

Université 20 Août 1955-Skikda

Faculté de technologie

Département : Génie civil

Ref : .....



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم: الهندسة المدنية

المرجع: .....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
du diplôme de  
**Doctorat de 3ème cycle (LMD)**  
En génie civil  
Option : Diagnostique et traitement des pathologies de la construction

## **VALORISATION DES DECHETS DANS UN BETON DE SABLE A BASE DES FIBRES VEGETALES**

Présentée par :  
**RIHIA Chaher**

Dirigée par  
**M<sup>me</sup>. HEBHOUB Houria**

Soutenue publiquement le 03/11/2020

**Devant le jury composé de :**

Mr. DJEBIEN Rachid.	MCA.	Président.	Université de Skikda
Mme. HEBHOUB Houria.	MCA.	Rapporteur.	Université de Skikda
Mr. BELACHIA Mouloud.	Professeur.	Examineur.	Université de Guelma
Mr. BENSEBTI Salah eddine.	MCA.	Examineur.	Université de Constantine

## ***Remerciements***

Tout d'abord, je remercie madame H.HEBHOUB, maitre de conférences à l'université de Skikda pour sa disponibilité, ses conseils et ses orientations ainsi que pour le temps qu'il m'a consacré.

J'adresse mes remerciements à monsieur R.DJEBIEN, maitre de conférences à l'université de Skikda qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Mes remerciements vont aussi à monsieur M.BELACHAIA professeur à l'université de Skikda pour l'intérêt qu'il a porté à cet travail et avoir accepter la lourde tâche d'examineur.

J'exprime mes vifs remerciements et ma reconnaissance à monsieur S.BEN SEBTI, maitre de conférence à l'université de Constantine d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse et accepté de faire partie de mon jury.

Je remercie A.ABDELOUAHED et O.BOUGHAMSA, pour leurs aides, leurs disponibilités et leurs conseils appréciés... Sans oublier, tous le personnel et le responsable de laboratoire LMGHU de l'université de Skikda.

Mes remerciements s'adressent de même à tous le personnel de laboratoire LNHCE, ainsi que le laboratoire de la cimenterie de Hdjar Soud – Skikda, pour leurs précieux aides et conseils.

Je tiens sincèrement à remercier du fond du cœur mon père, ma mère, ma sœur et mes frères pour m'avoir soutenu et encouragé dans mes études.

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*À mes chers parents pour leurs soutiens, leurs sacrifices et leurs prières.*

*Tous les mots ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance  
pour votre dévouement.*

*Vous été toujours à mes côtés pour me soutenir et m'épauler.*

*À mes frères Elias, Nasr Eddine, Amine et à ma sœur Randa pour  
leurs encouragements.*

*À ma sœur qui sais toujours comment procurer l'aide et la  
joie pour moi et pour la famille.*

*N'oublions pas mes nièces Iline, Djoudi et mes neveux  
Mohamed zain, Youcef et Amir pour leurs amours.*

*À tous ceux qui me sont chers et proches.*

## RESUME

L'introduction de fibres végétales traitées dans les bétons de sable entraîne une réduction de la densité, une amélioration de la ductilité et la conductivité thermique et fait du béton de sable un matériau respectueux de l'environnement et écologique. La valorisation des déchets dans ce type de matériau permet de produire de nouveaux matériaux écologiques et durables qui sont utilisés soit dans des nouvelles constructions, soit dans la réhabilitation des bâtiments anciens. Dans ce contexte, une étude comparative a été basée sur la valorisation des déchets de marbre et de céramique sous forme de sable dans un béton de sable à base de fibres de paille de blé. Pour mener à bien cette étude, nous avons introduit ces déchets à des taux de substitution de 10% et 20%, séparés et mixtes, et étudié le développement des propriétés de ces bétons (densité, ouvrabilité, teneur en air, résistance à la compression et résistance à la traction en flexion, homogénéité, résistance à la surface, absorption d'eau par capillaire et par immersion) et leur comportement dans les milieux agressifs  $H_2SO_4$ , HCL,  $CH_3COOH$  et NaCL (perte de masse, perte de résistance ainsi que la pénétration des ions de chlorure). L'étude montre que la récupération de ces déchets sous forme de sable dans un béton de sable à base de fibres de paille donne des résultats satisfaisants.

**Mots clés:** Béton de sable, fibres de paille de blé, valorisation, déchet, marbre, céramique, substitution, comportement, milieux agressifs.

## ABSTRACT

The introduction of treated plant fibres into sand concretes leads to a reduction in density, improved ductility and thermal conductivity, and makes sand concrete an environmentally friendly and ecological material. The recovery of waste in this type of material allows the production of new ecological and sustainable materials used either in the new construction or in the rehabilitation of old buildings. In this context, a comparative study was based on the valorization of marble and ceramic waste as sand in sand concrete made from wheat straw fibers. To carry out this study, we introduced these wastes at substitution rates of 10% and 20%, separated and mixed, and studied the development of the properties of these concretes (density, workability, air content, compressive strength and bending tensile strength, homogeneity, surface resistance, water absorption by capillaries and by immersion) and their behavior in aggressive media  $H_2SO_4$ , HCL,  $CH_3COOH$  and NaCL (loss of mass, loss of resistance and the chloride ion penetration). The study shows that the recovery of this waste as sand in sand concrete based on straw fibers gives satisfactory results.

**Key words:** sand concrete, wheat straw fibres, recovery, waste, marble, ceramics, substitution, behavior, aggressive media.

## ملخص

يؤدي إدخال ألياف النباتات المعالجة في الخرسانة الرملية إلى تقليل الكثافة وتحسين الليونة والتوصيل الحراري، ويجعل الخرسانة الرملية مادة صديقة للبيئة وإيكولوجية. يسمح استعمال النفايات في هذا النوع من المواد بإنتاج مواد بيئية مستدامة جديدة تستخدم إما في البناء الجديد أو في إعادة تأهيل المباني القديمة. في هذا السياق، استندت دراسة مقارنة على استعادة نفايات الرخام والسيراميك على شكل رمل في خرسانة رملية مصنوعة من ألياف قش القمح. لإجراء هذه الدراسة، قمنا بإدخال هذه النفايات بنسب استبدال 10٪ و 20٪ ، مفضولة ومختلطة ، ودرسنا تطور خصائص هذه الخرسانة (الكثافة ، قابلية العمل ، محتوى الهواء ، مقاومة الانضغاط وقوة الشد المرنة، التجانس، مقاومة السطح، امتصاص الماء عن طريق الشعيرات و الغمر) و سلوكهم في أوساط عدوانية  $H_2SO_4$ , HCL,  $CH_3COOH$  و NaCl (فقدان الكتلة، فقدان المقاومة و عمق تغلغل ايونات الكلوريد) . أوضحت الدراسة أن استعادة هذه النفايات كرمال في خرسانة رملية مبنية على ألياف القش يعطي نتائج مرضية.

**كلمات المفتاح:** الخرسانة الرملية، ألياف قش القمح، الاستعادة، نفايات، الرخام، السيراميك، استبدال، السلوك، أوساط عدوانية.

**Sommaire**

Liste des figures	1
Liste des tableaux	4
Introduction générale	6

**Chapitre I: Etat de connaissances**

I.1. Introduction	10
I.2. Béton de sable	10
I.2.1. Définition	10
I.2.2. Histoire du béton de sable	11
I.2.3. Constituants des bétons de sable	12
I.2.4. Caractéristiques des bétons de sable	14
I.2.5. Propriétés spécifique des bétons de sable	17
I.2.6. Domaine d'application des bétons de sable	17
I.2.7. Méthode de formulation des bétons de sable	19
I.3. Bétons à base des fibres végétales	22
I.3.1. Généralités	22
I.3.2. Classification des fibres végétales	24
I.3.3. Valorisation des fibres végétales dans différentes composites	25
I.3.4. Propriétés des bétons renforcés par des fibres végétales	27
I.3.5. Les fibres de paille de blé	28
I.4. Valorisation des déchets dans le domaine de construction	30
I.4.1. Introduction	30
I.4.2. Déchets de marbre et déchets de céramique	31
I.4.2.1. Le marbre	31
I.4.2.1.1. Déchets de marbre	32
I.4.2.1.2. Utilisation de déchets de marbre comme matériaux de construction	33
I.4.2.2. La céramique	34
I.4.2.2.1. Céramique sanitaire (les appareils sanitaires)	35
I.4.2.2.2. Les déchets de céramique	35
I.4.2.2.3. Utilisation de déchets de céramique comme matériaux de construction	36
I.5. Conclusion	37

**Chapitre II: Caractérisation des matériaux**

II.1. Introduction	39
II.2. Caractérisation des matériaux	39
II.2.1. Ciment	39
II.2.2. Sables	41
II.2.2.1. Sable ordinaire	41
II.2.2.2. Sables recyclés	42
II.2.3. Fines calcaires	45
II.2.4. Fibres de paille de blé	45
II.2.5. Adjuvant	46
II.2.6. Eau de gâchage	46
II.3. Conclusion	46

**Chapitre III : Programme expérimental et méthodologie d'essai**

III.1. Introduction	49
III.2. Programme expérimental et méthodes d'essais	50
III.2.1. Programme expérimental	50
III.2.2. Formulation des mélanges	50
III.2.3. Fabrication des mélanges	51
III.2.4. Méthodes d'essais	54
III.2.4.1. Affaissement au cône d'Abrams	54
III.2.4.2. Air occlus	54
III.2.4.3. Densité	55
III.2.4.4. Essai de compression	55
III.2.4.5. Essai de traction par flexion	56
III.2.4.6. Essai au scléromètre	57
III.2.4.7. Essai aux ultrasons	57
III.2.4.8. Absorption d'eau par immersion	58
III.2.4.9. Absorption d'eau par capillarité	59
III.2.4.10. Essai d'attaque chimique par les acides et les bases	59
III.2.4.11. Essai pénétration des ions de chlorures	62
III.3. Conclusion	63

**Chapitre IV: Influence du taux de substitution des sables recyclés sur les propriétés du béton de sable à base de fibres de paille de blé**

IV.1. Introduction	65
IV.2. Influence du taux de substitution des sables recyclés sur les propriétés du béton de sable à base de fibres de paille de blé	65
IV.2.1. A l'état frais	65
IV.2.1.1. Ouvrabilité	65
IV.2.1.2. Densité	66
IV.2.1.3. Air occlus	66
IV.2.2. A l'état durci	67
IV.2.2.1. Résistance en compression	67
IV.2.2.2. Résistance à la traction par flexion	69
IV.2.2.3. Résistance en compression obtenue par l'essai scléromètre	72
IV.2.2.4. Résistance en compression obtenue par l'essai ultrasonique	73
IV.2.2.5. Résistance en compression obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason	75
IV.2.2.6. Absorption d'eau par immersion du béton	76
IV.2.2.7. Absorption d'eau par capillarité du béton	77
IV.3. Conclusion	78

**Chapitre V : Comportement dans les milieux agressifs de béton de sable à base de paille de blé contenant des sables recyclés**

V.1. Introduction	81
V.2. Pertes de masse dans les milieux agressifs	81
V.2.1. Perte de masse dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	81
V.2.2. Perte de masse dans HCL	83
V.2.3. Perte de masse dans CH <sub>3</sub> COOH	86
V.2.4. Perte de masse dans NaCL	88

## SOMMAIRE

V.3. Pertes des résistances dans les milieux agressifs	90
V.3.1. Perte de résistance en compression et en traction par flexion dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	90
V.3.2. Perte de résistance en compression et en traction par flexion dans HCL	92
V.3.3. Perte de résistance en compression et en traction par flexion dans CH <sub>3</sub> COOH	95
V.3.4. Perte de résistance en compression et en traction par flexion dans NaCL	98
V.4. Pénétration des ions des chlorures	101
V.5. Conclusion	102
Conclusions générales	104
Bibliographie	108

## Liste des figures

Figure I-1 : Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte)	11
Figure I-2 : Le temps d'écoulement en fonction du module de finesse	14
Figure I-3 : Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance	15
Figure I-4 : Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance	15
Figure I-5 : Effet de la granularité sur la résistance	16
Figure I-6 : Pénétration des ions chlore	17
Figure I-7 : Projection sur surface ancienne avec nouveau ferrailage	18
Figure I-8 : Béton de sable dans la préfabrication	18
Figure I-9 : Béton de sable coulé sur site (réalisation d'une piscine)	19
Figure I-10 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines	20
Figure I-11 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable	21
Figure I-12 : Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e+ v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée	21
Figure I-13 : Types de sous-produits végétaux suivant les cultures lignocellulosiques	23
Figure I-14 : Structure d'une paille de blé	29
Figure I-15 : Carrière des blocs de marbre de fil-fila	31
Figure I-16 : Carrière des dérivées de marbre de Chatt (Fil-fila)	32
Figure I-17 : Déchets des appareils sanitaires	36
Figure II-1 : CEM I d'Ain Kbir - Sétif	40
Figure II-2 : Mesure de la densité	40
Figure II-3 : Mesure de la SSb	40
Figure II-4 : Poudre de marbre jetée	42
Figure II-5 : Chutes de céramique	43
Figure II-6 : Courbes granulométriques des sables	44
Figure II-7 : Fines calcaire	45
Figure II-8 : Fibres de paille de blé	46
Figure III-1 : Malaxeur de béton	52
Figure III-2 : Remplissage des moules	53
Figure III-3 : Eprouvettes après démoulage	53
Figure III-4 : Affaissement au cône d'Abrams	54
Figure III-5 : Aéromètre à béton	55
Figure III-6 : Mesure de la densité	55
Figure III-7 : Essai de compression	56
Figure III-8 : Essai de traction par flexion	56
Figure III-9 : Schéma de l'essai de traction par flexion trois points	57
Figure III-10 : Essai au scléromètre	57
Figure III-11 : Essai des ultrasons	58
Figure III-12 : Essai d'absorption par immersion	58
Figure III-13 : Essai d'absorption par capillarité	59
Figure III-14 : Conservation des éprouvettes dans l'eau	60
Figure III-15 : Conservation des éprouvettes dans une solution de 3% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	60
Figure III-16 : Conservation des éprouvettes dans une solution de 3% HCl	61
Figure III-17 : Conservation des éprouvettes dans une solution de 3% CH <sub>3</sub> COOH	61
Figure III-18 : Essai sur éprouvette soumis à l'attaque chimique	62
Figure III-19 : Mesure de la profondeur de pénétration des chlorures	62
Figure IV-1 : Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution	65

## LISTE DES FIGURES

Figure IV-2 : Variation de la densité en fonction du taux de substitution	66
Figure IV-3 : Variation de la teneur en air en fonction du taux de substitution	67
Figure IV-4 : Résistance en compression des bétons étudiés	68
Figure IV-5 : Résistance en compression des bétons étudiés en fonction du temps	69
Figure IV-6 : Résistance à la traction des bétons étudiés	70
Figure IV-7 : Résistance à la traction des bétons étudiés en fonction du temps	71
Figure IV-8 : Résistance en compression obtenue par l'essai au scléromètre (formulation BSP-M)	72
Figure IV-9 : Résistance en compression obtenue par l'essai au scléromètre (formulation BSP-C)	72
Figure IV-10 : Résistance en compression obtenue par l'essai au scléromètre (formulation BSP-MC)	73
Figure IV-11 : Résistance en compression obtenue par l'essai aux ultrasons (formulation BSP-M)	73
Figure IV-12 : Résistance en compression obtenue par l'essai aux ultrasons (formulation BSP-C)	74
Figure IV-13 : Résistance en compression obtenue par l'essai aux ultrasons (formulation BSP-MC)	74
Figure IV-14 : Résistance en compression obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason (formulation BSP-M)	75
Figure IV-15 : Résistance en compression obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason (formulation BSP-C)	75
Figure IV-16 : Résistance en compression obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason (formulation BSP-MC)	76
Figure IV-17 : Variation du coefficient d'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution	77
Figure IV-18 : Absorption d'eau par capillarité en fonction du temps	78
Figure V-1 : Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (formulation BSP-M)	81
Figure V-2 : Variation de masse en fonction de la période d'immersion dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (formulation BSP-C)	82
Figure V-3 : Variation de masse en fonction de la période d'immersion dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (formulation BSP-MC)	82
Figure V-4 : Eprouvettes traitées par l'acide H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	83
Figure V-5 : Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans HCL (formulation BSP-M)	84
Figure V-6 : Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans HCL (formulation BSP-C)	84
Figure V-7 : Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans HCL (formulation BSP-MC)	85
Figure V-8 : Eprouvettes traitées par l'acide HCL	85
Figure V-9 : Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans CH <sub>3</sub> COOH (formulation BSP-M)	86
Figure V-10 : Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans CH <sub>3</sub> COOH (formulation BSP-C)	86
Figure V-11 : Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans CH <sub>3</sub> COOH (formulation BSP-MC)	87
Figure V-12 : Eprouvettes traitées par l'acide CH <sub>3</sub> COOH	87
Figure V-13 : Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans NaCl (formulation BSP-M)	88

## LISTE DES FIGURES

Figure V-14 : Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans NaCl (formulation BSP-C)	88
Figure V-15 : Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans NaCl (formulation BSP-MC)	89
Figure V-16 : Eprouvette traitée par l'acide NaCl	89
Figure V-17 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-M)	90
Figure V-18 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-C)	90
Figure V-19 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-MC)	91
Figure V-20 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-M)	91
Figure V-21 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-C)	92
Figure V-22 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-MC)	92
Figure V-23 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-M)	93
Figure V-24 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-C)	93
Figure V-25 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-MC)	94
Figure V-26 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-M)	94
Figure V-27 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-C)	95
Figure V-28 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-MC)	95
Figure V-29 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-M)	96
Figure V-30 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-C)	96
Figure V-31 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-MC)	96
Figure V-32 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-M)	97
Figure V-33 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-C)	97
Figure V-34 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-MC)	98
Figure V-35 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-M)	98
Figure V-36 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-C)	99
Figure V-37 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-MC)	99
Figure V-38 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-M)	100
Figure V-39 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-C)	100
Figure V-40 : Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-MC)	100
Figure V-41 : Profondeur de pénétration des chlorures	101

**Liste des tableaux**

Tableau I-1 : Propriétés physiques et mécaniques de quelques fibres d'origine naturelles	25
Tableau I-2 : Composition chimique de certaines fibres naturelles courantes	25
Tableau I-3 : Production mondiale des fibres naturelles les plus courantes et leurs sources	25
Tableau I-4 : Composition chimique de pailles de blé	29
Tableau II-1 : Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 42,5	41
Tableau II-2 : Propriétés physiques et mécaniques du CEM I 42,5	41
Tableau II-3 : Propriétés physiques de sable ordinaire	41
Tableau II-4 : Propriétés chimiques de sable ordinaire	42
Tableau II-5 : Propriétés physiques de sable de déchets de marbre	42
Tableau II-6 : Composition chimique de sable de déchets de marbre	43
Tableau II-7 : Caractéristiques physiques de sable de déchets de céramique	44
Tableau II-8 : Composition chimique de sable de déchets de céramique	44
Tableau II-9 : Composition chimique des fines calcaires	45
Tableau II-10 : Caractéristiques du super plastifiant	46
Tableau II-11 : Analyse chimique de l'eau	46
Tableau III-1 : Différentes compositions des mélanges pour les trois formulations	50
Tableau III-2 : Formulation des mélanges	51
Tableau IV-1 : Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution.	66
Tableau IV-2 : Variation de la densité en fonction du taux de substitution.	66
Tableau IV-3 : Variation de la teneur en air occlus en fonction du taux de substitution.	67
Tableau IV-4 : Résistance en compression obtenue par l'essai au scléromètre.	73
Tableau IV-5 : vitesse de son obtenue par l'essai aux ultrasons.	75
Tableau IV-6 : Résistance en compression obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason.	76
Tableau IV-7 : Variation du coefficient d'absorption d'eau par immersion.	77

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Le béton de sable est un matériau important dans les zones arides où il peut constituer une alternative au béton ordinaire en raison de ses propriétés mécaniques et physiques, ce qui rend son utilisation en expansion dans tous les domaines.

L'introduction des fibres naturelles (copeaux de bois, chanvre, palmier, paille, diss et autres fibres naturelles) comme renforts dans ce type de béton conduit à diminuer la densité, améliorer les performances thermiques et la ductilité et rendre les bétons de sable allégés et matériaux écologiques utilisé dans les murs et les toits et s'étend à la réhabilitation de bâtiments anciens et même pour les construction neuves.

L'introduction des fibres naturelles comme matériau de construction entraîne une augmentation de la porosité et diminue légèrement les résistances mécaniques (elles contiennent des sucres) et dans ce sens un traitement de ces fibres est nécessaire.

Les dépôts de sable naturels, de gravier et de pierre, surtout ceux qui se situent près de grands centres urbains risquent de s'épuiser ou d'entraîner des frais d'exploitation très élevés en raison du coût de transport et la place occupée par les sites de stockage et les restrictions relatives à la protection de l'environnement.

Les changements climatiques, l'épuisement des ressources naturelles, la pollution de l'air, de l'eau et du sol, l'iniquité dans le partage des richesses caractérisent les enjeux du développement durable (**Hebhoub 2011**).

Chaque année environ des millions de tonnes de béton sont couramment démolis des constructions qui ont vieillis, approchant à la fin de leur durée de vie, ainsi qu'un grand nombre de céramiques sont rejetés des usines dues à la non-conformité aux spécifications requises.

L'industrie des matériaux de construction est toujours accompagnée par des produits secondaires ou déchets qui ont une incidence directe sur l'environnement.

Les carrières de granite et de marbre fournies une grande quantité des rebuts de masses et des déchets de taille et de sciages des pierres. Le stockage de tels déchets dans les dépôts favorise la pollution de l'air et la contamination des sources d'eau et des terrains agricoles, il est donc nécessaire pour éliminer ces produits de les valoriser et de les réutiliser de nouveau (**Hebhoub 2011**).

La valorisation et la réutilisation des déchets (déchets de marbres, déchets de céramiques, déchets de briques, bétons de démolitions et autres déchets) comme granulats a une grande importance sur la protection de l'environnement car, d'un coté, elle permet de récupérer les matériaux et d'autre coté, elle permet de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats ordinaires.

La possibilité d'employer certains de ces déchets comme granulats du béton de sable est nécessaire du fait que ce matériau est constitué essentiellement de granulats.

Cette étude, la valorisation et la réutilisation des déchets dans un béton de sable allégé par des fibres végétales s'inscrit dans ce contexte.

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à la réutilisation des déchets de marbre (poudre jeté soumise aux intempéries) de la carrière de Fil-fila et des déchets de céramique dans la formulation du béton de sable à base des fibres végétales (fibre de paille de blé) et cela permet donc:

- Produire un nouveau matériau écologique utilisé dans la construction neuve ou dans la réhabilitation des vieux bâtis.
- Améliorer le comportement du béton de sable allégé par des fibres végétales et réduire les effets de négatifs de ces derniers sur les propriétés du béton étudié, en réutilisant le sable de déchets de marbre et de céramique.
- Eliminer les déchets par recyclage et réutilisation d'où la protection de l'environnement,
- Résoudre certains problèmes liés au manque de granulats,
- Préserver nos ressources naturelles qui ne sont pas infinies,
- Réduire la mise en décharge et donner une seconde vie à nos déchets.

On s'intéresse dans cette étude de fabriquer un béton de sable à base des fibres végétales (les fibres de paille de blé), puis nous introduisons les sables recyclés de déchets de marbre et déchets de céramique comme substituant au sable ordinaire dans le béton.

Cette étude est divisée en cinq chapitres:

Le premier chapitre est un état de connaissances, dans ce chapitre nous avons réalisé une banque de données sur les bétons de sables, ses propriétés, domaines d'applications et méthode de formulation, ensuite nous avons fait une recherche sur l'utilisation de fibres végétales dans le béton et ses propriétés, avec quelques études antérieures dans ce domaine.

Une partie importante sur la valorisation des déchets dans le domaine de construction en particulier les déchets de marbre et les déchets de céramique. Enfin, nous avons recensé quelques études antérieures sur la valorisation des déchets de marbre et de céramique comme ajouts dans le ciment ou comme granulats dans le béton hydraulique et les bétons de sable.

Le deuxième chapitre décrit la provenance et la caractérisation des matériaux utilisés pour réaliser ce travail à savoir les matériaux de base qui sont le sable de dune, le ciment, les fines calcaires et l'adjuvant et les matériaux élaborés; les fibres de paille de blé, le sable de déchets de marbres et le sable de déchets de céramique. Il présente les résultats des essais de caractérisations pour chaque matériaux utilisés dans cette étude.

Dans le troisième chapitre nous précisons le programme expérimental, la formulation des différentes compositions et les méthodes de fabrication des mélanges pour chaque essai. On décrit dans ce chapitre les principaux essais réalisés sur les différentes formulations retenues dans cette étude.

Dans le quatrième chapitre, nous avons étudiés l'effet de l'influence de sable de déchets de marbre et de céramique sur les propriétés du béton de sable à base des fibres végétales à l'état frais (densité, air occlus et ouvrabilité) et les résistances mécaniques obtenus par les essais destructifs, l'ultrason et scléromètre ainsi que l'absorption d'eau par immersion et l'absorption d'eau par capillarité à l'état durci. Nous analysons l'ensemble des résultats obtenues.

Le cinquième chapitre donne les principaux résultats des essais réalisés sur la durabilité, dans ce chapitre nous avons étudiés l'effet du taux de substitution des sables de déchets de marbre et de céramique sur le comportement du béton de sable à base des fibres végétales vis à vis des attaques chimiques par les acides, perte des résistances et pénétration des chlorures.

A la fin de ce travail on sort avec quelques conclusions et recommandations.

# **Chapitre I : Etat de connaissances**

## I. Etat de connaissance

### I.1. Introduction

L'industrie de la construction a connu un grand développement ces dernières années, alors que la recherche continue pour obtenir de nouveaux matériaux de construction renouvelables et économiques. Surtout dans les zones où il y a une pénurie de certains matériaux. Par exemple, le sud algérien avec son vaste désert se caractérise par un manque important de matériaux de construction de base, tels que le gravier, ce qui nécessite l'utilisation de nouveaux matériaux alternatifs pour compenser cette pénurie.

Le béton de sable est un matériau important dans les zones arides où il peut constituer une alternative au béton ordinaire en raison de ses propriétés mécaniques et physiques, ce qui rend son utilisation en expansion dans tous les domaines. Cependant, les recherches se poursuivent pour améliorer les propriétés du béton de sable en introduisant dans son composant des matériaux nouveaux, alternatifs et renouvelables, en particulier avec l'exploitation irrationnelle des matériaux de construction, ce qui provoque l'épuisement des ressources naturelles (par exemple, le sable et le gravier), ce qui peut entraîner un déficit à l'avenir.

Ce processus a abouti à la production de béton de sable allégé en introduisant des fibres végétales dans des composants de béton de sable, ce qui améliore considérablement ses performances thermiques et le rend compétitif par rapport aux matériaux de construction traditionnels. Avec son poids léger, le processus de construction de murs et de toits devient plus facile et s'étend à la réhabilitation de bâtiments anciens. Cependant, l'introduction de fibres végétales s'accompagne d'effets négatifs sur certaines propriétés, telles que l'augmentation de la porosité et le manque de résistance à la compression.

La recherche pour développer le béton de sable dans cette mesure n'a pas empêché, mais a démenagé au recyclage des déchets comme une alternative au sable ou le ciment et ce afin d'améliorer les performances du béton, que ce soit à l'état frais ou durci d'une part, et d'autre part, afin de protéger l'environnement et réduire la pollution dans la nature résultant de ces déchets provenant principalement de différentes usines.

Le but de ce chapitre est de passer en revue les connaissances bibliographiques sur le béton de sable, propriétés et composants. Aussi, des données bibliographiques différentes concernant les fibres végétales et leurs types. Avec une présentation sur la valorisation des déchets dans le béton comme substituant de sable ou de ciment.

### I.2. Béton de sable

#### I.2.1. Définition

Le béton de sable est un béton fin composé principalement de sable(s), de ciment, d'addition(s) et d'eau; outre ces composants de base, le béton de sable comporte habituellement un ou plusieurs adjuvants. Ce type de béton peut être incorporé des gravillons avec un rapport massique G/S inférieur à 0,7 afin d'augmenter la rigidité du béton de sable.

Par sa composition (comporte des additions), son dosage en ciment (250 à 400 kg/m<sup>3</sup>), sa résistance la plus élevée et par son domaine d'utilisation (similaire au béton traditionnel) le béton de sable se distingue de mortier.

Les additions ou les fines d'ajout jouent un rôle plus important dans la formulation du béton de sable, ils contribuent d'une manière significative à l'augmentation de sa compacité ce qui se reflète positivement sur ses propriétés, en termes de durabilité, de résistance mécanique et de l'aspect.

### I.2.2. Historie du béton de sable

Le béton de sable est un matériau ancien, son développement a commencé à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Ce type de béton a trouvé ses origines dans le béton aggloméré mis au point par François Coignet en 1853, par un mélange sans caillou, de cendres de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et en faible quantité d'eau (**Guenoun 2003**).

En 1869, Les premières applications du béton de sable ont retrouvés dans la réalisation du phare de Port-Saïd de 52 mètres de hauteur construit par un mélange de sable local avec la chaux importée de France (figure I-1) et dans le pont de New-York en 1872 (**Sablocrete 1994**).



Figure I-1: Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte). (**Sablocrete 1994**)

Entre 1869 et 1872, Coignet a fait une tentative de correction granulaire pour réaliser certaines parties de l'aqueduc de captation des eaux de la rivière la Vanne de 40 km et qui contribue également à relier Bluefontain à Orléans, en combinant un sable fin traditionnel avec un autre non utilisé à l'époque, ainsi qu'un liant formé de chaux et de ciment (**Sblocrete 1994**).

Cette technique a également été utilisée par l'ancienne Union Soviétique, qui s'est étendue vers l'Europe Occidentale, parmi les projets réalisés au cours de cette période (**Chauvin 1991**):

- Le port de Kaliningrad en Prusse-Orientale.
- Le pont Chernavskif coulé sur place à Varonej (500 km environ de Moscou).

Chauvin, 1991 décrit une technique inventé par le comte Nicolas de Rochefort en 1918. Cette technique consiste à broyer le clinker et le sable dans un rapport de un pour un, puis a

mélangé ce produit de broyage à trois parties de sable naturel, il permet d'obtenir un mélange avec une résistance incroyable qui améliore considérablement les performances du ciment.

Après quelques années, une récession a été enregistrée dans l'utilisation de cette technique avant de redevenir d'actualité durant la seconde guerre mondiale, grâce au comportement de certaines pistes que les Allemands ont faites d'une part (**Chauvin 1991**), et d'autres part, grâce à les propriétés spécifiques du béton de sable, la pénurie des gros granulats dans certaines régions avec une disponibilité de gros gisements de sable (**Sablocrete 1994**).

L'Union Soviétique a développé une méthodologie de formulation et de mise en œuvre dans la préfabrication et projection pour construire différents structures de construction (routes, pistes aéronautiques, ouvrage d'art, bâtiments, aérodromes et composants du génie civil) en béton de sable (**Chauvin 1991**). Parmi les projets réalisés: l'aérodrome militaire de Pevek (en Sibérie) et celui d'Arkhangelsk.

Durant les années 70, L'intérêt envers cette technique s'est accru en France notamment dans la région sud-ouest, ceci en raison de la pénurie de granulats alluvionnaires et de la disponibilité de gros gisement de sable (**Abdeljalil 2010**). Pour cela, après plusieurs initiatives et travaux de recherches menées par l'association pour la production et le développement du béton de sable qui vise à formuler ce type de béton dont les caractéristiques similaire à celles des bétons classiques, le projet SABLOCRETE a vu le jour en 1988 (**Sablocrete 1994**).

En Algérie, l'utilisation du béton de sable est encore rare ou inexistante, malgré l'abondance de sable dans le sud qui représente 60% de la superficie du pays, où il ne reste que des recherches faites dans les universités et les laboratoires mais toujours ce béton reste inconnu et sans application sur le terrain.

### **I.2.3. Constituants des bétons de sable**

#### **a. Le sable**

Tous les types de sables que ce soit alluvionnaire ou dunaire, roulé ou concassé qui conformes aux normes NF P18-541, P18-302 ou P18-309 sont utilisés dans la composition du béton de sable. En fait, il n'existe pas de critère spécifique pour la confection du béton de sable uniquement, le sable utilisé doit être propre quelles que soit sa nature, sa granularité et son origine, où l'équivalent de sable doit être supérieur ou égal à 75 si le sable est roulé et supérieur ou égale à 65 s'il est broyé.

En général, les propriétés du sable jouent un rôle important sur les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci, le sable riche en fines par exemple nécessite plus d'eau, ce qui provoque une chute de résistance (**Dreux et Feasta 1996**).

#### **b. Le ciment**

Le ciment est un liant hydrauliques en raison de leur capacité de faire prise et de durcir progressivement sous ou avec un excès d'eau par l'hydratation des composés chimiques ou des minéraux du ciment, il se présente sous forme d'une poudre très fine. Les ciments utilisés pour la confection d'un béton de sable doivent être conformes à la norme NFP 18-301 et son choix en générale dépend de l'usage destiné, la résistance mécanique désirées, l'agressivité du milieu et d'autres caractéristiques.

Le dosage en ciment adopté dans le béton de sable est généralement plus élevés ce que usagé dans les bétons traditionnels (entre 200 et 400 kg/m<sup>3</sup>).

### c. Les additions

L'introduction des additions ou des fines d'ajouts dans la composition des bétons vise, d'une part, à améliorer la compacité de l'empilement granulaire (côté technique) et, d'autre part, à réduire la quantité de ciment couteux (coté économique). Généralement, les additions sont ajoutées dans la composition du béton en grandes quantités (entre 5 à 20%) du dosage en ciment. Leur nature minéralogique, leur finesse, leur distribution granulaire et leur caractère actif ou inerte les fines d'ajouts contribuent à améliorer le comportement et la performance du béton à l'état frais ainsi qu'à l'état durci tel que la cohésion et le comportement rhéologique du béton, la résistance mécanique et la durabilité.

La compacité du béton (**Guenoun 2003**) dépend à plusieurs paramètres essentiels qui sont:

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau.
- L'énergie de mise en place.

L'optimisation de la compacité est en relation avec la granularité, obéit à la règle des tables gigognes, où les éléments les plus fins sont placés dans les vides des éléments les plus grossiers (**Sablocrete 1994**). Dans le cas d'un béton de sable, les fines d'ajouts remplis une partie des vides du sable et contribue à la rigidité de mélange (cas du filler non inerte) par un complément d'hydraulicité (**Abdeljalil 2010**).

Parmi les additions les plus utilisés dans les bétons de sables, les fines calcaires qui sont des produits minéraux, obtenus par le broyage et/ou par la pulvérisation des roches calcaire, basalte, bentonite et cendres volantes, sous forme des poudres fines à granulométrie contrôlée, c'est-à-dire les plus gros grain ne dépassent pas 80 µm. Si elles sont broyées assez finement, s'enfoncent dans le squelette granulaire du ciment et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats).

L'influence de l'utilisation des fines de calcaires sur les caractéristiques du béton que ce soit à l'état frais et à l'état durci est un aspect important, qui permet de limiter les problèmes concernant l'homogénéité de la matrice du béton, aspect de surface et la diminution de la résistance mécanique.

Les fines de calcaires répondent aux critères de la norme NF P18-508, ils sont incorporés dans la formulation du béton conformément aux dosages décrits dans la norme NF EN 206-1.

Les fines de calcaire contiennent principalement au moins de 90% de carbonate de calcium, différents résultats montrent que ce type d'addition avait principalement un effet physique de comblement des vides (augmentation de la compacité), et aussi peut avoir d'autres effets tels que:

- Le calcaire finement broyé accélère l'hydratation du silicate tricalcique C<sub>3</sub>S et de l'aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A (**Cheloup-Bondant 1996**).
- Améliore le comportement rhéologique de la pâte interstitielle (rôle fluidifiant).
- Augmente la résistance à jeune âge par la réaction chimique entre la matrice cimentaire et le carbonate de calcium de calcaire (**Dreux et Feasta 1996**).

#### d. Les adjuvants

Les adjuvants utilisés dans la composition du béton de sable sont les mêmes que ceux utilisés dans les autres bétons et devront être conformes à la norme NF P 18-304, ce sont des produits chimiques ajoutés en faible quantité (ne dépassant pas 5% de la masse totale de ciment), afin d'améliorer certaines propriétés par une action chimique ou physique.

Pour le béton de sable, plusieurs études montrent que les adjuvants les plus utilisés sont des plastifiants ou super plastifiant. Comme nous savons, le rapport E/C d'un béton de sable est plus élevé à celle d'un béton traditionnel, l'utilisation des plastifiants ou des superplastifiants contribuent à améliorer la maniabilité du béton en réduisant la quantité d'eau nécessaire, ce qui traduit par une augmentation de la résistance du béton à l'état durci (**Dreux et Feasta 1996**).

Les adjuvants peuvent être classés comme des matériaux organiques ou inorganiques selon leur composition chimique et ils sont ajoutés au cours de malaxage du béton.

#### e. L'eau de gâchage

Pour la confection du béton de sable, l'eau de gâchage doit être conforme à la norme NF P 18-303. Si la proportion d'éléments fins dans le mélange est élevée, une augmentation du rapport E/C est nécessaire, c.-à-d. une quantité d'eau plus importante à celle d'un béton ordinaire; avec l'utilisation des plastifiants et le choix des fillers adéquats, la quantité d'eau peut réduire dans des proportions non négligeables (**Abdeljalil 2010, Dreux et Feast 1996**).

### I.2.4. Caractéristiques des bétons de sable

#### a. Granularité/maniabilité

Le béton de sable nécessite un rapport (eau/ciment) plus élevé (supérieur à 0,5) par rapport au béton traditionnel, ce qui peut être réduit en ajoutant des additions en fines et des plastifiants ou superplastifiants. Pour déterminer la quantité d'eau requise pour la confection de béton de sable, il est nécessaire de connaître les caractéristiques du sable utilisé, telles que la granularité; plus le sable contient beaucoup d'éléments grossiers, plus la maniabilité augmente. Ceci se traduit par une relation (figure I-2) entre le module de finesse et la maniabilité (**Casanova 1996**).

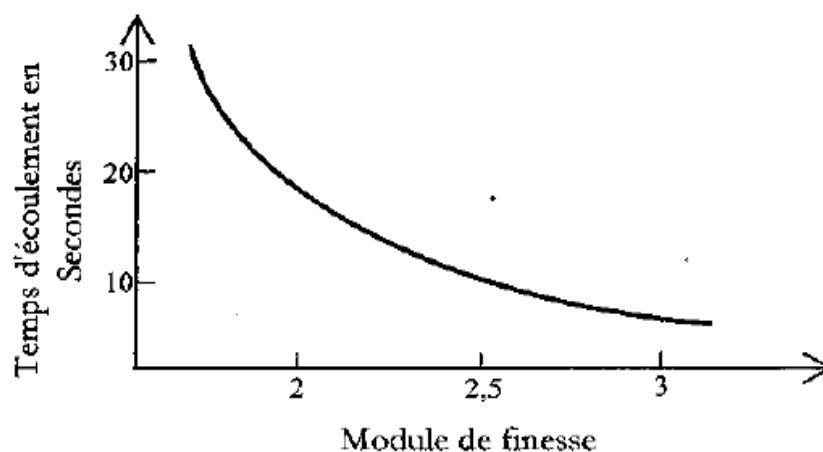


Figure I-2: Le temps d'écoulement en fonction du module de finesse. (**Sablocrete 1994**)

## b. Comportement mécanique

La classification des bétons selon les performances mécaniques est restée généralement un repère dans l'esprit des utilisateurs. Pour le béton de sable, ses résistances mécaniques sont inférieures à celles des bétons traditionnels ce qui peut limiter l'usage pour des ouvrages mis en charge précocement, mais il est facile d'obtenir des bétons de sable à hautes performances mécaniques même à court terme (Sablocrete 1994). En fait, à dosage en ciment constant, la résistance peut être variée en fonction de différents paramètres:

- **La finesse de l'addition:** Plus l'addition est fine plus la compacité est importante, cela se traduit par un gain de résistance; ce résultat est valable quel que soit la granulométrie du sable (figure I-3).

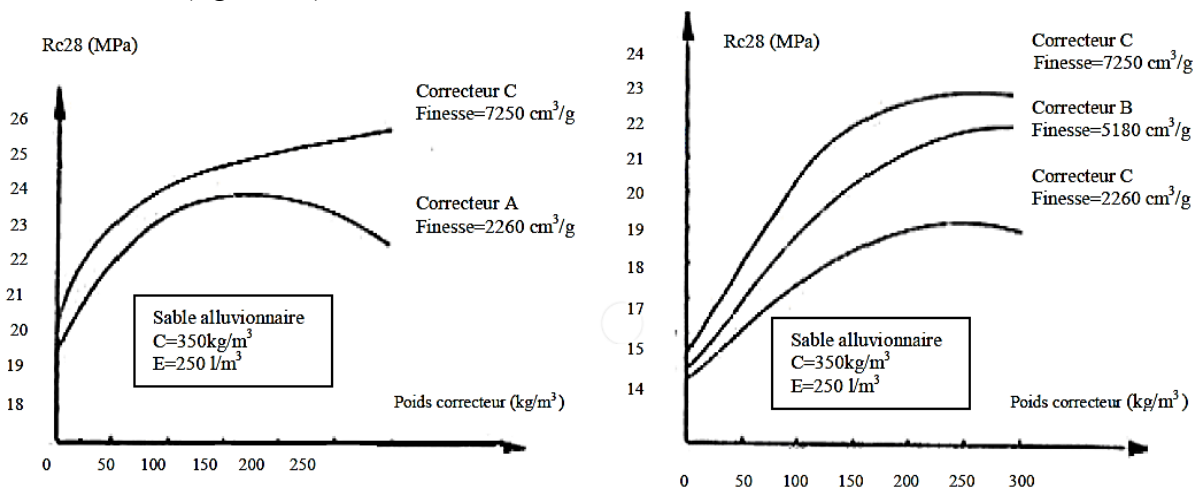


Figure I-3: Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance. (Sablocrete 1994)

- **La nature de l'addition:** Selon la figure I-4, on peut constater que avec un dosage constant en fines d'addition, l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler; si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable.

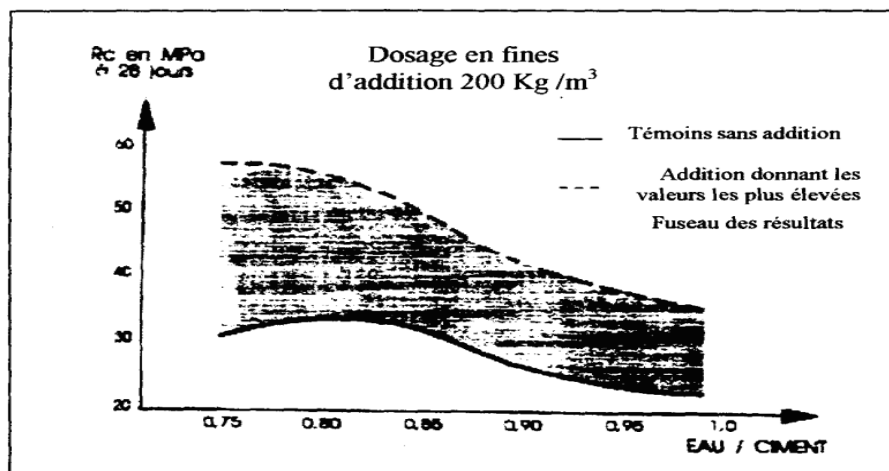


Figure I-4: Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance. (Sablocrete 1994)

- **La dimension du Dmax (0/D):** La figure I-5 montre que pour une même valeur du rapport E/C, on remarque que l'effet du diamètre Dmax est peu important, mais par contre il influe sur la maniabilité; ou il faut employer un plastifiant réducteur d'eau, afin de fixer la maniabilité et atteindre la résistance voulu.

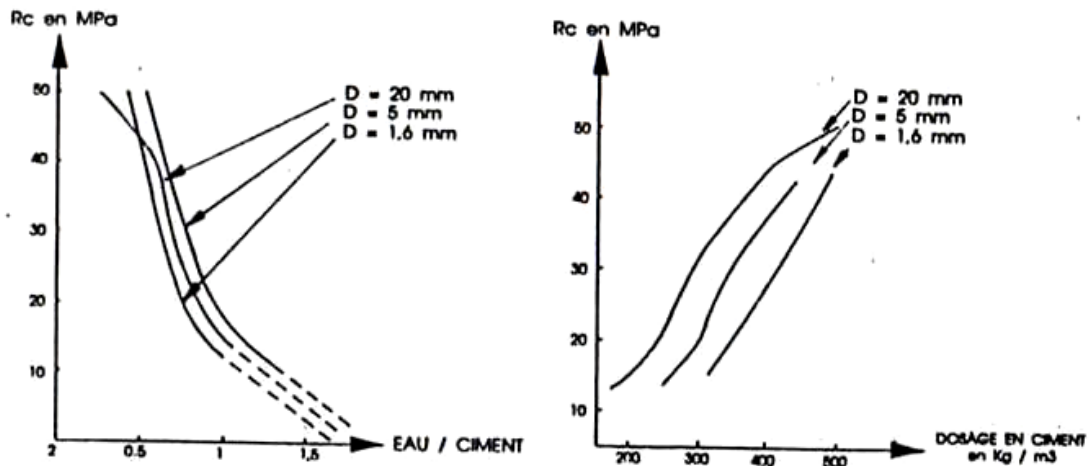


Figure I-5: Effet de la granularité sur la résistance. (Sablocrete 1994)

### c. Durabilité

L'expression durabilité du béton est généralement utilisée pour caractériser de façon très générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique (Regourd 1982). Les bétons de sable est également susceptibles à plusieurs agents agressif qui peuvent être affecté sa durabilité, ces agents sont classés en deux types: les agents externe et les agents interne. Parmi les agents internes, on peut trouver les alcalis du ciment avec des granulats réactifs, les ions de chlorure qui se trouve dans certain accélérateurs. En ce qui concerne les agents externes, on peut citer les sulfates, les ions chlore, le gaz carbonique, les bactéries et les cycles de gel-dégel.

Le béton de sable se caractérise par une perméabilité à l'eau plus faible que celle d'un béton traditionnel ( $2,5 \times 10^{-2}$  contre  $10^{-10}$ ), alors que la perméabilité à l'air est inférieure ou comparable pour des bétons de sable optimisés. Pour la profondeur de pénétration des ions de chlore, le comportement est comparable à celle d'un béton ordinaire, que ce soit en milieu marin ou par le biais d'essais accélérés d'immersion-séchage. La figure I-6 montres les résultats de pénétration des ions chlore après cinq ans d'exposition en milieu marin. En effet, la porosité du béton de sable avec faibles dimensions des pores ( $<10\mu\text{m}$ ) et l'importance de l'absorption initiale peut être contribué à augmenter la profondeur de carbonatation en milieu naturelle (Benaissa 1992).

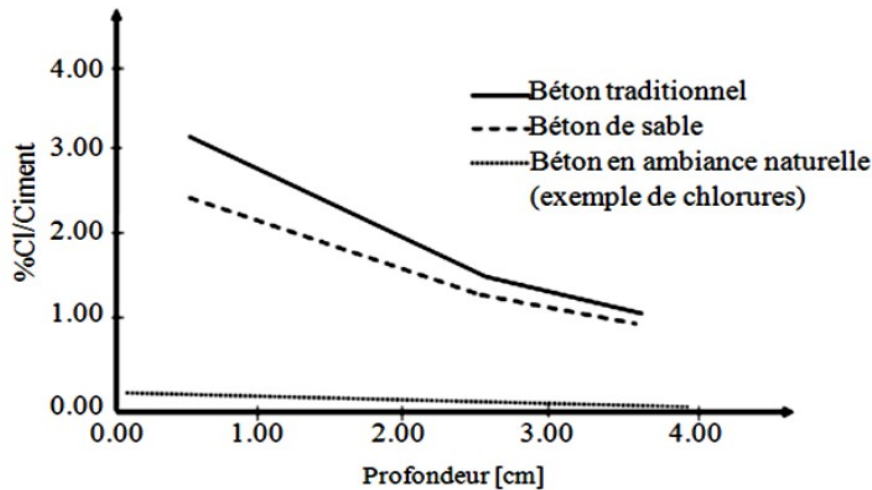


Figure I-6: Pénétration des ions chlorure. (Sablocrete 1994)

### I.2.5. Propriétés spécifique des bétons de sable

**\*La résistance à la ségrégation:** La cohésion, l'homogénéité et la bonne maniabilité du béton de sable donnent un bel aspect de surface en éliminant le problème de ségrégation.

**\*L'adhérence aux armatures:** Le béton de sable offre une bonne adhérence avec les armatures qui n'est pas différente à celle du béton ordinaire quel que soit sa granularité, où Sablocrete (1994) obtenue que l'adhérence avec un sable de dune est supérieure par rapport au sable grossier. Ce qui permet de l'avoir utilisé comme un béton de structure et entrant en concurrence avec le béton traditionnel.

**\*La fluidité et la légèreté:** Le béton de sable se caractérise par sa petite granularité ce qui facilite les travaux d'injection, le coulage des pièces à forte densité de ferrailage et/ou à coffrages complexes et peut utiliser dans les travaux de rénovation des anciens bâtis.

**\*Le retrait:** Il existe deux types de retrait: l'un qui s'appelle endogène se produit sans mise en contact avec le milieu extérieur, l'apparence de ce type de retrait dans le béton de sable est presque similaire aux autres bétons traditionnels; une différence marqué de l'ordre de 10% environ entre eux et d'autre qui s'appelle retrait de dessiccation (de séchage) ce type a lieu en milieu ambiant et peut atteindre des valeurs plus élevée dans un béton de sable par rapport d'un béton ordinaire du moins pendant les deux premiers mois, ensuite il y'a une tendance à la stabilisation, cela est dû à la taille et la distribution des pores dans le béton (Benaissa *et al.* 1992).

**\*Le fluage:** C'est un phénomène lié à la structure du béton de sable, où la cinétique de fluage propre n'est pas très différente aux bétons traditionnels alors que le fluage de dessiccation du a une cinétique extrêmement rapide, deux fois plus importantes. Les valeurs de fluage d'un béton de sable, si on dépasse de 25 à 50 MPa, sont divisées par 5 et n'était supérieures à celui du béton traditionnel que de 20% (Sablocrete 1994).

### I.2.6. Domaine d'application des bétons de sable

Grace à les propriétés avantageuses du béton de sable, on peut l'utiliser dans différents secteurs de construction et sous plusieurs formes structurales, comme exemple:

**\*La projection:** Le béton de sable se caractérise par sa légèreté, ce qui facilite à utiliser comme un béton projeté pour les travaux de projection (figure I-7) dans les tunnels, les ponts, les travaux de rénovation, la réparation et renforcement, les canaux d'égouts visible et les bâtiments.



Figure I-7: Projection sur surface ancienne avec nouveau ferrailage. (Chauvin 1991)

**\*Les éléments préfabriqués:** Le béton de sable peut être utilisé dans les travaux de production des éléments préfabriqués tels que les dalles, les panneaux, les murs et les mobiliers urbains (figure I-8).



Figure I-8: Béton de sable dans la préfabrication. (Bederina 2000)

**\*Le coulage sur site:** En raison de manque des gros granulats, coulage des éléments structuraux à forte densité en ferrailage et la fluidité du béton de sable, on peut faire le coulage avec ce type de béton sur le site (figure I-9) de chantier (les routes, les aérodromes, les tunnels et les bâtiments).



Figure I-9: Béton de sable coulé sur site (réalisation d'une piscine). (Bederina 2000)

### I.2.7. Méthode de formulation des bétons de sable

La formulation d'un béton de sable consiste à optimiser la compacité du béton d'une part, et à estimer ses performance d'autre part. Pour cela, il existe deux méthodes de formulation du béton de sable; la première s'appelle méthode SABLOCRET de l'origine de la norme révisée P 18-500 « Béton de sable: caractéristiques et pratiques d'utilisation »; et la deuxième a été proposée par Cissé en 1996 (Cissé 1996). On va citer que la première que nous allons utiliser dans notre étude.

#### \*Méthode SABLOCRETE

Comme nous l'avons dit précédemment, la formulation d'un béton de sable dépend à la recherche de la compacité maximale du béton. Pour assurer cette dernière, Caquot a développé à partir des résultats expérimentaux une relation mathématique permet d'estimer le volume de vides ( $V$ ) d'un mélange granulaire en fonction de son étendue granulaire ( $d/D_{\max}$ ):

$$V = V_0 (d/D_{\max})^{0,2}$$

$V_0$  : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8;

$d$ : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire;

$D_{\max}$  : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Dans le même contexte et après quelques hypothèses simplificatrice, Caquot pris en compte le dosage des particules en fines ( $<80\mu\text{m}$ ) qui correspond à la moitié de la porosité de l'étendue granulaire de sable.

$$[\text{Fines}] = 0.38(0.08/D_{\max})^{0,2}$$

Selon cette relation, le dosage en fines dépend généralement à la dimension des plus gros granulats, ce qui est prouvé dans la figure I-10 où le dosage en fine diminue avec l'augmentation de diamètre des grains.

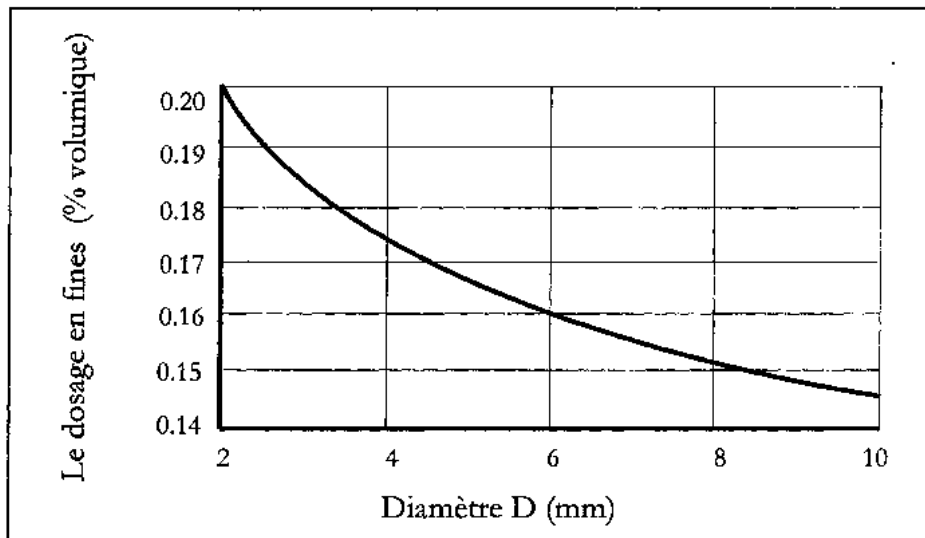


Figure I-10: Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines. (Sablocrete 1994)

Le dosage en ciment et en addition s'obtient par la résolution du système suivant:

$$\text{Ciment} + \text{Addition} = [\text{Fines}] \quad \text{et} \quad \text{Addition/Ciment} = \text{Optimum d'activité}$$

L'activité optimale représente un seuil au-delà duquel l'activité de fillers ne contribue plus au développement des performances mécaniques.

Après l'obtention de la compacité optimale entre l'ensemble granulaire et les fines, ce qui conduit à une porosité minimale constituée par un volume d'eau (e) et un volume des vides piégés (V), Caquot a abouti à une autre relation après d'autres travaux sur la compacité. Cette relation est comme suit:

$$(e + v)_{\min} = 0,8 (d/D_{\max})^{0,2}$$

d/D est l'étendue granulaire de l'ensemble granulaire.

Mais cette équation exige d'estimer la valeur de la plus petite dimension (d) de l'étendue granulaire du mélange, l'estimation de cette valeur est faite en considération les effets de floculation dans l'eau qui peuvent se produire à l'ensemble du mélange par la formule suivante:

$$d = (60 / f \times \rho) \text{ mm}$$

f : La surface spécifique exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$  du constituant.

$\rho$  : La masse volumique du grains exprimée en  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

La dimension d peut être définie comme la moyenne harmonique des grains les plus fins (d) du constituant assimilés à des sphères.

Dans le cas d'un mélange non défloculé, la valeur de la plus petite dimension de l'étendue granulaire (d) est fixée entre 20 à 25  $\mu\text{m}$ , c'est du à la difficulté de préciser la valeur (d) en raison de considération physico-chimiques très complexes. La figure I-11 nous montre l'influence de la dimension d sur la réduction de la porosité minimale du béton.

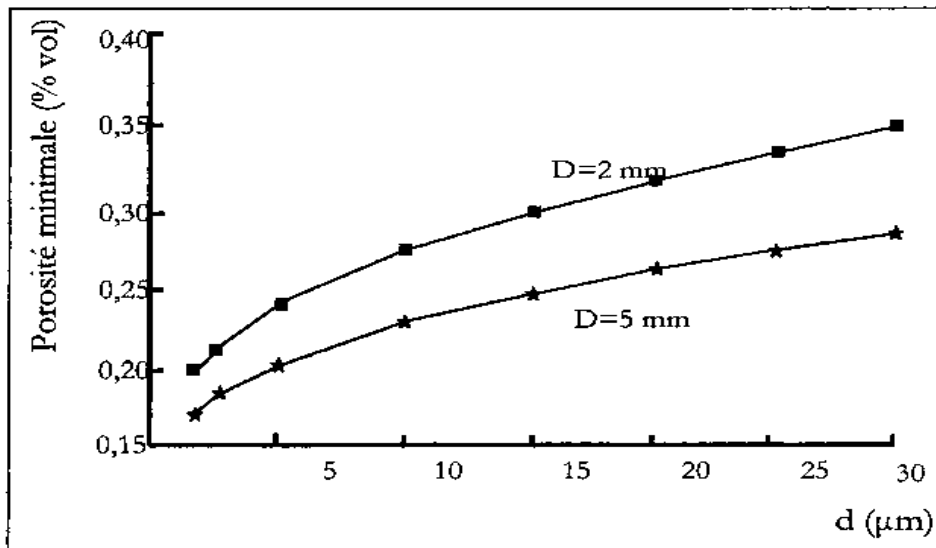


Figure I-11: Influence de la dimension  $d$  sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable. (Sablocrete 1994)

La quantité d'eau joue un rôle très important en ouvrabilité du béton, où sa confection avec des grandes quantités d'eau peut conduire à une mauvaise ouvrabilité, comme la figure I-12 nous montre.

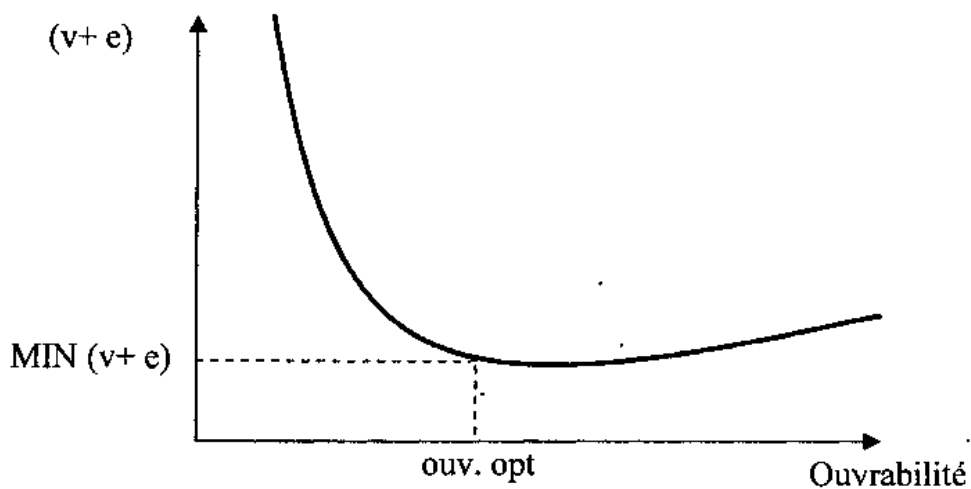


Figure I-12: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage  $(e+v)$  d'une matrice pour une mise en œuvre donnée. (Sablocrete 1994)

Pour estimer le dosage en eau, il faut passer par une évaluation préalable du volume d'air piégé. Dans le cas des bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons traditionnels et la relation suivante conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5 %:

$$[\text{vide}] = k \times [\text{eau}] \text{ (l/m}^3\text{)}$$

$k$  compris entre 0,2 et 0,25.

Enfin, l'estimation du dosage en sable est obtenue en faisant soustraire au mètre cube du mélange la somme des dosages des autres constituant déterminés précédemment (fines, eau, vide).

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] \text{ (l/m}^3\text{)}$$

Après avoir les différents quantités des constituants et optimiser la compacité, il est nécessaire d'estimer la résistance en compression du mélange par le biais de la formule de Féret proposée récemment:

$$R_b = \frac{K_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{C(1+K_1+K_2)}\right)^2}$$

$K_f$ : Coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5;

$R_c$ : Classe vraie du ciment (MPa);

$e$ : Dosage en eau total (l/m<sup>3</sup>);

$v$ : Air piégé (l/m<sup>3</sup>);

$R_b$ : Résistance du béton à 28 jours (MPa);

$K_1$ : Coefficient pouzzolanique;

$K_2$ : Coefficient d'activité du filler calcaire. Et les coefficients sont exprimés par:

$$K_1 = K_{cv} \frac{CV}{C} + K_{fs} \frac{FS}{C} \quad \text{et} \quad K_2 = K_{fil} \frac{FIL}{C}$$

$K_{cv}$ ,  $K_{fs}$ ,  $K_{fil}$ : Coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines;

CV, FS, FIL: Dosage en cendres volantes, en fumée de silice et en filler de calcaire (kg/m<sup>3</sup>).

### I.3. Bétons à base des fibres végétales

#### I.3.1. Généralités

Les bétons végétaux sont des matériaux composites fibrés c'est à dire constitués d'au moins deux matériaux de propriétés différentes mais complémentaires (**Bouzouita 2011**). Ce type de béton se compose par des particules ou des fibres végétales et un liant minéral, cette combinaison permet de donner des solutions pour limiter l'impact environnemental des bâtiments que ce soit l'état de construction neuve ou rénovation qui répond au critère de qualité environnementale, sanitaire et confort de l'habitat d'une part, et d'autre part permet de répondre au critère technique tel que les performances mécanique, la durabilité et la résistance au feu. Généralement, l'introduction de fibres végétales dans la matrice du béton permet d'obtenir de meilleures caractéristiques que celles aboutis en utilisant un matériau homogène classique.

La combinaison des fibres ou des particules végétales avec des liants minéraux est une ancienne méthode utilisée depuis décennies. Cette méthode peut être constatée dans plusieurs vestiges d'anciennes constructions qui témoignent de la durabilité de ce type de matériau, parmi les anciens exemples utilisés de ce type de mélange on trouve les blocs de terre crue renforcé par de la paille ou l'introduction de crin de cheval aux mortiers d'enduit (**Brandt 2008**), son utilisation dans les bâtiments a été transmis au début des années 70, là où les premiers travaux ont été pour but de remplacer les d'amiante dans les éléments préfabriqués profilés en fibrociment (bardage, tuiles, plaques.etc...) (**Aziz and Paramasivam 1984**). Cette

technique a donnée l'inspiration pour l'utiliser dans les matériaux de construction classique et moderne.

Les matières lignocellulosiques telles que les fibres et les granulats végétaux (figure I-13) proviennent généralement par les activités agricoles, où la majorité entre eux provient à l'origine de la paille et de la tige (résidus des plantes céréalière) et d'autres certains peuvent être à l'origine des feuilles, des plantes et des graines.

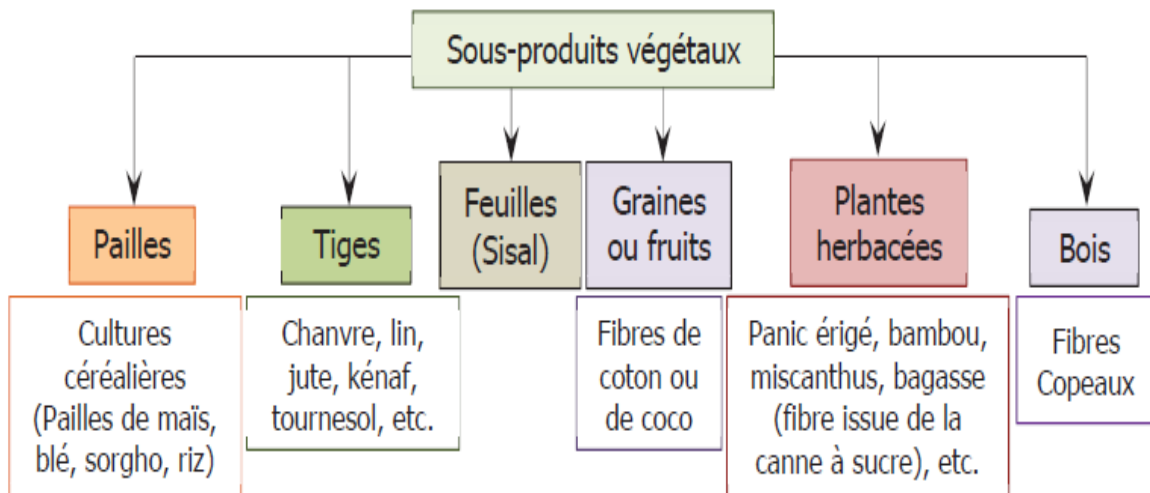


Figure I-13: Types de sous-produits végétaux suivant les cultures lignocellulosiques. (Ibrahim 2011)

Les fibres végétales utilisé pour renforcer les matrices de mélange qui se divise en trois catégories: les matrices minérales, les matrices polymères et les matrices cimentaires, alors que la matrice assure la cohésion du mélange, enrobe les fibres et offre une protection face les agents agressifs extérieurs, transfert des efforts aux fibres et joue un rôle important dans les performances mécaniques de composite.

#### a. Pour quelle raison les fibres végétales utilisées dans le béton ?

Les fibres végétales sont introduites dans la composition du béton et les matériaux composites en générale pour deux raisons principales :

- La première concerne le développement de nouveaux matériaux qui respectent les critères environnementales et ont des impacts limités avec l'utilisation d'autres matériaux (matériaux recyclable, biodégradable et renouvelable).
- La deuxième a pour but de la valorisation et l'exploitation des ressources locales moins chères et abondants que les matériaux traditionnels, ainsi d'arrêter l'épuisement de ces derniers d'une part et les préserver pour les générations futures d'autres part.

#### b. Quels sont les critères de base pour choisir les fibres végétales ?

La sélection des fibres végétales destinées à être utilisées comme renforts de béton doit se faire selon différents critères, qui sont les suivants:

- L'origine et la source de ces fibres et le type de plante dont elles proviennent.

- La fonction et le rôle de ces fibres dans la matrice ainsi que leur impact potentiel attendu sur les propriétés du béton.
- Sa composition chimique et sa structure complexe qui lui confèrent des propriétés spécifiques, telle que la légèreté, le module d'élasticité, la rigidité, le comportement thermique, la résistance à la traction et la flexibilité, etc...
- Sa disponibilité en grandes quantités sur le marché ou dans la nature et sa facilité d'utilisation.

En fait, l'utilisation de fibres végétales dans les matériaux composite est principalement due aux ses points positifs qui peuvent contribuer à améliorer les performances du matériau renforcé. Parmi ces points forts, nous mentionnons:

- Une ressource naturelle et renouvelable,
- Moins cher que les autres matériaux,
- Il est facile d'utilisé en raison de son caractère flexible et souple,
- A un impact environnemental limité ou nul,
- Il se caractérise par la biodégradation en tant que substance renouvelable,
- Moins de consommation d'énergie pour être produite,
- Il offre une isolation thermique et acoustique élevée.

Cependant, les fibres végétales présentent également certains inconvénients qui peuvent affecter de manière significative les propriétés du béton ou des composites renforcé, comme l'absorption d'eau, le gonflement et la faible stabilité dimensionnelle, la dégradation, une faible liaison dans la matrice cimentaire, mauvais ingrédients chimiques, etc.....

### **I.3.2. Classification des fibres végétales**

Les fibres végétales sont classées selon leur origine en tant que fibres naturelle, car elles contiennent une grande quantité de cellulose, en plus d'avoir de meilleures propriétés que certaines fibres d'origine naturelle comme les fibres animale. Ils sont donc très disponible presque dans tous les pays. En effet, les fibres d'origine végétales peuvent être classées selon la nature de la plante dont elles sont extraites, on retrouve donc:

- Les fibres d'écorces (jute, kénaf, chanvre);
- Les fibres de feuilles (henequen, sisal);
- Les fibres de fruits (noix de coco);
- Les fibres de bois (bambou);
- Les tiges (blé, orge);
- Les cannes et roseaux (roseaux, alfa);
- Les graines (coton).

Le tableau I-1 donne les propriétés physiques et mécaniques de quelque fibre selon **Siddique (2000)** et **Mohanty et al. (2005)**.

Fibre	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Diamètre (µm)	Résistance à la traction (N/mm <sup>2</sup> )	Absorption d'eau (%)	Module d'Young (GPa)	Allongement (%)
Plantain	-	-	92	-	1.43	5.90
Kénaf	3.36	-	295	-	-	-
Jute	-	1.30-1.49	227	120	13-26.5	1.16-1.50
Coco	1.60	-	180	110	-	26.5
Sisal	1.50	50-200	300-820	-	9.4-26	3-7
Lin	1.50	40-600	345-1500	-	27.6	2.7-3.2
Chanvre	1.47	10-100	650-900	-	30-70	1.6

La composition chimique de certaines fibres naturelles courantes d'après **Rowell et al. (2000)** est donnée par le tableau I-2.

Type de fibre		Cellulose	Lignine	Pentosane	Cendre	Silice
Paille	Riz	28-48	12-16	23-28	15-20	9-14
	Blé	29-51	16-21	26-32	4.5-9	3-7
	Orge	31-45	14-15	24-29	5-7	3-6
	Bambou	26-43	21-31	15-26	1.7-5	0.7
Fibre d'écorce	Graine de lin	43-47	21-23	24-26	5	-
	Kénaf	44-57	15-19	22-23	2-5	-
	Jute	45-63	21-26	18-21	0.5-2	-
	Sabai	-	22	24	6	-

Tableau I. 3 donne la production mondiale des fibres naturelles les plus courantes et leurs sources d'après **Rowell et al. (2000)**.

Fibre	Production mondiale (1000 t)	Source
Bambou	10.000	Tige
Coton	18.450	Fruit
Jute	2.300	Tige
Kénaf	970	Tige
Lin	830	Tige
Sisal	378	Feuille
Chanvre	214	Tige
Coco	100	Fruit
Abaca	70	Feuille

### I.3.3. Valorisation des fibres végétales dans différentes composites

L'introduction des fibres végétales comme renfort dans différentes matrices fait l'objet de plusieurs recherches, afin de résoudre plusieurs problèmes en raison de leurs caractéristiques mécaniques, thermiques et acoustiques, leur aspect renouvelable, ainsi que leur faible densité et les coûts de production bas (**Bederina et al. 2012**).

Selon une étude menée par **Bledzki et Gassan (1999)**, le cout d'obtention des fibres d'origine naturelle est trois fois inférieures à celui des fibres de verre, quatre fois moins que les fibres d'aramide et cinq fois inférieur au coût des fibres de carbone.

L'effet de l'addition de copeaux de bois sur la conductivité thermique des bétons de sable avec une teneur en copeaux variante de 0 à 100 kg/m<sup>3</sup> a été étudié par **Bederina et al. (2007)**, les résultats montrent une réduction de sa densité et une amélioration de sa conductivité thermique.

Un travail a été fait par **Belhadj et al. (2014)** sur l'effet de l'introduction séparée et combinée de pailles d'orge et de copeaux de bois sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable, ils ont trouvé que l'incorporation combinée des deux types de fibres donne des meilleurs résultats notamment le retrait, la diffusivité thermique, la ténacité et la ductilité.

**Li et al. (2006)** ont renforcé des composites en béton par des fibres de chanvre, ce renforcement entraîne une réduction de la densité et de l'absorption de l'eau. Dans une autre étude **Taoukil et al. (2012)** ont examiné l'effet de l'incorporation de laine de bois sur les propriétés thermo-physiques des mortiers de sable avec des pourcentages allant de 35 à 58%, ils ont démontré que cette incorporation diminue la conductivité thermique, la diffusivité, ainsi que la résistance à la compression qui est compatible avec l'utilisation de ce matériau comme béton léger.

**Bederina et al. (2009)** ont présenté une étude sur l'influence du traitement des copeaux de bois par la pâte de ciment sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton de sable, ils ont trouvé une augmentation de la résistance mécanique sans influence sur la conductivité thermique, le retrait a été réduit et l'adhérence a été améliorée. Dans le même sens, **Sellami et al. (2013)** ont étudié un béton vert renforcé par des fibres de diss traitées par l'eau bouillante pour extraire les sucres; ils ont montré que ce types de traitement entraîne une amélioration considérable sur les propriétés mécaniques des composites étudiés.

**Belhadj et al. (2015)** ont étudié l'effet de l'incorporation de paille d'orge sur les propriétés thermo-physiques d'un béton de sable destiné à la construction d'un mur extérieur dans les régions arides, ils ont trouvé que l'introduction de la paille d'orge dans le béton de sable améliore les propriétés thermiques en terme de la conductivité thermique et la chaleur spécifique. **Merta et Tschegg (2013)** ont utilisé les fibres de chanvre, herbe d'éléphant et pailles de blé dans un béton, ils ont constaté une amélioration de la ténacité du béton avec une diminution de la résistance à la traction.

Dans une autre étude réalisée par **Andonian et al. (1979)** sur les propriétés mécaniques d'un matériau composite renforcé par des fibres cellulosique, leurs résultats ont montrés une amélioration notable de la résistance à la traction, compatible avec l'augmentation de la teneur en fibre. Cela s'est accompagné d'une diminution du module de Young.

**Agarwal et Narain (1995)** a également étudié l'effet de l'introduction de fibres de bagasse dans la composition d'un composite à base de ciment, sur leurs propriétés mécaniques et physiques. Dans le même contexte, les résultats sont similaires à ce qui a été mentionné précédemment, où une augmentation de la résistance à la traction jusqu'à une valeur optimale de la teneur en fibre a été observée à 16%. Plus que cette valeur, la résistance à la traction du composite renforcé a diminué. Il a également observé une diminution de l'ouvrabilité avec l'augmentation de la teneur en fibres.

### I.3.4. Propriétés des bétons renforcés par des fibres végétales

#### a. La légèreté

Revenant aux études précédentes, l'incorporation de fibres végétales, qui se caractérisent par sa faible densité et sa légèreté dans un composite cimentaire conduit clairement à une diminution de 20 à 30% de la densité du béton. Par exemple, il est possible de remarquer la différence entre la masse volumique du béton hydraulique ordinaire qui est souvent de l'ordre de 2300 et 2500 kg/m<sup>3</sup>, et entre la masse volumique de béton allégé qui peut atteindre 1200 kg/m<sup>3</sup> avec l'augmentation de la teneur en fibres.

#### b. L'ouvrabilité

L'introduction des fibres végétales dans la composition du béton peut affecter la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage du mélange ce qui se reflète par une diminution de son ouvrabilité, cela est dû à la structure des fibres utilisées, plus la porosité de ces fibres est élevée, plus leur absorption de l'eau de gâchage est importante. La compensation de cet effet consiste à ajuster le rapport E/L ou par l'utilisation des super plastifiants (**Kriker *et al.* 2008, Castro and Naaman 1981**). En effet, la perte d'ouvrabilité est liée au rapport de la longueur sur le diamètre des fibres (la relation d'aspect) et ainsi à leurs quantités (**ACI Committee 1996**).

#### c. Résistance mécanique

L'utilisation des fibres végétales comme renfort peut améliorer considérablement la résistance à la traction du béton grâce aux propriétés mécaniques de ces fibres (résistance à la traction élevée), mais en ce qui concerne la résistance à la compression, leur effet est négatif car elles diminuent selon la teneur en fibres dans la composition du béton. Cependant, la résistance à la compression du béton à base des fibres végétales reste acceptable et plusieurs études ont montré que cette caractéristique peut être améliorée en effectuant un traitement sur les fibres (thermique, chimique et physique) avant leur incorporation dans la composition du béton.

#### -Les effets négatifs des fibres végétales sur les propriétés du béton

##### a. La porosité

Le béton à base des fibres végétales se compose de plusieurs éléments de base, à savoir: des éléments solides tels que les granulats, le liant et les fibres, des éléments liquides tels que l'eau et parfois l'adjuvant, tandis que le reste est formé par des vides et ces derniers sont différents selon leurs taille et l'origine de la porosité. Selon l'étude de **Collet *et al.* (2008)**, trois tailles de ces pores de vide peuvent être distinguées, comme suit:

- Des macrospores avec des diamètres supérieurs à 1mm, cela est dû à la mauvaise disposition des particules dans la composition de mélange.
- Des mésopores avec un diamètre entre 0.1 et 1mm, se trouvent à l'intérieur des granulats et de liant.
- Des micropores avec des diamètres inférieurs à 0.1mm, se trouvent dans la matrice.

En fait, l'introduction des fibres végétales dans le béton ou dans un matériau composite entraîne une augmentation de la porosité du mélange. Plus la teneur en fibres est élevée, plus la porosité est importante. Cette augmentation de la taille des pores est due à la structure

poreuse des fibres végétales elles-mêmes d'une part, et d'autre part, du fait à la disposition de ces fibres au sein de la matrice, et ce qui peut également créer une connectivité entre les pores. **Belhadj et al. (2016)** ont montrés dans une étude que la porosité résultant par l'incorporation des fibres végétales (Paille d'orge) dans un béton de sable est plus élevée et plus connectée que celle d'un béton sans fibres.

L'effet des fibres végétales sur la porosité est un effet négatif et peut causer d'autres problèmes sur certaines propriétés du béton, où la quantité d'évaporation de l'eau sera importante et qui se reflétera sur le retrait du béton qui augmentera également. En revanche, un autre problème se posera dont les symptômes qui peuvent apparaître au fil du temps concernant la durabilité résultant à l'augmentation de la taille des pores, qui est de rendre le béton vulnérable aux facteurs agressifs externe comme les ions de chlorure, ce qui affaiblit la résistance du béton et conduit à sa détérioration.

### **b. Influence des fibres sur le temps de prise**

Selon de nombreuses études antérieures, une augmentation du temps de prise de ciment est clairement observée lorsqu'il est combiné avec des fibres végétales ou du bois, et parfois le mélange reste à l'état pâteux pendant une longue période. Généralement, ce retard de prise est largement lié à la présence de sucres dans la composition des fibres végétales. Il a également été constaté à travers plusieurs études que la période de récolte des fibres peut jouer un rôle important sur le retard de prise du ciment (**Biblis et Lo. 1968, Weatherwax et Tarkow 1964, Reading 1985**).

En fait, la composition chimique complexe des fibres végétales explique ce phénomène, Reading par exemple, explique le retard de prise de ciment aux des polysaccharides produits par la dégradation de l'hémicellulose en milieu alcalin (**Reading 1985**).

Par conséquent, il semble claire qu'il est difficile de maîtriser les composants chimiques des fibres végétales en raison de leurs conditions et période de récolte et leurs lieux de culture, ce qui reflète sur le contrôle de la prise du ciment (**Sedan 2007**).

La plupart des études s'accordent que l'introduction des fibres végétales rend le béton un béton allégé, mais avec un effet néfaste sur le retrait, le temps de prise, la porosité et la résistance à la compression du béton. Cependant, plusieurs traitements ont été proposés pour réduire les effets négatifs des fibres végétales dans le béton tels que, le traitement thermique, chimique et physique.

### **I.3.5. Les fibres de paille de blé**

Les fibres de paille de blé sont obtenues par les travaux de récolte, où elles sont coupées par une moissonneuse-batteuse pour obtenir des grains de blé et ce qui en reste sur les champs sous forme des morceaux inégaux est une tige qui contient également des feuilles, ce que nous appelons la paille.

En fait, les fibres de paille se composent de trois parties principales: la tige, les nœuds et les feuilles mais le premier est considéré comme le plus importants, car il est chargé de porter toute la structure de la paille, sa forme est cylindrique creuse avec un faible diamètre, contribue au transport de l'eau et se compose de plusieurs couche concentrique et divisée par les nœuds sur lesquels le feuilles se développent (**Stephen et James 1981**). En ce qui

concerne les entre-nœuds, ils représentent de 50% de la masse de la paille et lui donne sa résistance mécanique.

### a. La structure et la composition chimique de paille de blé

La structure de la paille de blé (figure I-14) selon **Stephen et al. (1981)**, **Liu et al. (2005)** est formée par des couches à structure tubulaire ou creuse et se compose généralement de cellules, organisées d'une manière concentrique autour du lumen. La coupe longitudinale nous montre la structure des fibres de paille de blé, à partir de la périphérie vers le centre, où l'on trouve:

- \*L'épiderme est une couche externe riche en cellulose qui entoure la tige et se caractérise par sa rigidité;
- \*le sclérenchyme, c'est une couche adjacente à l'épiderme et contribue à sa dureté;
- \*Le parenchyme, couche cellulaire contient principalement des faisceaux vasculaires pour transporter de l'eau et des nutriments le long de la tige;
- \*La moelle.

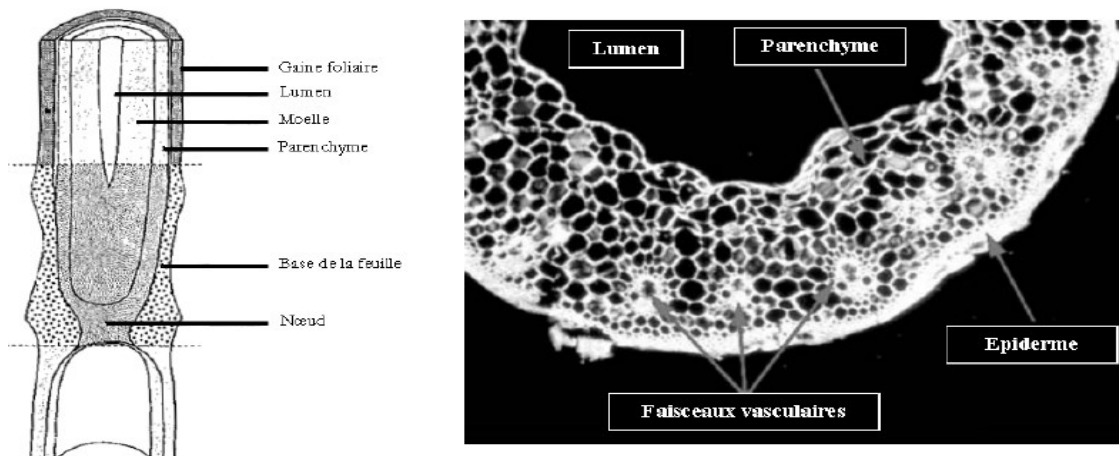


Figure I-14: Structure d'une paille de blé. (**Stephen et al. (1981)**, **Liu et al. (2005)**)

En ce qui concerne les composants chimiques, plusieurs études nous ont donné les composants de base de paille de blé et ont également montré une différence dans leurs proportions, cela est probablement dû au changement de climat, la période de récolte et le type de sol. En fait, la paille de blé se compose de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine.

Composants chimiques	Pourcentage
Cellulose	45 – 55 %
Hémicellulose	20 – 25 %
Lignine	8 – 12 %
Cendre	5 – 10 %

Comme le montre dans le tableau I-4, la cellulose est le principal ingrédient de la paille de blé, suivie de l'hémicellulose et il contient également la lignine et la cendre mais en faibles proportions.

## I.4. Valorisation des déchets dans le domaine de construction

### I.4.1. Introduction

Les déchets résultent des travaux des chantiers de construction, des usines des matériaux de construction, de la réhabilitation des bâtiments et aussi au niveau des carrières (béton, céramique, brique, verre, pierres, terres et sables) sont considérés comme des déchets solides, minéraux et inertes. Ils ne présentent pas de pollution, chimiquement stable dans le temps, c'est-à-dire neutre pour l'environnement (**Recovering 2014**). Cependant, ils ont toujours un effet négatif sur l'environnement par l'émission de CO<sub>2</sub>, ainsi que sur la santé de l'être humaine et la présence de ces déchets dans la nature peuvent causer une pollution visuelle.

En Algérie, le secteur de la récupération et du recyclage des déchets sont connu par sa faible activité, malgré les atouts qu'il apporte à l'économie nationale (en ouvrant le marché de l'investissement) d'une part et à l'environnement d'autre part, mais l'exploitation de ce secteur est très limitée. Selon plusieurs rapports des médias et des statistiques publiées par le ministère algérien de l'environnement et des énergies renouvelables, la réutilisation des déchets en Algérie ne dépasse pas 7%, sachant que l'Algérie produit annuellement 13 million de déchets, dont 30% représentent des déchets solides et 50% sont des déchets inertes. Et avec l'augmentation continue de ces déchets et leurs répandues dans la nature, il nous a fallu nous diriger vers une stratégie de développement durable afin d'éliminer ces déchets. Selon le point de vue du ministre de l'environnement, une stratégie de développement durable sera mise en œuvre dans le but d'éliminer complètement les déchets dans la nature d'ici 2035 en Algérie. Pour atteindre cet objectif, plusieurs méthodes peuvent être appliquées, dont la plus importante est le recyclage des déchets.

Les processus de recyclage des déchets est une solution environnementale et durable le plus utilisé dans le monde, car est l'un des moyens appropriés qui permet de donner une nouvelle vie à ces déchets et de réduire ses impacts environnemental, cela nous donne certains avantages tel que la protection des ressources naturelles, les économies d'énergie, la contribution à l'économie, la réduction des déchets et les investissements pour l'avenir, et cela peut également être considéré comme une approche durable de la gestion des déchets solide (**Kaseva et Gupta 1996**).

Dans ce contexte, plusieurs recherches et études ont été consacrées sur la réutilisation des déchets dans les matériaux de construction à travers un processus de remplacement total ou partiel des matériaux d'origine naturels (ciment, sable et gravier) par des matériaux recyclés (déchet de plastiques, brique, béton, marbre, verre, céramique...etc.) visent notamment à améliorer son comportement de performance, sa durabilité et ainsi à traiter les problèmes de béton. Ce processus nous a permis de développer de nouveaux matériaux appelés «les éco-matériaux », ces derniers se caractérisent par leur respect de l'environnement et son cout économique, en plus de ses propriétés mécaniques, physiques et thermiques qui en font un endroit compétitif par rapport aux matériaux traditionnel, où ils peuvent être utilisés dans la réalisation de nouvelles constructions et même dans les travaux de réhabilitation des ouvrages anciens qui ont été endommagés.

Dans ce travail on s'intéresse à la valorisation et la réutilisation des déchets de marbre et déchets de céramiques dans la formulation d'un béton de sable allégée par des fibres de paille de blé.

## I.4.2. Déchets de marbre et déchets de céramique

### I.4.2.1. Le marbre

Le marbre est une roche d'origine métamorphique naturelle, extraite en grandes dimensions afin de répondre à des besoins spécifiques sur le marché des matériaux de construction ou pour d'autres activités commerciales. D'autre part, les matériaux en marbre et granit sont considérés comme l'un des plus grands matériaux de production au monde en termes de taille et de dimensions.

Les roches de marbre sont dérivées au calcaire métamorphisé qui sont présentes dans plusieurs régions du monde comme la Chine, l'Inde, le Portugal et l'Italie et même en Algérie, où l'entreprise national du marbre produit plus de 36 milles mètre cube par an, grâce aux plusieurs carrières d'extraction et des usines de transformation (07 carrière et 03 unités de transformation) selon les normes européennes. Parmi les carrières les plus productivités en Algérie c'est la carrière de Fil-fila à Skikda, qui produit entre de 10 et 12 milles mètres cubes de marbre annuellement, qui répond aux besoins de 40 entreprises de l'industrie du marbre.

La carrière de la montagne de Fil-fila pour la production de marbre se compose de deux parties, la première (figure I-15) est un gisement monoclinale constitué par des affleurements en marbre qui peuvent atteindre une longueur de 1100 m avec une largeur allant de 100 à 300 m. Cette carrière occupe une superficie de 13 hectares et à plus de 100 mètres de profondeur avec un réserves restants des blocs estimés à 5.527.145 m<sup>3</sup>, ce qui explique la diversité des produits en marbre brut extrait, comme le marbre blanc qui représente le plus grand pourcentage, tandis que les autres variétés se composent de marbre gris clair et foncé, réséda marron, vert et dérivés de marbre en différentes classes granulaires (**Hebhoub et Belachia 2011**).



Figure I-15: Carrière des blocs de marbre de fil-fila

La deuxième carrière (figure I-16) est située dans la même zone de Fil-fila et s'appelle la carrière de Chatt, cette dernière qui contient de 6.7 millions tonnes en tant que réserve désignée pour l'exploitation de gisement de marbres fissurés de type blanc, gris et gris foncé qui sont traités au niveau de la station de concassage pour produire des dérivés de marbre de différents dimension granulaire (poudre, grains 1/5, grains 5/10 et grains 10/18).



Figure I-16: Carrière des dérivées de marbre de Chatt (Fil-fila)

Dans le même contexte, le processus de production se déroule en deux étapes principales:

**\*L'extraction:** le processus de l'extraction de marbre brut se fait en 3 étapes, à savoir:

- Explosifs, en exploitant les matières explosives souvent utilisées dans les carrières de granit
- Haveuses-rouilleuses, pour l'extraction des blocs.
- Fil, en utilisant des fils hélicoïdal ou fils diamanté pour découper et abattre des masses brutes de marbres en carrières.

**\*Le sciage:** les roches brutes de marbre extraites, sont sciées à l'aide d'une lame d'acier avec de sable ou à l'aide d'une lame diamanté et transformées en un produit complet.

#### I.4.2.1.1. Déchets de marbre

Tous les opérations de production de marbre s'accompagnent de grandes quantités de déchets en différentes dimensions et en différentes formes géométriques, sont stockés au niveau des carrières à ciel ouvert. En ce qui concerne les déchets de marbre résultant de l'exploitation du gisement de Fil-fila, on trouve les déchets de débris, des chutes et gravats sous diverses formes géométriques et d'une poudre déclassifiée (poudre jetée exposée aux intempéries) produite par l'opération de sciage vertical et latéral par un fil diamanté, et le taux de ces déchets est de 56% de production. Dans le même contexte, l'usine de transformation du marbre produit  $22 \text{ m}^2/\text{m}^3$  de déchets (chute des carreaux, chute des blocs et poudres de marbre). L'extraction du marbre brut par l'opération explosif dans la carrière de Fil-fila produit également des déchets en différentes classes granulaires et poudre déclassée avec un taux de 19% de la production (**Hebhoub et al. 2019**).

Les composants principaux de déchets de marbre sont du calcaire ou carbonate de calcium, ce sont des déchets très durs et peuvent être utilisés dans différents domaines tels que la fabrication de ciment blanc, comme remplisseur de peinture et pour faire la couche de fond pour des peintures de toile, etc...

#### I.4.2.1.2. Utilisation de déchets de marbre comme matériaux de construction

Les déchets de marbre ont été récupérés dans plusieurs matériaux de construction, comme ajout dans les matériaux cimentaires, comme granulats dans les bétons et mortiers et comme sable dans un béton de sable.

**Corinaldes *et al.* (2010)** ont étudiés et caractérisés le sous produit de sciage et de façonnage de marbre afin de l'utiliser comme ajout minéral pour mortier et béton en particulier pour les béton Auto-plaçant, la poudre de marbre présente une finesse très élevée (  $1500\text{m}^2/\text{kg}$ ), les pâtes de ciment sont préparés avec plusieurs poudres de marbre avec et sans ajouts d'un superplastifiant, des mortier 1/3 sont préparés pour une même maniabilité afin d'évaluer les effets de la poudre de marbre sur le comportement mécanique, les mélanges ont été évalués avec une substitution de ciment ou du sable par la poudre de marbre; les résultats indiquent que 10% substitution de sable par la poudre de marbre a fourni une résistance maximale à la compression à peu près au même maniabilité.

**Hebhoub et Belachia (2011)** ont étudié la valorisation des granulats de déchets de marbre dans la composition du béton avec l'incorporation total et partiel de 0 à 100%, ils ont trouvé une amélioration de la résistance à la compression et à la traction ainsi l'ouvrabilité du béton.

**Belaidi *et al.* (2012)** ont examiné l'effet de la substitution de la poudre de marbre sur les propriétés du béton auto-plaçant, en pourcentage différents de 10 à 40% ils ont été montrés une amélioration sur l'ouvrabilité du béton avec un effet négatif sur la résistance à la compression.

**Aliabdo *et al.* (2014)** ont évalués la possibilité de réutiliser la poussière de marbre comme remplacement partiel du ciment et du sable dans le béton, les résultats trouvés indiquent une amélioration des propriétés physique et mécanique du béton. Dans le même sens **Sardinha *et al.* (2016)** ont vérifiés la capacité de durabilité d'un béton contenant de la boue de marbre, les résultats montrent que l'augmentation de la teneur en ciment et en boue de marbre affecte négativement la durabilité du béton.

Une étude expérimentale a été faite par **Hebhoub *et al.* (2014)** sur le remplacement partiel et total du sable normalisé par le sable de déchets de marbre dans la composition du mortier, les résultats montrent que l'introduction de déchets de marbre dans le mortier entraîne une amélioration de la densité avec une diminution de l'ouvrabilité, ainsi une bonne résistance à la compression à court terme.

**Djebien *et al.* (2015)** ont utilisé les fines de déchets de marbre de la carrière de Fil-fila qui remplace partiellement les fines calcaires dans un béton de sable, ils ont constaté une amélioration des propriétés à l'état frais et durci en fonction de l'augmentation du taux de fines.

**Berdoudi *et al.* (2017)** ont élaboré une étude qui porte sur l'utilisation des fillers de déchets de marbre comme ajout dans le ciment, ils ont trouvé une amélioration de la consistance de la pâte de ciment, une augmentation du temps de début et fin de prise et les meilleures performances en compression et en traction par flexion sont données par les mortiers de 5% de taux de substitution, le retrait augmente avec l'augmentation du taux de substitution mais reste dans les normes.

**Djebien *et al.* (2018)** ont réutilisés les déchets de marbre comme sable dans un béton auto plaçant, ils ont trouvés que la substitution de déchets de marbre diminue la densité et la teneur en air, et assure la cohésion et la résistance à la ségrégation.

**Boughamsa *et al.* (2019)** ont utilisés les sables de déchets de marbre de la carrière de Fil-fila comme substituant partielle et total d'un sable ordinaire dans la formulation d'un béton de sable, ils ont trouvés que les caractéristiques du béton de sable à l'état frais ont été améliorées. La substitution partielle de 25% a donné une meilleure propagation du son ainsi qu'une meilleure dureté de surface et la substitution partielle a négativement influencé la pénétration de chlorure, ainsi que l'absorption d'eau.

**Benhalilou *et al.* (2020)** ont étudié un béton de sable contenant un sable de déchets de marbre substitué partiellement un sable ordinaire avec des taux 5, 10, 15, et 20%, les résultats sont comparés avec des échantillons témoins de 0% de taux de substitution, ils ont montrés que l'introduction de déchets de marbre dans le béton de sable améliore les caractéristiques rhéologiques de la matrice

**Hebhoub *et al.* (2020)** ont introduit les déchets de marbre dans la composition des mortiers comme sable substitué partiellement un sable ordinaire avec des taux allons de 0 à 20%, les résultats obtenues montrent que la plus faible teneur en air occlus et la meilleur consistance est donné par le mortier de 15% de taux de substitution. Une amélioration des résistances en compression et en traction par flexion et les résistances vis à vis de l'attaque par  $H_2SO_4$  dans les mortiers contentent des sables de déchets de marbre

#### I.4.2.2. La céramique

L'émergence des matériaux de céramique est inspirée de l'utilisation de l'argile dans l'art de la poterie, en formant une pâte plastique d'argile et d'eau qui initialement facile à former puis devient solide, dur et immuable après l'avoir exposée à des températures élevées (cuisson).

Par conséquent, le terme céramique est d'origine grecque « Keramikos » qui signifie terre cuite ou terre à potier. Inclure ensuite plusieurs matériaux et produits destinés à des usages différents, notamment: les produits de terre cuite (les tuiles, les appareils sanitaires, les briques...), les porcelaines, les abrasifs, les réfractaires, les céramiques pour l'électronique, les céramiques technique, les verres et d'autres.

En fait, la céramique a de nombreuses définitions et cela est dû à la diversité de ses produits et ses compositions chimiques. Mais la définition la plus courante est donnée par **Kingery (1976)**, qui a défini la céramique comme un matériau solide inorganique non métallique, qui est obtenu par fusion et se compose d'aux moins deux ou plusieurs éléments de base (des oxydes et d'autres composants chimiques).

Les caractéristiques du produit final de céramique varient selon la nature de leurs composants, la liaison de leurs atomes, leur microstructure, leur température de cuisson et leur qualité de surface.

En effet, les propriétés qui caractérisent la plupart des matériaux céramiques sont les suivantes:

- La durabilité;
- La résistance à l'usure;
- La résistance à la chaleur;
- La fragilité;
- La résistance à l'oxydation;
- La stabilité chimique;
- Isolateurs thermique et électriques;
- Imperméable.

L'industrie des produits céramiques en Algérie a connu une croissance importante ces dernières années, et contribuant de manière significative dans le secteur de la construction, que ce soit par la céramique rouge ou la céramique blanche (céramique sanitaire).

Durant l'année 2018, la production en céramique a enregistré le nombre de 150 millions de mètres carrés (**Bouderba 2018**).

#### **I.4.2.2. 1. Céramique sanitaire (les appareils sanitaires)**

Les appareils sanitaires sont largement utilisés dans le domaine de la construction, parmi lesquelles on trouve les équipements de salle de bain comme les labos, les receveurs de douche, les vasques, les cuvettes, etc. Sa structure se compose de deux couches, dont la première est formée d'une pâte qui contient des matières premières naturelles telles que l'argile et le kaolin, la seconde recouvre la première par d'une couche d'émail puis exposé à une température élevée (environ de 1280°C). A la fin du processus de fabrication, nous obtenus une pièce sanitaire en céramique qui se caractérise par une surface émaillée lisse, une résistante à l'abrasion, une grande dureté, une solidité, une isolation thermique, une grande durabilité et une extrême longévité.

#### **I.4.2.2.2. Les déchets de céramique**

Le croissance de la production et de la consommation mondiale de divers produits de céramiques, qui ont atteint en 2018 environ de 13 milliard de m<sup>2</sup> et 12.8 milliard de m<sup>2</sup> respectivement, ont grandement contribué à l'augmentation de pourcentage de déchets de construction et de démolition, ce qui représentent plus de 50 % des déchets de construction.

En Algérie, des grandes quantités de déchets de céramique (figure I-17) jetés dans la nature lors de sa production par les usines en raison de la mauvaise qualité du dit produit constatés durant l'emballage et leur expédition. Cependant d'autres quantités de déchets de céramique sont également déversées à la suite des travaux de réaménagement au niveau des domiciles, sachant que les déchets de céramique blanche (les appareils sanitaires) sont classés comme déchets inertes non biodégradables, ce qui signifie met plus de 4000 ans pour se décomposer dans processus naturel (**Farinha et al. 2015**). En 2016, l'Agence National des Déchets a recensé 11 millions de tonnes des déchets inertes (céramique et débris de travaux) (**Nasri. 2018**).



Figure I-17: Déchets des appareils sanitaires.

#### I.4.2.2.3. Utilisation de déchets de céramique comme matériaux de construction

Plusieurs études ont été menées sur la réutilisation des déchets de céramique sous forme de fines et granulats dans le béton et mortier.

**Alves *et al.* (2014)** ont évalué l'effet de l'incorporation de granulats fins de céramique recyclée (brique et des pièces sanitaires en céramique) remplace partiellement des granulats fins naturels avec des taux de 20 à 100% sur les propriétés mécaniques du béton, ils ont trouvés que les briques concassées entraînent une amélioration des performances structurales et contrairement à ceux donnés par les granulats de céramique.

**Higashiyama *et al.* (2012)** ont étudié l'effet de l'utilisation des granulats fins et poudre de déchets de céramique comme remplacement partiel des granulats fins naturels et de ciment respectivement sur la résistance en compression et la résistance à la pénétration des ions de chlorure d'un mortier, ils ont trouvés une amélioration à ces caractéristiques en comparaison avec le mortier de sable ordinaire, en particulier à 20% de taux de remplacement partiel du ciment par la poudre de céramique.

L'utilisation des déchets sanitaires en céramique comme granulats (fins et grossier) dans le béton ont été étudiés par **Halicka *et al.* (2013)**, ils ont montré une amélioration des résistances mécaniques et à l'abrasion.

**Farinha *et al.* (2015)** ont étudié le comportement des mortiers de ciment avec la substitution volumique des granulats naturels par des granulats fins recyclés (pièces sanitaires en céramique) avec des pourcentages de 0 à 20%, les résultats ont été très positifs en particulier a 20% de taux de substitution.

L'amélioration des performances d'un mortier de ciment par l'ajout de granulats très fins recyclé de la céramique rouge ont été étudiées par **Silva *et al.* (2019)**, ils ont trouvés que le remplacement de 10% de granulats fins ordinaires par les granulats fins recyclés dans le mortier entraîne une amélioration générale de ses performances.

## **I.5. Conclusion**

Dans cette étude on s'intéresse à la valorisation et la réutilisation des déchets dans un béton de sable à base de fibres végétales.

Pour atteindre les objectifs de ce travail nous avons réalisés une banque de donnée sur:

- Les bétons de sable, composition, propriétés, différents types et domaines d'utilisation.
- Les différents types de fibres végétales et quelques travaux antérieurs sur l'utilisation de ces fibres dans les bétons de sable.
- Une notion sur les déchets et en particulier les déchets de marbre et de céramique l'objet de cette étude et la valorisation de ces déchet dans comme matériaux de constructions.

## **Chapitre II : Caractérisation des matériaux**

## II. Caractérisation des matériaux

### II.1. Introduction

On présente au cours de cette partie les matériaux utilisés à savoir la caractérisation des granulats ordinaires, des granulats recyclés et les essais de caractérisations pour chaque type de matériaux.

On fait substituer une partie des granulats ordinaires (sable de dune) par des granulats recyclés (sable de déchets de marbre et sable de déchets de céramique) d'un béton de sable à base des fibres végétales (paille de blé); on réalise des essais de caractérisation sur les différents matériaux utilisés dans cette étude comme le ciment CEM I, le sable ordinaire et les sables recyclés à savoir: la densité, la finesse, l'analyse granulométrique et l'analyse chimique.

Les essais de caractérisation ont été faites dans les laboratoires:

- Laboratoire de l'Habitats et la Construction – Skikda;
- Laboratoire de la cimenterie de Hdjar Soud – Skikda;
- Laboratoire de génie civil de l'université de Skikda.

### II.2. Caractérisation des matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude sont:

- Ciment CEM I de classe 42.5 d'origine la cimenterie d'Ain kbira -Sétif.
- Sable de dune SD de classe 0/1 de nature roulée de provenance Collo –Skikda.
- Sable de déchets de marbre SM (déchets jetés exposés aux intempéries) de classe 0/2 de nature concassée de la carrière de Fil-fila-Skikda.
- Sable de déchets de céramique SC de classe 0/2 de nature concassée obtenu par concassage et tamisage des chutes des lavabos.
- Fines calcaires F de la carrière de Ben Azzouz -Skikda.
- Fibres de paille de blé obtenues dans les champs de l'agriculture lors de la récolte du blé.
- Adjuvant super plastifiant SP.
- Eau de gâchage du robinet.

#### II.2.1. Ciment

Le type de ciment utilisé dans cette étude est un ciment CEM I de classe 42,5 à faible teneur en C<sub>3</sub>A utilisé pour les travaux dans les milieux fortement agressifs des sulfates (CRS), d'origine la cimenterie d'Ain Kbira- Sétif (Est de l'Algérie) et livré dans des sacs de 50 Kg (figure II-1).

Le ciment CEM I est un ciment portland obtenu par un mélange de 95% de clinker finement broyé au quel on ajoute de gypse comme régulateur de prise.



Figure II-1: CEM I d'Aïn Kbira -Sétif

Les essais effectués sur les constituants du CEM I sont:

- La densité est  $3,22 \text{ g/cm}^3$  a été déterminée à l'aide de densimètre le Chatelier en utilisant l'acétone (figure II-2).

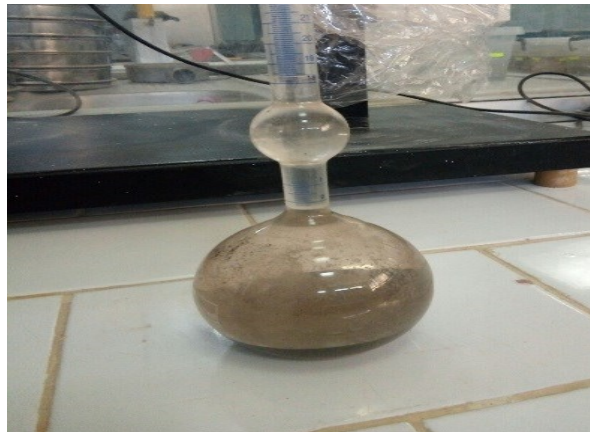


Figure II-2: Mesure de la densité

- La surface spécifique de Blaine du ciment est de  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$  a été déterminée conformément à la norme EN 196-1, par la méthode de perméabilité à l'air (figure II-3) on observant le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lait de ciment ou de fillers compacte dans la cellule du perméabilimètre de Blaine.



Figure II-3: Mesure de la SSb

- L'analyse chimique de ciment CEM I utilisé dans cette étude a été déterminée par diffraction par rayon « X » et par la méthode classique. Les caractéristiques chimiques sont présentées dans le tableau II-1, la teneur des phases anhydres du ciment est calculée à partir de l'analyse du ciment en appliquant la méthode de Bogue.

Désignation	Résultats en %	Désignation	Résultats en %
CaO	65.85	CaO Libre	0.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.13	SO <sub>3</sub>	2.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.16	MS	2.43
SiO <sub>2</sub>	21.31	MAF	0.88
MgO	1.34	C <sub>3</sub> S	72.25
Na <sub>2</sub> O	0.16	C <sub>2</sub> S	8.83
K <sub>2</sub> O	0.25	C <sub>3</sub> A	3.14
Cl	0.003	C <sub>4</sub> AF	14.7

Les propriétés physiques et mécaniques du ciment CEM I sont présentées dans le tableau II-2.

	2jours	7jours	28jours
Resistance en compression en MPa	19.6	37.48	54.91
Resistance en traction par flexion en MPa	5.01	6.45	8.97
Prise	<b>Début de prise</b>	<b>Fin de prise</b>	/
	4h 6min	5h 18min	/

## II.2.2. Sables

Dans cette étude, nous avons utilisés trois types de sable, un sable ordinaire et deux sables recyclés.

### II.2.2.1. Sable ordinaire

Le sable ordinaire utilisé dans cette étude est un sable naturel dunaire SD de nature roulée, de classe 0/1 provient de la région de Collo-Skikda. Ses propriétés physiques sont représentées dans le tableau II-3.

Désignations	Résultats
Densité apparente g/cm <sup>3</sup>	1.520
Densité réelle g/cm <sup>3</sup>	2.591
Equivalent de sable %	86.30
Valeur au bleu %	0.7
Absorption %	3.35
Module de finesse %	1.95
Teneur en fines %	1

Le sable de dune présente des densités courantes, propre de faible pourcentage de fines argileuse, à un module de finesse faible et un coefficient d'absorption un peut élevé.

Les propriétés et chimiques de se sable sont présentées dans le tableau II-4

Désignations	Résultats en%	Désignations	Résultats en%
CaO	0.80	MgO	0.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.36	Na <sub>2</sub> O	0.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.15	K <sub>2</sub> O	0.58
SiO <sub>2</sub>	94.09	SO <sub>3</sub>	0.01

D'après les analyses chimiques le sable de dune est un sable siliceux (SiO<sub>2</sub> est de 94.09).

### II.2.2.2 Sables recyclés

Dans cette étude nous avons utilisé deux types de sable recyclés, un sable de déchets de marbre SM et un sable de déchets de céramiques SC.

#### a. Sable de déchets de marbre

Le sable de déchet de marbre SM est une poudre jetée exposée aux changements climatiques (figure II-4) de classe 0/2, de nature concassée provenant de la carrière de Fil-fila qui se situe à 25 km de l'est de la wilaya de Skikda.



Figure II-4: Poudre de marbre jetée

Les caractéristiques physiques du sable de déchets de marbre sont données par le tableau II-5.

Désignations	Résultats
Densité apparente g/cm <sup>3</sup>	1.61
Densité réelle g/cm <sup>3</sup>	2.666
Equivalent de sable %	67.11
Valeur au bleu %	0.6
Absorption %	4.95
Module de finesse %	1.79
Teneur en fines %	15

Les caractéristiques chimiques de sable de déchet de marbre sont présentées dans le tableau II-6.

Désignations	Résultats en%	Désignations	Résultats en%
CaCO <sub>3</sub>	98.67	Na <sub>2</sub> O	0.00
CaO	55.29	K <sub>2</sub> O	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	Cl	0.025
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	SO <sub>3</sub>	0.04
SiO <sub>2</sub>	0.53	PF	43.40
MgO	0.20	R. Insoluble	0.035

Le sable de déchets de marbre présente une densité réelle et teneur en fines élevées et un fort coefficient d'absorption.

Le module de finesse du sable de déchets de marbre est le plus faible indique un sable fin, ce qui traduit par une facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance et une demande en eau élevée (**Dreux et Feasta 1996, Hebhou 2011**).

Le sable de déchets de marbre a une teneur en carbonate de 98,67%, c'est un signe que le sable présente une bonne adhérence à l'interface matrice/granulat (bon collage pâte de ciment sur la surface de sable) et entraîne une augmentation des résistances mécanique au jeune âge (**Hebhou 2011**).

#### b. Sable de déchets de céramique

Le sable de déchets de céramique SC de calasse 0/2, de nature concassée obtenu par concassage et tamisage dans le tamis 2mm des chutes des lavabos (figure II-5). L'origine de ces chutes proviennent principalement des usines de production de céramique en raison de leurs fragmentations pendant le processus de production ou d'expédition d'une part, et des travaux de rénovation à domicile d'autre part.



Figure II-5: Chutes de céramique

Dans le tableau II-7 on présente les caractéristiques physiques du sable de déchets de céramique.

Désignations	Résultats
Densité apparente $g/cm^3$	1.38
Densité réelle $g/cm^3$	2.430
Equivalent de sable %	66.29
Valeur au bleu %	0.25
Absorption %	1.26
Module de finesse %	2.20
Teneur en fines %	17

Le sable de déchets de céramique est un sable préférentiel de faible propreté et teneur en fines élevée d'où une demande en eau important (**Dreux et Feasta 1996**), de densité réelle faible et un coefficient d'absorption faible.

Les caractéristiques chimiques de sable de déchets de céramiques sont présentées dans le tableau II-8.

Désignations	Résultats en%	Désignations	Résultats en%
CaO	1.52	MgO	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.90	Na <sub>2</sub> O	1.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.60	K <sub>2</sub> O	1.39
SiO <sub>2</sub>	76.86	R. Insoluble	-

D'après les analyses chimiques on constate que le sable de déchets de céramique est un sable siliceux (76,86 % de SiO<sub>2</sub>), ce qui peut ralentir le durcissement, et permet d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme et améliore la durabilité du béton (**Dreux et Feasta 1996**), en plus de contenir un pourcentage d'oxyde d'aluminium (21,90% d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) qui contribue à la prise du béton.

Les résultats des analyses granulométriques des trois types de sables sont présentés par des courbes granulométriques (figure II-6).

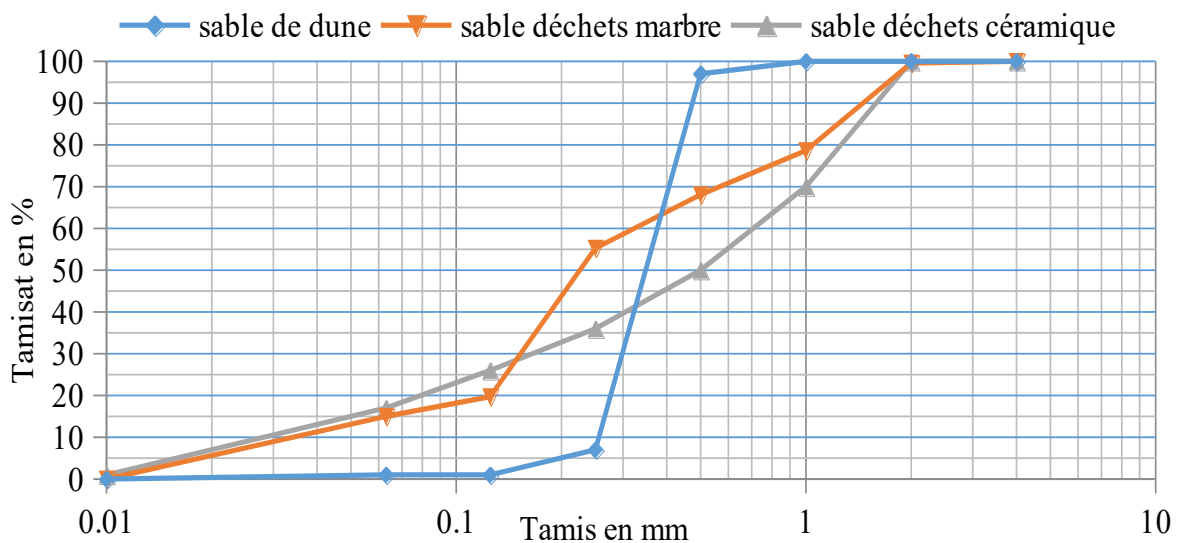


Figure II-6: Courbes granulométriques des sables.

Les courbes granulométriques des trois sables sont continués et présentent une moyenne régularité de la granularité.

### II.2.3. Fines calcaires

Les fines F utilisées dans cette étude sont des fines calcaires prévenants de la carrière de Ben Azouz- Skikda (figure II-7), le passant au tamis 0.08mm de ces fines est supérieur à 70% avec une densité absolue de 2.74 g/cm<sup>3</sup>.



Figure II-7: Fines calcaire

Les caractéristiques chimiques sont présentées dans le tableau II-9.

Désignations	Résultats en%
CaCO <sub>3</sub>	84.60
SO <sub>3</sub>	Traces
SO <sub>4</sub>	Traces
Cl	0.21

### II.2.4. Fibres de paille de blé

Les fibres de paille de blé ont été obtenues dans les champs de l'agriculture lors de la récolte du blé, ils sont également considérés comme des déchets végétaux. Ils sont récupérés et coupés de 3.5 cm de long sous forme tubulaire avec un diamètre d'environ 1- 4mm (figure II-8), puis traités thermiquement avec de l'eau bouillante à une température plus de 70 C° pendant une heure pour extraire les hémicelluloses à l'intérieur (Pimienta *et al.* 1994), et laissez sécher pendant 28 jours. Ces fibres ont une masse volumique absolue égale à 506 kg/m<sup>3</sup>.



Figure II-8: Fibres de paille de blé

### II.2.5. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est de type « POLY FLOW SR 5400-SOLU EST », conforme à la norme EN 934-2. C'est un super plastifiant SP haut réducteur d'eau pour les bétons, est présenté sous la forme d'un liquide marron clair. Ces caractéristiques sont données par le tableau II-10.

Désignation	Couleur	Densité g/cm <sup>3</sup>	Ph	Teneur en ions Cl	Teneur en Na <sub>2</sub> O	Extrait
Résultats	Marron	1.07(±) 0.02	5(±) 1	≤ 0.1	≤ 2.5	30(±) 1

### II.2.6. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet a été utilisé dans la composition des bétons étudiés, sa température est de 28C°. L'analyse chimique est représentée dans le tableau II-11, les résultats montrent qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme NF P18-404.

Cl mg/l	PH	T°	Salinité	TDS mg/l	Conductivité us/cm	Observation
0,1	7,3	28	0,2	297	541	Turbidité : 1,44 ntu Eau de bonne qualité chimique

### II.3. Conclusion

Nous avons présentés dans ce chapitre les matériaux utilisés dans l'étude des propriétés de béton de sable à base des fibres végétales tels que le sable de dune, le sable de déchets de marbre et le sable de déchets de céramique. Sans oublier le reste des matériaux, qui sont les fibres de paille, les fines calcaires, l'adjuvant et l'eau de gâchage, et nous avons donné les principaux résultats des essais de caractérisation de ces matériaux.

D'après les résultats obtenus nous avons tirés les observations suivantes:

- La plus forte densité est donnée par le sable de déchets de marbre tandis que le sable de déchets de céramique donne la plus faible densité.

- L'équivalent de sable montre que les trois types de sable sont propres et admissibles pour les bétons de qualité, en particulier pour le sable de dune qui est très propre avec une valeur de 86.30%.
- Les trois types de sable utilisés se caractérisent par une distribution granulométrique continue.
- La teneur en fines des sables de déchets de céramique et de déchets de marbre est élevée 17% et 15% respectivement en comparaison avec le sable de dune, ce qui nécessite un dosage en eau peu élevé.
- Le sable de déchet de marbre se caractérise par la plus faible module de finesse, ce qui indique un sable fin, une augmentation de l'ouvrabilité au détriment probable de la résistance.
- Le sable de déchets de céramique présente un module de finesse proche à la valeur optimale, il permet de donner une bonne ouvrabilité et une bonne résistance.
- Le sable de déchets de marbre est plus fin que le sable ordinaire et le sable de déchets de céramique.
- La valeur élevée de l'absorption du sable de dune et sable de déchets de marbre indique une demande en eau élevée, ce qui peut affecter la durabilité du béton d'une manière négative dans un milieu agressif et peut provoquer une perte de la fluidité du béton à l'état frais.
- Le sable de déchets de marbre et le sable ordinaire absorbent plus d'eau que le sable de déchets de céramique.
- Le sable de dune et le sable de déchets de céramique contiennent un pourcentage élevé de silice ( $\text{SiO}_2$ ) de 94.09% et 76.86% respectivement, ce qui peut ralentir le durcissement, et permet d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme et améliore la durabilité du béton.
- De plus de la silice, le sable de déchets de céramique contient de l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (21.90%), qui contribue à la prise du béton, par contre il influe négativement sur la stabilité chimique et favorise l'attaque par les sulfates.
- Le sable de déchets de marbre se compose principalement de  $\text{CaCO}_3$  avec un pourcentage de 98.67%, cet élément est responsable à l'amélioration de la cohésion de la matrice cimentaire et entraîne une augmentation des résistances mécaniques au jeune âge.

## **Chapitre III : Programme expérimental et méthodologie d'essai**

### III. Programme expérimental et méthodologie d'essai

#### III.1. Introduction

Dans cette partie on présente :

Le programme expérimental utilisé dans l'étude de la valorisation des déchets dans un béton de sable à base des fibres végétales (paille de blé), en introduisant les sables de déchets de marbre et le sable de déchets de céramique, les paramètres et les essais pour chaque compagne d'essai, les formulations, les méthodes de fabrications des mélanges et les méthodes d'essais; du fait que plusieurs études ont montres l'effet de l'introduction de ces déchets comme remplacement de sable ordinaire sur les propriétés du béton de sable à base de fibres végétales, on fait varier le taux de substitution des déchets recyclés (10 et 20% de sable de déchets de marbre, 10 et 20% de sable de déchets de céramique, 10 et 20% de mélange en parties égales entre le sable de déchets de marbre et le sable de déchets de céramique), on étudie le comportement du béton de sable fibré à l'état frais, ses propriétés physiques et mécaniques à l'état durci, ainsi que sa durabilité.

Le programme expérimental et la méthode de formulation des bétons de sable allégés, les essais réalisés sur le béton frais et durci, ainsi que sa durabilité, les méthodes de fabrication des mélanges et les différentes compositions des mélanges obtenus et les méthodes d'essais sont présentés dans ce chapitre.

Le programme expérimental est divisé en trois séries, dans la première série on fait varier le taux de substitution de sable de déchets de marbre (10 et 20%), dans la deuxième série, on fait varier le taux de substitution de sable de déchets de céramique (10 et 20%) et dans la troisième série, on fait varier les deux sables de déchets ensemble de partie égale (sable de déchets de marbre et céramique) avec les même taux de substitution (10 et 20%) et avec les paramètres fixes sont le dosage en ciment, le rapport E/C, le dosage en fines calcaire, dosage en fibres de paille, dosage en adjuvant et on observe le comportement des bétons à l'état frais et durci.

Notre étude était basée sur les études de :

**Belhadj *et al.* (2016)** qui ont étudié l'introduction de paille d'orge dans une matrice cimentaire de béton de sable en différentes quantités entre 5, 10 et 15 Kg/m<sup>3</sup>, et sa contribution à l'allègement du béton ainsi qu'à l'amélioration de ses propriétés thermique, mécaniques et physique. L'étude a commencé par la recherche de la composition optimale constituée uniquement de sable ordinaire (sable de dune et sable alluvionnaire), ce dernier est remplacé par une quantité de paille de blé, afin d'obtenir un Eco-béton de sable et ensuite étudier ses propriétés.

**Bederina *et al.* (2012)**, ceux qui ont étudié la possibilité d'améliorer les propriétés du béton de sable allégé par des copeaux de bois, et cela en les traitants avec trois enduits minéraux différents (revêtement de surface en ciment, revêtement de surface à la chaux, revêtement ciment-chaux) et une imprégnation d'huile.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire national de l'Habitat et de la Construction LHC de Skikda ainsi qu'au laboratoire des Matériaux de Construction du département de Génie de Civil de l'Université du 20 Août 1955 de Skikda.

## III.2. Programme expérimental et méthodes d'essais

### III.2.1. Programme expérimental

Dans le programme expérimental nous avons choisi comme béton de référence, un béton de sable à base de fibres de paille (BSP) en se basant sur les travaux de **Bederina *et al.* (2012)**, **Belhadj *et al.* (2016)**. Ensuite nous avons substitué le sable ordinaire par le sable de déchets de marbre et le sable de déchets de céramique (substitution volumique). Pour se faire, trois formulations ont été effectuées :

- Dans la première formulation (BSP-M) nous avons substitué un sable ordinaire SD par le sable de déchets de marbre SM avec des taux de substitution de 10 et 20%.
- Dans la deuxième formulation (BSP-C) nous avons remplacé partiellement le sable ordinaire SD par un sable de déchets de céramique SC avec des taux de substitution de 10 et 20%.
- Une troisième formulation mixte (BSP-MC) contenant un mélange égal de sable de déchets de marbre et sable de déchets de céramique MC remplace partiellement un sable ordinaire SD avec des taux de 10 et 20%.

Les différentes compositions des mélanges des bétons étudiés, les paramètres fixes et variables sont donnés dans le tableau III-1.

Formulations	Notation	Type de béton
<b>BSP</b>	BSP-0	Béton de sable à base des fibres de paille avec 100% de sable SD.
<b>BSP-M</b>	BSP-10M	Béton de sable à base des fibres de paille avec 90% de sable SD et 10% de sable SM.
	BSP-20M	Béton de sable à base des fibres de paille avec 80% de sable SD et 20% de sable SM.
<b>BSP-C</b>	BSP-10C	Béton de sable à base des fibres de paille avec 90% de sable SD et 10% de sable SC.
	BSP-20C	Béton de sable à base des fibres de paille avec 80% de sable SD et 20% de SC.
<b>BSP-MC</b>	BSP-10MC	Béton de sable à base des fibres de paille avec 90% de sable SD et 5% de sable SM et 5% de sable SC.
	BSP-20MC	Béton de sable à base des fibres de paille avec 80% de sable SD et 10% de sable SM et 10% de sable SC.
<b>Paramètres constants</b>	-E /C= 0,65; -Dosage en fines; -Dosage en fibre de paille; -Dosage en adjuvant	
<b>Paramètres variables</b>	Taux de substitution de sable de déchets de marbres et céramique	

### III.2.2. Formulation des mélanges

La formulation du mélange du béton témoin (BSP) a été obtenue par la méthode SABLOCRET (**Sablocrete 1994**) avec les paramètres fixes de cette étude sont, le dosage en fibres de paille, le dosage en adjuvant, le dosage en fines et le rapport E/C. Les compositions

des mélanges BSP-M, BSP-C et BSP-MC ont été obtenue en remplaçant le sable ordinaire par les sables recyclés. Les résultats de la formulation sont présentés sur le tableau III-2.

Formulations	SD (kg/m <sup>3</sup> )	CEM I (kg/m <sup>3</sup> )	E (l/m <sup>3</sup> )	F (kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)	Fibres (kg/m <sup>3</sup> )	SM (kg/m <sup>3</sup> )	SC (kg/m <sup>3</sup> )
<b>BSP-0</b>	1130.94	400	260	246.6	1	8	-	-
<b>BSP-10M</b>	1017.58	400	260	246.6	1	8	120.51	-
<b>BSP-20M</b>	904.76	400	260	246.6	1	8	241.03	-
<b>BSP-10C</b>	1017.58	400	260	246.6	1	8	-	106.09
<b>BSP-20C</b>	904.76	400	260	246.6	1	8	-	212.21
<b>BSP-10MC</b>	1017.58	400	260	246.6	1	8	60.25	54.79
<b>BSP-20MC</b>	904.76	400	260	246.6	1	8	120.51	106.09

#### • Essais effectués

Les essais effectués sur les différentes formulations sont:

- Ouvrabilité, mesuré par l'affaissement au cône d'Abrams conformément à la norme **NF P 18-451**.
- Densité a l'état frais selon la norme **NF EN 12350-6**.
- Teneur en air occlus mesuré par un aéromètre à béton conformément à la norme **NF EN 12350-7**.
- Résistance en traction par flexion à l'âge 2,7, 14, 28 et 90jours mesuré sur éprouvettes prismatiques de dimension 7x7x28cm conservées dans l'eau conformément à la norme **NF EN 12390-5**.
- Résistance en compression à l'âge 2, 7, 14, 28 et 90jours mesuré sur éprouvette cubique de 15x15x15cm conservée dans l'eau selon la norme **NF EN 12390-3**.
- L'essai au scléromètre a été effectué sur éprouvettes 20x20x20cm conservées dans l'eau à l'âge de 28 jours selon la norme **NF EN 12504-2**.
- L'essai aux ultrasons a été effectué en deux sens sur éprouvettes 20x20x20cm conservées dans l'eau à l'âge de 28 jours selon la norme **NF EN 12504-4**.
- Absorption par immersion mesurée sur des éprouvettes cubiques de dimension 15x15x15cm conformément à la norme **NBN B 15-215**.
- Absorption capillaire mesurée sur éprouvettes 7x7x28cm selon la norme **NF EN 480-5**.
- Pénétration de chlorure mesurée sur éprouvettes de dimensions 7x7x28cm conservées pendant 28 jours dans l'eau ensuite dans une solution contenant de 3% de chlore sodium (NaCl). Les échantillons ont été coupés et traités par une solution de nitrate d'argent sur la surface du béton coupé conformément à la norme **NT BUILD 492-1**.
- Attaque chimique par des acides et des bases effectuées sur des éprouvettes 4x4x16cm conservées pendant 28 jours dans l'eau ensuite dans la solution chimique. Ensuite, on mesure la perte en poids et la perte de résistance en fonction de l'âge de l'essai conformément à la norme **ASTM C- 267-96**.

### III.2.3. Fabrication des mélanges

#### -Malaxage

Afin d'assurer un mélange homogène et donc un béton de haute qualité, ce qui nous permet d'obtenir des résultats bons, fiables et facilitant ainsi d'étudier le comportement et les

caractéristiques de ce béton, la méthode de la confection des différents bétons étudiés se fait selon plusieurs étapes, à savoir:

Au départ, nous mélangeons le ciment, les fines de calcaire et le sable utilisé (selon le mélange requis), à l'état sec pendant trois minutes complètes. Lorsque le mélange devient clairement homogène, les fibres de paille de blé sont ajoutées au mélange sec tout en continuant à mélanger pendant trois minutes. A la fin, nous introduisons progressivement de la quantité d'eau et l'adjuvant sans arrêter le processus de mélange pendant une période de trois minutes jusqu'à obtenir une pâte de béton homogène. Cette méthode est inspirée sur des études antérieures menées par **Bederina *et al.* (2012)**, **Belhadj *et al.* (2016)**.

Le processus de mélange est effectué dans une bétonnière de type B132, le volume de sa cuve est de 134 litres et sa vitesse de rotation est de 24 tr/min (figure III-1).



Figure III-1: Malaxeur de béton

#### - Moules

Après le malaxage, le mélange est introduit dans des moules normalisés en acier permettant de réaliser les éprouvettes des essais programmés:

- Moule prismatique triple pour prismes de béton (70 x 70 x 280) mm<sup>3</sup>, pour l'essai de traction par flexion, l'essai d'absorption par capillarité ainsi que pour l'essai de pénétration des chlorures.
- Moule cubique (150 x 150 x 150) mm<sup>3</sup> pour l'essai de résistance à la compression et l'absorption d'eau par immersion.
- Moule cubique (200 x 200 x 200) mm<sup>3</sup> pour l'essai ultrason et l'essai au scléromètre.
- Moule prismatique triple pour prismes (40 x 40 x 160) mm<sup>3</sup>, pour la perte en masse et perte de résistance.

#### - Remplissage des moules et vibration

Le processus de remplissage des moules en béton se fait en deux couches, et nous appliquons sur chaque couche 25 coups, afin d'assurer l'homogénéité du mélange et éliminer les bulls d'air dans le béton, l'arasement se fait par une règle métallique (figure III-2).



Figure III-2: Remplissage des moules

### -Conservation des éprouvettes

Après le remplissage, les éprouvettes sont conservées dans un local à une humidité suffisante et une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées (figures III-3) et conservées selon les conditions de chaque essai.



Figure III-3: Eprouvettes après démoulage

- Les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à une durée correspondante aux âges des essais (2, 7, 14, 28 et 90 jours) pour les essais de traction par flexion et de compression.
- Les éprouvettes destinées à l'essai d'absorption par capillarité sont conservées 28 jours à l'air libre à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .
- Les éprouvettes destinées à l'essai d'absorption par immersion, sont conservées 14 jours dans une salle humide à  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  et humidité relative de 90%, ensuite 28 jours à l'air libre à  $20^{\circ}\text{C}$  et humidité relative de  $60 \pm 2\%$ .
- Les éprouvettes destinées à l'essai aux ultrasons et au scléromètre sont conservées dans l'eau à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , jusqu'à 28 jours.
- Après 28 jours d'immersion dans l'eau, les éprouvettes destinées à l'attaque chimique par les acides et les bases sont soumises à quatre (04) modes de conservation dans les différentes solutions citées ci-dessous:
  - 3% d'acide chlorhydrique (HCL),
  - 3% d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ),

- 3% d'acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ),
- 3% de chlore sodium ( $\text{NaCl}$ )
- Après 28 jours de conservation dans l'eau, les éprouvettes destinées à l'essai pénétration des chlorures, sont immergées dans une solution de  $\text{NaCl}$  concentrée à 3% durant toute la période de traitement.

### III.2.4. Méthodes d'essais

#### III.2.4.1. Affaissement au cône d'Abrams

L'ouvrabilité du béton est testée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (figure III-4) conformément à la norme **NF P 18-451**, cet essai est le plus employé pour déterminer cette caractéristique. Le moule conique doit être placé sur la plaque d'appui après avoir été huilé légèrement, puis on le remplit en trois couches de même hauteur, et on applique à chaque couche 25 coups à l'aide de la tige de piquage. Une fois le moule complètement rempli, nous arasons son bord supérieur et soulevons soigneusement. La mesure se fait sur le point le plus haut du béton et la valeur obtenue est exprimée en cm, d'après ce résultat on peut classer la consistance du béton étudié.



Figure III-4: Affaissement au cône d'Abrams

#### III.2.4.2. Air occlus

La mesure de la teneur en air occlus est effectuée à l'aide d'un aéromètre à béton de huit litres (figure III-5), conformément à la norme **NF EN 12350-7**. L'appareil de mesure de cet essai se compose de deux parties, supérieure et inférieure, où le béton est placé à l'intérieur de la partie inférieure de la même manière qu'il est placé dans le moule. Après le remplissage du béton, la partie supérieure est soigneusement placée et fixée, puis on applique une pression à l'aide de la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille de l'appareil indique 0%. A ce moment, on ouvre la valve qui sépare les deux parties de l'appareil de mesure, le béton est bien comprimé, le manomètre intégré dans l'aéromètre s'affiche directement le pourcentage de l'air occlus du béton.



Figure III-5: Aéromètre à béton

### III.2.4.3. Densité

Pour calculer la densité du béton à l'état frais (figure III-6), on utilise des moules de volume connue (moule  $V = 3 \times (4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ ), si les poids du moule pleine et vide sont successivement  $P$  et  $P_0$ , la densité du mélange frais est tel que:

$$\rho = (P - P_0) / V \quad (V = \text{Volume du moule}).$$

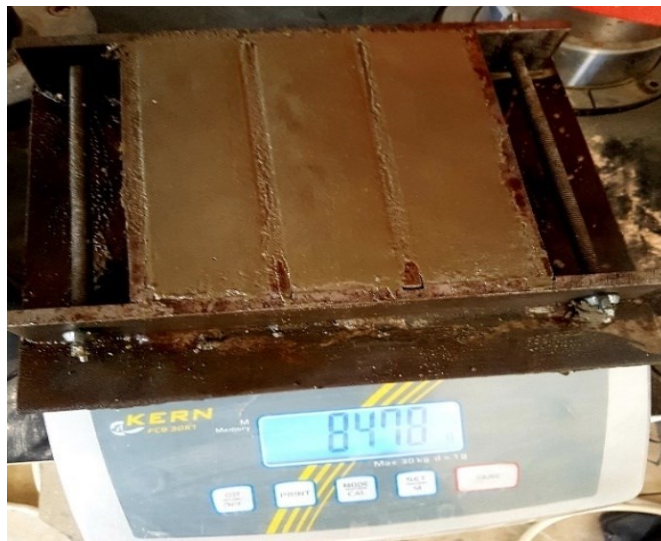


Figure III-6: Mesure de la densité

### III.2.4.4. Essai de compression

Les mesures de la résistance à la compression du béton à l'état durci sont effectuées sur des éprouvettes cubiques  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ , consiste à rompre leurs corps entre les deux plateaux d'une presse de compression de 2000 KN conformément à la norme NF P18-406 (figure III-7). Après un bon centrage de l'éprouvette, on applique un effort de compression  $F$  sur la section transversale  $S$  jusqu'à le moment de la rupture, la machine s'arrête on obtient l'effort maximal  $F_{\text{max}}$  qui nous permet de calculer la contrainte à la rupture.

$$\sigma_{\text{rup}} = \frac{F_{\text{max}}}{S} \quad \text{en Mpa}$$

Cet essai a été mené sur trois échantillons, selon la composition étudiée afin d'obtenir la moyenne de trois données de mesure.



Figure III-7: Essai de compression

#### III.2.4.5. Essai de traction par flexion

La résistance à la traction par flexion (figure III-8) est déterminée sur des éprouvettes prismatiques  $7 \times 7 \times 28$  cm, consiste à réaliser à l'aide d'une machine de flexion à 3 points de 100 KN de charge, afin de créer les forces de traction dans l'éprouvette conformément à la norme **12390-5**. Pour faire une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, ce dernier ont été bien placés au sein de l'appareil, on lance la mise en charge qui se fait augmenter automatiquement avec une vitesse constante jusqu'au moment de la rupture. Trois échantillons pour chaque composition, afin d'obtenir la moyenne de trois données de mesure.



Figure III-8: Essai de traction par flexion

On présente sur la figure III-9 un schéma représentatif de l'essai de traction par flexion selon **Afnor, 2001**.

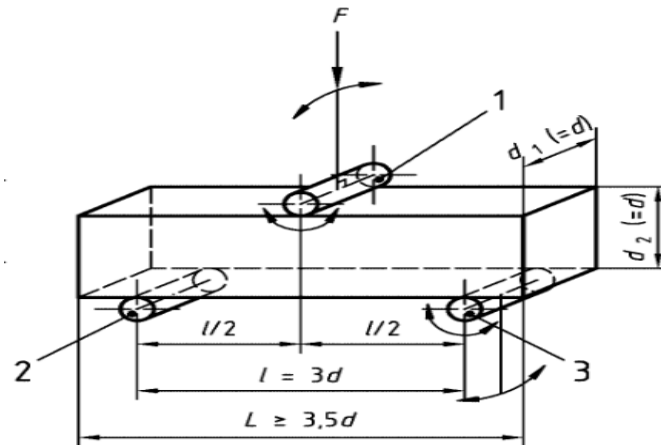


Figure III-9: Schéma de l'essai de traction par flexion trois points

La résistance à la traction par flexion est mesurée suivant la formule:

$$\sigma_{\text{flex}} = \frac{3}{2} \times \frac{F l}{d_1 d_2^2}$$

F en N et  $d_1$  et  $d_2$  en mm,  $\sigma_{\text{flex}}$  est donné en MPa.

#### III.2.4.6. Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre est une méthode non destructive, peut être réalisée à la position horizontale et verticale sur les quatre faces de l'éprouvette, il est effectué selon la norme **NF EN 12504-2** (figure III-10) et permettant de déterminer l'indice de rebondissement de la surface du béton durci à l'aide d'un marteau en acier projeté par ressort, permet également d'estimer la résistance en compression à partir d'une courbe étalonnée.



Figure III-10: Essai au scléromètre

#### III.2.4.7. Essai aux ultrasons

Il s'agit d'un essai non destructif, où l'appareil électronique lance des ondes longitudinales et perpendiculaires dans deux sens à la surface du béton durci pour nous donner le temps de sa

transmission (figure III-11). Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques traversant et donc d'estimer la résistance du béton, conformément à la norme NF EN 12504-4.

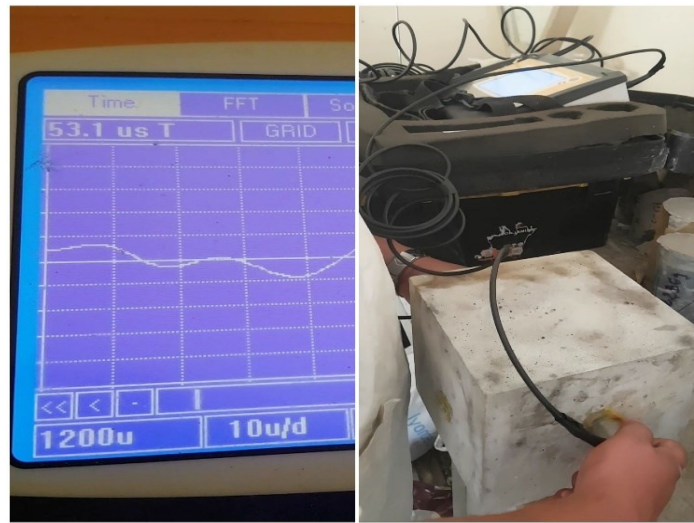


Figure III-11: Essai des ultrasons

#### III.2.4.8. Absorption d'eau par immersion

L'essai d'absorption d'eau par immersion consiste à mettre les éprouvettes cubiques (15x15x15) cm<sup>3</sup> du béton dans l'étuve à 105 °C (figure III-12) 72 heures jusqu'à une masse constante, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 48 heures c'est-à-dire jusqu'à saturation du matériau, puis les retirer et peser. Le coefficient d'absorption par immersion est calculé par la formule suivante:

$$A_{\text{bimm}} \% = \left( \frac{M_h - M_s}{M_s} \right) \times 100$$

**M<sub>h</sub>** est la masse de l'éprouvette humide après l'immersion (kg);

**M<sub>s</sub>** est la masse de l'éprouvette sèche après le séchage dans l'étuve (kg);

**A<sub>bimm</sub>** est le coefficient d'absorption par immersion (%).



Figure III-12: Essai d'absorption par immersion.

Deux échantillons pour chaque composition, afin d'obtenir la moyenne.

### III.2.4.9. Absorption d'eau par capillarité

L'absorption d'eau par capillarité du béton à l'état durci est effectuée sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28cm. Les échantillons séchés dans l'étuve pendant 72heurs jusqu'à une masse constante, en enveloppant les parois latérale des éprouvettes par un papier film ensuite ils sont immergés dans une nappe d'eau de hauteur 5 mm durant 24 heures (figure III-13). Les mesures de la variation de masse et la hauteur de pénétration d'eau sont prises aux intervalles suivants: 15, 30, 60, 120, 240, 360, 480, 720, 1080 et 1440 min. Le coefficient d'absorption est calculé par la relation suivante:

$$Ab_{cap} = \frac{M_0 - M_i}{A}$$

$M_0$  est la masse de l'éprouvette initial avant l'immersion dans la nappe d'eau (kg);

$M_i$  est la masse de l'éprouvette après l'immersion dans la nappe d'eau à l'échéance donnée (kg);

$A$  est la section en (m<sup>2</sup>).

$Ab_{cap}$  est le coefficient d'absorption par capillarité.



Figure III-13: Essai d'absorption par capillarité.

Deux échantillons pour chaque composition, afin d'obtenir la moyenne.

### III.2.4.10. Essai d'attaque chimique par les acides et les bases

Afin d'étudier l'effet de l'introduction de sable de déchets de marbre et de céramique sur la durabilité d'un béton de sable à base des fibres végétales, on a évalué les caractéristiques des différents compositions vis-à-vis des milieux agressifs (les acides et les bases). Pour cela on a confectionné des éprouvettes prismatiques de dimension 4x4x16cm. 24 heures après le coulage, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans l'eau à une température de 20°C avec une humidité de 95% pendant 28 jours (figure III-14).

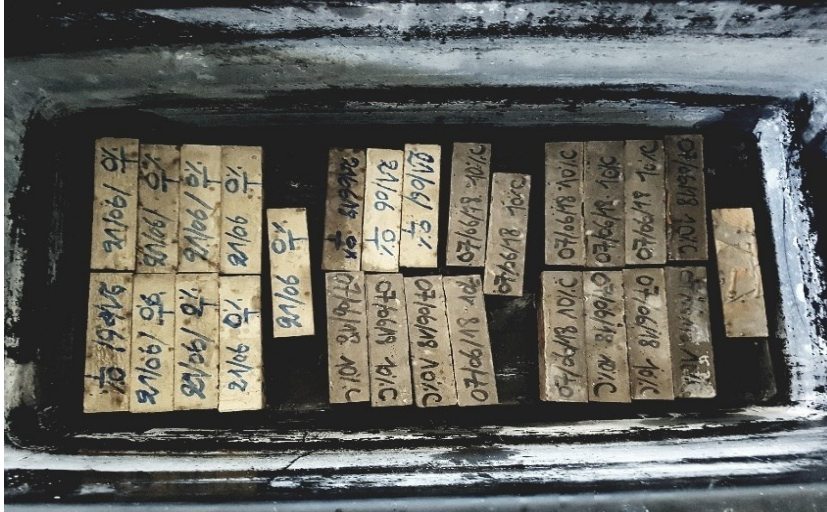


Figure III-14: Conservation des éprouvettes dans l'eau

Après 28 jours de conservation dans l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse  $M_1$ , puis elles sont immergées dans les différentes solutions citées ci-dessous et renouvelées chaque 14 jour:

- 3% d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) acide fort (figure III-15),
- 3% d'acide chlorhydrique (HCL) acide fort (figure III-16),
- 3% d'acide acétique ( $CH_3COOH$ ) acide faible (figure III-17),
- 3% de chlore sodium NaCL



Figure III-15: Conservation des éprouvettes dans une solution de 3%  $H_2SO_4$

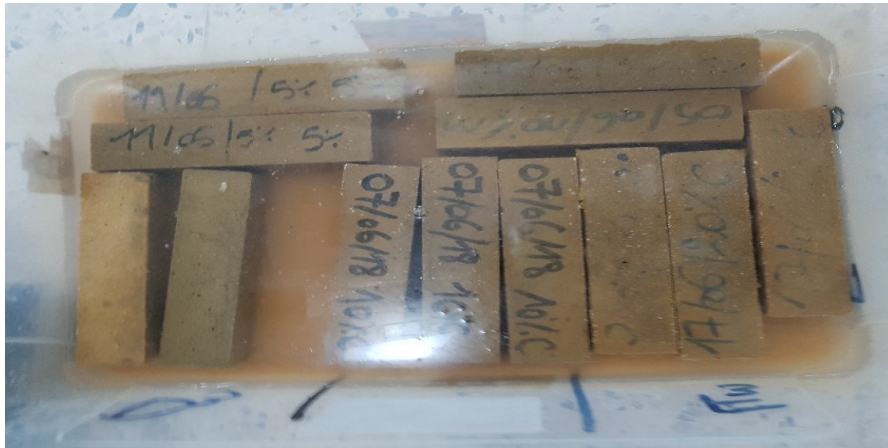


Figure III-16: Conservation des éprouvettes dans une solution de 3% HCl



Figure III-17: Conservation des éprouvettes dans une solution de 3% CH<sub>3</sub>COOH

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions, est évaluée par leur perte de masse selon la norme ASTM C 267-96, les éprouvettes sont nettoyées avec l'eau puis laissées sécher à la température ambiante pendant 20 minutes. Ensuite, on procède à la pesée de ces dernières d'où la masse  $M_2$ . Les mesures sont effectuées après 2, 7, 14, 28, 56, 90 et 120 jours après l'immersion.

La résistance chimique est évaluée par la mesure de la variation de masse de l'éprouvette:

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

**M1** : masse de l'éprouvette avant l'immersion

**M2** : masse de l'éprouvette après l'immersion.

Finalement on réalise des essais de compression et de traction par flexion sur les éprouvettes soumis à l'attaque chimique (figure III-18).

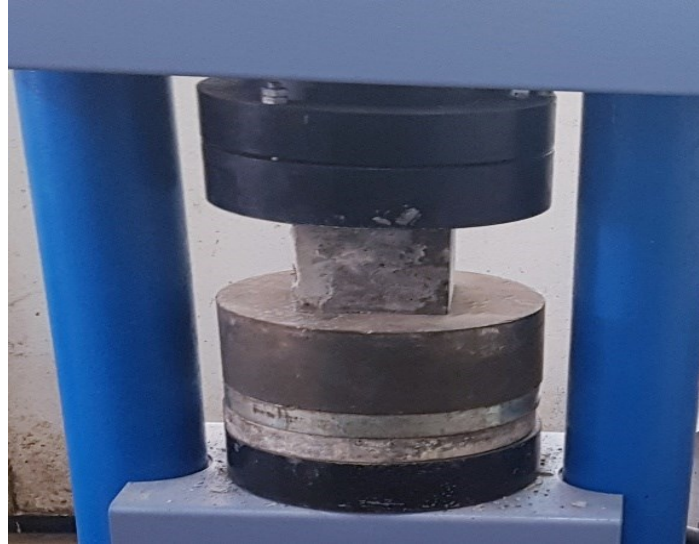


Figure III-18: Essai sur éprouvette soumise à l'attaque chimique

#### III.2.4.11. Essai pénétration des ions de chlorures

Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs et les conditions climatiques ou environnementales. Parmi les paramètres qui agissent sur la durabilité, il y a la pénétration de chlorures.

Pour les échantillons d'essais, on a utilisé des éprouvettes prismatiques 7x7x28cm. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans l'eau à 20°C jusqu'à 28 jours ensuite sont immergées dans une solution de 3% de NaCl, la solution est renouvelée chaque 28 jours.

Au moment de l'essai aux échéances 28, 56, 90 et 120 jours, l'éprouvette sera coupée en deux afin d'obtenir des mini-prismes 7x7x7cm (norme NT BUILD 492-1). La profondeur de pénétration de chlorure a été mesurée par une solution de nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$  selon le changement de la couleur sur le béton. La zone blanche indique la profondeur de pénétration de chlorure, par contre la zone brune indique qu'il n'y a aucune pénétration (figure III-19).



Figure III-19: Mesure de la profondeur de pénétration des chlorures

### III.3. Conclusion

Ce chapitre a successivement abordée les points suivant:

- Il présente le programme expérimental utilisé au cours de cette recherche,
- Il donne la formulation des différents mélanges de béton de sable à base des fibres végétales avec la valorisation des déchets de marbre et de céramique ainsi que le mode de fabrication, les moules utilisés et la conservation des éprouvettes.
- Il regroupe l'ensemble des essais réalisés sur les différentes compositions du béton étudiés ainsi que les méthodes d'essais qui se résument à:
  - Essai affaissement au cône d'Abrams;
  - Air occlus;
  - Densité;
  - Essai de compression;
  - Essai de traction par flexion;
  - Essai au scléromètre;
  - Essai aux ultrasons;
  - Essai d'absorption par immersion;
  - Essai d'absorption par capillarité;
  - Essai d'attaque chimique par les acides et les bases (perte de masse et résistance);
  - Essai pénétration les ions de chlorures.

Les résultats des essais effectués et les interprétations des résultats seront présentés dans les chapitres suivants.

**Chapitre IV : Influence du taux de substitution des sables recyclés sur les propriétés du béton de sable à base de fibres de paille de blé**

#### IV. Influence du taux de substitution des sables recyclés sur les propriétés du béton de sable à base de fibres de paille de blé

##### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous analysons l'ensemble des résultats sur les échantillons de béton de sable à base de fibres de paille de blé à l'état frais (ouvrabilité, densité et air occlus) et les performances mécaniques à l'état durci (résistance en compression et en traction par flexion) ainsi que l'absorption d'eau par immersion et capillarité.

##### IV.2. Influence du taux de substitution des sables recyclés sur les propriétés du béton de sable à base de fibres de paille de blé

###### IV.2.1. A l'état frais

###### IV.2.1.1. Ouvrabilité

D'une manière générale l'introduction des sables recyclés entraîne une amélioration de l'ouvrabilité quel que soit le taux de substitution (figure IV-1). L'introduction du SM entraîne une augmentation de l'ouvrabilité par rapport au béton de référence quel que soit le taux de substitution, cette augmentation est due que le SM facilite la dispersion entre les grains en conséquence d'effet de remplissage des vides du béton (Noha 2013). Ces résultats sont en cohérence avec ceux trouvés par Baboo *et al.* (2011) et contrairement avec ceux obtenus par Hebhouh *et al.* (2014).

L'introduction de sable de déchets de céramique entraîne une amélioration de l'ouvrabilité quel que soit le taux de substitution avec une valeur maximale à 20% de taux de substitution ceci est expliqué d'une part par le module de finesse qui est proche à l'optimal et à l'effet de remplissage et la plus faible absorption du SC d'autre part. Ces résultats sont compatibles avec ceux trouvés par López *et al.* (2007) et contrairement avec ceux obtenus par Alves *et al.* (2014).

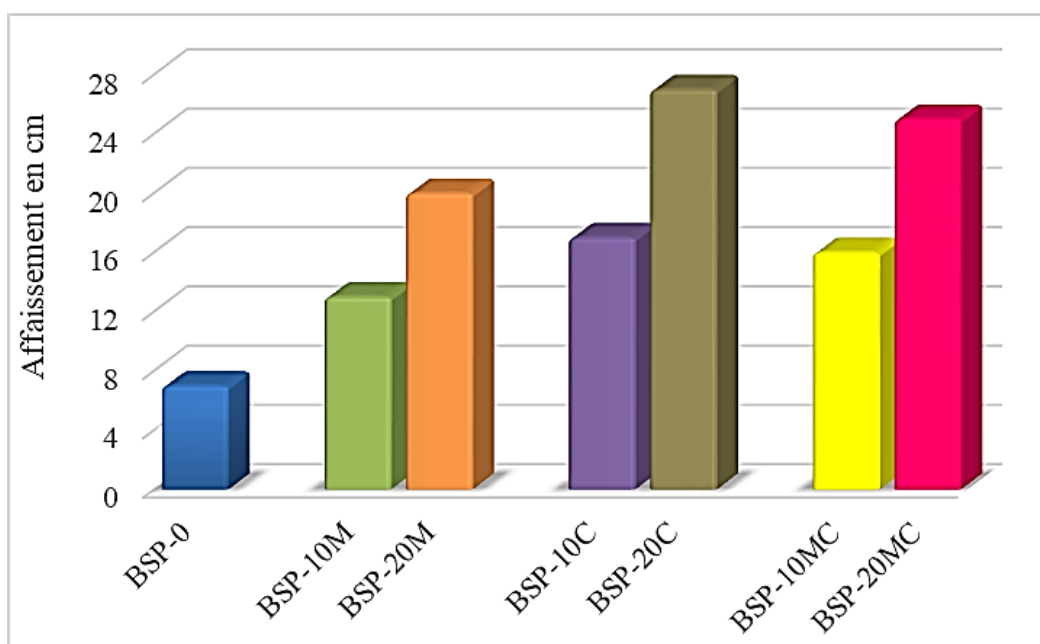


Figure IV-1: Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution.

Tableau IV-1: Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution.

Formulations	BSP-0	BSP 10M	BSP 20M	BSP 10C	BSP 20C	BSP 10MC	BSP 20MC
Ouvrabilité (cm)	7	13	20	17	27	16	25

#### IV.2.1.2. Densité

L'introduction de SM comme remplacement partiel de SD a augmenté la densité du béton de référence jusqu'à une valeur maximale de 2.40 g/cm<sup>3</sup> pour le béton de 20% de taux de substitution, on peut expliquer cette augmentation par la densité élevée du SM en comparaison avec celle du SD (Djebien *et al.* 2015). Pour la formulation BSP-C, l'augmentation du taux de substitution de SC entraîne une diminution de la densité jusqu'à 2.32g/cm<sup>3</sup> (figure IV-2) obtenue pour un taux de 20% ceci peut être expliqué par la plus faible densité du SC, ces résultats sont en cohérence avec ceux trouvés par Vieira *et al.* (2015).

L'introduction du sable MC dans la formulation mixte BSP-MC engendre une augmentation de la densité pour un taux de 20%, le mélange des deux sables donne un équilibre entre les densités de ces derniers.

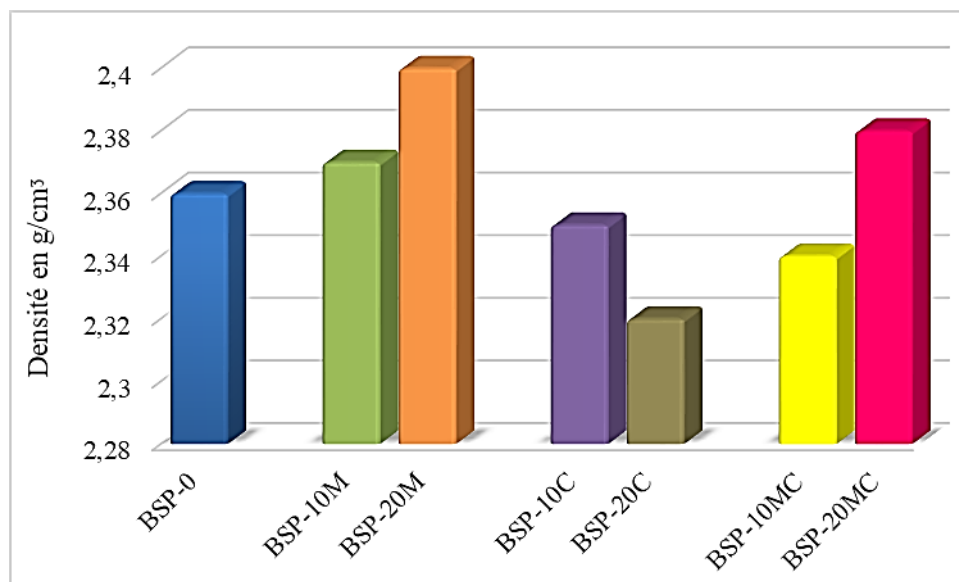


Figure IV-2: Variation de la densité en fonction du taux de substitution.

Tableau IV-2: Variation de la densité en fonction du taux de substitution.

Formulations	BSP-0	BSP 10M	BSP 20M	BSP 10C	BSP 20C	BSP 10MC	BSP 20MC
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	2,36	2,37	2,40	2,35	2,32	2,34	2,38

#### IV.2.1.3. Air occlus

L'introduction des sables recyclés (figure IV-3) entraîne une diminution de la teneur en air occlus quel que soit le taux de substitution sauf pour la formulation BSP-20M où on remarque une légère augmentation, ce dernier est contrairement à ce qui a été trouvé par Alyousef *et al.* (2018). La diminution de la teneur en air occlus pour la formulation BSP-10M est dû à l'amélioration de la capacité de la résistance à la ségrégation par le sable de déchets de marbre

(Corinaldesi *et al.* 2010 ; Djebien *et al.* 2015, 2018). Cependant, la diminution de la teneur en air occlus en fonction de l'augmentation du taux de sable de SC peut être expliquée par la teneur en fine plus élevée qui contribue à réduire la porosité du béton, aussi le faible mouvement des molécules d'eau par capillarité peut réduire la formation des pores d'air dans le béton (Siddique *et al.* 2019).

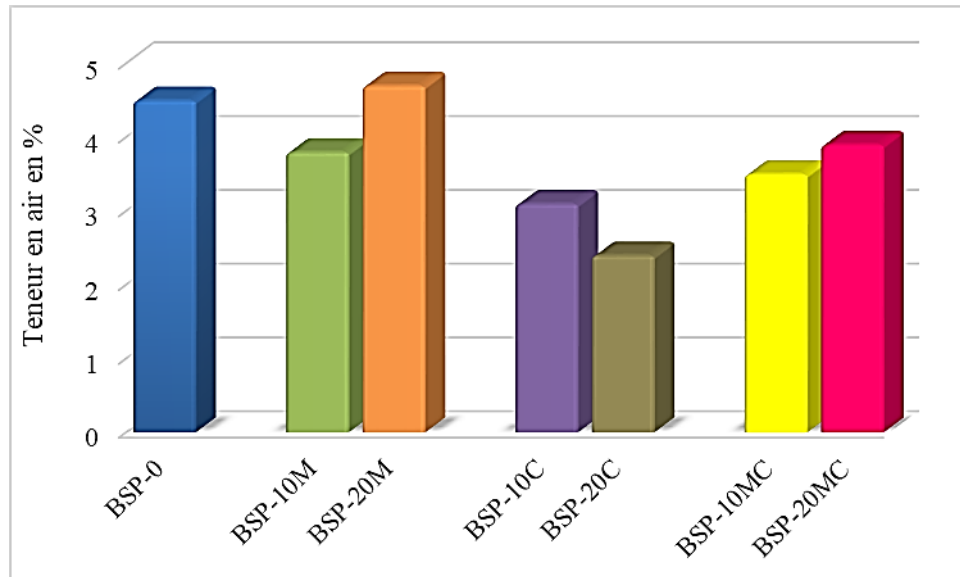


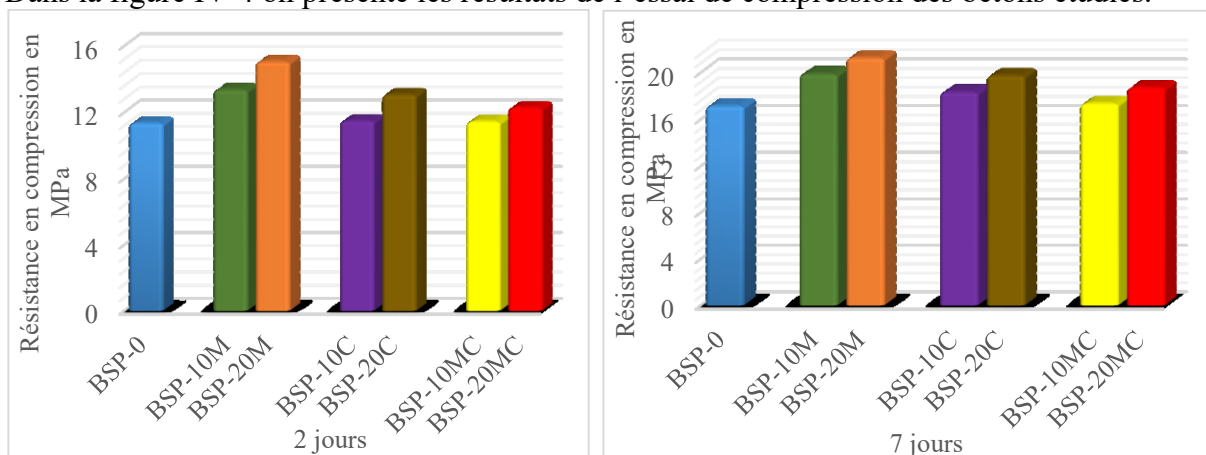
Figure IV-3: Variation de la teneur en air en fonction du taux de substitution.

Formulations	BSP-0	BSP 10M	BSP 20M	BSP 10C	BSP 20C	BSP 10MC	BSP 20MC
Air occlus (%)	4,5	3,8	4,7	3,1	2,4	3,5	3,9

## IV.2.2. A l'état durci

### IV.2.2.1. Résistance en compression

Dans la figure IV-4 on présente les résultats de l'essai de compression des bétons étudiés.



(a)

(b)

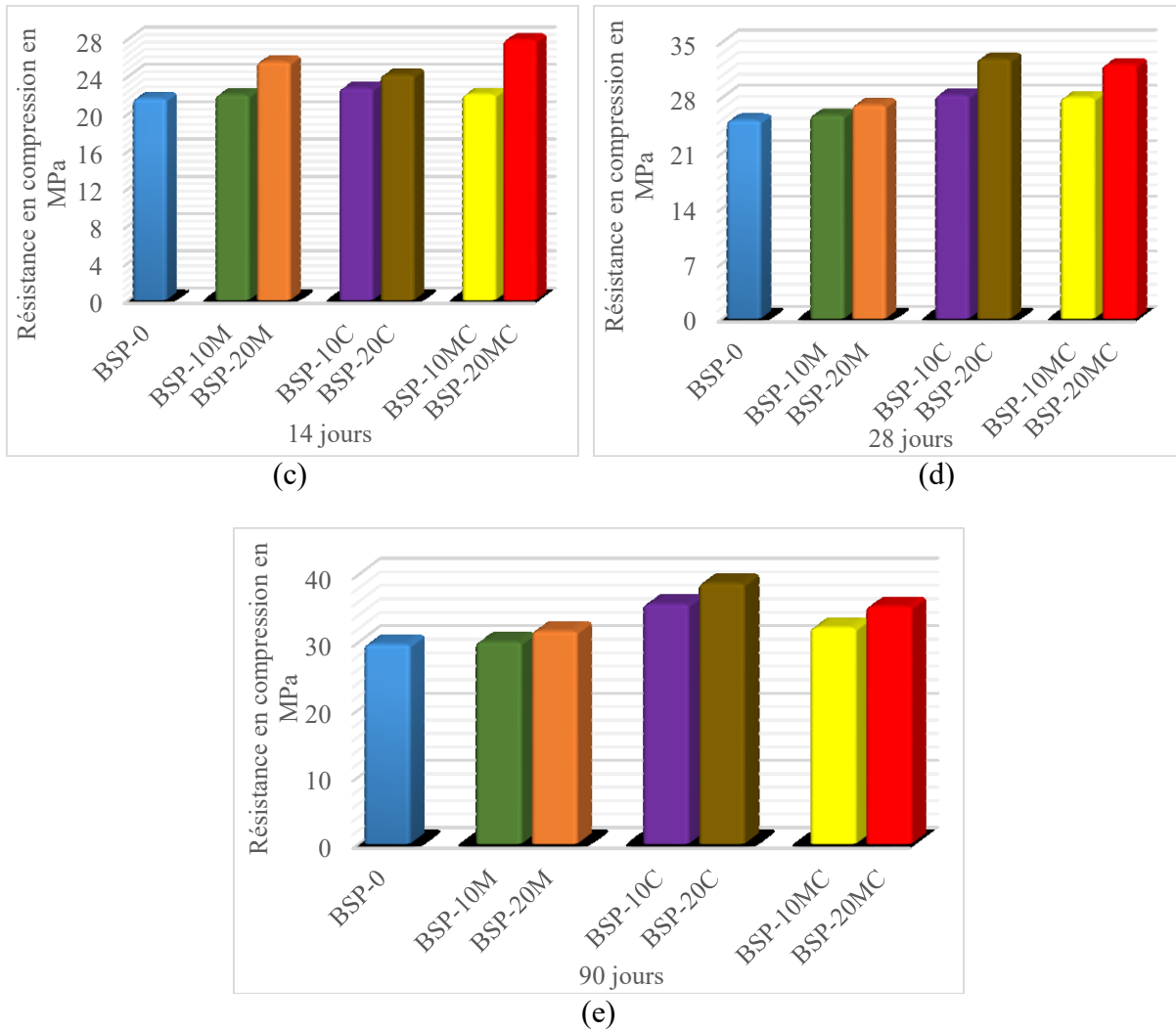
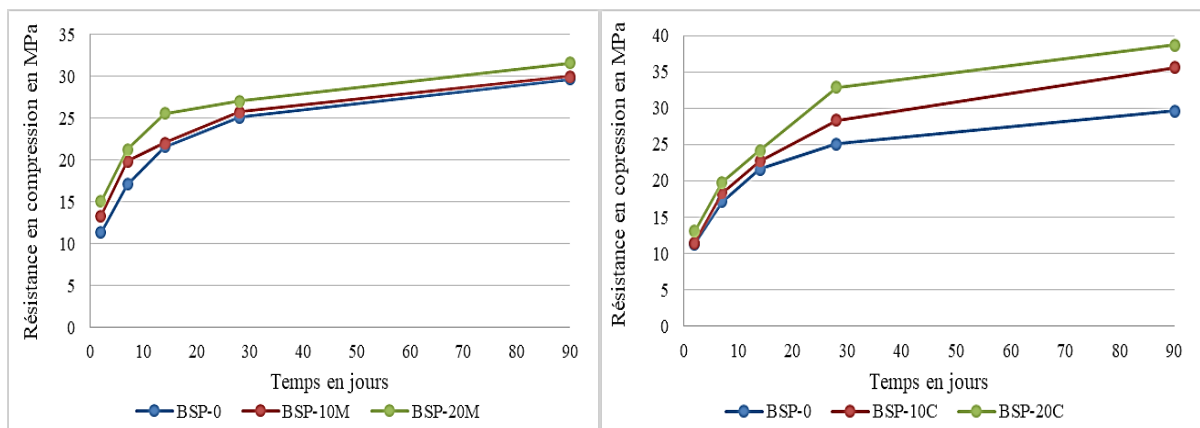


Figure IV-4: Résistance en compression des bétons étudiés

On présente les résultats des essais de compression sur les bétons étudiés dans la figure IV-5.



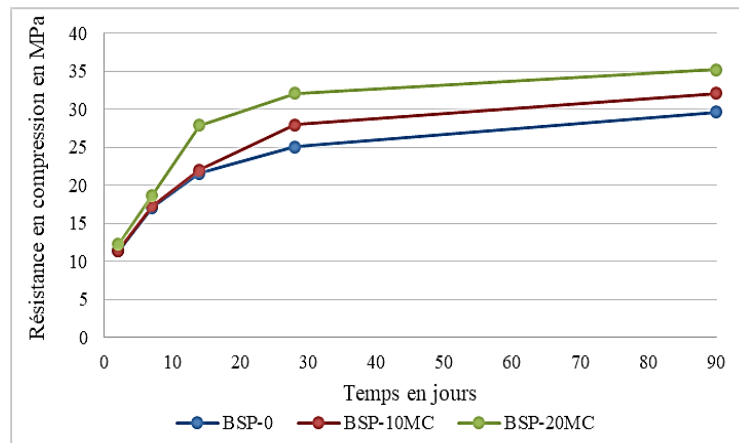


Figure IV-5: Résistance en compression des bétons étudiés en fonction du temps.

L'augmentation du taux de substitution des sables recyclés (figure IV-4 (a) et (b)) conduit à augmenter les résistances initiales à 2 et 7 jours en comparaison avec le béton de référence.

Les plus fortes performances à 2 et 7 jours sont données par les formulations BSP-M celles-ci sont dues à la composition chimique du SM qui contient beaucoup de  $\text{CaCO}_3$  le responsable sur l'augmentation des résistances initiales (**Djebien et al. 2018, Hebhouh et al. 2014, Maisarah et al. 2015**) d'une part, et à l'effet de remplissages des vides de SM (**Ulubeyli et Artir 2016**).

A moyen terme 14 jours (figure IV-4 (c)), le comportement n'est pas le même qu'à court terme où l'on constate une légère augmentation de la résistance en compression et les meilleures performances sont données par la formulation mixte avec un taux de 20%.

Les meilleures performances en compression à 28 jours (figure IV-4 (d)) sont données par les formulations BSP-C en fonction de l'augmentation du taux de substitution; la valeur maximale est enregistrée dans le BSP de 20% de taux de SC, ceci est expliqué par la composition chimique du SC qui contient une très grande quantité de  $\text{SiO}_2$  qui influe positivement sur les résistances mécaniques à cet âge (**Dreux et Feasta 1996, Hebhouh et Belachia 2011, Hebhouh et al. 2014**).

A long terme 90 jours (figure IV-4 (e)), le comportement est le même qu'à 28 jours et les meilleures performances sont toujours données par les formulations BSP-C, ceci est dû à la quantité très élevée du  $\text{SiO}_2$  qui est responsable sur l'augmentation des résistances à long terme, ces résultats sont en cohérence avec ceux obtenus par **Farinha et al. (2015)**.

L'impact du sable des déchets sur l'augmentation de la résistance à la compression du béton en fonction du temps est clair pour la substitution de SC par rapport au sable mixte MC et de SM (figure IV-5).

#### IV.2.2.2. Résistance à la traction par flexion

La résistance en traction par flexion des bétons sont illustrés sur les figures IV- 6 et IV-7

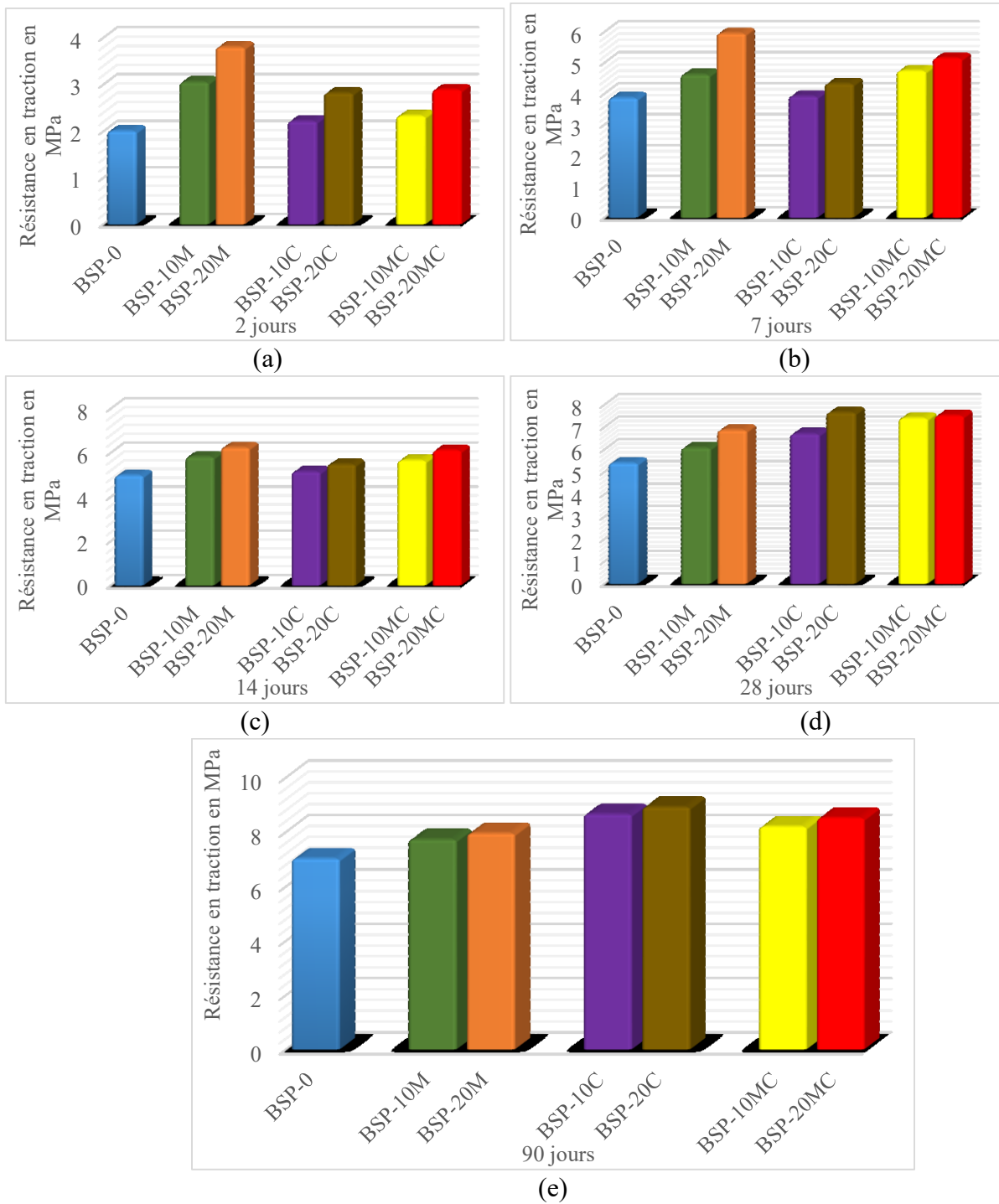


Figure IV-6: Résistance à la traction des bétons étudiés.

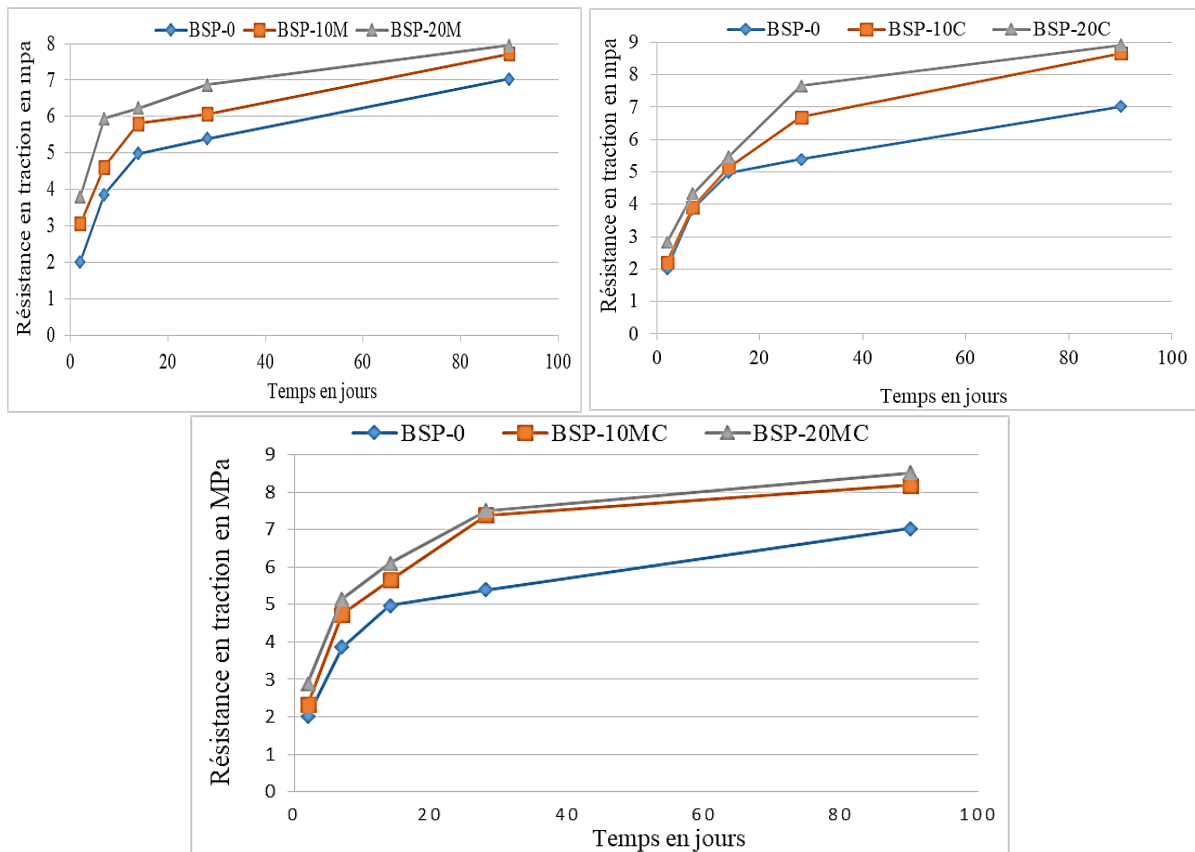


Figure IV-7: Résistance à la traction des bétons étudiés en fonction du temps.

D'une manière générale le comportement en traction par flexion est le même qu'en compression, l'augmentation du taux de substitution engendre une augmentation de ces résistances dans tous les âges.

A 2, 7 et 14 jours, les meilleures performances en traction sont données par les BSP-M (figure IV-6 (a), (b), (c), ceci est expliqué par la présence du  $\text{CaCO}_3$  dans le SM qui augmente la cohésion (Dreux et feasta 1996, Hebhouh et Belachia 2011) d'une part et qui accélère les résistances initial d'autre part (Maisarah *et al.* 2015). Les plus faibles performances aux mêmes âges sont données par les BSP-C.

A 28 et 90 jours, on constate une augmentation des résistances mécaniques en traction dans les BSP-C et BSP-MC ceci est dû à la réaction pouzzolanique du SC qui augmente les résistances à long terme, ces résultats sont en cohérence avec ceux obtenus par Farinha *et al.* (2015), Silva *et al.* (2009).

En ce qui concerne l'augmentation de la résistance à la traction du béton en fonction du temps (figure IV-7), l'effet du SM est évident aux premiers jours et l'inverse pour le SC, dont l'effet est plus clair avec le temps. Tandis que le sable MC nous donne une solution consensuelle pour augmenter la résistance quel que soit le temps.

On peut dire que le remplacement partiel du sable ordinaire par les sables de déchet de marbre, de céramique ou les deux ensembles, améliore les résistances en traction par flexion du béton de sable allégé par les fibres de paille.

### IV.2.2.3. Résistance en compression obtenue par l'essai scléromètre

La résistance en compression donnée par le scléromètre pour la formulation BSP-M, BSP-C, BSP-MC est présente dans les figures IV-8, IV-9 et IV-10.

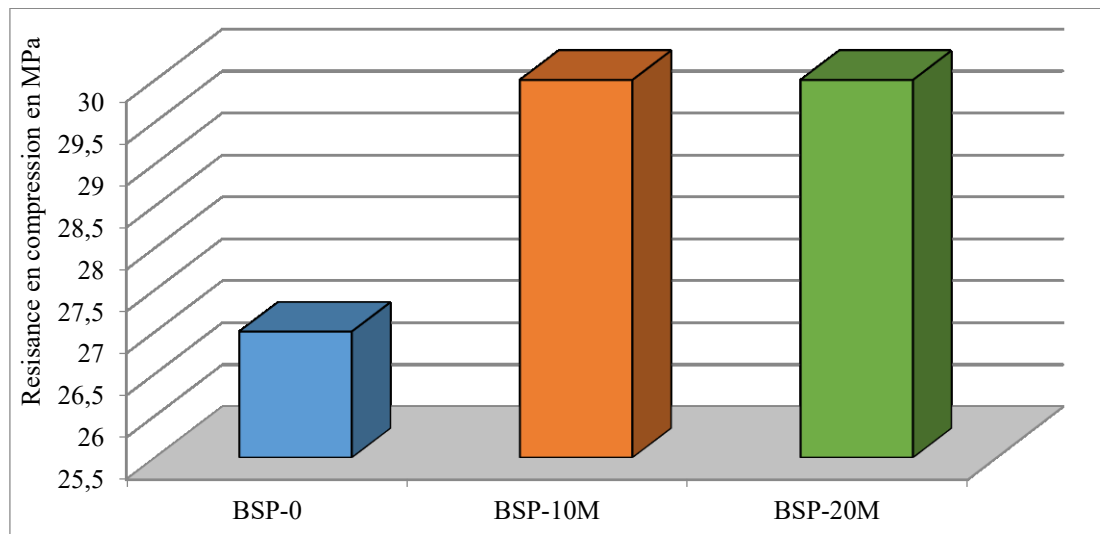


Figure IV- 8: Résistance en compression obtenue par l'essai au scléromètre (formulation BSP-M)

L'introduction de sable de déchet de marbre dans le BSP (figure IV-8) conduit à augmenter la résistance à la surface d'où la résistance en compression du BSP témoin pour atteindre des valeurs de 30MPa dans les bétons BSP-10M et BSP-20M ceci est expliqué par la présence du CaO dans les déchets de marbre qui donne un bon collage matrice granulats (**Hebhoub et Belachia 2011, Hebhoub et al., 2014**).

La figure IV-9 montre que l'ajout de sable de déchets de céramique influe positivement sur la dureté à la surface. La résistance en compression augmente en fonction de l'augmentation du taux de substitution du SC pour atteindre une valeur maximale de 33MPa dans le béton BSP-20C, le sable de déchets de céramique contient beaucoup de silice qui donne des résistances élevées à moyen et long terme (**Farinha et al. 2015**).

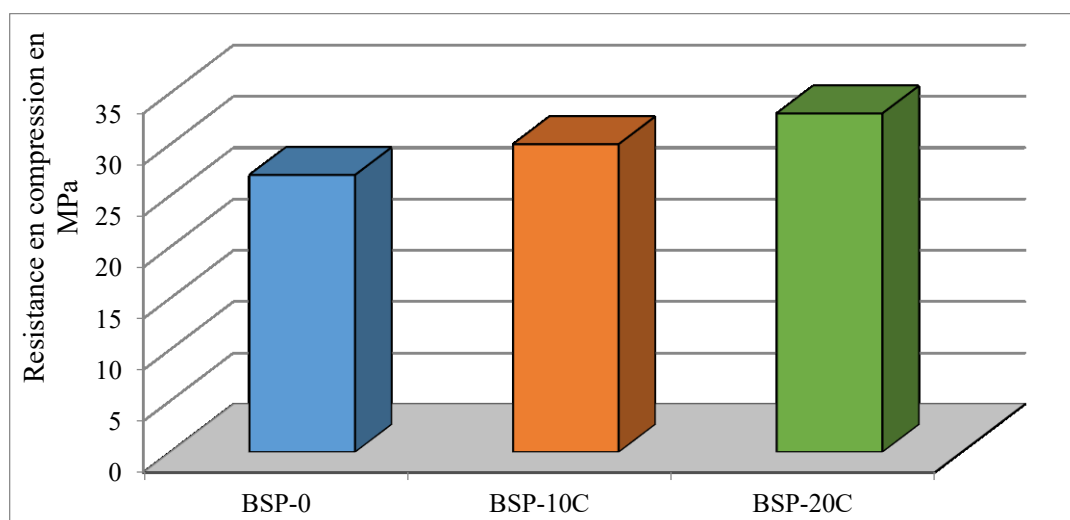


Figure IV-9: Résistance en compression obtenue par l'essai au scléromètre (formulation BSP-C)

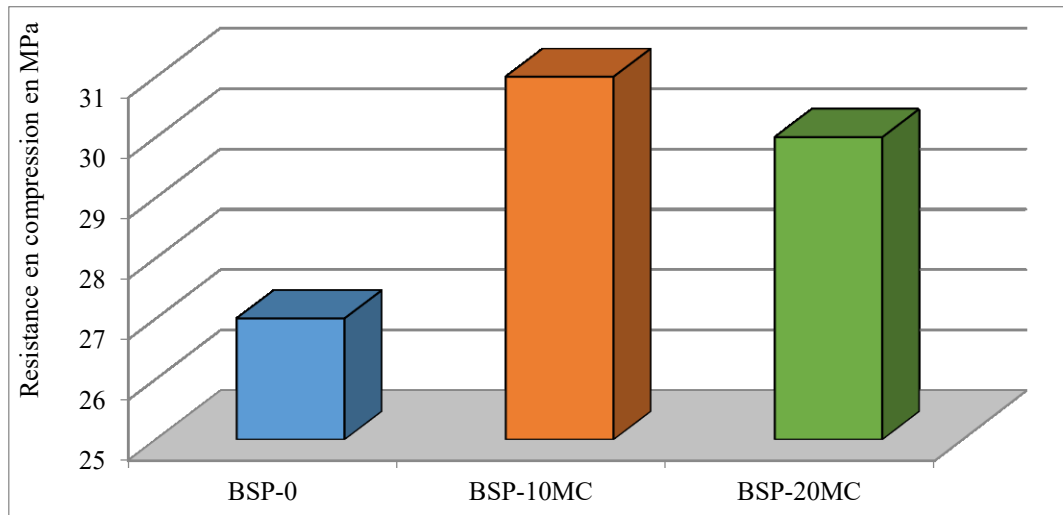


Figure IV-10: Résistance en compression obtenue par l'essai au scléromètre (formulation BSP-MC)

Formulations	BSP-0	BSP 10M	BSP 20M	BSP 10C	BSP 20C	BSP 10MC	BSP 20MC
Résistance par scléromètre (MPa)	27	30	30	30	33	31	30

Pour la formulation BSP-MC (figure IV-10), l'ajout des sables recyclés par un taux de 10% donne la résistance maximale obtenue par scléromètre, on peut l'expliquer par l'augmentation de la quantité de la chaux présent dans le SM et la silice présent dans le SC. La meilleure résistance en comparaison donnée par l'essai scléromètre est obtenue par le BSP-20C, on compare avec les autres formulations.

#### IV.2.2.4. Résistance en compression obtenue par l'essai ultrasonique

On présente sur la figure IV-11, IV-12 et IV-13 les résistances en compression donnée par les essais ultrasoniques des formulations BSP-M, BSP-C et BSP-MC.

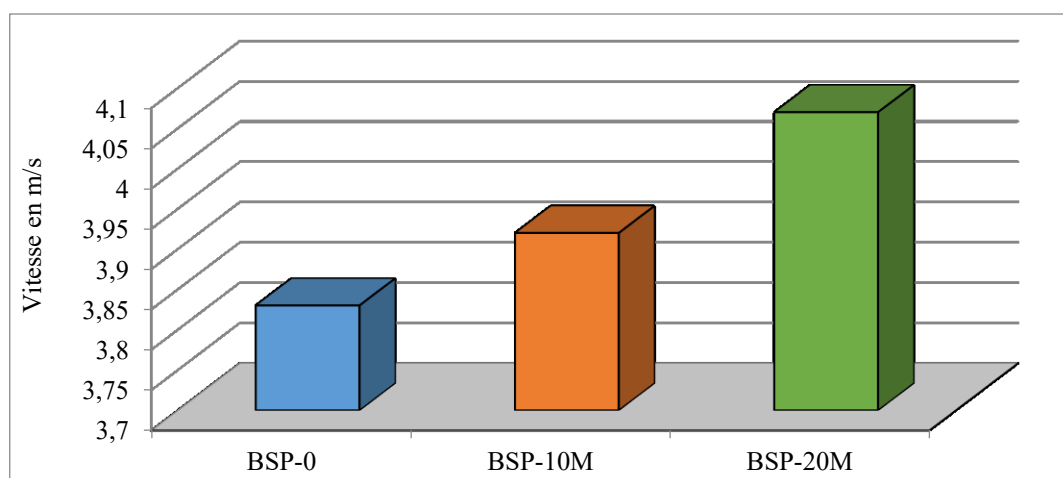


Figure IV-11: Résistance en compression obtenue par l'essai aux ultrasons (formulation BSP-M)

La vitesse de la propagation du son est plus élevée proportionnellement avec à l'augmentation du taux de sable SM (figure IV-11). Le passage rapide du son dans cette formulation est justifié par la légère augmentation de la densité des mélanges à base de sable SM (**Bougamsa et al. 2020**).

Les mêmes constatations pour la formulation BSP-C (figure IV-12), la vitesse maximale de la propagation du son est donnée par le béton BSP-20C.

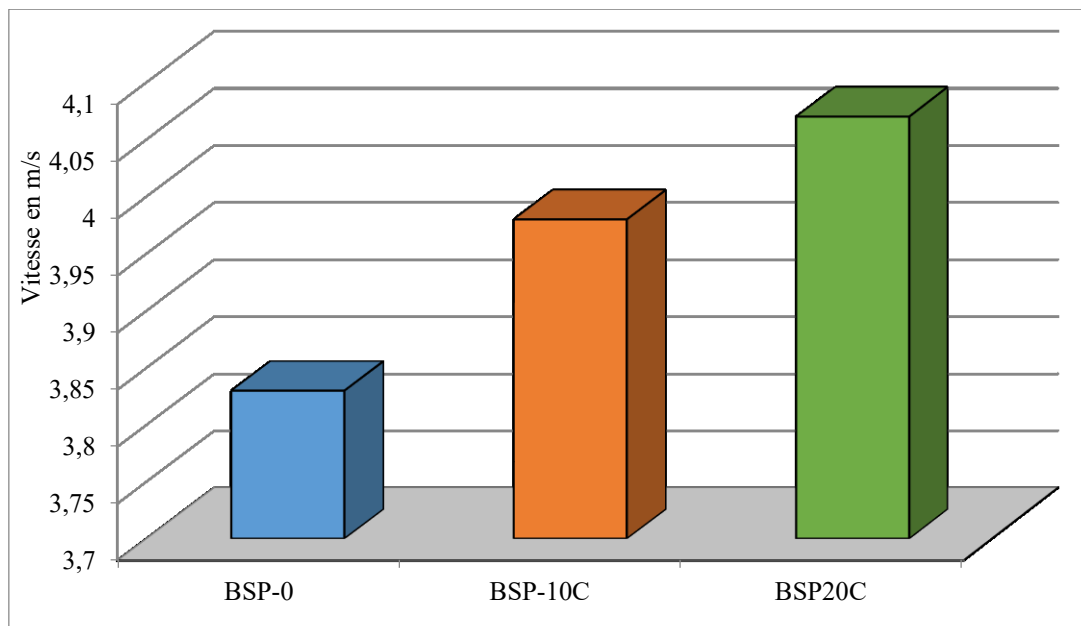


Figure IV-12: Résistance en compression obtenue par l'essai aux ultrasons (formulation BSP-C)

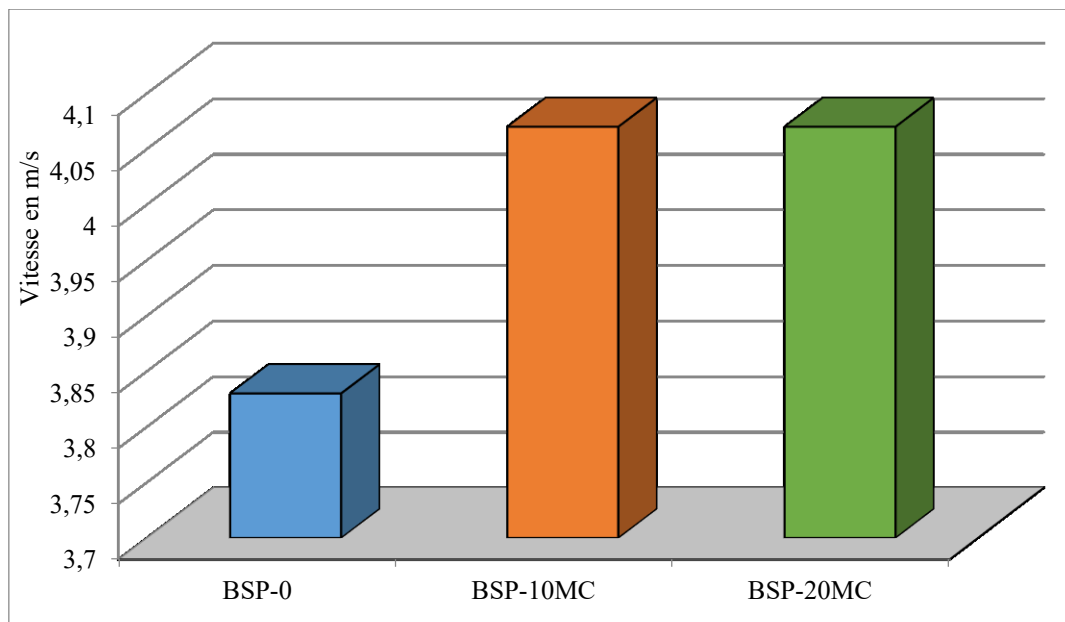


Figure IV-13: Vitesse de son obtenue par l'essai aux ultrasons (formulation BSP-MC)

Formulations	BSP-0	BSP 10M	BSP 20M	BSP 10C	BSP 20C	BSP 10MC	BSP 20MC
Vitesse de son (m/s)	3,83	3,92	4,07	3,98	4,07	4,07	4,07

Une légère augmentation de la vitesse du son obtenue par le béton BSP-10MC (figure VI-13) en comparaison avec la formulation BSP-M et BSP-C.

#### IV.2.2.5. Résistance en compression obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason

Sur la figure IV-14, IV-15 et IV-16 on présente les résultats de la résistance en compression obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason pour la formulation BSP-M, BSP-C et BSP-MC.

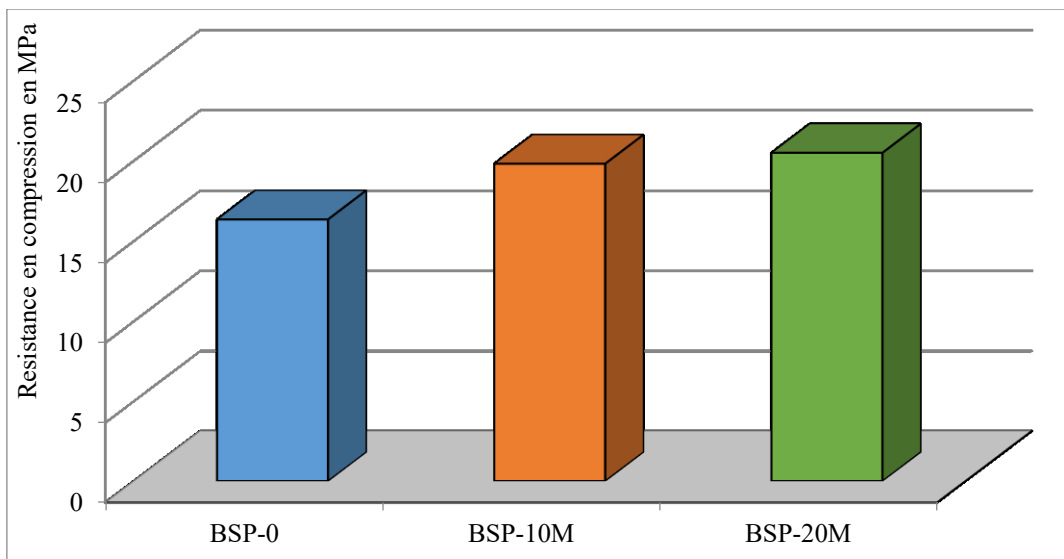


Figure IV-14: Résistance en compression obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason (formulation BSP-M)

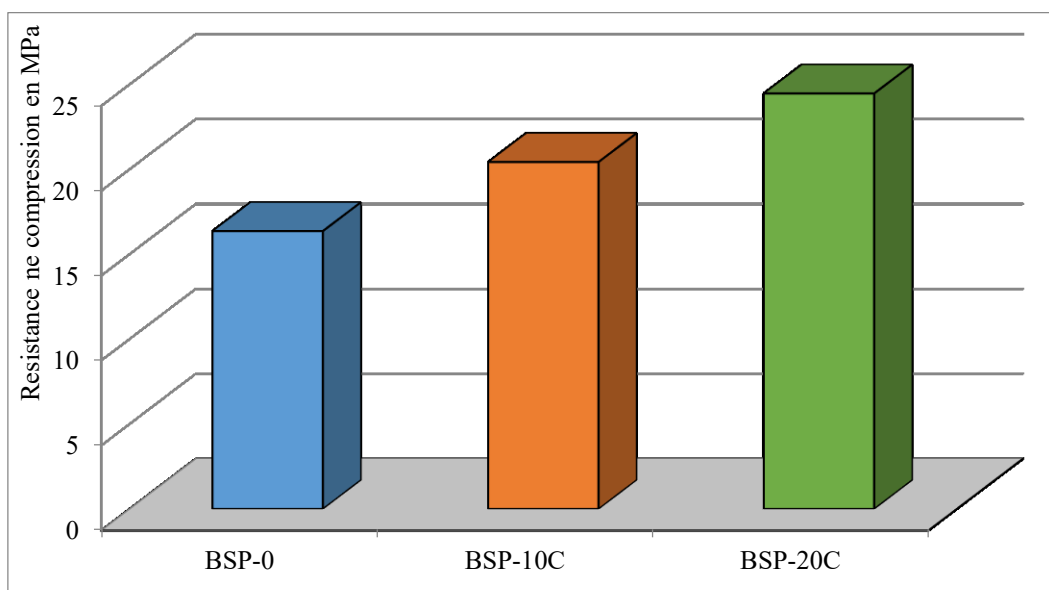


Figure IV-15: Résistance en compression obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason (formulation BSP-C)

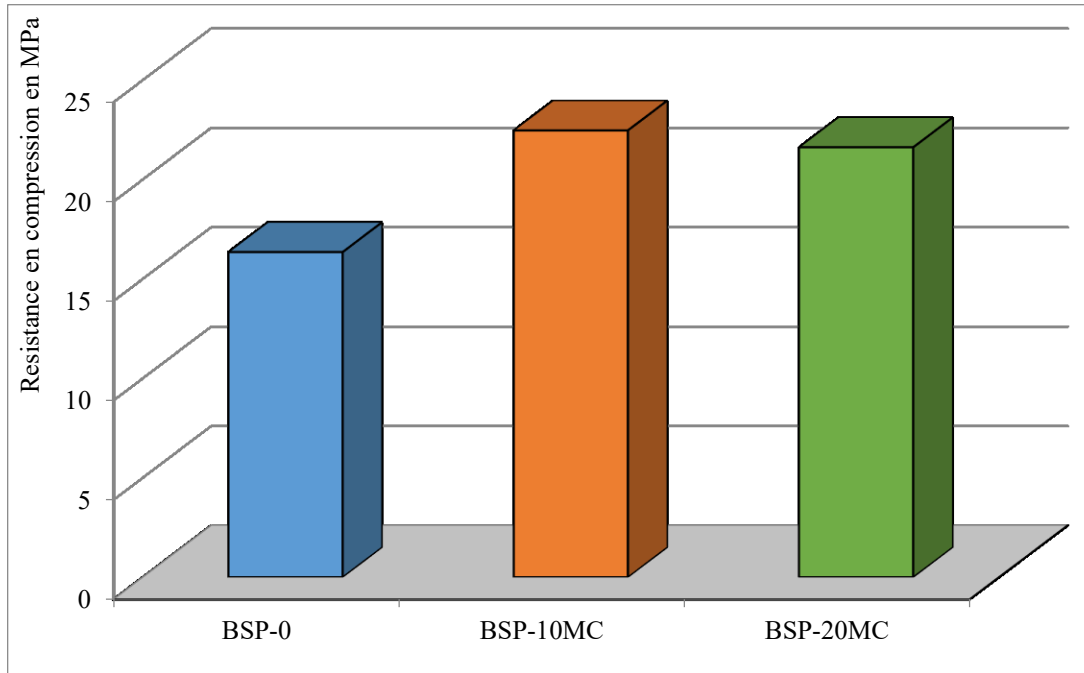


Figure IV-16: Résistance en compression obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason (formulation BSP-MC)

Formulations	BSP-0	BSP 10M	BSP 20M	BSP 10C	BSP 20C	BSP 10MC	BSP 20MC
Résistance (MPa)	16,35	19,82	20,50	20,42	24,46	22,47	21,62

D'une manière générale l'introduction des sables recyclés dans la formulation du béton témoin donne une amélioration de l'homogénéité dans les bétons.

La résistance maximale obtenue par la combinaison scléromètre/ultrasons est donné par le béton BSP-20C qui peut être expliqué par la quantité de silice élevée dans le SC qui augmente les résistances à 28jours (Farinha *et al.* 2015).

#### IV.2.2.6. Absorption d'eau par immersion du béton

La variation du coefficient d'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution des sables recyclés sont données par la figure IV-17.

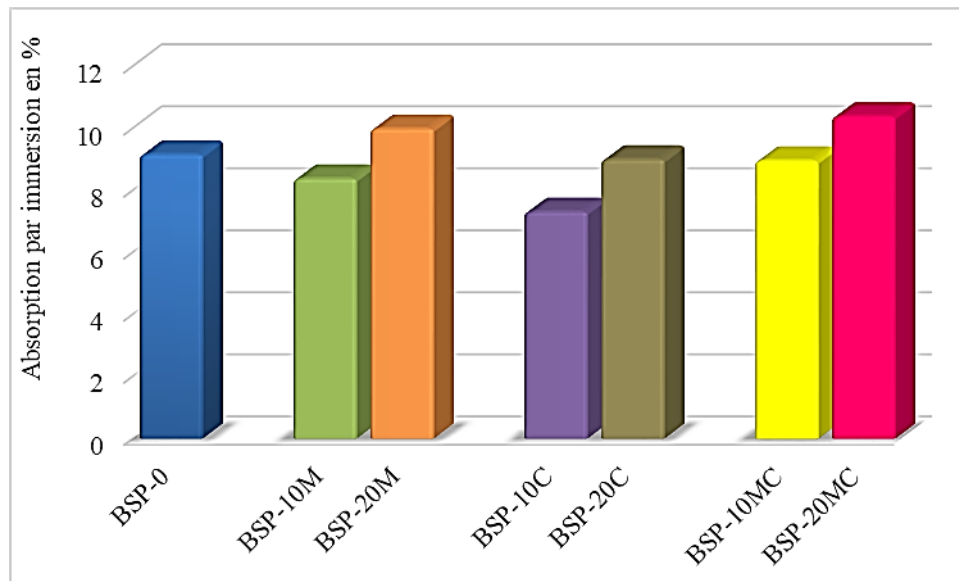


Figure IV-17: Variation du coefficient d'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution

Formulations	BSP-0	BSP 10M	BSP 20M	BSP 10C	BSP 20C	BSP 10MC	BSP 20MC
L'absorption par immersion (%)	9,17	8,39	10,00	7,32	9,01	8,97	10,40

L'absorption de l'eau par immersion est une propriété liée à la durabilité du béton, il permet d'estimer le volume des pores ouverts du béton par la pénétration de l'eau à travers la structure de ces pores.

Les résultats obtenus de l'essai d'absorption d'eau par immersion (figure IV-17) indiquent que la substitution du sable ordinaire par un taux de 10% de sable recyclés entraîne une diminution de l'absorption en comparaison avec le béton de référence. L'absorption la plus faible est enregistrée par la formulation BSP-10C, ceci est expliqué par l'effet de fillers et la réaction pouzzolanique du sable de déchets de céramique avec de l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ce qui conduit à un béton moins poreux et plus imperméable (Sampaio *et al.* 2017), sachant que le coefficient d'absorption du SC est plus faible que le SD et SM.

La substitution de sable de recyclés à 20% entraîne une augmentation légère de l'absorption d'eau en comparaison à celle du béton de référence pour les formulations BSP-20M et BSP-20MC, ceci est dû au coefficient d'absorption plus élevé de SM d'une part et que l'augmentation de la teneur en air occlus de BSP-20M est liée avec l'absorption par immersion d'autre part, ce qui influe sur la compacité du béton en raison de la rugosité des granulats de SM (Gameiro *et al.* 2014). Le béton à faible absorption est plus compacte, imperméable et peut conserver leurs propriétés à long terme (Sampaio *et al.* 2017).

#### IV.2.2.7. Absorption d'eau par capillarité du béton

Sur la figure IV-18 on présente les résultats de l'absorption d'eau par capillarité.

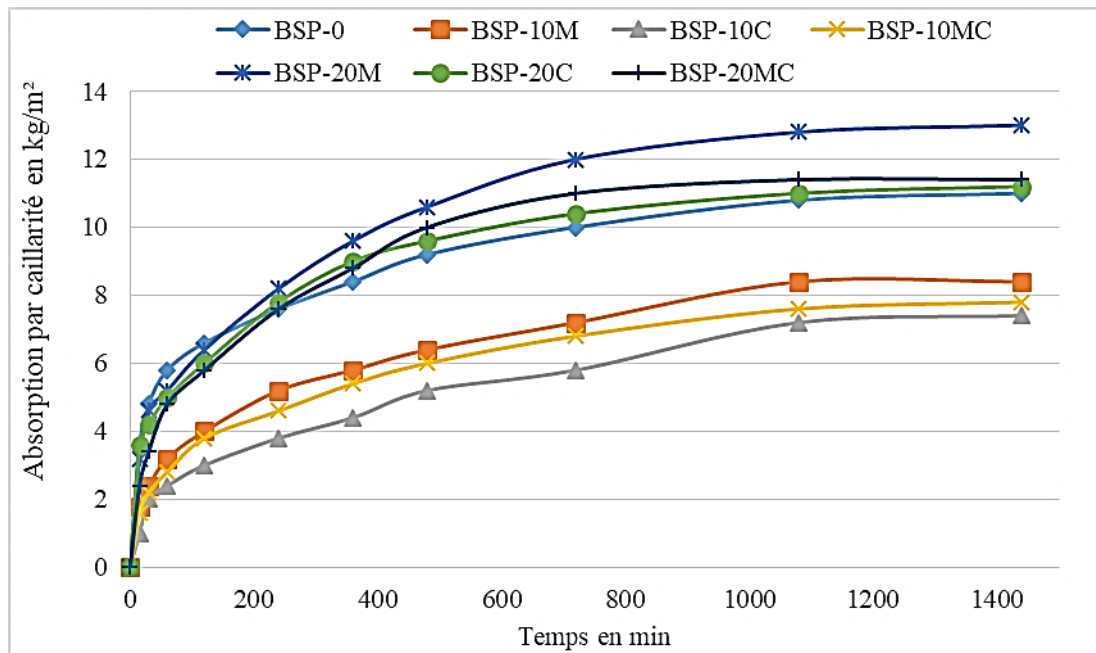


Figure IV-18: Absorption d'eau par capillarité en fonction du temps

Les résultats (figure IV-18) montrent que l'introduction du sable recyclé avec 10% de taux de substitution entraîne une diminution de l'absorption d'eau par capillarité en comparaison avec celle du béton de référence, avec une absorption minimale enregistrée dans le BSP-10C, ces résultats sont en cohérence avec ceux trouvés par **Farinha et al. (2015)**, ceci est dû que les grains du SC comblent bien les pores du béton qui fournissent des vaisseaux capillaires plus minces et un flux d'eau plus faible d'une part, d'autre part l'activité pouzzolanique probablement due à la réaction entre le  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ce qui produit des phases additionnelles de C-S-H (étrangéité) et de mono-sulfate et autres (**Farinha et al. 2015, Silva et al. 2009, Vieira et al. 2016**).

Le même comportement est constaté dans le BSP-10M, où le SM améliore la liaison entre la pâte de ciment et les granulats fins en raison de leur géométrie angulaire et allongée (**Gameiro et al. 2014**), ce qui est traduit par la réduction de la capacité de pénétration d'eau par capillarité, ces résultats sont confirmés par **Topçu et al. (2008)**. A 20% de substitution, l'augmentation du sable recyclés conduit à augmenter l'absorption d'eau pour toutes les formulations après 200 min de temps, jusqu'à une valeur maximale enregistrée dans le BSP-20M, ceci est dû que la taille moyenne des pores capillaires du béton deviennent plus grande (**Gameiro et al. 2014**), sachant que le coefficient d'absorption le plus élevé est donné par le SM.

### IV.3.Conclusion

D'après les résultats de cette étude, on peut tirer les points suivants:

- L'introduction des déchets comme sables entraîne une amélioration de l'ouvrabilité d'un BSP.
- L'utilisation des déchets comme sables dans un béton de sable allégé par les fibres de paille réduit la teneur en air occlus, excepté pour un taux de 20% de sable de déchets de marbre.
- La substitution de sable de déchets de marbre augmente les résistances initiales du béton en compression et en traction.

- Les meilleures performances en compression à moyen terme et en traction à long terme sont données par la formulation BSP-20MC.
- La formulation BSP-20C donne les meilleures résistances en compression et en traction par flexion à long terme.
- L'introduction de sable de déchet de marbre dans le BSP conduit à augmenter la résistance à la surface.
- L'ajout de sable de déchets de céramique influe positivement sur la dureté à la surface.
- La meilleure résistance en compression donnée par l'essai scléromètre est obtenue par le BSP-20C, on compare avec les autres formulations.
- La vitesse de la propagation du son est rapide proportionnellement avec l'augmentation du taux de sable SM.
- Les meilleures performances en compression obtenue par l'ultrason sont données par les formulations contenant des sables recyclés.
- L'introduction des sables recyclés donne une amélioration de l'homogénéité dans les bétons.
- La vitesse maximale de la propagation du son est donnée par le béton BSP-20C.
- La résistance maximale obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason est donnée par le béton BSP-20C.
- L'introduction des sables recyclés avec un taux de 10% entraîne une diminution de l'absorption d'eau par capillarité avec un meilleur comportement observé sur le béton de céramique. Plus le taux est élevé, plus l'absorption est importante. La même tendance a été marquée sur l'absorption d'eau par immersion pour un taux de 10%, tandis que l'effet s'inverse pour un taux de 20% du sable de déchet de marbre et le sable de déchet mixte.

**Chapitre V : Comportement dans les milieux agressifs de  
béton de sable à base de paille de blé contenant des sables  
recyclés**

## Chapitre V. Comportement de béton de sable à base de paille de blé contenant des sables recyclés dans les milieux agressifs

### V.1. Introduction

On présente dans ce chapitre les résultats de la perte de masse et des résistances dans les milieux agressifs ainsi que les résultats de la pénétration des ions de chlorure.

On analyse l'ensemble des résultats en fonction de la période d'immersion et on étudie l'effet du taux de substitution des sables recyclés sur ces propriétés.

### V.2. Pertes de masse dans les milieux agressifs

Les pertes de masses des différentes formulations sont mesurées dans plusieurs modes à savoir  $H_2SO_4$ , HCL,  $CH_3COOH$  et NaCL.

#### V.2.1. Perte de masse dans $H_2SO_4$

Les résultats des essais de l'attaque chimique par  $H_2SO_4$  des formulations BSP-M, BSP-C et BSP-MC sont présentés dans la figure V-1, V-2 et V-3.

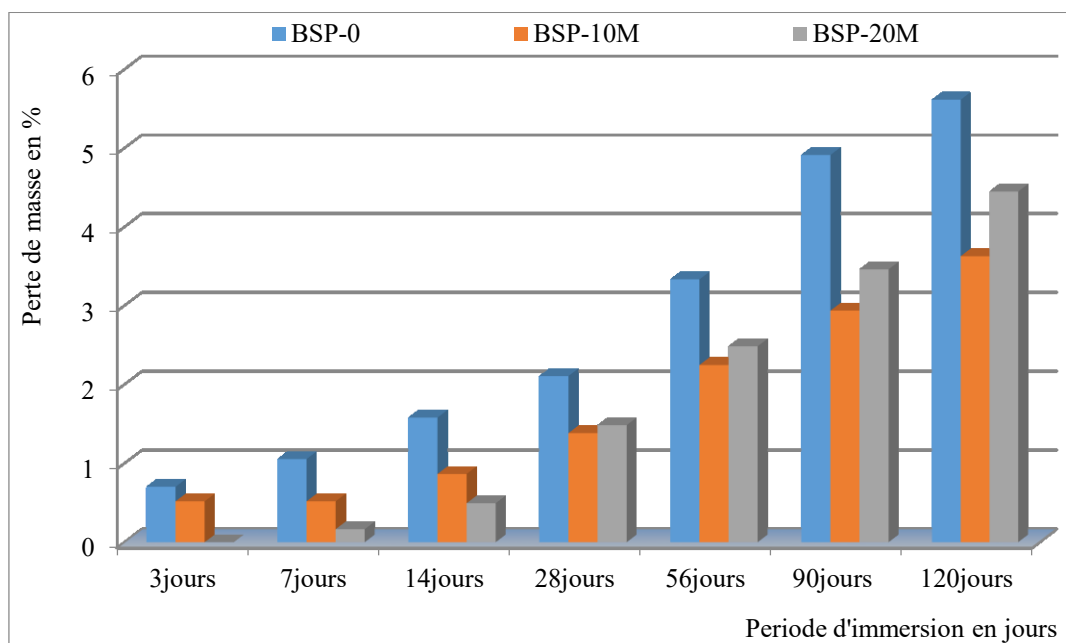


Figure V-1: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans  $H_2SO_4$  (formulation BSP-M)

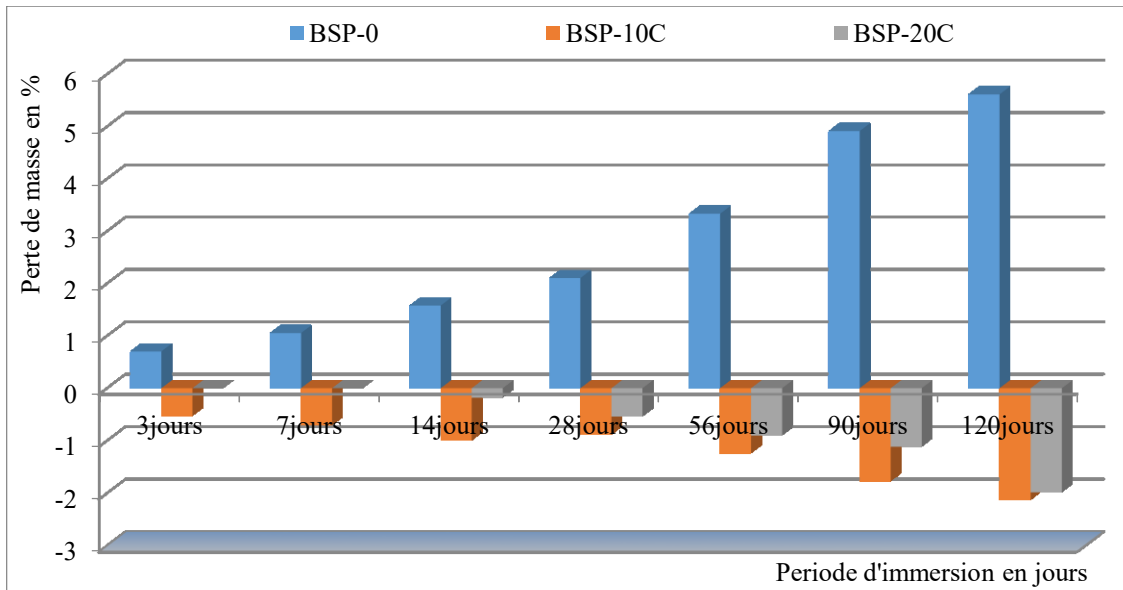


Figure V-2: Variation de masse en fonction de la période d'immersion dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (formulation BSP-C)

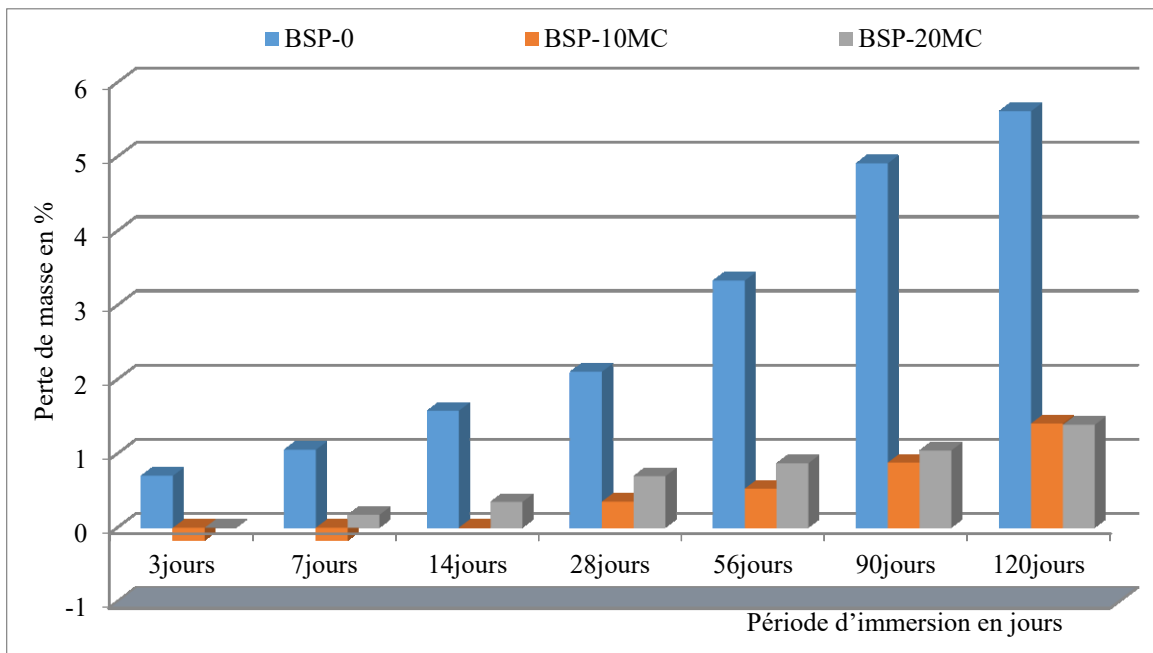


Figure V-3: Variation de masse en fonction de la période d'immersion dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (formulation BSP-MC)

Le béton témoin BSP-0 présente une perte de masse dans tous les âges, elles deviennent plus importantes à partir de 28 jours. L'acide sulfurique attaque la couche superficielle de béton (figure V-4) ce qui traduit la perte en poids dans le troisième jours, lorsque les bétons sont attaqués par l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ils réagissent avec la Portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> résultant de l'hydratation du ciment (Mohammed 2009), ce qui provoque la formation de gypse et nous donne une solution blanchâtre au fond du bassin d'immersion, le processus est décrit par la réaction chimique suivante (eq 1 et 2):

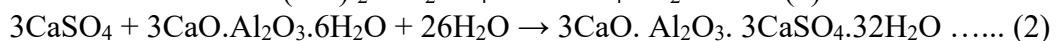
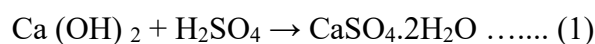




Figure V-4: Eprouvettes traitées par l'acide  $H_2SO_4$

L'augmentation du pourcentage du sable de déchets de marbre influe positivement sur la résistance chimique des bétons de sable, les bétons avec 10% et 20% de SM résistent mieux que le béton témoin dans tous les âges. Dans tous les cas, la perte en poids du béton BSP-M est inférieure à celle du béton de référence (BSP-0). Lors de la prise, les réactions s'accroissent pour former de nombreux hydrates de Portlandite et de C-S-H (Mohammed 2009). Ces hydrates remplissent rapidement les pores et donnent ainsi une raideur à la matrice formée, empêchant ainsi l'absorption de la solution acide à l'extérieur du béton, qui s'est traduite par une réduction relative de la perte de poids par rapport au béton témoin (Laoufi *et al.* 2016).

D'après les résultats (béton avec 10 et 20% de céramique), on remarque que le béton à base de sable de déchets céramique ne subit aucune perte de masse donc, le béton de sable à base de sable de déchets de céramique présente une meilleure résistance chimique dans tous les âges. Tandis que le béton avec le mélange de SM et SC présente une perte en poids moins sévère que le béton témoin et le béton avec le sable de déchets de marbre.

On peut expliquer le gain en poids présentés par les bétons de sable à base de SC, que le béton était bien préparé à résister l'attaque de l'acide sulfurique dans la période de cure (28 jours) d'une part, ainsi est dû au dépôt de gypse, qui se forme suite à la réaction entre la Portlandite et l'acide sulfurique d'autre part (Mouli *et al.* 2010).

D'après les résultats de la composition chimique des sables, il est clair que les trois sables ont des caractéristiques chimiques différentes. Le principal composé de sable de déchets de céramique est la silice  $SiO_2$  et  $Al_2O_3$ , comme il est bien connu, le  $SiO_2$ , l' $Al_2O_3$  et le  $CaO$  sont des oxydes très importants pendant le processus d'hydratation et produisent les gels C-S-H (Ghasan *et al.* 2019).

De toute évidence, la présence de plus de d'aluminium influence la réaction pouzzolanique pour produire des gels d'hydrate de silicate de calcium supplémentaires rendant ainsi le béton plus durable et plus dense. Ce sont les C-S-H qui, en se soudant entre eux et aux parois environnantes, constituent la colle du béton (Mohammed 2009).

### V.2.2. Perte de masse dans HCL

Les résultats des essais de l'attaque chimique par HCl des formulations BSP-M, BSP-C et BSP-MC sont présentés dans la figure V-5, V-6 et V-7.

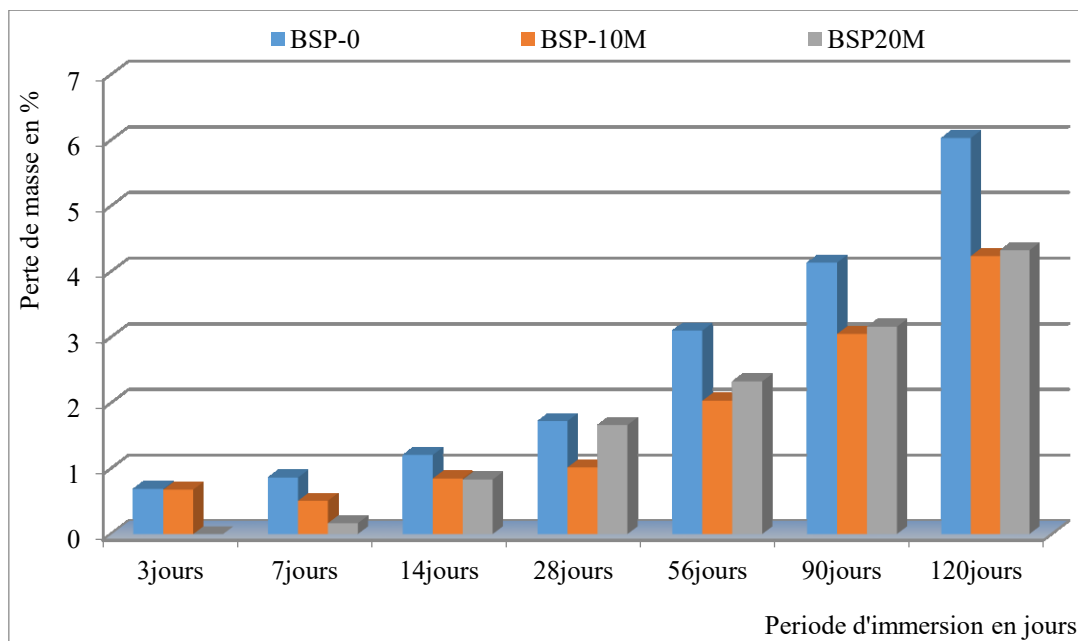


Figure V-5: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans HCL (formulation BSP-M)

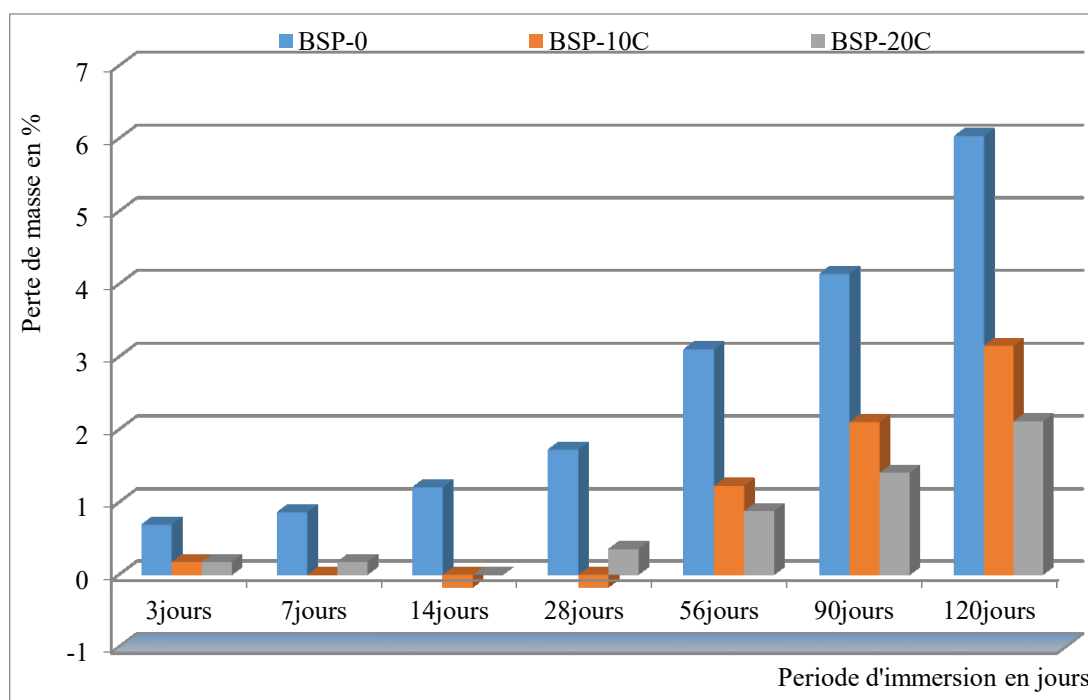


Figure V-6: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans HCL (formulation BSP-C)

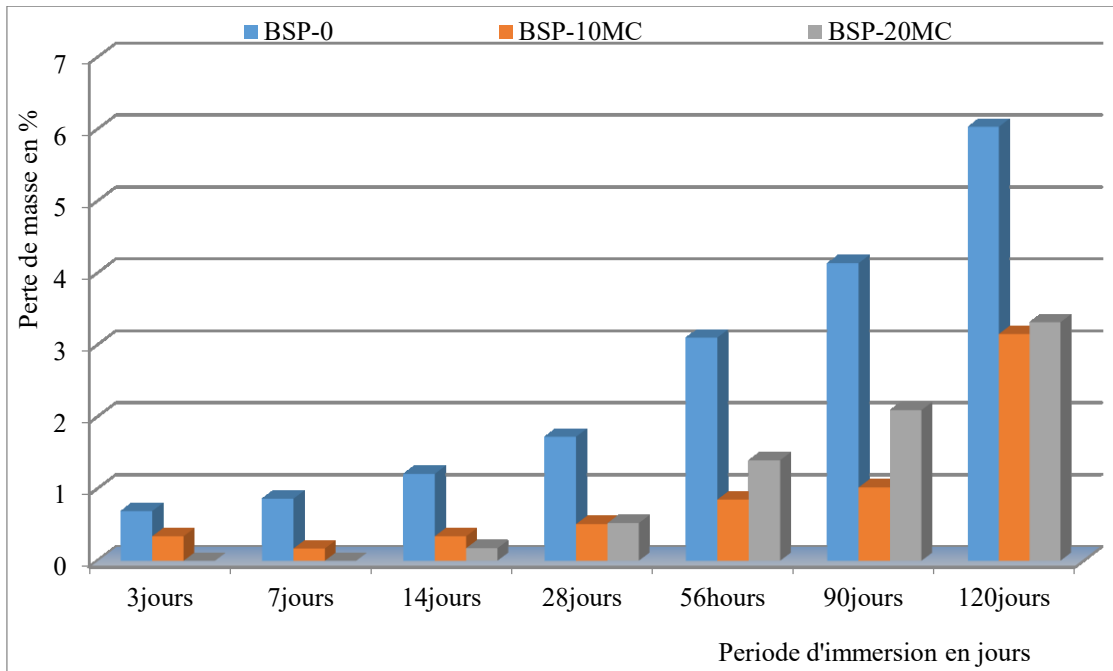


Figure V-7: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans HCL (formulation BSP-MC)

D'après les figures V-5, V-6 et V-7, on observe que tous les bétons montrent une perte de masse significative, grâce à la réaction entre l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et l'acide chlorhydrique, la réaction a été exprimée par l'équation (3).



Figure V-8 : Epreuves traitées par l'acide HCL

Le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) provoque la dissolution du ciment, la production de sel de  $\text{CaCl}_2$  augmente la porosité car il est très soluble dans l'eau. Le béton témoin BSP-0 présente des faibles résistances chimiques par rapport aux autres formulations. Les pertes en poids augmentent avec le temps de traitement. Le BSP-C montre une meilleure résistance chimique dans tous les âges, cela est traduit par un recul dans la production de  $\text{CaCl}_2$  pour les BSP-C, peut-être due à la haute quantité de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans le sable de déchets de céramique, ce dernier favorise la formation d'hydrates d'aluminate, qui fixe les ions des chlorures et forme des composés insolubles (Kore et Vyas 2016) permet de freiner la pénétration des ions agressifs.

En général, l'attaque d'acide chlorhydrique HCL dans le béton entraine une augmentation de sa porosité et compte tenu des résultats précédents, le processus de remplacement des sables de déchets de marbre, céramique et de sable mixtes joue un rôle important pour rendre la matrice cimentaire plus denses et moins poreux par rapport à celle du béton de référence, ce qui empêche la pénétration d'acide HCL à l'intérieur du béton, accompagnée d'une diminution de la perte de poids.

### V.2.3. Perte de masse dans CH<sub>3</sub>COOH

Les résultats des essais de l'attaque chimique par CH<sub>3</sub>COOH des formulations BSP-M, BSP-C et BSP-MC sont présentés dans les figures V-9, V-10 et V-11.

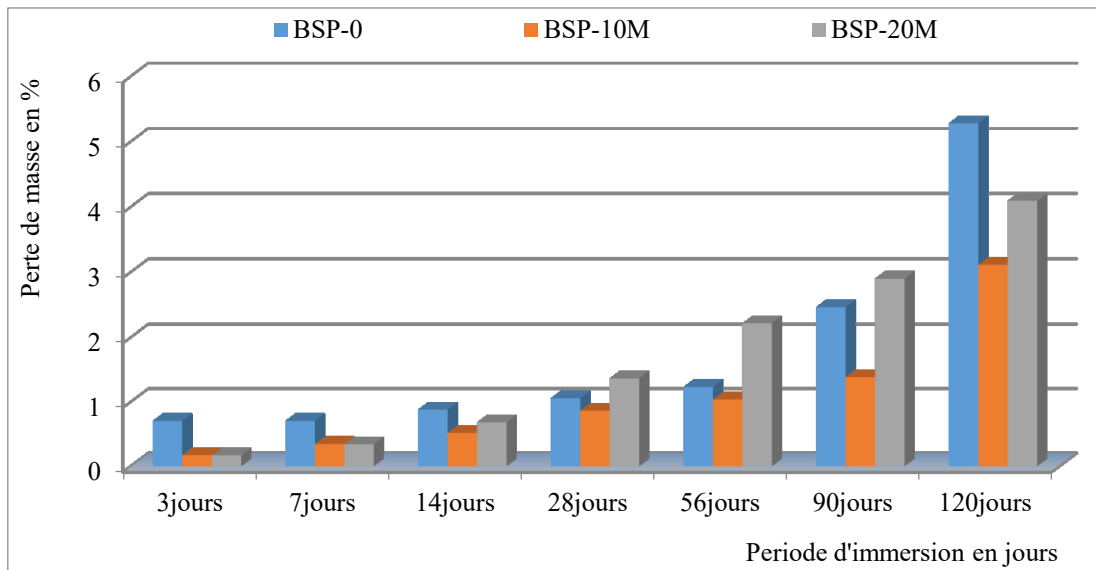


Figure V-9: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans CH<sub>3</sub>COOH (formulation BSP-M)

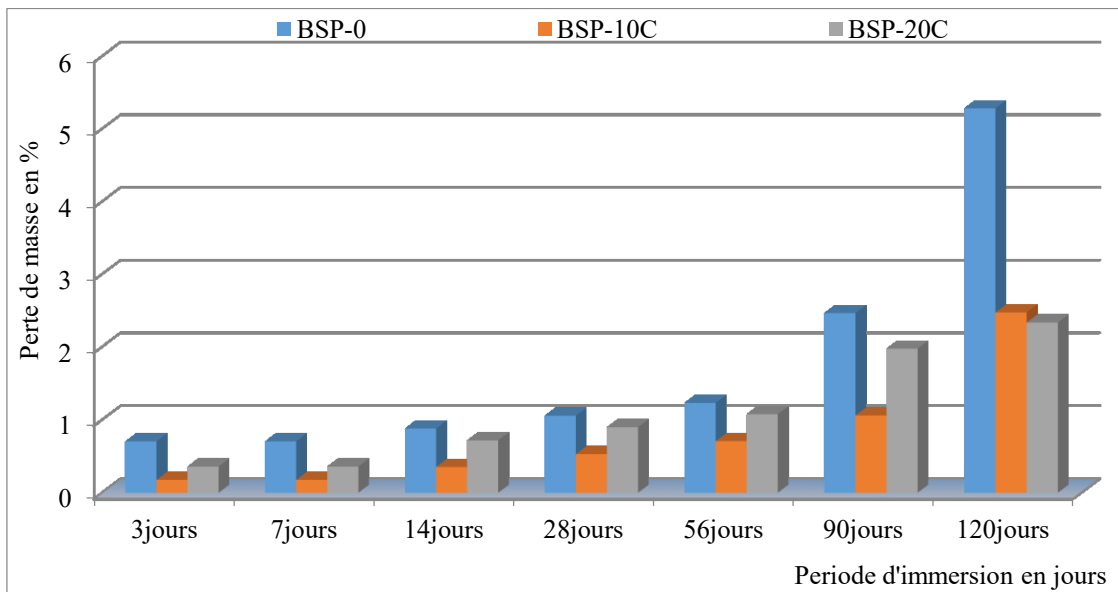


Figure V-10: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans CH<sub>3</sub>COOH (formulation BSP-C)

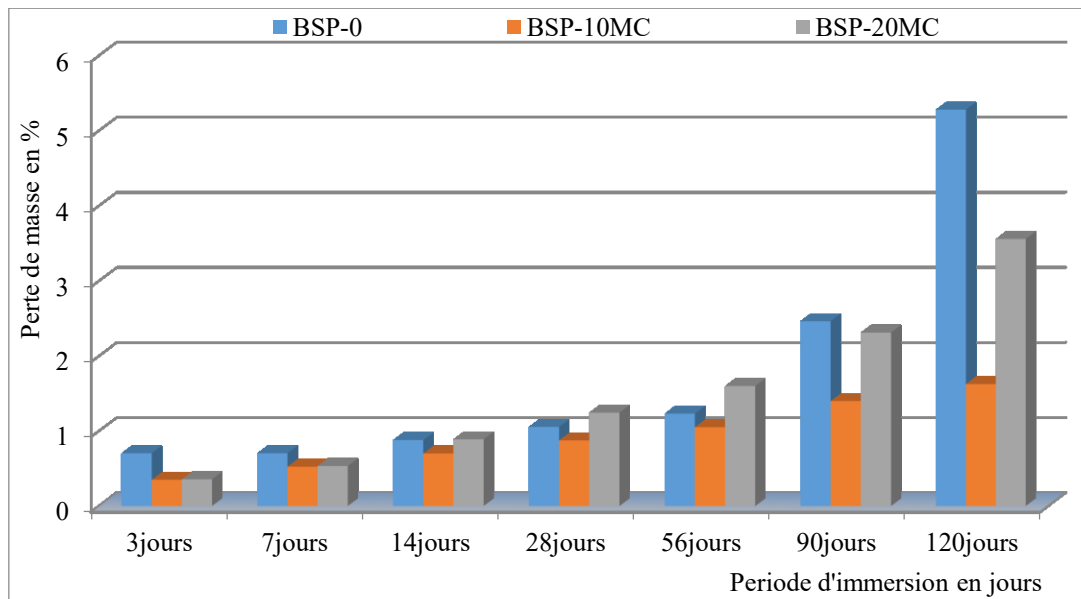


Figure V-11: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (formulation BSP-MC)

Les résultats présentés par les figures V-9, V-10 et V-11, montrent la perte en poids en % mesurée sur des bétons traités par une solution d'acide acétique  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (après 28 jours de cure dans l'eau).

Tous les bétons montrent une perte en poids mais d'une manière dissemblable. Les bétons BSP-0 présentent une faible résistance chimique à tous les âges, tandis que le béton BSP-C montre des meilleures résistances chimiques. Il est bien connu que l'acide acétique est un composé très agressif (**Zivica et Bazja 2002**). Leur réactivité s'explique par la réaction avec la Portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  produisant des sels de calcium très solubles qui, du fait de sa solubilité, sont lessivés par la solution agressive. L'acétate de calcium  $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  est difficilement soluble dans l'eau, ce qui provoque la dissolution du ciment par la réaction entre la Portlandite (hydroxyde de calcium) et l'acide acétique, la réaction a été exprimée par (eq. 4)

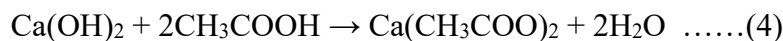


Figure V-12 : Eprouvettes traitées par l'acide  $\text{CH}_3\text{COOH}$

L'acide acétique tel qu'il est connu, est un acide organique qui forme avec l'hydroxyde de calcium de l'acétate de calcium, son attaque se fait sur la couche superficielle des spécimens et cette action entraîne une perte de poids continue des spécimens immergés. Les trois sables de déchets ont contribué à une réduction relative de la perte de poids par rapport au béton de

référence selon le taux de substitution de chacun d'eux, qui apparait d'une manière significative dans le béton BSP-C et légèrement dans le béton BSP-M et le béton BSP-MC.

#### V.2.4. Perte de masse dans NaCl

Les résultats des essais de l'attaque chimique par NaCl des formulations BSP-M, BSP-C et BSP-MC sont présentés dans les figures V-13, V-14 et V-15.

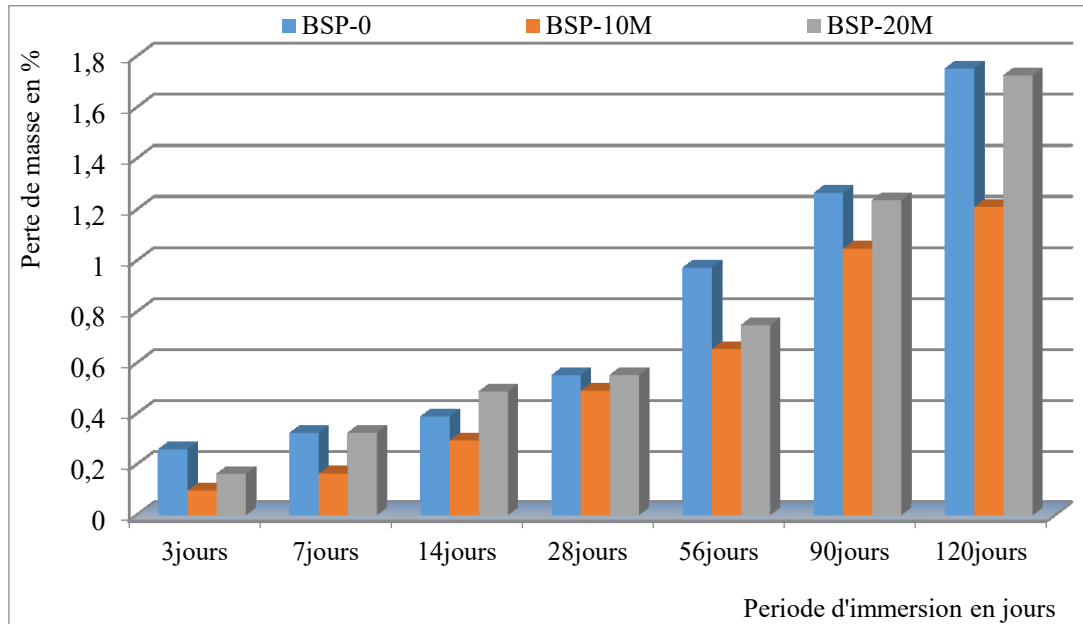


Figure V-13: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans NaCl (formulation BSP-M)

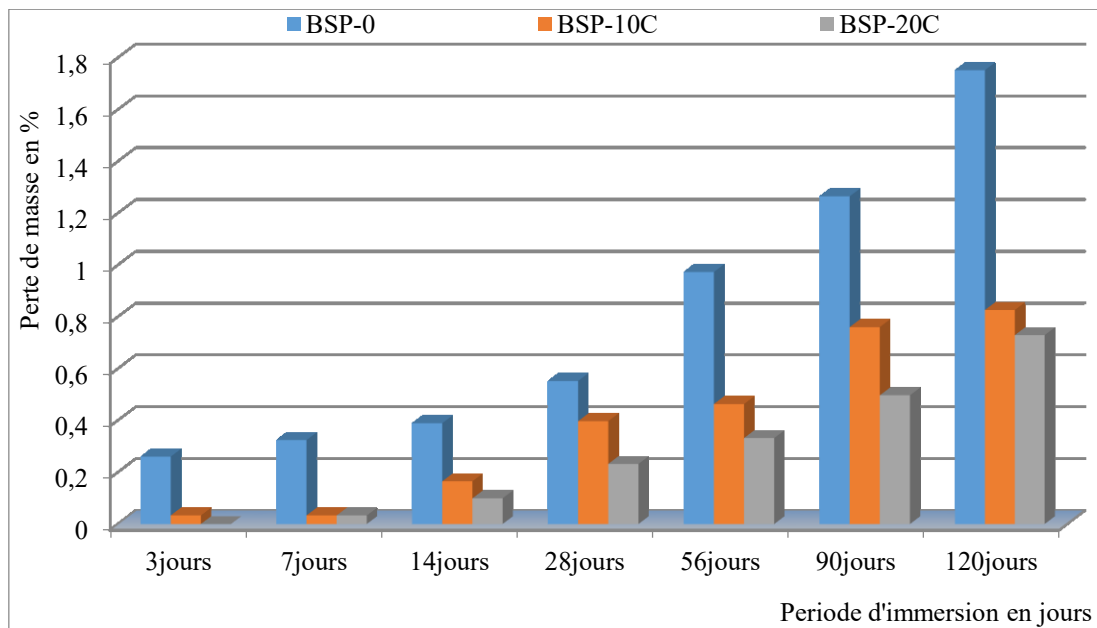


Figure V-14: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans NaCl (formulation BSP-C)

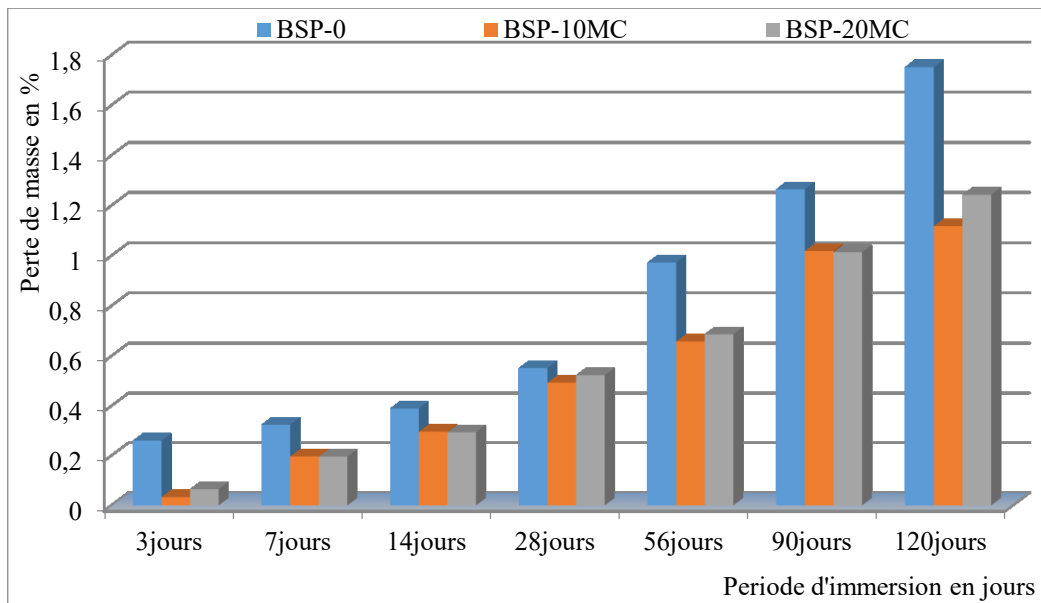


Figure V-15: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans NaCl (formulation BSP-MC)

D'après les résultats de perte en poids dans la solution NaCl, tous les formulations de différents bétons sont enregistrées des pertes en poids d'une manière différentes, grâce à la réaction entre l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et les chlorures, la réaction est exprimée par (eq. 5).

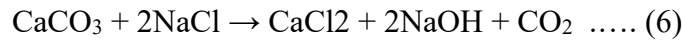


Figure V-16 : Eprouvette traitée par l'acide NaCl

Le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) provoque la dissolution du ciment, la production de sel de  $\text{CaCl}_2$  augmente la porosité car il est très soluble dans l'eau. On peut également noter que, les meilleures résistances chimiques sont présentées par le béton BSP-C qui ne présente aucune perte dans les premiers jours. À 7 jours le BSP-C présente une perte négligeable, environ 0.033%. On peut aussi noter que toutes les pertes en poids sont maigres. Le béton témoin BSP-0 montre une faible résistance chimique en comparant avec les bétons BSP-M, BSP-C et BSP-MC.

Les ions chlorures peuvent pénétrer dans le béton avec de l'eau et ils peuvent causer des problèmes de durabilité pour le béton armé (la corrosion). Plus la microstructure est plus dense, plus la pénétration des ions chlorures est limitée (Siddique *et al.* 2018). Le granulats de céramique avec sa structure stable donne une résistance supérieure au béton pour résister aux ions

chlorures. Tandis que le granulat de marbre avec sa teneur élevée en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) augmente la capacité des bétons à réagir avec les agressions (eq. 6).



### V.3. Pertes des résistances dans les milieux agressifs

Les pertes de résistance mécanique des différentes formulations sont mesurées dans plusieurs modes à savoir  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCL}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  et  $\text{NaCL}$ .

#### V.3.1. Perte de résistance en compression et en traction par flexion dans $\text{H}_2\text{SO}_4$

Dans les figures V-17, V-18, V-19 on présente les pertes de résistances en compressions pour les différentes formulations étudiées.

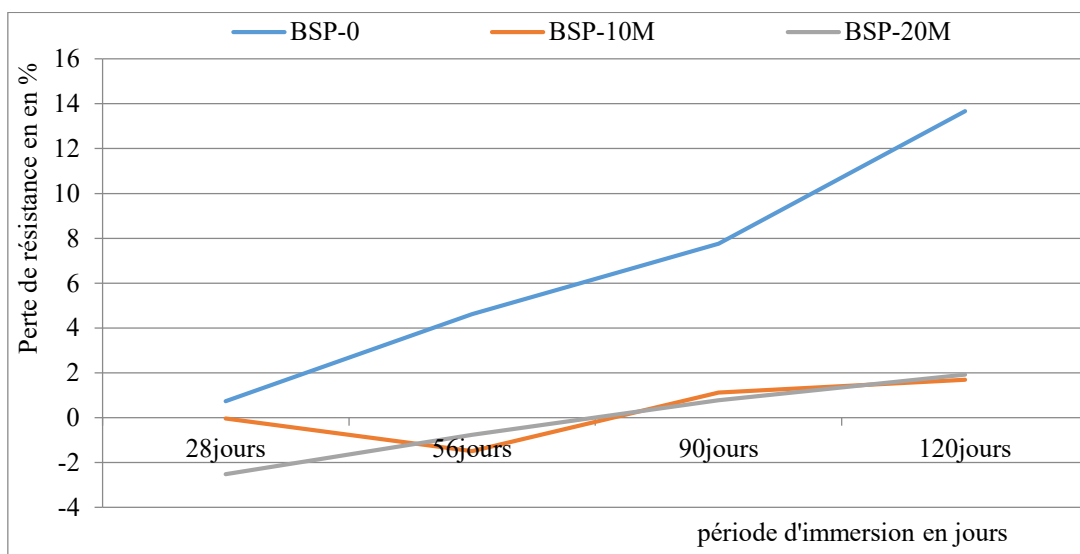


Figure V-17: Perte de résistance en compression (formulation BSP-M)

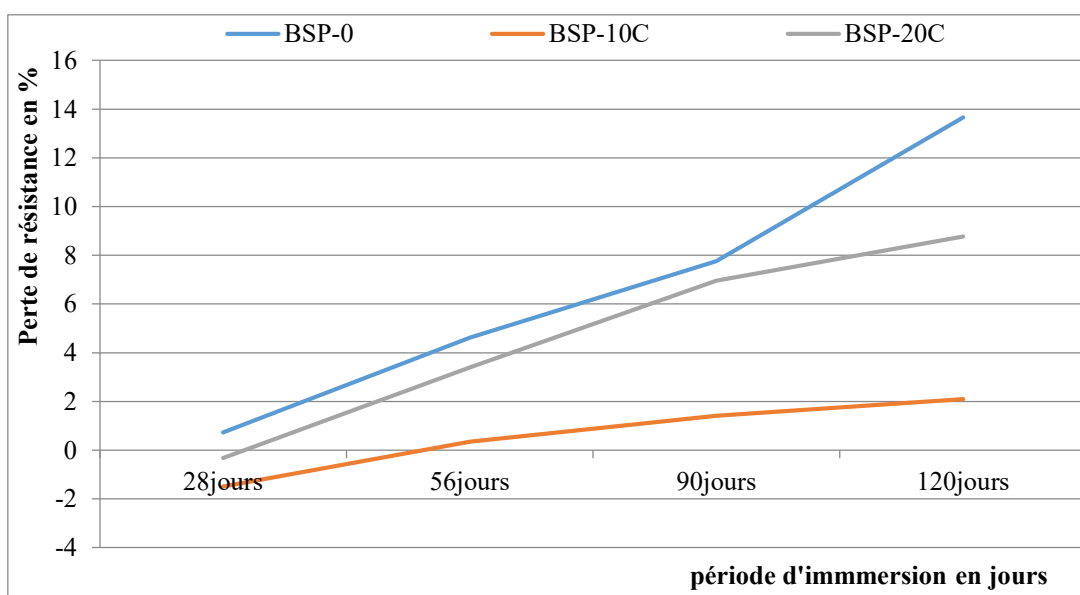


Figure V-18: Perte de résistance en compression (formulation BSP-C)

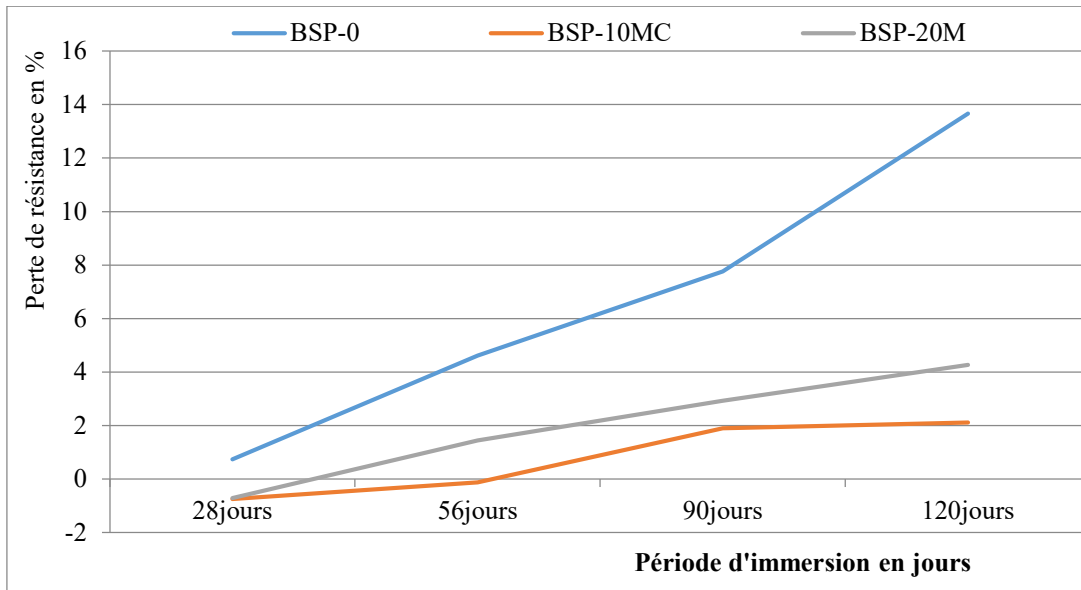


Figure V-19: Perte de résistance en compression (formulation BSP-MC)

La perte de la résistance en compression est plus importante dans le BSP-0, elle augmente avec le temps d'immersion pour toutes les formulations sauf pour le BSP-10M qui montre un gain en résistance entre la période de 28 à 56 jours. On peut aussi noter que les bétons BSP-10MC et BSP-10C et BSP-20M commencent à perdre leurs résistances après 56 jours de traitement dans l'acide sulfurique ; on peut l'expliquer par leurs hautes résistances initiales avant le traitement par  $H_2SO_4$ .

Le BSP-0 le seul qui montre une perte en résistance à la compression, après 28 jours d'immersion dans l'acide sulfurique. La substitution de SM et de SC dans le sable rendre le béton plus dense et plus durable dans  $H_2SO_4$ .

Dans les figures V-20, V-21, V-22 on présente les pertes de résistances en traction par flexion pour les différentes formulations étudiées.

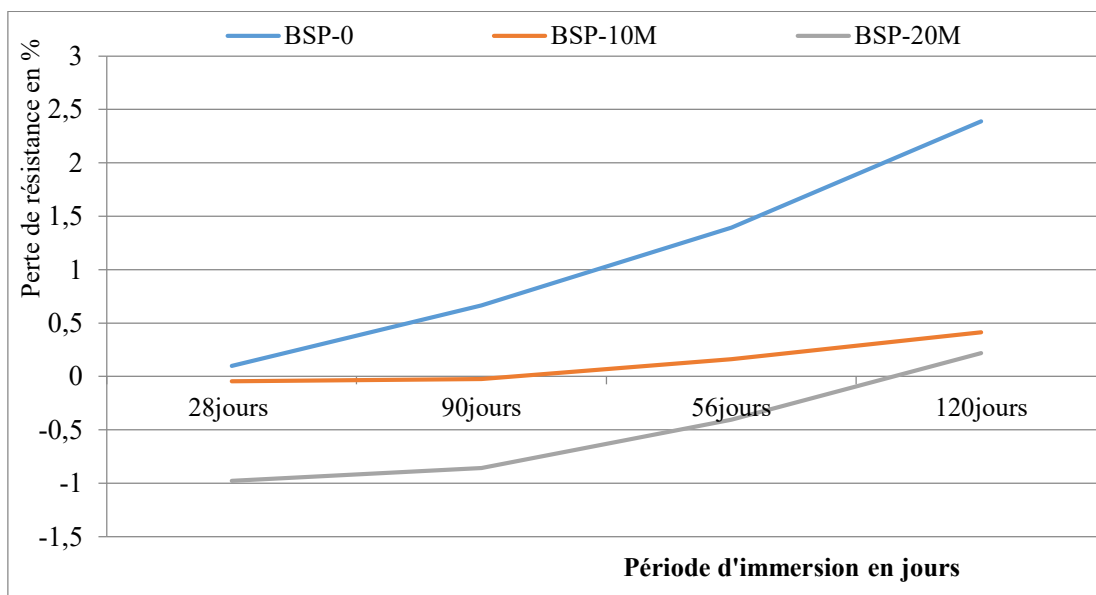


Figure V-20: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-M)

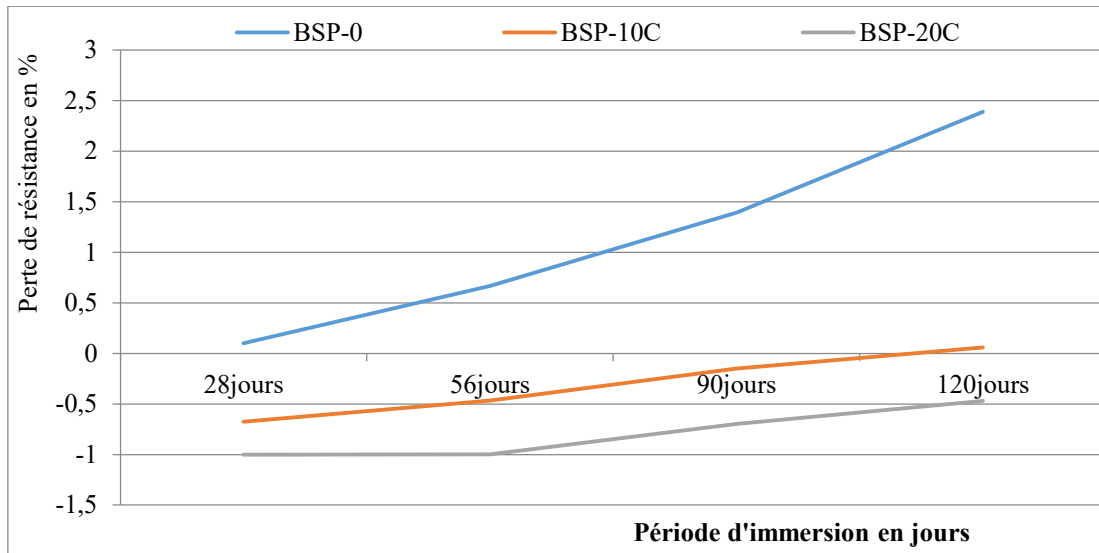


Figure V-21: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-C)

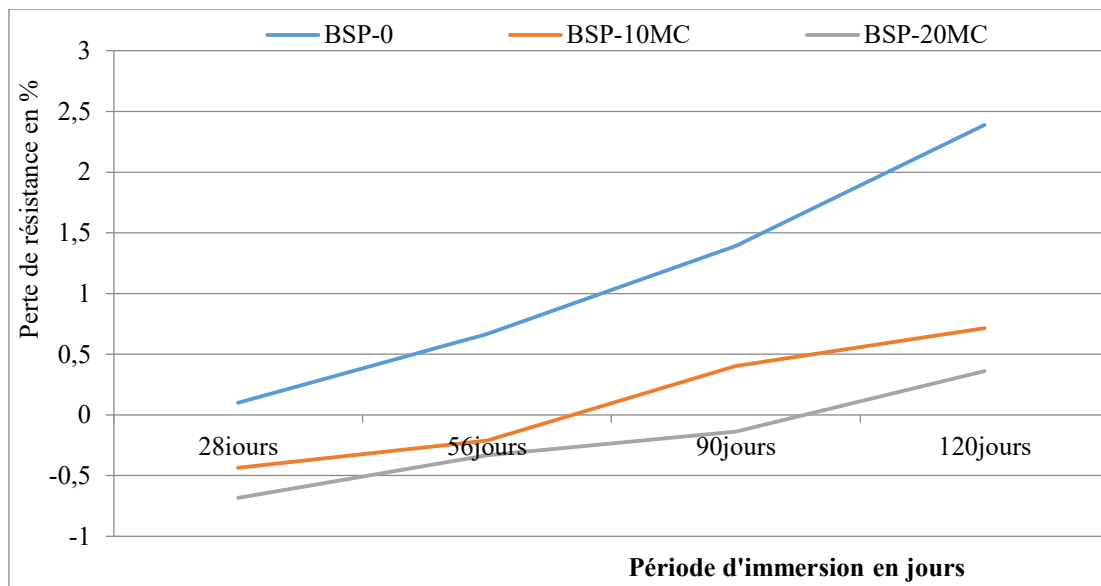


Figure V-22: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-MC)

La perte de résistance en traction par flexion des bétons est presque de la même manière de celle de compression. Le béton BSP-0 présente toujours des pertes importantes dans tous les âges. Le BSP-10M qui présente un gain de résistance en compression, ne présente aucune perte ni gain pour la résistance à la traction par flexion, il garde sa résistance en traction par flexion pendant la période 28 jours jusqu'à 90 jours. Le sable de déchets de céramique avec sa composition chimique contribue à une réaction pouzzolanique et une amélioration dans la résistance mécanique des bétons. Dans le même contexte, le sable mixte des déchets a également contribué au maintien de la résistance en traction par flexion du béton dans la solution d'acide sulfurique, notamment avec le remplacement de 20% du sable MC.

### V.3.2. Perte de résistance en compression et en traction par flexion dans HCl

Dans les figures V-23, V-24, V-25 on présente les pertes de résistances en compressions pour les différentes formulations étudiées conservée dans un milieu de l'acide chlorhydrique HCl.

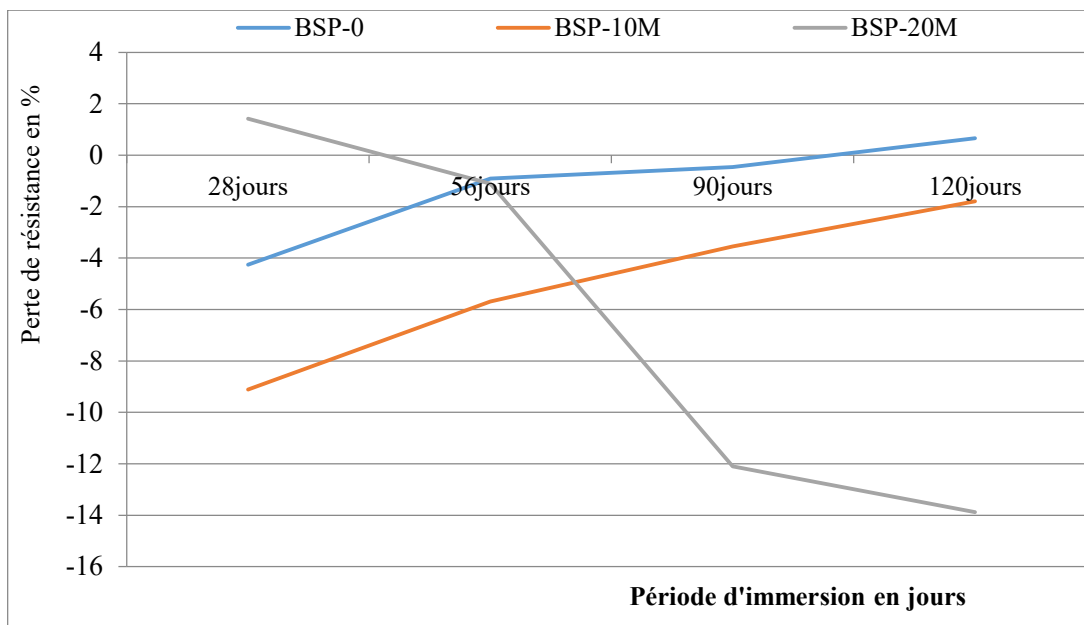


Figure V-23: Perte de résistance en compression (formulation BSP-M)

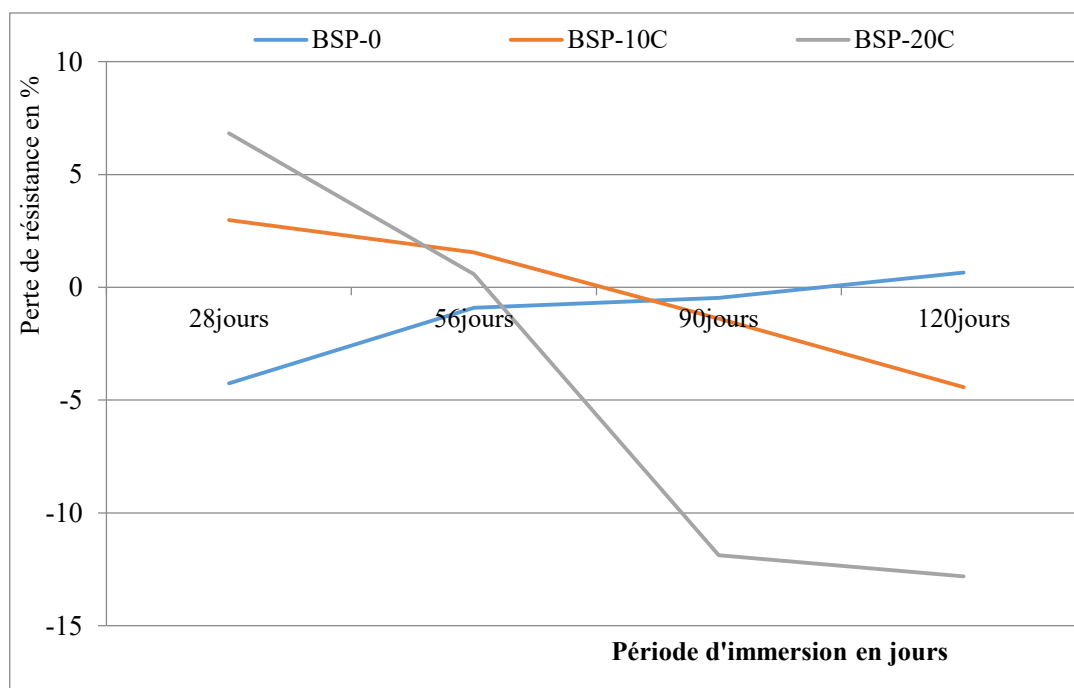


Figure V-24: Perte de résistance en compression (formulation BSP-C)

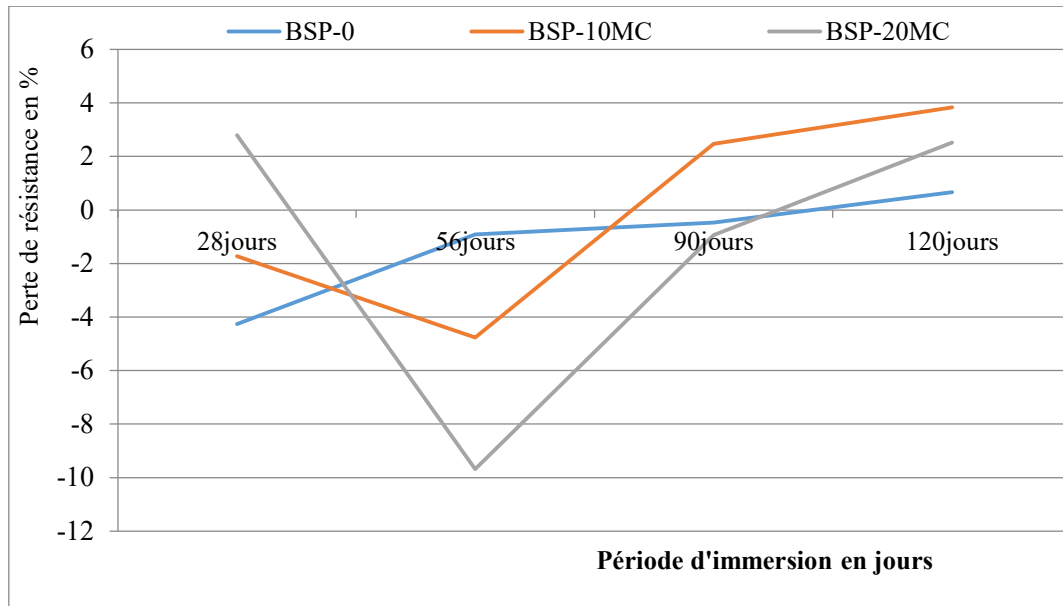


Figure V-25: Perte de résistance en compression (formulation BSP-MC)

Après un traitement de 28 jours par un acide chlorhydrique les bétons BSP-20M, BSP-10C, BSP-20C, BSP-10MC, montrent des pertes en résistance à la compression avec des divers degrés, la perte était plus sévère dans le BSP-20C à 28 jours d'immersion, tandis que le BSP-10M présente un gain de résistance important dans tous les âges. Les bétons BSP-20M et BSP-20C gardent l'augmentation de ses résistances en compression vis-à-vis l'acide chlorhydrique à partir de 56 jusqu'à 120 jours, due à la haute quantité de  $Al_2O_3$  dans le sable de déchets de céramique, ce dernier favorise la formation d'hydrates d'aluminate qui fixe les ions de chlorures et la continuation de la réaction pouzzolanique qui donne des meilleures résistances à long terme. Tandis que le sable mixte de déchets, il a donné un gain important de résistance en compression à 56 jours quelle que soit le taux de substitution.

Dans les figures V-26, V-27, V-28 on présente les pertes de résistances en traction par flexion pour les différentes formulations étudiées après l'attaque de l'acide chlorhydrique.

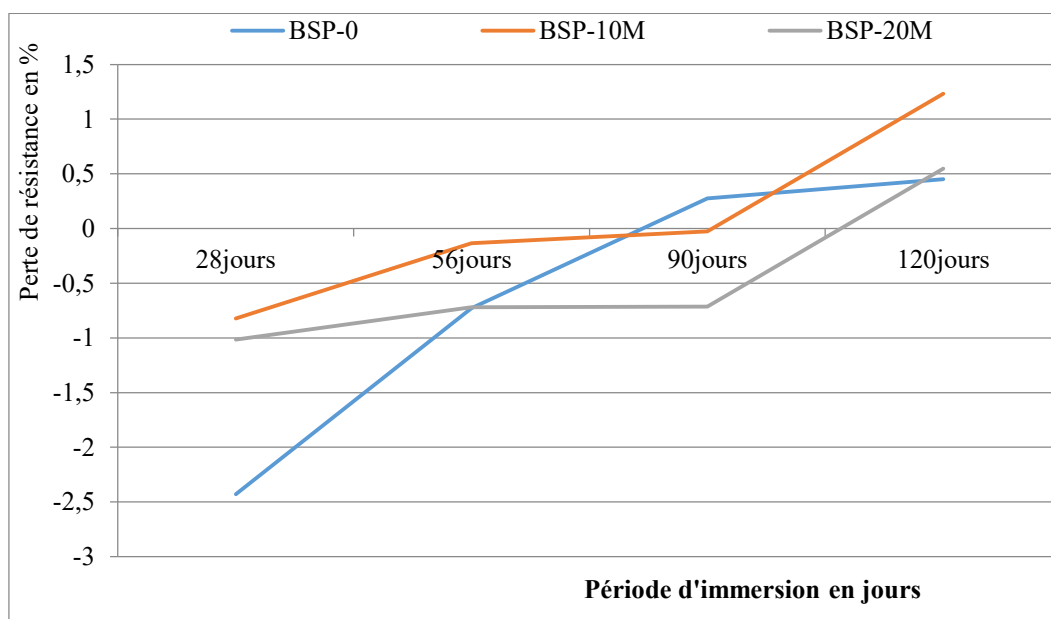


Figure V-26: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-M)

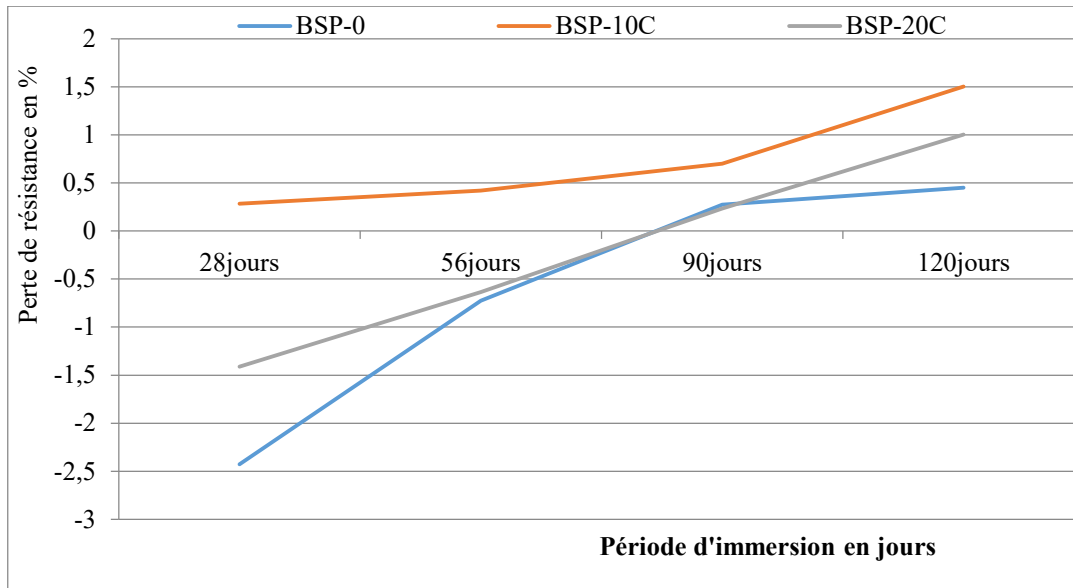


Figure V-27: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-C)

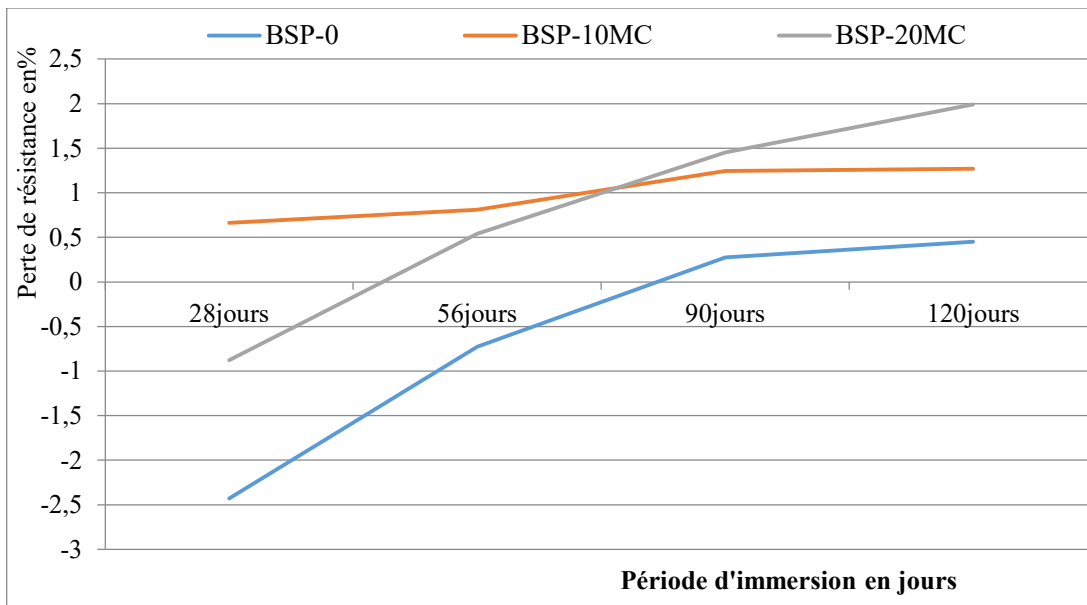


Figure V-28: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-MC)

La perte de la résistance à la traction par flexion varie approximativement avec le même niveau de la perte en résistance à la compression, que nous avons enregistré que les bétons ont un gain de résistance après 28, 56 et 90 jours de conservation dans HCl pour le BSP-20M et un gain après 28 et 56 jours de conservation pour le BSP-20C. La substitution de SM et SC dans le béton influe sur la perte en résistance à la traction par flexion des bétons d'une manière irrégulière à cause de la structure de sable de déchets de céramique et de marbre.

### V.3.3. Perte de résistance en compression et en traction par flexion dans CH<sub>3</sub>COOH

Dans les figures V-29, V-30, V-31 on présente les pertes de résistances en compressions pour les différentes formulations étudiées conservée dans un milieu de l'acide acétique.

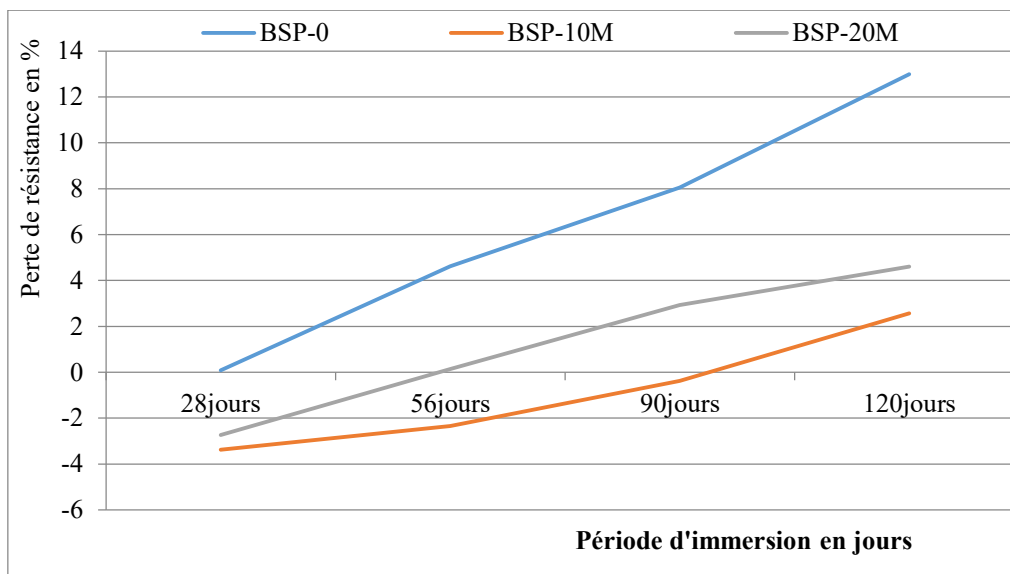


Figure V-29: Perte de résistance en compression (formulation BSP-M)

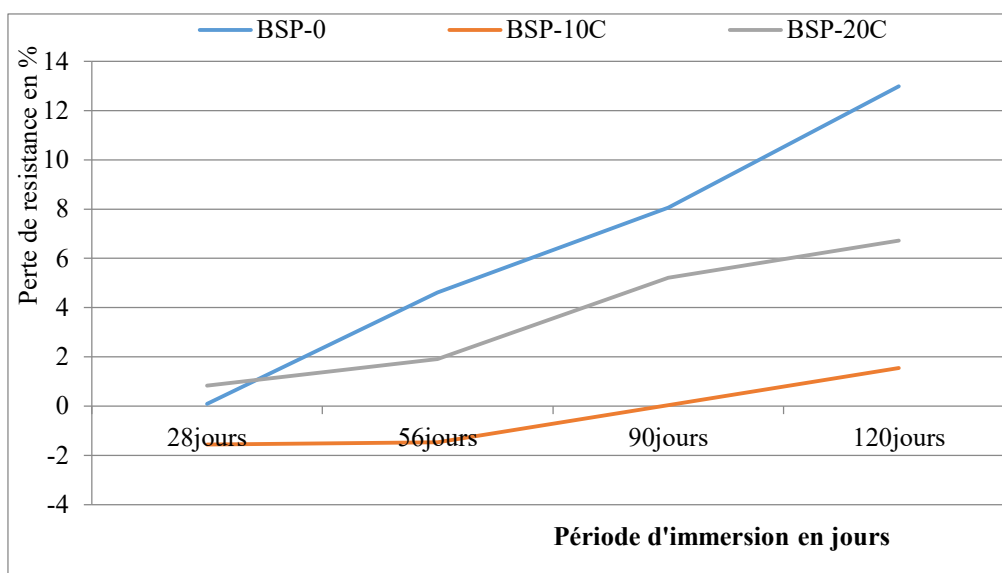


Figure V-30 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-C)

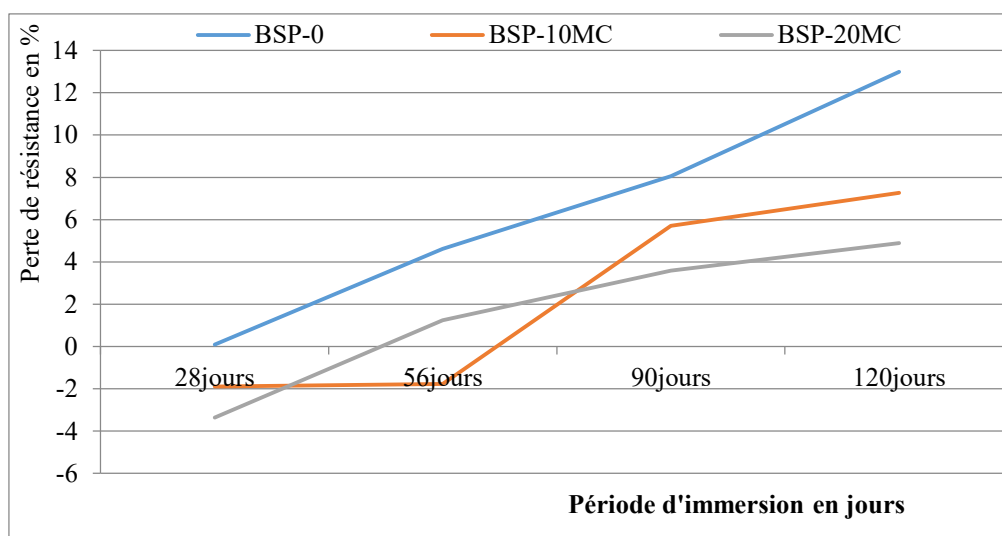


Figure V-31 : Perte de résistance en compression (formulation BSP-MC)

Les figures V-29, V-30, V-31 présentent les résultats de la résistance à la compression des bétons immergés dans l'acide acétique. Il a été montré que la perte de résistance à la compression des différentes formulations due à l'acide acétique est assez similaire à la perte de résistance à la compression due à l'acide sulfurique. L'acétate de calcium  $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ , qui est produit par la réaction des ions acétiques (eq.4), a une grande capacité à dissoudre l'eau. Pour cette raison, il favorise la réaction des ions acide acétique.

Le BSP-0 présente toujours des pertes en résistance plus élevée, et elle augmente avec le temps d'immersion, tandis que le BSP-10C résiste mieux devant l'acide acétique.

Dans les figures V-32, V-33, V-34 on présente les pertes de résistances en traction par flexion pour les différentes formulations étudiées après l'attaque de  $\text{CH}_3\text{COOH}$ .

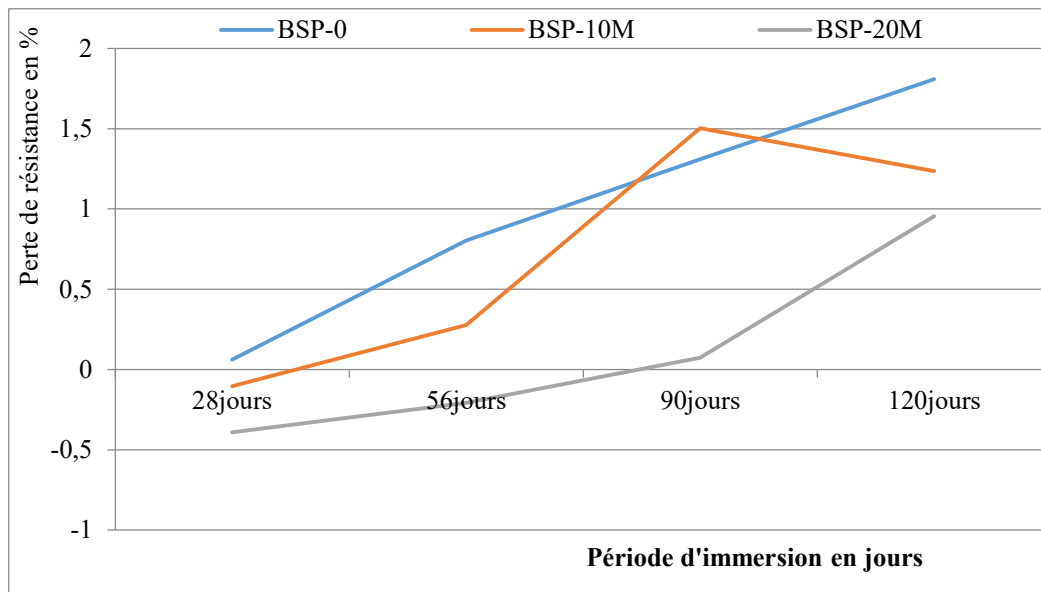


Figure V-32: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-M)

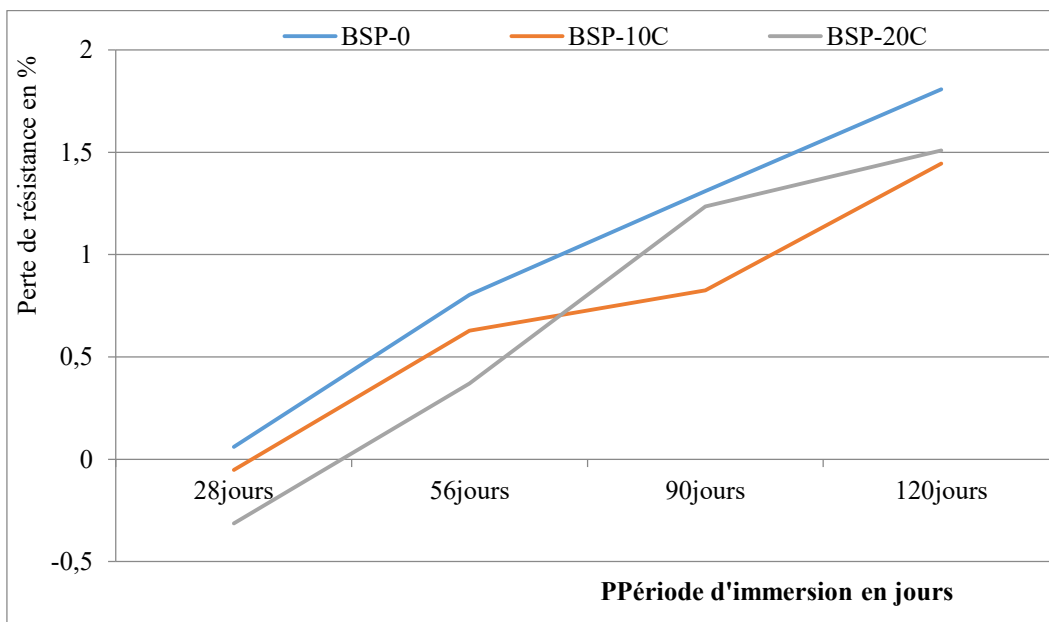


Figure V-33: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-C)

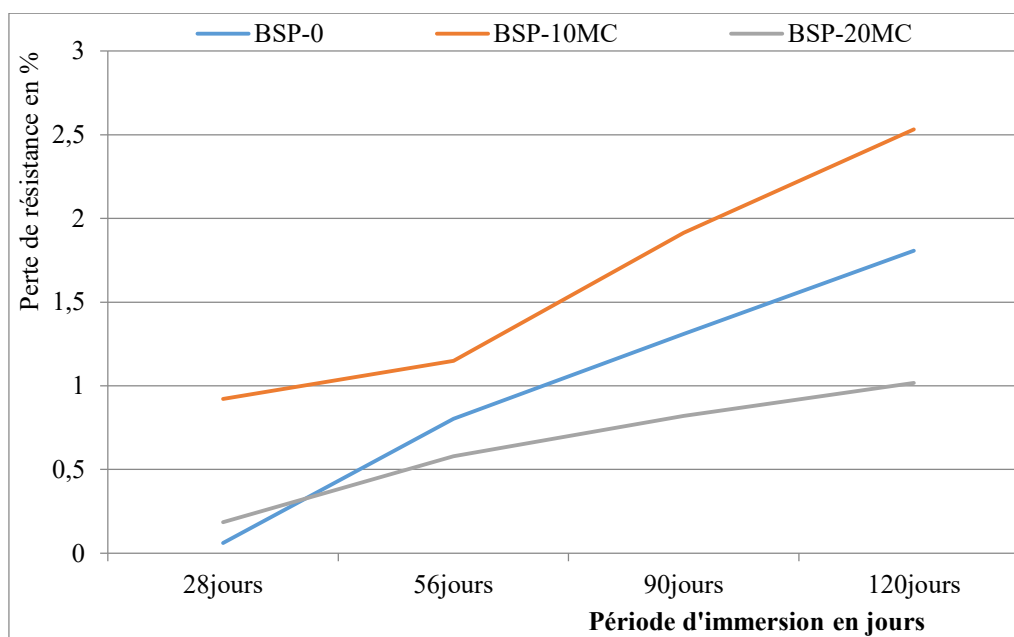


Figure V-34: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-MC)

Les bétons BSP-0, le BSP-10MC, BSP-20MC présentent toujours des pertes en résistance à la traction par flexion, tous les bétons montrent des chutes dans les résistances pendant la durée d'immersion et elles augmentent avec le temps. Après 28 jours d'immersion, BSP-20C, BSP-20M présentent un gain de résistance à la traction par flexion et le BSP-20M commence à perdre sa résistance après 56 jours de traitement par  $\text{CH}_3\text{COOH}$ .

#### V.3.4. Perte de résistance en compression et en traction par flexion dans NaCl

Dans les figures V-35, V-36, V-37 on présente les pertes de résistances en compressions pour les différentes formulations étudiées conservée dans un milieu de chlorure de sodium.

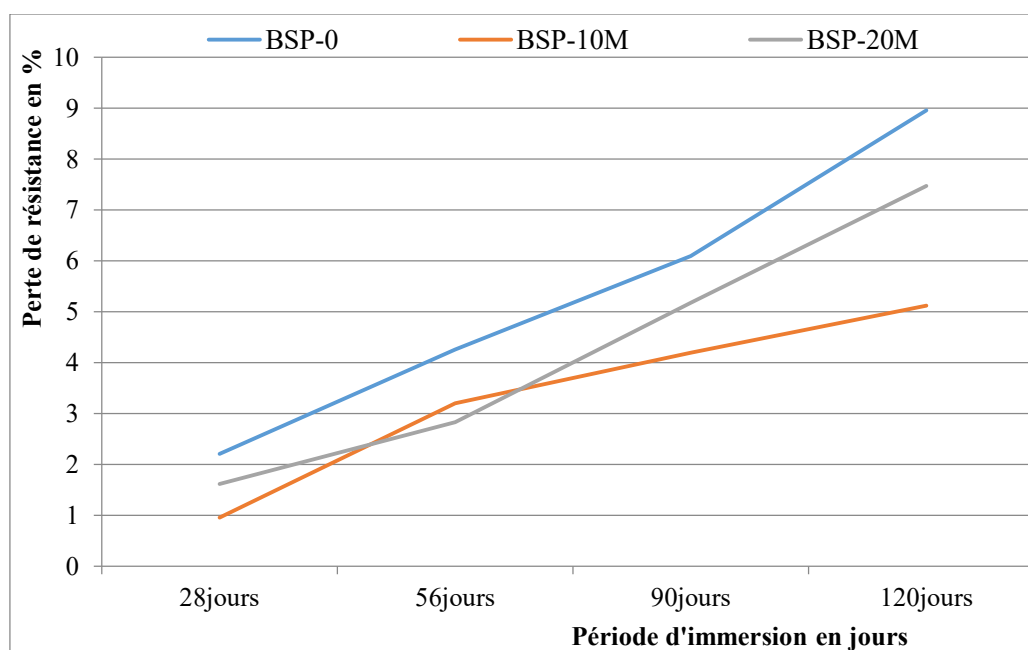


Figure V-35: Perte de résistance en compression (formulation BSP-M)

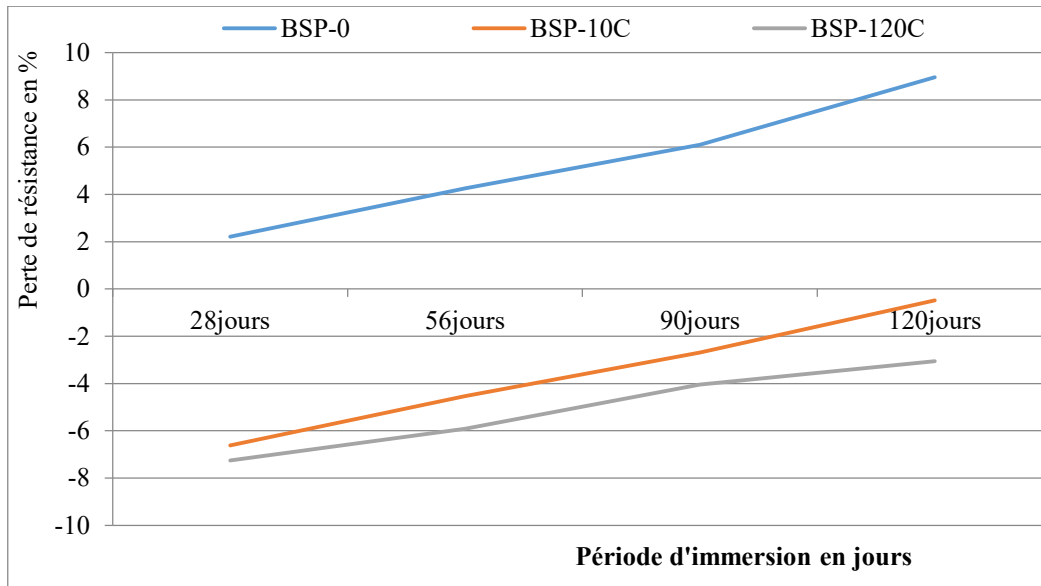


Figure V-36: Perte de résistance en compression (formulation BSP-C)

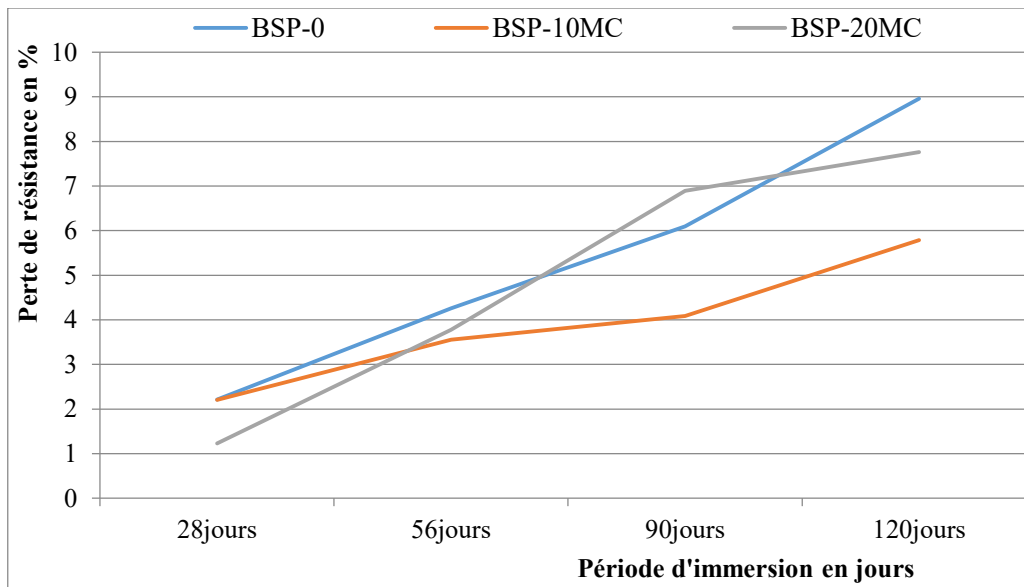


Figure V-37: Perte de résistance en compression (formulation BSP-MC)

D'après les figures V-35, V-36, V-37 on peut noter que les bétons BSP-10C et BSP-20C montrent toujours des gains de résistance à la compression, le SC par leur composition chimique attribue la réaction pouzzolanique et produit les C-S-H (Cherif 2018), qui assurent par ailleurs la cohésion entre les composants des matériaux cimentaires et contribuent essentiellement au développement de leur résistance mécanique. Les autres formulations présentent toujours des pertes en résistance à la compression, due à l'augmentation de la porosité résultant de la dissolution de  $\text{Ca(OH)}_2$  par la réaction de l'équation (5).

Dans les figures V-38, V-39, V-40 on présente les pertes de résistances en traction par flexion pour les différentes formulations étudiées après l'immersion dans la solution de chlorure de sodium NaCl.

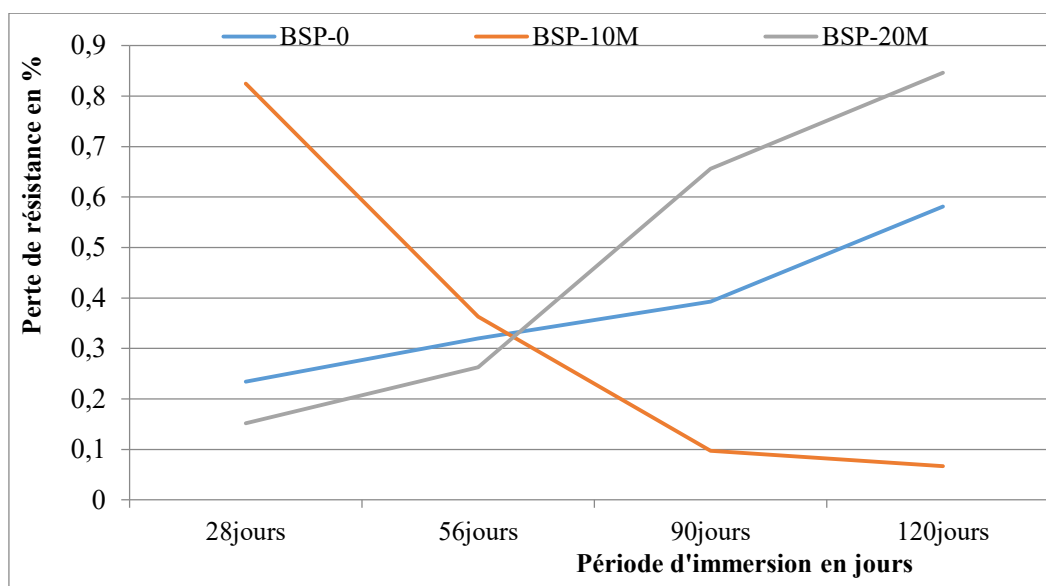


Figure V-38: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-M)

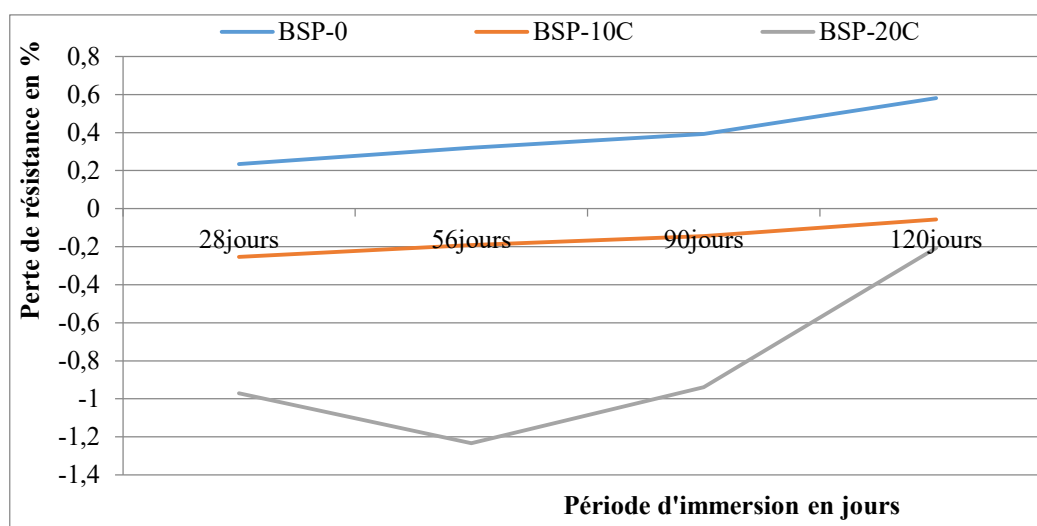


Figure V-39: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-C)

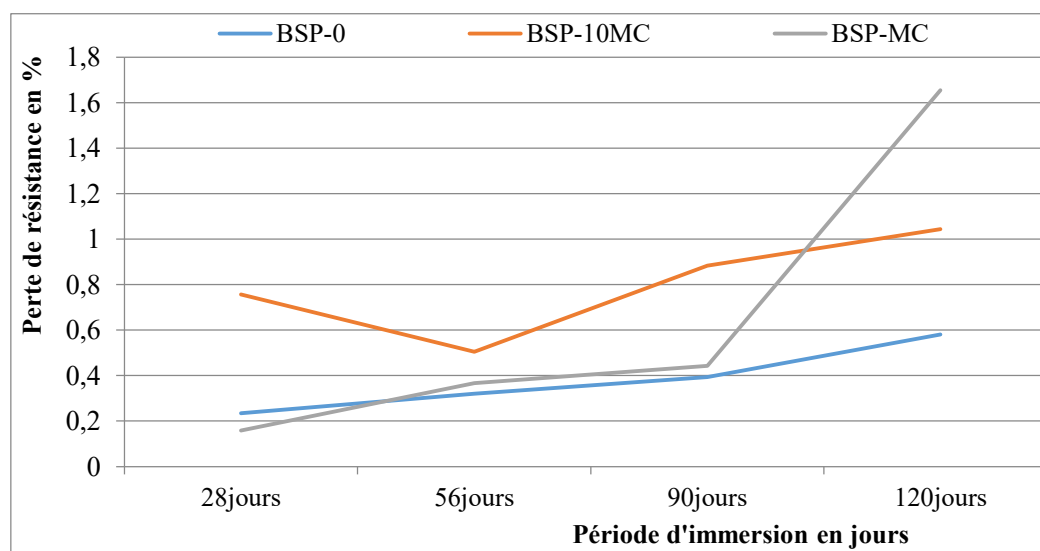


Figure V-40: Perte de résistance en traction par flexion (formulation BSP-MC)

La perte en résistance à la traction par flexion a été enregistrée d'une manière identique à la perte en résistance à la compression. La même perte de résistance a été enregistrée pour tous les échantillons. A l'exception du béton BSP-C, qui a enregistré un gain de résistance notamment à 20% de substitution à tous les âges de conservation dans la solution de chlorure de sodium.

#### V.4. Pénétration des ions des chlorures

Sur la figure V-41 on présente la variation de la profondeur de la pénétration des chlorures dans les différentes formulations.

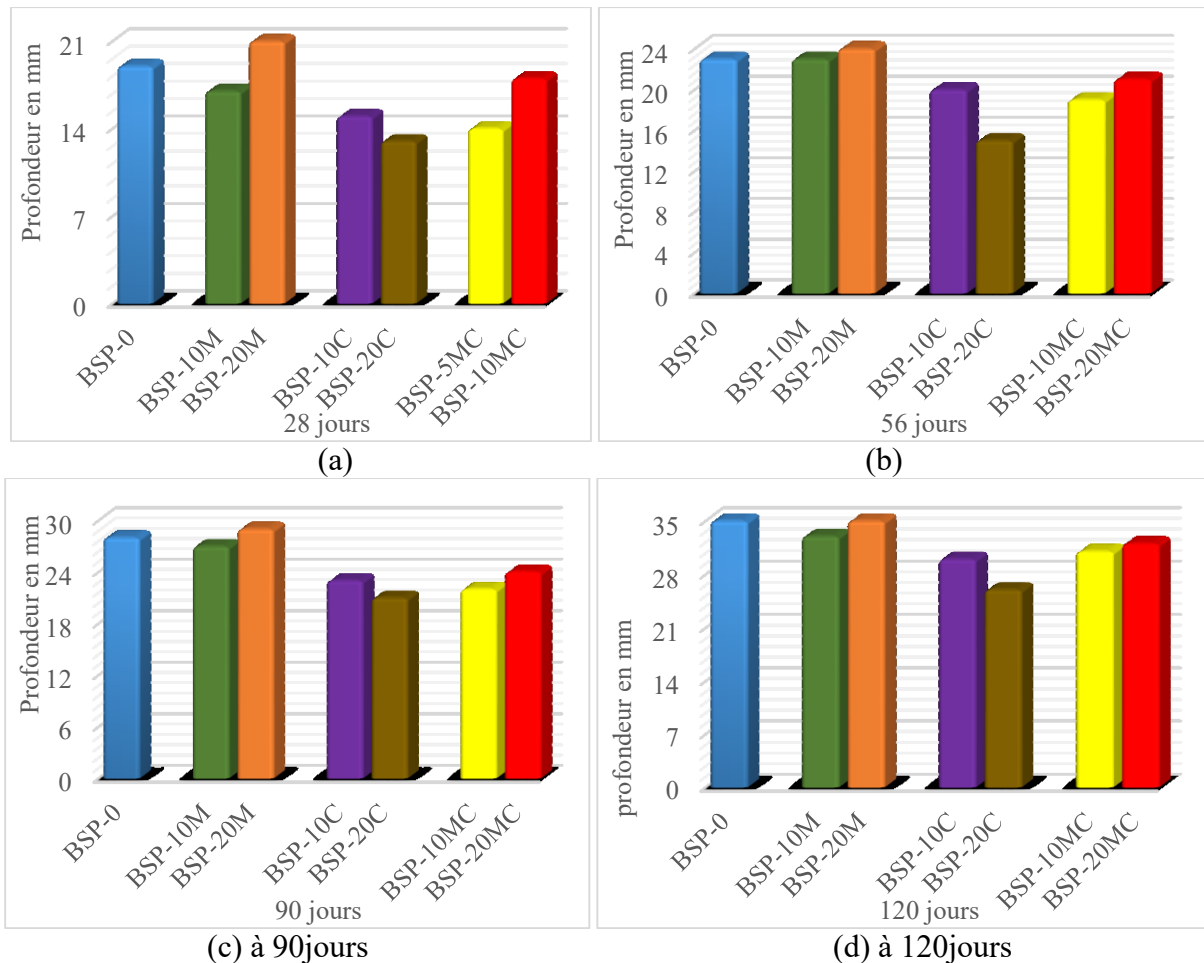


Figure V-41: Profondeur de pénétration des chlorures

D'après les résultats obtenus (figure V-41), on constate que la plus faible profondeur de pénétration de chlorure est donnée par la formulation BSP-C en fonction de l'augmentation du taux de substitution du SC en comparaison avec celle du béton de référence à tous les âges, jusqu'à une valeur maximale de 20%. Cette diminution est due à l'effet de remplissage qui réduit le volume des pores internes du béton (Higashiyama *et al.* 2012) d'une part, d'autre part le sable de déchets de céramique contient une quantité d'alumine ( $Al_2O_3$ ), ce dernier favorise la formation d'hydrates d'aluminate qui fixe les ions de chlorure et forme des composés insolubles (Kore et Vyas 2016). Aussi le SC contient le  $SiO_2$ , ce dernier donne une grande durabilité au milieu agressif (Dreux et Feast 1996).

Le même comportement est enregistré par la formulation BSP-MC, c'est-à-dire une légère diminution de la profondeur de pénétration a été observée en fonction du taux de substitution du MC à 10 et 20% par rapport au béton de référence.

En ce qui concerne la formulation BSP-M, l'introduction du SM avec un taux de 10% entraîne une légère diminution de la profondeur de pénétration pour tous les âges, ces résultats sont similaires avec ceux trouvés par **Rana et al. (2015)** en raison de la réduction des passages capillaires qui conduit à une diminution de la migration des ions chlorure (**Ulubeyli et Artir 2016**).

A 20% de taux de substitution, la profondeur de pénétration de chlorure augmente en comparaison avec le béton témoins à 28 jours, cette augmentation s'atteint dans le temps pour atteindre une valeur presque similaire à celle du béton de référence à 120 jours.

## V.5. Conclusion

Après analyse des résultats des bétons conservés dans les milieux agressifs, on peut conclure que :

- L'augmentation du pourcentage de sable de déchets de marbre influe positivement sur la résistance chimique des bétons de sable dans le milieu  $H_2SO_4$  et, le béton à base de sable de déchet de céramique présente une meilleure résistance chimique dans tous les âges.
- Dans le milieu HCl, la quantité de sable de déchets de marbre doit être limitée à 10% pour une bonne résistance chimique, et le béton de sable de déchets de céramique donne une meilleure résistance chimique avec un taux de remplacement de 20%.
- Dans les deux milieux  $CH_3COOH$  et NaCl, le remplacement de sable de déchets de céramique influe positivement sur la résistance chimique des bétons.
- Le remplacement du sable de déchets de céramique et du sable de déchets mixte réduit la profondeur de pénétration de chlorure, les meilleurs résultats ont été enregistrés par le BSP de 20% de céramiques.
- Le sable de déchets de marbre a un effet négatif sur la durabilité du BSP pour un taux de substitution de 20% dans le milieu de chlorures.

## **Conclusions générales**

## Conclusions générales

Ce travail a porté sur l'étude de la possibilité de récupération des déchets de marbre et de déchets de céramique dans le béton de sable à base des fibres végétales.

L'étude présente une démarche expérimentale suivie lors de la substitution de sable ordinaire par les sables de déchets de marbre et de céramique dans le but de produire un éco-matériau, la base de cette démarche est de déterminer les performances mécaniques et la durabilité de chaque formulation qui permet de comprendre le comportement des sables de déchets de marbre et de céramique dans le béton de sable à base des fibres végétales.

L'étude de la faisabilité de cette utilisation passe par plusieurs étapes :

Dans la première étape de cette étude, les différents composants du béton de sable, les fibres végétales, les déchets de marbre et les déchets de céramique ont été finis en revue. Les propriétés physiques et chimiques des sables de déchets utilisés ont été faites et comparées avec celles du sable ordinaire. En plus d'étudier les caractéristiques du reste des matériaux utilisés dans notre étude.

Dans la deuxième étape, nous avons mené une étude expérimentale pour comprendre l'effet de taux de substitution des sables de déchets de marbre et de céramique sur les propriétés des bétons à l'états frais, leurs influences sur la densité, air occlus, ouvrabilité et sur les propriétés des bétons à l'états durci, leurs résistances mécaniques, homogénéité et dureté à la surface, absorption d'eau par immersion et par capillarité.

Dans la dernière étape, nous avons étudié l'effet de substitution des sables de déchets de marbre et de céramique sur la durabilité du béton de sable à base des fibres végétales dans différents milieux acides (acide sulfurique, acide chlorhydrique, acide acétique et la pénétration de chlorure).

La substitution des sables de déchets recyclés dans le béton de sable à base des fibres végétales contribue à améliorer ses différentes propriétés, en fonction du type de déchets et du taux de son remplacement. D'après les résultats obtenus l'étude montre que:

L'ouvrabilité du béton augmente en fonction de l'augmentation du taux de substitution du sable recyclés (sable de déchets de marbre, sable de déchets de céramique et sable mixte déchets de marbre et céramique), ceci est due que le sable de déchets de marbre facilite la dispersion des grains de la pâte de ciment en conséquence d'effet de remplissage des vides du béton d'une part, et le module de finesse de sable de déchets de céramique qui est proche à l'optimal, ainsi leur effet de remplissage et leur coefficient d'absorption la plus faible d'autre part.

Le sable de déchets de marbre augmente la densité du béton de sable allégé, tandis le sable de déchets de céramique diminue la densité. Le mélange des deux sables donne un équilibre entre les densités de ces derniers, cela est dû aux densités différentes des sables utilisés.

L'introduction des sables des recyclés entraîne une diminution de la teneur en air occlus du béton de sable allégé, excepté pour un taux de 20% de sable de déchets de marbre.

L'introduction de sable de déchets de marbre accélère les résistances mécaniques des bétons au jeune âge, ceci est dû à la teneur élevée en chaux  $\text{CaCO}_3$  ce qui implique que l'introduction de sable de déchets de marbre dans le béton permet le décoffrage immédiat.

Dans le même contexte, l'introduction de sable de déchets de céramique contribue à améliorer la résistance à long terme (il contient un pourcentage élevé de dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ )).

La meilleure performance en compression à moyen terme et en traction par flexion à long terme obtenue pour la substitution de 20% en sable de mélange de déchets de marbre et de céramique.

Les valeurs maximales de la résistance en compression et en traction par flexion à 90 jours sont obtenues par les bétons de 20% de taux de substitution de sable de déchets de céramique.

L'ajout des sables recyclés dans le béton de sable à base des fibres de paille conduit à augmenter la résistance à la surface et donne une amélioration de l'homogénéité dans les bétons, en particulier avec la substitution de 20% du sable de déchets de céramique (SC), qui donne la résistance maximale obtenue par la combinaison scléromètre/ultrason.

La substitution de sable de déchets de céramique entraîne une diminution de l'absorption d'eau par immersion du béton de sable allégé quel que soit le taux.

L'introduction des sables recyclés avec un taux de 10% conduit à une diminution de l'absorption d'eau par capillarité en particulier pour le sable de déchets de céramique et plus le taux est élevé, plus l'absorption est importante.

Les principaux résultats obtenus concernant le comportement de béton de sable à base de paille de blé contenant des sables recyclés dans les milieux agressifs sont les suivants:

En milieu d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), l'augmentation du pourcentage de sable de déchets de marbre contribue à améliorer positivement la résistance chimique de béton de sable à base des fibres végétales. Dans le même sens, le sable de déchets de céramique offre une meilleure résistance chimique dans tous les âges.

Les bétons immergés dans l'acide sulfurique sont recouvertes après attaque d'une couche de gypse varie d'un mélange à l'autre, ce qui entraîne une déformation de la forme initiale de ces bétons.

Pour obtenir une bonne résistance chimique du béton de sable à base des fibres végétales dans un milieu d'HCL, l'introduction de sable de déchets de marbre doit être limitée à 10% de taux de substitution. En revanche, le remplacement de 20% de sable de déchets de céramique permet d'obtenir une meilleure résistance chimique.

L'introduction des SM, SC entraîne une amélioration de la résistance chimique du béton vis-à-vis les milieux acides de  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (limité à 10% pour le SM et MC) et  $\text{NaCl}$ .

La dégradation chimique par les attaques d'acides dans un béton de sable à base des fibres végétales conduit a diminué sa résistance mécanique.

L'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), chlorhydrique (HCL) et acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) sont des milieux très agressifs et nocifs pour le béton de sable allégé, par une chute de résistance en compression et en traction par flexion, ainsi par une perte de poids.

Les composants  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont des oxydes très importants pendant le processus d'hydratation et produisent les gels C-S-H, rendant ainsi le béton plus durable et plus dense.

Le sable de déchets de céramique et le sable mixte de déchets de marbre-céramique ont des effets positifs en réduisant la profondeur de pénétration des ions de chlorure dans le béton, en particulier pour la formulation (BSP-20C) à 20% de substitution de sable ordinaire par le sable de déchets de céramique.

L'introduction de sable de déchets de marbre en pourcentage élevé augmente la profondeur de pénétration des ions de chlorure dans le béton, ce qui signifie qu'il a un impact négatif sur la durabilité.

Pour mieux comprendre les phénomènes internes, une étude de la microstructure de ces bétons sera nécessaires.

Comme perspectives, on peut citer:

- Etude de la microstructure
- Continue à étudier l'effet de la substitution des sables de déchets de marbre et de céramique sur d'autres propriétés du béton de sable allégé, comme la conductivité thermique, la chaleur spécifique, le retrait, le gonflement et le gel-dégel.
- Ajustement du taux de remplacement des déchets et le dosage en paille de blé.
- Continuer à étudier la durabilité du béton dans d'autres milieux agressifs.
- Tester l'efficacité de ce nouveau type de béton dans les travaux de rénovation et réhabilitation.

## **Bibliographie**

## Bibliographie

Abdeljalil, Z (2010). Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dragage: application aux bétons de sables et granulats, Thèse de doctorat de Génie Civil et Environnemental, Université de Lille Sciences et Technologie.

ACI Committee 544, State-of-the-art report on fibre reinforced concrete, *ACI 544.1-96*.

Agrawal and Narain (1995). The sustainable paper in India, report prepared for the IIED Sustainable Paper Cycle Study, IIED, London.

Aliabdo, AA, Abd Elmoaty, AE. and Auda, EM (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Const. Build. Mater.*, 50, 28-41.

Alyousef, R, Benjeddou, O, Khadimallah, MA, Mohamed, AM and Soussi, C (2018). Study of the effects of marble powder amount on the self-compacting concretes properties by microstructure analysis on cement-marble powder pastes. *Adv. in Civil Eng.*, 1-13.

Alves, AV, Vieira, TF, de Brito, J and Correia, JR (2014). Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic. *Const. Build. Mater.*, 64, 103-13.

Andonion, R, Mai, Y,M, and Cotterell, B (1979). *Int. J. Cem. Composites*, 1, 151.

Aziz, A, M, and Paramasivam Lee, P, S, L (1984). New Reinforced Concretes 3. Concrete reinforced with natural fibres, *Surrey University Press*.

Azzouz, L, Bouhicha, M, Kenai, S et Hadjouda, M (2000). Recyclage des déchets de briques dans le béton de sable de dunes, Procédant du 1<sup>er</sup> colloque national de génie civil: matériaux de construction, université Mostaganem.

Baboo, R, Khan, NH, Abhishek, Kr, Tabin, RS and Duggal, SK (2011). Influence of marble powder/granules in concrete mix. *Int. J. Civil Struct. Eng.*, 1(4), 827-834.

Bederina, M, Gotteicha, M, Belhadj, B, Dheily, RM, Khenfer, MM and Quéneudec, M (2012). Drying shrinkage studies of wood sand concrete—effect of different wood treatments. *Const. Build. Mater.*, 36, 1066–1075.

Bederina, M, Laidoudi, B, Goullieux, A, Khenfer, MM, Bali, A and Quéneudec, M (2009). Effect of the treatment of wood shavings on the physico mechanical characteristics of wood sand concretes. *Const. Build. Mater.*, 23(3), 1311-1315.

Bederina, M, Marmoret, L, Mezreb, K, Khenfer, MM, Bali, A and Quéneudec, M (2007). Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes experimental study and modelling. *Const. Build. Mater.*, 21(3), 662-668.

Bederina, M (2000). Caractéristiques mécaniques et micro structure de béton de sable, mémoire de magistère université de Laghwat.

- Belaidi, ASE, Azzouz, L, Kadri, E and Kenai, S (2012). Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. *Const. Build. Mater.*, 31, 251-257.
- Belhadj, B, Bederina, M, Makhloufi, Z, Dheilly, RM, Montrelay, N and Quéneudéc, M (2016). Contribution to the development of a sand concrete lightened by the addition of barley straws. *Const. Build. Mater.*, 113, 513-522.
- Belhadj, B, Bederina, M, Makhloufi, Z, Goullieux, A and Quéneudéc, M (2015). Study of the thermal performances of an exterior wall of barley straw sand concrete in an arid environment. *Energy Build.*, 87, 166-175.
- Belhadj, B, Bederina, M, Montrelay, N, Houessou, J and Quéneudéc, M (2014). Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico mechanical properties of lightweight sand concrete. *Const. Build. Mater.*, 66, 247-258.
- Benaïssa, A, Morlier, P, Viguier, C et Cauvin, J, J. (1992). Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable, Annales de l'institut technique du bâtiment et de travaux publics (ITBTP) N°504, juin.
- Benaïssa, A (1992). Déformations différées du béton de sable, Thèse de doctorat de génie civil, Université de Bordeaux I;104 pages.
- Benhalilou, M. I, Belachia, M, Houari, H and Abdelouahed, A (2020). The study of the characteristics of sand concrete based on marble waste sand, *Civil and Environmental Engineering Reports*, 28(2), 130-144.
- Berdoudi, S, Hebhouh, H and Djebien, R (2017). Valorization and recycling of quarries waste as an addition in cement. *Journal of Applied Engineering Science*, 15(2), 122-127.
- Biblis, E, J, and Lo, C, F (1968). Effect on the setting of southern pine-cement mixture, *Forest Products Journal*, 1968, Vol. 18, pp. 28-34.
- Bledzki, A, K and Gassan, J (1999). Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres. *Progress in Polymer Science*, 24, 221-274.
- Bouderba, M (2018). L'industrie de la céramique à nouveau menacée par des considérations liées aux licences d'importation. Radio Algérienne, Algeria. [www.radioalgerie.dz/news/fr/article/20181015/152543.html](http://www.radioalgerie.dz/news/fr/article/20181015/152543.html).
- Boughamsa, O, Hebhouh, H, Kherref, L, Belachia, M and Rihia, C (2020). Valorization of marble's waste as a substitute in sand concrete, *Advances in Concrete Construction*, 9(2), 217-225.
- Bouzouita, S (2011). Optimisation des interfaces fibre/matrice de composites à renfort naturel, Thèse de doctorat de Génie Des Matériaux, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir - Ecole Centrale de Lyon ;193 pages.
- Brandt, M, A (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after 40 years of development in building and civil engineering, *Composite Structures, Volume 86*, 3-9.
- Casanova, P (1996). Béton renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure. Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Série ouvrages d'art OA20, France.

- Castro, J and Naaman, A,E (1981). Cement Mortar Reinforced with Natural Fibers, *ACI Materials Journal*. Volume 78-6. 69-78.
- Chauvin, J, J (1991). Le béton de sable en Union Soviétique, Bulletin de liaison du Laboratoire des Pont et Chaussées n°174, juillet-aout, Réf.3589.
- Cherif, R (2018). Etude de l'effet de la composition de la solution interstitielle des matériaux cimentaires sur les interactions multi-espèces lors des transferts de chlorures. Génie civil. Université de La Rochelle.
- Chloup-Bondant, M (1996). Etude des mécanismes réactionnels dans l'hydratation des silicates et aluminates tricalciques en présence d'un filler calcaire, Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincare, Nancy I, 156p.
- Cisse, I, K (1996). Contribution à la valorisation des matériaux locaux au Sénégal : Application aux Béton de Sables.
- Collet, F, Bart, M, Serres, R and Miriel, J (2008). Porous structure and water vapour sorption of hemp based materials. *Construction and Building Materials*, 22(6), pp. 1271-1280.
- Corinaldesi, V, Giacomo, M and Tarun, RN (2010). Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Const. Build. Mater.* 24(1), 113-117.
- Corinaldesi, V, Moriconi, G and Tarun, R N (2010). Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete, *Construction and Building Matériaux*, 21, 1950-1960.
- Debib, F et S Kenai, S (2000). Les performances du béton recyclé à base de gros et fins granulats de brique concassée, Proceedings du 1<sup>er</sup> colloque national de génie civil : matériaux de construction, université de Mostaganem.
- Desmyter, J et Rousseau, R (2004). CSTC: RTD info 26, le bâtiment se recycle.
- Djebien, R, Belachia, M and Hebhouh, H (2015). Effect of marble waste fines on rheological and hardened properties of sand concrete. *Struct. Eng. Mech.*, 53(6), 1241-1251.
- Djebien, R, Hebhouh, H, Belachia, M, Berdoudi, S and Kherraf, L (2018). Incorporation of marble waste as sand in formulation of self-compacting concrete. *Struct. Eng. Mech.*, 67(1), 87-91.
- Dreux, G et Feasta, J (1996). Nouveau Guide du Béton et de Ses Constituants. Edition Eyrolles, Paris, France.
- Farinha, C, de Brito, J and Veiga, R (2015). Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars. *Const. Build. Mater.*, 83, 194-206.
- Gameiro, F, de Brito, J and Correia da Silva, D (2014). Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry. *Eng. Struct.*, 59, 654-662.
- Ghasan, FH, Abdul Rahman, MS, Kwok, WS, Jahangir, M and Mahmoud, MT (2019). Evaluation of alkali-activated mortars containing high volume waste ceramic powder and fly ash replacing GBFS. *Construction and Building Materials* 210, 78–92.

- Guenoun, R (2003). Etude et formulation d'un béton de sable de dune, P.F.E, ENP, Alger, Algérie.
- Halicka, A, Ogradnik, P and Zegardlo, B (2013). Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. *Const. Build. Mater.*, 48, 295-305.
- Hebhoub, H, Belachia, M and Djebien, R (2014). Introduction of sand marble wastes in the composition of mortar. *Struct. Eng. Mech.*, 49(4), 491-498.
- Hebhoub, H, Kherraf, L, Abdelouahed, A and Belachia, M (2020). Introduction of marble waste sand in the composition of mortar, Chapter in Book, Use of Sandy Materials in Civil Engineering, Intech Open, 1-16.
- Hebhoub, H and Belachia, M (2011). Use of the marble wastes in the hydraulic concrete. *Nature and Technol. Rev.*, 04, 41-46.
- Hebhoub, H (2011). Granulats recyclés de substitution pour béton hydraulique « déchets de marbre », Thèse de doctorat, université de Skikda.
- Higashiyama, H, Yagishita, F, Sano, M and Takahashi, O (2012). Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate. *Const. Build. Mater.*, 26(1), 96-101.
- Ibrahim Nasr Morsi, M (2011). Properties of rice straw cementitious composite," These de doctorat de l'Universite technique de Darmstadt, Allemagne.
- Kaseva, ME and Gupta, SK (1996). Recycling-an environmentally friendly and income generating activity-towards sustainable solid waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 17(4), 299-309.
- Kingery, W, D, Bowen, H, K and Uhlmann, D, R (1976). Introduction to ceramics, Book, 2<sup>nd</sup> edition, New York.
- Kore, SD and Vyas, AK 2016. Durability of concrete using marble mining waste. *J. Build. Mater. Struct.*, 3, 55-67.
- Kriker, A, Bali, B, Debicki, G, Bouziane, M and Chabannet, M (2008). Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates, *Cement and Concrete Composites, Volume 30*, 639-648.
- Kubes, P (2004). Recyclage des bétons, habit ART.
- Laoufi, L, Senhadji, Y, Benazzouk, A, Langlet, T, Mouli, M, Laoufi, L et Benosman, AS (2016). Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique (Assessment of pozzolanic mortars sustainability exposed to chemical attack). *J.Mater. Environ. Sci.* 7(5). 1835-1845.
- Liu, R, H, Y and Huang, Y (2005). Structure and morphology of cellulose in wheat straw. *Cellulose*, 12(1):25-34.

- Li Z, Wang, X and Wang, L (2006). Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *Composites: Part A (Appl Sci Manuf)*., 37, 497–505.
- López, V, Liamas, B, Juan, A, Morán, JM and Guerra, I (2007). Eco-efficient concretes: impact of the use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete. *Biosystems Eng.*, 96(4), 559-564.
- Maisarah, A Muhd. SA and Siti, AS (2015). Effect of calcium carbonate replacement on workability and mechanical strength of Portland cement concrete. *Adv. Mater. Res.*, 1115, 137-141.
- Merta, I and Tschegg, EK (2013). Fracture energy of natural fibre reinforced concrete. *Const. Build. Mater.*, 40, 991-997.
- Mohammed, RK (2009). Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants. Université de Constantine, Université d'Orléans.
- Mohanty A, K, Misra, M, Drzal, L,T,S, Harte, B, R and Hinrichsen, G (2005). Natural Fibres, Biopolymers and Biocomposites: An Introduction, In biopolymers and biocomposites, *CRC Press LLC*, Boca Raton (FL), pp. 1-36.
- Mouli, M, Senhadji, Y, Benosman, AS et Khelafi, H (2010). Résistance aux acides et à la pénétration des ions chlorures des mortiers avec pouzzolane et fine calcaire. *Communication Science et technologie*. N°8. COST. Oran. Algérie.
- Nasri, R (2018). Gestion des déchets, le tri à la source s'impose. Le soir d'Algérie, Algeria.
- Noha, MS (2013). Effect of using marble powder in concrete mixes on the behavior and strength of R.C. slabs. *Int. J. of Current Eng. Technol.*, 3(5), 1863-1870.
- Pimienta, P, Chandellier, J, Rubaud, M, Dutruel, F and Nicole, H (1994). Etude de la faisabilité des procédés de construction à base de béton légers d'aujourd'hui. *Cahiers de CSTB*; Janv-Fevr.
- Pimienta, P et Delmotte, P (1997). Blocs de construction en granulats recyclés, *CSTB magazine*, N° 109.
- Rana, A, Kalla, P and Csetenyi, LJ (2015). Sustainable use of marble slurry in concrete. *J. Clea. Prod.*, 94, 304-311.
- Reading, T, J (1985). Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces. *Concrete International*, pp. 57-62.
- Recovering (2014). Les Déchets du BTP en France. In Recovering <http://www.recovering.fr/index.php?id=12> (Page consultée le 29 juin 2014).
- Regourd, M (1982). La résistance du béton aux altérations physiques et chimiques, dans le béton hydraulique, Presses de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées, Paris.
- Rowell, R, M, Han, J, S and Rowell, J, S (2000). Characterization and factors effecting fibre properties, in *Natural Polymers and Agrofibrés Composites*, E.L.A.L.a.M. Frolline, L.H.C., Editor. Embrapa Instrumentacao Agropecuaria: Sao Carlos, Brazil. p. 115-134.

Sablocrete (1994). Bétons de Sable: Caractéristiques et Pratiques d'Utilisation. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

Sampaio, ZLM, Martinelli, AE and Gomes, TS (2017). Formulation and characterization of structural lightweight concrete containing residues of porcelain tile polishing, tire rubber and limestone. *Cerâmica.*, (63), 530-535.

Sardinha, M, de Brito, J and Rodrigues, R (2016). Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge. *Const. Build. Mater.*, 119, 45-52.

Sedan, D (2007). Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Thèse de doctorat des Matériaux Céramiques et Traitements de Surface, *Université de Limoges*; 137 pages.

Sellami, A, Merzoud, M and Amziane, S (2013). Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetal fibers. *Const. Build. Mater.*, 47, 1117-1124.

Siddique, S, Shrivastava, S and Chaudhary, S (2018). Durability properties of bone china ceramic fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials.*, 173 323–331

Siddique, S, Shrivastava, S and Chaudhary, S (2019). Influence of ceramic waste on the fresh properties and compressive strength of concrete. *European J. Env. Civil Eng*, 23(2), 212-225.

Siddique, R (2000). Special Structural concretes, Galgotia publications.

Silva, J, de Brito, J and Veiga, R (2009). Incorporation of fine ceramics in mortars. *Const. Build. Mater.*, 23(1), 556–564.

Stephen, H, T, H, and James, M,L (1981). The chemical components and decomposition of wheat straw leaves, internodes and nodes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 32(11):1057-1062.

Taoukil, D, El bouardi, A, Ajzoul, T and Ezbakhe, H (2012). Effect of the incorporation of wood wool on thermo physical properties of sand mortars. *KSCE J. Civil Eng.*, 16(6), 1003-1010.

Topçu, İB, Bilir, T and Uygunoğlu, T (2009). Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Const. Build. Mater.*, 23(5), 1947-1953.

Ulubeyli, GC and Artir, R (2015). Properties of hardened concrete produced by waste marble powder. *Procedia-Social and Behavioral Sci.*, 195(3), 2181–2190.

Vieira, T, Alves, A, de Brito, J, Correia, JR and Silva, RV (2016). Durability related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. *Mater. Design*, 90(15), 767-776.

Weatherwax, R,C and Tarkow, H (1964). Effect of wood on the setting of Portland cement. *Forest Products Journal*, pp. 567-570.

Zivica, V and Bajza, A (2002). Acidic attack of cement-based materials a review Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures. *Construction and building materials*, 16, 215-222.

### Normes utilisées

[NFP 18-541] **Norme Française (1981)**, Béton-Essai d’Affaissement, *Éditions AFNOR*, Paris.

[NF EN 12350-6] **Norme Européenne (1999)**, Essai pour béton frais –Partie 6 : Masse volumique, *Éditions AFNOR*, Paris.

[NF EN 12350-7] **Norme Européenne (2001)**, Essai pour béton frais –Partie 7: Teneur en air-Méthode de la compressibilité, *Éditions AFNOR*, Paris.

[NF EN 12390-5] **Norme Européenne (2001)**, Essai pour béton durci –Partie 5: Résistance à la flexion sur éprouvettes, *Éditions AFNOR*, Paris.

[NF EN 12390-3] **Norme Européenne (2003)**, Essai pour béton durci –Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes, *Éditions AFNOR*, Paris.

[NF EN 480-5] **Norme Européenne (1996)**, Adjuvants pour Béton, Mortier et Coulis-Méthodes d’Essai –Partie 5 : Détermination de l’Absorption Capillaire, *Éditions AFNOR*, Paris.

[NBN B 15-215] **Norme Belge (2018)**, Essais sur béton durci-Absorption d’eau par immersion, *Éditions NBN*, Bruxelles.

[NT Build 492] **NT Build 492 (1999)**, Nord test method, concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Espoo, Finland.

[ASTM C267-96] **ASTM C 267-96 (2001)**, Méthodes d’essai standard pour la résistance chimique de Mortiers.