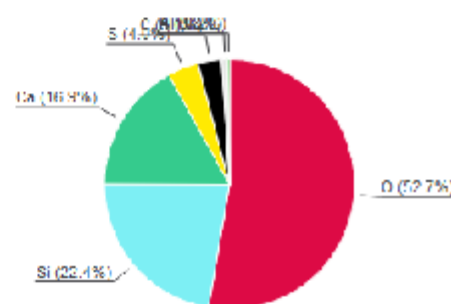
File name BO Acide(1).csv  
 File path C:/Users/DELL/Desktop/drx/Belmouhoub Amer 23 (7)/Belmourhoub Amer 23  
 Data collected mai 20, 2024 00:17:53  
 Data range 9.970° - 79.930°  
 Original data range 10.010° - 79.970°  
 Number of points 3499  
 Step size 0.020  
 Rietveld refinement converged No  
 Alpha2 subtracted No  
 Background subtr. No  
 Data smoothed No  
 2theta correction -0.04°  
 Radiation X-rays  
 Wavelength 1.541874 Å

**Analysis Results**

Phase composition (Weight %) calc. by RIR method



Elemental composition (Weight %) calc. by RIR method



Index	Amount (%)	Name	Formula sum
A	47.9	Quartz	O2 Si
B	25.5	Calcium carbonate Calcite	C Ca O3
C	19.4	Gypsum	Ca H4 O6 S
D	5.1	Ettringite	Al2 Ca6 H80.602 O49.498 S3
E	2.1	Calcium hydroxide Portlandite	Ca H2 O2
	16.5	Unidentified peak area	

Amounts calculated by RIR (Reference Intensity Ratio) method

Element	Amount (weight %)
O	52.7
Si	22.4
Ca	16.9
S	4.0
C	3.1
H	0.5
Al	0.2
*LE (sum)	56.5

**Details of identified phases**

**A: Quartz (47.9 %)\***  
 Formula sum O2 Si  
 Entry number 98-900-5018  
 Figure-of-Merit (FoM) 0.822743  
 Total number of peaks 140  
 Peaks in range 40  
 Peaks matched 35  
 Intensity scale factor 0.78  
 2theta correction -0.017°  
 Space group P 32 2 1 S  
 Crystal system trigonal (hexagonal axes)  
 Unit cell a= 4.9137 Å c= 5.4047 Å  
 V/c 2.96 (Source: Unknown)  
 Calc. density 2.649 g/cm<sup>3</sup>

## Match! Phase Analysis Report

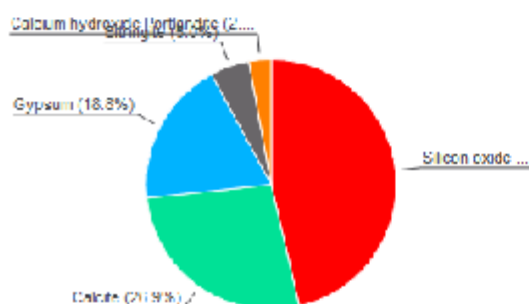
Sample: 2C2Px Acide(1)

### Sample Data

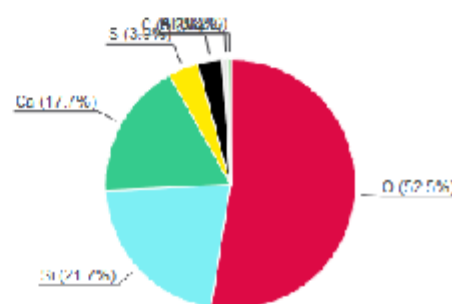
File name 2C2Px Acide(1).csv  
 File path C:/Users/DELL/Desktop/drx/Belmouhoub Amer 23 (7)/Belmourhoub Amer 23  
 Data collected mai 20, 2024 00:17:53  
 Data range 10.190° - 80.150°  
 Original data range 10.010° - 79.970°  
 Number of points 3499  
 Step size 0.020  
 Rietveld refinement converged No  
 Alpha2 subtracted No  
 Background subtr. No  
 Data smoothed No  
 2theta correction 0.18°  
 Radiation X-rays  
 Wavelength 1.541874 Å

### Analysis Results

Phase composition (Weight %) calc. by RIR method



Elemental composition (Weight %) calc. by RIR method



Index	Amount (%)	Name	Formula sum
A	46.4	Silicon oxide Quartz low	O2 Si
B	26.9	Calcite	C Ca O3
C	18.8	Gypsum	Ca H4 O6 S
D	5.0	Ettringite	Al2 Ca6 H84 O50 S3
E	2.9	Calcium hydroxide Portlandite	Ca H2 O2
	19.3	Unidentified peak area	

Amounts calculated by RIR (Reference Intensity Ratio) method

Element	Amount (weight %)
O	52.5(*)
Si	21.7%
Ca	17.7%
S	3.9%
C	3.2(*)
H	0.2%
Al	0.2%
%LE (sum)	56.5%

### Details of identified phases

#### A: Silicon oxide Quartz

low (46.4 %)\*

Formula sum O2 Si  
 Entry number 96-101-1180  
 Figure-of-Merit (FoM) 0.752224\*  
 Total number of peaks 140  
 Peaks in range 140  
 Peaks matched 23  
 Intensity scale factor 0.67  
 2theta correction -0.041°  
 Space group P 32 2 1 S  
 Crystal system trigonal (hexagonal axes)  
 Unit cell a= 4.9100 Å c= 5.4000 Å  
 V/c 3.01 (Source: Unknown)

## Match! Phase Analysis Report

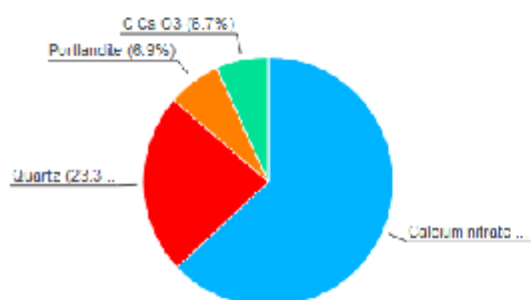
Sample: BO Nitrate(1)

### Sample Data

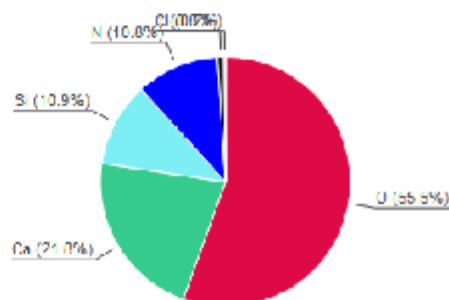
File name BO Nitrate(1).csv  
 File path C:/Users/DELL/Desktop/drx/Belmouhoub Amer 23 (7)/Belmourhoub Amer 23  
 Data collected mai 20, 2024 00:17:53  
 Data range 10.010° - 79.970°  
 Original data range 10.010° - 79.970°  
 Number of points 3499  
 Step size 0.020  
 Rietveld refinement converged No  
 Alpha2 subtracted No  
 Background subtr. No  
 Data smoothed No  
 Radiation X-rays  
 Wavelength 1.541874 Å

### Analysis Results

Phase composition (Weight %) calc. by RIR method



Elemental composition (Weight %) calc. by RIR method



Index	Amount (%)	Name	Formula sum
A	63.0	Calcium nitrate	Ca N2 O6
B	23.3	Quartz	O2 Si
C	8.9	Portlandite	Ca H2 O2
D	6.7		C Ca O3
	13.0	Unidentified peak area	

Amounts calculated by RIR (Reference Intensity Ratio) method

Element	Amount (weight %)
O	55.5(*)
Ca	21.8%
Si	10.9%
N	10.8(*)
C	0.8(*)
H	0.2(*)
%LE (sum)	67.3%

### Details of identified phases

#### A: Calcium nitrate (63.0 %)

Formula sum Ca N2 O6  
 Entry number 96-591-0048  
 Figure-of-Merit (FoM) 0.000000  
 Total number of peaks 154  
 Peaks in range 154  
 Peaks matched 7  
 Intensity scale factor 1.00  
 Space group P a -3  
 Crystal system cubic  
 Unit cell a= 7.6000 Å  
 I/c 1.55 (Source: Unknown)  
 Calc. density 2.482 g/cm<sup>3</sup>  
 Reference Wyckoff R. W. G., "Crystal structure of calcium nitrate", Crystals structures, Vol. II (1951)

#### B: Quartz (23.3 %)

Formula sum O2 Si

## Match! Phase Analysis Report

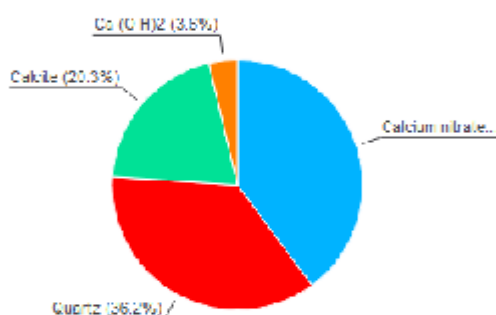
Sample: 2C2Px Nitrate(1)

### Sample Data

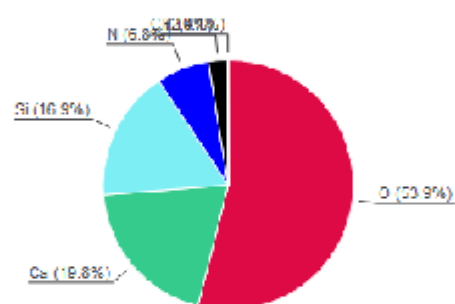
File name 2C2Px Nitrate(1).csv  
 File path C:/Users/DELL/Desktop/drx/Belmouhoub Amer 23 (7)/Belmourhoub Amer 23  
 Data collected mai 20, 2024 00:17:53  
 Data range 10.050° - 80.010°  
 Original data range 10.010° - 79.970°  
 Number of points 3499  
 Step size 0.020  
 Rietveld refinement converged No  
 Alpha2 subtracted No  
 Background subtr. No  
 Data smoothed No  
 2theta correction 0.04°  
 Radiation X-rays  
 Wavelength 1.541874 Å

### Analysis Results

Phase composition (Weight %) calc. by RIR method



Elemental composition (Weight %) calc. by RIR method



Index	Amount (%)	Name	Formula sum
A	39.9	Calcium nitrate	Ca N2 O6
B	36.2	Quartz	O2 Si
C	20.3	Calcite	C Ca O3
D	3.8	Ca (O H)2	Ca H2 O2
	10.7	Unidentified peak area	

Element	Amount (weight %)
O	53.9% (*)
Ca	19.8%
Si	16.9%
N	6.8% (*)
C	2.4% (*)
H	0.1% (*)
%LE (sum)	63.2%

Amounts calculated by RIR (Reference Intensity Ratio) method

### Details of identified phases

#### A: Calcium nitrate (39.9 %)

Formula sum Ca N2 O6  
 Entry number 98-591-0046  
 Figure-of-Merit (FoM) 0.000000  
 Total number of peaks 154  
 Peaks in range 60  
 Peaks matched 7  
 Intensity scale factor 0.39  
 Space group P a -3  
 Crystal system cubic  
 Unit cell a= 7.6000 Å  
 $\rho_c$  1.55 (Source: Unknown)  
 Calc. density 2.482 g/cm<sup>3</sup>  
 Reference Wyckoff R. W. G., "Crystal structure of calcium nitrate", Crystals structures, Vol. II (1951)

#### B: Quartz (36.2 %)

## Match! Phase Analysis Report

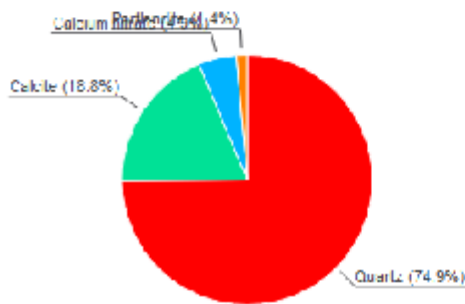
Sample: 2C2PF Nitrate

**Sample Data**

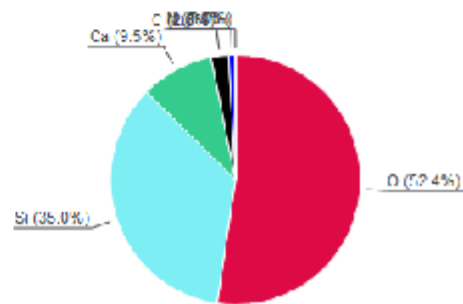
File name 2C2PF Nitrate.csv  
 File path C:/Users/DELL/Desktop/drx/Belmouhoub Amer 23 (7)/Belmourhoub Amer 23  
 Data collected mai 20, 2024 00:12:09  
 Data range 10.010° - 79.970°  
 Original data range 10.010° - 79.970°  
 Number of points 3499  
 Step size 0.020  
 Rietveld refinement converged No  
 Alpha2 subtracted No  
 Background subtr. No  
 Data smoothed No  
 Radiation X-rays  
 Wavelength 1.541874 Å

**Analysis Results**

Phase composition (Weight %) calc. by RIR method



Elemental composition (Weight %) calc. by RIR method



Index	Amount (%)	Name	Formula sum
A	74.9	Quartz	O2 Si
B	18.8	Calcite	C Ca O3
C	4.9	Calcium nitrate	Ca N2 O6
D	1.4	Portlandite	Ca H2 O2
	19.2	Unidentified peak area	

Element	Amount (weight %)
O	52.4% (*)
Si	35.0%
Ca	9.5%
C	2.3% (*)
N	0.8% (*)
H	0.0% (*)
%LE (sum)	55.5%

Amounts calculated by RIR (Reference Intensity Ratio) method

**Details of identified phases**

**A: Quartz (74.9 %)\***

Formula sum O2 Si  
 Entry number 98-901-0145  
 Figure-of-Merit (FoM) 0.778627  
 Total number of peaks 140  
 Peaks in range 140  
 Peaks matched 24  
 Intensity scale factor 0.66  
 2theta correction 0.035°  
 Space group P 32 1 S  
 Crystal system trigonal (hexagonal axes)  
 Unit cell a= 4.9230 Å c= 5.4090 Å  
 I/c 2.86 (Source: Unknown)  
 Calc. density 2.636 g/cm³  
 Reference Ikuta D., Kawame N., Banno S., Hirajima T., Ito K., Rakovan J. F., Downs R. T., Tamada O., "First in situ X-ray diffraction identification of coesite and retrogradequartz on a glass thin section of an ultrahigh-pressure metamorphic rock and their crystal structure details Locality: Yangkou meta-igneous complex in the middle part