

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider - Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie



جامعة محمد خيضر - بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département: Génie Civil et d'Hydraulique

قسم: الهندسة المدنية والري

Réf :

المرجع :

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du Diplôme de

Doctorat en Science

Spécialité: Génie Civil

Option: Matériaux

**Contribution à l'Étude de la Durabilité du Béton Renforcé par Matériaux
Composites (Fibres de Verre AR) et de PRV sous l'Effet des Sulfates**

Présenté par:

BOUMEHRAZ Mohammed-Amin

Soutenu publiquement le **25/11/2021**

Devant le jury composé de:

Nom et prénom	Grade	Qualité	Université
Dr MEZGHICHE Bouzidi	MCA	Président	Université de Biskra
Pr MELLAS Mekki	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Pr CHABIL Hocine	Professeur	Examineur	Université de Constantine
Pr BELACHIA Mouloud	Professeur	Examineur	Université de Guelma
Dr BELAGRA Larbi	MCA	Examineur	Université de M'sila

2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je remercie avant tout Allah de m'avoir gardé en bonne santé afin de mener à bien ce projet de doctorat, et je remercie également ma famille. Je remercie mon encadreur Mr.MELLAS Mekki, Professeur à l'université de Mohamed Khider-Biskra, pour ses orientations et ses précieux conseils;

Je remercie le président de jury qui m'a honoré de bien vouloir présider cette soutenance, et je remercie également les membres de jury qui vont sans doute m'honorer par leurs remarques précieuses et d'avoir examiné de près cette thèse;

Je remercie les éléments de laboratoire des travaux publics à la wilaya de Jijel (LTPE). Je remercie le directeur de l'usine de MAGHREB PIPE à la wilaya de M'sila Mr.Brahim BAALI, chef de labo de l'usine Mr.Tamer BAALI, et tous les ingénieurs du labo surtout Soufiane;

Je remercie également mes collègues enseignants Mr. GOUDJIL Kamel et Mr. DJEGHADER Djamel pour leur aide. Et aussi je remercie mes amis Daouad, Aissa, Adel, Nabil, Alaa,

Je remercie le directeur de laboratoire étude et contrôle à la wilaya de Jijel Mr. Farid MAKHOUT. Et aussi je remercie mon oncle Essadik bourezema, Mr Abderrazek Bouhala et mon ami Fatih KAOUDI d'avoir m'aider à acheter des fibres de l'étranger.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des personnels de: laboratoire LNHC unité de Jijel, laboratoire des travaux publics sud (LTPS) unité de Ghardaïa, direction des travaux publics à la wilaya de Jijel, société des travaux maritimes MEDITRAM, société des travaux maritimes coréenne DEAWOO, groupe industriel des ciments d'Algérie (Constantine) et laboratoire d'algérienne des eaux (ADE) unité de Jijel.

Dédicaces

Je dédie ce travail:

À ma très chère mère,

Je demande pour mon père la miséricorde divine,

À ma très chère femme,

À mes très chères enfants Tadjeddine et Loudjaine,

À mes très chères sœurs,

À toute la famille et à tous mes amis.

Résumé

Les composites BRFV et PRV sont actuellement utilisés dans plusieurs applications en génie civil et en travaux publics. Significativement, l'idée de renforcement de la matrice cimentaire ou polymère par des fibres de verre a pour but d'améliorer de la durabilité et des propriétés mécaniques de la matrice tel que la résistance à la compression, à la traction, à la flexion, au cisaillement et à la rupture.

Le premier objectif de cette recherche est d'étudier l'évolution du comportement mécanique et physique (résistance à la compression, à la flexion, l'absorption capillaire et l'évolution de la masse) du béton renforcé par différents pourcentages des fibres de verre (BRFV) type ARHP ou alcalis résistants haute performance immergé dans le milieu humide (l'eau potable) et de l'eau de mer (milieu sulfatique). Alors que, le deuxième objectif est de suivre l'évolution des propriétés mécaniques et physiques (la résistance à la traction, à la flexion, dureté de Barcol et l'absorption d'eau) du PRV conservé dans différents milieux tels que l'air libre (témoin), l'eau potable et l'eau de mer (milieu agressif). Enfin, les tests sur le BRFV et le PRV sont accomplis par une étude de caractérisation chimique (DRX, IR et MEB) de la matrice cimentaire et de la résine respectivement.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que le renforcement du béton par des fibres de verre AR améliore ses propriétés mécaniques; ainsi que, la conservation des éprouvettes en béton des fibres AR dans l'eau de mer n'influent pas sur la résistance à la flexion du béton. En plus, le PRV est considéré comme un matériau stable chimiquement pour une durée de conservation d'une année dans l'eau de mer.

Mots clefs: *PRV, BRFV, ARHP, résine, sulfates, eau de mer, eau potable, compression, flexion, traction, fibres, Combo-mat.*

Abstract

GFRC and GFRP composites are currently used in several applications in civil engineering and public works. Significantly, the idea of reinforcing the cement or polymer matrix with glass fibers aims to improve the durability and mechanical properties of the matrix such as compressive, tensile, flexural, shear, and breaking strength.

The first goal of this research is to investigate the evolution of the mechanical and physical behavior of fiber-reinforced concrete (tensile strength, compressive strength, capillary absorption test, and mass evolution). This tested concrete is reinforced with different percentages of ARHP type glass fibers or high performance resistant alkalis, improving its performance in humid environments (drinking water) and in sea water (the sulfate environment). Whereas, the second objective is to follow the evolution of the mechanical and physical properties (tensile strength, flexural strength, Barcol hardness and water absorption test) of GFRP in different storage environments such as open air (control), drinking water, and sea water (aggressive environment). The tests on the GFRC and the GFRP are completed by a chemical characterization study (XRD, IR, and SEM) of the cement matrix and the resin, respectively.

As per the obtained results, we conclude that the reinforcement of concrete with AR glass fibers improves the mechanical properties of concrete, as well as that the retention of concrete specimens with AR fibers in seawater does not affect the flexural strength of the concrete. In addition, GFRP is considered to be a chemically stable material with a shelf life of one year in seawater.

Key words: *GFRP, GFRC, ARHP, resin, sulphates, sea water, drinking water, compressive, flexural, traction, fibers, Combo-mat.*

الملخص

تُستخدم مركبات الخرسانة المدعمة بالألياف الزجاجية *BRFV* و البلاستيك المدعم بالألياف الزجاجية *PRV* حاليًا في العديد من التطبيقات في الهندسة المدنية والأشغال العمومية. بشكل ملحوظ، تهدف فكرة تقوية مصفوفة الأسمنت أو البلاستيك المدعم بالألياف الزجاجية إلى تحسين المتانة والخصائص الميكانيكية للمصفوفة مثل مقاومة الانضغاط والانحناء والشد والقطع والإنكسار.

الهدف الأول من هذا البحث هو دراسة السلوك الميكانيكي والفيزيائي (مقاومة الضغط، الانحناء، الإمتصاص الشعري للماء وتغير الكتلة) للخرسانة المسلحة بنسب مختلفة من الألياف الزجاجية من *BRFV* نوع *ARHP* أو القلويات المقاومة عالية الأداء والمحفوظة في البيئة الرطبة (مياه الشرب) ومياه البحر (وسط كبريتي). إذن فالهدف الثاني لهذا البحث هو متابعة تطور الخصائص الميكانيكية والفيزيائية (مقاومة الشد، الانحناء، صلابة باركول و إمتصاص الماء) ل *PRV* في بيئات تخزين مختلفة مثل الهواء الطلق (وسط مثالي) ومياه الشرب ومياه البحر (بيئة عدوانية). بمجرد الانتهاء من الاختبارات على *BRFV* و *PRV* نكمل هذا البحث بدراسة الخصائص الكيميائية للمصفوفة الإسمنتية والراتنج بإستعمال تقنيات (*DRX, IR et MEB*).

و في النهاية، خلصنا إلى أن تقوية الخرسانة بألياف زجاج *AR* يحسن خصائص الخرسانة، كما أن الاحتفاظ بالعينات الخرسانية من ألياف *AR* في مياه البحر لا يؤثر على قوة الانحناء للخرسانة. بالإضافة إلى ذلك، يعتبر *PRV* مادة مستقرة كيميائيًا مع عمر تخزين لمدة عام واحد في مياه البحر.

الكلمات المفتاحية: *PRV*، *BRFV*، *ARHP*، الراتنج، الكبريتات، مياه البحر، مياه الشرب، الضغط، الانحناء، الشد، الألياف، كومبومات.

Sommaire

Résumé

Abstract

الملخص

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale **1**

Chapitre I: Etude bibliographique

I.1. Introduction	6
I.2. Béton de fibres	7
I.2.1. Constituants du béton de fibre	7
I.2.1.1. Ciment portland	7
I.2.1.2. Les granulats	8
I.2.1.3. L'eau	8
I.2.1.4. Les ajouts minéraux	9
I.2.1.5. Les adjuvants	9
I.2.1.6. Les fibres	10
I.2.2. Différents types des fibres	10
I.2.2.1. Les fibres de carbone	10
I.2.2.2. Les fibres de polypropylène	10
I.2.2.3. Les fibres naturelles	11
I.2.2.4. Les fibres métalliques	11
I.2.2.5. Les fibres de verre	11
I.2.3. Béton renforcé par fibres de verre (BRFV)	12
I.2.4. Caractéristiques des fibres de verre	13
I.2.5. Mise en œuvre du BRFV	14
I.2.5.1. Renfort du BRFV	14

I.2.5.2. Méthodes de mise en œuvre	15
I.2.5.3. Effet de l'orientation et de la distribution des fibres	16
I.2.5.4. Eclatement des fibres lors du malaxage	17
I.2.6. Propriétés mécaniques du BRFB	18
I.2.6.1. Résistance à la compression	18
I.2.6.2. Résistance à la traction directe	19
I.2.6.3. Résistance à la flexion	19
I.2.6.4. Interface matrice-fibres	20
I.2.6.5. Mécanisme de fissuration des fibres	21
I.2.7. Propriétés chimiques du BRFB	22
I.2.7.1. Mécanismes d'alcalinisation des fibres de verre (Leaching)	22
I.2.7.2. Mécanismes de dissolution du réseau des fibres de verre (etching)	23
I.2.7.3. Vieillessement des composites ciment-verre	23
I.3. Durabilité du béton dans le milieu agressif	24
I.3.1. L'attaque par les sulfates	24
I.3.1.1. Mécanisme d'attaque par des sulfates	25
I.3.1.2. Formation de thaumasite	26
I.3.1.3. Attaque par les sulfates externes	27
a) Sulfate de magnésium	27
b) Sulfate de calcium	27
c) Sulfate de sodium	27
d) Sulfate des alcalins	27
e) Sulfate d'ammonium	28
f) Sulfates métalliques	28
g) L'acide sulfurique	29
I.3.1.4. Paramètres influant sur l'attaque sulfatique	29
a) Type et dosage du ciment	29
b) Les ajouts minéraux	30
I.3.2. Carbonatation du béton	33
I.3.2.1. Mécanisme d'attaques par le dioxyde de carbone	33
I.3.2.2. Facteurs influant la carbonatation du béton	34
a) Humidité relative	34
b) Dosage de ciment	34
c) Les additions minérales	35

I.3.3. Corrosion des armatures du béton armé	35
I.3.4. Effet de gel et dégel	36
I.3.5. L'attaque par une solution alcaline	36
I.3.5.1. Mécanismes d'attaque du béton par des alcalis	36
I.3.5.2. Paramètres influents sur l'attaque par les alcalins	38
a) Type et dosage du ciment	38
b) Influence des ajouts minéraux	39
c) Influence de cure humide	39
I.4. Polymère renforcé en fibre de verre (PRV)	40
I.4.1. Propriétés mécaniques des composites PRF	40
I.4.2. Constituants d'un matériau composite	41
I.4.2.1. Matrices polymères	41
a) Les matrices thermoplastiques	42
b) Les matrices thermodurcissables	42
I.4.2.2. Renfort	44
I.4.3. Procédés de fabrication des PRF	46
I.4.4. Polymère renforcé par des fibres de verre (PRV)	48
I.4.5. Principaux dégradation du PRV	49
I.4.5.1. Mécanismes d'attaque par les alcalis	49
I.4.5.2. Mécanismes de corrosion des fibres	50
I.4.5.3. Effet de variation de température	51
I.4.5.4. Effet d'humidité et phénomène du vieillissement	52
I.4.6. Propriétés mécaniques du PRV	53
I.4.6.1. Résistance de traction	53
I.4.6.2. Résistance à la flexion	54
I.4.6.3. Interface matrice - renfort	55
I.5. Conclusion	56

Chapitre II: Essais sur les matériaux utilisés

II.1. Introduction	58
II.2. Etat de l'art sur les bétons de fibre	58
II.3. Matériaux utilisés pour la confection des échantillons en béton	60
II.3.1. Normes	60
II.3.2. Ciment	60
II.3.3. Ajouts minéraux	61
II.3.4. L'adjuvant superplastifiant	62
II.3.5. Fibres	63
II.3.6. Granulats	64
II.3.7. Eau de gâchage	66
II.3.8. Conclusion	66
II.4. Formulation des bétons de fibres	67
II.4.1. Etude de formulation par Dreux Gorisse	67
II.4.2. Optimisation du béton fibré	67
II.5. Confection et conservation des éprouvettes en béton de fibre	68
II.5.1. Confection des éprouvettes en béton	68
II.5.2. Malaxage et coulage du béton	69
II.5.3. Composition chimique des eaux de mer	69
II.5.4. Conservation des éprouvettes	70
II.6. Caractérisation du béton de fibre à l'état frais	71
II.6.1. Maniabilité du béton	71
II.6.2. Mesurer de l'affaissement par l'essai de cône d'Abrams	71
II.7. Caractérisation du béton de fibre à l'état durci	72
II.7.1. Essai de résistance à la compression	72
II.7.2. Essai de traction par flexion	73
II.7.3. Essai d'absorption capillaire (AC)	74
II.7.4. Essai de mesurer la profondeur de carbonatation	75
II.8. Études antérieures sur le PRV au domaine maritime	75
II.9. Matériaux utilisés pour la confection des plaques en PRV	77
II.9.1. Normes	77
II.9.2. Fibres de Verre	77

II.9.3. Additifs (catalyseur et accélérateur)	78
II.9.4. Résine	78
II.10. Confection et conservation des plaques en PRV	79
II.10.1. Confection des plaques en PRV	79
II.10.2. Conservation des plaques en PRV	80
II.11. Caractérisation des plaques du PRV	81
II.11.1. Essai de traction axiale	81
II.11.2. Essai de flexion trois points	82
II.11.3. Essai de mesure de la dureté de Barcol	83
II.11.4. Essai d'absorption d'eau	84
II.12. Analyses chimiques	84
II.12.1. Observation par microscope électronique à balayage (MEB)	84
II.12.2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	85
II.12.3. Spectroscopie infrarouge (IR)	85
II.13. Conclusion	86

Chapitre III: Caractérisation du béton durci

III.1. Introduction	88
III.2. Résultats des essais mécaniques	88
III.2.1. Résultats de l'essai de compression	88
a) Effet du pourcentage de fibres	88
b) Influence du milieu sulfatique	89
c) Influence du milieu de conservation	90
III.2.2. Résultats d'essai de flexion	91
a) Effet du pourcentage de fibres	91
b) Influence du milieu sulfatique	92
c) Influence du milieu de conservation	93
III.2.3. Evolution du rapport R_f/R_C	94
III.3. Résultats des essais physiques	95
III.3.1. Essai de l'absorption capillaire	95
a) Effet du pourcentage de fibres	95
b) Influence du milieu sulfatique	96
c) Influence du milieu de conservation	97
III.3.2. Evolution de la masse des éprouvettes	97
III.4. Résultats des essais chimiques	98

III.4.1. Mesure de la profondeur de carbonatation	98
III.4.2. Observations visuels des éprouvettes en BRV	99
III.4.3. Analyses chimique par DRX	100
III.4.4. Observation au MEB	103
a) Fibre de verre AR à l'état naturelle	103
b) Fibre de verre AR conservé dans l'eau potable	104
c) Fibre de verre AR conservé dans l'eau de mer	105
d) Patte du ciment durci témoin	106
e) Patte du ciment durci conservée dans l'eau de mer	107
III.5. Conclusion	108

Chapitre IV: Caractérisation du PRV

IV.1. Introduction	110
IV.2. Résultats des essais mécaniques	110
IV.2.1. Résultats d'essai de traction axial	110
a) Courbes contraintes - déformations	110
b) Evolution de la contrainte	111
c) Evolution de la déformation	112
d) Variation du module d'élasticité	113
IV.2.2. Résultats d'essai de flexion trois points	114
a) Courbes contraintes - déformations	114
b) Evolution de la contrainte	114
c) Evolution de la déformation	115
d) Variation du module d'élasticité	117
IV.2.3. Résultats de l'essai dureté de Barcol	117
IV.2.4. Résultats d'essai d'absorption d'eau	118
IV.3. Essais chimiques	119
IV.3.1. Observations visuels des éprouvettes conservées dans différents milieux	119
IV.3.2. Analyses des spectres d'infrarouge (IR)	120
IV.3.3. Observation MEB	121
a) Observation du PRV témoin	121
b) Observation du PRV conservé dans l'eau potable	122
c) Observation du PRV conservé dans l'eau de mer	123
IV.4. Conclusion	124

Conclusion générale et perspectives	
1. Conclusion générale	126
2. Recommandations et perspective	128
Références bibliographiques	130
Annexes	149

Liste des abréviations

BRFV: béton renforcé par des fibres de verre

PRV: polyester renforcé en fibre de verre

CRS: ciment résistant aux sulfates

HR: Humidité relative

T: Température

ARHP: alcali-résistante haute performance

LA: coefficient de Los Angeles

MDE: coefficient de micro deval

ES: équivalent de sable

E/C: rapport eau/ciment

HR: haute résistance

HM: haut module

THM: très haut module

AR: fibres de verre résistant aux alcalis

PRE-67: résine de polyester insaturée de type Isophtalique

PRF: polymères renforcés par des fibres

PRFC: polymère renforcé de fibres de carbone

PRFA: polymère renforcé de fibres d'aramide

PET: poly-téréphtalate éthylénique

PPS: polysulfure de phénylène

PP: polypropylène

PC: polycarbonate

PAI: Polyamide-imide

PES: polyéther-sulfone

PEEK: polyéther-éther-cétone

T: témoins

EP: eau potable

Liste des abréviations

EM: eau de mer

BCR: blocs cubiques rainurés en béton

LTPE: laboratoire travaux publics est de Jijel

LNHC: laboratoire national d'habitat et construction-Jijel

LEC: laboratoire étude et control du béton-Jijel

LPCMA: laboratoire physique, couches minces et applications université de Biskra

Liste des symboles

CEM III: ciments du laitier de haut fourneau

CEM II: ciments pouzzolaniques

CEM V: ciments composites

CEM I: ciment Portland artificiel

R_f : résistance à la flexion

R_C : résistance à la compression

F: Charge maximale

A: Section de l'éprouvette chargée

a: est la cote de l'éprouvette chargée

A_C : Absorption capillaire d'eau

P: Poids d'eau

t: Durée de conservation des éprouvette

S: Surface de l'éprouvette contactée avec l'eau

f_C : résistance de rupture à la compression du béton

f_{st} : résistance de rupture par traction du béton

f'_C : Résistance à la compression du béton a l'âge de 28 jours

V_f : fraction volumique de fibres

ΔL : Allongement de l'éprouvette sous l'effet de charge maximale de traction

L: Longueur de l'éprouvette

σ_f : Contrainte à la rupture par flexion au milieu de la longueur de l'éprouvette

P: Charge maximale appliquée au milieu de la longueur de l'éprouvette

b: Largeur de l'échantillon

D: Déflexion maximale au milieu de la longueur de l'échantillon

ε_f : Déformation de l'éprouvette

h: Epaisseur moyenne de l'échantillon

L: Longueur de support

Liste des symboles

D: Déflexion maximale au milieu de la longueur de l'échantillon

A: Absorption d'eau

D: Poids initiale de l'éprouvette

W: Poids après immersion

Liste des figures

N°	Figures	Pages
	Chapitre I	
01	Figure (I, 01): Fibres de verre coupées type E.	12
02	Figure (I, 02): Vue idéalisée d'une fibre de verre contenant 204 mono-filaments de 10 μm de diamètre.	14
03	Figure (I, 03): Schéma représentatif du comportement des types de fibres de verre (AR) mélangé dans le béton ou avec l'eau, et (b) Images MEB des fibres.	17
04	Figure (I, 04): Courbes charge – flèche en fonction du temps de malaxage d'après Dibecki en 1984.	17
05	Figure (I, 05): Résistance à la compression en fonction des teneurs en fibres (AR): (a) Pour béton (b) Pour mortier.	18
06	Figure (I, 06): Résistance à la traction du béton en fonction des teneurs en fibres de verre (AR).	19
07	Figure (I, 07): Rapport R_f/R_C en fonction de la teneur en fibre.	20
08	Figure (I, 08): Variation de la résistance à la flexion avec l'âge du BRPV.	20
09	Figure (I, 09): Mécanismes des interactions fibres-matrice.	22
10	Figure (I, 10): Modélisation physique de la déliaison et de l'extraction des fibres par un essai d'extraction de la fibre.	22
11	Figure (I, 11): Observation par MEB la surface des fibres attaquées par le sulfate d'ammonium de la concentration de 0,25 mol/l.	28
12	Figure (I, 12): Effet des teneurs en C_3A et C_3S sur l'expansion du béton.	30
13	Figure (I, 13): La relation entre la résistance à la compression, la masse des matériaux mis à l'échelle et l'absorption d'eau dépend du type de ciment et de la teneur en laitier.	31
14	Figure (I, 14): Résistance à la compression et à la flexion des mortiers avec différents pourcentages d'ajout de laitier.	32
15	Figure (I, 15): Image MEB de laitier granulaire de haut fourneau d'une pâte de mortier avec différentes tailles de particules.	32
16	Figure (I, 16): Evolution de la résistance à la compression et en flexion du béton avec ajouts minéraux.	32
17	Figure (I, 17): Essai de détermination de la profondeur de carbonatation du béton.	33
18	Figure (I, 18): Relation entre la profondeur de carbonatation et le dosage en	34

Liste des figures

- ciment des éprouvettes en béton.*
- 19 *Figure (I, 19): La profondeur de carbonatation du béton contenant des cendres volantes en fonction de l'humidité relative.* 35
- 20 *Figure (I, 20): Présentation des composants nécessaires pour une réaction alcalis-agrégats.* 37
- 21 *Figure (I, 21): (a) Pourcentage des pertes de poids et (b) de résistance des différents types du béton de haute résistance immergées aux solutions de H₂SO₄ et de HCl.* 38
- 22 *Figure (I, 22): Résultats de l'expansion du béton de basse et de haute alcalinité dans différents milieux au laboratoire.* 39
- 23 *Figure (I, 23): différents formes des tissus de renfort: (a) unidirectionnel, (b) toile ou taffetas, (c) serge, (d) satin, (e) multi-triaxial et (f) tridimensionnelles.* 46
- 24 *Figure (I, 24): Processus de fabrication manuels: (a) moulage au contact, et (b) moulage par projection simultanée.* 48
- 25 *Figure (I, 25): Images MEB des échantillons en PRV (a) témoins, et (b) immergées dans une solution alcaline à 40 °C pendant 60 jours.* 50
- 26 *Figure (I, 26): Effet de variation des températures au PRV immergé dans l'eau de mer: (a) la résistance à la traction, (b) déformation et (c) le module d'élasticité.* 52
- 27 *Figure (I, 27): Evolution de la consommation d'eau des matrices de résine pure.* 53
- 28 *Figure (I, 28): evolution de la résistance à la traction des barres en PRV conservées dans deux types des solutions HP-SWSSC et N-SWSSC.* 54
- 29 *Figure (I, 29): variation du module de flexion des plaques en PRV exposées dans l'eau de mer.* 54
- 30 *Figure (I, 30): courbes (a) la contrainte de rupture (b) la résistance ultime pour des échantillons de la résine vinylester - verre E (VE) et du résine polyester – verre E (PE).* 55

Chapitre II

- 31 *Figure (II, 01): Analyse DRX du ciment CRS.* 61
- 32 *Figure (II, 02): Analyse granulométrique du laitier de haut fourneau.* 62
- 33 *Figure (II, 03): Analyse DRX (a) du laitier, (b) la fumée de silice.* 62
- 34 *Figure (II, 04): Fibres de verre ARHP 67/36 anti-crack.* 64
- 35 *Figure (II, 05): Courbes d'analyses granulométriques des granulats (sable, gravier 3/8 et 8/15).* 65

Liste des figures

36	<i>Figure (II, 06): Analyse DRX du sable.</i>	66
37	<i>Figure (II, 07): Analyse DRX du gravier 3/8.</i>	66
38	<i>Figure (II, 08): Analyse DRX du gravier 8/15.</i>	66
39	<i>Figure (II, 09): Conservation des éprouvettes en béton de fibres dans l'eau de mer.</i>	71
40	<i>Figure (II, 10): Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.</i>	72
41	<i>Figure (II, 11): Essai de traction par flexion des éprouvettes en béton de fibres conservées dans différents milieux.</i>	73
42	<i>Figure (II, 12): Essai de l'absorption capillaire des éprouvettes en béton au labo LTPE.</i>	74
43	<i>Figure (II, 13): Essai de mesure la profondeur de carbonatation des éprouvettes en béton de fibre.</i>	75
44	<i>Figure (II, 14): (A) Face des fibres coupées et (B) face du tissu de Combo Mat 600/300. (C) Tissu du verre C.</i>	77
45	<i>Figure (II, 15): Conservation des plaques en PRV dans différents milieux.</i>	81
46	<i>Figure (II, 16): Essai de traction axiale des éprouvettes en PRV conservées dans différents milieux.</i>	82
47	<i>Figure (II, 17): Essai de flexion trois points des éprouvettes en PRV.</i>	83
48	<i>Figure (II, 18): Essai de détermination de dureté de Barcol.</i>	83
49	<i>Figure (II, 19): Essai d'absorption d'eau des éprouvettes en PRV.</i>	84

Chapitre III

50	<i>Figure (III, 01): Résistance à la compression des éprouvettes du BRFV témoin.</i>	89
51	<i>Figure (III, 02): Résistance à la compression des éprouvettes en BRFV conservées dans l'eau de mer.</i>	90
52	<i>Figure (III, 03): Résistance à la compression des éprouvettes en BRFV conservées dans différents milieux.</i>	91
53	<i>Figure (III, 04): Résistance de flexion des éprouvettes en BRFV témoins.</i>	92
54	<i>Figure (III, 05): Résistance de flexion des éprouvettes en BRFV conservées dans l'eau de mer.</i>	93
55	<i>Figure (III, 06): Résistance de flexion des éprouvettes en BRFV conservées dans différents milieux.</i>	94
56	<i>Figure (III, 07): Rapport R_f/R_C des éprouvettes en BRFV conservées</i>	95

Liste des figures

dans différents milieux.

57	<i>Figure (III, 08): Absorption capillaire du BRFV témoins.</i>	96
58	<i>Figure (III, 09): Absorption capillaire des éprouvettes en BRFV conservées dans l'eau de mer.</i>	96
59	<i>Figure (III, 10): Résultats d'absorption capillaires des éprouvettes en BRFV conservées dans différents milieux.</i>	97
60	<i>Figure (III, 11): Evolution des masses des éprouvettes en BRFV conservées dans différents milieux.</i>	98
61	<i>Figure (III, 12): Mesure de la profondeur de carbonatation des éprouvettes en BRFV conservées dans différents milieux.</i>	99
62	<i>Figure (III, 13): éprouvette du béton fibré après 365 jours de conservation dans différents milieux.</i>	100
63	<i>Figure (III, 14): Résultats des analyses DRX des éprouvettes en BRFV témoins.</i>	102
64	<i>Figure (III, 15): Résultats des analyses DRX des éprouvettes en BRFV conservées dans l'eau de mer.</i>	103
65	<i>Figure (III, 16): Observation MEB des fibres à l'état naturel.</i>	104
66	<i>Figure (III, 17): Observation MEB des fibres du BRFV témoin.</i>	105
67	<i>Figure (III, 18): Observation MEB des fibres du BRFV conservé dans l'eau de mer.</i>	106
68	<i>Figure (III, 19): Observation MEB du BRFV témoin.</i>	107
69	<i>Figure (III, 20): Observation MEB du BRFV conservé dans l'eau de mer.</i>	108

Chapitre IV

70	<i>Figure (IV, 01): Courbe ($\sigma_t - \varepsilon_t$) des échantillons conservés dans différents milieux à l'âge de 180 jours.</i>	110
71	<i>Figure (IV, 02): Courbe ($\sigma_t - \varepsilon_t$) des échantillons conservés dans différents milieux à l'âge de 365 jours.</i>	111
72	<i>Figure (IV, 03): Contrainte à la rupture par traction axiale des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.</i>	112
73	<i>Figure (IV, 04): Déformation à la rupture par traction axiale des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.</i>	112
74	<i>Figure (IV, 05): Module d'élasticité de traction des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.</i>	113
75	<i>Figure (IV, 06): Courbe ($\sigma_f - \varepsilon_f$) des échantillons conservés dans différents milieux.</i>	114

Liste des figures

	<i>milieux à l'âge de 180 jours.</i>	
76	<i>Figure (IV, 07): Courbe ($\sigma_f - \varepsilon_f$) des échantillons conservés dans différents milieux à l'âge de 365 jours.</i>	114
77	<i>Figure (IV, 08): Contrainte à la rupture par flexion des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.</i>	115
78	<i>Figure (IV, 09): Déformation à la rupture par flexion des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.</i>	116
79	<i>Figure (V, 10): Module d'élasticité de flexion des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.</i>	117
80	<i>Figure (IV, 11): Dureté de Barcol du PRV conservées dans les différents milieux.</i>	118
81	<i>Figure (IV, 12): Absorption d'eau des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.</i>	118
82	<i>Figure (IV, 13): Surfaces des éprouvettes conservées dans différents milieux.</i>	119
83	<i>Figure (IV, 14): Résultats IR du PRV conservé (A) Eau de mer (B) Eau potable (C) témoins, à l'âge de 365 jours.</i>	121
84	<i>Figure (IV, 15): Observation MEB du PRV témoin.</i>	122
85	<i>Figure (IV, 16): Observation MEB du PRV conservé dans l'eau potable.</i>	123
86	<i>Figure (IV, 17): Observation MEB du PRV conservé dans l'eau de mer.</i>	124

Annexes

87	<i>Figures (01): Ajouts minéraux: (A) Laitier de haut fourneau (B) Fumée de silice.</i>	151
88	<i>Figures (02): Essais d'identification des granulats.</i>	152
89	<i>Figure (03): Confection des éprouvettes en béton au laboratoire LEC.</i>	156
90	<i>Figure (04): Etapes de confection des plaques en PRV dans différents milieux.</i>	159

N°	Tableaux	Pages
Chapitre I		
01	<i>Tableau (I, 01): Composition chimique des fibres de verre.</i>	13
02	<i>Tableau (I, 02): Propriétés mécaniques et physiques des fibres de verre.</i>	14
03	<i>Tableau (I, 03): Propriétés mécaniques des composites en PRF.</i>	41
04	<i>Tableau (I, 04): Propriétés physiques et mécaniques des résines.</i>	43
05	<i>Tableau (I, 05): Caractéristiques des matériaux de renforcement en fibres de verre.</i>	44
Chapitre II		
06	<i>Tableau (II, 01): Propriétés physiques et mécaniques du ciment CRS</i>	60
07	<i>. Tableau (II, 02): Analyses chimiques du ciment CRS</i>	60
08	<i>Tableau (II, 03): propriétés physico-chimique de l'adjuvant TEKSUPERFLOW 2000 R.</i>	63
09	<i>Tableau (II, 04): Propriétés physico-mécaniques des fibres AR HP 67/36 anti-crack.</i>	63
10	<i>Tableau (II, 05): Composition chimique des fibres AR HP 67/36 anti-crack utilisée.</i>	63
11	<i>Tableau (II, 06): Propriétés physiques et mécaniques des granulats.</i>	64
12	<i>Tableau (II, 07): propriétés chimiques des granulats.</i>	65
13	<i>Tableau (II, 08): Masses des constituants du béton de fibres.</i>	68
14	<i>Tableau (II, 09): Résultats des analyses des paramètres minéralogiques globaux de l'eau de mer de la ville Jijel</i>	70
15	<i>Tableau (II, 10): Propriétés physiques des Combo Mat du verre E et C.</i>	78
16	<i>Tableau (II, 11): Propriétés mécaniques de la résine Isophtalique.</i>	78
17	<i>Tableau (II, 12): Propriétés physiques de la résine Isophtalique.</i>	79
18	<i>Tableau (II, 13): Résultats du test de viscosité selon le procédé Brookfield.</i>	79

Liste des tableaux

19	<i>Tableau (II, 14): Résultats du test de temps du durcissement de la résine.</i>	80
----	---	----

Chapitre III

20	<i>Tableau (III, 01): Intensité des pics DRX de la portlandite, de carbonate de calcium et de l'ettringite.</i>	101
----	---	-----

Annexes

21	<i>Tableau (01): Normes des essais sur le ciment et des ajouts minéraux.</i>	149
22	<i>Tableau (02): Normes des essais d'identification des granulats.</i>	149
23	<i>Tableau (03): Normes pour la confection et les tests sur les échantillons en béton.</i>	150
24	<i>Tableau (04): Coefficient correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de l'angularité des granulats.</i>	153
25	<i>Tableau (05): Masses des constituants du béton.</i>	154
26	<i>Tableau (06): Résultats des essais de maniabilité du béton fibré.</i>	155
27	<i>Tableau (07): Normes des essais sur les fibres de verre.</i>	157
28	<i>Tableau (08): Normes des essais sur la résine polyester insaturée.</i>	157
29	<i>Tableau (09): Normes de caractérisation des échantillons en PRV.</i>	157
30	<i>Tableau (10): Analyse chimique du laitier de haut fourneau et de la fumée de silice.</i>	158
31	<i>Tableau (11): Résultats des tests sur les fibres de verre types E et C au laboratoire MAGHREB PIPE.</i>	158
32	<i>Tableau (12): Résultats des essais mécaniques et physico-chimiques sur les échantillons en béton.</i>	160
33	<i>Tableau (13): Résultats des essais mécaniques et physico-chimiques sur les échantillons en PRV.</i>	161

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est un matériau de construction qui constitue des granulats (sable, gravillons) et un liant hydraulique (ciment portland). Ce dernier réagit avec l'eau pour former une pâte de ciment durcie qui jouant le rôle de la colle, afin que les granulats soient connectés entre eux pour former ce matériau rigide. La résistance finale du béton, qui est utilisée comme référence dans les calculs est celle obtenue à l'âge de 28 jours. La qualité du béton dépend de plusieurs facteurs tels que: la nature, le dosage des composants utilisés (ciment, granulats, eau), rapport E/C, les ajouts minéraux et les adjuvants, le malaxage, le transport, la vibration et le mode de cure humide. Généralement, le béton de ciment qui contient de 2% à 5% de vides peut provoquer une perte de la résistance mécanique à la compression de 10% à 30% respectivement. D'autre part, ces vides à l'intérieur du béton sont considérés soit comme des bulles d'air piégé pendant le malaxage, soit comme des espaces qui restent lorsque l'excès d'eau contenu dans le béton est évaporé. Le terme durabilité signifie que l'élément est capable de résister aux actions communes: des facteurs atmosphériques, charges extérieures,.... La durabilité du béton armé des constructions est un facteur très important dans les domaines de génie civil et travaux publics. Étant donné, que le béton peut affecter de multiples altérations, ces dernières atteignent soit la matrice cimentaire soient les armatures, et par fois les deux. Leurs origines sont très nombreuses: liées à la mise en œuvre du béton et dégradations physico-chimiques du béton dans le milieu agressif. [1, 2, 3, 4]

Au début des années 1960 Romualdi, Batson et Mandel ont publié des articles sur l'idée de renforcement du béton de ciment Portland par des fibres. Ce dernier se compose de deux composants principaux: la fibre et la matrice, tandis que la matrice cimentaire peut être considérée comme un composite avec plusieurs constituants, il est montré le premier composant principal du BRFV, et la fibre représente la deuxième partie essentielle [5, 6]. La région de Jijel est caractérisée par un climat méditerranéen, ayant des températures élevées en Été atteignant plus de 35°C, des précipitations moyennes annuelles qui atteignent de l'ordre de 1100mm/an aux mois d'automne, et d'une vitesse maximale du vent de 20.3m/s au mois de décembre. Dans notre zone d'étude (Jijel), nous enregistrons plusieurs problèmes liés à la durabilité des ouvrages maritimes en béton armé, telle que: la corrosion des armatures du béton armé, destruction et l'éclatement d'enrobage du béton, fissures superficielles. Ces dégradations sont causés en raison de la présence des chlorures et des sulfates dans les eaux de mer, de tel sorte l'attaque chimique du béton est principalement due à la réaction chimique de la portlandite (Ca(OH)_2)

contenue dans la pâte de ciment hydraté avec des sulfates ou des chlorures. L'eau de mer est un environnement agressif; couramment les dégradations du béton maritime liée au degré d'immersion de l'eau de mer, dans le cas d'immersion totale l'attaque chimique est modérée pour un béton peu poreux, dans le cas d'immersion alterné ou semi-immersion, les différentes actions physiques (érosion par les vagues et le sable, absorption et évaporation répétées de l'eau, cristallisation expansive des sels, fissurations due à la corrosion des armatures) sont combinées à des attaques chimiques pour aggraver les conditions d'exposition. [4, 7, 8]

Les premiers matériaux en PRF (polyester renforcé par des fibres) utilisaient des fibres de verre incorporées dans des résines polymères mises au point par l'industrie pétrochimique en plein essor après la seconde guerre mondiale. Le polyester renforcé en fibre de verre ou (PRV) est un matériau polymère utilisé pour la fabrication des conduites, des éléments de raccordement. Il est généralement préféré grâce à leurs facilités d'installation et leur très longue durée de vie, même en présence de fluides agressifs. Ce matériau supporte une plage de pH de 1 à 10 et de bonne résistance à la corrosion, d'une durée de vie théorique allant jusqu'à 50 ans [9, 10].

Le but de cette recherche est d'étudier la durabilité du béton renforcé par des fibres de verre (BRFV) alcalis résistants (AR) et du PRV à base de la résine polyester dans un milieu agressif réel. Le BRFV confectionné dans cette étude présente des fractions volumiques de 0%, 1%, 3% et 5% de verre; il est fabriqué en à l'aide de la formulation de Baron-Lesage pour déterminer les pourcentages massiques des constituants tel que (le sable, gravier de classes granulaires 3/8 et 8/15, ciment CRS, eau, laitier, la fumée de silice, superplastifiant et différents % de fibres de verre). Un programme expérimental des essais mécaniques, physiques et chimiques est procédé au laboratoire sur le béton avec et sans fibre pour évaluer son comportement dans l'eau de mer (ou milieu sulfatique fortement agressif), et par conséquent est comparé à celui du béton témoin. Le PRV est fabriqué sous forme des plaques carrées par la technique de moulage au contact, y compris ces constituants: résines Isophthalique (PRE-67), fibres en verres (des Combo Mat du verre E et des tissus du verre C), additifs (catalyseurs et accélérateurs). Les plaques en PRV sont conservées dans différents milieux, a pour objet d'étudier leurs comportements par des essais effectués au laboratoire. Les questions posées:

- Est-ce que les fibres de verre peuvent améliorer le problème des dégradations du béton dans les sulfates des eaux de mer?
- Est-ce que le PRV renforcé par des fibres de verre type Combo-Mat offre une meilleure durabilité dans les eaux de mer ?

La présente thèse est structurée en quatre chapitres:

Introduction générale

Après l'introduction générale, le premier chapitre est une étude bibliographique, elle présente les caractéristiques des fibres et le béton des fibres de verre type (AR), notion de la durabilité et les causes principales des dégradations du béton, les différentes propriétés le polyester renforcé par des fibres en verre (PRV) et les caractéristiques des matériaux composites, enfin les différentes propositions pour améliorer la durabilité du béton fibré et des matériaux composites;

Le deuxième chapitre a été consacré aux essais d'identification des matériaux de constructions utilisés et la préparation des éprouvettes en BRV et en PRV;

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats des essais effectués sur des échantillons en BRV et les éventuelles interprétations;

Les résultats obtenus des essais mécaniques, physiques et chimiques sur le PRV et leurs interprétations sont présentés au quatrième chapitre;

Et enfin, cette étude est terminée par une conclusion générale, des recommandations et des perspectives de recherches.

Chapitre I

Etude bibliographique

Chapitre I: Etude bibliographique

I.1. Introduction

Depuis une quarantaine d'années, des recherches sur les bétons renforcés par des fibres ont été faites afin d'améliorer la durabilité de la matrice cimentaire dans l'environnement extérieure. Les composites «ciment - fibres» et «bétons - fibres» sont une avancée technologique importante dans les domaines de génie civil et des travaux publics: dalles, dallages industriels, voussoirs, pieux, voûtes de galeries, panneaux d'isolation thermique, panneaux décoratifs, réparation des dégradations des ouvrages [1]. Le rôle essentiel des fibres est l'amélioration des caractéristiques mécanique dans la matrice cimentaire selon leurs utilisation (nature et forme) soient: la cohésion du béton frais, la déformabilité avant rupture, la résistance à la traction par flexion, la résistance aux chocs, la résistance à la fatigue, la résistance à l'usure, la résistance mécanique du béton aux jeunes âges, la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures, la tenue au feu et la résistance à l'abrasion. Malgré la disponibilité des informations dans la littérature sur le béton renforcé par des fibres, la relation entre ses propriétés mécaniques pour prédire la résistance à 28 jours est assez limitée (la résistance à la flexion et l'indice de renforcement des fibres, la résistance à la rupture et l'indice de renforcement des fibres). [11]

La durabilité du béton est liée à leur capacité de résister aux dommages causés par des facteurs externes (exposition aux températures et l'humidité, attaque par les sulfates ou les chlorures,...), et internes (réaction chimique entre ingrédients du béton, rapport eau /ciment élevé, et des changements volumétrique dus à l'hydratation de la pâte) [4, 12]. Les altérations du béton par solutions chimiques se fait par une attaque concomitante des sulfates, des chlorures, des acides, et des solutions salines, ces dernières entraînent couramment la dissolution de la chaux. Mais le plus souvent, en association avec cette dissolution, la formation des nouveaux composés donne naissance à: la diminution de la résistance mécanique, fissuration et déformation du matériau, baisse du pH, augmentation de la porosité du béton. [13]

Les composites PRF sont actuellement utilisés dans plusieurs applications en génie civil, telles que tiges de renforcement et tendons, enveloppes pour la rénovation sismique de poteaux et armatures collées à l'extérieur pour le renforcement de murs, poutres et dalles, ponts en composite, ponts systèmes structuraux composites, les tours de transmission et les systèmes de charpente. Le faible coût, le niveau élevé de déformation ultime peuvent atteindre, la résistance aux chocs, la tolérance aux dommages, et la facilité générale de traitement à travers un large éventail de techniques rend à l'utilisation du renforcement par des fibres très attrayant [14,

15]. Selon Jianye Wen, le comportement et les propriétés des composites sont déterminés par trois facteurs: le facteur intrinsèque des propriétés des constituants, la forme et la disposition structurelle des constituants, ainsi que l'interaction entre les constituants. Les propriétés des constituants déterminent l'ordre général ou étendue des propriétés du composite. La forme et dimensions, la disposition structurelle, la composition et la distribution des constituants confèrent aux composites leur polyvalence et contribuent à la performance globale. L'interaction entre ces constituants a également joué un rôle critique dans l'amélioration des propriétés mécaniques des composites. [16]

I.2. Béton de fibres

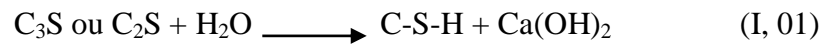
I.2.1. Constituants du béton de fibre

Le béton de fibre se compose des granulats (sables et graviers) collés entre eux par un liant hydraulique ou le ciment [17]. Le ciment Portland est le matériau le plus largement utilisé dans le domaine de construction, et il réagit avec l'eau pour former un produit durci [18]. Les fibres sont utilisées principalement pour renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures; ou elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives [4, 11]. L'hydroxyde de calcium est le principal hydrate concerné par les agressions chimiques du béton (dissolution, recombinaison éventuelle telle que carbonatation, etc.), donc pour améliorer la durabilité du béton dans les milieux agressifs, il est préférable d'utiliser des ajouts minéraux, tels que: des pouzzolanes pour la consommation d'hydroxyde de calcium et la formation d'hydrates, les laitiers de haut fourneau peuvent limiter la présence de chaux et améliorer la résistance du béton dans le milieu sulfatique [19]. Les adjuvants, en particuliers les super plastifiants ont permis d'augmenter les performances des bétons, de même les différentes familles des superplastifiants et des plastifiants sont des polymères dont la structure générale du motif comprend un groupement hydrophobe et un groupement hydrophile ionisé, neutralisé par un contre ion [20].

I.2.1.1. Ciment portland

Il existe plusieurs types des ciments soient: les ciments (CEM III) ou les ciments du laitier de haut fourneau, elles présentaient une meilleure résistance à l'attaque acide lactique-acétique. Les ciments (CEM II) ou les ciments pouzzolaniques, les ciments (CEM V) ou les ciments composites, et les ciments (CEM I) ou ciment Portland artificiel [21]. Les principaux constituants du ciment portland sont les suivants: silicate tricalcique C_3S ($3CaO.SiO_2$) dont le pourcentage entre (45% à 60%), silicate bi calcique C_2S ($2CaO.SiO_2$) de pourcentage varie de 15% à 30%, aluminat tricalcique C_3A ($3CaO.Al_2O_3$) de pourcentage comprise entre 6% et 12%,

alumino-ferrite tetracalcique C_4AF ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) a un pourcentage de 6% à 8%, et de 5% du gypse [22]. La réaction d'hydratation d'une pâte de ciment est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment, cette réaction est principalement associée à l'hydratation des deux composants de silicate de calcium, ils occupent d'environ de 75% de la masse total du ciment portland (environ de 50% de C_3S et 25% de C_2S) [18, 23]. L'action d'hydratation du ciment peut résumer sous forme de l'équation chimique (I, 01).



Les produits finaux de la réaction chimique sont les silicates de calcium hydraté (C-S-H) et la portlandite ($Ca(OH)_2$), le gel C-S-H qui jouent un rôle de colle qui solidarise les granulats entre eux pour former un matériau rigide, il représente environ de 60 - 70% de la pâte de ciment entièrement hydratée et il est responsable de la plupart des propriétés mécanique du béton [18, 24]. On peut citer que la cinétique d'hydratation du C_2S est beaucoup plus lente que celle du C_3S , les C_3S sont hydratés totalement pour augmenter la résistance mécanique du béton à court terme, l'hydratation plus lente du C_2S après 28 jours, conduit à l'amélioration de résistance à long terme. L'hydratation des aluminates tricalcique (C_3A) est très rapide, et il est formé des sufloaluminate dont la forme la plus connue est l'ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 31H_2O$), la prise est très courte que le ciment est riche en C_3A [4].

I.2.1.2. Les granulats

Les granulats (sables, gravillons) forment 60 à 80 % du volume de béton, généralement ces granulats doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. De plus, ils peuvent être d'origine détritique, sédimentaire, métamorphique ou éruptive, et selon leur origine, on distingue des granulats roulés, extraits de ballastières ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière [17]. En outre, ces agrégats sont en résultant principalement de fragments des roches caractérisés par une résistance élevée. La résistance mécanique à la compression du béton dépend: du rapport eau/ciment, degré de compactage, la liaison entre le mortier et les agrégats, la forme et la granulométrie des agrégats. [25]

I.2.1.3. L'eau

La quantité d'eau joue un rôle important dans la préparation du béton et du mortier. Les impuretés dans l'eau peuvent interférer avec la prise du ciment et peuvent avoir un effet négatif sur la résistance. Les constituants chimiques présents dans l'eau peuvent participer aux réactions chimiques et affecter ainsi la mise en place, durcissement et développement de la résistance du

mélange [26]. L'eau de gâchage du béton doit être raisonnablement propre et exempts d'huile, d'acide, d'alcali, et des matières organiques ou d'autres substances délétères. [27]

I.2.1.4. Ajouts minéraux

Ces ajouts peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés, améliorer notablement les performances et la durabilité du béton grâce à leurs propriétés physico-chimiques. Ils existent sous forme de produits naturels comme la pouzzolane ou sous forme de déchets comme le laitier granulé [17, 28]. Le laitier de haut fourneau granulé broyé améliore la résistance des bétons dans les milieux sulfatiques, car il consomme une grande quantité de la portlandite produits pendant l'hydratation du ciment portland, plus encore il dilue ses aluminates et diminue le pH du mélange [29]. Naceri et Messaoudene en 2006, ont trouvés que le remplacement de 30% du ciment par l'ajout de laitier provoque une augmentation de la surface spécifique de 3500cm²/g à 4200cm²/g des mortiers et des bétons, et améliore donc leurs résistances mécaniques [30].

La fumée de silice est composée de 95% des particules pur de silice sous forme non cristalline, dont les dimensions inférieures à 1µm. Il est obtenu comme sous-produit au cours du processus de fabrication du silicium élémentaire et des alliages de Ferro silicium. L'addition de la fumée de silice améliore la durabilité du béton en réduisant sa perméabilité, et encore conduisant à la réduction de la teneur en hydroxyde de calcium qui résulte une résistance plus élevée sous d'attaque sulfatique [31]. En France, le taux de l'ajout des fillers calcaires et siliceux autorisé ne dépasse pas 5% du poids de ciment. Ces additions sont des particules fines dont des dimensions 0/100µm issues de produit de concassage par substitution des sables de carrières présentant un taux élevé de fillers calcaire. Leur utilisation a été généralisée comme additif dans les bétons durables et les bétons à hautes performances [32].

I.2.1.5. Adjuvants

Le mot adjuvant est dérivé du mot latin adiuvaré, ce qui signifie aide ou aider [33], Ces adjuvants peuvent être classés selon leurs propriétés physicochimiques, leurs origines et leurs mécanismes d'action [34]. Ils sont ajoutés au béton frais en faibles quantités ou moins de 3% du poids de ciment, les principaux adjuvants sont:

- Les retardateurs de prise sont additionnés au béton frais pour prolonger le temps de durcissement, et leur utilisation dans le transport du béton aux grandes distances ou la mise en place par pompage, en particulier par temps chaud;
- Les accélérateurs de prise sont utilisés pour assurer une acquisition plus rapide de résistance au béton durci. Les plastifiants qui permettent d'obtenir des bétons frais à consistance

parfaitement liquide, donc très maniables, plus encore ils réduisent la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton;

- Les entraîneurs d'air qui facilitent la mise en place des bétons et les protègent du gel, cet adjuvant est ajouté dans le but d'améliorer le réseau des bulles d'air. En plus, Nicola a obtenu que l'absence de l'entraîneur d'air pendant le malaxage du béton exposé aux effets gels-dégels peut provoquer une diminution très remarquable du module d'élasticité et de la résistance à la compression; [17, 35]
- L'utilisation des super plastifiants permettent de réduire la valeur du rapport eau/ciment (E/C) est d'environ 30% sans aggraver le comportement rhéologique de la pâte de ciment ou béton. Donc, plus E/C faible conduit à un béton plus durci dense et moins poreux. La diminution de la porosité sont amélioré les caractéristiques mécaniques de la pâte du ciment durci. [36]

I.2.1.6. Les fibres

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature (naturelles ou artificielles), leur diamètre, leur longueur, leur forme et leur état de surface [1]. Le renforcement du béton ou de mortier par des fibres a pour but d'améliorer la résistance mécanique (à la flexion, traction, cisaillement et rupture), augmenter la rigidité des matériaux composites, et l'amélioration du comportement du matériau composite en fatigue et en résistance aux chocs. Les fibres les plus utilisés au renforcement de la matrice cimentaire, notamment: les fibres de carbone, de verre, de propylène, métallique et polymères [37, 38].

I.2.2. Différents types des fibres

I.2.2.1. Fibres de carbone

Elles sont trouvés sous forme filamenteuses continues, dont le diamètre varie entre 7 et 15µm. Ces fibres sont inertes dans les environnements agressifs, ils n'absorbent pas de l'eau et plus stables chimiquement que les fibres de verre dans les environnements alcalins, et aussi de bonnes résistances à l'abrasion et stables à des températures élevées, mais encore une faible relaxation comparée à celle des aciers extensibles précontraints. Le mal comportement des stratifiés renforcés par des fibres de carbone aux chocs et à l'abrasion devraient également être signalés. En comparaison avec les fibres d'acier, elles ont d'une faible densité et d'un rapport résistance/densité plus élevé [39, 40].

I.2.2.2. Fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène sont des fibres synthétiques utilisées pour améliorer la résistance du béton ou de mortier en quantités faibles (ne dépasse de 0,5% de volume du béton).

Ces fibres ont une bonne adhésion avec ciment, mais elles se dégradent sous l'effet des températures élevées. De plus, tous les chercheurs confirment qu'un béton plus résistant lorsqu'il s'agit de la teneur la plus élevée en fibre de polypropylène [41, 42].

I.2.2.3.Fibres naturelles

La matrice cimentaire renforcé par des fibres en bois a été fabriqués à partir des fibres agricoles non ligneuses (sisal, bambou, lin,...), et d'autres déchets lingo-cellulosiques (bagasse, paille de blé et papier boues d'usines). Des recherches antérieures avaient montré que le principal inconvénient des panneaux de mortier renforcé par des fibres de bagasse, qui étaient de vulnérabilité à l'humidité et leurs propriétés mécaniques sont réduites par rapport aux panneaux fabriqués avec des fibres de polypropylène ou des fibres de verre [43].

I.2.2.4.Fibres métalliques

Les fibres d'acier sont existantes au marché sous plusieurs formes telles que (droites, lisses, ondulées, à crochets...) [1]. Ces fibres ont tendance à se déformer rapidement; cependant, ils contribuent à empêcher le gonflement du béton et l'éclatement à travers l'adhérence et la résistance au cisaillement. Ces fibres peuvent augmenter l'adhérence avec la pâte du ciment, les études précédentes ont montré que l'ajout de fibres d'acier dans le béton augmente la résistance à la compression de 10% jusqu'à 20% par rapport au béton ordinaire [44].

I.2.2.5.Fibres de verre

La technique du chauffage et de l'étirage du verre en fibres fines existe depuis des milliers d'années, mais la première production commerciale de la fibre de verre était en 1936 [45]. Généralement, ces fibres sont trouvées sous forme des filaments très fins (simples, tressés, tissés...), avec des diamètres de 2 jusqu'à 13×10^{-6} m. La résistance et le module des fibres de verre peuvent se dégrader avec une température croissante, parcequ'elles sont considérées comme des matériaux isotropes, et des coefficients de dilatation thermique inférieures à celui de l'acier. Il existe plusieurs types des fibres de verre, on peut les citer:

- A (silicate soda-calcique) verre, durable et de bonne résistivité électrique que de verre E;
- D (borosilicate) verre est d'un faible constant diélectrique pour les applications électriques;
- E (aluminosilicate de calcium) verre est d'une teneur maximale en alcalis de 2% au poids utilisé pour des zones de haute résistance à la corrosion;
- AR (résistant aux alcalis) verre, composés de silicates de zirconium alcalin utilisés pour le renforcement du ciment et/ou du béton;
- R (aluminosilicate de calcium) verre, utilisés pour le renforcement là où la résistance est accrue et une résistance à la corrosion acide sont requises;

- S (aluminosilicate de magnésium) verre, utilisés pour les substrats textiles ou le renforcement des structures composites qui nécessitent une résistance élevée, la stabilité sous des températures extrêmes, et des environnements corrosifs. [46]



Figure (I, 01): Fibres de verre coupées type E. [47]

I.2.3. Béton renforcé par fibres de verre (BRFV)

L'utilisation d'un système du béton renforcé par des fibres de verre a été reconnue par les Russes aux années 1940. Au début des années 1960 Romualdi, Batson et Mandel ont publié des articles sur l'idée de renforcement du béton de ciment Portland par des fibres, et les premières applications du béton de fibre de verre sous l'appellation (BRFV) se sont portées sur la fibre de verre E [5, 6]. Les composites renforcés par des fibres sont généralement définis comme des composites avec deux composants principaux: la fibre et la matrice, alors que la matrice cimentaire peut être considérée comme un composite avec plusieurs composants, il était le premier composant principal du BRFV, et la fibre représente la deuxième composant principal. La fibre est supposée discontinue et, sauf indication contraire, orientée au hasard et distribuée dans le volume de composite. La fibre et la matrice sont supposées fonctionner ensemble, par liaison, et fournissent la synergie nécessaire pour faire une composite efficace. La matrice quelle que soit une pâte de mortier ou du béton, est supposée contenir tous les agrégats et additive spécifiés [48].

Le BRFV a été largement utilisé aux cinq dernières décennies, son application principale a été reconnue comme panneaux de revêtement en raison de ses bonnes propriétés mécaniques, bonne résistance au feu, facilité de moulage et inhibition des processus de corrosion. D'autre part, les composites ciment-verre également été utilisé comme un coffrage permanent pour la restauration de bâtiments, dans les égouts, dans les tunnels, comme murs de protection des berges et comme barrières acoustiques. Récemment, le béton en fibre de verre a été considéré

comme un matériau approprié pour des applications structurelles tels que les sols industriels, les toits préfabriqués, les télécommunications tours et peut être utilisées avec des armatures d'acier comme renforcement [49]. De plus de 90% des fibres de verre dans le monde est fabriquée à partir du verre E, mais à bien des égards, ses propriétés physico-chimiques ne répondent pas aux exigences technologiques modernes, et aussi il entraîne une réduction de la résistance en raison de la réactivité aux alcalis dans la pâte du ciment hydraté. Significativement, le renforcement par des fibres de verre améliore la résistance à la fracture et la résistance au choc du béton; actuellement les fibres de verre résistant aux alcalis (verre AR) sont communément utilisées à cet effet. Ces fibres offrant une durabilité à long terme, mais d'autres tendances en termes de perte de résistance ont été remarquées, c'est pourquoi un meilleur résultat de la durabilité a été prouvé lorsque le verre AR a été utilisé avec le ciment développé faiblement alcalin [6, 50].

I.2.4. Caractéristiques des fibres de verre

Il existe deux types de fibres de verre: continue et discontinues; qui est différencié par leurs propriétés, leur finalité et technologie de production. Couramment, les fibres continues sont caractérisées par une grande longueur et disposition parallèle rectiligne des filaments dans les brins; alors que les fibres discontinues à une longueur limitée et un arrangement sinueux. Le processus de formation des fibres continues est relié par la viscosité du verre utilisé et son variation avec la température, la limite supérieure de cristallisation, et la vitesse de cristallisation, ainsi que la tension superficielle. Tandis que, la combinaison de ces facteurs permet un large intervalle de travail et la continuité de formation des fibres. La composition chimique des différents types de fibre de verre est présentée au tableau (I, 01).

Tableau (I, 01): Composition chimique des fibres de verre. [51]

Constituants	Verre A	Verre E	Verre C	Verre D	Verre S	Verre AR
SiO ₂	60.0- 71.8	52.0- 65.0	53.0- 65.0	50.0-80.0	54.0 - 79.9	50.0- 71.0
Al ₂ O ₃	1.0- 3.0	9.0- 16.0	3.8 - 16.0	0 - 20.0	12.6 - 32.0	1.0- 23.0
B ₂ O ₃	-	0 - 13.0	0 - 5.5	15.0 - 45	-	-
CaO	8.0 - 8.8	14.0- 25.0	12.0 - 15.8	0 - 5.0	0 - 20.0	0 - 14.0
MgO	2.5 - 3.8	0 - 8.0	2.0 - 3.5	0 - 4.0	2.0- 17.0	0 - 11.0
TiO ₂	-	0 - 6.0	0 - 2.0	0 - 5.0	0 - 10.0	0 - 6.2
ZrO ₂	0 - 6.0	-	0 - 4.2	-	0 - 0.7	0.1 - 21.5
ZnO	0 - 6.0	0 - 5.0	0 - 1.7	-	-	0 - 0.1
Na ₂ O + K ₂ O	12.0- 15.0	0 - 1.0	7.0- 11.5	0 - 5.0	0 - 0.4	8.3 - 19.0
FeO ₃	0.5 - 2.0	0 - 1.0	0 - 2.0	-	0 - 0.6	0 - 4.7
F ₂	-	0 - 3.0	0 - 0.3	-	-	-

Les deux types des fibres de verre les plus connues sont de verre E et verre S. Le verre E à un coût plus faible par rapport aux autres fibres de verre, il est disponible au marché, d'une bonne résistivité électrique et mieux résistants dans les milieux acides. En revanche, le verre S a une résistance, une rigidité et une déformation ultimes supérieures que celle E, mais il est plus coûteux et plus sensible à la dégradation dans les environnements alcalins que le verre E. Par ailleurs, les autres types soient du verre C est utilisé pour sa stabilité chimique dans des environnements acides, mais les fibres de verre AR sont développées pour minimiser les pertes du poids et améliorer leurs résistance dans les environnements alcalins; de plus, ces fibres ont une haute résistance à la traction et d'excellentes propriétés isolantes. Enfin, les propriétés physiques et mécaniques des différents types des fibres sont montrées au tableau (I, 02).

Tableau (I, 02): Propriétés mécaniques et physiques des fibres de verre. [51, 52]

Paramètres	Verre E	Verre S	Verre C	Verre AR
Contrainte de rupture à la traction (GPa)	3.45	4.3	3.03	2.5
Module d'élasticité (GPa)	72.4	86.9	69.0	70.0
Déformation (%)	4.8	5.0	4.8	3.6
Coefficient de poisson	0.2	0.22	-	-
Densité (g/cm ³)	2.54	2.49	2.49	2.78
Diamètre (µm)	10.0	10.0	4.5	-
Allongement à rupture (%)	5.0	2.9	7.2	-

I.2.5. Mise en œuvre du BRFV

I.2.5.1. Renfort du BRFV

L'amélioration de la durabilité des composites ciment-verre dépend aussi de l'interaction des constituants du béton et du comportement au vieillissement de l'interface fibre-ciment [53].

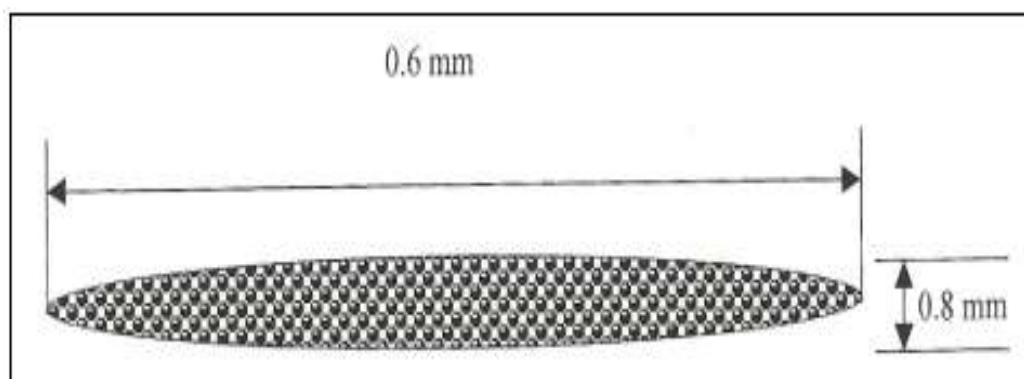


Figure (I, 02): Vue idéalisée d'une fibre de verre contenant 204 mono-filaments de 10µm de diamètre. [14]

Actuellement, la majorité des travaux de recherches sur les composites de la matrice cimentaire renforcés par des fibres de verre, ont montré que ces fibres subissent des dégradations à long terme, les fibres de verre de type alcali-résistant (Cem Fil) sont spécialement conçues pour inhiber l'attaque par les matrices cimentaires par l'adjonction d'oxyde de zirconium (ZrO_2) dans la composition chimique des fibres [54]. Couramment le verre AR comprend un pourcentage de 15 à 20% de la masse en zirconium, ce dernier peut améliorer considérablement la durabilité du verre dans les environnements alcalins, mais ne résout pas entièrement les problèmes de dégradation [50]. Généralement, Les fibres de verre sont produites dans un processus dans lequel le verre fondu est étiré sous forme de filaments. Généralement, 204 filaments sont tirés simultanément et ils se solidifient en refroidissant à l'extérieur du réservoir chauffé, ils sont ensuite rassemblés sur un tambour dans un brin composé de 204 filaments. Avant de remonter, les filaments sont recouverts d'un ensimage qui protège les filaments contre les effets du temps et de l'abrasion, ainsi que les liant s'ensemble dans un brin [55]. Ces brins de fibre de verre sont coupés dans un pistolet à la taille requise, couramment des longueurs comprennent entre 25 et 40mm. La matrice cimentaire renforcés en fibres de verre ont été développés principalement pour la production des composites avec des fibres coupées d'une teneur entre 2 et 4% (habituellement 3,5%) du poids, dont des longueurs entre 6 à 12mm, car les fibres plus longues limitent la maniabilité du mortier ou du béton, alors que ces fibres de verre sont appliqués principalement en feuille mince pour les revêtements. Dans ces applications, les fibres jouent un rôle de renforcement primaire et leur contenu est compris entre 5 et 15% du volume [56].

I.2.5.2.Méthodes de mise en œuvre

Dans cette partie, nous citons les différentes méthodes de mise en œuvre du BRVF :

- a) **Méthode Prémix:** dans cette méthode le malaxage du BRVF a été effectué par lots, en utilisant des équipements de mélange du béton conventionnel. Les fibres de verre coupé (AR) sont ensuite mélangées avec des pourcentages de 2 à 4% du poids, car la concentration des fibres élevées est pénible le malaxage et les fibres deviennent orientées de manière aléatoire en trois dimensions. Plus encore la longueur de la fibre prédécoupée est généralement de 6 ou 12mm, mais d'autres longueurs aussi sont disponibles. Couramment le compactage du prémix est obtenu par le mélange emballé à la main ou à la truelle dans un moule fraîchement rempli, qui est ensuite soumis à une vibration externe. Lorsqu'on utilise des agrégats grossiers, le mélange et le compactage peuvent endommager les fibres et réduire la résistance du béton, pour cela le verre est ajouté à la fin de mélange; [57, 58]

- b) Méthode de projection:** c'est une méthode de pulvérisation du mélange en têtes, qui peut être adaptée à la production dans l'usine en ligne continue. Ce processus de pulvérisation automatique consiste de pulvériser une boue de ciment assez humide et de couper simultanément les fils de fibres sur un récipient à ailettes perforé avec un média filtrant. L'aspiration élimine les excès d'eau et aide l'opération de compactage. Cette technique utilise un pourcentage élevé des fibres (jusqu'à 5%), et en résultant une orientation bidimensionnelle des fibres, cela permet une bonne distribution des fibres et un composite très compacté d'une bonne résistance mécanique; [57, 59]
- c) Enroulement filamentaire:** l'enroulement filamentaire consiste à envelopper une armature continue en fibre de verre (AR) imprégnée par un matériau matriciel frais, autour d'un mandrin définissant la forme finale du produit fini. Cette technique a été effectuée par une teneur des fibres allant jusqu'à 18% du volume. Le procédé convient très bien à la fabrication de produits tubulaires creux. Il a été utilisé aux États-Unis et l'Australie pour la fabrication des poteaux en BRFFV et les tuyaux;
- d) Extrusion:** cette technique n'a pas été largement adoptée, en raison du coût élevé de l'équipement et l'incertitude quant à son exploitation adéquate. Elle est utilisée pour la fabrication des panneaux et des éléments similaires dans lesquels une ou les deux faces doivent être lisses, et qui étaient nécessaires en grand nombre avec une très grande répétition;
- e) Lay-up manuel:** ce procédé permet de produire des formes simples plat et à trois dimensions. Le moule est recouvert d'une matrice unie, puis doublé d'un mat, d'un tissu ou d'un filet. Une autre couche de la matrice fraîche appliquée pénétrant dans le tissu et la couche suivante du tapis ou d'un tissu de fibres de verre placée. Le processus est répété jusqu'à ce que l'épaisseur requise soit atteinte, la rendant proche de celle du béton armé en textile. Cette technique produit un béton transmettant la lumière, où un élément en vrac constitué des couches de verre parallèles. [58]

I.2.5.3. Effet de l'orientation et de la distribution des fibres

Fibres de verre AR coupées est intégralement dispersées, à la fois ayant une longueur de 6mm ont été choisis comme supplément renforcement, cette fibre dispersée est d'un diamètre de 20 μ m, tandis que les filaments individuels des fibres intégrales est de 13 μ m de diamètre. La fibre intégrale contenue au moyenne d'environ de 100 filaments, lors de malaxage du béton, ou contacter avec l'eau, à courte dispersion des fibres sont réparties dans la pâte fraîche en milliers et des millions de filaments à prédominance simple. Les fibres coupées intégral restent collées ensemble et agissent comme de courtes pièces defil multi filament dans le mélange selon la figure (I, 03) [60]. Même dans un mélange fluide, il est difficile de disperser les fibres de

verre par une technique du malaxage normale car ils ballent autour des lames du mélangeur. Les bétonnières spéciales peuvent disperser jusqu'à 5% du volume des fibres de verre, mais pour des fibres longues et de grande proportion peut être dispersée en pulvérisant simultanément des mèches de fibre de verre coupées, et coulis de ciment ou de plâtre sur un support filtrant supporté de manière appropriée. L'orientation aléatoire des fibres coupées en trois dimensions peut améliorer la résistance en flexion d'un BRFV, mais la répartition non uniforme peut engendrer des zones de fragilité vis à vis de la fissuration [58, 61].

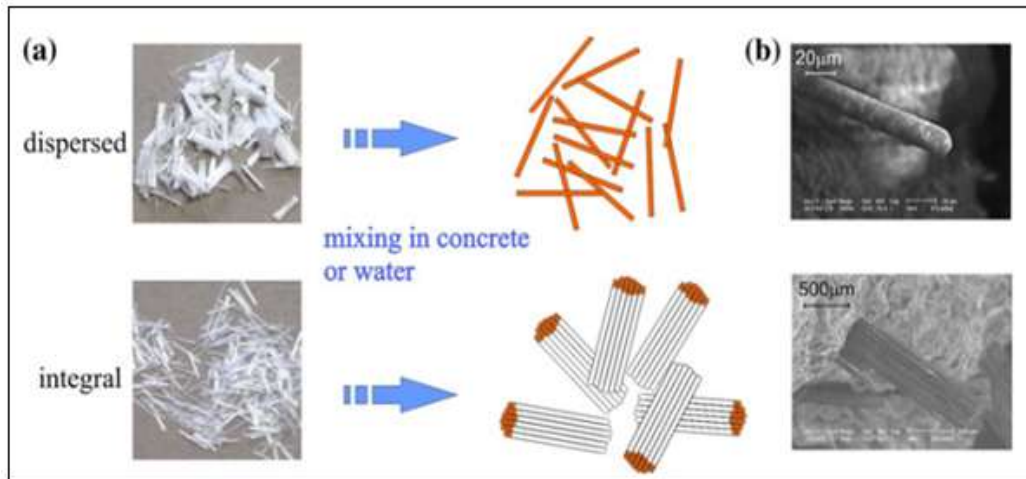


Figure (I, 03): Schéma représentatif du comportement des types de fibres de verre (AR) mélangé dans le béton ou avec l'eau, et (b) Images MEB des fibres. [60]

I.2.5.4. Eclatement des fibres lors du malaxage

Les caractéristiques du BRFV dépendent des propriétés de son ingrédient, soient les proportions du mélange, la méthode de compactage et d'autres contrôles lors de la mise en œuvre, compactage, et durcissement [62].

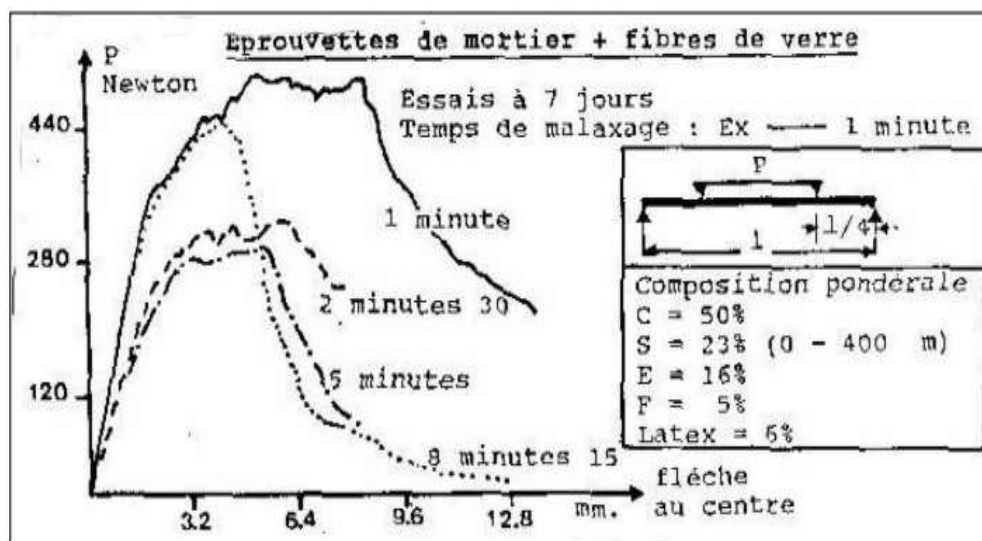


Figure (I, 04): Courbes charge – flèche en fonction du temps de malaxage d'après Dibecki en 1984. [63]

Une fois, les fibres de verre coupées sont ajoutées en deuxième étapes avec une vitesse faible du malaxage (dans le but d'obtenir une ouvrabilité maximale, une facilité de dispersion dans le volume et pour diminuer les dommages aux fibres). La patte fraîche peut être emballée à la main ou à la truelle dans un moule ou coulé, puis cette coulée doit être accompagnée d'une vibration de l'élément entier, soit sans vibration, si un mélange auto-compactant est utilisé [58, 59]. La figure (I, 04) montre l'influence du temps de malaxage sur le comportement en flexion du mortier renforcé par fibres de verre E. Donc, pour 1 minute de malaxage les mèches de fil sont peu endommagées et confèrent un matériau de bonne résistance, mais l'augmentation du temps de malaxage au-delà de 1mn ou entre 2mn et 5mn, il peut provoquer un éclatement des mèches de fils et une chute de résistance. Alors que les fibres sont défibrées, et la résistance augmente à cause d'une meilleure répartition du latex le long des fibres mais le matériau devient plus fragile pour 8mn de malaxage [59, 63].

I.2.6. Propriétés mécaniques du BRV

En générale, les interactions fibre-matrice affecte leurs propriétés mécaniques du BRV, tel que: résistance à la compression, à la flexion et à la traction, module d'élasticité, déformation maximale de rupture par traction, résistance aux chocs, ductilité et durabilité [64].

I.2.6.1. Résistance à la compression

Actuellement, de nombreuses études expérimentales ont étudié du BRV soient par l'utilisation des différents types et pourcentages des fibres, modification de composition de la matrice et les dimensions des échantillons. Le test de compression montre que l'addition de 0,5% du verre au béton pouvait améliorer leur résistance, puisque nous savons que la fibre de verre a une bonne capacité d'absorption d'eau [65].

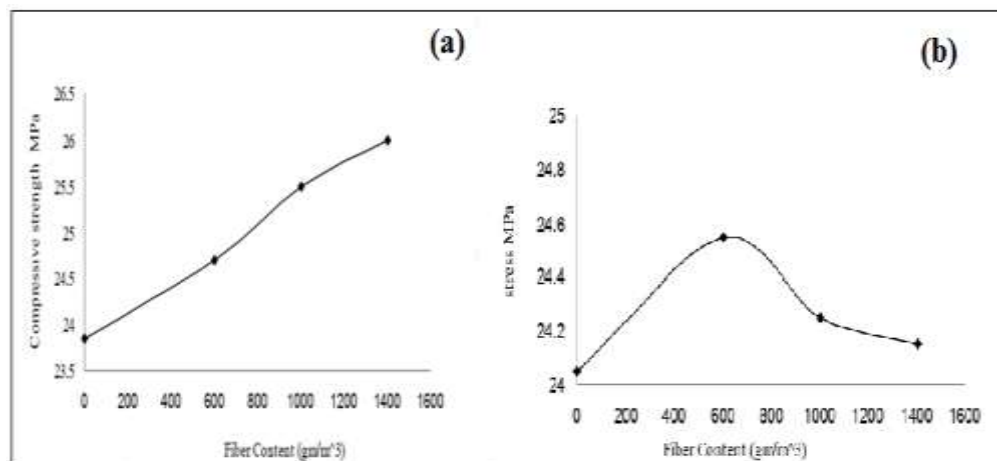


Figure (I, 05): Résistance à la compression en fonction des teneurs en fibres (AR): (a) Pour béton (b) Pour mortier.

La figure (I, 05) montre que l'ajout des fibres de verre (AR) dans le béton augmente sa résistance à la compression jusqu'à (3.6, 7.1 et 9.3)% pour des teneurs en fibres de (600, 1000 et 1400)g/m³ respectivement. D'autre part, on a enregistré une augmentation de 2% de la résistance à la compression du mortier pour un taux des fibres de 600g/m³, et des regressions de (0.8 et 0.4)% de résistance pour des teneurs en fibres de (1000 et 1400)g/m³ respectivement [6].

I.2.6.2. Résistance à la traction directe

Abdullah et Jallo ont obtenue des accroissements de la résistance à la traction du BRFV (type AR) jusqu'à (5.4, 7.7 et 17)% pour des teneurs en fibres de (600, 1000 et 1400)g/m³ respectivement, comme présenté à la figure (I, 06).

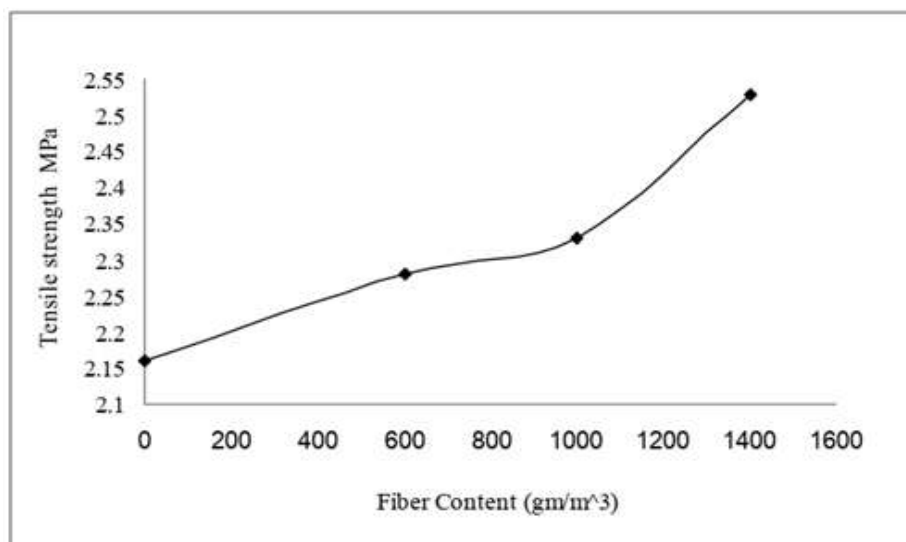


Figure (I, 06): Résistance à la traction du béton en fonction des teneurs en fibres de verre (AR). [6]

I.2.6.3. Résistance à la flexion

Takagi a conclut que les fibres de verre orientées aléatoirement influent sur la résistance à la flexion du BRFV et de mortier, alors que l'augmentation de la résistance est en fonction de l'augmentation de la teneur en fibres [47]. La figure (I, 07) représente l'évolution du rapport R_f/R_C (Résistance à la flexion / Résistance à la compression) des mortiers (CCV) en fonction de la teneur des fibres, et ceci pour les trois longueurs de 3, 6 et 12mm, on a constaté que les fibres les plus longues sont les plus efficaces [66]. Kiran en 2016, a trouvé que l'augmentation de la teneur en fibres (mais pas beaucoup) a entraîné une augmentation de la résistance à la flexion du BRFV par rapport au béton ordinaire (Voir la figure (I, 08)) [67].

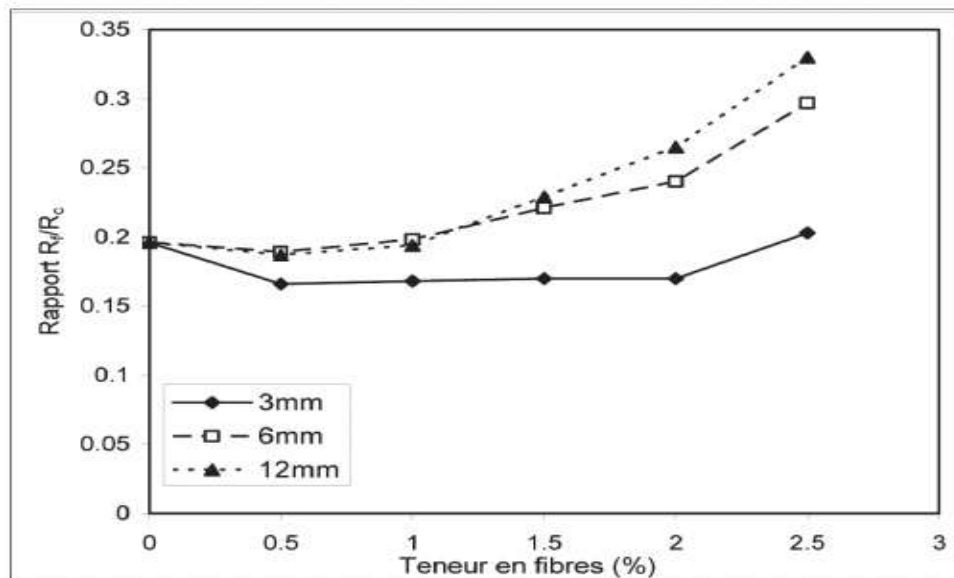


Figure (I, 07): Rapport R_f/R_c en fonction de la teneur en fibre [66].

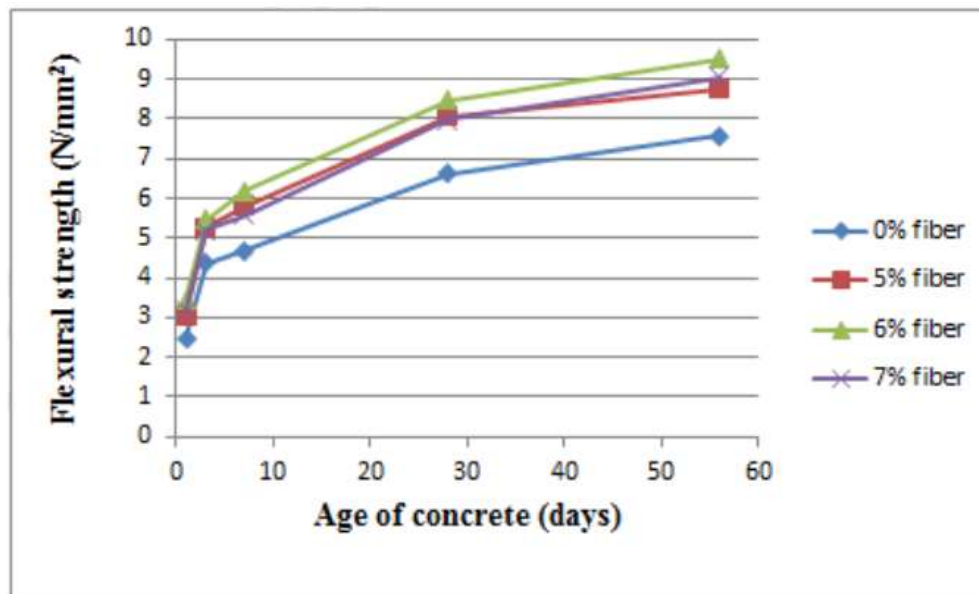


Figure (I, 08): Variation de la résistance à la flexion avec l'âge du BRFV [67].

I.2.6.4. Interface matrice-fibres

L'interface fibre-matrice des composites ciment-verre (CCV), aussi appelée zone de transition interfaciale ou auréole interfaciale, elle affecte leurs comportement contrainte-déformation, la contrainte locale, l'initiation et la propagation des dommages des échantillons testés [68, 69]. Sa morphologie de cette zone dépend au type, la géométrie et du traitement de surface des fibres; la composition de la matrice et la technologie de fabrication des pièces en CCV, dans certains cas, cela peut changer considérablement avec le temps [56]. La performance physique des fibres dans cette matrice et par conséquent, la performance du CCV est dépendante de la microstructure d'une matrice et des fibres de la zone d'interface où les

fibres et la matrice sont en contact. Cette zone est importante non seulement sur la surface externe du faisceau de fibres mais également à l'intérieur du faisceau lui-même [14]. Selon Bentur et al en 1995, la taille de la section des fibres a influé considérablement sur la microstructure de l'interface fibre-matrice, on peut citer:

- Les microfibrilles dont un diamètre inférieur ou égal à celui des particules de ciment ($\leq 70 \mu\text{m}$), la microstructure de l'interface est dense, peu différente de celle de la matrice. Ceci est dû au fait que les diamètres des fibres et des particules de ciment sont du même ordre de grandeur;
- Les fibres en faisceau, d'une microstructure de l'interface ou autour des filaments se distinguent selon son emplacement interne ou externe, plus encore les hydrates formés ne pouvant pénétrer dans le faisceau;
- Les macro-fibrilles avaient un diamètre supérieur à celui des particules de ciment, et d'une microstructure de l'interface ressemble à celle de l'auréole de transition des granulats dans le béton. Sa formation est due entre autre à un effet de paroi et de ressuage au niveau de l'interface. Elle peut se composer d'un film duplex, d'une couche discontinue des cristaux issus de l'hydratation du ciment et d'une zone poreuse [59, 69].

La force de liaison de l'interface fibre-matrice d'un béton fibré est influencée par les caractéristiques de la fibre et de la matrice et l'interaction entre les deux; ces caractéristiques sont: la type et géométrie des fibres, alignement (orientation) de la fibre, le traitement de surface des fibres, la résistance et composite de la matrice, et taux de charge [65].

I.2.6.5.Mécanisme de fissuration des fibres

La fissuration du béton se produit par des déformations particulièrement faibles car elle présente une résistance à la traction remarquablement faible (environ 7-11% de sa résistance à la compression), alors que le béton est classé comme un matériau fragile. La mécanique de la liaison interfaciale fibre-matrice est extrêmement sophistiquée du fait de différents modes d'interaction linéaires et non linéaires: liaison physique/chimique, décollement interfacial, déformations de la matière plastique, déformations de la liaison et glissement par frottement, le pontage décollement-arrachement selon la figure (I, 09), est généralement considéré comme le mode de défaillance le plus possible du béton fibré. Le comportement des liaisons fibre-matrice est évalué en mesurant la charge de traction et le glissement correspondant lors décollement de la fibre. Ce test peut fournir des informations importantes sur la liaison fibre-matrice du béton fibré, car il simule le décollement et l'arrachement des fibres selon la figure (I, 10). La largeur d'ouverture de la fissure est définie par le glissement de la fibre y compris les effets d'élongation et de lissage.

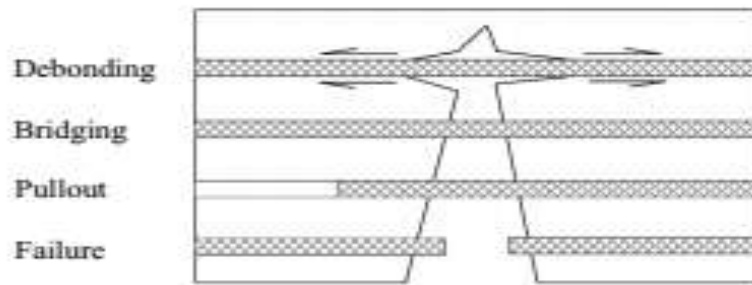


Figure (I, 09): Mécanismes des interactions fibres-matrice.

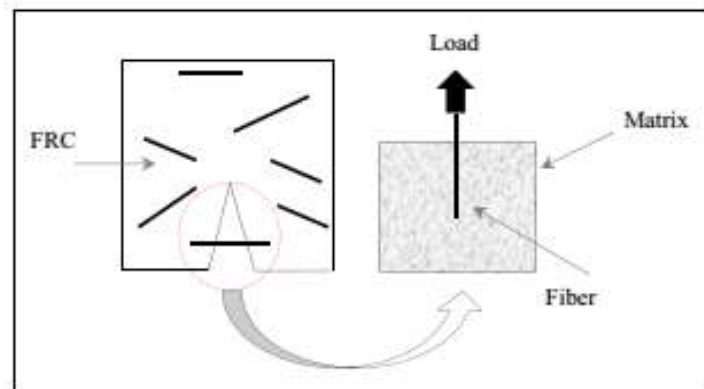


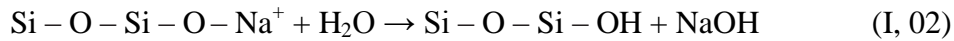
Figure (I, 10): Modélisation physique de la déliaison et de l'extraction des fibres par un essai d'extraction de la fibre [65].

I.2.7. Propriétés chimiques du BRVF

I.2.7.1. Mécanismes d'alcanisation des fibres de verre (Leaching)

Des recherches approfondies ont été menées sur l'effet des solutions alcalines sur les fibres de verre et il est bien établi que, lorsqu'elles sont placées dans des solutions alcalines à pH élevé, similaire à la chimie du béton, les fibres de verre se dégradent rapidement avec une perte de ténacité et de force, et par un processus de piqûre, de gravure, de lixiviation et de fragilisation. Les fibres sont endommagées par la combinaison des deux processus principaux: à savoir, d'une attaque chimique par le milieu alcalin du ciment, ou la concentration et la croissance des produits d'hydratation entre les filaments individuels. Les fibres de verre alcalis résistants (AR) résistent généralement aux attaques des alcalis mais ne sont pas complètement inertes. Dans un milieu alcalin ou d'un pH du béton est supérieure à 10 [15]. Ces fibres peuvent se dégrader par la réaction de "lixiviation" ou l'étape "leaching" est la terminologie anglaise couramment utilisée, elle est la réaction la plus importante de la dissolution du verre dans l'eau. Cette réaction est commencée par la dissolution immédiate des ions de sodium suivie par l'attaque des ions hydroxyde du réseau de verre et la dissolution des ions de silicate selon l'équation (I, 02) [70, 71]. Holmes et al constatent que l'attaque chimique était provoquée par la réaction d'hydratation et de dissolution,

puis elle peut conduire à la formation d'un hydroxyde, ou desilicate de calcium hydraté, aboutissant à une formation de gelcoat de H_2SiO_3 qui provoque une dissolution de l'acide salique et donc la dégradation de la structure de verre elle-même. [15]



I.2.7.2. Mécanismes de dissolution du réseau des fibres de verre (etching)

"Gravure" ou "etching" est la terminologie anglaise couramment utilisée, c'est la réaction de dissolution du réseau de silice des fibres de verre dans l'eau ou par une attaque alcaline selon l'équation (I, 03). La formation des produits d'hydratation peut provoquer des entailles et une fragilisation des fibres de verre, plus encore, la dégradation de l'interface fibres / matrice est compliquée car l'interface est une région inhomogène d'une épaisseur faible d'environ $1\mu m$, et elle peut dégrader facilement. [71]



Les liaisons de zircon se sont légèrement attaquées par les ions d'hydroxyde par rapport aux liaisons de silicate, d'autre sorte qu'il est une augmentation marquée de la teneur en zircon à la surface des fibres; ces réactions ne sont pas entièrement comprises et ne semblent pas entraîner de corrosion à la surface, de plus ils pourraient bien de constituer un mécanisme de dissolution du réseau de verre aux extrémités sous contrainte. Dans les matrices contenant de l'hydroxyde de calcium (CH), il est connu que le CH a tendance de précipiter à la surface du verre et à l'intérieur des brins. Ces cristaux formés se développent dans les espaces confinés à l'intérieur et autour des brins des fibres, des pressions s'exercent, et aggravant encore le processus de corrosion sous contrainte. La lixiviation préférentielle des composants de la surface du verre est également susceptible d'induire des contraintes dans le réseau du verre [70].

I.2.7.3. Vieillessement des composites ciment-verre

Le taux de vieillissement est en fonction du type de fibre de verre. La nouvelle génération de verre (AR) est mieux qu'en verre (E). La performance au vieillissement du composite dépend aux conditions de l'environnement ou météorologiques, il est donc nécessaire de développer des fibres de verre spéciales pour une meilleure résistance aux alcalis [56]. Selon Butler et al en 2010, ont étudié la morphologie de l'interface fibre-matrice à l'aide de MEB, la perte de performance observée avec la durée croissante du vieillissement dépend principalement de l'alcalinité de la matrice, la formation de portlandite dans l'interface fibre-matrice et sur la surface du filament. L'épaisseur et la fragilité augmentent avec un potentiel croissant de la formation de la portlandite dans la matrice. Une précipitation amplifiée de $Ca(OH)_2$ entre les

filaments peut également être observée avec une alcalinité croissante de la matrice [72]. Qian et al en 2003, ont conclu que l'ajout des poudres de polyvinyle alcool peut réduire le vieillissement du BRFFV, et il permet de créer un dépôt d'un film polymérique à la surface des filaments de fibre, donc cet ajout peut empêcher l'accumulation des hydroxydes de calcium à l'interface fibre - matrice [73]. Enfedaque et al en 2012, ont conclu que les cycles de gel-dégel et l'immersion du BRFFV de l'eau chaude accélère son vieillissement. Les ajouts de la fumée de silice ou le métakaolin en quantités faibles (la substitution d'environ 10% du ciment) préservent ses propriétés mécaniques à long terme [49].

Cependant, la durabilité de la fibre de verre lorsqu'elle est placée dans un environnement alcalin est une préoccupation majeure. Même, si les fibres de verre résistantes aux alcalis (AR) ont été largement utilisées dans l'industrie du BRFFV, les problèmes de leur durabilité n'ont pas encore été entièrement résolus. Le BRFFV âgé est d'une résistance à la traction et une ductilité inférieure à celle béton du jeune âge, donc la corrosion des filaments en verre provoqué par une attaque alcaline d'ions d'hydroxydes et la fragilisation du BRFFV a été appelée processus de fatigue statique [49, 70]. La perte de résistance et de ductilité du béton fibré dans les environnements humides peuvent être attribuée à des produits chimiques et des facteurs physiques. Chimiquement est soumise à une attaque alcaline du verre puis perdent une partie de leur résistance à la traction; et physiquement est due à l'accumulation d'hydroxyde de calcium dans les espaces entre les fibres de verre individuelles. Les propriétés fragiles de l'hydroxyde de calcium entraînent une liaison excessive puis conduire une fragilisation du BRFFV [73].

I.3. Durabilité du béton dans le milieu agressif

La durabilité des matériaux à base du ciment portland peut être compromise par plusieurs processus des dégradations physico-chimiques tels que: les réactions alcali-agrégats, attaque par les dioxydes de carbones (la carbonatation), la réaction avec des acides, l'attaque par les sulfates externes ou internes, et l'attaque par les ions chlorure [74].

I.3.1. L'attaque par les sulfates

L'attaque par les sulfates est considérée comme l'un des principaux problèmes de détérioration des matériaux à base de ciment (béton ou mortiers). Les ions sulfates peuvent causer de détérioration du béton armé en provoquant une expansion et fissuration due à des facteurs tels que le type de ciment, le type des sulfates, la concentration des sulfates et la période d'exposition dans le milieu sulfatique [75]. Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de la pollution domestique et industrielle, on peut les retrouver dans

les eaux souterraines, les eaux de mer, sols salins, eaux souterraines, sel naturellement présent dans la pierre,..... [4]

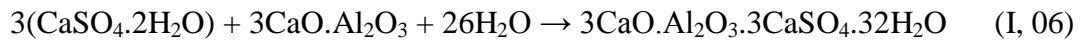
Les sels de sulfate dissous peuvent entrer dans des réactions chimiques avec les matériaux cimentaires et en provoquant l'expansion, la fissuration et l'écaillage, et /ou ramollissement et désintégration. La forme classique d'attaque par les sulfates implique aux sulfates alcalins tels que le sulfate de sodium (Na_2SO_4) qui réagit avec la portlandite pour former le gypse et l'ettringite, et il peut provoquer une expansion, la fissuration et la détérioration du béton. Pourtant, le mécanisme exact de l'expansion et le rôle du gypse et de l'ettringite dans le processus détérioration restent sujets de controverse [76]. De nombreuses enquêtes sur le terrain ont signalé des dommages du béton dans les environnements sulfureux, dont le sud de la Californie. Novak et Colville ont étudié les causes de dommage des dalles sol en béton d'une maison à l'âge d'environ 20 à 30 ans réalisé sur un sol riche en sulfate. Ils insinuent que la cause des dommages était principalement due à la cristallisation du sel, car aucun des produits de sulfate chimiques tels que l'ettringite et le gypse n'a été identifié, mais des minéraux de sel tels que Na_2SO_4 et $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ont été trouvés dans les fissures [77].

I.3.1.1. Mécanisme d'attaque par des sulfates

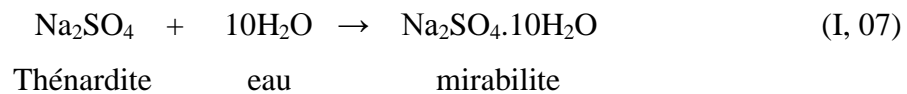
L'attaque du béton par les sulfates est due à une série des réactions chimiques entre les ions de sulfate et les composants principaux de la microstructure de la pâte du ciment. La chimie de l'attaque par les sulfates est complexe et implique de nombreuses réactions, mécanismes et interactions internes ou sources externes [78]. De plus, le mouvement des ions se fait par la diffusion moléculaire ou par capillarité, et il peut être accompagné d'une dissolution progressive du portlandite et la décomposition du gel C-S-H. Simultanément, la formation des cristaux d'ettringite et les déformations volumétriques du matériau durci, sont également considérées comme responsable des forces expansives et de la microfissuration [4, 79]. D'autre part, les sulfates sont trouvés principalement sous forme des sulfates de sodium (Na_2SO_4) ou de magnésium (MgSO_4) [80]. L'ettringite expansive est formée en deux étapes, la première étape est la formation du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) par la réaction entre la portlandite et les sulfates externes, les équations (I, 04) et (I, 05) montrent les cas d'attaque par les sulfates de sodium et de magnésium:



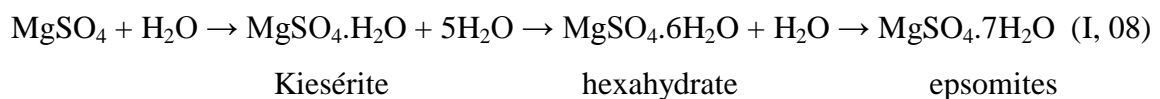
La deuxième étape est la formation de l'ettringite expansive ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$) par la réaction entre le gypse et les aluminates de calcium anhydres (C_3A) selon l'équation (I, 06):



Plusieurs chercheurs rapportent que l'équation (I, 06) représente le seul mécanisme de formation d'ettringite expansive [81, 82]. Cependant, il y peut obtenir par la réaction chimique entre la portlandite, les sulfates et l'aluminate tetracalcique hydraté (C_4AH_{13}). Le mécanisme de cristallisation du sel est la dissolution répétée des sulfates de sodium et la recristallisation dans des pores du béton. La précipitation de mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) se fait selon l'équation (I, 07), et elle est reliée par la variation d'humidité et de température dans l'environnement extérieure.



Le sulfate de magnésium peut également causer des dommages, comme indiqué dans l'équation (I, 08), la déshydratation de l'epsomite se produit uniquement à des températures supérieures à 70°C , et il peut aussi causer de la détresse au béton en diminuer la concentration des ions d'hydroxyde. [82, 83]



I.3.1.2. Formation de thaumasite

La formation de la thaumasite nécessite quatre principaux facteurs de risque: présence des carbonates/bicarbonates, source de sulfate, excès d'eau et basse température ($< 15^\circ\text{C}$) [84]. Selon Glasser et Brown et al, la formation de la thaumasite est toujours précédée de la formation d'ettringite. On suppose généralement que la thaumasite n'est formée qu'à des températures inférieures à 15°C . Cependant, certains chercheurs ont également trouvé de la thaumasite à des températures supérieures à 15°C [80]. Le premier cas de l'endommagement des structures en béton causé par la formation de thaumasite a été enregistré à une centrale hydraulique au Bapanxia - chine par MA Bao-guo et al en 2004 [85]. La formation de thaumasite ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{CO}_2\cdot\text{SO}_3\cdot 15\text{H}_2\text{O}$) se fait selon l'équation (I, 09) à partir de la réaction chimique entre les C-S-H et les ions des sulfates. Le remplacement progressif de C-S-H par la thaumasite produit généralement une masse pulpeuse présentant des caractéristiques non contraignantes. [76]



I.3.1.3. Attaque par les sulfates externes

Dans cette partie, nous citons les sulfates externes les plus agressifs sur le béton à savoir, les sulfates de magnésium, les sulfates de calcium, les sulfates de sodium, les sulfates alcalins, les sulfates d'ammonium et les sulfates métalliques.

a) Sulfate de magnésium

Le sulfate de magnésium est très agressif et de double action, il réagit avec tous les composants du ciment. La première réaction chimique est la substitution du Mg^{2+} par le Ca^{2+} et l'anion SO_4^{2-} , pour la formation des couches de brucite ($Mg(OH)_2$) et du gypse cristallisé dans la zone de surface d'après l'équation précédente et aussi diminuer le pH [2, 86]. La formation d'ettringite selon l'équation (I, 08) peut provoquer l'expansion et la fissuration directement ou indirectement. Plus encore, ces sulfates peuvent provoquer la dissolution des C-S-H, puis la formation d'une pâte de silicate de magnésium hydraté (Mg-S-H) de faible cohésion [4, 87].

b) Sulfate de calcium

Ces sulfates sont trouvés dans les eaux salins sous forme de gypse ($CaSO_4$), généralement, ils sont très agressifs sur le béton, et caractérisés par une solubilité faible et lente par rapport aux sulfates de sodium, d'ammonium et de magnésium. L'ettringite expansive est le résultat de la réaction entre ces sulfates et les C_3A selon l'équation (I, 06), de plus, si la réactivité est trop faible, le sulfate de calcium modifie fortement l'ettringite en monosulfoaluminate ($4CaO.Al_2O_3.SO_3.12H_2O$) [4, 88].

c) Sulfate de sodium

Ce sulfate sous forme (Na_2SO_4) est très agressif sur le béton par la formation d'ettringite expansive selon l'équation précédente (I, 06) [2]. Leur comportement agressif augmente en fonction de la concentration des ions de sulfate (SO_4^{2-}) dans le milieu extérieur, la teneur des aluminates anhydres (C_3A) dans la pâte du ciment hydraté et le temps d'exposition des structures en béton [4, 89].

d) Sulfate des alcalins

Les sulfates alcalins sont principalement: le potassium ou l'arcanite (K_2SO_4), sulfate double potassium-sodium ou langbeinite ($2CaSO_4.K_2SO_4$), sulfate double calcium-potassium ou l'aththitalite ($Na_2SO_4.3K_2SO_4$) [90]. Le pourcentage de potassium dans le clinker est plus grand que le sodium, parce que le sodium a un taux d'incorporation dans les phases du clinker plus élevé que celle du potassium. La formation des sulfates alcalins est très rapide, et la forme la plus connue des sulfates alcalins est l'arcanite (K_2SO_4). Le sulfate de potassium est d'une solubilité

élevée, et il est très agressif sur le béton, mais la vitesse d'attaques est plus lente que les sulfates de sodium [91, 92].

e) Sulfate d'ammonium

L'ammoniac est d'une matière première principale, il est trouvé sous différentes formes d'engrais azotés (N) tels que: l'urée (45-46 N%), le nitrate d'ammonium (34 N%) et le sulfate d'ammonium (21 N%). Le sulfate d'ammonium $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ est une bonne source d'azote (N) et de soufre (S) [93]. Ce sulfate est très soluble et plus agressive sur le béton, il réagit avec l'hydroxyde de calcium pour la formation du gypse, de plus la réaction avec les aluminates anhydres qui provoquent l'ettringite expansive [4, 94].

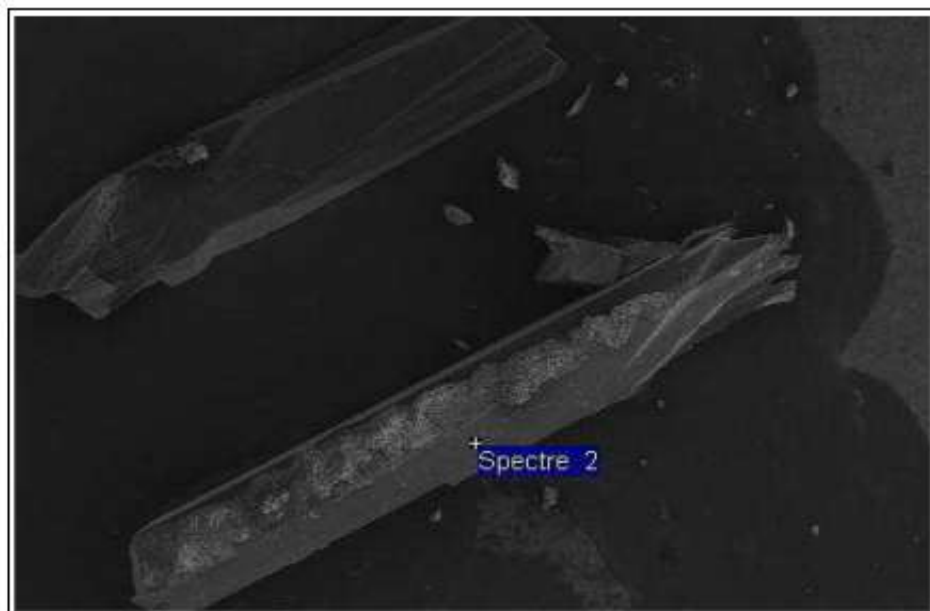


Figure (I, 11): Observation par MEB la surface des fibres attaquées par le sulfate d'ammonium de la concentration de 0,25mol/l.

La figure (I, 11) montre l'effet de sulfate d'ammonium sur des éprouvettes en mortier ont été confectionnées par des pourcentages de 0% à 10% des fillers de marbre, et de pourcentage de 20% à 30% de laitier de haut fourneau, ces échantillons ont été conservés dans une solution de sulfate d'ammonium de concentration de 0,25M pour une durée de 12 mois [95].

f) Sulfates métalliques

Les sulfates métalliques sous forme (FeSO_4 , CuSO_4 , ZnSO_4) sont solubles et de faible agressivité par rapport aux autres sulfates [4]. D'autre part, le sulfate de baryum est de faible solubilité dans l'eau, pour cela ne peut facilement être précipitée [96].

g) L'acide sulfurique

L'acide sulfurique (H_2SO_4) est l'un des acides les plus agressifs au béton, ce sulfate provoque la détérioration du béton et la corrosion des armatures. Les bactéries anaérobies actives existant dans les eaux usées se produisent le gaz H_2S , de plus le gaz H_2S s'oxyde en contact avec l'air, puis se transforme en acide sulfurique (H_2SO_4) dans les réseaux d'égout sous l'effet d'humidité et de température. Cet acide agressif réagit avec le carbonate de calcium ou la portlandite pour former le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) [97, 98].

I.3.1.4. Paramètres influé sur l'attaque sulfatique

L'attaque du béton par les sulfates dépend de nombreux paramètres soient: types de ciment et leur dosage dans le mélange, types des ajouts minéraux et leurs pourcentages au ciment, structure des pores, perméabilité et coefficient de diffusion des ions, types et concentrations de sulfate, durée de l'exposition, la température et le taux d'humidité dans le milieu d'exposition [99].

a) Type et dosage du ciment

Pour assurer une bonne durabilité du béton dans le milieu sulfatique, il y a lieu d'utiliser un ciment de faible teneur en aluminat tricalcique (C_3A), parce que la vitesse de dégradation due aux sulfates est proportionnelle à la quantité de C_3A du ciment. On prend comme un exemple le ciment portland résistant aux sulfates (CRS) est de faible teneur en C_3A . Les normes américaines suggèrent une limite de 5% et de 25% respectivement pour les teneurs en (C_3A) et ($2C_3A + C_4AF$) des ciments résistants aux sulfates. De plus, la teneur élevée en C_3A affecte négativement à la demande de superplastifiant et la maniabilité du béton frais en raison de la capacité d'adsorption initiale élevée des phases contenant de l'alumine-sulfate [4, 100]. Plus encore, l'augmentation du C_3S qui entraîne une augmentation de la portlandite après l'hydratation du ciment, donc la susceptibilité à l'attaque de sulfate est plus élevée. D'après les résultats de Paulo et al à la figure (I, 12), ont conclu que le C_3A n'est pas le seul composé responsable de l'expansion du béton, alors que la teneur de C_3S ou le rapport C_3S/C_2S élevé du ciment est d'un effet important sur l'expansion du béton. Plus encore, pour un béton avec un rapport E/C égale a 0,48 et fabriquer avec un ciment contenant une quantité élevée de C_3S (73,7%) est tombé en panne à l'âge de 3,6ans, alors qu'un béton similaire avec des proportions de mélange similaires mais à faible teneur en C_3S ne tombe pas en panne jusqu'à l'âge de 40ans.

Selon Ouyang et al, le gonflement ettringitique augmente en fonction du rapport E/C ou de l'augmentation de la porosité du matériau qui facilite les transferts liquides ou gazeux. Mais les expérimentaux de Stark et al, montrent que l'expansion diminue lorsque le rapport E/C augmente

de 0,35 à 0,65. Ce phénomène peut s'expliquer par une porosité plus élevée, qui sert de vase d'expansion à la formation d'ettringite.

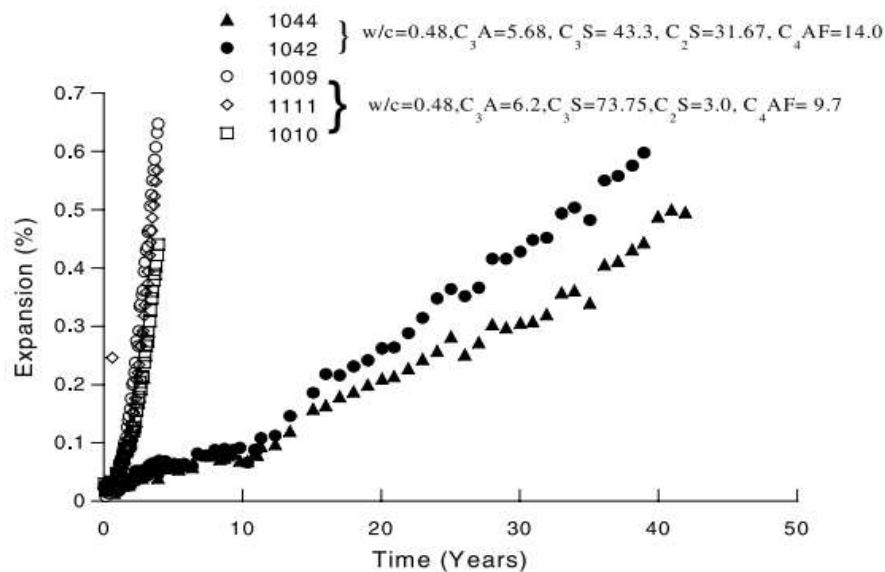


Figure (I, 12): Effet des teneurs en C₃A et C₃S sur l'expansion du béton. [20, 101]

b) Les ajouts minéraux

Les additions minérales tel que les cendres volante, la fumée de silice et les laitiers de hauts fourneaux, elles améliorent la résistance du béton aux sulfates, en raison de leurs teneur plus faible de CH et le rapport Ca-Si (C/S) dans les hydrates de silicate de calcium (C-S-H), et la structure de pores raffinée qu'ils produisent dans le béton. Ces ajouts peuvent réduire la perméabilité et du coefficient de diffusion, la cristallisation de l'ettringite formée par précipitation à partir de la phase liquide et non expansive, et la réduction de la teneur en chaux et du C₃A anhydre [21]. Berndt en 2009, a trouvé que le béton contenant des niveaux élevés de cendres volantes provoque une réduction de la résistance à la compression précoce à l'âge de 7 jours, pour des éprouvettes cylindriques (102X204) mm en béton immergé dans l'eau de mer artificielle à une durée de 84 jours [102]. La teneur de 20% à 30% des cendres volantes a un effet bénéfique sur la durabilité du béton dans un milieu sulfatique, cet effet est dû à la consommation partielle de la portlandite libérée pendant l'hydratation du ciment par les cendres [4].

Selon la Comité 226 de l'Alliance Coopérative Internationale (ACI), l'ajout du laitier au ciment ne devrait pas dépasser 50% en raison de la résistance au gel-dégel. D'après les compléments polonais à la norme PN-EN 206-1 spécifient la quantité de laitier dans la classe d'exposition XF4 en fonction de la classe CEM III: jusqu'à 50% pour 32,5R, supérieure à 50% pour 42,5R et plus de 80% pour les structures marines. L'expérience montre que les bétons contenant un ciment riche au laitier sont extrêmement sensibles aux effets combinés du gel et des

sels de déglacage. Les bétons du ciment CEM III se distinguent par une résistance élevée à l'action des sulfates, des chlorures et autres agents corrosifs aux CEM I, y compris la carbonatation du béton. En conséquence, les laitiers granulés de haut fourneau ajoutés au CEM I dans des quantités définies avec précision permettent d'obtenir des bétons efficaces présentant des caractéristiques techniques élevées dans des conditions de dispersion optimales [103, 104]. L'utilisation du ciment CEM II/B-S ou CEM III/A à la place du ciment CEM I ont progressivement diminué la résistance à la formation de gel-sel; malgré l'escalade relative de la masse de matière écaillée d'un facteur de 4. La résistance affaiblie à l'entartrage gel-sel ne peut pas être éclairée par une résistance inférieure du béton, car elle ressemble à la résistance à la compression croissante selon la figure (I, 13).

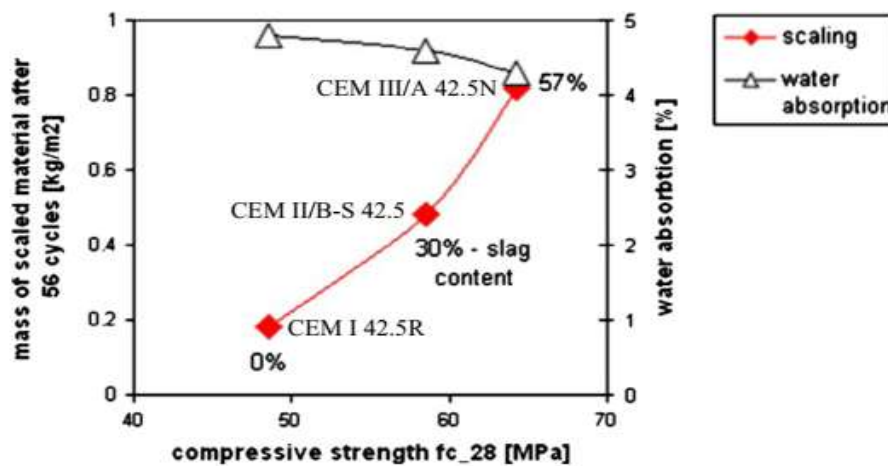


Figure (I, 13): Relation entre la résistance à la compression, la masse des matériaux mis à l'échelle et l'absorption d'eau dépend du type de ciment et de la teneur en laitier [105].

Chonggen et al en 2017, montrent que l'ajout du laitier au mortier avec des teneurs de 10 à 20%, provoquer une résistance à la compression élevés par rapport aux teneurs de 30 jusqu'à 50% à l'âge de 28 jours. Mais au même âge, nous constatons une légère différence de la résistance à la flexion des mortiers selon la figure (I, 14). La figure (I, 15) montre une image MEB de la morphologie de surface du mortier avec ajout de laitier granulaire de haute fourneau, nous constatons que le laitier présente sous forme irrégulière, des bords et des angles clairs, il est composé d'un grand nombre de particules ayant une taille de particules supérieure à 10 μ m [106]. Les résultats de Gupta en 2016, montrent que l'amélioration de la résistance à la compression et à la flexion (à 3 et 7 jours) du mortier avec ajout de laitier d'une finesse de 556m²/Kg. Cependant, à une finesse similaire, le remplacement du ciment par 20% de laitier se révèle produire une résistance précoce supérieure par rapport à 60% de laitier d'après la figure (I, 16).

Donc, le remplacement du ciment par 20% de laitier peut accélérer considérablement l'hydratation et améliorer la durabilité du béton ultra haute performance. [107]

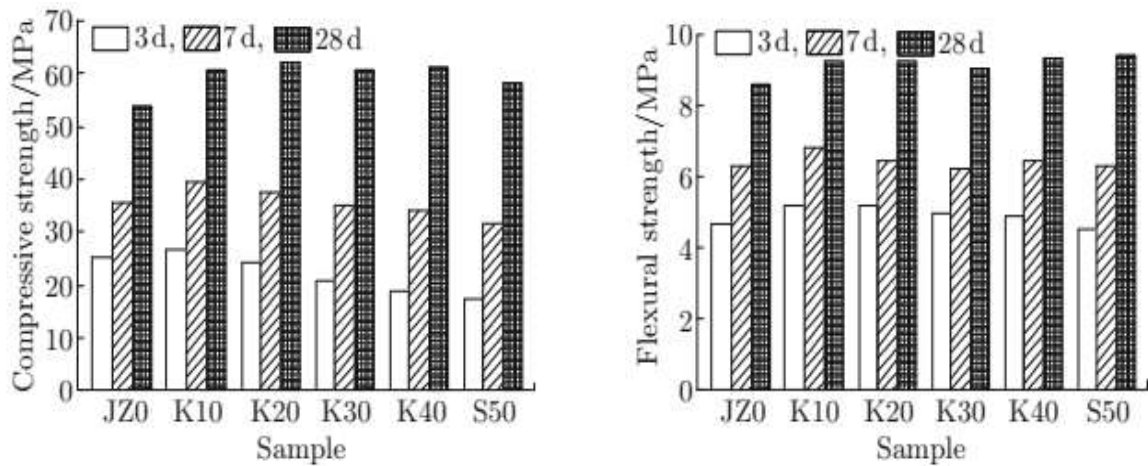


Figure (I, 14): Résistance à la compression et à la flexion des mortiers avec différents pourcentages d'ajout de laitier.

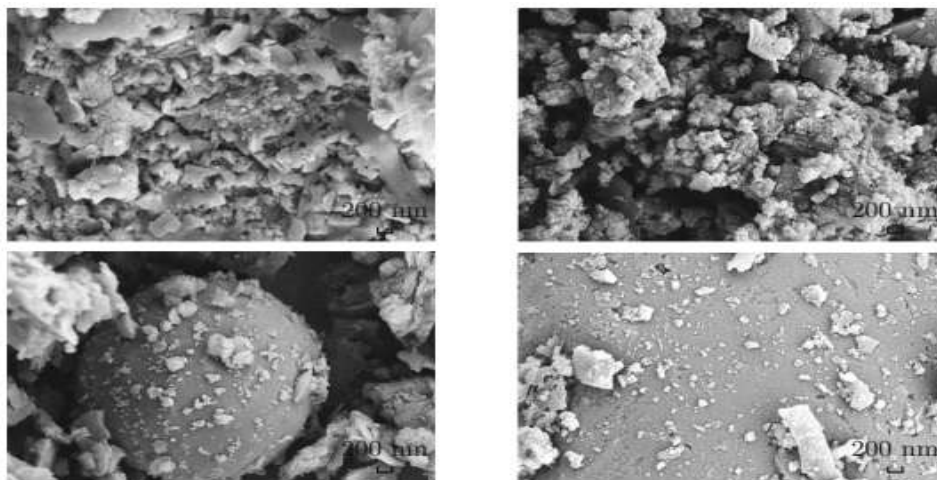


Figure (I, 15): Image MEB de laitier granulaire de haut fourneau d'une pâte de mortier avec différentes tailles de particules. [106]

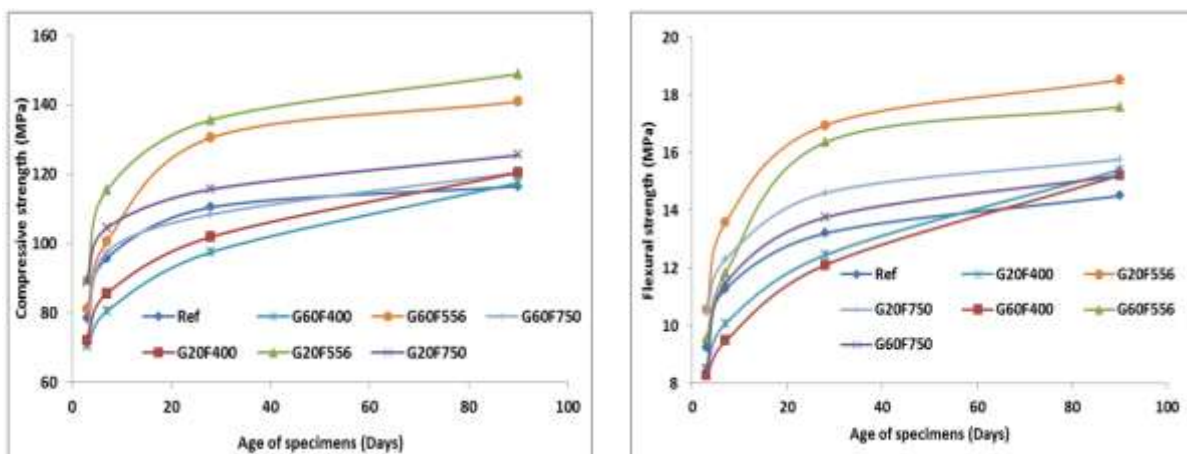


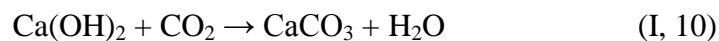
Figure (I, 16): Evolution de la résistance à la compression et en flexion du béton avec ajouts minéraux [107].

L'utilisation de la fumée de silice peut améliorer les propriétés mécaniques du béton, réduire la taille des pores et la connectivité et augmentant la tortuosité, et diminue la pénétration des agents agressifs dans le béton. D'après Seyedhamed et al en 2017, l'ajout de 0 à 12,5% de la fumée de silice au béton d'un rapport E/C de 0,4 à 0,5, qui modifie leur microstructure et diminuer la diffusion des ions chlorures. De plus, la teneur de la fumée de silice entre (7% - 10%) améliore très significativement la résistance aux sulfates. [4, 108]

I.3.2. Carbonatation du béton

I.3.2.1. Mécanisme d'attaques par le dioxyde de carbone

La carbonatation est considérée comme l'une des principales causes de détérioration du béton et de la corrosion des armatures des structures en béton armé. Le taux de diffusion du gaz carbonique (CO_2) est relié par le type et la quantité de ciment, la porosité du béton ou de mortier, le temps de durcissement, le type et la quantité des ajouts minéraux pendant le malaxage [109]. La formation du carbonate de calcium (CaCO_3) se fait par la réaction entre le dioxyde de carbone dans l'air, et les composants du béton hydraté tel que la portlandite et les C-S-H, les réactions chimiques peuvent présenter par les équations simples (I, 10) et (I, 11): [110]



La présence d'humidité à l'intérieur des pores qui provoque la formation de l'acide carbonique, cet acide peut réagit avec les hydrate et il conduit à la dissolution de la portlandite ou la libération des ions calcium Ca^{+2} , de plus, ces derniers sont réagi avec les ions carbonate CO_3^{-2} et formant le carbonate de calcium CaCO_3 [111].



Figure (I, 17): Essai de détermination de la profondeur de carbonatation du béton [112].

La profondeur de carbonatation est maximale lorsque l'humidité relative est entre 50% à 75%. La teneur en humidité dans le béton a une importance rôle sur le rythme de progression de la carbonatation. La quantité d'humidité plus élevé dans les pores qui empêche la diffusion de dioxyde de carbone, alors que les pores du béton sont trop secs, l'hydroxyde de calcium dissous en quantité insuffisante sera disponible pour la carbonatation [113]. La cure humide du béton peut améliorer leur propriété mécanique et la durabilité aux attaques des sulfates, l'effet de gel-dégel et attaques par les acides [114]. Le pH du béton non carbonaté est d'environ 12,6, mais l'attaque des hydrates par les dioxydes de carbone qui provoquent la diminution de (pH) de la zone carbonatée du béton est inférieure à 9 [109].

I.3.2.2. Facteurs influant la carbonatation du béton

Dans cette partie, nous citons quelques facteurs influents sur la profondeur de carbonatation du béton, tels que l'humidité relative, dosage du ciment et les ajouts minéraux.

a) Humidité relative

La réduction du temps de cure humide de béton accroît la profondeur de carbonatation, la diffusion de gaz carbonique dans le béton à l'état liquide est de dix milles fois (10^4) plus lente, que la diffusion à l'état sec [4]. La concentration du CO_2 dans les ouvrages souterrains (tel que les tunnels) est de 3 à 5 fois plus que l'atmosphère naturelle, cette concentration peut également accélérer la carbonatation du béton. La carbonatation du béton se développe plus rapide dans la plage d'humidité relative entre 62% et 86% [115].

b) Dosage de ciment

La figure (I, 18) montre les résultats de l'évaluation de la profondeur de carbonatation des éprouvettes en béton préparées avec différents dosages en ciment CPJ45 conservées à 60% HR et au 1% de gaz CO_2 pendant 100 ans, nous constatons que l'augmentation du dosage de ciment et la diminution du rapport E/C qui minimise la profondeur de carbonatation.

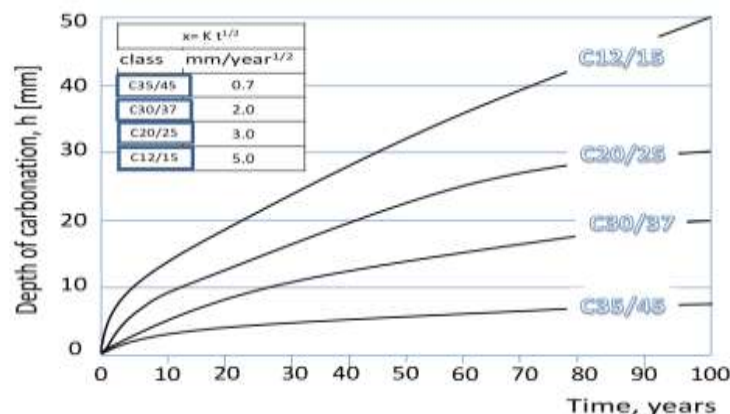


Figure (I, 18): Relation entre la profondeur de carbonatation et le dosage en ciment [116].

c) Les additions minérales

La teneur des ajouts minéraux dans le béton influe sur la profondeur de carbonatation. La profondeur de carbonatation a augmenté en fonction des ajouts minéraux, pour un béton comportant de 20% des cendres volantes et de 50% du laitier de haut fourneau est d'une profondeur de carbonatation plus élevée par rapport un béton de ciment portland. Les tests d'absorption capillaire sur des échantillons carbonatés ont montré que la porosité était réduite par carbonatation, à l'exception du mélange contenant 65% de laitier [117]. D'après les résultats de Ruixia en 2010, la vitesse de carbonatation du béton a augmenté en fonction de la teneur de cendres volantes selon la figure (I, 19). Lorsque, l'humidité relative de l'environnement est entre 50% à 70%, le taux de carbonatation du béton contenant de cendres volantes est diminué [118]. Couramment, la fumée de silice est utilisée pour la confection d'un béton de haute performance, en cas où il est ajouté au béton, il peut modifier la vitesse de carbonatation par la consommation du portlandite. L'effet de la fumée de silice sur la carbonatation du béton dépend du rapport E/C; plus E/C est élevé, plus la profondeur de carbonatation du béton est élevé [119].

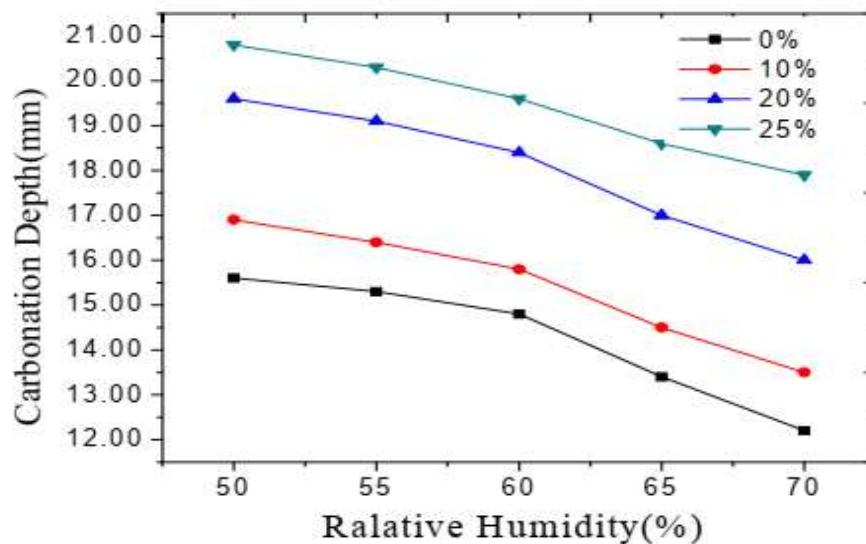


Figure (I, 19): La profondeur de carbonatation du béton contenant des cendres volantes en fonction de l'humidité relative [118].

I.3.3. Corrosion des armatures du béton armé

La corrosion des barres d'acier est l'un des problèmes de détérioration des ouvrages en béton armé. Ce phénomène est conditionné par le vieillissement physique et/ou chimique de l'enrobage, le taux d'humidité, d'oxygène (O_2), des chlorures (Cl^-), des dioxydes de carbone (CO_2), et des acides. Les barres d'acier corrodé recouvert par une rouille brune en raison de ses expositions dans l'eau de pluie ou dans l'air humide a court période, ou par une rouille noire due à une exposition a longue durée dans l'air libre. En outre, d'après les études accélérées du labo,

on a trouvé que la microstructure d'interface acier-béton exposé dans le milieu marin, joue un rôle vital dans l'initiation de la corrosion de l'acier. [4, 120]. La corrosion des armatures avec formation de rouille comporte deux phases, dans la première phase les éléments agressifs tels que le dioxyde de carbone (CO₂) ou les chlorures (Cl⁻). Ces derniers pénètrent dans le béton jusqu'aux armatures, si leur concentration à la surface des aciers atteint un niveau critique, et la couche protectrice peut être localement détruite. Plus encore, l'alcalinité du béton peut être neutralisée par le dioxyde de carbone de l'atmosphère, de sorte que le pH du liquide le béton diminue jusqu'à une valeur d'environ 9 où les aciers peuvent perdre son passivité. À la deuxième phase, lorsque la corrosion commence à se propager rapidement et atteint un certain niveau, il cause des dommages importants, c'est-à-dire commence à affecter l'état limite de service du béton armé [121].

I.3.4. Effet de gel - dégel

L'endommagement par le gel se présente sous deux formes: l'endommagement interne et l'écaillage. L'endommagement interne se manifeste par la formation de microfissures au béton, plus encore la résistance mécanique et les paramètres de transferts (la perméabilité et le coefficient de diffusion) peuvent diminuer. L'écaillage se manifeste par un endommagement superficiel, en plus d'une dégradation esthétique de l'ouvrage, ce phénomène peut augmenter sensiblement la perméabilité de surface et diminuer l'enrobage; noter que l'écaillage est favorisé et magnifié par la présence de sels de déverglaçage. Les détériorations sont alors attribuées au couplage entre l'augmentation volumique de 9%, due à la solidification de l'eau des pores et le transport de l'eau non gelée au sein du réseau poreux [122]. D'après les résultats de Mechkouri et al en 2009, nous concluons que l'addition d'adjuvant d'entraineur d'air dans des bétons améliore leurs durabilité après 60 cycles de gel-dégel, alors que pour un taux de dosage optimal de cet adjuvant de 0.08% est une nette amélioration de la maniabilité allant jusqu'à 13%, et une gain de résistance à la compression peut atteindre un taux de 22%, plus encore une chute de résistance à la compression de 10% pour un béton témoin ou sans adjuvant [35].

I.3.5. L'attaque par une solution alcaline

I.3.5.1. Mécanismes d'attaque du béton par des alcalis

Généralement, les agrégats peuvent réagir avec l'hydroxyde alcalin dans le béton, cette réaction est potentiellement nuisible seulement quand il produit une expansion significative. Les réactions alcalis-agrégats sont présentées sous deux formes: réaction alcali-silice et réaction alcali-carbonate. La réaction alcali-silice a été reconnue comme une source potentielle de détresse dans le béton depuis la fin des années 1930, de même les agrégats sont potentiellement

réactifs qui existent partout en Amérique du Nord. La réaction alcali-silice est une réaction chimique entre les hydroxydes alcalins dans la solution de pores du béton et certaines phases siliceuses réactives présentes dans les agrégats. Cette réaction peut être illustrée selon les deux étapes suivantes:

- Alkali + Silice réactive → Produit de réaction en gel
- Produit de réaction en gel + Humidité → Expansion

Le pH de la solution des pores du béton est d'environ de 12,5, ce pH augmente lorsque la teneur des alcalis en ciment augmente. Les alcalis de sodium (Na^+) et de potassium (K^+) dans le béton sont principalement dérivés à partir des matériaux à base de ciment. Les sels alcalis se dissolvent dans la solution des pores et augmentent son alcalinité. La silice réactive se dissout, elle réagit avec les alcalis et le calcium d'hydroxyde pour former un gel de calcium-alcali-silicate-hydrate. Cette réaction engendre un certain nombre de détérioration à l'intérieur ou à proximité immédiate des particules d'agrégats réactifs (des microfissures aux bords de réaction, décollements), y compris ce gel qui gonfle en absorbant d'eau, et en développant des pressions dans la pâte du ciment. Ces pressions sont capables de dépasser de résistance à la traction de la pâte et des agrégats, ainsi il créant des microfissures et provoquant une expansion volumétrique du béton [123, 124]. La présence des alcalis, en concentration élevé, réduit la solubilité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et la concentration des ions Ca^{2+} en phase liquide, et en même temps permet de l'entrée des cations alcalins dans la composition du produit d'hydratation au lieu de calcium. Alors que, de l'hydratation du ciment, le calcium est remplacé par un alcali-cation, de plus qu'il n'est pas de former des liaisons de pontage avec les hydrates. Lors de la réaction d'hydratation et la consommation des cations alcalins, le rapport entre le calcium et les cations alcalins dans le produit sont augmentés. Donc, les produits d'hydratation précoce et tardive se distinguent par le rapport Ca/Na, et le produit tardif sera plus proche de C-S-H-gel [125].

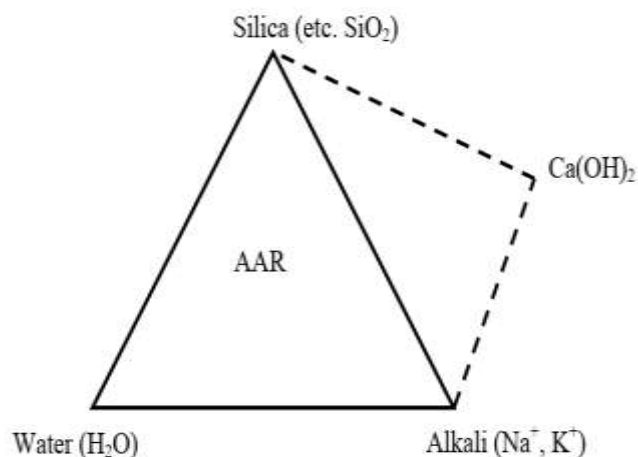


Figure (I, 20): Présentation des composants nécessaires pour une réaction alcalis-agrégats.

On a plusieurs paramètres influents sur la réactivité alcalis-agrégats dans le béton soient: la température, l'humidité et le degré de saturation, la teneur des alcalis dans les granulats, rôle de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), les types des roches réactives, la granulométrie et le classement des agrégats, la porosité de la pâte et le rapport E/C... La figure (I, 20) montre les trois essentiels composants pour une réaction alcalis-agrégats [126].

I.3.5.2. Paramètres influents sur l'attaque par les alcalins

Dans cette partie, nous citons les facteurs influents sur la résistance du béton dans les milieux alcalins ou acides :

a) Types et dosages du ciment

Le type du ciment utilisé est d'un rôle important pour la durabilité du béton dans un milieu alcalin. Les ciments à haute teneur en alumine peuvent être résistants aux solutions d'attaque en acides dont le pH est compris entre 4 et 5, ces ciments sont de meilleure performance par rapports aux ciments Portland. Plus encore, les ciments avec ajouts de pouzzolane et de laitier sont plus résistants dans les milieux alcalins et acides [127].

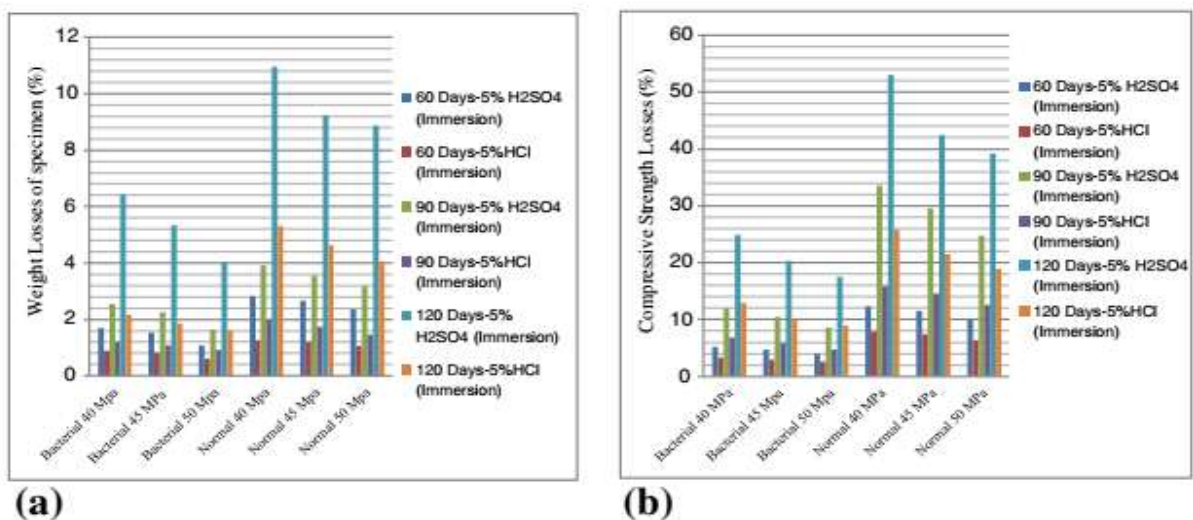


Figure (I, 21): (a) Pourcentage des pertes de poids et (b) de résistance des différents types du béton de haute résistance immergées aux solutions de H_2SO_4 et de HCl .

D'après les résultats d'Andalib et al en 2014 à la figure (I, 21), nous remarquons que les éprouvettes en béton de haute résistance (50MPa) ou de dosage du ciment élevé ($561,42\text{Kg/m}^3$) est au moins de perte du poids et de résistance à la compression par rapports aux éprouvettes de résistance de (40MPa) et (45MPa). Plus encore les bétons immergés dans la solution HCl est de faible perte du poids et de résistance par rapport aux bétons immergés dans la solution de H_2SO_4 . Dans cette étude, nous fabriquons deux types des éprouvettes avec différents dosages du ciment

portland (béton normale et béton de surface traitée par des bactéries), puis sont immergées aux solutions 5% de H_2SO_4 et 5% de HCl dans une durée de 120 jours [128].

b) Influence des ajouts minéraux

Selon Rashad en 2013, l'adjuvant superplastifiant a amélioré l'ouvrabilité, la résistance à la compression et retardé les temps de prise initiale et finale. De plus l'ajout de 5% ou (5 - 10)% de la fumée de silice dans la matrice du laitier activé par alcalis qui diminué la maniabilité et augmenté la résistance à la compression du béton. D'autre part, l'ajout de metakaolin dans la matrice du laitier activé par alcalis augmente la perméabilité, la profondeur de carbonatation et le volume total des pores du béton, donc il diminue leur résistance à la compression. L'ajout de 20% du laitier dans la matrice de metakaolin qui donne une résistance à la compression supérieure, à celle d'un géopolymère à base de metakaolin pur après l'exposition à des températures élevées peut atteindre $800^\circ C$ [129].

c) Influence de cure humide

La température ambiante et l'humidité relative peut influencer sur la résistance du béton aux attaques par l'acide. La cure humide du béton représente un facteur important, elle influe sur la qualité de la structure des pores et la perméabilité du béton. Certains auteurs ont rapporté que l'effet du changement de la température ambiante sur la vitesse d'attaque par l'acide n'est pas significatif, ainsi que l'augmentation de la température ambiante de 20 à $40^\circ C$ n'influe pas sur la résistance du béton dans le milieu acide [127].

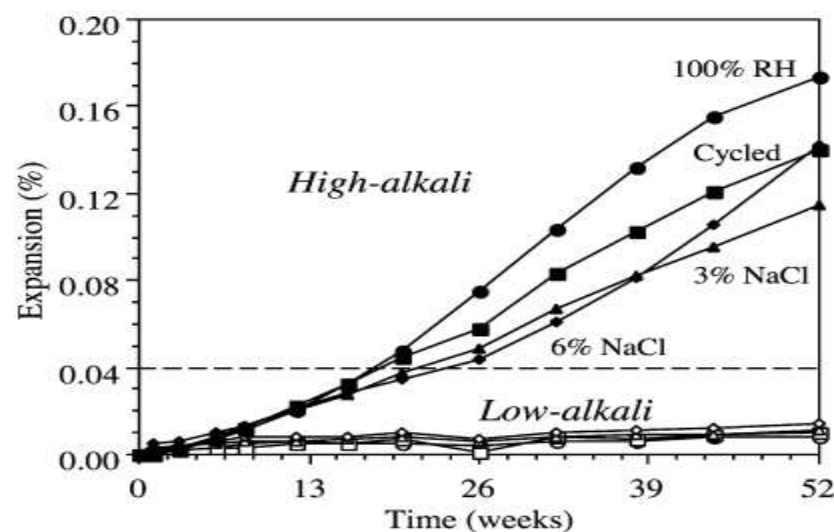


Figure (I, 22): Résultats de l'expansion du béton de basse et de haute alcalinité dans différents milieux au laboratoire.

Bérubé et al en 2003 (voir la figure (I, 22)), ont obtenu après une année d'immersion que le ciment de faible teneur en alcalis est un moyen efficace de prévenir la dilatation due à la réaction

alcali-silice, même pour les bétons exposés à l'eau de mer ou aux sels de déglacage. En revanche, l'expansion du ciment de haute alcalinité augmente jusqu'à la fin d'exposition au 100% d'humidité de l'air, plus encore il est très élevé par rapport aux autres milieux de conservation [130]. Le béton du ciment portland renforcé par fibres de verre (AR) peut subir une perte marquée de la résistance et de ductilité avec le temps dans l'environnement humide. Cette réduction des propriétés est attribuée à deux phénomènes principaux: l'attaque alcaline sur les fibres de verre par les ions hydroxydes dérivés de l'hydratation de la matrice du ciment, ce qui entraîne une altération chimique et la réduction de leurs forces; et des changements à l'interface fibres/matrice, qui densifie la matrice au niveau de la fibre de verre interface. Le dernier phénomène est lié au dépôt des produits d'hydratation (principalement $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH) dans les brins du fibre. L'élément de renforcement du béton n'est pas un filament mais un «brin» d'environ 200, dans lequel la matrice ne pénètre pas initialement. La propension d'une matrice à précipiter le CH à l'intérieur ou à l'interface fibre/matrice de ces brins réduit supposément leur flexibilité et également influe négativement sur la durabilité du béton [131].

I.4. Polymère renforcé en fibre de verre (PRV)

Afin d'améliorer la durabilité des structures en béton armé, on utilise de barres d'acier en polymère renforcé de fibres (PRF) semble très prometteuse, car elles ont une résistance à la corrosion plus élevée que les matériaux renforcés d'acier. Dans le domaine de la construction en béton armé, le PRF est généralement composé de fibres organiques, telles que le polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC), de verre tel que le polymère renforcé de fibres de verre (PRFV) ou (PRV). Et de fibres minérales soient: le polymère renforcé de fibres d'aramide (PRFA) ou le polymère renforcé de fibres d'alcool polyvinylique (PRFV) [132].

I.4.1. Propriétés mécaniques des composites PRF

Ces composites sont utilisés en pratique pour renforcer les éléments en béton précontraint, ancrages au sol et pour réparer ou renforcer la structure en béton existante. Cependant, leur utilisation intensive dans l'ingénierie des structures en béton armé a été très limitée pour le manque de données de recherche et de spécifications de conception. Les propriétés mécaniques des matériaux composites dépendent des fibres contenues (type, quantité et direction), de la matrice utilisée, et du rapport fibre/volume totale; selon Foo et al en 2001 les composites de fibres de carbone sont plus solides et plus rigides que les composites de fibres de verre. Le tableau (I, 03) résume les propriétés mécaniques des matériaux composites selon Teng et al en 2002.

Tableau (I, 03): Propriétés mécaniques des composites en PRF. [48, 133]

Matériaux composites unidirectionnel	Contenu en fibres (% par poids)	Densité (Kg/m ³)	Module d'élasticité longitudinale (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Fibres de verre / polyester (PRFV ou PRV laminé)	50 - 80	1600 - 2000	20 - 55	400 - 1800
Carbone / époxy (PRFC laminé)	65 - 75	1600 - 1900	120 - 250	1200 - 2250
Aramide / époxy (PRFA laminé)	60 - 70	1050 - 1250	40 - 125	1000 - 1800

Les principaux avantages de l'application du PRF sont: poids faible, rapport rigidité/poids et résistance/poids élevés, installation facile et une durabilité globale potentiellement élevée, résistance à la corrosion et aux attaques chimiques, dilatation thermique contrôlable et stabilité dimensionnelle, bonne résistance au feu et temps de durcissement rapide. Ces avantages pourraient conduire une augmentation de la durée de vie et du cycle de vie, réduction des coûts de fabrication, d'équipement et de maintenance [52, 134]. En revanche, ses inconvénients sont: coût des matériaux, temps long de développement, difficulté de fabrication, faible ductilité, température limitée, attaque dissolvante ou humide et dommages cachés et susceptibilité aux dommages [135].

I.4.2. Constituants d'un matériau composite

Les composites contiennent généralement une ou plusieurs phases soient continues ou discontinues. La phase continue est la matrice pour obtenir des caractéristiques et des propriétés spécifiques. La phase discontinue est appelée renforcement, et généralement beaucoup plus forte et rigide que la matrice. Les renforcements dans les composites ont pour but d'obtenir la résistance, la rigidité et d'autres propriétés mécaniques, ainsi que d'autres propriétés telles que le coefficient d'extension thermique, la conductivité et le transport thermique. Le rôle de la matrice est de donner la forme de la pièce composite, protéger les renforcements dans l'environnement agressif, transférer les charges sur les renforcements et la ténacité des matériaux. Selon la nature de sa matrice, les composites sont classés comme suit: matériaux composites à matrice organique, matériaux composites à matrice métallique, et matériaux composites à matrice céramique [16, 135].

I.4.2.1. Matrices polymères

Il existe deux types des matrices polymères thermoplastiques et thermodurcissable. La structure des thermoplastiques se présente sous forme des chaînes linéaires, et ils pouvant être

durcis et ramolli à plusieurs reprises par des températures croissantes et décroissantes. Actuellement, on utilise des résines thermodurcissables que l'on a associées à des fibres longues, dont la structure sous forme d'un réseau tridimensionnel et durcir en forme de façon définitive lors d'un échauffement [16, 136].

a) Matrices thermoplastiques

A l'état durci, les matrices thermoplastiques présentent de bonnes propriétés mécaniques et une bonne stabilité dimensionnelle. De plus, en renforçant des fibres courtes, elles présentent une résistance thermique et une résistance mécanique améliorées. Les résines qui peuvent résister à des températures élevées dépassant 100°C sont: poly-téréphtalate éthylénique (PET), polysulfure de phénylène (PPS), le polypropylène (PP), le polycarbonate (PC). Il existe également des matrices thermoplastiques thermostables qui résistent des températures supérieures à 200°C, notamment: polyamide-imide (PAI), polyéther-sulfone (PES) et le polyéther-éther-cétone (PEEK) [136].

b) Matrices thermodurcissables

Les résines thermodurcissables comprennent l'époxy, polyester, phénolique, vinylester, polyimide et polyuréthanes. Résines polyester, résines vinylester, et les résines époxy sont les plus couramment utilisées pour la fabrication des matériaux composites [16, 137].

- **Polyesters insaturés:** sont des résines orthophtalique, isophtalique, chlorée, bisphénol. Le polyester isophtalique est de meilleures propriétés, en particulier la résistance à l'absorption d'eau, et il est utilisé dans les navires de guerre et les coques commerciales de meilleure qualité. Ces résines ont de bonne accroche sur fibres de verre, elles sont caractérisés par une bonne résistance chimique, faibles couts, mise en œuvre facile et elles supportent de températures élevés ou supérieurs à 150°C; [136, 138]
- **Vinylesters:** elles possèdent une bonne résistance à la fatigue, un excellent comportement à la corrosion. Ces résines utilisées dans les procédés de dépose à la main doivent avoir une faible viscosité, une bonne propriété d'immersion, être durcissable à la température ambiante et à la pression normale, faible débit pendant le durcissement, et le processus de durcissement doit être non ou peu toxique [136, 137]. Aux États-Unis, les vinylesters sont utilisés pour leur durabilité et leur résistance aux attaques chimiques, mais ils sont plus chers; et il commence à être utilisé au Royaume-Uni dans les composites à haute fraction volumique de fibres;

- **Epoxydes:** Ces résines nécessitent un durcissement à des températures plus élevées que les polyesters réticulés à froid pour obtenir leurs propriétés optimales, et elles sont limitées aux constructions de faibles dimensions;

Tableau (I, 04): Propriétés physiques et mécaniques des résines. [138]

Type de résine	Densité (g/cm ³)	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Résistance à la traction (MPa)	Déformation à la rupture en traction (%)
I- Thermodurcissable					
Polyester (Orthophtalique)	1,23	3,2	0,36	65	2,0
Polyester (Isophtalique)	1,21	3,6	0,36	60	2,5
Époxy	1,20	3,2	0,37	85	5,0
Vinylester	1,12	3,4	-	83	5,0
Phénolique	1,15	3,0	-	50	2,0
II- Thermoplastique					
Polyéther-éther cétone (PEEK)	1,30	3,7	-	92	50
Polycarbonate (PC)	1,20	2,3	-	60	100
Polyéther sulfone (PES)	1,35	2,8	-	84	60

- **Phénoliques:** Ces résines ne sont pas utilisées en raison du besoin de polymérisation à la pression; et elles présentent des propriétés mécaniques légèrement plus médiocres que les autres résines et leur performance dans le milieu marin n'a pas été entièrement étudiée. En Chine, ces résines phénoliques qui peuvent être guéries à la pression normale, actuellement utilisées dans l'enroulement et la pose à la main; [137, 138]
- **Polyimides:** elles sont généralement utilisées pour la confection des pièces en composites de haute performance, à pour objet d'obtenir une bonne stabilité sous hautes températures ou supérieur à 250°C [136].

Le tableau (I, 04) résume les caractéristiques physiques et mécaniques de différents types des résines utilisées.

I.4.2.2. Renfort

Traditionnellement, le verre E est le plus utilisé avec une matrice de résine polyester ou époxy. Ce verre est moins résistant et légèrement moins rigide que les autres verres couramment disponibles, mais il est nettement moins cher. Il existe de possibilités en termes de configurations des nappes améliorées, des méthodes de tissage et même d'utilisation d'autres matériaux pour former des sandwichs. Plus encore, le verre était soit mat, soit tissé dans un tissu équilibré avec à peu près le même nombre de fibres dans la chaîne et dans la trame. Cela a été suivi rapidement par un tissu ou un ruban unidirectionnel (presque 100% des fibres dans un sens), et maintenant le tissu peut être tissé avec n'importe quelle combinaison de fibres dans les deux sens [138]. Le renforcement d'un composite est relié au pourcentage de fibres ou rapport (fibres/résine), généralement ce rapport étant supérieur à 50% de fibres par poids, et aussi type de fibres et l'orientation des fibres par rapport à la direction des charges [135]. Les principaux matériaux de renforcement utilisés dans les procédés de fabrication des composites PRF sont les plaid, tissus, mat de fibres coupées, les fibres coupées et autres types des tissus en fibres peuvent également être utilisé en fonction de la demande. Leurs propriétés mécaniques et physiques sont montrées au tableau (I, 05).

Tableau (I, 05): Caractéristiques des matériaux de renforcement en fibres de verre. [137]

Type	Spécification	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (GPa)	Résistance au cisaillement (MPa)	Teneur en caoutchouc (%)
Plaid	400g/cm ²	223	14,9	-	50
Tissu unidirectionnel	Roving	563,7	32	52,5	40
Mat à fils coupés	450g/cm ²	49,3	7,9	-	75

Il existe différentes formes des fibres de verre, sont les mats en fibres de verre, les fils coupés et les fils pour les applications textiles.

a) Mat en fibre de verre: ce produit peut être fabriqué sous forme des mats continus ou coupés. Un mat de corde hachée est formé en déposant de manière aléatoire des fibres coupées sur une courroie ou une chaîne qui les relie par des liants chimiques. Le mat continu est formé d'une manière similaire et sans hachage. Le mat continu peut être utilisé aux procédés de moulage fermés et comme produit supplémentaire dans des processus unidirectionnels tels que la pultrusion, où une certaine résistance transversale est requise,

sous forme du voile de surfaçage en verre C utilisé comme des doublures résistantes à la corrosion pour les tuyaux et les réservoirs. Enfin, les tissus en verre sont utilisés dans certains revêtements de sol en vinyle;

- b) Combinaison d'un mat et tissage:** elle a été développée ces dernières années pour fabriquer des produits spécifiques. Généralement, le stratifié est constitué des couches alternées de mat en fibre de verre et d'une mèche tissée. Les poids appropriés du mat en fibre de verre (mat de laine hachée) et des mèches tissées sont liés chimiquement par des liants, ou mécaniquement par tissés ou cousus. Ce produit peut être utilisé comme un économiseur de main-d'œuvre important par les fabricants;
- c) Fibres coupés:** ce type est plus utilisé ces dernières années pour fabriquer de nombreux produits en fils coupés. Ces fibres sont des coupes d'une longueur de 3,2 à 12,7mm. De plus, ils sont utilisés comme renforcement dans l'industrie du moulage par injection. Le verre et la résine peuvent être mélangés à sec ou extrudés dans une étape préliminaire avant le moulage, ou bien le verre peut être alimenté directement dans la machine de moulage avec la résine plastique. Des centaines de pièces différentes pour de nombreuses applications sont ainsi réalisées. Les fibres coupées peuvent également être utilisés comme renforcement dans certaines applications thermodurcissables, telles que les composés de moulage en vrac;
- d) Tissu en fibres de verre:** il est fabriqué par l'utilisation des fils en fibre de verre et son convertis en tissu par des opérations de tissage conventionnelles. Les caractéristiques principales d'un tissu comprennent son style ou son motif de tissage, son nombre de tissus, et la formation des fils s'enchaînent. En plus, ces caractéristiques déterminent les propriétés du tissu, telles que la durabilité et la performance du composite final. Le nombre de tissus identifie le nombre des fils en chaîne et le remplissage par pouce, et aussi les fils en chaîne sont parallèles à la direction de la machine et les fils de remplissage sont perpendiculaires;
- e) Fibres broyées:** elles sont préparées par broyage des fibres de verre à fil continu hachées ou sciées, ensuite d'un calibrage chimique pour certaines applications spécifiques et par tamisage à longueur. Ces fibres ont un rapport longueur/diamètre relativement faible, dont longueur nominale d'environ 0,79 à 6,4mm. Leurs utilisations concernent principalement les composés phénoliques, les uréthanes moulés par injection et les composés d'enrobage;
- f) Papiers en fibre de verre:** ces sont des éléments de renforcement des bardeaux en fibre de verre, ils sont fabriqué par l'utilisation des fibres coupés d'une longueur de 25 à 50mm. De plus, ces dernières sont dispersées dans l'eau pour former une solution diluée. Ensuite, la solution est pompée sur une chaîne en mouvement continu, où la majeure partie de l'eau est

éliminée par le vide, laissant derrière elle un mince tapis de fibre de verre uniformément réparti. Une résine liante est ajoutée en ligne, suivie d'un séchage et d'un durcissement pour former le papier en fibre de verre. Ce papier est ensuite combiné avec le système de résine approprié pour former des bardeaux de toiture;

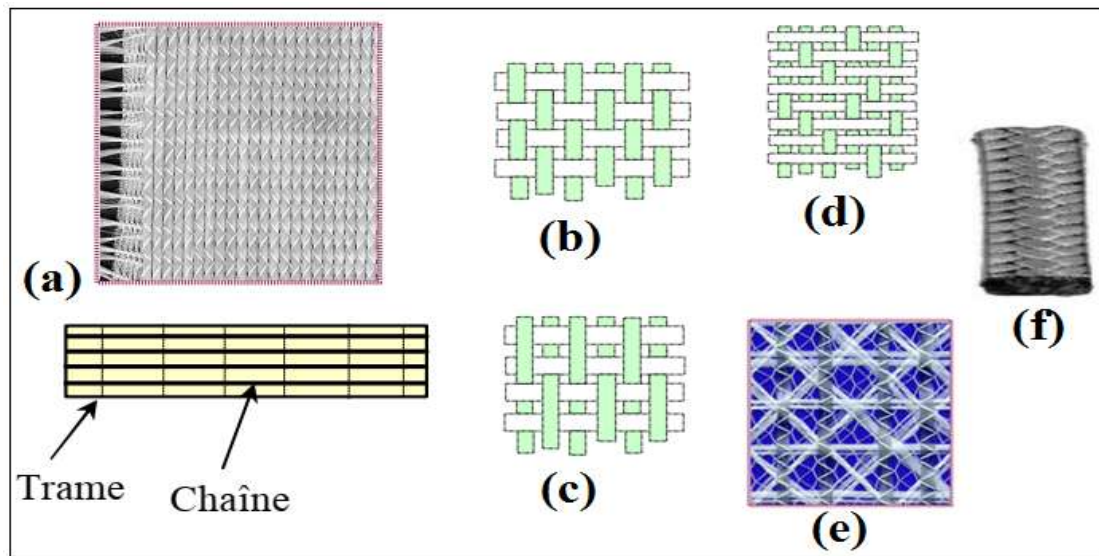


Figure (I, 23): Différents formes des tissus de renfort: (a) unidirectionnel, (b) toile ou taffetas, (c) serge, (d) satin, (e) multi-triaxial et (f) tridimensionnelles. [136, 139]

g) Fil texturé: la texturation est un processus dans lequel le fil textile est soumis à un jet d'air qui frappe sa surface pour fabriquer le fil, alors que le jet d'air provoque la rupture aléatoire des filaments de surface, puis donnant au fil un aspect plus volumineux. Le processus de texturation permet d'augmenter le rapport résine/verre dans le composite final, et parmi les principales applications des fils texturés le remplacement de l'amiante [139].

I.4.3. Procédés de fabrication des PRF

Les processus de fabrication des composites les plus importants sont les suivants:

a) Processus d'enroulement filamentaire: c'est un processus relativement lent avec la possibilité de contrôler la direction de la fibre, et le diamètre des pièces peut être modifié au long de la pièce. Pendant ce processus, la bande est tirée à travers d'un bain de résine et le vent dans un mandrin de rotation. Ce mandrin peut être métallique ou non métallique, et assurer la possibilité de retirer facilement les pièces après durcissement. La pièce finie est traitée dans un autoclave, et plus tard est retiré du mandrin. Avec ce processus peut être réalisé des pièces diverses comme des tuyaux, des tubes, des appareils sous pression, des réservoirs et des objets de similaires forme;

- b) **Processus de pultrusion:** ce processus représente un transport continu de bandes de fibres à travers un bain matriciel de résine, suivi de leur chute dans une matrice préchauffée ou un ensemble de matrices. Après le processus de durcissement, où la pièce est passée d'un renforcement saturé humide à un solide par la pultrusion est scié à la longueur désirée. Ce processus permet d'obtenir des pièces de formes complexes, telles que des tubes, des canaux, poutres en I, sections en Z et des barres plates;
- c) **Processus de laminage:** il est largement utilisé pour la confection des matériaux avancés. Pour améliorer ce processus peut être utilisé un matériau pré imprégné, qui est un matériau renforcé pré imprégné des propriétés du composite élevé par des fibres alignées parallèlement les unes aux autres. Un échantillon déformé du produit est coupé par une procédure de variété et le matériel de pré imprégné est fixé la géométrie souhaitée du stratifié. La pièce finale est obtenue en polymérisant les plis empilés sous pression et chauffer dans un autoclave [135].
- d) **Processus de fabrication manuels:** ce sont des processus de mise en contact et de formage à basse pression, elles sont réalisées principalement à la main, le matériel et les outils ne sont nécessaires que pour travail auxiliaire. La pose à la main est simple, facile à apprendre et à comprendre; le matériel utilisé est simple et nécessite un peu d'investissements. La taille et la forme des pièces fabriquées ne sont pas limitées; cependant, les processus de pose manuelle présentent les inconvénients tels que: faible efficacité, mauvaises conditions de travail et forte intensité de main-d'œuvre. La qualité du produit obtenue est moins à celles des produits obtenus par d'autres techniques, et elle dépend largement des compétences opérationnelles du travailleur et est difficile à contrôler [137]. On peut citer deux processus plus utilisés, soient:
- **Moulage au contact:** ce procédé est utilisé pour la fabrication des pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Ainsi que, les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée, pour être mis en forme progressivement au moyen d'ébulleurs et de pinceaux selon la figure (I, 24a). Lorsque la résine est durcie, la pièce est démoulée et détournée;
 - **Moulage par projection simultanée:** ce procédé permettant à la réalisation des pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface du moule puis compactés et ébullés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs. La résine pré accélérée est catalysée en continu lors de sa projection selon la figure (I, 24b).

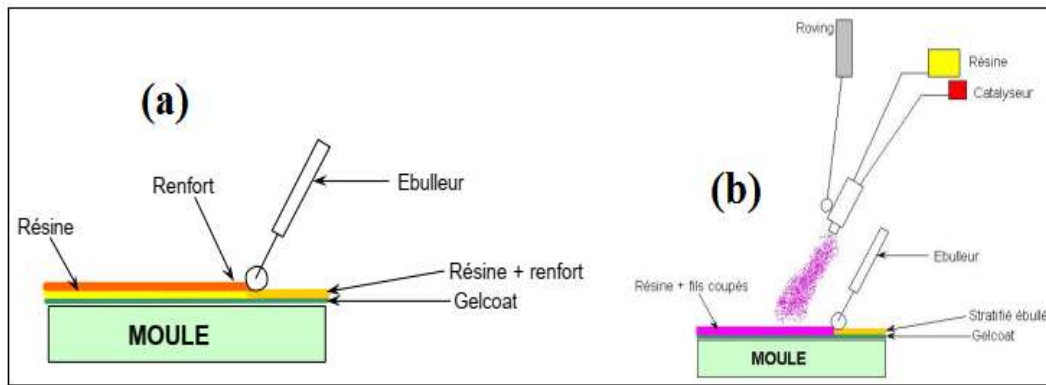


Figure (I, 24): Processus de fabrication manuels: (a) moulage au contact, et (b) moulage par projection simultanée.

e) **Moulage sous vide:** il s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant les caractéristiques des pièces. Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule, la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort. [136]

I.4.4. Polymère renforcé par des fibres de verre (PRV)

Les composites en PRV ont été largement utilisés dans les applications d'engineering en raison de leurs avantages considérables par rapport à d'autres matériaux. Ils offrent une résistance/rigidité spécifique élevée, une résistance à la corrosion supérieure, une construction légère, une faible conductivité thermique, une résistance à la fatigue élevée, une grande capacité de carbonisation et une résistance aux attaques chimiques et microbiologiques. Du fait de l'élargissement du domaine d'applications des GFRP, l'usinage de ces derniers matériaux sont devenus un sujet de recherche très important [140]. Les matières premières utilisées dans la fabrication du PRV sont: les fibres de verre (continues, coupées, tissus, mat...) représentent 60% à 70% du poids, résines polyesters (Orthophtalique ou Isophtalique), une quantité de catalyseur comprise entre 1 et 2,5% du poids de la résine, des additifs comme accélérateurs utilisés pour la polymérisation de la résine et le sable de haute teneur en silice (dont la granulométrie est inférieure à 0,25mm) ayant pour but d'augmenter la résistance mécanique, de donner une rigidité supplémentaire, et de minimiser le coût de fabrication [2].

L'utilisation d'une résine offre un niveau de protection des fibres contre le contact direct dans tels environnements agressive [15]. Les résines polyester insaturé utilisés contenant un monomère insaturé (généralement le styrène) est réticulée à une température ambiante par l'ajout d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un

maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante. Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale, cette réaction dépend de la réactivité de la résine, de la forme des pièces fabriquées, de la nature et du dosage du système catalytique [136]. Le matériau PRV se caractérise par l'insensibilité vis-à-vis au gaz H₂S, aux mercaptans, à l'ammoniac.... Ce matériau supporte une plage de pH de 1 à 10 et de bonne résistance à la corrosion, d'une durée de vie théorique allant jusqu'à 50 ans, et un faible poids par rapport aux pièces fabriquées en autres matériaux de mêmes dimensions. Les premières couches de la structure intérieure du PRV, dont l'épaisseur est d'environ 1,2mm, et d'après les essais d'abrasion qui ont été réalisés selon l'essai de Darmstadt, montrent une abrasion à 50 ans de 0.42mm, donc d'une bonne résistance vis-à-vis des dégradations chimiques en milieux agressifs. Enfin, le PRV supporte des températures comprise entre -50 et 180°C [10].

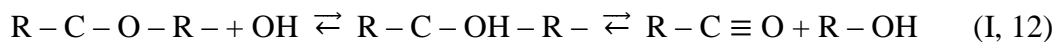
I.4.5. Principaux dégradation du PRV

Les principaux problèmes techniques qui empêchent l'utilisation des matériaux en PRF à long terme, est le manque des données de la performance et la durabilité comparables à celles disponibles pour les autres matériaux de construction traditionnels. Bien qu'il y ait de nombreuses études sur le fluage, la corrosion sous contrainte, la fatigue environnementale, le vieillissement chimique et physique, et l'altération naturelle des composites, la plupart de ces études ne sont pas liées aux applications de génie civil. Les différents mécanismes de dommage du PRF soient par l'influence des fluides absorbés sur les propriétés physiques et mécaniques, relaxation par le fluage et des contraintes, et/ou des dommages dus à la fatigue ou la fatigue environnementale. Tous ces mécanismes peuvent être considérés comme une conséquence de l'attaque d'agents externes, notamment: humidité et solutions aqueuses, environnement alcalin, effets thermiques (cycles gel-dégel, forte températures) et fatigue, rayonnement ultraviolet, et le feu. Le taux de dégradation des composites polymères exposés dans un environnement fluide est lié au taux d'absorption du fluide. Alors que leurs comportement dépend de: type de fluide, la concentration du fluide, la température, la contrainte appliquée, l'état d'endommagement, la structure chimique du matrice et l'interface fibre/matrice [141].

I.4.5.1. Mécanismes d'attaque par les alcalis

L'action de l'humidité et de la température sur les fibres de verre peuvent causer des dommages et réduire leur durabilité prévue. Les mécanismes de dégradation des fibres de verre dans l'eau ou des solutions alcalines peuvent être classés en deux catégories: lessivage et attaque chimique. La diffusion des ions alcalis hors de la structure en verre est connue sous le nom de

«lessivage» comme indiqué dans l'équation (I, 02); dans cette réaction les fibres de verre forment une couche d'eau dans laquelle les ions alcalins (par exemple NaOH) sont lessivés, remplacés par des protons (H^+), et la lixiviation des oxydes alcalins (oxyde de sodium et de potassium) aux surfaces des fibres de verre conduisent à la formation de microfissures. La deuxième réaction importante est appelée «gravure», dans laquelle les ions d'hydroxyle brisent la structure Si-O-Si comme indiqué dans l'équation (I, 03). Généralement, les résines comme le polyester, l'ester vinylique et l'époxy sont les plus utilisées en génie civil, le groupe ester est la liaison la plus faible de la matrice polyester et de l'ester vinylique, de plus le phénomène de dégradation de la matrice par l'hydrolyse est indiqué selon l'équation (I, 12):



Les trois processus de dégradation présentés aux équations précédentes sont aggravés en présence des solutions alcalines, de plus les fibres verre sont particulièrement sensibles à l'absorption d'humidité et le mécanisme de dégradation de l'interface entre les fibres et la matrice est défficile. Cette interface est une région non homogène avec une épaisseur d'environ un micromètre, et peut dégrader facilement. Enfin, Bradshaw et Brinson sont prposés les trois essentiels mécanismes de dommage du PRV suivant: craquage osmotique sur la matrice, décollement interfacial et le délaminage [142, 143].

I.4.5.2.Mécanismes de corrosion des fibres

La résistance élevée à la corrosion est une caractéristique idéale des composites en PRF utilisés dans les environnements corrosifs. À la fin des années 1980, une barre d'armature en PRF a été introduite comme un nouveau type de renforcement interne pour les tabliers de pont en béton. Les fibres de verre sont les plus largement utilisées dans la réalisation en raison de leur faible coût, mais les composites en PRV sont susceptibles de se dégrader quand ils sont exposés à certaines conditions environnementales.

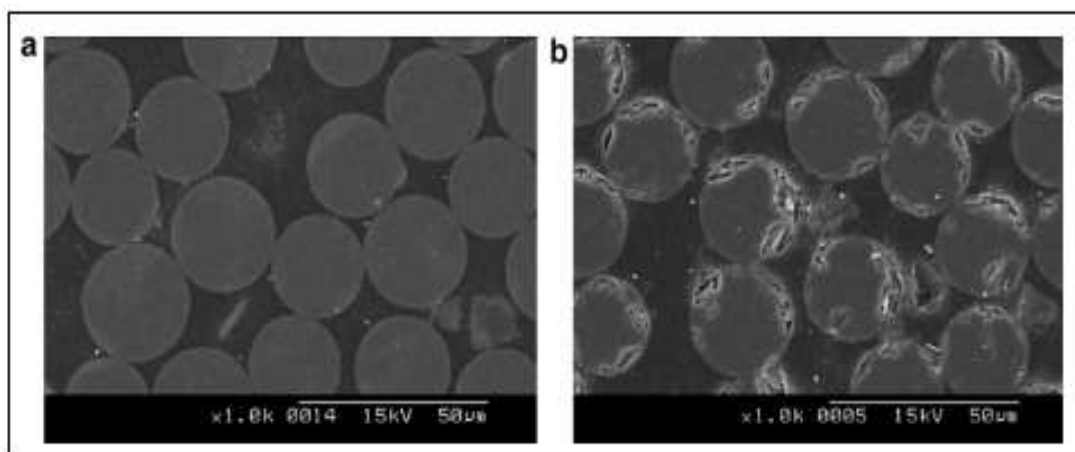


Figure (I, 25): Images MEB des échantillons en PRV (a) témoins, et (b) immergées dans une solution alcaline à 40°C pendant 60 jours.

En particulier, il est connu que les fibres de verre sont dégradées par l'humidité et les alcalis du fait des actions de gravure et de lessivage. La dégradation des matrices est due à l'hydrolyse, à la plastification et au gonflement en présence d'eau, cela affaiblit également l'interface entre les fibres de verre et la matrice, et diminue les propriétés de traction du PRV. Cependant, peu de données de performance à long terme sont disponibles pour les composites en PRV à ce jour, et leur durabilité est la question de ces dernières années. La dégradation de la fibre de verre et de la matrice n'affecte non seulement par l'humidité et l'alcali, mais aussi par l'interface fibre/matrice. Kim et al en 2008 ont étudié des spécimens en PRV (voir la figure (I, 25)), ils ont trouvés que les bords des fibres en verre sont corrodés (ces spécimens immergés dans une solution alcaline à 40°C pendant 60 jours), ainsi que ces dommages sont principalement dues à l'attaque par les alcalins et de l'humidité, ce qui a également entraîné interface entre la fibre et la matrice [144].

I.4.5.3.Effet de variation de température

Les composites en PRF sont sensibles aux changements de température dues aux contraintes thermiques induites entre les fibres et la matrice polymère en raison de leurs coefficients de dilatation thermique distincts. À des températures élevées, la dilatation thermique différentielle de la fibre et de la matrice peut entraîner la formation des microfissures à l'interface fibre/matrice, cette interface devient sensible aux réactions agressives sous l'exposition dans un environnement à haute température, pouvant entraîner une dégradation à la fois des fibres et de la matrice. L'effet d'un environnement thermique sur les performances mécaniques résiduelles a été évalué pour une température constante de 170°C pendant 120, 240 et 626 heures avant le test de flexion. La résistance au cisaillement du composite à graphite unidirectionnel s'abaisse d'environ 30% dans l'exposition à une température élevée. Dans les environnements à basse température, on a divers dommages structurels surtout de l'interface fibres/matrice tel que le décollement et le délaminage, qui entraînent la dégradation des propriétés mécaniques des composites en PRV. D'après Kim et al en 2007, la rigidité du PRV a augmenté d'environ 16% lorsque la température est diminuée au -150°C, et on peut également noter que le taux d'augmentation de la rigidité est plus élevée entre la température ambiante et -50°C [145]. D'autre part, la température et les rayons ultraviolet peuvent provoquer la scission des liaisons chimiques de la matrice c'est-à-dire la scission principale de la chaîne (C-C), conduisant à une photo/thermoxydation et à un craquelage du matériau, ou conduisant à la post-polymérisation du polymère [146].

Silva et al en 2014, ont conclu que la température plus élevée provoque une dégradation plus grave de la résistance à la traction du PRV (voir la figure (I, 26)).

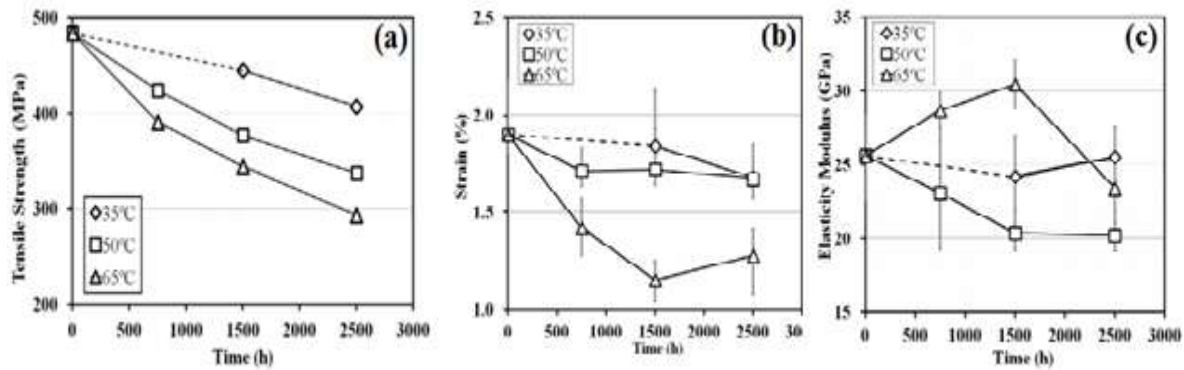


Figure (I, 26): Effet de variation des températures au PRV immergé dans l'eau de mer:

(a) la résistance à la traction, (b) déformation et (c) le module d'élasticité.

Pour tous les spécimens exposés aux températures de 35°C jusqu'à 65°C, la résistance à la traction a diminué nettement jusqu'à 2500h d'exposition dans l'eau de mer car l'humidité absorbée crée une pression hydrostatique au composite. Le comportement du PRV peut être lié plus haut au coefficient de diffusion, qui conduisant initialement à une absorption considérable d'une courte période qui affecte l'interface matrice/fibre, et par conséquent la diminution du module d'élasticité et la déformation du PRV [143].

I.4.5.4. Effet d'humidité et phénomène du vieillissement

L'humidité induite a des effets néfastes sur la performance des matériaux composites en PRV, l'humidité à l'intérieur d'un composite conduit à la plastification de la matrice et à la dégradation chimique - mécanique. La plastification matricielle influe sur le module l'élasticité, la dégradation chimique comprend l'hydrolyse de la liaison à l'interface, et la dégradation mécanique est une fonction du gonflement souche de la matrice. Au cours de l'immersion des composites du PRV dans l'eau, des dommages considérables peuvent apparaître sous forme de microfissures interfaciales, ces microfissures accélèrent encore l'accumulation d'eau et entraîne un changement considérable de poids d'un composite. La fibre de verre absorbe une humidité négligeable par rapport à la matrice polymère, donc l'interface est le seule responsable des écarts en quantité d'humidité absorbée par le composite et la résine pure. Akay et al en 1997, ont trouvé que l'absorption de 1% d'humidité entraînait une réduction de 5%, 4% et 2% de la résistance à la compression, au cisaillement et à la flexion, respectivement. Phifer en 2003 a conclu que l'immersion du composite verre E/vinylester dans l'eau douce pendant deux ans, provoquait une réduction de 60% et de 10% de la résistance à la traction et de la rigidité respectivement. Le vieillissement hygrothermique fait référence au vieillissement synergique sous l'effet d'humidité, plus encore les dommages induits par la température peuvent encore accélérer la diffusion de l'humidité. Certaines enquêtes ont examiné la réponse du composite dans un environnement hygrothermique et également soumis à une charge externe constante,

Aditya et al observaient une réduction de 54% et de 27% de la rigidité et de la flexion respectivement, lorsque des stratifiés en PRV symétriques et antisymétriques étaient exposés à un environnement humide de 98% pendant 2000 heures [145]. Mouzakis et al en 2008, ont trouvé que les principaux facteurs de l'augmentation de la rigidité et de vieillissement du PRV de résine polyester isophthalique sont la température, le rayonnement ultraviolet et l'absorption d'eau [146].

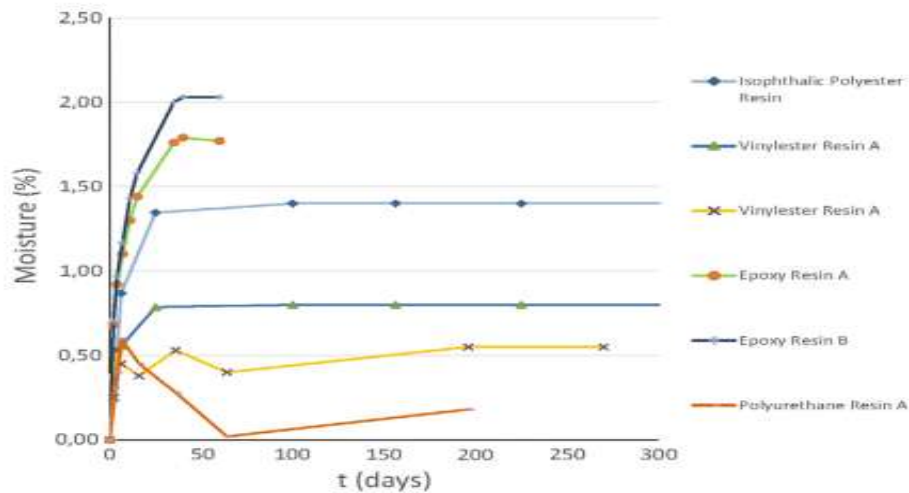


Figure (I, 27): Evolution de la consommation d'eau des matrices de résine pure.

Généralement, la concentration d'humidité augmente initialement avec le temps et se rapproche d'un point de saturation équilibre après plusieurs jours d'exposition du polymère à une atmosphère humide. L'absorption d'eau du composite selon la loi de diffusion généralisée de Fick dépend de plusieurs facteurs, tel que le contenu en vide, type de fibre, type de résine, orientation/architecture de la fibre, l'épaisseur du composite, la température ambiante, niveau de contrainte appliqué, présence de microfissures et pointes thermiques. Alia et al en 2013, ont étudié les performances d'absorption d'eau de différents types de résines immergés dans l'eau de mer en fonction du temps d'exposition (jours) selon la figure (I, 27), nous constatons que la plupart des matrices appropriées à utiliser dans les applications maritimes est l'époxy car après avoir atteint des niveaux de saturation en eau, leurs propriétés mécaniques sont stabilisées. Les propriétés mécaniques des composites à matrice de polyester ne sont pas stabilisées après le niveau de saturation en eau, et les composites à matrice vinylester doivent être soumis à un test de vieillissement accéléré, donc les composites à matrice époxy sont suggérés pour être utilisés dans les transports maritimes, mais la matrice vinylester n'est pas conseillée [147].

I.4.6. Propriétés mécaniques du PRV

I.4.6.1. Résistance à la traction

La figure (I, 28) montre l'évolution de la résistance à la traction des barres en PRV conservées dans deux solutions de concentration de salinité différente eau de mer d'alcalinité

normale HP-SWSSC et de haute alcalinité N-SWSSC avec différents températures 32, 40 et 55°C. D'après Wang et al en 2017, nous enregistrons une résistance à la traction élevée pour des barres conservés d'une solution de HP-SWSSC et de basse température ou 32°C après 63 jours de conservation. En revanche, une faible durabilité a été enregistrée de même âge, pour des barres en PRV conservé d'une solution de N- SWSSC et de température 55°C.

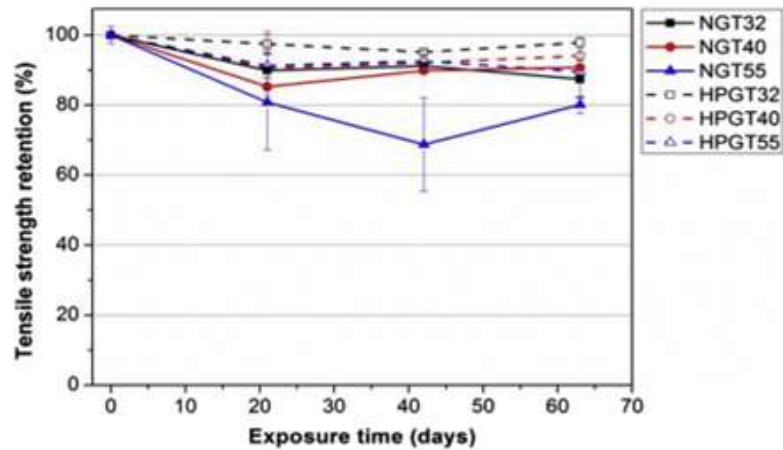


Figure (I, 28): Evolution de la résistance à la traction des barres en PRV conservées dans deux types des solutions HP-SWSSC et N-SWSSC [148].

I.4.6.2. Résistance à la flexion

Le module de flexion des plaques symétriques et antisymétriques en PRV diminue d'environ 60% et 28% respectivement, lorsqu'elles sont exposées 2000 heures dans l'eau de mer selon les résultats obtenus par Aldajah et al en 2009.

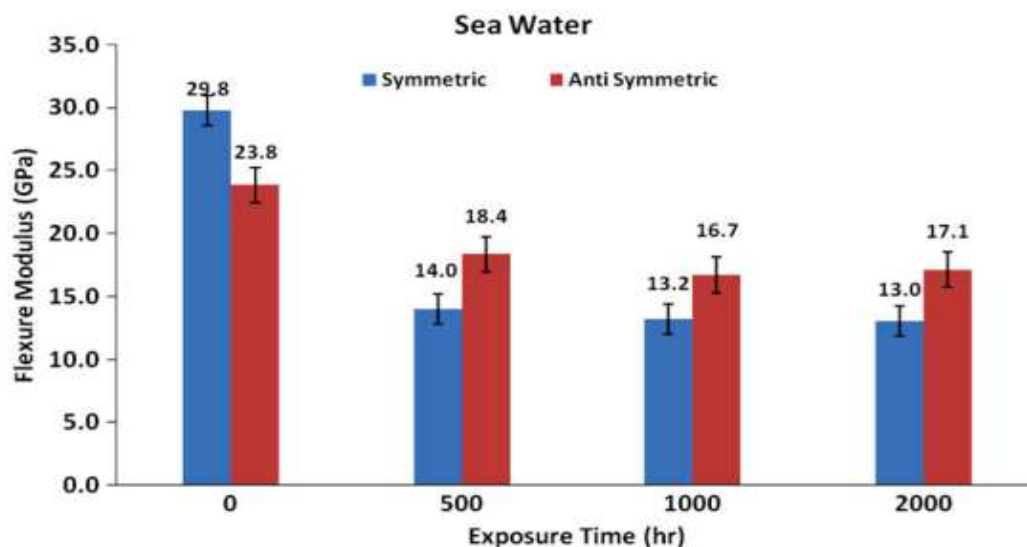


Figure (I, 29): Variation du module de flexion des plaques en PRV exposées dans l'eau de mer [149].

Les résultats trouvés par Poodts et al en 2013 (figure (I, 30)) du test de flexion sur des plaques de dimensions (100X300X4)mm³ conservés dans l'eau de mer et à température de 15°C.

Ces résultats montrent que la contrainte à la rupture et la résistance ultime des plaques en vinylester-verre E sont plus élevés que des plaques en polyster-verre E. Plus encore, nous enregistrons des regressions de 20% et 6% de la résistance ultime et de la contrainte à la rupture respectivement pour des plaques de la résine polyster par rapport de résine vinylster à l'âge de 22 semaines de conservation.

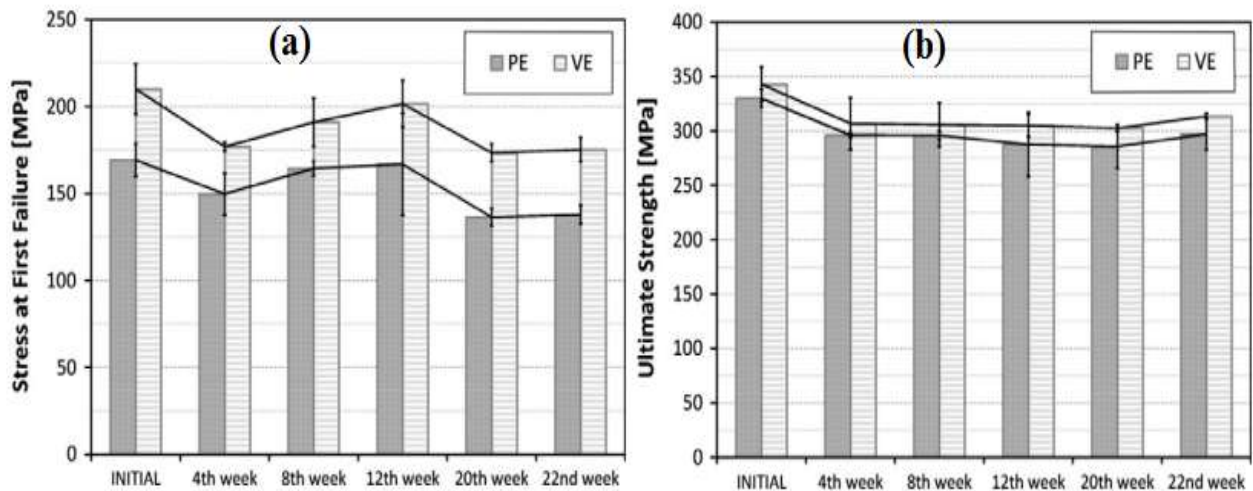


Figure (I, 30): courbes (a) la contrainte de rupture (b) la résistance ultime pour des échantillons du résine vinylester - verre E (VE) et du résine polyster – verre E (PE) [150].

I.4.6.3. Interface matrice - renfort

La performance du matériau composite dépend des caractéristiques inhérentes aux matières premières utilisées, et aussi beaucoup de l'adhérence entre le matériau de renfort et la matrice. Nous avons distingué différents modèles d'adhésion mécanique, dont le phénomène d'ancrage, l'adhérence mécanique de la matrice dans les pores et la rugosité du renfort. Bikerman a proposé un modèle en 1968, qui montrait que l'adhésion des matériaux composites est proportionnelle à la rugosité du matériau de renfort. Généralement, la faible cohésion de la couche est principalement due à la présence d'impuretés sur la surface solide à haute tension superficielle, ce qui conduit à une mauvaise mouillabilité. De plus, le principal critère pour former une interface de haute qualité est la mouillabilité du matériau renforcé.

D'autre part, la diffusion ultérieure, l'attraction électrique et la formation de liaisons chimiques peuvent être considérées comme des conséquences importantes ou efficaces du contact étroit entre le renfort et la matrice. Li et coll en 2000, ont conclu que la résistance à la rupture d'un composite poly éther éther cétone/fibre de carbone est provoquée sous l'effet de la cristallinité et par la morphologie des cristallites de la matrice, aussi bien que par l'interaction matrice/fibres au niveau d'interface [151].

I.5. Conclusion

D'après cette étude bibliographique, nous concluons ce qui suit:

- Premièrement, le béton des fibres de verre AR est peu utilisé dans le domaine de construction, malgré ce type de renforcement a amélioré la résistance à la rupture et la résistance au choc du béton. Ces fibres offrant une durabilité à long terme, lorsqu'elles sont utilisées avec le ciment développé faiblement alcalin, ou par l'addition des ajouts minéraux ou dans un environnement sec;
- Deuxiément, les principales dégradations du béton sont: la carbonatation du béton ou la formation des carbonates de calcium sous l'effet de dioxyde de carbone en présence d'humidité, la corrosion des armatures du béton produit par l'attaque du dioxyde de carbone ou la pénétration des ions chlorures présent dans le milieu environnant, la pénétration des sulfates internes ou externe qui conduisent à la formation d'ettringite expansive, et enfin l'attaque par une solution alcaline soient réaction alcali-silice et réaction alcali-carbonate qui influe sur la résistance du béton ou du fibre. Significativement, pour améliorer la durabilité de la matrice cimentaire renforcée par des fibres de verre, soient par l'application d'un traitement spécifique à la surface des fibres, ou par l'introduction des matériaux pouzzolanique ou l'utilisation un autre type de ciment de faible alcalinité;
- Finalement, les composites en PRV sont peu utilisés dans les applications marines, parce que l'eau de mer peut dégrader les propriétés mécaniques des composites en PRV à long terme. Plus encore, il existe peu de recherches scientifiques qui est étudier la durabilité du PRV dans les solutions agressives, en même temps il est difficile de sélectionner le type de la résine pour l'utilisation.

Chapitre II

Essais sur les matériaux utilisés

Chapitre II: Essais sur les matériaux utilisés

II.1. Introduction

Notre travail expérimental consiste à étudier le mécanisme de dégradation physico-chimique du béton renforcé par des fibres de verre BRV et en PRV dans le milieu agressif réel. Dont notre programme expérimental comprend les étapes suivantes:

- L'identification et la caractérisation des matériaux de base;
- Préparation et confection des éprouvettes;
- Conservation des éprouvettes dans les différents milieux;
- Faire des tests mécaniques sur les éprouvettes conservées à différents âges.

II.2. Etat de l'art sur les bétons de fibre AR

Il existe différentes méthodes utilisées pour améliorer la durabilité de la matrice cimentaire renforcée par des fibres de verre, soient au niveau de la fibre en modifiant la composition chimique du verre ou en appliquant un traitement spécifique de leur surface des fibres. La deuxième méthode au niveau de la matrice se fait par l'introduction des matériaux pouzzolanique ou l'utilisation un autre type de ciment de faible alcalinité [152]. Les propriétés mécaniques du BRV dépendent du type, longueur et volume des fibres de verre, matrice composition, méthode de fabrication, régime de cure et conditions de stockage. Pour augmenter leur durabilité à long terme, nous pouvons modifier du mortier de ciment portland avec un polymère latex, modifiant la matrice du ciment Portland avec ajouts pouzzolaniques, modification la composition de verre, le revêtement des fibres de verre et développement d'un ciment. [153]

Actuellement, les fibres AR riche en oxyde de zirconium est couramment utilisé. L'analyse des compositions de fibres de verre proposées pour la fabrication de matériaux composites à base de ciment, montre qu'un composant clé capable d'améliorer leur durabilité chimique est la zircone [50]. L'attaque alcaline des fibres de verre par le ciment, en particulier dans les zones humides, est avancée comme facteur chimique de la dégradation des fibres, tandis que la dégradation due à un facteur physique est associée au dépôt et à la croissance de la portlandite $[Ca(OH)_2]$, qu'il remplit l'espace entre et autour des filaments de fibres de verre, les cimentant ensemble et réduisant leur flexibilité. Une autre technique consiste à densifier l'interface fibre/matrice par des produits, tels que des polymères (PVA, AC et VAC) afin d'éviter la diffusion de la chaux vers les fibres. [54]

De nombreux chercheurs indiquent que la durabilité à long terme de BRFV peut être améliorée par des modifications de la matrice. Selon Marikunte et al, l'ajout de 10% de métakaolin a entraîné une réduction de 10% de la résistance à la flexion et d'environ 25% de la ténacité après vieillissement (50°C dans un bain chaud pendant 84 jours). Plusieurs chercheurs ont signalé une amélioration de la durabilité du BRFV avec des cendres volantes en remplacement partiel du ciment portland. Zhang et al, ont constaté une amélioration de la résistance à la flexion et une réduction d'environ 30% de la ténacité était observée après le vieillissement (vieillessement accéléré à 80°C dans un bain chaud pour le remplacement du ciment par 60% des cendres volantes). Peled et al, ont constaté une amélioration de vieillissement du BRFV et une réduction de 40% de la résistance en flexion pour le remplacement du ciment par 70% des cendres volantes après vieillissement accéléré à 80°C dans un bain chaud pendant 6 semaines. Leonard et Bentur ont trouvé que le BRFV sans cendres volantes a perdu 50% de sa résistance à la flexion. L'ajout de laitier de haut fourneau n'a pas amélioré les performances, Mills a constaté après deux ans de vieillissement des spécimens du ciment remplacé par 50% du laitier de haut fourneau, qu'ils avaient des forces presque équivalentes à celles de la matrice des échantillons sans fibres. Peled et al en 2005, le remplacement du ciment de BRFV par l'ajout de laitier (18%) et des produits auxiliaires de stabilité dimensionnelle conduisant à l'amélioration de leur durabilité pour des échantillons immergées dans un bain d'eau chaude de 50°C pendant 84 jours, cette amélioration s'explique par l'absence de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans le composite des produits auxiliaires de stabilité dimensionnelle [131]. D'après Marikunte et al en 1997, l'ajout des pouzzolanes synthétiques améliore considérablement le comportement à la flexion et à la traction du BRFV. [154]

Pan et al en 2017, montrent que l'ajout du laitier au mortier avec des teneurs de 10 à 20%, provoquer une résistance à la compression élevés par rapport aux teneurs de 30 jusqu'à 50% à l'âge de 28 jours [106]. D'après Sadati et al en 2017, l'ajout de 0 à 12,5% de la fumée de silice au béton d'un rapport E/C de 0,4 à 0,5, qui modifie leur microstructure et diminuer la diffusion des ions chlorures [108]. D'après Arabi en 2011; l'ajout de la fumée de silice au taux de 3% peut améliorer légèrement la résistance, mais pas suffisamment protéger la surface des fibres dans l'environnement alcalins, cette amélioration devient imperceptible à l'air ambiant et à l'environnement sec [155]. D'après Arabi et al en 2017, la fumée de silice a réduit les phénomènes d'attaques de fibres en raison de l'effet pouzzolanique qui transforme la portlandite en C-S-H et diminuer la porosité du BRFV. Cependant, l'utilisation d'un ciment à faible alcalinité réduit la quantité de la portlandite dans la matrice, ce qui entraîne un appauvrissement de la production des ions hydroxyde, et diminuer le pH de la solution des pores et par

conséquent, l'environnement qu'il peut être épuisé (moins basique). D'autre part, les ions Ca^{2+} peuvent être combinés à la fumée de silice pour former des nouveaux silicates de calcium hydratés. [156]

II.3. Matériaux utilisés pour la confection des échantillons en béton

La détermination des propriétés des matériaux utilisés est une étape inévitable, cette étape a pour objet de déterminer les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques conformément aux normes recommandées. Ensuite, on étudie la formulation du béton pour de déterminer les fractions massiques de ces constituants: sable, gravier, ciment, ajouts minéraux, eau, adjuvant et fibres.

II.3.1. Normes

Les caractéristiques des matériaux utilisés sont déterminés au laboratoire, et conformément aux normes présentés aux tableaux 01, 02 et 03 en annexe.

II.3.2. Ciment

Les eaux de mer sont très sulfatées, car dans la plus part des ouvrages maritimes, il s'agit du ciment de type CRS (ciment résistant aux sulfates) utilisé. Le ciment utilisé dans cette étude est de type CRS (NA 443 - CEM I 52.5 N-ES) qui est celui fabriqué à l'usine de LAFARGE-M'sila. Ainsi qu'il est constitué de 95% de clinker et de 5% du gypse. Les résultats d'analyse chimique par diffraction des rayons X sur un échantillon de ciment CRS sera présentée à la figure (II, 01). Alors que, les tableaux (II, 01) et (II, 02) sont regroupés les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques respectivement du même échantillon de ciment selon la fiche technique.

Tableau (II, 01): Propriétés physiques et mécaniques du ciment CRS. [157]

Consistance normale dans la pâte de ciment (%)		27,50 à 29,50
Surface spécifique selon la méthode de Blaine (mm^2/g)		3700 à 4200
Résistance à la compression (MPa) à 28 jours		$\geq 52,50$
Temps de prise à 20°C	Début de prise (min)	60 à 140
	Fin de prise (min)	100 à 180

Tableau (II, 02): Analyses chimiques du ciment CRS. [157]

Constituants	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF	Gypse
Valeurs en %	60 à 72	3 à 10	2 à 4,50	11 à 15	5

Les analyses chimiques dans notre type du ciment montrent qu'il est composé par l'oxyde de calcium, la silice et d'une faible teneur d'aluminates de calcium (C₃A). Enfin, notre type du

ciment a des caractéristiques acceptables qui permettent de l'utiliser à la formulation et à la confection du béton.

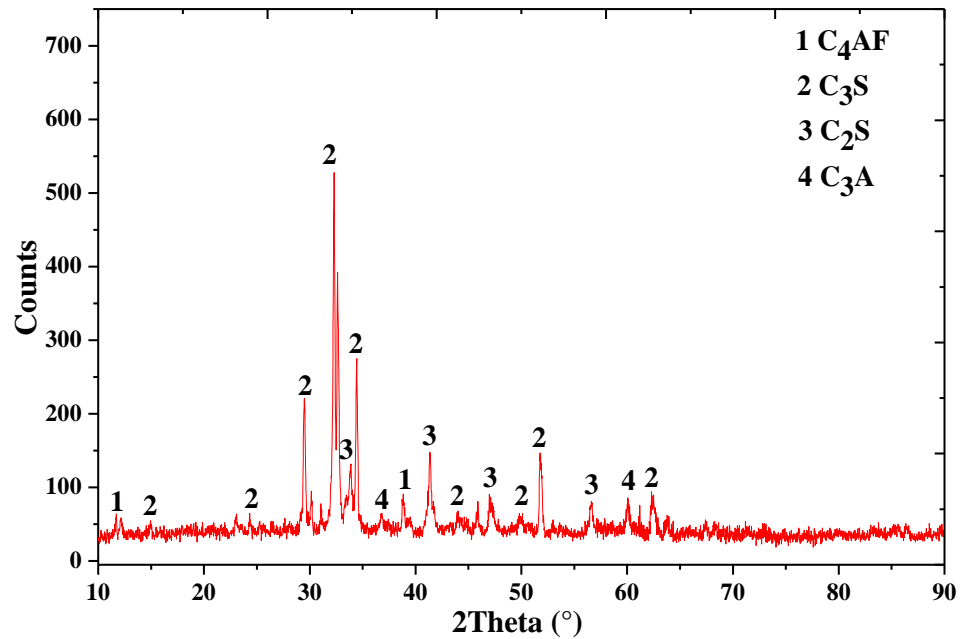


Figure (II, 01): Analyse DRX du ciment CRS.

II.3.3. Ajouts minéraux

De nombreux chercheurs ont indiqués que l'utilisation des ajouts minéraux peut modifier la texture de la matrice cimentaire, améliorer la performance et la durabilité du béton [28]. L'ajout du laitier de haut fourneau mène à la consommation d'une grande partie de la portlandite fournie par le ciment portland au cours de son hydratation, afin d'améliorer la résistance mécanique du béton immergé dans un environnement sulfatique [29, 131]. L'ajout de la fumée de silice a réduit les phénomènes d'attaques des fibres en raison de l'effet pouzzolanique qui transforme la portlandite en C-S-H et diminuer la porosité du béton [156]. Le laitier de haut fourneau granulé broyé utilisé dans notre étude est d'Elhadjer-Annaba, dont la granulométrie inférieure à 6,30mm conformément à la norme européenne NF P18-506 [158]. Par conséquent, la courbe de l'analyse granulométrique du laitier est présentée à la figure (II, 02).

Le laitier utilisé a un faible un pourcentage d'éléments fins inférieurs à 0,125mm selon leur courbe d'analyse granulométrique, et son module de finesse égale à 2,74%, il est donc d'une granulométrie moyenne. La fumée de silice utilisée est une silice ultra fine de couleur grise, dont la surface spécifique Blaine de 23m²/g (d'après la norme NF P18-502), et elle est provienne de l'entreprise SIKA (Alger) (voir les figures en annexe) [159, 160]. La figure (II, 03) illustre les analyses DRX du laitier et de la fumée de silice. Les analyses chimiques du laitier et de la fumée de silice sont regroupées au tableau 10 en annexe.

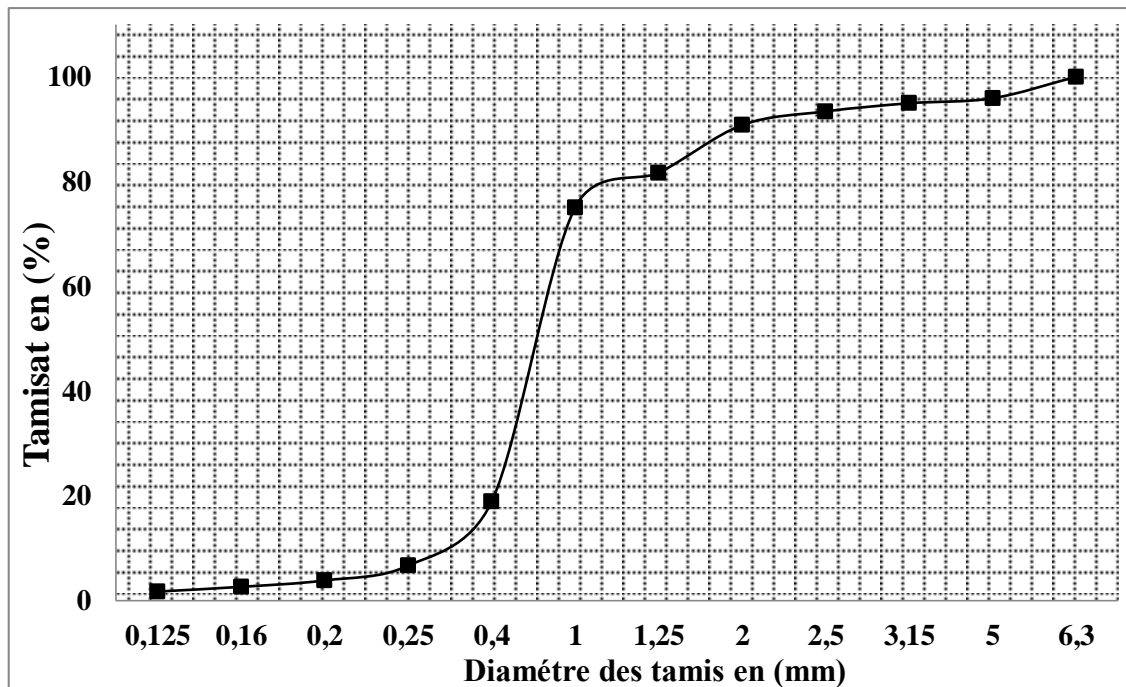


Figure (II, 02): Analyse granulométrique du laitier de haut fourneau.

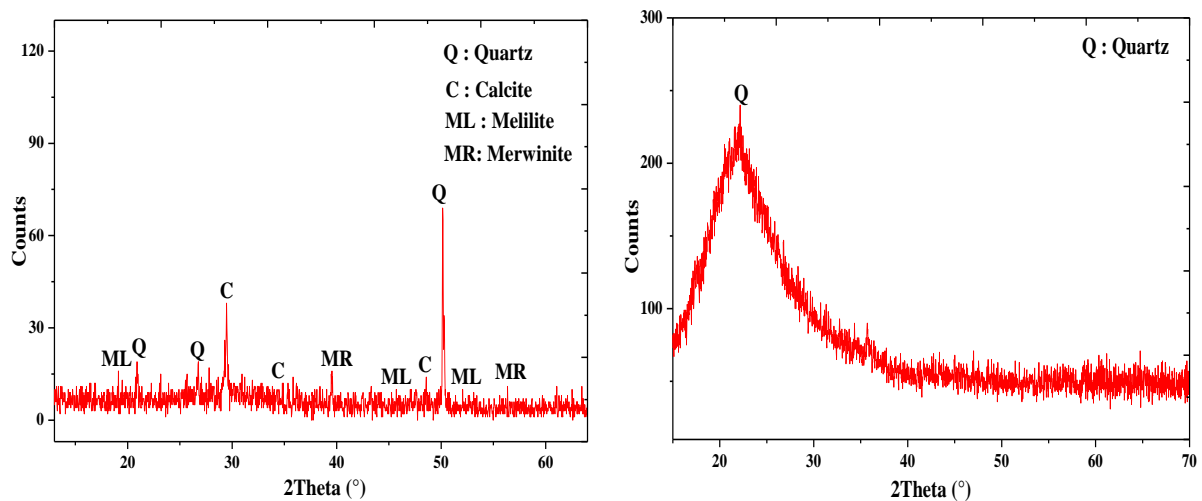


Figure (II, 03): Analyse DRX (a) du laitier, (b) la fumée de silice.

D'après les analyses chimiques présentées ci-dessus, nous constatons que les éléments les plus intenses au laitier sont la calcite et le quartz, donc ce matériau est de type calcaire. La fumée de silice est d'origine siliceux, ainsi que l'élément le plus intense de la courbe des analyses chimiques est le quartz (SiO_2).

II.3.4. L'adjuvant superplastifiant

Dans cette étude, on utilise le super plastifiant TEKSUPERFLOW 2000 R, il est polyvalent, compatible avec tous les types du ciment et haut réducteur d'eau. Cet adjuvant est ajouté au béton frais lors du malaxage pour garder sa maniabilité selon la norme européenne NF EN 934-

2. Ses propriétés chimiques et physiques du super plastifiant TEKSUPERFLOW 2000 R selon la fiche technique sont présentées au tableau (II, 03). [161, 162]

Tableau (II, 03): Propriétés physico-chimique de l'adjuvant TEKSUPERFLOW 2000 R. [162]

Aspect	Liquide	pH à 20°C	10 ± 1
Couleur	Brun	Extrait sec (%)	35 ± 2
Densité (g/cm³) à 20°C	1,18 ± 0,03	Teneur en chlorures (%)	0,10

II.3.5. Fibres

Actuellement, tous les travaux de recherches sur le BRFBV ont été élaborés par l'utilisation des fibres de verre AR comme un renforcement de la matrice cimentaire. Parce que, ce type de fibres qui contiennent de 15 à 20% de zirconium (ZrO₂), celle-ci améliore considérablement la durabilité du béton dans les milieux alcalins à long terme [50, 54]. Habituellement, le choix du pourcentage des fibres en volume est en fonction de la composition de la matrice, le mode de mise en œuvre des pièces en béton, et des performances recherchées. Le pourcentage des fibres de verre coupées en béton varie de 2 à 5% du poids [58]. Dans cette étude, on prendra différents pourcentages des fibres de verre coupées type AR dans les mélanges (0, 1%, 3% et 5%). Ces fibres sont de type Cem-Fil alcali-résistante haute performance (ARHP 67/36), et des longueurs de 36mm (voir la figure (II, 04)). Elles sont caractérisées par son enrichissement en zirconium (ZrO₂) ou de 16,80%, qui lui confèrent une meilleure durabilité vis à vis de l'attaque alcaline du ciment. Les propriétés chimiques et physico-mécaniques des fibres de verre ARHP 67/36 anti-crack données par le fabricant OWENS CORNING (Espagne) sont montrées aux tableaux (II, 04) et (II, 05) respectivement.

Tableau (II, 04): Propriétés physico-mécaniques des fibres AR HP 67/36 anti-crack.

Propriétés	Valeurs
Longueur (mm)	35 ± 2
Diamètre (µm)	14 - 19
Masse volumique (Kg/m ³)	2680
Contrainte à rupture en traction (MPa)	> 1700
Module d'élasticité en traction (MPa)	72000
Allongement à rupture (%)	3
Coefficient de dilatation linéique α (entre 20 et 100°C)	7,5 X 10 ⁻⁶
Point de ramollissement (°C)	840

Tableau (II, 05): Composition chimique des fibres AR HP 67/36 anti-crack utilisée. [163]

Constituants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	(Na ₂ O + K ₂ O)	CaO	MgO	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Valeurs en %	61.2	0.4	0	14.7	5.6	< 0,10	16.8	< 0,10	< 0,10



Figure (II, 04): Fibres de verre ARHP 67/36 anti-crack.

II.3.6. Granulats

Les agrégats utilisés sont les suivants: le sable siliceux de la région d'Oued Zehour-Skikda est d'une granulométrie inférieure à 5mm, et les graviers concassés de classes granulaire (3/8) et (8/15) proviennent à la carrière de Chelghoum Laïd-Mila. Ces graviers sont fournis en vrac et sont conformes aux normes nécessaires à la construction. La figure (II, 05) illustre les courbes de l'analyse granulométrique des granulats. Dans la composition des bétons, il est nécessaire que des raisons économiques utilisent des matériaux locaux. L'échantillonnage de ce matériau est effectué dans un plateau en tôle, pour l'homogénéisation d'échantillon de tel matériau en utilisant une pelle manuelle. La quantité du matériau enlevé doit être au moins deux fois le plus grande que la masse nécessaire pour faire le ou les essais au laboratoire selon la norme européenne NF P 18-553 (voir les figures en annexe) [164]. Les résultats des essais physiques et mécaniques sont illustrés au tableau (II, 06).

Tableau (II, 06): Propriétés physiques et mécaniques des granulats.

	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique apparente (g/cm³)	1,416	1,389	1,35
Masse volumique absolue (g/cm³)	2,60	2,72	2,80
Equivalent de sable (%)	77,40	-	-
Propreté des granulats (%)	-	1,63	0,47
Coefficient de Los Angeles (LA) (%)	-	-	24,72
Coefficient de micro deval (MDE) (%)	-	-	19,20

Les résultats des essais physico-mécaniques sur les granulats montre que:

- Le sable est d'un module de finesse de 2,54%, on peut dire que ce sable est d'une finesse moyenne. En outre, notre sable est d'un module ES de 77,40%, et a un pourcentage de 5,50%

d'éléments fins inférieures à 0,08mm, soit moins de 12%. Donc, le sable est propre de faible pourcentage de fines, et est parfait pour le béton ordinaire;

- Le gravier 8/15 est des coefficients de LA inférieur à 25% et de MDE moins de 20%, donc ce gravier est de catégorie (C). Les deux types des graviers 3/8 et 8/15 sont des propretés superficielles inférieures à 2%. Enfin, ces graviers sont acceptables pour la confection d'un béton ordinaire. [165]

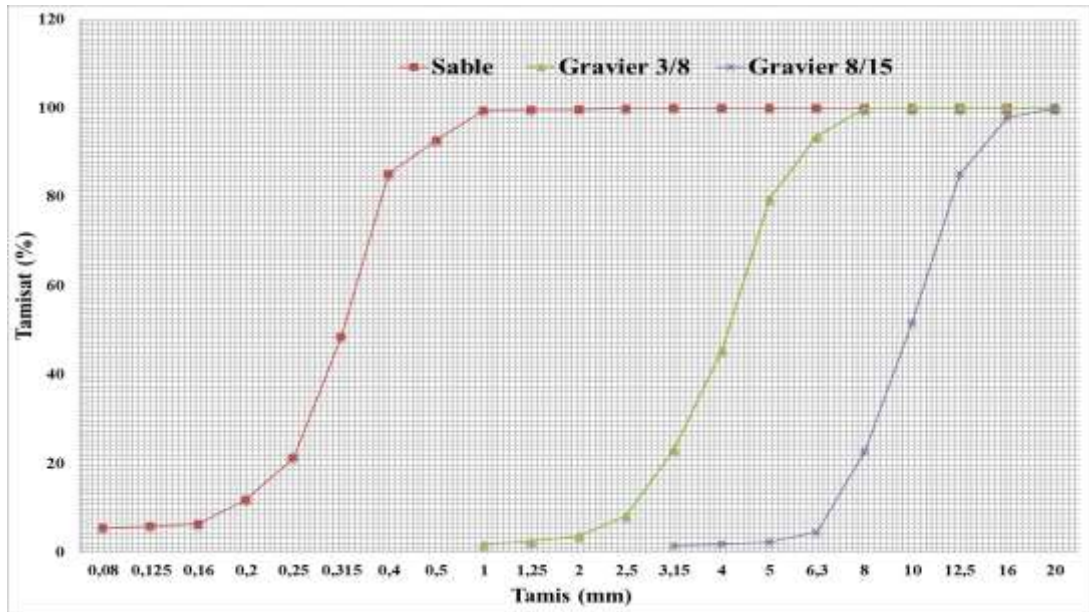


Figure (II, 05): Courbes d'analyses granulométriques des granulats (sable, gravier 3/8 et 8/15).

Le tableau (II, 07) résume les analyses chimiques des granulats utilisés. Les analyses DRX des granulats sont illustrées aux figures (II, 06), (II, 07) et (II, 08).

Tableau (II, 07): propriétés chimiques des granulats.

Constituants		Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Insolubles (%)		94,40	02	5,40
Sulfates (SO ₃ ⁻²) (%)		Traces	Traces	Traces
Carbonates (CaCO ₃) (%)		03	92	90
Chlorures	Cl ⁻ (%)	0,003	0,006	0,006
	NaCl (%)	0,005	0,009	0,009

D'après les analyses chimiques précédentes, nous concluons ce qui suit:

- Le sable est d'origine siliceux, ainsi que les éléments agressifs sont contenus en quantités négligeables, ce qui permet son utilisation pour la confection du béton.
- Les graviers 3/8 et 8/15 sont des matériaux d'origine calcaire, les éléments nuisibles sont contenus en quantité faible, donc on peut utiliser ces granulats pour la confection du béton sans crainte.

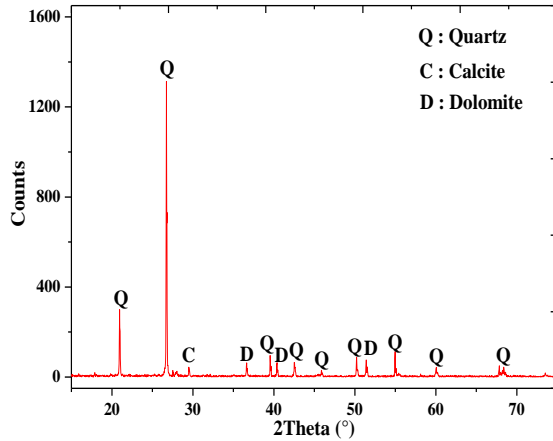


Figure (II, 06): Analyse DRX du sable.

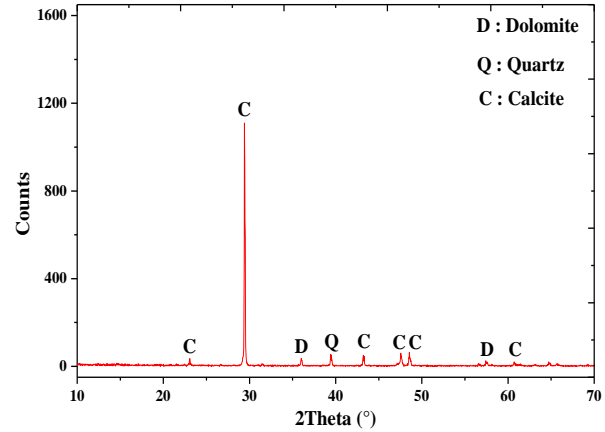


Figure (II, 07): Analyse DRX du gravier 3/8.

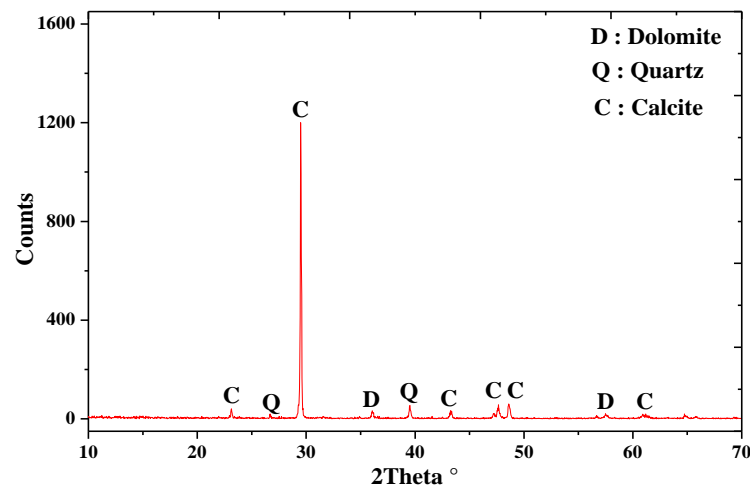


Figure (II, 08): Analyse DRX du gravier 8/15.

II.3.7. Eau de gâchage

L'eau de gâchage est souvent une eau douce propre de toutes impuretés solides ou solubles qui peut influencer sur la stabilité des granulats, ou les conditions d'hydratation, ou le durcissement du béton, ou l'évolution de la résistance mécanique et/ou la durabilité du béton, ou la protection des armatures contre la corrosion [2]. En générale, l'eau potable est propre, ne nécessite pas d'essai d'analyse, caractérisé par des propriétés physico-chimiques acceptables pour la confection du béton [166]. L'eau utilisée est l'eau du robinet provenant de la ville de Jijel qui alimente notre laboratoire. Cette eau est faiblement agressive selon la norme européenne XP P18-303.

II.3.8. Conclusion

L'étude des différentes caractéristiques des granulats, ciment, ajouts minéraux, adjuvants et des fibres montre que ces matériaux sont acceptables pour la confection des éprouvettes en béton.

II.4. Formulation des bétons de fibres

II.4.1. Etude de formulation par Dreux Gorisse

L'étude de la composition d'un béton de fibre consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage du ciment, la teneur en eau et le pourcentage des fibres, afin d'obtenir un béton de bonne qualité [167]. Il y a peu d'informations dans la littérature sur les formulations du béton de fibres. La formulation du béton de fibre est une étude complexe car elle n'est pas un ajout d'un ou plusieurs pourcentages de fibres à une composition étudiée d'un béton, car l'addition des renforts modifie les caractéristiques de la matrice cimentaire. Il s'agit d'un matériau nouveau et il ne peut être abordé comme un béton armé tel qu'on le connaît actuellement. Les fibres ne sont pas considérées comme un renforcement classique [168]. Les caractéristiques rhéologiques satisfaisantes et la compacité maximale de béton frais sont deux critères importants pour obtenir une très bonne formulation du béton. [169]

Dans notre étude, la formulation du béton Dreux Gorisse est utilisée pour déterminer la composition du béton sans fibre. Cette méthode est la plus utilisée pour la confection du béton, elle est basée sur les courbes granulométriques des granulats utilisés. La composition du mélange sec est déterminée à partir de tracer: la courbe de référence d'une ligne brisée, les lignes de partage et la verticale de Joisel qui permettant les lectures des pourcentages de S, G3/8 et G8/15 (le détail de calcul est en annexe). Selon la norme européenne NFP 18-011, l'environnement de conservation des échantillons en béton est fortement agressifs ou de classe «A₃». Pour cette raison, le dosage minimal du ciment est fixé à 400Kg/m³ [167]. D'autre part, le superplastifiant utilisé a pour objet d'obtenir des bétons frais à consistance parfaitement liquide, donc très maniables, et de réduire la valeur du rapport E/C sans aggraver le comportement rhéologique de la pâte du béton [17, 36]. L'ouvrabilité du BRFV était moins bonne, lorsque le pourcentage de fibres est élevé et la taille des agrégats est plus grande. En outre, les bétons de fibres sont plus difficiles à mettre en œuvre que les bétons classiques. Le rapport longueur/diamètre de fibres influe également sur l'ouvrabilité du béton de fibres [167]. Le tableau en annexe illustre la composition de base d'un 1m³ du béton frais sans fibre étudiée par la méthode Dreux Gorisse.

II.4.2. Optimisation du béton fibré

Pour l'optimisation de la composition du BRFV, la méthode expérimentale de LCPC Baron-Lesage est utilisée. Cette méthode est basée sur les deux essentielles hypothèses:

- On fixe le rapport E/C au début;
- Le dosage optimal des agrégats ne dépend pas des teneurs en eau et en ciment.

Dans notre cas, la troisième hypothèse est introduite de manière à ce que cette méthode soit applicable pour la fabrication du BRFBV :

- L'ajout de fibres de verre au béton ne modifie pas les deux hypothèses précédentes. [170, 171]

Afin d'obtenir un béton de très bonne maniabilité, on va suivre ces étapes :

- Le rapport E/C est fixé au départ à une valeur de 0,42, ainsi que le pourcentage de fibres à incorporer;
- On propose différents rapports de S/G (sable/gravier), puis déterminez la maniabilité du béton de fibres pour chaque rapport S/G. Dans cette partie, la maniabilité du béton pour chaque pourcentage de fibres de verre (0, 1%, 3% et 5%) est testé, car cinq gâchés du béton avec des rapports S/G différents sont réalisés, tel que: S/G = 0,4, S/G = 0,5, S/G = 0,6, S/G = 0,7 et S/G = 0,8, en outre le rapport E/C est fixé à 0,42 (Résultats de l'essai de maniabilité est en annexe au tableau 06).

Le BRFBV confectionné dans cette étude est basé sur la formulation du béton présentée au tableau (II, 08).

Tableau (II, 08): Masses des constituants du béton de fibres.

Constituants du BRFBV	R0	R1	R3	R5
	EM0	EM1	EM3	EM5
Ciment en (Kg)	308	308	308	308
Laitier en (Kg)	80	80	80	80
Fumée de silice en (Kg)	12	12	12	12
Sable en (Kg)	728,06	726,56	723,56	720,56
Gravier 3/8 en (Kg)	233,74	233,26	232,29	231,33
Gravier 8/15 en (Kg)	979,70	977,68	973,64	969,60
Fibres (Kg)	0 (0%)	4 (1%)	12 (3%)	20 (5%)
Eau en (l)	168	168	168	168
Superplastifiant en (%)	1,5			
E/L	0,42			
S/G	0,6			

II.5. Confection et conservation des éprouvettes en béton de fibre

II.5.1. Confection des éprouvettes en béton

Pour la confection des éprouvettes en béton les moules prismatiques et cubiques utilisés sont des dimensions (70X70X280)mm³ et (100X100X100)mm³ respectivement conformément aux normes européennes NF P 18-427 et NF EN 12390-1 [172, 173]. Bien que, les tests effectués sur

ces éprouvettes sont: à la compression, de flexion, absorption capillaire, essai de carbonatation et des analyses chimiques.

II.5.2. Malaxage et coulage du béton

Le malaxage du béton de fibre se fait dans une bétonnière électrique d'un volume de 130l, selon la norme française NF P18-404 et selon la formulation du béton étudiée (voir la figure 03 en annexe). Les étapes de malaxage du béton sont citées ci-après:

- Introduire les constituants du béton de l'ordre suivant: graviers, ciment, laitier, fumée de silice et sable. Puis malaxer mélange sec dans une durée de 1min à une vitesse lente; [174]
- Ajouter l'eau de gâchage, puis malaxer le mélange frais dans une durée de 2 minutes à une vitesse rapide. Lorsqu'on met 90% de l'eau de gâchage, le superplastifiant est ajouté au béton frais (avec 10% de l'eau restant), jusqu'à ce que la consistance souhaitée soit obtenue; [162]
- Les fibres de verre AR sont progressivement additionnées en pluie au mélange au cours de la dernière étape à une durée moyenne de 01 à 02 minute avec une vitesse faible du malaxage selon la norme européenne, afin d'obtenir une ouvrabilité maximale, une dispersion facile de fibres et diminuer également les dommages causés à leurs surfaces [58, 175].
- Vérifier la plasticité du béton en mesurant l'affaissement par l'essai du cône d'Abrams;
- Les prélèvements du béton frais ne doivent pas être effectués directement dans la cuve, mais par vidage latéral ou central de celle-ci;
- Huiler les moules cubiques et prismatiques, puis introduire la pâte frais à la truelle aux moules en deux couches;
- Vibrer chaque couche du béton de fibre par la table vibrante pendant une durée de 10 secondes;
- Raser et régler la surface du béton par une pelle, puis laisser pour le durcissement. [174]

II.5.3. Composition chimique des eaux de mer

L'eau de mer est d'une salinité d'environ de 3,5%, bien qu'elle varie d'un océan à l'autre en fonction de la géologie [176]. Les principaux composants chimiques de l'eau de mer sont les ions de chlorure, de sodium, de magnésium, de calcium et de potassium. La concentration des principaux constituants du sel de l'eau de mer est exprimée en % du poids de sel comme 78% de NaCl, 10,5% de MgCl₂, 5% de MgSO₄, 3,9% de CaSO₄, 2,3% de K₂SO₄, 0,3% de KBr [26]. Les concentrations ioniques de Na⁺ et Cl⁻ sont les plus élevées, en outre les ions de Mg²⁺ et SO₄²⁻ suffisants pour fournir une action agressive sur produits d'hydratation du ciment. Un autre aspect

important est le CO₂ dissous dans l'eau de mer, formant de l'acide carbonique puis attaque la matrice cimentaire, et enfin il provoque la lixiviation de calcium de la pâte du ciment hydraté [177]. Les résultats des analyses chimiques de l'eau de mer de la ville de Jijel seront regroupés au tableau (II, 09).

Tableau (II, 09): Résultats des analyses des paramètres minéralogiques globaux de l'eau de mer de la ville Jijel.

Eléments	pH	Cl ⁻	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	Conductivité	Salinité
Unité	-	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µs/cm	mg/l
Valeur	8.06	20346	475	1366	460	1449	10400	7170	4700

D'après les analyses du tableau ci-dessus, les principaux composants chimiques de l'eau de mer sont: des chlorures, sodium, magnésium, calcium et potassium. Selon la norme européenne NF P 18-011, l'eau est moyennement agressive car elles ont une teneur des sulfates (SO₄⁻²) et de magnésium (Mg⁺²) comprise entre 300 et 1500mg/l, mais dans le cas d'un béton totalement immergé de l'eau de mer, la zone de marnage relevant d'une agressivité classée en A₃ ou fortement agressive. Cette eau est caractérisée par un haut degré de salinité, dont le pH est légèrement basique, elle contient un excès de minéraux bicarbonates, et d'une valeur de conductivité très élevées [167, 178]. Par conséquent, ces valeurs montrent l'existence de très fortes concentrations de sels minéraux solubles. Enfin, ces eaux se caractérisaient par une concentration élevée de chlorures qui les rendent agressifs d'introduire un risque élevé de corrosion des armatures des structures en béton armé.

II.5.4. Conservation des éprouvettes

Après le coulage du béton, tous les éprouvettes sont conservées dans les moules à une salle humide du laboratoire (T = 20 ± 2°C et HR = 95 ± 5%) pendant une durée de 24 heures, pour le durcissement du béton et éviter toute évaporation de l'eau.

Le prélèvement des échantillons en béton se fait selon la norme européenne NF EN 12390-2. Après le démoulage, la première série d'éprouvettes témoins est conservée dans un bac rempli d'eau potable en laboratoire tout au long de la période de conservation;

La conservation de la deuxième série d'éprouvettes se fait selon le programme ci-après:

- Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans une salle au laboratoire (T = 20 ± 2°C, et HR = 95 ± 5%); [179]
- Après 28 jours de conservation, les éprouvettes sont conservées dans des bacs remplis d'eau de mer de la ville de Jijel, cet eau est changée chaque fois ou après 15 jours jusqu'à le dernier jour de conservation.

Ces éprouvettes sont conservées dans milieux cités, jusqu'à les dates des essais de 28, 90, 180 et 365 jours (voir la figure (II, 09)).



Figure (II, 09): Conservation des éprouvettes en béton de fibres dans l'eau de mer.

II.6. Caractérisation du béton de fibre à l'état frais

II.6.1. Maniabilité du béton

Le but de ce test est de déterminer le temps d'écoulement du béton de ou sans fibre dans un couloir vibrant du maniabilimètre LCPC selon la norme française NFP 18-452. Le maniabilimètre utilisé comprend une cuve métallique dont les dimensions intérieures de: 30cm de largeurs, profondeur de 30cm et 60cm de longueur, et une cloison amovible qui sépare le moule en deux parties. Le grand compartiment du moule est rempli en quatre couches du béton, alors que chaque couche est piquée de 6 coups en utilisant d'une tige métallique des dimensions de 6mm de diamètre, qui pèse de 200g et la surface libre est arasée à la règle. Le temps d'écoulement entre la fin du malaxage et le début de l'écoulement sous vibration doit être de 2min 30S. Lorsque le vibreur est mis en marche, on déclenche le chronomètre et on enlève la cloison amovible. Le temps d'écoulement enregistré «t» est caractérisé la consistance du béton. Enfin, plus le temps d'écoulement est court, plus le béton est fluide et plus maniable. [180]

II.6.2. Mesurer de l'affaissement par l'essai de cône d'Abrams

L'essai de mesurer l'affaissement a pour but de déterminer la plasticité du béton de fibre par l'utilisation du moule tronconique en tôle de dimensions ($D=20\text{cm}$, $d=10\text{cm}$ et $h=30\text{cm}$) selon la norme française NF P 18-451. Cet essai est effectué selon les étapes ci-dessous, lorsque le gâché du béton est préparé en fonction de la formulation étudiée.

- Mouillez la surface du support, et huiler légèrement le cône, puis placer l'entonnoir. A l'aide d'une pelle creuse, introduire le béton en (3) couches représentant $1/3$ de la hauteur du cône;

- Piquer chaque couche 25 coups par une tige de piquage de diamètre de 16mm. Ces coups doivent être distribués et pénétrer tous les couches. À la dernière couche, et lors du piquage, ajoutez le béton nécessaire pour que le cône soit plein;
- Raser la surface du cône, et régler le niveau par une règle métallique;
- Démouler immédiatement en soulevant le cône avec précaution, lentement, à la verticale et sans secousses. Enfin, l'affaissement du béton est mesuré par une règle, et on utilise le point plus haut comme un repère du béton affaissé [2, 181].

II.7. Caractérisation du béton de fibre à l'état durci

Les tests de spécimens en BRFBV ont été effectués aux laboratoires de LTPE, LNHC, et LPCA, après le séchage des échantillons conservés aux différents milieux à l'air libre pour une durée de 24 heures, puis procédant à un programme d'essais physiques, chimiques et mécaniques.

II.7.1. Essai de résistance à la compression

Cet essai a été effectué au laboratoire de LTPE unité de Jijel, par l'emplacement des éprouvettes cubiques (100X100X100)mm³ au milieu d'une presse (machine type CONTROLS-DIGIMAX de force Max de 5000KN), et de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens du coulage. Enfin elles sont chargées par l'application de charge sans choc et s'accroît de façon continue de vitesse constante sélectionnée, jusqu'à la rupture de l'éprouvette conformément à la norme européenne NF EN 12390-3. Le dispositif de l'essai de compression est illustré à la figure (II, 10).



Figure (II, 10): Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.

La résistance à la compression des éprouvettes en béton est calculée par la relation (II, 01); alors que sa valeur de résistance est la moyenne des résultats de cinq (05) éprouvettes dans chaque période d'essai.

$$R_c = \frac{F}{A} \quad (\text{II, 01})$$

Ou;

R_c : est la résistance en compression, exprimée en MPa ou (N/mm²);

F : est la charge maximale, exprimée en Newtons;

A : est l'aire de la section de l'éprouvette chargée, exprimée en mm². [182]

II.7.2. Essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion se fait conformément à la norme française NF P18-407, et par l'emplacement des éprouvettes prismatiques (70X70X280)mm³ dans la machine d'essai (machine type CONTROLS de force Max de 3000KN). La figure (II, 11) montre le dispositif d'essai de flexion, la charge est appliquée sans choc et de façon continue à la face perpendiculaire au surfacage du moulage, à une vitesse constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette.



Figure (II, 11): Essai de traction par flexion des éprouvettes en béton de fibres conservées dans différents milieux.

Cet essai a été effectué au laboratoire LNHC unité de Jijel; la valeur de la résistance de traction par flexion des éprouvettes en béton est la moyenne des résultats de quatre (04) éprouvettes pour chaque série d'essai. La contrainte de rupture de traction par flexion est calculée par la relation (II, 02):

$$R_f = \frac{3F}{a^2} \quad (\text{II, 02})$$

Avec;

R_f : est la résistance de traction par flexion, exprimée en MPa ou (N/mm²);

F: est la charge maximale, exprimée en Newtons;

a: est la cote de l'éprouvette chargée est égale à 70mm [167, 183].

II.7.3. Essai d'absorption capillaire (AC)

L'essai d'absorption capillaire a été effectué au laboratoire LTPE unité de Jijel conformément à la norme NF EN 1925. Cet essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée pour une éprouvette sous l'effet d'un gradient de pression hydraulique, par le prélèvement des éprouvettes en béton de dimensions (70X70X100)mm³ conservées dans les différents milieux, puis séchées dans l'étuve jusqu'à masse constante.



Figure (II, 12): Essai de l'absorption capillaire des éprouvettes en béton au labo LTPE.

Ces éprouvettes sont déposées horizontalement à la face sciée destinée à absorber l'eau pendant une durée de 72 heures d'un récipient contenant 2cm de sable saturée d'eau, les autres faces des éprouvettes sont badigeonnées du paraffine ayant pour objet de limiter l'évaporation d'eau absorbée et assurer l'absorption juste de la surface sciée (Voir la figure (II, 12)), de sorte que ces éprouvettes sont préparées avant 24 heures de l'essai, l'absorption capillaire d'eau est calculée par la relation (II, 03) [184]. La valeur de l'absorption capillaire est la moyenne des trois (03) éprouvettes en béton dans chaque série d'essai.

$$A_c = \frac{100P}{S\sqrt{t}} \quad (\text{II, 03})$$

Avec :

A_c : Absorption capillaire d'eau, exprimée en g/cm²;

P: Poids d'eau, exprimée en gramme;

t: Durée de conservation des éprouvette (72 heures);

S: Surface de l'éprouvette contactée avec l'eau, égale à $(7 \times 7) \text{cm}^2$ [185].

II.7.4. Essai de mesurer la profondeur de carbonatation

Le test de carbonatation a été effectué au laboratoire de LNHC unité de Jijel, ayant pour but de déterminer la profondeur de carbonatation des chutes prismatiques en béton de dimensions $(70 \times 70 \times \text{Hvar}) \text{mm}^3$, le test en question se fait sur la face de rupture fraîche des éprouvettes en béton par l'application d'une solution alcoolique de phénolphtaléine. La partie superficielle carbonatée qui reste incolore soit un pH est inférieur à 9, tandis que la zone colorée en rose vif indique un pH supérieur à 9 soit non carbonaté. Ce test est réalisé sur les surfaces des éprouvettes dans les mêmes conditions d'essai (Figure (II, 13)). Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation des éprouvettes en béton [4]. La valeur de profondeur de carbonatation est la moyenne des trois (03) éprouvettes en béton dans chaque période d'essai.



Figure (II, 13): Essai de mesure la profondeur de carbonatation des éprouvettes en béton de fibre.

II.8. Études antérieures sur le PRV au domaine maritime

Les matériaux composites à base de fibres de verre sont bien connus dans certaines applications maritimes depuis 25 ans, étant utilisé dans les plates-formes pétrolières en mer au début des années quatre-vingt-dix. Ils sont aussi bien connus dans le secteur naval où les navires sont généralement construits avec ces matériaux. Il y a d'autres applications assez communes comme des réservoirs de stockage d'eau, des canalisations pour les usines de dessalement d'eau et systèmes de lames de courants de marée pour la production d'énergie. Dans tous ces applications, la résistance à la corrosion des matériaux PRV fait les très efficaces. Il existe également des applications en génie civil très connues où les composites ont été appliqués, comme le composite de construction ponts, passerelles pour piétons en PRV ou réparation

et renforcement des structures en béton du pont. Les armatures en PRV sont utilisées est pour renforcer le béton structurel, où la force des barres d'armature en béton environnementales est importante comme effet de glace sur les dalles de pont en béton armé d'acier renforcé. Bien que la résistance à la corrosion des matériaux en PRV soit bien connue, il existe peu d'expériences dans lesquelles les matériaux en PRV sont rarement utilisés dans le domaine maritime [138, 147]. Les composites en PRV sont souvent utilisés dans des applications marines telles que canoës, chalutiers de pêche, patrouilleurs bateau et navires de recherche de mines navales et dans la coque sans pression caissons, dôme de sonar et mâts de sous-marins. [149]

Les seules références sont trouvées pour certaines applications marginales comme la construction d'éléments composites pour la protection des rives de la mer et des ouvrages d'art contre l'impact des vagues sur le chemin de fer Tuapse – Adler qui longe la côte russe de la mer Noire. Une autre application est renforcée par palplanches des composites de plusieurs panneaux pour construire une mer de retenue des murs, utilisés dans certaines applications comme une digue de 141m à Martinez Marina au Canada. La seul raison pour laquelle le PRV n'est pas utilisé dans les applications maritime est dû aux effets de l'environnement de l'eau de mer peut dégrader les propriétés mécaniques à long terme des composites en PRV et la résistance au cisaillement inter-laminaire [147]. Lorsqu'il est utilisé en marine applications, il est essentiel que les composites PRV conservent leurs propriétés mécaniques et ne se dégrade pas lorsqu'il est immergé dans la mer l'eau pendant une longue période. Un problème majeur lié à l'utilisation des composites en PRV dans l'eau de mer, c'est que l'interface fibre/matrice est dégradée par une réaction d'hydrolyse de groupes insaturés au sein de la résine. La dégradation de l'eau de mer peut provoquer un gonflement et une plastification de la matrice polyester, et déliaison à l'interface fibre/matrice qui peut réduire les propriétés mécaniques [149]. Le gonflement induit par l'humidité introduit des contraintes à la fois dans la résine en raison d'inhomogénéités du réseau et à l'interface fibre/matrice. Lessivage de faible masse moléculaire des espèces de poids peuvent également se produire, ce qui peut entraîner des contraintes résiduelles dues à rétrécissement que le réseau de polymère se ferme dans l'espace précédemment occupé par les molécules extraites. L'eau peut provoquer une dégradation chimique des fibres de verre entraînant des énergies de fracture inférieures en présence d'humidité [186]. Selon les résultats de Garcia-Espinel et al en 2014, nous remarquons que les composites verres/polyester après saturation à l'humidité, la contrainte de traction est diminuée de l'ordre de 1,25% à l'âge de 65 jours et devient presque stabilisé, par contre cette diminution pas en flexion. [147]

II.9. Matériaux utilisés pour la confection des plaques en PRV

La fabrication du PRV nécessite de définir les propriétés des matières premières utilisés du corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées l'évolution des différents caractéristiques du matériau et les techniques d'essai. Pour caractériser ce matériau, on va suivre les étapes ci-après:

- Propriétés des matières premières utilisées;
- Les dimensions des éprouvettes en du PRV;
- Mode de fabrication, soient: la méthode de l'introduction et de répartition des fibres dans les échantillons en PRV;
- Et enfin, le mode de conservation des corps d'épreuve dans le milieu agressif.

II.9.1. Normes

La caractérisation du PRV et l'identification de leurs matières premières est effectuée au laboratoire de l'usine de MAGHREB PIPE-M'sila, et conformément les normes illustrés aux tableaux 07, 08 et 09 en annexe.

II.9.2. Fibres de Verre

Le renforcement d'un composite est relié au type de fibres, leurs pourcentage et l'orientation de ces fibres par rapport à la direction des charges, généralement le rapport (fibres/résine) étant supérieur à 50% de fibres par poids [135]. Les renforts utilisés dans les plaques en PRV sont de combinaison d'un mat et tissage (Combo Mat 600/300) du verre E et d'un tissu en fibres de verre du type C. Ce combo Mat est constitué par deux faces: une face des fibres coupées du type E des longueurs entre 35 et 50mm, elles sont réparties aléatoirement dans les deux sens et d'une masse surfacique de 300g/m². La deuxième face est d'une mèche tissu d'une répartition en toile et d'une masse surfacique de 600g/m², ce tissu est d'une rigidité élevée et est peu déformable pour la mise en œuvre.

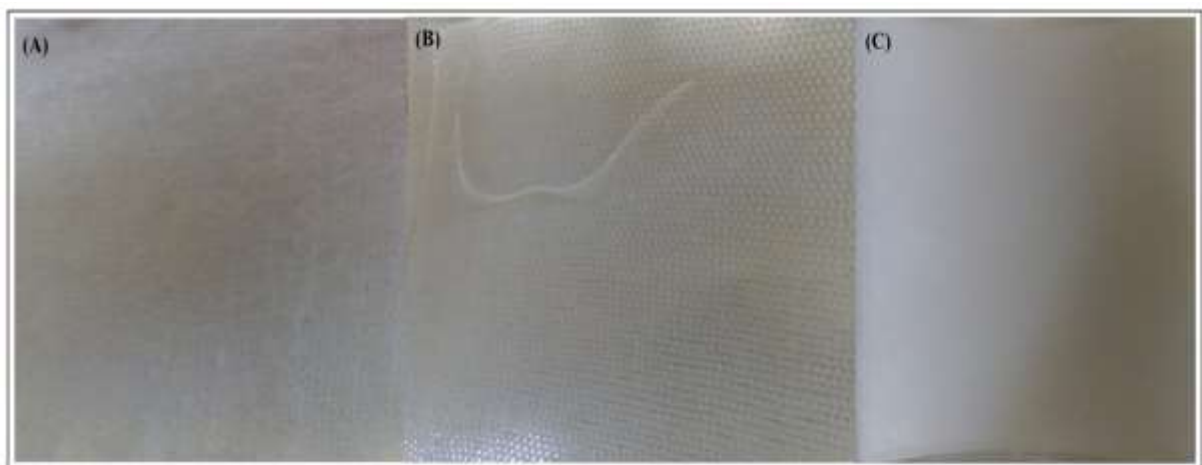


Figure (II, 14): (A) Face des fibres coupées et (B) face du tissu de Combo Mat 600/300. (C) Tissu du verre C.

Le tissu du verre C utilisé est d'une répartition unidirectionnels des fibres de verre continue et d'une masse surfacique de 30g/m². Ces produits sont fabriqués par la société JUSHI France SAS (voir la figure (II, 14)). Les résultats des essais de détermination des propriétés physiques des fibres de verre à déterminé à l'usine de MAGHREB PIPE sont montrés au tableau (II, 10).

Tableau (II, 10): Propriétés physiques des Combo Mat du verre E et C. [187]

Propriétés	Combo Mat verre E	Tissu verre C
Masse surfacique (g/m ²)	938,30	25,77
Taux d'humidité (%)	0,11	1,70
Teneur en matières combustibles (ensimage) (%)	2,098	6,90

II.9.3. Additifs (catalyseur et accélérateur)

La fabrication des éléments en PRV est basée essentiellement sur la polymérisation de la résine. Pour commencer la polymérisation en ajoutant une quantité de catalyseur, cette quantité ne dépasse 1,5% en poids pour la résine de type Isophtalique, bien que tout excès ou défaut peut entraîner la polymérisation anormale, de sorte que les propriétés mécaniques sont faibles. Le catalyseur utilisé est du type peroxyde de méthyl éthyle cétone (MEKP 50), liquide, incolore et d'une formule moléculaire brute (C₈H₁₆O₄). L'accélérateur de polymérisation est ajouté dans le mélange quotidiennement (résine et catalyseur), dans notre étude la solution d'Octoate de Cobalt (PC006) est utilisée comme accélérateur. Cette solution est de couleur violet et d'une formule moléculaire brute (C₁₆H₃₀CoO₄), pour la résine Isophtalique la quantité d'accélérateur ajoutée ne dépasse de 6% en poids. [188]

II.9.4. Résine

L'utilisation de la résine offre un niveau de protection des fibres contre le contact direct dans les environnements agressifs [15]. Dans cette étude, on utilise la résine de polyester insaturée de type Isophtalique (PRE-67), cette dernière est caractérisée par: faible viscosité, temps de gel court, possibilité d'imprégnation et d'épaisse stratification, excellent pouvoir d'unification et de renfort avec les fibres de verre [188]. Les caractéristiques mécaniques et physiques de la résine utilisée selon la fiche technique sont présentées aux tableaux (II, 11) et (II, 12).

Tableau (II, 11): Propriétés mécaniques de la résine Isophtalique.

Propriétés	Valeurs	Propriétés	Valeurs
Dureté de BARCOL	40	Résistance de traction (Mpa)	70
Résistance de flexion (Mpa)	120	Module de traction (Mpa)	3500
Module de flexion (Mpa)	3600	Elongation de rupture en (%)	3

Tableau (II, 12): Propriétés physiques de la résine Isophtalique. [188]

Propriétés	Valeurs	Propriétés	Valeurs
Couleur	1. Gardner	Pic exothermique (°C)	175 - 195
Viscosité de Brookfield en 25 °C	300 - 400	Temps de gel au pic exothermique (25 °C) en (min - sec)	8 - 12
Masse volumique (g/cm ³)	1.10 – 1,20		

II.10. Confection et conservation des plaques en PRV

II.10.1. Confection des plaques en PRV

Les plaques en verre/polyester ont été fabriquées selon la technique manuelle de moulage au contact. Ces plaques sont des épaisseurs moyennes de 7mm, elles ont été coupées sous forme rectangulaire de dimensions 80x80cm, avec un disque diamanté conformément à la norme européenne ISO 1268-2 [189]. Ces plaques sont fabriqués à l'usine de MAGHREB PIPE de la wilaya de M'sila, et à l'aide des matières premières suivantes: résines Isophtalique, fibres en verres (des Combo Mat du verre E et des tissus du verre C), additifs (catalyseurs et accélérateurs). La préparation de résine au laboratoire se fait à une température moyenne de 25°C et une humidité relative ne dépasse pas 80%, dans laquelle la résine Isophtalique (PRE-67) utilisée dans notre étude, est mélangée avec le styrène pour sa diluer et atteindre sa viscosité acceptable conformément à la norme ISO 2555 [190]. Les résultats du test de viscosité au laboratoire selon le procédé Brookfield sont présentés au tableau (II, 13).

Tableau (II, 13): Résultats du test de viscosité selon le procédé Brookfield.

Masse de la résine en (g)	Masse de styrène en (g)	Viscosité de Brookfield en 25 °C
600	0	308
600	18 ou 3%	218
600	24 ou 4%	188
600	30 ou 5%	180

Selon les résultats du tableau ci-dessus, il a été détecté que la résine est de bonne viscosité pour sa dilution avec 5% de styrène. Le pourcentage massique des tissus du verre C et des Combo Mat du verre E est d'environ de 40.5%. Le choix de ce pourcentage a été effectué conformément à la norme américaine ASTM D2584-11 [191]. Les plaques ont été fabriquées par la mise en place de cinq couches du Combo Mat et deux couches en surfaces du tissu avec une résine Isophtalique préparée (voir le tableau (II, 14)) selon les normes européennes ISO 584 et ISO 2535 [192, 193].

Tableau (II, 14): Résultats du test de temps du durcissement de la résine.

Masse de résine avec 5% styrène en (g)	Masse de catalyseur en (g)	Masse de l'accélérateur en (g)	Temps et température de début de gel (min-sec)	Temps et température de durcissement (min-sec)
100	1 ou 1%	0,15g ou 0,15%	13' à 32,50°C	23'38'' à 205,7°C
100	0,8 ou 0,8%	0,15g ou 0,15%	23'32'' à 30,40°C	37'38'' à 197,30°C

D'après les résultats du tableau précédent, pour la fabrication des plaques en PRV, la résine a été mélangée avec 5% de styrène, 1% de catalyseur et 0,15% de l'accélérateur. Les renforts sont déposés couche par couche et sont imprégnés d'une résine liquide, accélérée et catalysée. La résine préparée est versée par un rouleau dans le moule, après chaque couche de renfort on applique un compactage sur toute la surface de la plaque par un compacteur manuelle selon la norme européenne ISO 1268-2. Tous les plaques fabriquées sont conservées au laboratoire (T = 25°C et HR = 80%) pendant une durée de 24 heures pour le durcissement du résine. Les plaques sont découpées, à l'aide d'un disque en diamante selon les dimensions préconisées, et la face de coupure sera finie par la résine préparée, et ensuite poser les plaques à l'air libre pour le séchage avant la conservation dans différents milieux (voir la figure 04 en annexe).

II.10.2. Conservation des plaques en PRV

Les plaques de composite en PRV ont été immergées dans l'eau potable et dans l'eau de mer pendant 365 jours à une température ambiante dans des bacs assez larges pour permettre le contact direct et l'immersion totale de toutes les surfaces de chaque plaque (Figure (II, 15)). L'ensemble des plaques fabriquées (plaques témoins (T), plaques immergées dans l'eau potable (EP) et plaques immergées dans l'eau de mer (EM)) ont subi une caractérisation en traction axiale et en flexion de trois points dont le but de déduire la contrainte, la déformation à la rupture et le module d'élasticité pour différents durées d'immersion (30, 90, 180 et 365 jours). Chaque période d'essai, on coupe des éprouvettes de chaque plaque par une tronçonneuse de disque en diamant, pour faire des essais au laboratoire de MAGHREB PIPE.

Ces éprouvettes sont coupées par une tronçonneuse de disque de type diamant, puis la face de coupure sera finie par un produit préparé (résine + catalyseur + accélérateur), puis mettez les plaques pendant 24 heures à l'air libre pour le séchage avant la nouvelle conservation, cette opération doit être effectuée, afin d'assurer la stabilité des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des plaques conservées, enfin et après la préparation des échantillons, les tests mécanique et chimiques sont effectués.



Figure (II, 15): Conservation des plaques en PRV dans différents milieux.

II.11. Caractérisation des plaques du PRV

II.11.1. Essai de traction axiale

Cet essai a été effectué en utilisant des spécimens dans la forme «I» de dimensions $(30 \times 300 \times e) \text{ mm}^3$ conservées dans différents milieux. Ces éprouvettes sont placées dans la machine d'essai (YL-25-Machine Overview), puis on applique la force de traction conformément à la norme ASTM D 638-03. La figure (II, 16) montre le dispositif de l'essai de traction axiale, l'application de la charge se fait sans choc et de façon continue jusqu'à la rupture des éprouvettes, la vitesse de chargement est constante et elle est d'environ $(1,5 \pm 0,1 \text{ mm/minute})$, la courbe contrainte – déformation $(\sigma_T - \varepsilon_T)$ est calculée et tracée par le logiciel de calcul intégré (UTM Main.03.11.42.R01). La contrainte (σ_T) et la déformation (ε_T) de rupture par traction axiale sont les moyennes de cinq (05) valeurs dans chaque série d'essai, elles sont calculées par les relations (II, 04) et (II, 05):

$$\sigma_T = \frac{F}{A} \quad (\text{II, 04})$$

Ou;

F: Charge maximale, exprimée en Newtons.

A: Section de l'éprouvette chargée égale à $(25 \times h) \text{ mm}^2$.

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{II, 05})$$

Ou;

ΔL : Allongement de l'éprouvette sous l'effet de charge maximale de traction, exprimé en mm.

L: Longueur de l'éprouvette prise égale à 250mm. [194]



Figure (II, 16): Essai de traction axiale des éprouvettes en PRV conservées dans différents milieux.

II.11.2. Essai de flexion trois points

Pour faire ce test, des éprouvettes en PRV ayant les dimensions $(15 \times 160 \times e) \text{mm}^3$ sont utilisées. Elles sont placées au centre de la machine d'essai (YL-25-Machine Overview), puis une charge sans choc et de façon continue est appliquée jusqu'à la rupture d'après la norme ASTM D 790-03. La figure (II, 17) montre le dispositif de l'essai de flexion trois points, la mise en charge se fait à une vitesse constante $(1,5 \pm 0,1 \text{mm/minute})$ jusqu'à la rupture de l'éprouvette, la courbe contrainte – déformation $(\sigma_f - \varepsilon_f)$ étant donnée par le logiciel de calcul (UTM Main.03.11.42.R01). En outre, la contrainte (σ_f) et la déformation (ε_f) de rupture par flexion sont calculées par les relations (II, 06) et (II, 07) :

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} [1 + 6(D/L)^2 - 4(h/L)(D/L)] \quad (\text{II, 06})$$

Avec;

σ_f : Contrainte à la rupture par flexion au milieu de la longueur de l'éprouvette, exprimée en MPa ou (N/mm^2) .

P : Charge maximale appliquée au milieu de la longueur de l'éprouvette, exprimée en Newtons.

b : Largeur de l'échantillon prise égale à 15 mm.

h : Epaisseur moyenne de l'échantillon mesurée au pied à coulis.

L : Longueur de support prise égale à $16h$.

D : Déflexion maximale au milieu de la longueur de l'échantillon, exprimée en mm.

$$\varepsilon_f = \frac{6Dh}{L^2} \quad (\text{II, 07})$$

Avec;

ε_f : Déformation de l'éprouvette, exprimée en %.

h : Epaisseur moyenne de l'échantillon mesurée au pied à coulis.

L : Longueur de support prise égale à $16h$.

D: Déflexion maximale au milieu de la longueur de l'échantillon, exprimée en mm [195].



Figure (II, 17): Essai de flexion trois points des éprouvettes en PRV.

II.11.3. Essai de mesure de la dureté de Barcol

Le scléromètre portable Barcol est un appareil, que l'on applique sur les surfaces des composites en plastique renforcés de fibres ou non, cet essai a pour but d'évaluer la dureté des plaques en PRV conformément à la norme ASTM D2583-13a. Afin de réaliser ce test, l'échantillon est placé sous l'indicateur du testeur de dureté de Barcol, puis une pression uniforme à l'échantillon est appliquée jusqu'à ce que l'indicateur atteigne un maximum.



Figure (II, 18): Essai de détermination de dureté de Barcol.

La profondeur de pénétration est convertie en une valeur absolue de Barcol (voir la figure (II, 18)). Enfin, cet essai est applicable lorsque l'échantillon ayant une épaisseur minimale de 1,60mm. La valeur de dureté est la moyenne de trois (03) mesure dans chaque période d'essai [196].

II.11.4. Essai d'absorption d'eau

Cet essai a été effectué au laboratoire par l'utilisation des échantillons de dimensions (50X50Xe) mm³ d'après la norme ASTM C 413-01. Les spécimens à l'état sec des poids (D) sont immergés dans un bac rempli en eau potable à une durée de 24 heures, puis nous pesons le poids (W) de leurs échantillons après immersion (voir la figure (II, 19)). L'absorption d'eau (A) est calculée par la relation (II, 08). La valeur de l'absorption est la moyenne de cinq (05) valeurs dans chaque série d'essai.



Figure (II, 19): Essai d'absorption d'eau des éprouvettes en PRV.

$$A = \left[\frac{W - D}{D} \right] 100 \quad (\text{II, 08})$$

Avec;

D: Poids initiale de l'éprouvette, exprimée en g;

W: Poids après immersion, exprimée en g [197].

II.12. Analyses chimiques

II.12.1. Observation par microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage (MEB) est utilisé pour observer la microstructure du béton de fibre et du PRV, soient: la porosité et le degré d'hydratation du ciment, l'état des fibres après immersion et le degré de polymérisation de la résine. Cet essai est effectué au laboratoire LPCMA université de Biskra.

Le principe de base de cette technique est qu'un faisceau très fin d'électrons, monocinétique, balayer la surface d'un échantillon dans lequel les interactions détectées par un capteur commandant la luminosité d'un oscilloscope cathodique dont le balayage est synchronisé, avec le faisceau d'électronique. Les électrons issus dus à l'effet thermoélectronique à partir d'un filament de tungstène ou de lanthanum hexaboride porté à haute température. Pour que les électrons soient canalisés, les bobines magnétiques sont utilisées: densité, contrôle du balayage de l'échantillon, conicité du faisceau sont ainsi maîtrisés. Le microscope électronique à balayage

est couramment utilisé pour étudier la surface des spécimens de quelques centimètres de dimension, après le séchage sous vide et la métallisation au carbone [198, 199].

II.12.2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Cette méthode est principalement utilisée pour déterminer les phases du matériau examiné en un point de vue qualitatif que quantitatif. Elle est basée sur les interactions de la structure cristalline d'un échantillon avec un rayonnement à longueur d'onde courte. Lorsque, le faisceau de rayons X monochromatique incident est diffracté par l'échantillon à un angle spécifique, les rayons X sont interférés de manières constructives ou destructives. Les interférences constructives, également appelées les pics d'intensité sont calculés par la relation de Bragg:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (\text{II, 09})$$

Où,

d: est la distance inter-réticulaire;

λ : est l'angle d'incidence des rayons X;

n: est un entier;

θ : est la longueur d'onde des rayons X.

L'enregistrement du signal par un détecteur approprié permet d'afficher les angles et intensités des pics de diffraction obtenus. L'indexation de ces pics est effectuée à l'aide de bases de données spécifiques permettant l'identification des composés impliqués. Cependant, cette technique ne peut généralement pas permettre d'identifier des composés amorphes. Cet essai a été réalisé au laboratoire LPCMA en utilisant du diffractomètre des rayons X Miniflex 600 avec un refroidisseur (lab tech/smart H150-1000) [198, 200].

II.12.3. Spectroscopie infrarouge (IR)

La spectroscopie infrarouge est utilisée depuis une centaine d'année pour identifier et quantifier les différents composés présents dans l'atmosphère [201]. L'analyse infrarouge est définie comme une méthode d'analyse structurale qui révèle la nature des liaisons entre atomes dans une molécule. En effet, les composés organiques ont la particularité d'avoir des liaisons interatomiques entrant dans la vibration sous l'action du rayonnement infrarouge à des longueurs d'onde caractéristiques. Ce phénomène est accompagné d'une consommation d'énergie lumineuse à la longueur d'onde considérée. La transformation de Fourier (IRTF) est une procédure mathématique qui vous permet de décomposer un interférentielle dans une somme de fonctions sinusoïdales, chacune représentant une certaine onde. Elle permet de mesurer les

absorbances d'énergie des liaisons chimiques (fonctions alcool, acides, méthyles, méthylène,...) de tous les composants présents dans les produits analysés et de les corréler à leurs concentrations, car l'intensité de l'absorption est directement proportionnelle à la concentration de la molécule considérée. La longueur d'onde d'absorption va dépendre de la liaison elle-même (C-H, C-O, C-C,...), mais aussi de l'environnement moléculaire dans lequel il est situé [202]. Ce test est réalisé au laboratoire LPCMA pour analyser des échantillons broyés du matériau PRV conservé dans différents milieux.

II.13. Conclusion

Les matériaux utilisés pour la confection du béton de fibre sont acceptables et de bonnes caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. La confection des éprouvettes du BRV est conforme aux normes pour atteindre une compacité élevée et une bonne résistance mécanique.

Les résultats des tests (mécaniques, physiques et chimiques) sur des spécimens en BRV conservés de l'eau de mer sont comparés à celles des résultats du BRV témoins, dont l'objectif d'étudier l'influence de leurs renforts par de fibres de verre avec différents pourcentages.

Les plaques en PRV sont immergées dans différents milieux agressifs, conçue pour évaluer la durabilité de ce matériau, en se basant sur des essais mécaniques, physiques et chimiques effectué au laboratoire.

Chapitre III

Caractérisation du béton durci

Chapitre III: Caractérisation du béton durci

III.1. Introduction

Ce chapitre vise à évaluer le comportement mécanique et physique du béton sans et avec fibres de verre conservés dans différents milieux. Une série du béton est conservée dans l'eau potable (témoin) et la deuxième série est immergée dans l'eau de mer (milieu sulfatique fortement agressif). Les essais sur des échantillons en BRFBV dont des fractions volumiques de 0%, 1%, 3% et 5%, sont effectués aux laboratoires LTPE et LNHC, après le séchage des échantillons conservés dans différents milieux à l'air libre pour une durée de 24 heures, puis procéder au programme d'essais mécaniques, physiques et chimiques. Les résultats des essais sont comparés à celles des éprouvettes témoins confectionnées dans les mêmes conditions mais conservées dans le milieu standards.

III.2. Résultats des essais mécaniques

III.2.1. Résultats de l'essai de compression

a) Effet du pourcentage de fibres

La valeur de la résistance à la compression des éprouvettes en béton sans et avec des fibres de verre est la moyenne des résultats de cinq (05) éprouvettes dans chaque période d'essai. Les résultats de l'essai de compression des éprouvettes témoins (T) sont présentés à la figure (III, 01).

Selon la figure (III, 01), la résistance à la compression des éprouvettes témoins T0, T1, T3 et T5 s'accroît de manière continue jusqu'à l'âge de 365 jours, ainsi que les résistances maximales sont égales à 58.90MPa, 67.66MPa, 67.95MPa et 59.09MPa, respectivement. Ces résultats sont confirmés par l'hydratation continue du béton sans et avec fibre sous l'effet de la cure humide et de la formation des silicates de calcium hydraté (C-S-H) [18, 24]. En outre, l'ajout de la fumée de silice et du laitier dans le béton pendant le malaxage qui minimise la perméabilité du béton et protège de la surface des fibres dans le milieu humide selon Pan et al, Sadati et al, et Arabi [106, 108, 155], soit l'augmentation de la résistance mécanique à la compression.

Les valeurs de la résistance à la compression des éprouvettes T3 sont supérieures à celle des éprouvettes T0, T1 et T5, à l'âge de 30, 90, 180 et 365 jours de cure humide. Les éprouvettes T5 présentent les valeurs minimales de la résistance à la compression à l'âge de 90, 180 et 365

jours de cure humide par rapport aux autres éprouvettes. La résistance à la compression des éprouvettes T0, T1, et T5 comparativement aux éprouvettes T3, montrent des régressions de 13.32%, 0.43%, 13.04% respectivement à l'âge de 365 jours. Par conséquent, le renforcement par des fibres de verre AR est un effet bénéfique sur la résistance à la compression du béton fibré. De plus, la haute teneur de zircon dans la composition chimique du verre AR provoque une surélévation de la résistance du béton fibré aux alcalis ou dans le milieu humide selon Lipatov et al [50]. Conformément à l'étude bibliographique, le pourcentage optimal de fibres pour obtenir de meilleures propriétés mécaniques varie de 2 à 4%. [56]

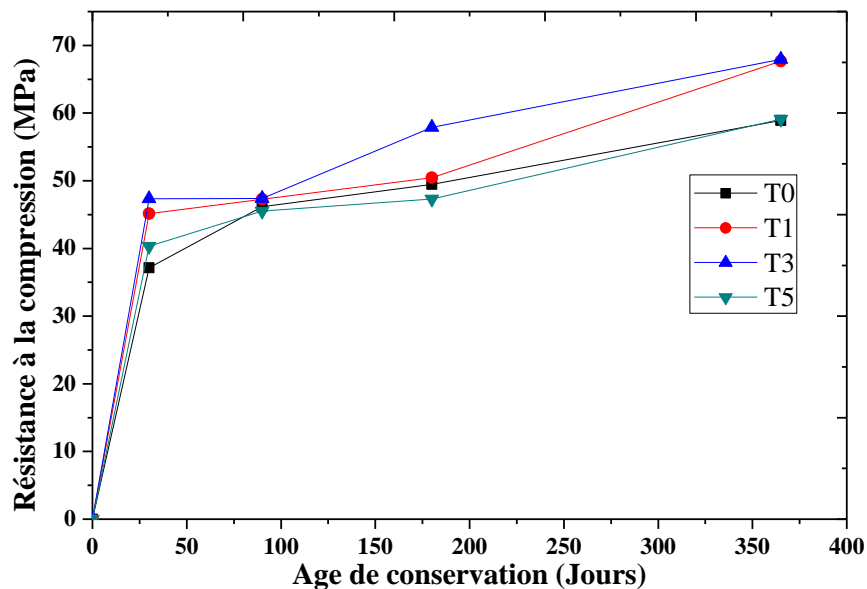


Figure (III, 01): Résistance à la compression des éprouvettes du BRFV témoin.

b) Influence du milieu sulfatique

Les résultats de l'essai de compression des éprouvettes conservées dans l'eau de mer (EM) sont présentés à la figure (III, 02). Cette dernière montre que la résistance à la compression des éprouvettes EM0 s'augmente de manière continue jusqu'à l'âge de 365 jours, où elle atteint sa valeur maximale de 52.53MPa. Ces résultats peuvent justifier par l'hydratation du ciment du béton et la formation du C-S-H sous l'effet de la cure humide [18, 24]. Cependant, l'utilisation du ciment CRS de faible teneur en C_3A , et le remplacement du ciment par 20% du laitier peuvent provoquer une diminution de la pénétration des sulfates et une amélioration de la résistance à la compression du béton conservé dans l'eau de mer. Ces résultats se concordent à ceux trouvés par Gupta [107], qui a trouvé une surélévation de la résistance mécanique à la compression après 90 jours de conservation pour un béton de dosage du ciment CRS de 640Kg/m^3 avec l'ajout de laitier de 20%.

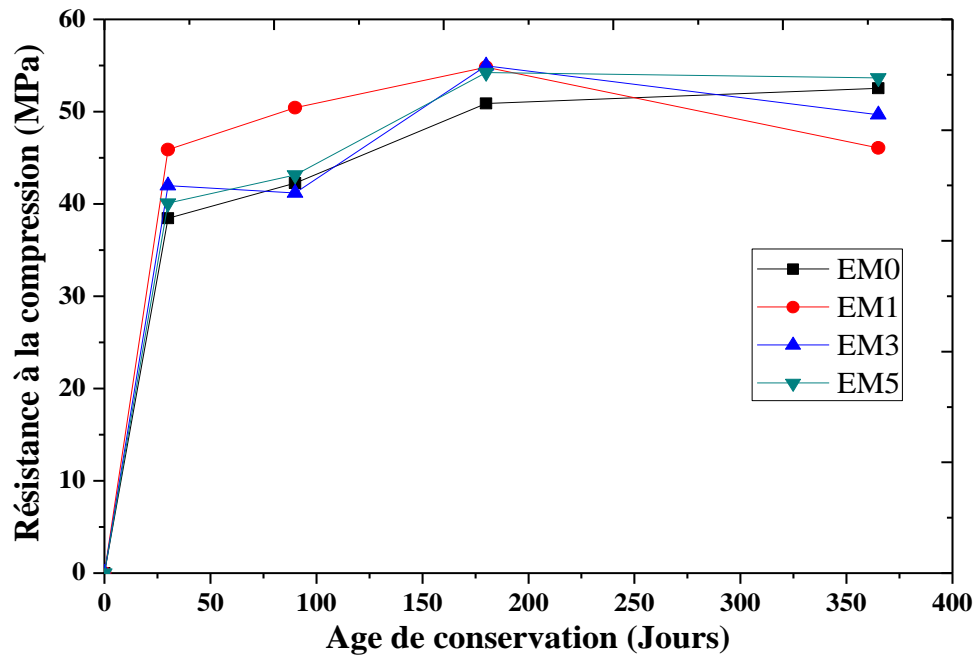


Figure (III, 02): Résistance à la compression des éprouvettes en BRFB conservées dans l'eau de mer.

Les courbes de résistance des spécimens EM1, EM3 et EM5 s'accroît de manière continue jusqu'à l'âge de 180 jours, mais au-delà même âge ces résistances à la compression sont diminuées jusqu'à l'âge de 365 jours, ou elles atteint les valeurs de 46.06MPa, 49.67MPa et 53.66MPa respectivement. L'eau de mer est un milieu de fort alcalinité, de sorte qu'il soit possible de justifier la perte de résistance par l'attaque alcaline des fibres AR en raison de l'accumulation d'hydroxyde de calcium, ce dernier qui entraîne une liaison excessive puis conduire une fragilisation du BRFB [73]. D'autre part à 365 jours de conservation, la résistance à la compression des éprouvettes du béton EM5 est supérieure à celles des éprouvettes EM0, EM1 et EM3, ainsi qu'au même âge les éprouvettes EM1 présentent les valeurs minimales de la résistance à la compression. Enfin, les échantillons EM5 montrent des gains de résistance de 2.15%, 16.50%, 8.03% à l'âge de 365 jours par rapport aux éprouvettes EM0, EM1, et EM3 respectivement. Selon Abdullah et al [6], la résistance à la compression s'augmente en fonction de l'augmentation de la teneur des fibres AR.

c) Influence du milieu de conservation

La résistance à la compression des éprouvettes conservées dans différents milieux sont illustrées à la figure (III, 03). D'après la figure ci-après, on a constaté que la résistance à la compression des éprouvettes témoins est supérieure à celles des éprouvettes conservées dans l'eau de mer. À l'âge de 365 jours, les éprouvettes T0, T1, T3 et T5 présentent des gains de résistance de 12.12%, 46,89%, 36,20% et 10,11% comparativement aux éprouvettes EM0, EM1,

EM3 et EM5 respectivement. Ces régressions peuvent être expliquées par la dissolution des ions de silicate des fibres de verre selon l'équation (I, 02), cette réaction a été causée sous l'effet d'attaque par des ions hydroxyde du réseau de verre et les ions de sodium des eaux de mer. [70, 71]

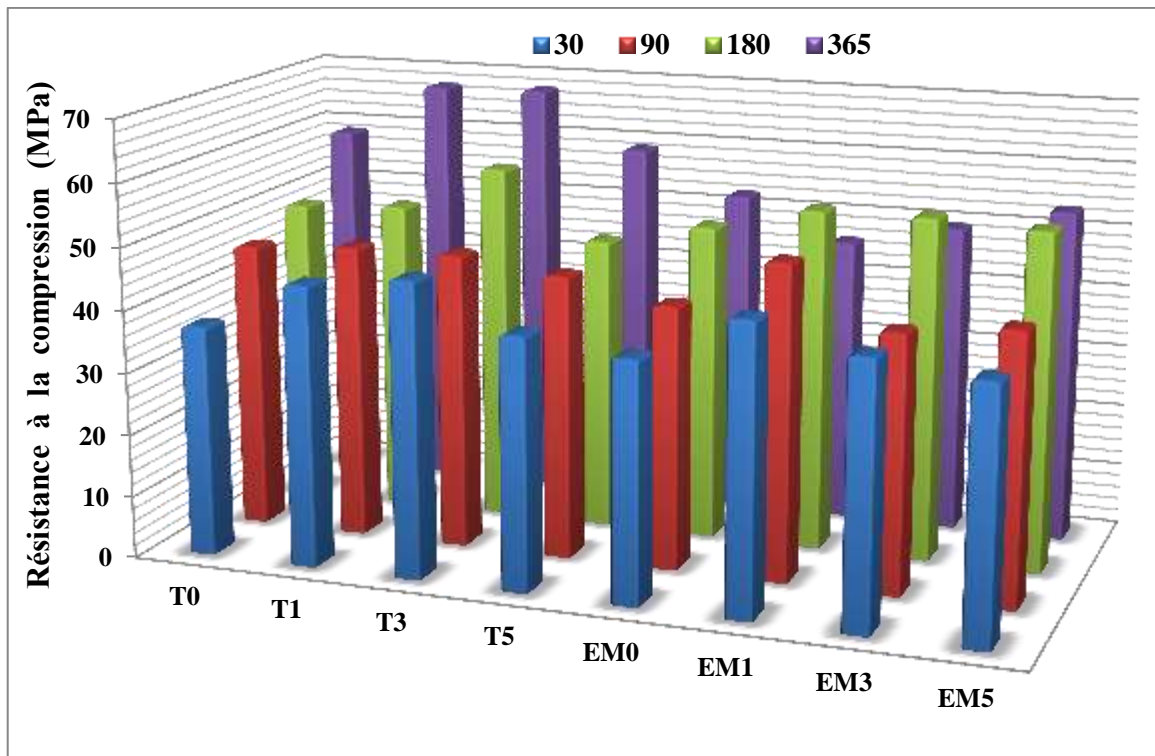


Figure (III, 03): Résistance à la compression des éprouvettes en BRFB conservées dans différents milieux.

III.2.2. Résultats d'essai de flexion

a) Effet du pourcentage de fibres

La valeur de la résistance de flexion des éprouvettes en béton de fibre de verre AR est la moyenne des résultats de quatre (04) éprouvettes pour chaque série d'essai. Les résultats de l'essai de flexion sur les éprouvettes témoins sont présentés à la figure (III, 04).

Cette dernière montre que la résistance à la flexion des éprouvettes T0, T1, T3 et T5 s'accroît de manière continue jusqu'à l'âge de 365 jours, ainsi que les résistances maximales sont égales à 7.19MPa, 7.78MPa, 7.90MPa et 8.20MPa respectivement. Ces résultats se concordent à ceux trouvés à l'essai de la résistance à la compression. De plus, ces résultats peuvent être justifiés par l'hydratation continue du béton sans et avec fibres, ainsi que l'effet des ajouts de la fumée de silice et du laitier qui minimise la perméabilité du béton, et elles protègent de la surface des fibres dans le milieu humide selon Pan et al, Sadati et al, et Arabi. [106, 108, 155]

Les valeurs de la résistance de flexion des éprouvettes T3 sont supérieures à celle des éprouvettes T0, T1 et T5, à l'âge de 30, 90 et 180 jours. Sauf, à l'âge de 365 jours on a constaté que la résistance à la flexion des éprouvettes T5 est supérieure à celles des autres éprouvettes. De plus, cette résistance pour des éprouvettes T0, T1, et T3 comparativement aux éprouvettes T5, montrent des régressions de 12.32%, 5.12%, 3.66% respectivement à l'âge de 365 jours. Donc, l'ajout d'un pourcentage de 5% des fibres de verre d'une longueur de 36mm au béton qui a amélioré leur résistance à la flexion [56]. Ces résultats conviennent à ceux trouvés par Kiran, ainsi que l'augmentation de la teneur de fibres de verre dans le béton provoque une surélévation de la résistance à la flexion du BRFV par rapport au béton ordinaire jusqu'à l'âge de 60 jours de conservation dans l'eau potable. [67]

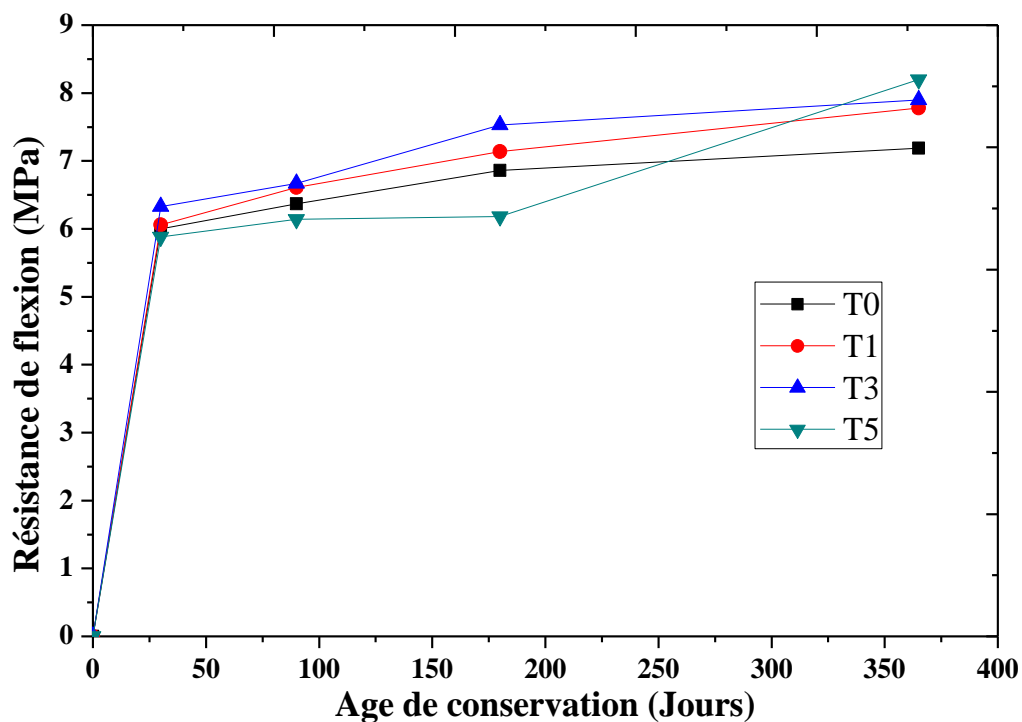


Figure (III, 04): Résistance de flexion des éprouvettes en BRFV témoins.

b) Influence du milieu sulfatique

Les résultats de l'essai de flexion sur les éprouvettes conservées dans l'eau de mer à la figure (III, 05). D'après cette dernière, nous remarquons que la résistance à la flexion des éprouvettes EM0, EM1, EM3 et EM5 s'augmente de façon continue jusqu'à l'âge de 365 jours, ainsi que les résistances maximales atteignent les valeurs de 10.92MPa, 11.88MPa, 11.86MPa et 10.39MPa respectivement. Ces résultats ne concordent pas à ceux trouvés par l'essai de compression. L'amélioration de la résistance à la flexion jusqu'à l'âge de 365 jours peuvent être justifié par la

consommation de la portlandite en présence des ajouts du laitier et de la fumée de silice dans le milieu humide et l'hydratation continue du ciment de béton. [106, 155]

La résistance à la flexion des éprouvettes EM1 sont supérieures à celles des autres éprouvettes conservées dans l'eau de mer à l'âge de 180 et 365 jours, ainsi qu'au même âge de conservation les éprouvettes EM5 présentent les valeurs inférieures de la résistance de flexion. Les éprouvettes EM0, EM3, et EM5 montrent des régressions de résistance de 8.08%, 0.20% et 12.54% respectivement comparativement aux éprouvettes EM1 à 365 jours de conservation. Par conséquent, l'amélioration de la résistance à la flexion du béton de fibre est due à l'augmentation de la teneur de fibres de verre selon Kiran. [67]

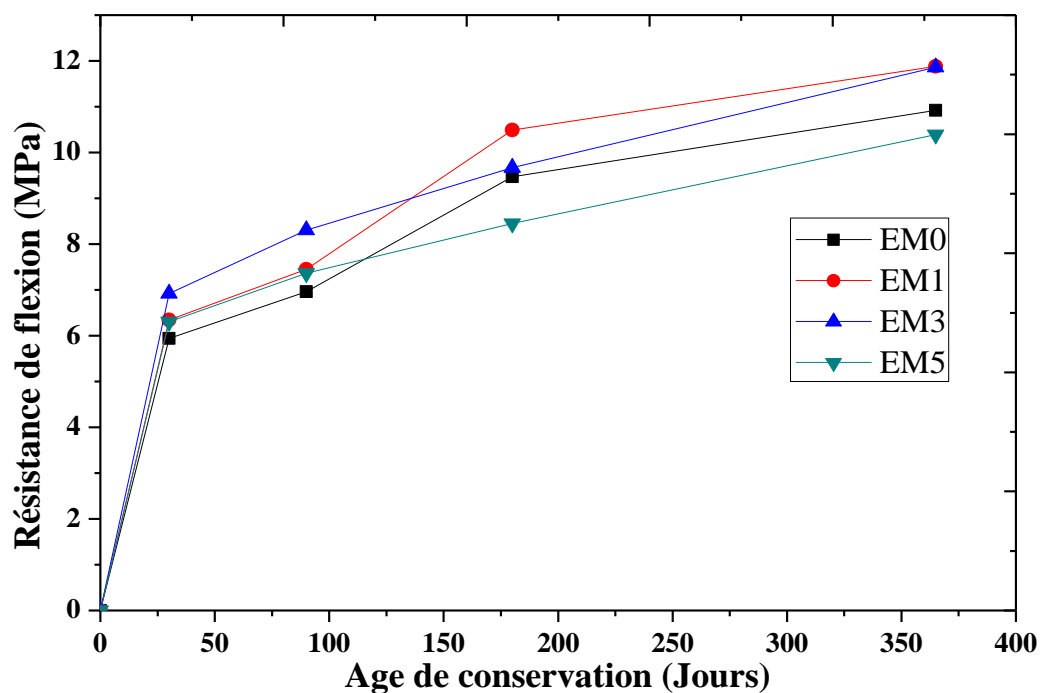


Figure (III, 05): Résistance de flexion des éprouvettes en BRFBV conservées dans l'eau de mer.

c) Influence du milieu de conservation

La figure (III, 06) montre la résistance de flexion des éprouvettes en béton renforcé par des fibres de verre AR conservés dans différents milieux. Nous constatons que la résistance de flexion des éprouvettes conservées dans l'eau de mer est plus élevée à celles des éprouvettes témoins. La résistance des éprouvettes EM0 comparativement aux éprouvettes T0 montre des gains de résistance de 9,30%, 38,10% et 51,87% respectivement à l'âge de 90, 180 et 365 jours, sauf à l'âge de 30 jours. Les éprouvettes EM3 montrent des surélévations de la résistance de 9,30%, 24,46%, 28,40% et 50,12% par rapport aux échantillons T3 respectivement à 30, 90, 180

et 365 jours de conservation. Mêmes remarques précédentes pour les échantillons EM1 et EM5 comparativement aux éprouvettes T1 et T5 respectivement. On peut dire que la conservation du BRFBV dans le milieu humide et dans un milieu sulfatique n'influe pas sur la résistance à la flexion et à l'état des fibres de verre; ou cette amélioration de la résistance peut s'expliquer par la formation d'une couche protectrice des ions chlorure à la surface des éprouvettes en bétons conservées dans l'eau de mer. Enfin ces résultats ne confirment pas à celles trouvés dans l'étude bibliographiques.

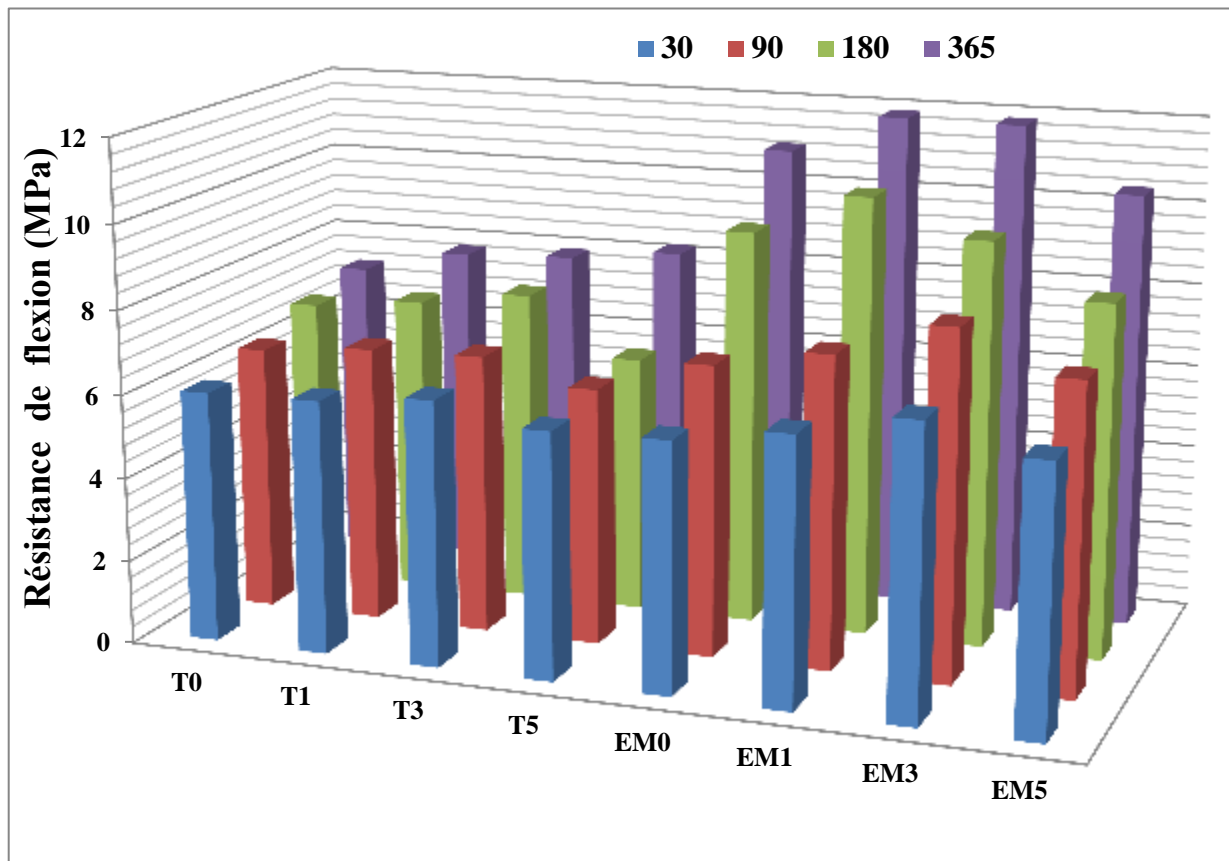


Figure (III, 06): Résistance de flexion des éprouvettes en BRFBV conservées dans différents milieux.

III.2.3. Evolution du rapport R_f/R_C

Le rapport de la résistance à la compression sur la résistance à la flexion (R_f/R_C) des éprouvettes en béton fibrés conservés dans différents milieux est illustré à la figure (III, 07). Cette figure présente que le rapport (R_f/R_C) des éprouvettes conservées dans l'eau de mer est supérieur à celles des éprouvettes témoins. Les échantillons EM1 est d'un rapport plus élevé comparativement aux autres échantillons à l'âge de 365 jours. Au même âge de conservation, les spécimens T1 présente les valeurs minimales du rapport (R_f/R_C) par rapport aux autres spécimens. On peut dire que la longueur de 36mm des fibres de verre est plus efficace sur la

résistance mécanique avec un teneur de 1% selon Arabi [66]. De plus, il n'y avait aucune influence de sulfates des eaux de mer sur la résistance du BRFV. Ces résultats ne coïncident pas avec ceux obtenues dans l'étude bibliographique.

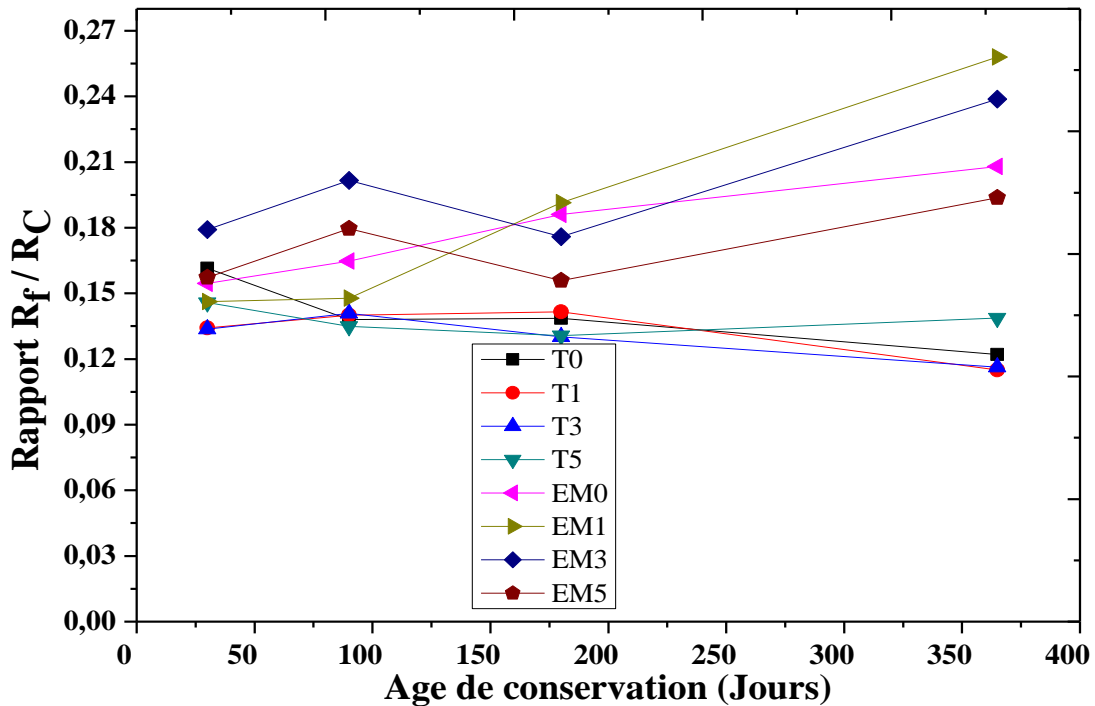


Figure (III, 07): Rapport R_f/R_c des éprouvettes en BRFV conservées dans différents milieux.

III.3. Résultats des essais physiques

III.3.1. Essai de l'absorption capillaire

a) Effet du pourcentage de fibres

La valeur de l'absorption capillaire est la moyenne des trois (03) échantillons dans chaque série d'essai. La figure (III, 08) montre les courbes de l'absorption capillaire des spécimens témoins.

Selon la figure ci-dessous, nous remarquons que l'absorption capillaire des éprouvettes T0, T1, T3 et T5 se diminue de façon continue jusqu'à l'âge de 365 jours. Les éprouvettes T5 et T3 présentent les valeurs supérieures de l'absorption capillaire par rapport aux éprouvettes T0 et T1. En outre, l'absorption capillaire des éprouvettes T0 est inférieure à celles des autres éprouvettes témoins. On peut dire que l'augmentation du pourcentage des fibres dans le BRFV se provoque une augmentation de leur porosité ou leur pourcentage de vides. De plus, l'augmentation de la teneur des fibres qui contribue à l'absorption d'eau.

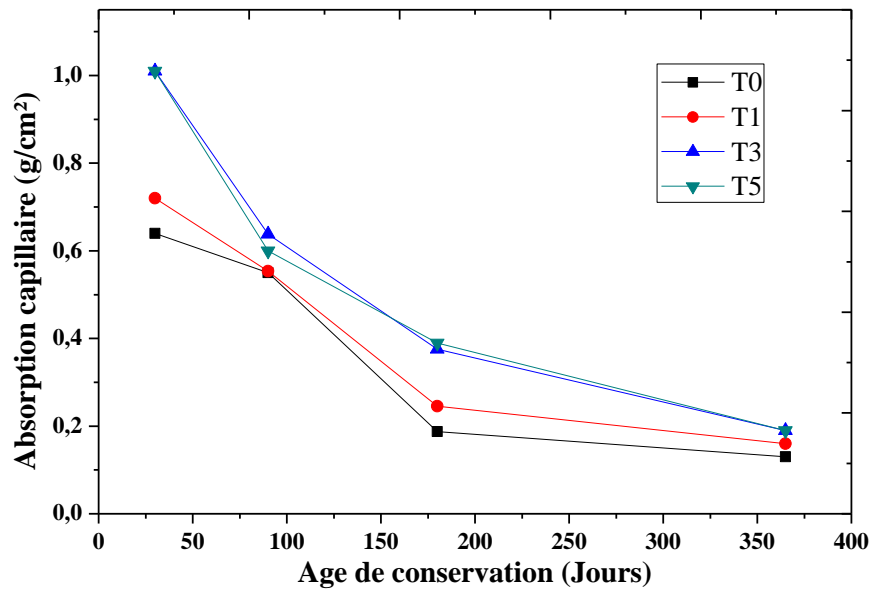


Figure (III, 08): Absorption capillaire des échantillons du BRFV témoins.

b) Influence du milieu sulfatique

La figure (III, 09) montre l'absorption capillaire des échantillons conservés dans l'eau de mer.

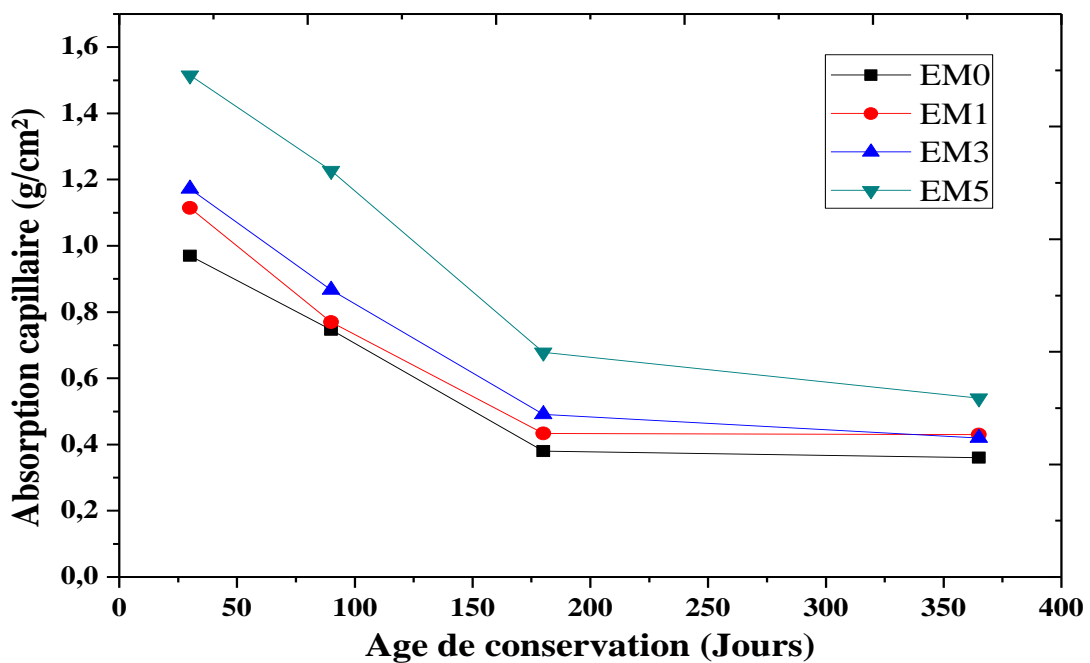


Figure (III, 09): Absorption capillaire des échantillons en BRFV conservés dans l'eau de mer.

Mêmes remarques précédentes pour les échantillons conservés dans l'eau de mer, on a constaté que les échantillons EM0, EM1, EM3 et EM5 se diminuent de façon continue jusqu'à l'âge de 365 jours. Les échantillons EM0 présentent les valeurs minimales de l'absorption

capillaire par rapports aux autres éprouvettes conservées dans l'eau de mer, alors que les éprouvettes EM5 présentent les valeurs maximales de l'absorption capillaire aux différents âges de conservation du béton. Ces résultats peuvent être justifiés par l'augmentation du volume de vides dans le BRFV.

c) Influence du milieu de conservation

L'absorption capillaire des éprouvettes en béton de fibres conservées dans différents milieux est illustrée à la figure (III, 10). D'après cette figure, nous enregistrons que l'absorption capillaire des éprouvettes conservées dans l'eau de mer (EM0, EM1, EM3 et EM5) est supérieure à celle des éprouvettes témoins (T0, T1, T3 et T5) respectivement, à l'âge de 30 jusqu'à 365 jours de conservation. Ces résultats peuvent être justifiés par la porosité interne plus élevée du béton EM, et l'hydratation incomplète du ciment CRS à cause de la diffusion des sulfates à l'intérieur des pores du béton, puis la formation de l'ettringite ou du gypse [81]. Enfin, lorsque la teneur des fibres augmente, l'absorption d'eau augmente et la porosité augmente.

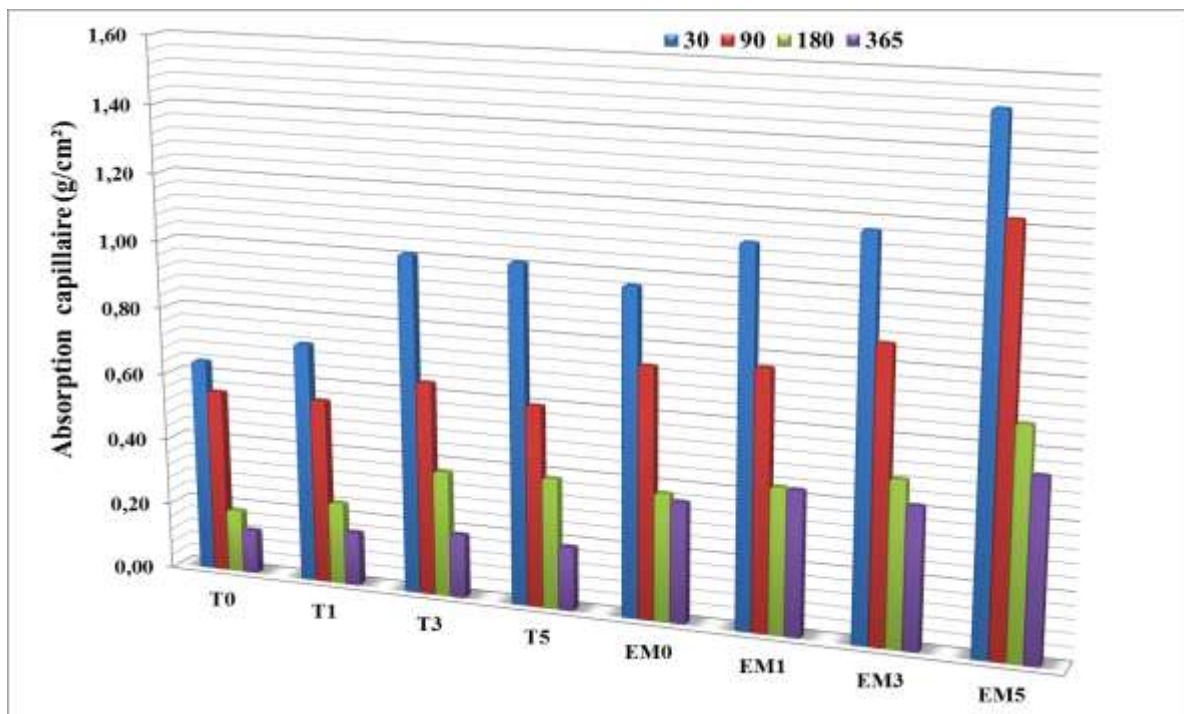


Figure (III, 10): Résultats d'absorption capillaires des éprouvettes en BRFV conservées dans différents milieux.

III.3.2. Evolution de la masse des éprouvettes

Cet essai a été effectué au laboratoire par l'utilisation d'une balance électronique. La valeur de la masse est la moyenne de quatre (04) éprouvette dans chaque période d'essai. Les masses des éprouvettes en BRFV de type AR après 180 et 365 jours de conservation sont illustrées à la figure (III, 11). Cette dernière, montre que la masse des éprouvettes T0 est supérieure à celles

des autres éprouvettes témoins et des éprouvettes EM, par contre les éprouvettes T5 présentent des valeurs inférieures de la masse à l'âge de 180 et 365 jours respectivement. Ces résultats peuvent être justifiés par la diminution de la porosité du BRFV et leur hydratation continue ou la formation des silicates de calcium hydraté (C-S-H), due à l'effet de la cure humide et l'addition de la fumée de silice et du laitier lors du malaxage. [29, 31]

En outre, la masse des éprouvettes témoins T0, T1, T3 et T5 est plus élevée par rapport aux éprouvettes conservées dans l'eau de mer EM0, EM1, EM3 et EM5 respectivement, sauf les éprouvettes EM3 à l'âge de 180 jours. Les spécimens EM5 ont des valeurs inférieures de la masse comparativement aux autres spécimens. Donc, on a enregistré que lorsque le pourcentage des fibres augmente, la porosité du BRFV augmente et la masse du BRFV diminue. Cependant, cette augmentation de la porosité n'a aucune influence sur la résistance mécanique des éprouvettes en béton fibré. Finalement, on peut dire que les résultats obtenus sont confirmés à ceux trouvés de l'essai de l'absorption capillaire.

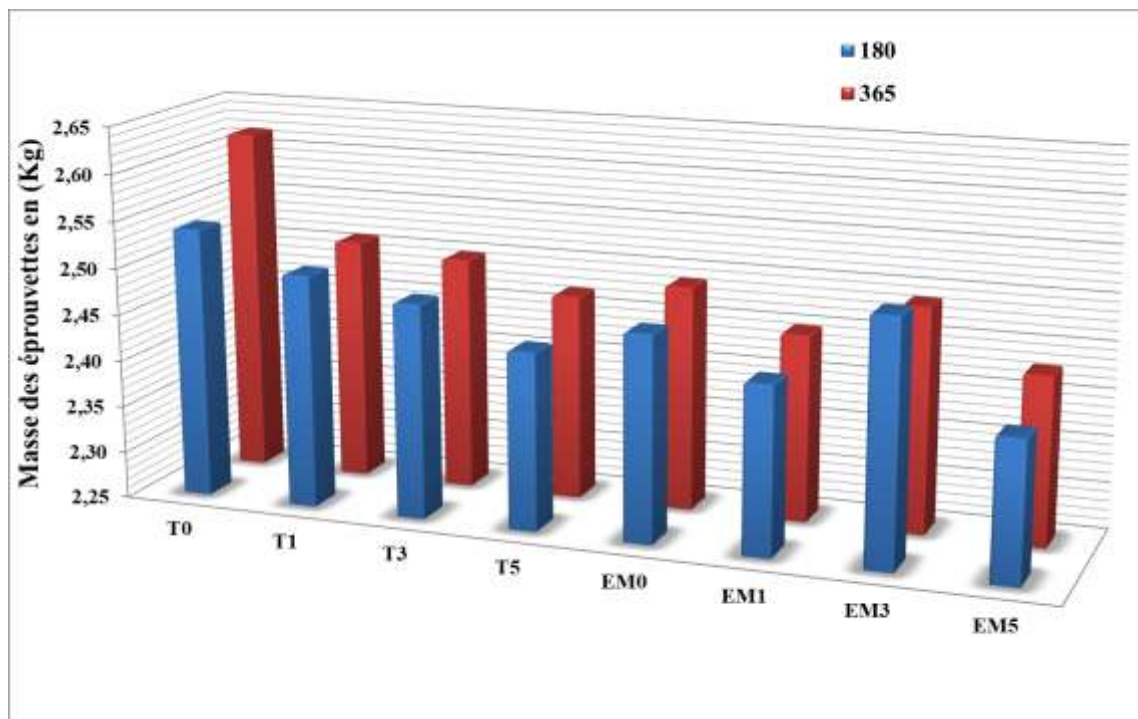


Figure (III, 11): Evolution des masses des éprouvettes en BRFV conservées dans différents milieux.

III.4. Résultats des essais chimiques

III.4.1. Mesure de la profondeur de carbonatation

Les résultats du test de carbonatation pour des éprouvettes en béton de fibres conservés dans différents milieux à l'âge de 365 jours sont illustrés à la figure (III, 12). Cette dernière montre que la profondeur de carbonatation des éprouvettes témoins et celles conservés dans l'eau de mer

est nulle de 30 jusqu'à 365 jours de conservation. Donc, l'immersion du BRFBV dans l'eau potable ou/et dans l'eau de mer diminue la vitesse de la diffusion de gaz carbonique à l'intérieure dans leur pores, alors que l'eau empêche la pénétration du gaz carbonique selon les travaux de Duval, il indique que la vitesse de pénétration du gaz carbonique est dix milles (10^4) plus élevée dans l'air que dans l'eau [4]. Plus encore, l'ajout de la fumée de silice qui modifie la vitesse de carbonatation due à la consommation de la portlandite. [119]



Figure (III, 12): Mesure de la profondeur de carbonatation des éprouvettes en béton conservées dans différents milieux.

III.4.2. Observations visuels des éprouvettes en BRFBV

Les observations visuelles des faces du BRFBV conservées dans différents milieux à 365 jours sont illustrées à la figure (III, 13).

- Une couche protectrice du couleur blanche (couche des sels des eaux de mer) est formée aux faces des éprouvettes conservées dans l'eau de mer (III, 13A). Par contre, on ne remarque aucune couche formée aux faces des échantillons témoins (III, 13B);
- Les déformations du BRFBV testées par l'essai de flexion sont visibles à l'œil nu. Cependant, on voit aux fibres de verre soient des déformations de glissement par frottement, de décollement et d'arrachement (III, 13C et 13D);
- On constate qu'aucun endommagement n'est visible à l'œil nu pour les fibres de verre conservées dans différents milieux. Ainsi que, ces fibres sont dispersées et orientées aléatoirement dans les éprouvettes en béton. D'autre part, on note qu'aucune fissure n'a été

observée aux surfaces des éprouvettes en béton fibrés témoins et conservés dans l'eau de mer (III, 13E et 13F).

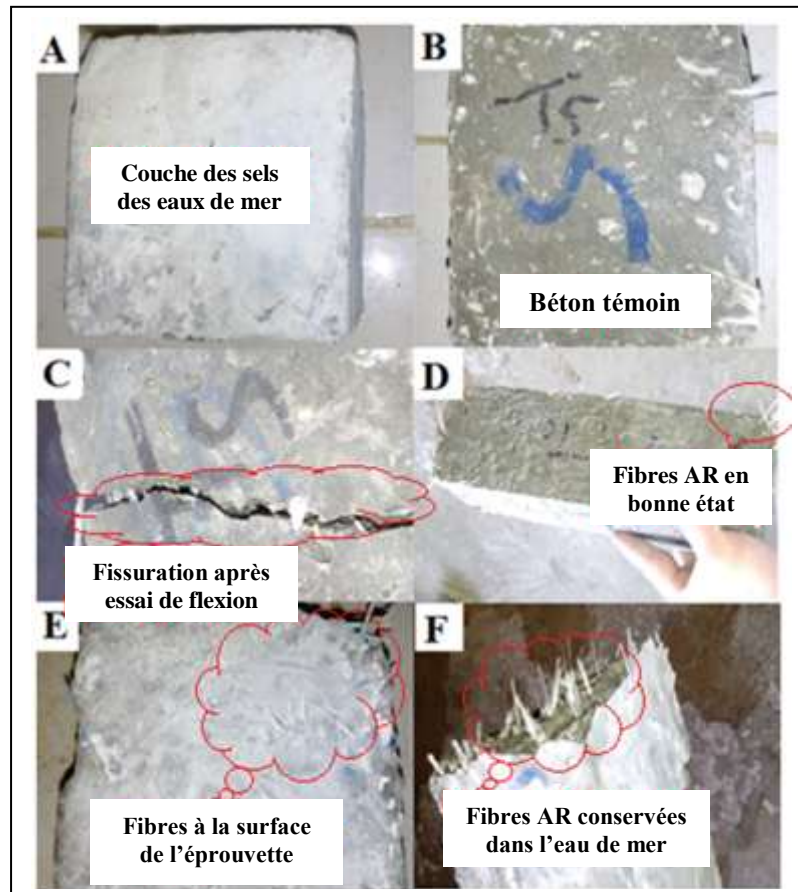


Figure (III, 13): éprouvette du béton fibré après 365 jours de conservation dans différents milieux.

III.4.3. Analyses chimique par DRX

Les résultats des analyses chimiques par DRX sur des couches superficielles des éprouvettes en béton fibré conservées dans différents milieux à l'âge 365 jours sont illustrées aux figures (III, 14) et (III, 15). Les valeurs de l'intensité des pics du carbonate de calcium (CaCO_3), la portlandite (Ca(OH)_2) et de l'ettringite sont récapitulés au tableau (III, 01).

Nous constatons que les pics de carbonate de calcium sont indiqués dans tous les milieux de conservation, mais on enregistre une légère différence de l'intensité entre les éprouvettes témoins et celles conservées dans l'eau de mer. Toutefois, on a enregistré que toutes ces éprouvettes en BRPV sont de valeur nulle de profondeur de carbonatation après 365 jours d'immersion. En outre, les pics de la portlandite sont détectés pour tous les spécimens conservés dans différents milieux. Bien que, l'intensité des pics pour des échantillons témoins est plus élevée que celles conservés dans l'eau de mer. Alors qu'on peut dire que les sulfates des eaux de mer (calcium,

magnésium, sodium, potassium,...etc) réagissent avec la portlandite puis provoquent la dissolution progressive et la formation du gypse ou de l'ettringite expansif. [81]

Pour les pics de l'ettringite, on remarque des écarts négligeables de l'intensité pour les échantillons conservés dans différents milieux. Ces résultats peuvent être justifiés, par l'effet des ajouts ou des taux de 3% de la fumée de silice et de 20% du laitier, car ces ajouts ce sont eux qui réagissent avec la portlandite et la transforme en C-S-H et diminuent la porosité du béton des fibres. De plus, les ions Ca^{2+} peuvent être combinés avec la fumée de silice pour former de nouveaux hydrates de silicate de calcium [155, 156]. Ces résultats sont adéquats à ceux trouvés aux tests précédents.

Tableau (III, 01): Intensité des pics DRX de la portlandite, de carbonate de calcium et de l'ettringite.

	2θ	Intensité d(Å)							
		T0	T1	T3	T5	EM0	EM1	EM3	EM5
Carbonate de calcium [CaCO ₃]	23,14	-	-	-	-	-	-	1,72	-
	29,35	24,16	43,53	12,12	13,54	13,28	13,80	12,02	11,23
	43,91	4,06	2,74	2,42	2,57	2,16	2,20	2,33	2,19
	47,56	2,53	2,96	2,89	2,50	2,16	2,50	1,84	2,04
	48,93	4,57	4,10	2,36	2,87	2,32	2,62	2,26	2,03
Portlandite [Ca(OH) ₂]	18,06	2,53	1,60	2,00	1,44	1,38	1,71	1,34	1,92
	28,69	1,43	-	1,24	1,13	-	-	-	-
	34,11	2,75	1,84	2,36	1,89	1,42	1,82	1,80	1,96
	40,19	-	-	-	-	1,23	-	-	1,31
	47,04	2,02	2,28	1,65	1,97	1,46	1,78	1,53	1,46
Ettringite [3CaO·Al ₂ O ₃ · 3CaSO ₄ ·32H ₂ O]	22,96	2,16	2,51	1,94	1,74	2,08	2,05	2,22	1,85
	60,67	1,36	2,05	0,88	1,13	0,96	1,21	1,04	0,96

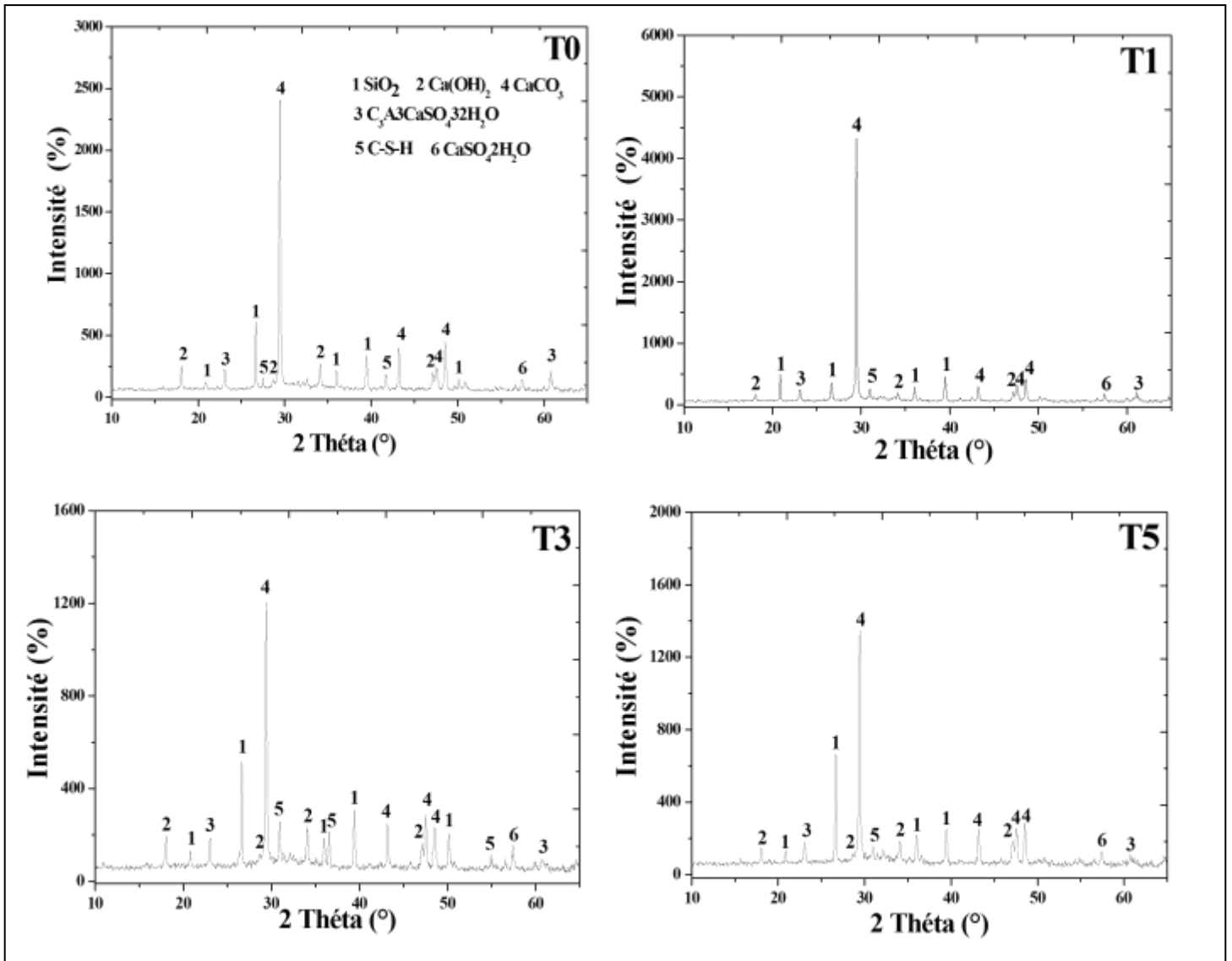


Figure (III, 14): Résultats des analyses DRX des éprouvettes en BRFV témoins.

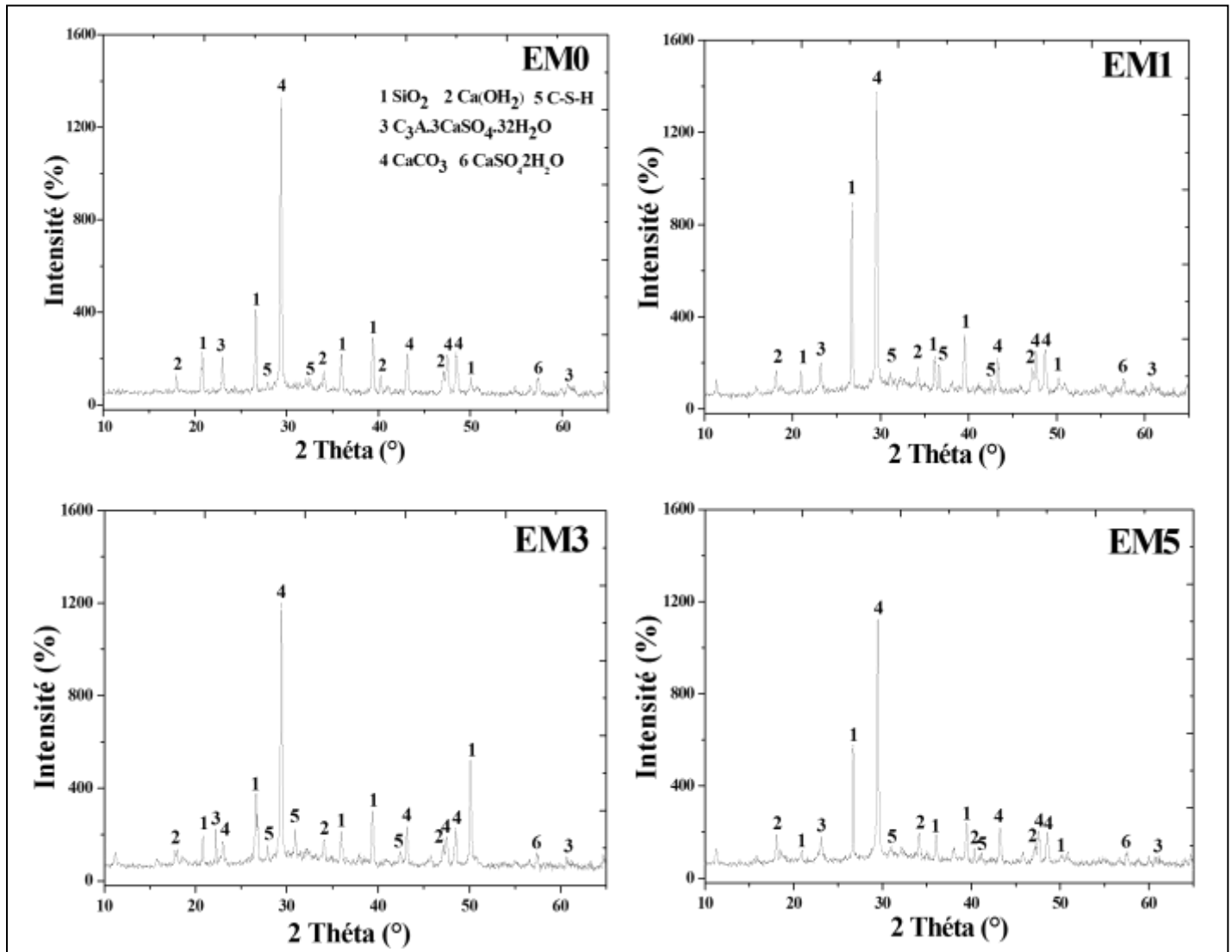


Figure (III, 15): Résultats des analyses DRX des éprouvettes en béton conservées dans l'eau de mer.

III.4.4. Observation au MEB

Les observations faites par microscope électronique à balayage sont reportées aux figures (III, 16), (III, 17), (III, 18), (III, 19) et (III, 20).

a) Fibre de verre AR à l'état naturelle

La figure (III, 16) est illustrée d'une image observée par MEB d'un filament de fibre AR à l'état naturel. Cette figure explique que la fibre est d'une forme cylindrique et d'un bon état, de plus on ne remarque aucune dégradation, sauf, quelques points en micromètre apparaissent à la surface de la fibre qui peuvent revenir à la fabrication des fibres.

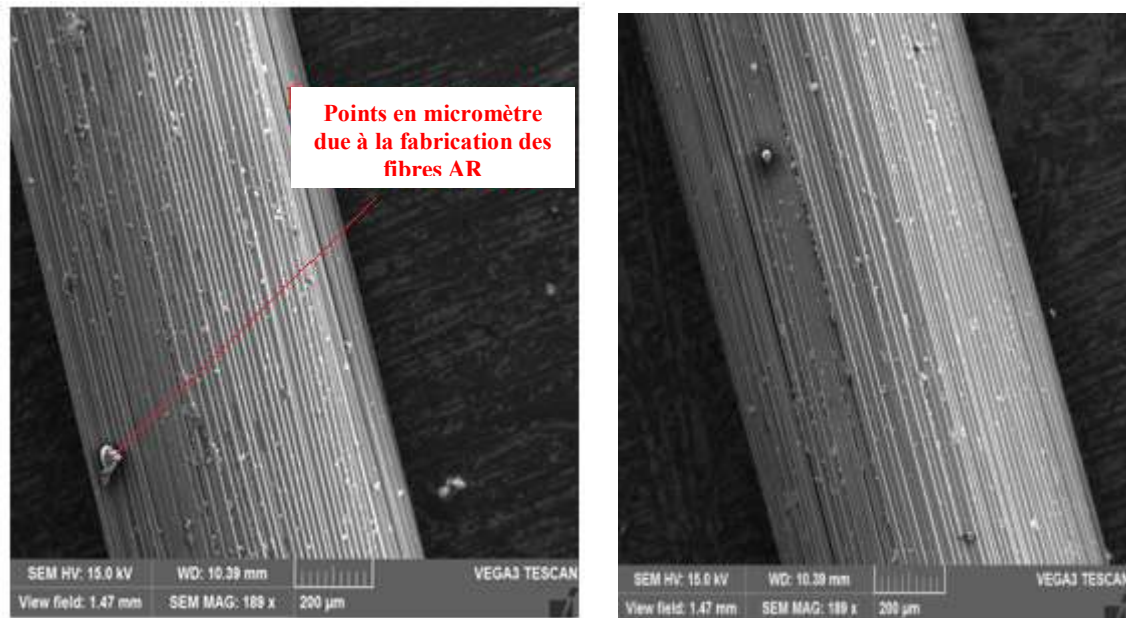
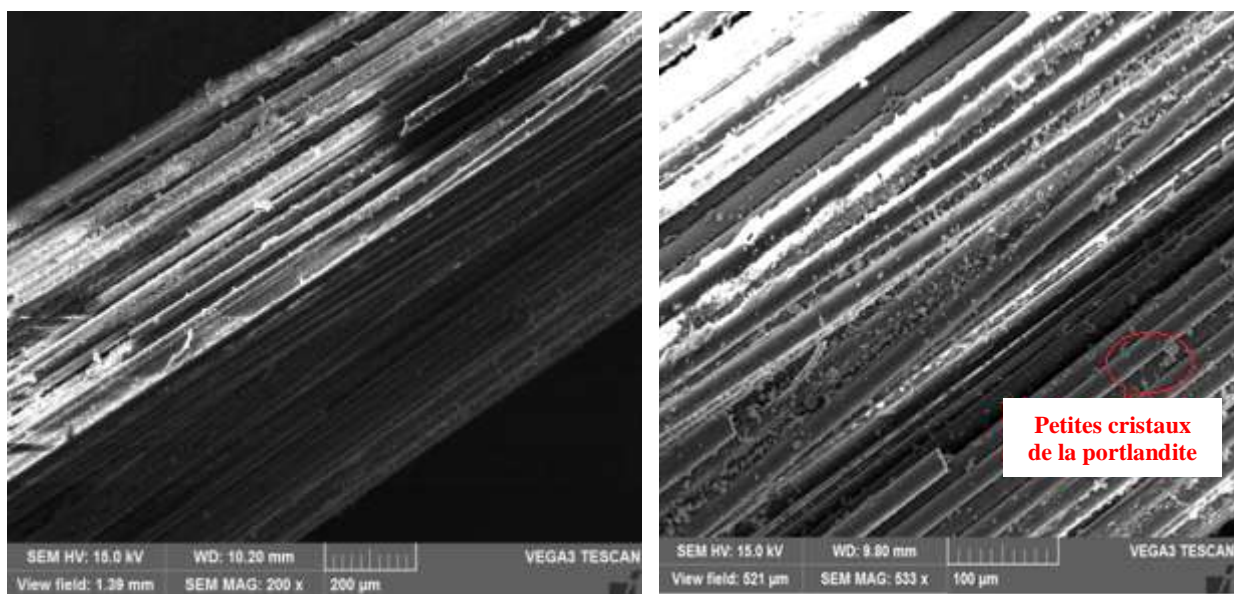


Figure (III, 16): Observation MEB des fibres à l'état naturel.

b) Fibre de verre AR conservé dans l'eau potable

Selon la figure (III, 17), on a constaté que la conservation de la fibre dans l'eau potable ou dans le milieu humide influe sur l'aspect de la fibre. Cependant, on voit des dommages à la surface de filaments de la fibre causés par le contact entre les fibres et granulats lors du malaxage et de coulage du BRVF des échantillons. De plus, une couche des particules du gel C-S-H couvrait la surface de la fibre AR et entre leurs filament. Des plaquettes sont observées à la surface des fibres sous forme de petits cristaux de la portlandite. Enfin, l'ajout de 3% de la fumée de silice et de 20% du laitier peut protéger la surface de la fibre.



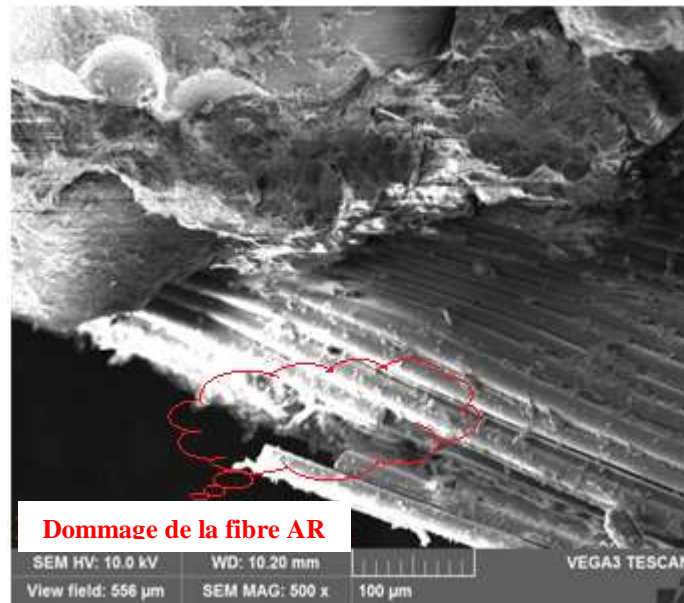
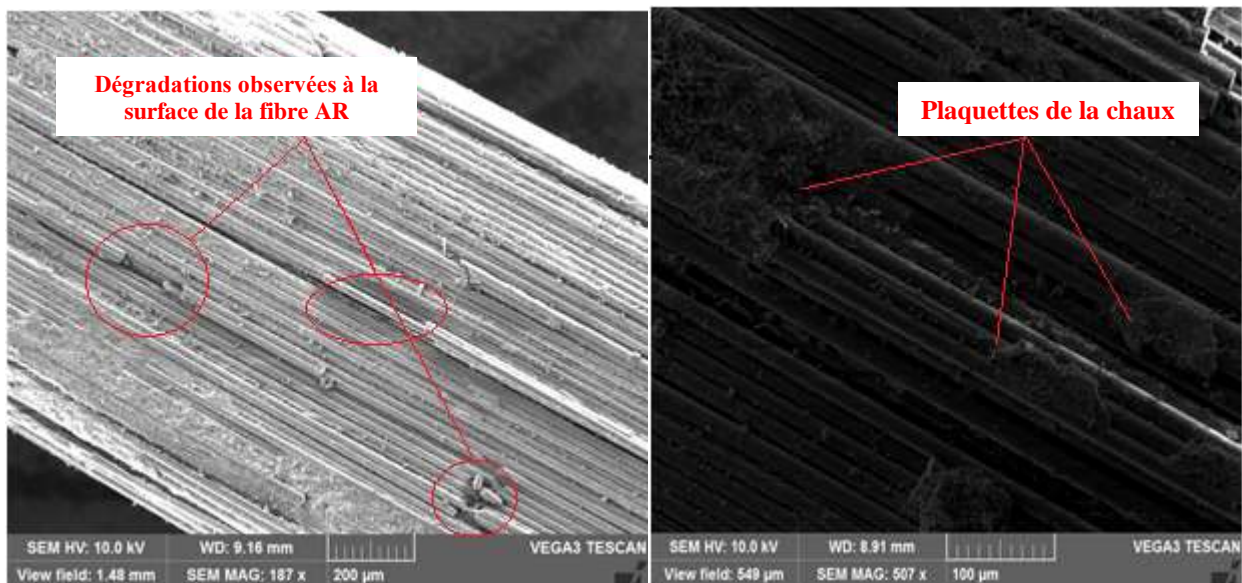


Figure (III, 17): Observation MEB des fibres du béton témoin.

c) Fibre de verre AR conservé dans l'eau de mer

La fibre AR conservée dans l'eau de mer est illustrée à la figure (III, 18), cette figure montre plusieurs dégradations à la surface des filaments de la fibre qui ont été provoqué lors du malaxage et du coulage du béton. D'autre part, on a constaté des hydrates de C-S-H sous forme de plaquettes et le dépôt de petites granules de la chaux à la surface de la fibre AR. L'agressivité du milieu de conservation ainsi que leur haute alcalinité ce qui influe sur l'aspect de la fibre, alors que la corrosion est déjà débuté à leur surface. Par conséquent, ces observations peuvent être justifiées les résultats des essais précédents.



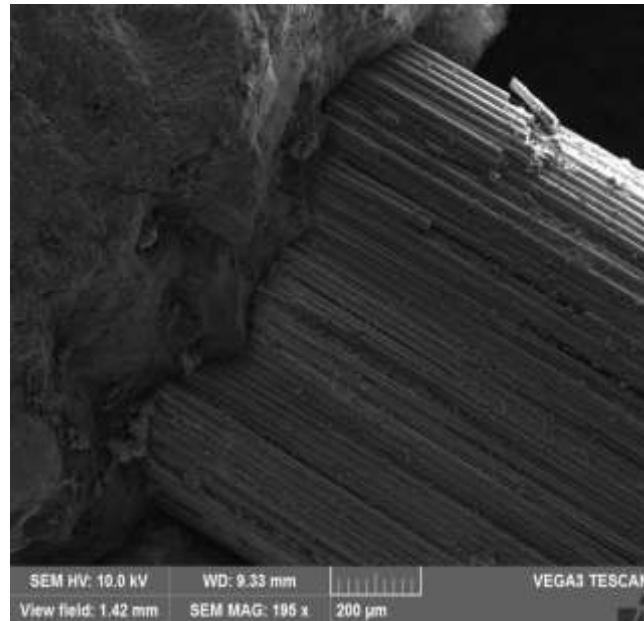
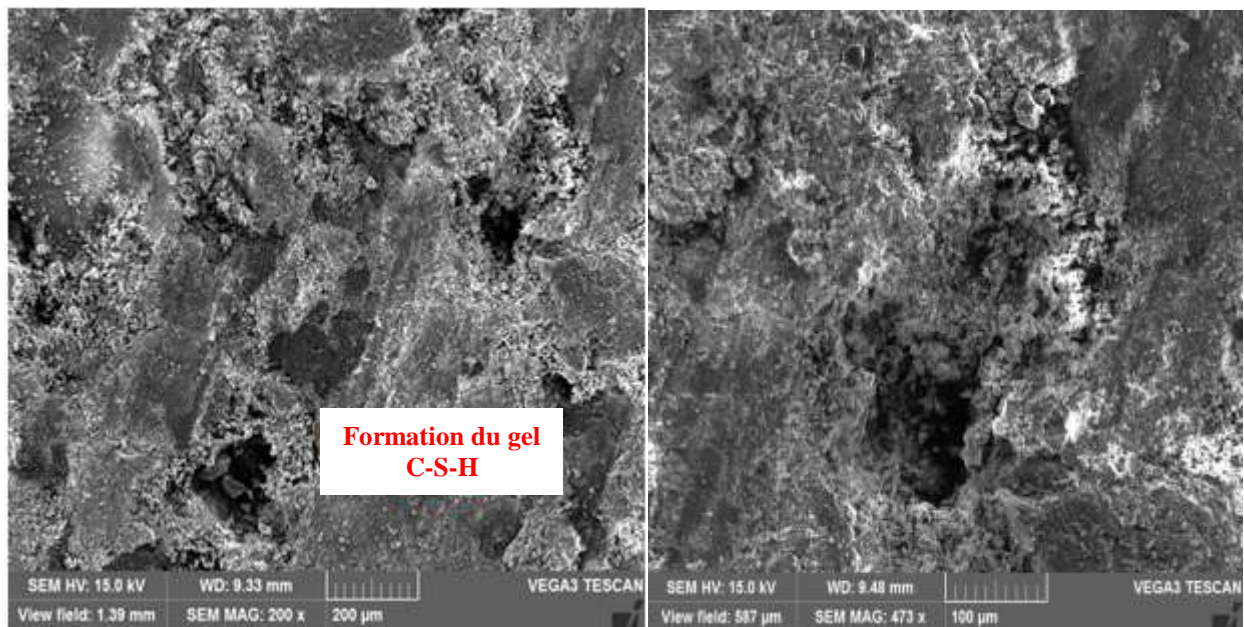


Figure (III, 18): Observation MEB des fibres du béton conservé dans l'eau de mer.

d) Patte du ciment durci témoin

La matrice cimentaire hydratée des éprouvettes témoins est dans un bon état comme le montre à la figure (III, 19), ainsi que sa morphologie est très dense et elle ne présente pas des cristaux ce qui confirme l'hydratation continue du ciment et la formation des C-S-H.



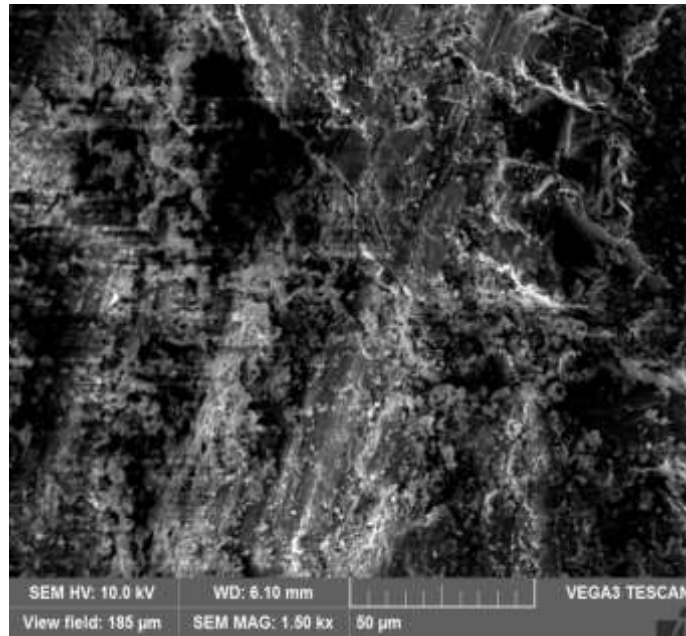
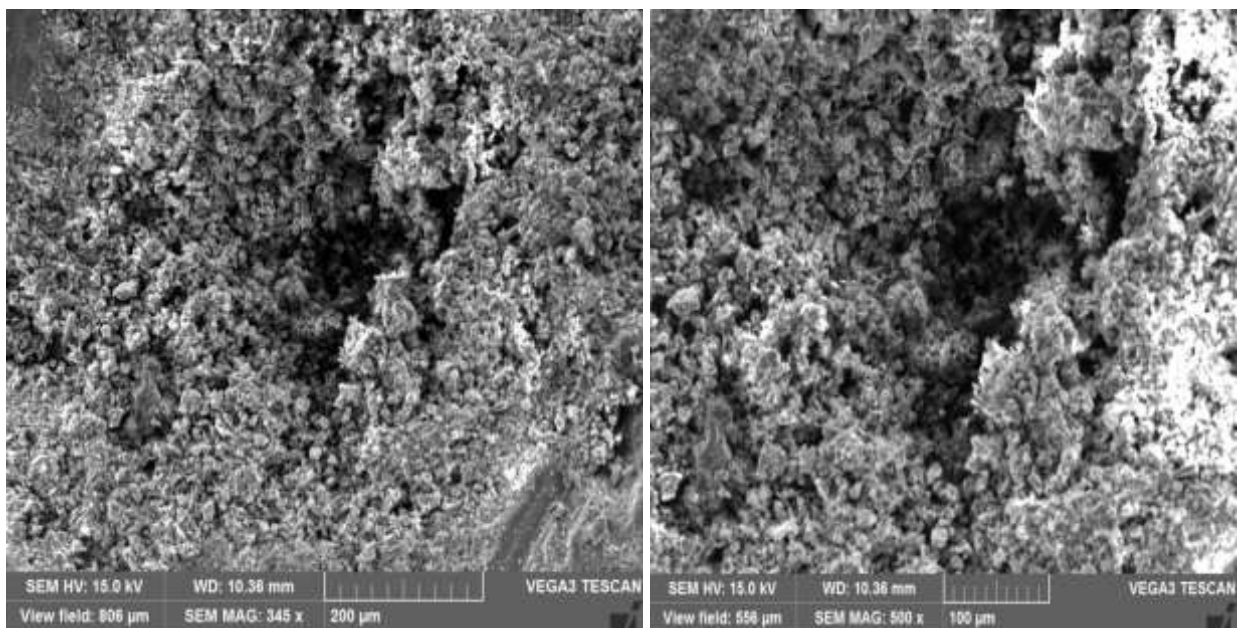


Figure (III, 19): Observation MEB du béton témoin.

e) Patte du ciment durci conservée dans l'eau de mer

La figure (III, 20) illustre la matrice cimentaire hydratée après conservation dans l'eau de mer à une durée de 365 jours. On a remarqué que la microstructure de la patte du ciment est très lâche. Elle présente des produits précipités à la surface de l'échantillon du béton sous forme de cristaux, ces cristaux soient de portlandite, du gypse ou d'ettringite. Ces observations peuvent confirmer la diminution de la résistance mécanique à la compression après une année de conservation dans l'eau de mer.



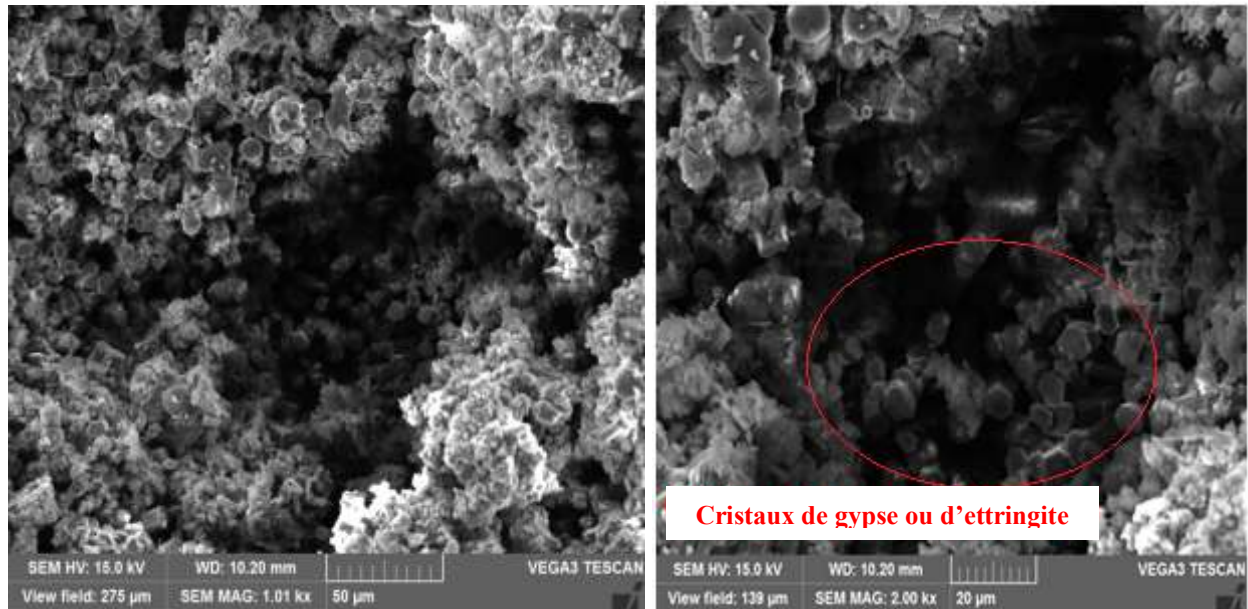


Figure (III, 20): Observation MEB du béton conservé dans l'eau de mer.

III.5. Conclusion

Nous concluons d'après ce chapitre que la résistance mécanique à la compression et à la flexion des éprouvettes en béton fibrées conservées dans différents milieux sont plus élevés que celles du béton sans fibres, ainsi que les meilleures caractéristiques mécaniques du béton pour son renforcement sont d'un pourcentage de 1% à 3%. De plus, les éprouvettes conservées dans l'eau de mer sont de faible résistance à la compression et d'une bonne résistance à la flexion par rapport aux éprouvettes témoins.

En outre, lorsque le pourcentage de fibres augmente, la porosité du BRFV augmente aussi, d'autre part, l'absorption d'eau du BRFV augmente et sa masse diminue. Et enfin, la profondeur de carbonatation des échantillons conservés dans différents milieux pendant 365 jours est nulle due à l'effet de cure humide.

Chapitre IV

Caractérisation

du PRV

Chapitre IV: Caractérisation du PRV

IV.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les résultats des essais mécaniques, physiques et chimiques sur des éprouvettes en PRV. Ainsi que, ces dernières sont conservées dans trois milieux différents, soient: la première série est exposée à l'air libre ou au laboratoire (témoins ou T), la deuxième série est conservée dans l'eau potable (EP), alors que les spécimens immergés dans l'eau de mer (EM) sont considérés comme une troisième série. Dans chaque période d'essai, les échantillons en PRV sont coupés par une tronçonneuse de disque du type diamant, ensuite les faces de coupure de plaques seront finies par un produit préparé (résine + catalyseur + accélérateur). En outre, ces plaques sont exposées à l'air libre à une durée de 24 heures pour le séchage avant la nouvelle conservation, cette opération doit être effectuée afin d'assurer la stabilité des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des plaques conservées. Finalement, on procède à la réalisation des essais mécaniques, physiques et chimiques, lorsque les échantillons sont préparés. Le programme d'essai sur les échantillons en PRV est effectué au laboratoire de MAGHREB PIPE.

IV.2. Résultats des essais mécaniques et physiques

IV.2.1. Résultats d'essai de traction axial

a) Courbes contraintes - déformations

Les valeurs moyennes de la contrainte et de la déformation à la rupture par traction axial sont les moyennes de cinq (05) valeurs dans chaque série d'essai. Les figures (IV, 01) et (IV, 02) montrent des exemples des courbes ($\sigma_t - \varepsilon_t$) des échantillons en PRV conservées dans différents milieux à l'âge de 180 et 365 jours.

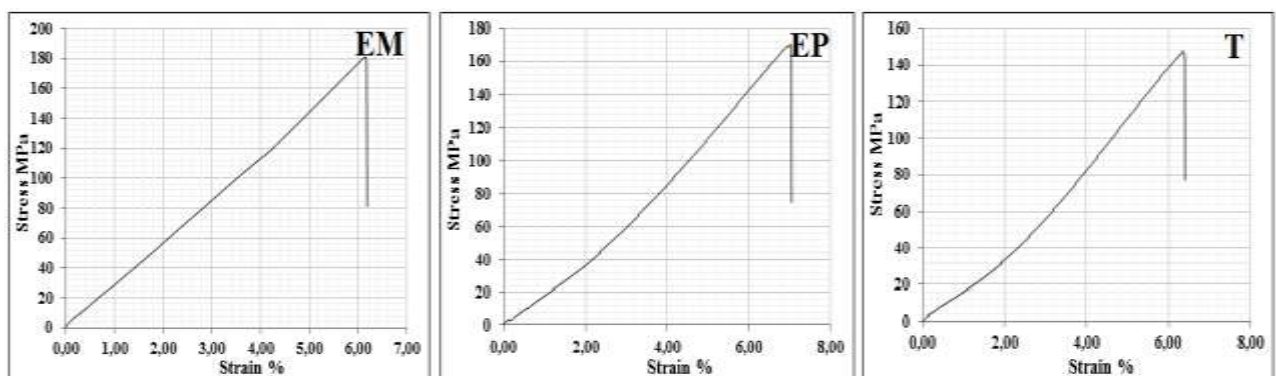


Figure (IV, 01): Courbe ($\sigma_t - \varepsilon_t$) des échantillons conservés dans différents milieux à l'âge de 180 jours.

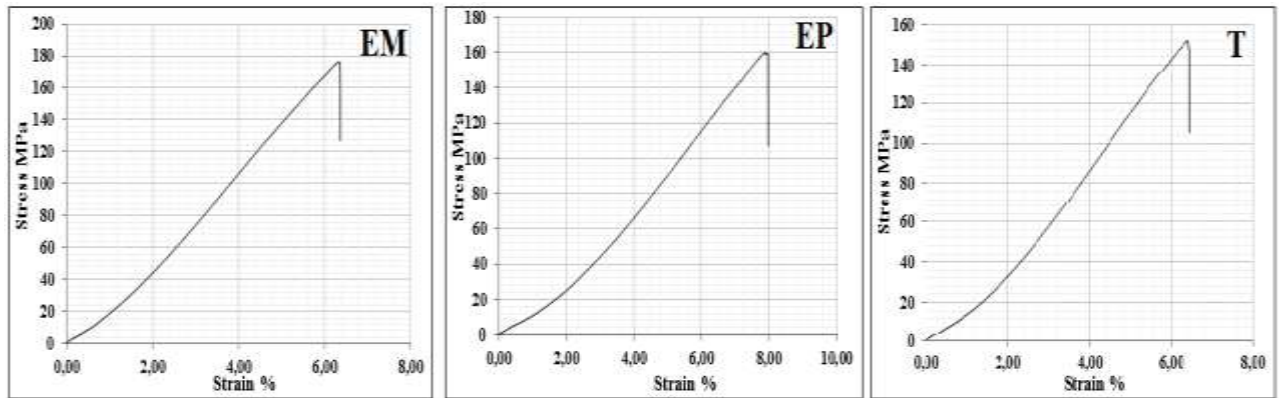


Figure (IV, 02): Courbe ($\sigma_T - \varepsilon_T$) des échantillons conservés dans différents milieux à l'âge de 365 jours.

D'après les figures précédentes, nous remarquons que les courbes de traction axiale sont composées de deux phases, la première phase des courbes se caractérise par une allure non stable due à l'adaptation de l'éprouvette avec les mâchoires de l'appareil d'essai, la limite de cette phase est généralement à une déformation d'environ 2% qui correspond à une faible contrainte. La deuxième phase des courbes présente une forme linéaire traduisant la réponse élastique du matériau ainsi que la relation proportionnelle entre la contrainte et la déformation. Ensuite, l'augmentation du chargement provoque le développement de l'endommagement et de la microfissuration mènent à la fracture soudaine de l'éprouvette traduisant le comportement fragile des éprouvettes en PRV. Cette rupture brutale et totale se produit finalement au maximum de charge.

b) Evolution de la contrainte

Les valeurs de la contrainte de traction axiale des éprouvettes en PRV conservées dans différents milieux jusqu'à l'âge 365 jours sont présentées à la figure (IV, 03). Il est bien remarqué sur cette dernière, que la contrainte à la rupture par traction des éprouvettes EP s'accroît de manière significative lors des premiers 90 jours de conservation au-delà des quels, une régression de contrainte peut être visible qui se stabilise lors du dernier palier. La contrainte à la rupture par traction des éprouvettes EM s'augmente jusqu'à 180 jours de conservation, mais au-delà nous remarquons une régression de contrainte jusqu'à 365 jours. En effet, les éprouvettes EP présentent une contrainte maximale à la rupture de l'environ de 173MPa, alors que celles des éprouvettes EM présentent une contrainte maximale à la rupture de 176MPa. Cependant, cette régression de contraintes probablement due au vieillissement du PRV sous l'effet d'humidité [145]. Les valeurs de la contrainte à la rupture de traction des éprouvettes EM sont supérieures à celles des éprouvettes EP et T de 180 jusqu'à 365 jours de conservation. Les éprouvettes T

présentent les valeurs minimales de la contrainte à la rupture comparativement aux autres éprouvettes. Les résultats de calcul du module d'élasticité confirment encore cette réduction.

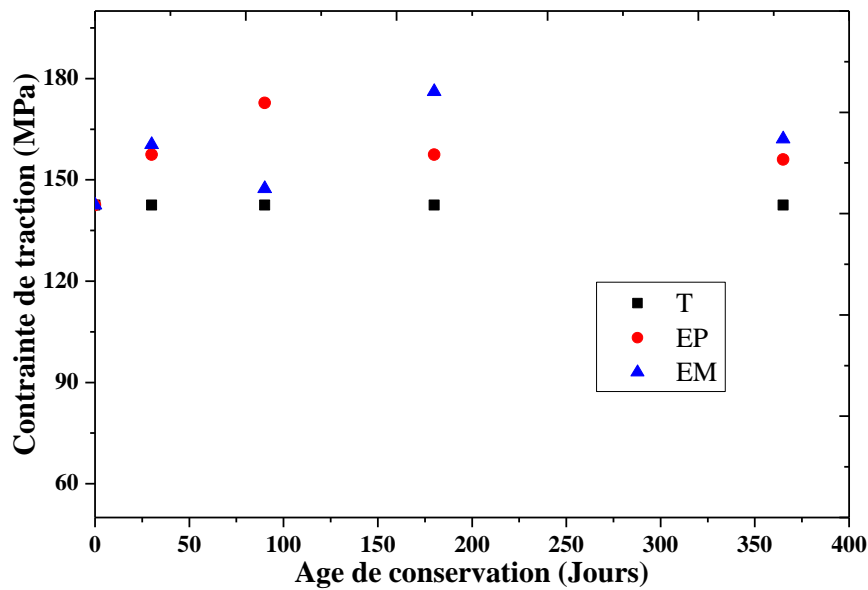


Figure (IV, 03): Contrainte à la rupture par traction axiale des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.

c) Evolution de la déformation

Les résultats de déformation à la rupture par traction axiale des éprouvettes en PRV conservées dans différents milieux sont illustrés à la figure (IV, 04).

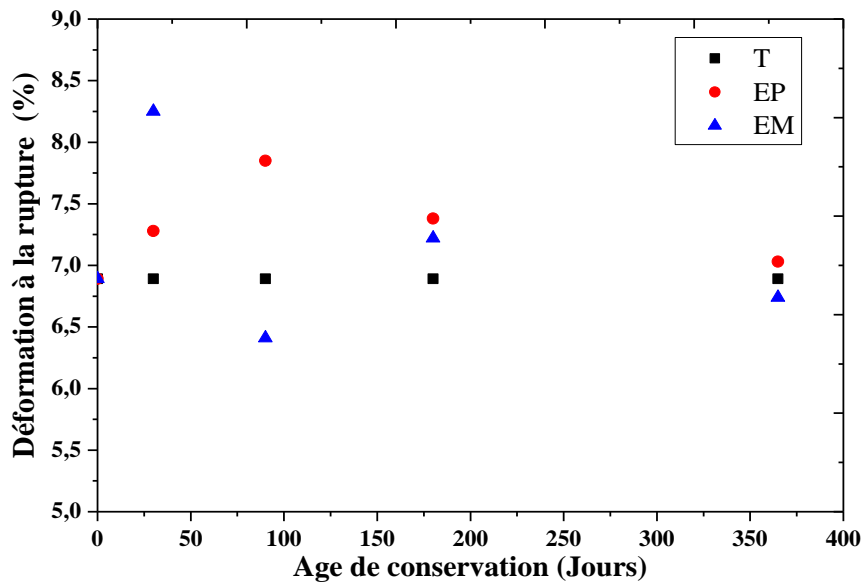


Figure (IV, 04): Déformation à la rupture par traction axiale des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.

Il est bien clair sur la figure (IV, 04), que la déformation à la rupture des éprouvettes EM s'augmente de manière continue jusqu'à l'âge de 30 jours, avec une valeur égal à 8.25%. Cette

valeur subit une diminution significative pour l'âge de 180 jours et l'âge de 365 jours. Pour les éprouvettes immergées dans l'eau potable (EP), la courbe de déformation à la rupture s'accroît de manière remarquable lors des premières 180 jours de conservation, ou elle atteint sa valeur maximale de 7.85%; notamment au-delà de l'âge de 180 jours où il est constaté qu'une réduction continue jusqu'à 365 jours. Cependant, la déformation des échantillons EM est inférieures aux éprouvettes T et EP, ainsi que les éprouvettes EM montrent des régressions de 0.29% et 0.15% par rapport aux éprouvettes EP et T respectivement, à l'âge de 365 jours. Ces résultats peuvent être justifiés par l'effet de diffusion de l'eau de mer au sein des éprouvettes immergées, qui entraîne par la suite une dégradation des propriétés physiques du matériau et affecte l'interface matrice/fibre. [143]

d) Variation du module d'élasticité

Les résultats de l'évolution du module d'élasticité de traction axiale sont présentés à la figure (IV, 05). Cette dernière montre que le module d'élasticité des éprouvettes EM est supérieur à celles des éprouvettes T et EP jusqu'à 365 jours de conservation. Par ailleurs, les éprouvettes immergées dans l'eau potable EP présentent des valeurs de module d'élasticité moins importantes comparativement aux éprouvettes témoins T, cette diminution du module d'élasticité à l'âge de 365 jours peut être justifiée par le vieillissement du PRV sous l'effet d'humidité et d'absorption d'eau à la durée de conservation. [143, 145]

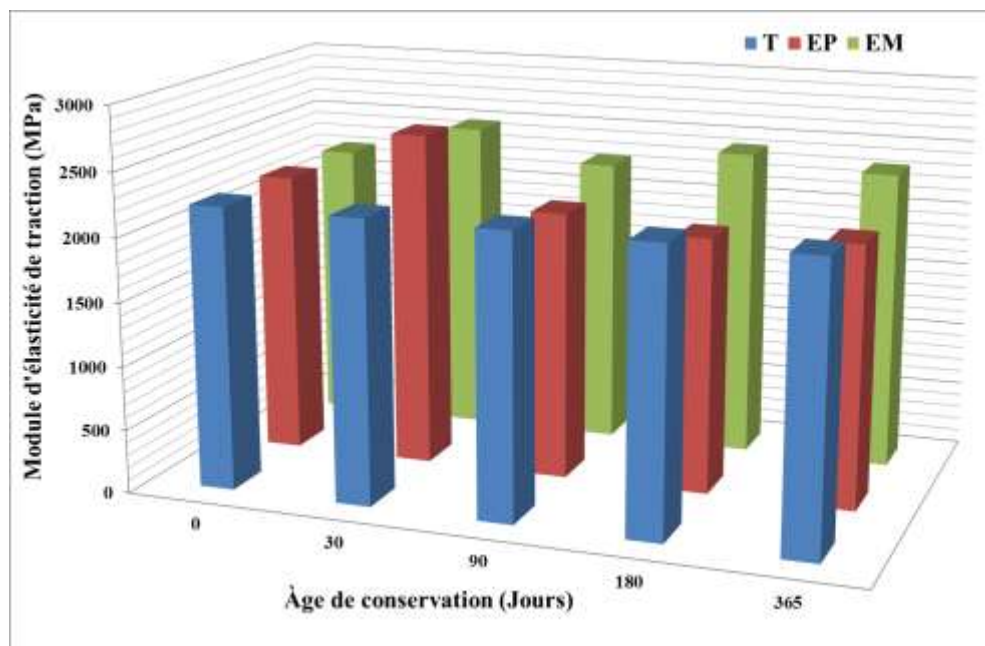


Figure (IV, 05): Module d'élasticité de traction des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.

IV.2.2. Résultats d'essai de flexion trois points

a) Courbes contraintes - déformations

Les courbes ($\sigma_f - \varepsilon_f$) de flexion extrants au logiciel UTM Main pour des spécimens en PRV conservées dans différents milieux à l'âge de 180 et 365 jours sont présentées aux figures (IV, 06) et (IV, 07).

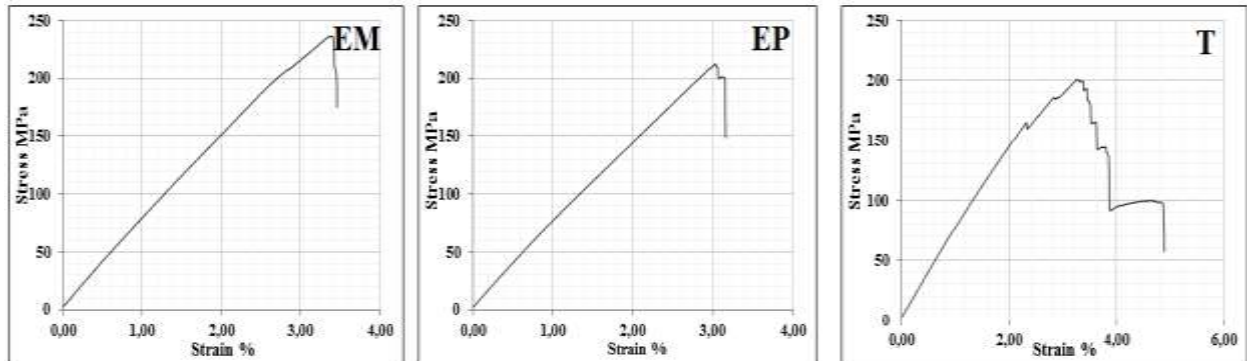


Figure (IV, 06): Courbe ($\sigma_f - \varepsilon_f$) des échantillons conservés dans différents milieux à l'âge de 180 jours.

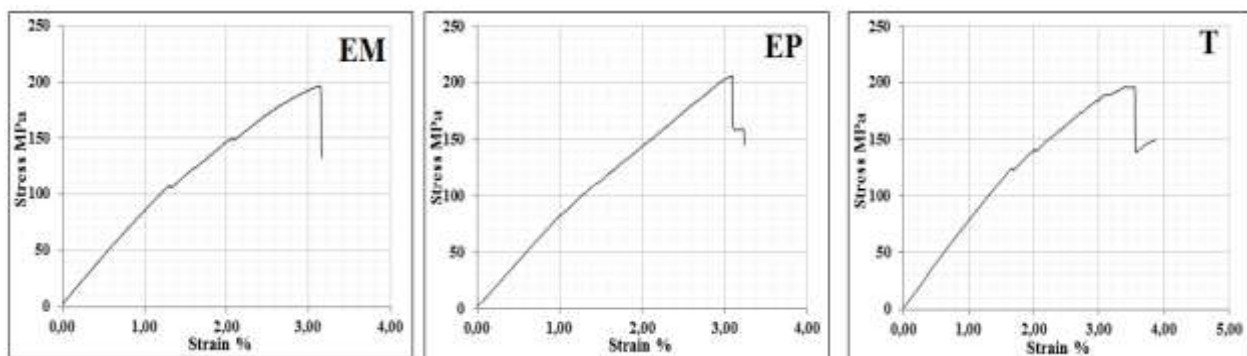


Figure (IV, 07): Courbe ($\sigma_f - \varepsilon_f$) des échantillons conservés dans différents milieux à l'âge de 365 jours.

Il est bien clair sur les figures (IV, 06) et (IV, 07), que la courbe (contrainte-déformation) de flexion présente une allure croissante, jusqu'à la rupture de l'éprouvette ou la contrainte atteint sa valeur maximale de rupture par flexion. Après la rupture de l'éprouvette même si la contrainte chute brutalement, la déformation augmente légèrement jusqu'au cisaillement des fibres en verre et la matrice. Cependant, les éprouvettes témoins T, présentent une déformation avant la rupture plus importantes par rapport aux éprouvettes conservées dans les différents milieux.

b) Evolution de la contrainte

La figure (IV, 08) présente la courbe de la contrainte en flexion des échantillons en PRV conservées dans différents milieux, ainsi que les valeurs moyennes de la contrainte à la rupture de flexion trois points sont les moyennes de cinq (05) valeurs dans chaque série d'essai.

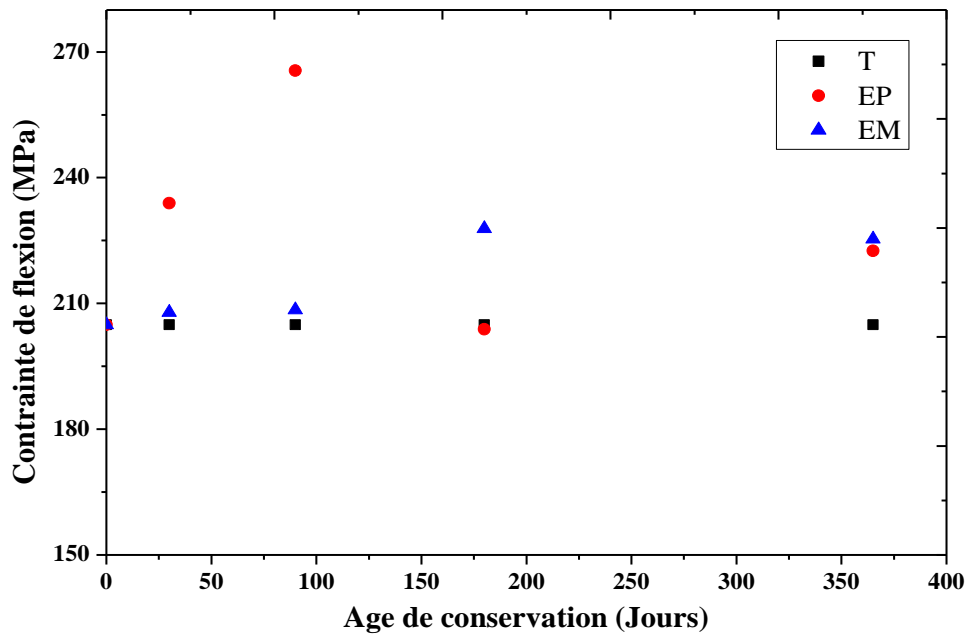


Figure (IV, 08): Contrainte à la rupture par flexion des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.

D'après la figure (V, 08), la contrainte à la rupture par flexion des éprouvettes EM s'augmente jusqu'à 180 jours de conservation, où les contraintes atteignent sa valeur maximale (environ 228MPa). En effet, la contrainte à la rupture par flexion des éprouvettes EP s'accroît de manière remarquable lors des premières 90 jours de conservation, où elle atteint la valeur de 266MPa; au-delà 90 jours cette contrainte est diminuée jusqu'à l'âge de 365 jours. La contrainte de flexion des spécimens EM est supérieure aux éprouvettes T et EP de 180 à 365 jours. Les éprouvettes T présentent les valeurs minimales de la contrainte de flexion à la rupture comparativement aux autres éprouvettes à 365 jours de conservation, de plus les échantillons T et EP présentent des régressions de 9.08% et 1.25% respectivement par rapport aux éprouvettes EM. Ces résultats conviennent à ceux trouvés par l'essai de traction; ainsi que la réduction des contraintes peut être justifiée par le vieillissement hygrothermique sous l'effet d'humidité selon Aditya et al [145], ils observaient une réduction de 27% de la contrainte de flexion des stratifiés en PRV symétriques et antisymétriques, étaient exposés dans un environnement de 98% d'humidité pendant une durée de conservation de 2000 heures. En outre, le vieillissement du PRV de résine polyester isophthalique accélère par l'effet d'humidité et l'absorption d'eau. [146]

c) Evolution de la déformation

Les figures (IV, 09) présentent la courbe de la déformation en flexion des échantillons en PRV conservées dans différents milieux.

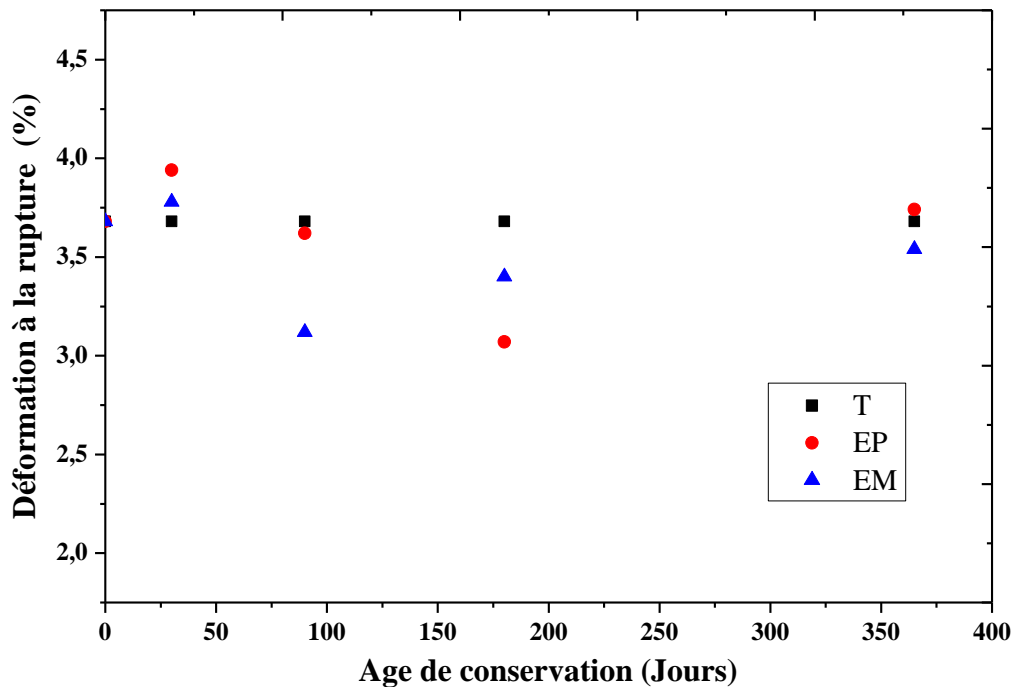


Figure (IV, 09): Déformation à la rupture par flexion des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.

Il est bien remarquer sur la figure (IV, 09) que la déformation des échantillons EP et EM s'accroît de manière continue jusqu'à 90 jours, mais de-là même âge, cette déformation est diminuée jusqu'à l'âge de 365 jours de conservation. La déformation à la rupture des éprouvettes EP est supérieure à celles des éprouvettes EM et T à 365 jours de conservation. Au même âge de conservation, les éprouvettes EM présentent les valeurs inférieures de déformation à la rupture par rapport aux autres éprouvettes. Ces résultats confirment à ceux trouvés de l'essai de traction. Par conséquent, on peut dire que cette diminution est due à l'effet de l'humidité ou de l'immersion des spécimens dans le milieu humide.

Cependant, toutes les éprouvettes testées présentent une zone endommagée avant la rupture totale justifiant la présence du phénomène de transfert des charges par les fibres de verre au sein du matériau, et avec l'augmentation de la charge appliquée sur la zone critique, la liaison fibre/matrice peut subir des dommages important qui entraine par la suite le délaminage des fibres en particulier pour les composites conservées dans l'eau de mer pour une durée de 365 jours. En effet, le composite EM présente une valeur minimale de déformation a la rupture par rapport aux autres milieux qui est due probablement à la présence des sels aux surfaces et au sein du matériau, qui provoquent par la suite, et avec l'augmentation de la durée d'exposition, une dégradation de l'interface et une diminution des propriétés des différents composants.

d) Variation du module d'élasticité

Les résultats du module d'élasticité de flexion des éprouvettes en PRV conservées dans différents milieux sont illustrés à la figure (IV, 10). Cette dernière indique que le module d'élasticité des éprouvettes EP est supérieur à celles des éprouvettes T et EM de 90 à 365 jours de conservation. Les éprouvettes T présentent un module d'élasticité inférieure comparativement aux autres éprouvettes. Ces résultats sont confirmés à ceux trouvés à la figure (IV, 08).

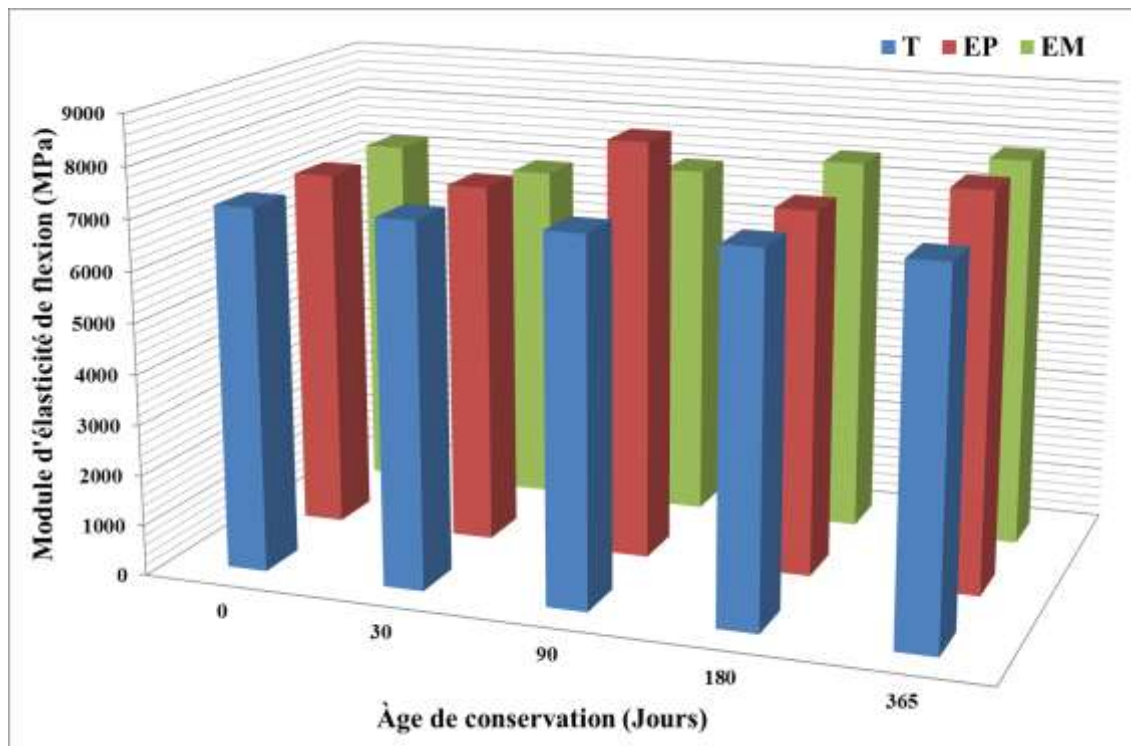


Figure (IV, 10): Module d'élasticité de flexion des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.

IV.2.3. Résultats de l'essai dureté de Barcol

La valeur de dureté est la moyenne de trois (03) valeurs dans chaque série d'essai. Les résultats de l'essai de dureté de Barcol des spécimens en PRV conservées dans différents milieux sont présentés à la figure (IV, 11). Selon la figure ci-dessous, nous enregistrons que la dureté des éprouvettes T est supérieure à celles des éprouvettes EP et EM, à l'âge de 180 et 365 jours. Les éprouvettes EM présentent les valeurs minimales de la dureté comparativement aux autres éprouvettes à 365 jours. Au même âge de conservation, la dureté des éprouvettes T, EP et EM sont de 44.40, 44.33 et 44 respectivement. Cette perte de rigidité du PRV immergé peut être justifiée par l'effet d'absorption d'eau ou d'humidité, selon Phifer [145], a obtenu que l'immersion du composite verre E- résine vinylester dans l'eau potable à une durée de deux ans, provoquait une réduction de rigidité d'environ de 10%.

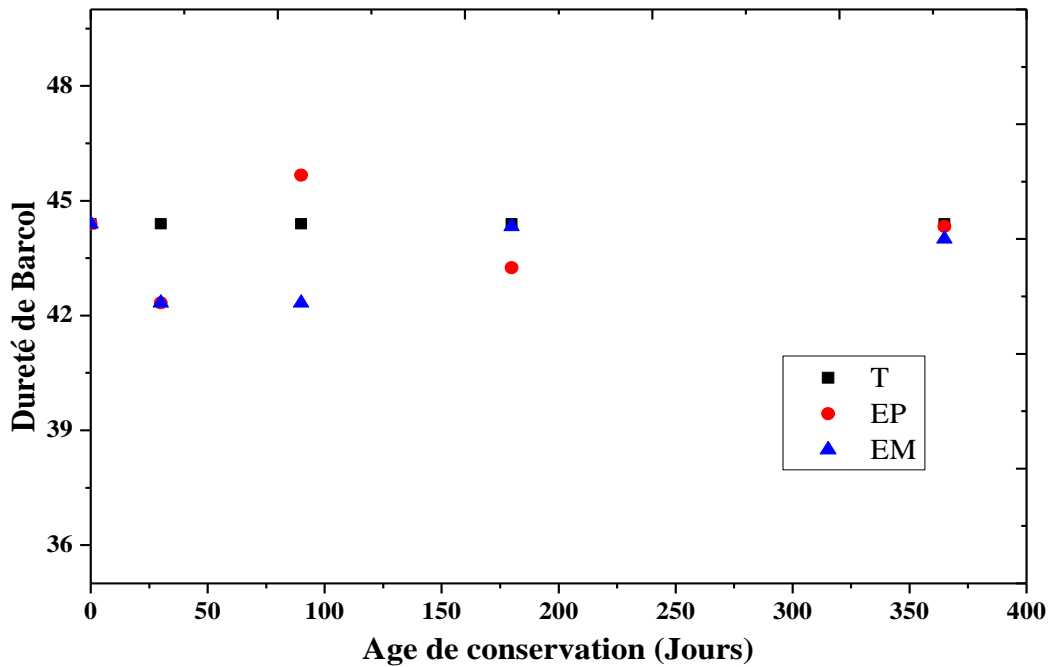


Figure (IV, 11): Dureté de Barcol du PRV conservées dans les différents milieux.

IV.2.4. Résultats d'essai d'absorption d'eau

Les résultats d'absorption d'eau des éprouvettes conservées dans différents milieux sont présentés à la figure (IV, 12). Les valeurs de l'absorption d'eau sont les moyennes de trois (03) éprouvettes dans chaque période d'essai.

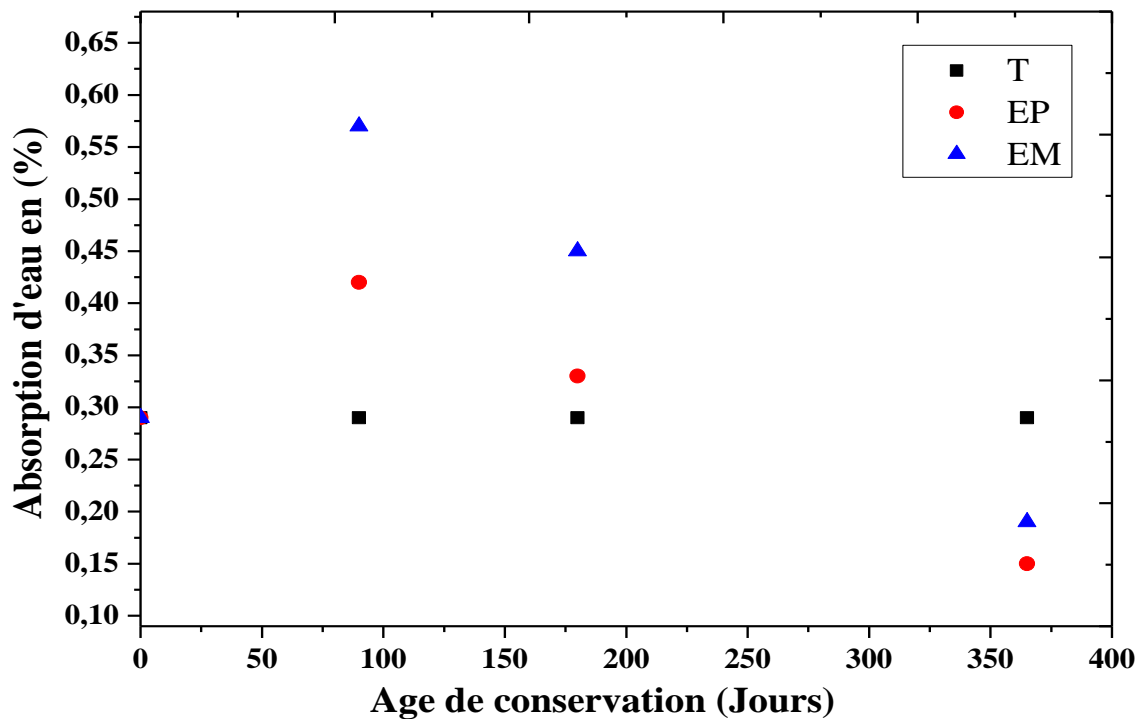


Figure (IV, 12): Absorption d'eau des éprouvettes en PRV conservées dans les différents milieux.

La figure (IV, 12) montre que les courbes d'absorption des éprouvettes en PRV conservées dans différents milieux se diminuent de façon continue jusqu'à l'âge de 365 jours. Les éprouvettes EM présentent une absorption maximale à l'âge de 90 jours de conservation qui est de 0.57g/cm^2 , alors que celles des éprouvettes EP présentent une absorption maximale de 0.42g/cm^2 , au même âge de conservation. Les éprouvettes EM sont des valeurs supérieures de l'absorption comparativement aux autres éprouvettes de 90 à 180 jours, alors que les éprouvettes T montrent les valeurs inférieures de l'absorption, sauf à l'âge de 365 jours. Ces résultats peuvent être justifiés par saturation du PRV après 365 jours d'immersion dans l'eau de mer ou de l'eau potable, ces résultats concordent à ceux trouvés par Alia et al en 2013 [147], qui ont obtenu que les composites à matrice de résine polyester isophthalique ne sont pas stabilisés après le niveau de saturation en eau.

IV.3. Essais chimiques

IV.3.1. Observations visuels des éprouvettes conservées dans différents milieux

Dans cette partie, nous observons visuellement les surfaces des éprouvettes en PRV conservées dans différents milieux dans une durée de 365 jours (voir la figure (IV, 13)).

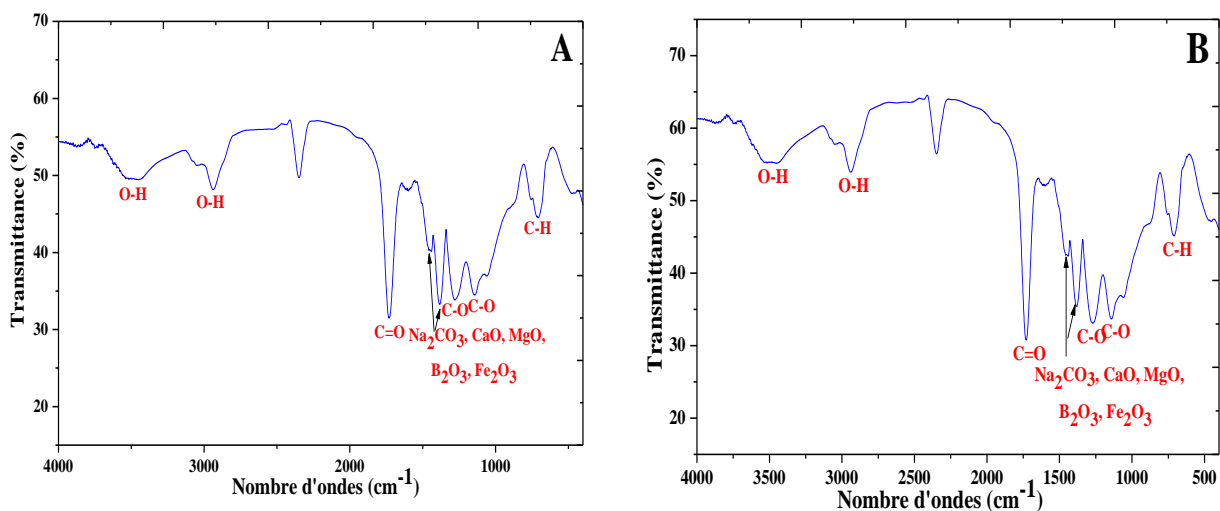


Figure (IV, 13): surfaces des éprouvettes conservées dans différents milieux dans une durée de 365 jours.

- Nous remarquons que la peau des éprouvettes en PRV conservées dans l'eau potable, ayant une couleur blanche selon la figure (IV, 13A). En revanche, on constate qu'une couche formée des sels de couleur blanche à la peau des éprouvettes conservées dans l'eau de mer (voir la figure (IV, 13B));
- Les déformations à la rupture des échantillons en PRV testés par flexion et/ou par traction sont visibles à l'œil nu. Ainsi que, ces déformations sont observées à la résine de leurs couches superficielles (IV, 13C et 13D);
- On ne vise aucune dégradation physico-chimique des fibres conservées à l'œil nu (IV, 17E et 17F).

IV.3.2. Analyses des spectres d'infrarouge (IR)

Les résultats des analyses des spectres d'infrarouge (IR) de la peau des spécimens en PRV conservés dans différents environnements à 365 jours, sont illustrés à la figure (IV, 14). D'après les résultats obtenus aux figures ci-dessous, nous enregistrons que la conservation de l'eau potable et de l'eau de mer n'influe pas sur les différentes formations dans la peau des spécimens en PRV après une année d'immersion. En plus, on a indiqué deux bandes de vibration d'élongation O - H fine d'alcool, et large de l'acide entre $2500 - 3200\text{cm}^{-1}$ et $3580 - 3670\text{cm}^{-1}$ respectivement. Une bande fine et intense à 1750cm^{-1} est attribuée à l'allongement de la double liaison C = O à la fonction COOH de l'acide carboxylique. La bande large et intense entre 1450 et 1550cm^{-1} est attribuée à l'élongation des composants chimiques de la fibre de verre AR des liaisons doubles (C = O, Ca = O, Mg = O, B = O et Fe = O). Deux bandes de déformation moyennes de liaison simple C - H entre 680 et 725cm^{-1} . Deux bandes autour de 1040 et 1450cm^{-1} correspondant aux bandes larges et forts de valence des vibrations symétriques et antisymétriques de liaison simple C - O.



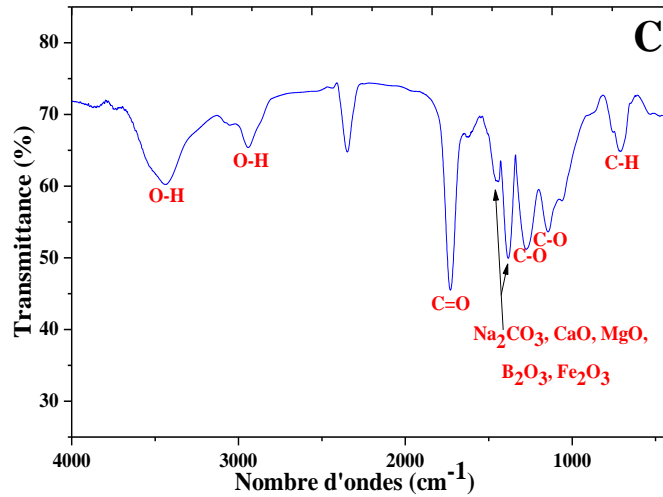


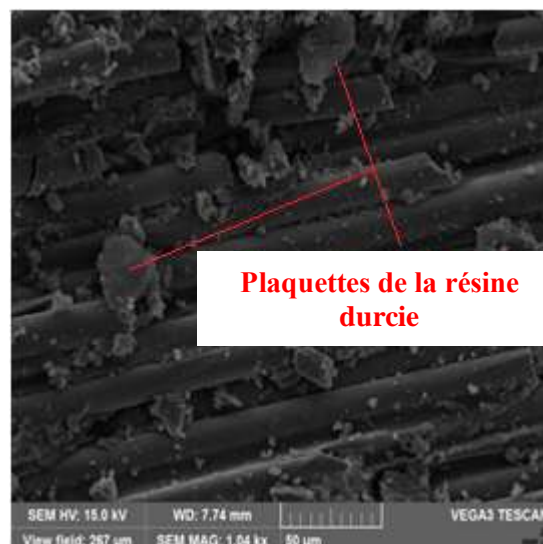
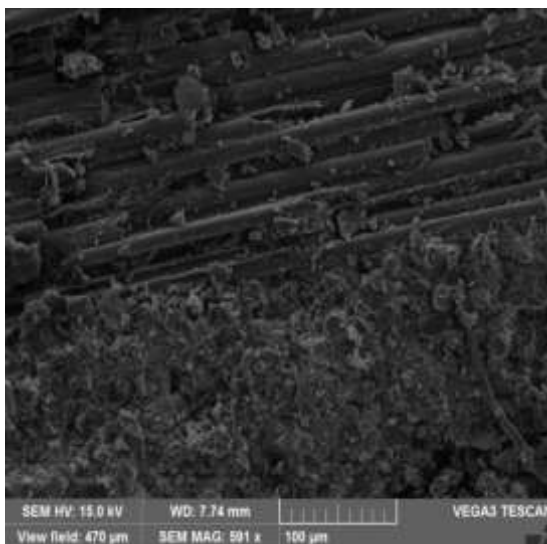
Figure (IV, 14): Résultats IR du PRV conservé de (A) l'eau de mer (B) l'eau potable (C) témoins à 365 jours.

IV.3.3. Observation MEB

Les images observées par microscopie électronique au balayage (MEB) sont illustrées aux figures (IV, 15), (IV, 16) et (IV, 17).

a) Observation du PRV témoin

La figure (IV, 15) est illustrée d'une image observée par MEB de l'échantillon de PRV témoin après la rupture par traction à l'âge de 365 jours. Cette figure explique que les fibres de la couche combo-Mat est d'un bon état, cependant on ne constate aucune dommage, sauf quelques points en micromètre apparaissent à la surface de la fibre qui peuvent revenir à la fabrication des fibres. De plus, on a remarqué des plaquettes formées de la résine durcie à la surface et entre les filaments de la fibre E. Enfin, on a indiqué une bonne liaison entre la fibre et la matrice à l'interface du PRV.



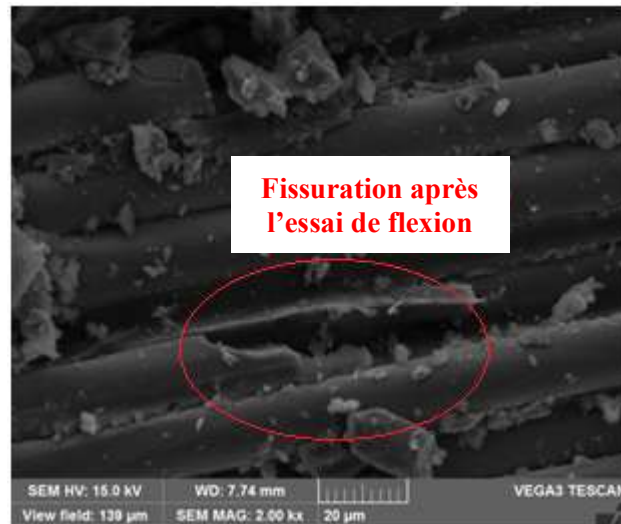
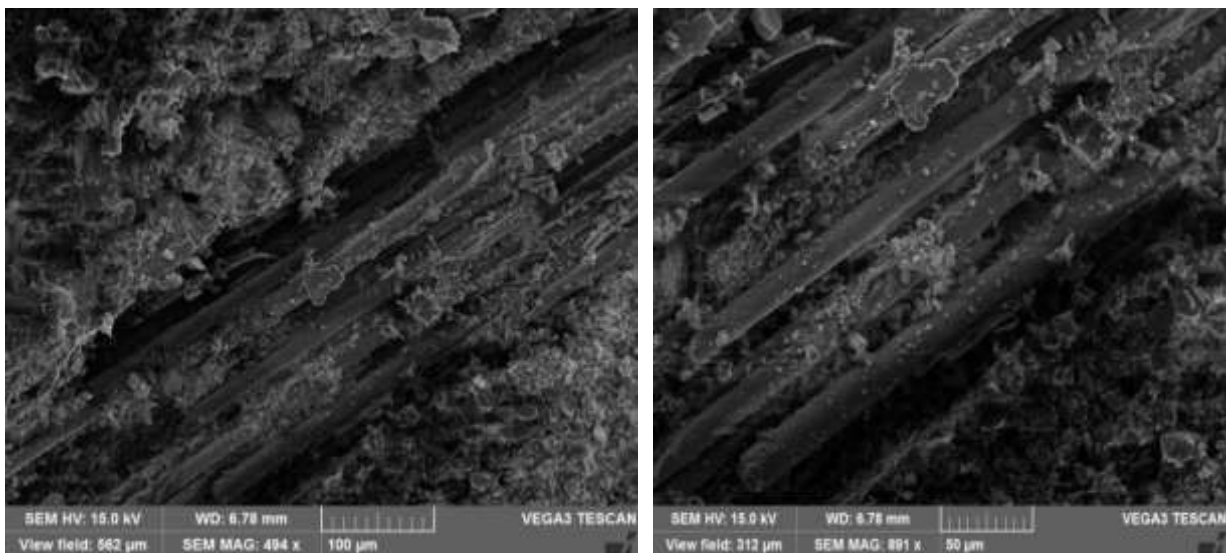


Figure (IV, 15): Observation MEB du PRV témoin.

b) Observation du PRV conservé dans l'eau potable

L'observation MEB du PRV conservé dans l'eau potable et après la rupture par l'essai de traction axiale à l'âge de 365 jours est illustrée à la figure (IV, 16). La conservation du PRV dans l'eau potable ou dans le milieu humide n'influe pas sur l'aspect de la fibre, ainsi qu'il n'apparaît aucune dégradation à la surface des filaments des fibres. Et aussi, on voit des plaquettes sous forme des cristaux de la résine durcie observées à la surface des fibres. En plus, nous remarquons une très bonne liaison entre les fibres et la matrice.



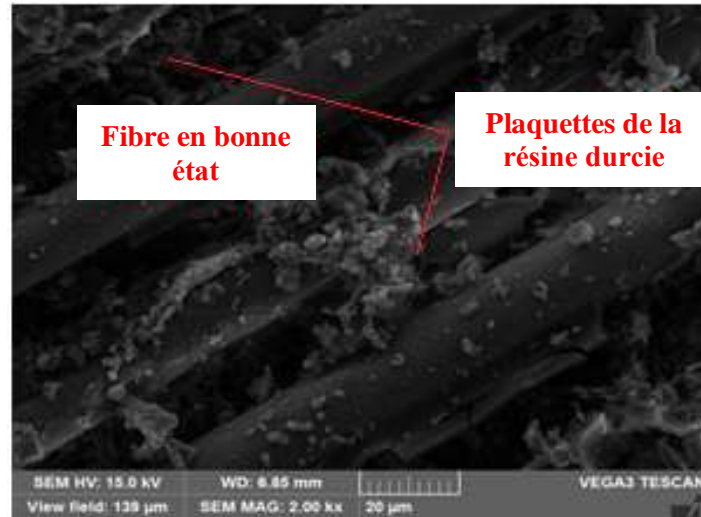
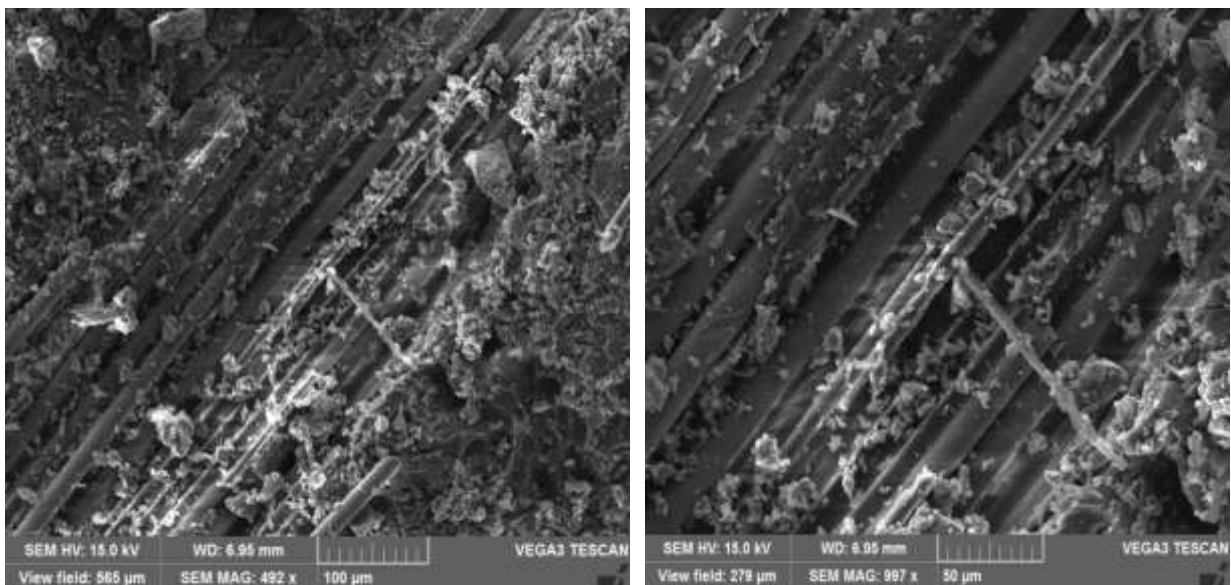


Figure (IV, 16): Observation MEB du PRV conservé dans l'eau potable.

c) Observation du PRV conservé dans l'eau de mer

La figure (IV, 17) illustre l'observation MEB des fibres de verre du PRV conservée dans l'eau de mer pendant 365 jours. Mêmes remarques précédentes, le dépôt des plaquettes de la résine durcie à la surface des fibres et entre leurs filaments. La liaison entre les fibres de verre et la matrice à un bon état. Les fibres sont un bon état, alors qu'on peut dire que les fibres sont protégées par la résine ou la résine est une matrice étanche. Par conséquent, la conservation à 365 jours dans le milieu humide et sulfatique n'a pas une influence sur le composite PRV. Finalement, ces résultats ne peuvent pas confirmer les résultats trouvés aux essais mécaniques et physiques.



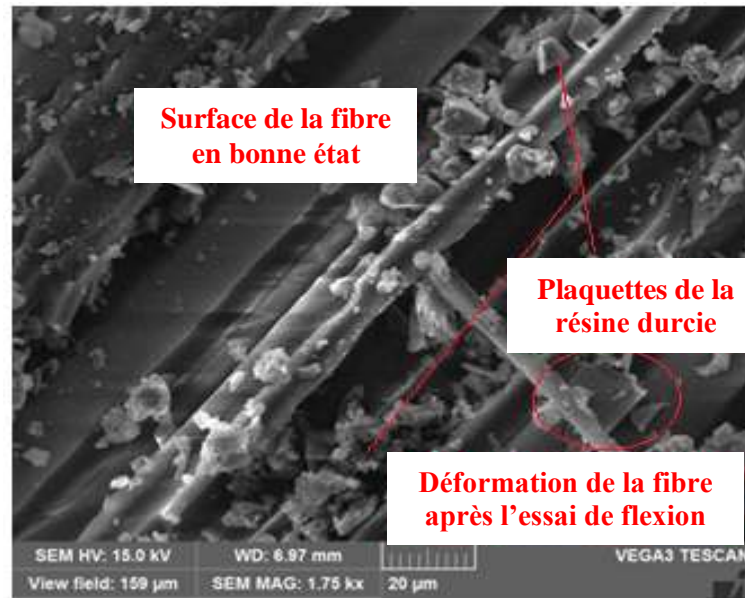


Figure (IV, 17): Observation MEB du PRV conservé dans l'eau de mer.

IV.4. Conclusion

On a conclu d'après ce chapitre que la contrainte à la rupture par traction axiale et à la flexion des spécimens en PRV conservés dans l'eau de mer est supérieure à celles des spécimens témoins conservés dans l'eau potable, sauf la déformation. En plus, malgré la conservation de PRV durant une année dans un milieu humide et sulfatique, on constate que la liaison entre les fibres et la matrice a un bon état, ou le milieu de conservation n'a aucune influence sur le composite PRV.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

1. Conclusion générale

L'évaluation de comportement du béton renforcé par de fibres de verre type AR immergé dans un milieu humide ou de l'eau potable est considérée comme premier objectif de notre étude. Cette dernière consiste à analyser l'influence de différents fractions volumiques de fibres pour différentes formulations du béton, en utilisant des fibres de verre type ARHP ou alcalis résistants haute performance. L'essentiel pointes a retenu après la caractérisation du BRFBV par des essais mécaniques (résistance à la compression et à la flexion), des essais physiques (perte de masse et l'absorption capillaires), et des essais chimiques (profondeur de carbonatation, DRX et MEB) sont ci-après:

- Le renfort du béton par le verre AR est considéré comme l'un des plus utilisés dans les recherches en génie civil, parce que ces fibres améliorent considérablement la durabilité du béton à long terme, lorsqu'elles sont utilisées avec le ciment développé faiblement alcalin et/ou des ajouts minéraux;
- Le béton renforcé par de fibres AR avait des propriétés mécaniques mieux que ceux du béton sans fibres, ainsi que les bonnes résistances à la compression et à la flexion enregistrés pour des fractions volumiques de 1% à 3%;
- On a obtenu que l'utilisation d'un taux de 3% de la fumée de silice et de 20% du laitier au BRFBV, peut améliorer ses caractéristiques dans le milieu humide, minimiser de la perméabilité du béton et protéger de la surface des fibres dans le milieu humide;
- Les dommages constatés à la surface de filaments des fibres conservés dans l'eau potable peuvent être causés à l'effet de contact entre les fibres et granulats lors du malaxage et de coulage du BRFBV des échantillons;
- La profondeur de carbonatation des spécimens témoins est nulle après 365 jours d'immersion dans l'eau potable, alors que cette dernière minimise la vitesse de la diffusion de gaz carbonique à l'intérieure des pores du BRFBV.

En outre, le second objectif de cette recherche consiste à étudier l'influence de sulfates des eaux de mer sur la durabilité du BRFBV de fibre ARHP. Après la phase de caractérisation du BRFBV par les mêmes essais mécaniques et physico-chimiques cités ci-après, nous avons conclu les points suivants:

Conclusion générale et perspectives

- Plusieurs dégradations ont été constaté sur le béton sous l'effet de la pénétration des agents agressifs à l'intérieure des pores du béton, soient: attaque par les sulfates, carbonatation du béton, corrosion des armatures du béton armé, effet de gel-dégel et l'attaque par une solution alcaline;
- L'eau de mer de la région de Jijel contient de forte teneur en sulfates et en chlorures, dont la concentration peut atteindre 1449mg/l en sulfates et 20346mg/l en chlorures. Selon les normes, ce type de l'eau est de haute salinité et elle est classée comme moyennement agressif;
- Les éprouvettes en BRFBV de ciment CRS conservées dans l'eau de mer, ont présenté des caractéristiques mécaniques acceptables comparativement au béton témoins et une pénétration des agents agressifs assez lente, ainsi qu'on enregistre des gains de résistance à la compression de 12%, 47%, 37% et 11% pour les éprouvettes T0, T1, T3 et T5 comparativement aux éprouvettes EM0, EM1, EM3 et EM5 respectivement, à l'âge de 365 jours. Sauf à l'essai de flexion, les échantillons EM0, EM1, EM3 et EM5 montrent des gains de résistance à la flexion de 52%, 53%, 51% et 27% comparativement aux éprouvettes T0, T1, T3 et T5 respectivement, à l'âge de 365 jours;
- Le renforcement du béton par des fibres de verre ARHP améliore les propriétés du béton; en plus, la conservation des éprouvettes en béton des fibres ARHP dans l'eau de mer n'influe pas sur la résistance à la flexion du béton;
- Début de corrosion est déjà remarquée à la surface des filaments de fibres due à l'agressivité du milieu de conservation (haute alcalinité);
- L'immersion du BRFBV dans l'eau de mer à une durée de 365 jours, qui diminue la vitesse de la diffusion de gaz carbonique à l'intérieure dans leur pores, soit la profondeur de carbonatation nulle.

Enfin, les points à retenir après la phase de caractérisation du PRV conservés dans différents milieux, par des essais physico-mécaniques comme à la traction, à la flexion et l'absorption d'eau, et par des essais chimiques tels que l'infrarouge et MEB, sont ci-après:

- Le polymère renforcé par des fibres de verre (PRV) est considéré comme un matériau stable chimiquement, mais généralement ce matériau peu utilisé dans le domaine maritime, parce que l'eau de mer peut influencer négativement sur leurs propriétés mécaniques à long terme;

- La conservation des plaques en PRV dans l'eau potable a montré une surélévation de contrainte à la rupture par traction maximale de 10%, un gain de 9% de contrainte à la rupture par flexion et d'une réduction de rigidité de l'ordre de 0,15% à l'âge de 365 jours par rapport aux éprouvettes témoins;
- L'immersion du PRV dans l'eau de mer de Jijel a montré une augmentation de contrainte à la rupture par traction de 14%, une surélévation de 10% de contrainte à la rupture par flexion et d'une régression de rigidité de l'ordre de 0,9% à l'âge de 365 jours comparativement au PRV témoin;
- La liaison entre les fibres de verre et la matrice du PRV reste en bon état, malgré ce matériau est conservé à une durée d'une année dans un milieu humide et sulfatique (eau de mer).

2. Recommandations et perspectives de recherches

D'après cette étude nous enregistrons que le renfort par des fibres de verre AR peut améliorer la durabilité du BRFV dans le milieu humide. Donc, pour compléter ce travail de recherche, nous recommandons ce qui suit:

- Tester l'évolution de déformation et le module de Young du BRFV conservé dans différents milieux jusqu'à l'âge de 365 jours;
- Protéger les faces de spécimens par l'utilisation soient: des matières étanches, couvrir les faces par des moules en matériaux stables chimiquement,...
- Etudier l'effet de température et du gel sur le BRFV de différentes fractions volumiques, des longueurs et de formes différents des fibres,....

En perspectives, nous proposons ce qui suit :

- Etudier l'effet de l'introduction d'autres ajouts minéraux dans la formulation du BRFV, soient : des cendres volantes silico-alumineuse, des pouzzolanes naturelles,....
- Etudier la durabilité du matériau PRV confectionné avec différents types de résines sous l'effet de l'humidité et les sulfates de l'eau de mer;
- Elargir la recherche sur les deux composites BRFV et PRV;
- Faire des simulations numériques sur le comportement du BRFV et du PRV immergés dans différents milieux.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Bentalha née Malou.M, «Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire. Caractérisation - comportement monotone - microstructure», thèse doctorat d'état, département de génie civil, faculté des sciences de l'ingénieur, université Mentouri de Constantine, 2007.
- [2] Boumehraz.M.A, «Contribution à l'étude de la durabilité des conduites en ciment et en PRV sous les eaux usées de la région de Ouargla», mémoire magistère, département de génie civil et d'hydraulique, faculté des sciences appliquées, université Kasdi Merbah d'Ouargla, 2014.
- [3] Boukli.H.S.M.A, Ghomari.F, Schoefs.F et Khelidj.A, «Etude expérimentale et statistique de l'influence de l'affaissement et de l'air occlus sur la résistance à la compression des bétons», Lebanese science journal, Vol 10, N° 2, 2009.
- [4] Baron.J et Ollivier.J.P, «La durabilité des bétons», Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université, 75007 Paris, 1992.
- [5] Zollo.R.F, «Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development», Cement and concrete composites, Vol 19, PP 107 - 122, 1997, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7).
- [6] Abdullah.M.M et Jallo.E.K, «Mechanical properties of glass fiber reinforced concrete», Al-Rafidain engineering, Vol 20, N° 5, 2012.
- [7] Bouketta.S et Bouchahm.Y, «L'effet de la géométrie urbaine sur l'écoulement du vent et la ventilation naturelle extérieure», Revue des énergies renouvelables, Vol 15, N° 4, PP 639 - 659, 2012.
- [8] Benhamouche.A, Nedjari.A, Bouhadad.Y, Machane.D, Oubaiche.E et Sidi-Said.N, «Field evidence of seismites in quaternary deposits of the Jijel (Eastern Algeria) coastal region», Journal of seismology, Vol 18, PP 289 - 299, 2014. DOI: 10.1007/s10950-013-9384-1.
- [9] Bakis.C.E, Bank.L.C, Brown.V.L, Cosenza.E, Davalos.J.F, Lesko.J.J, Machida.A, Rizkalla.S.H et Triantafillou.T.C, «Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review», Journal of composites for construction, PP 73 - 87, 2002.
- [10] Document technique, «Canalisation en PRV (FLOWTITE), présentation générale des tuyaux destinés à l'assainissement», APS France SAS, 2006.

- [11] Ramadoss.P et Nagamani.K, «Tensile strength and durability characteristics of high-performance fiber reinforced concrete», *The Arabian journal for science and engineering*, Vol 33, N° 2B, 2008.
- [12] Juarez.C, Duran.A, Valdez.P et Fajardo.G, «Performance of “Agave lecheguilla” natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions», *Building and environment*, Vol 42, PP 1151 - 1157, 2007, DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.12.005.
- [13] Hafad.S.A et Rashed.F.H, «Durability characteristics of concrete and reinforcing bars exposed to harsh environments», *Engineering and technology journal*, Vol 32, N°5, 2014.
- [14] Mahdi.R.S, «Experimental study effect of using glass fiber on cement mortar», *Journal of Babylon university, Engineering sciences*, Vol 22, N° 1, 2014.
- [15] Karbhari.V.M, Murphy.K et Zhang.S, «Effect of concrete based alkali solutions on short-term durability of E-glass/vinylester composites», *Journal of composite materials*, vol 36, No17, 2002, <https://doi.org/10.1177/0021998302036017977>.
- [16] Wen.J, «Some mechanical properties of typical polymer-based composites», *Physical properties of polymers handbook*, chapter 28, PP 487 - 495, 2007.
- [17] Gabrysiak.F, «Matériaux: les granulats, les bétons, chapitre 04», cours en ligne, académie de Nancy-Metz, France, <https://www.yumpu.com/fr/document/read/17207769/materiaux-les-granulats-academie-de-nancy-metz/2>.
- [18] Gastaldi.D, Canonico.F, Irico.S, Pellerej.D et Paganini.M.C, «Near-infrared spectroscopy investigation on the hydration degree of a cement paste», *Journal of material and science*, Vol 45, PP 3169 - 3174, 2010, DOI: 10.1007/s10853-010-4323-9.
- [19] Behim.M et Clastres.P, «Durabilité de pâtes de ciments contenant du laitier d'El Hadjar conservées dans des milieux agressifs et à des températures de climat chaud», séminaire international, innovation et valorisation en génie civil et matériaux de construction (INVACO2), Rabat - Maroc, 23-25 Novembre 2011.
- [20] Divet.L, «Les réactions sulfatiques internes au béton: contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'Ettringite», rapport technique, laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), Paris, 2001.
- [21] Gruyaert.E, Heede.P.V.D, Maes.M et Belie.N.D, «Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests», *Cement and concrete research*, Vol 42, PP 173 - 185, 2012, DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.09.009.

- [22] Kimberly.E.K et Monteiro.P, «Analysis of durability of advanced cementitious materials for rigid pavement construction in California», Rapport technique, université de California, 1999.
- [23] Double.D.D, Hellowell.A et Perry.S.J, «The hydration of Portland cement», Proceedings of the royal society of London, Vol 359, No 1699, PP 435 - 451, 1978, <https://doi.org/10.1098/rspa.1978.0050>.
- [24] Dolado.J.S, Griebel.M et Hamaekers.J, «A molecular dynamics study of cementitious calcium silicate hydrate (C-S-H) gels», N° 0701, Institute for numerical simulation, university of Bonn, Germany, 2007.
- [25] Abdullahi.M, «Effect of aggregate type on compressive strength of concrete», International journal of civil and structural engineering, Vol 2, No 3, PP 791 - 800, 2012, DOI:10.6088/ijcser.00202030008.
- [26] Tiwari.P, Chandak.R et Yadav.R.K, «Effect of salt water on compressive strength of mortar», International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development, Vol 2, N° 4, 2014.
- [27] Babu.G.R, Reddy.B.M et Ramana.N.V, «Quality of mixing water in cement concrete», Materials today: Proceedings, Vol 5, PP 1313 - 1320, 2018.
- [28] Chabi.S, Mezghiche.B et Guettala.H, «Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers», Courrier du savoir, N°05, PP 03-08, 2004.
- [29] Boutiba.A, Chaid.R, Jauberthie.R et Molez.L, «Murissement des BHPF avec ajout de laitier dans les milieux sulfatés», Congrès de l'expérimentation à la modélisation en génie civil, Cachan, France, May 2013.
- [30] Messaoudene.I, Jauberthie.R, Molez.L, Rangeard.D et Naceri.A, «Effet des fillers de laitier et marbre sur la durabilité des ciments Portland dans des environnements de sulfate», XXX^e rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, France, 6 - 8 juin 2012.
- [31] Eštoková.A et Kovalčíková.M, «Effectiveness of addition of silica fume as a waste material on durability of cement composites», the 9th international conference environmental engineering, Vilnius, Lithuania, 22 - 23 May 2014.
- [32] Benachour.Y, Skoczylas.F et Houari.H, «Etude expérimentale des mortiers fortement chargés en fillers calcaires», Sciences and technologie B, Vol 28, PP 53-59, 2008.

- [33] Harini.P.A, Kumar.H.G.A, Kumar.G.P et Neeta.S, «An overview of immunologic adjuvant», *Journal of vaccines and vaccination*, Vol 04, N° 01, 2013, DOI: 10.4172/2157-7560.1000167.
- [34] Apostólico.J.D.S, Lunardelli.V.A.S, Coirada.F.C, Boscardin.S.B et Rosa.D.S, «Adjuvants: classification, modus operandi, and licensing», *Journal of immunology research*, Hindawi Publishing Corporation, 2016, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1459394>.
- [35] Mechkouri.M et Guettala.A, «Effet de l'agent entraîneur d'air sur la résistance des bétons exposés aux cycles gel-dégel», *Annales de la faculté des sciences et sciences de l'ingénieur*, Vol 1, N° 4, PP 36 - 45, 2009.
- [36] Šiler.P, Kolářová.I, Krátký.J, Havlica.J et Brandštetr.J, «Influence of superplasticizers on the course of Portland cement hydration», *Chemical papers*, Vol 68, N°1, PP 90 - 97, 2014.
- [37] Sylovanyuk.V.P, Yukhym.R.Y, Lisnichuk.A.E et Ivantyshyn.N.A, «Computational model of the tensile strength of fiber-reinforced concrete», *Materials science*, Vol 51, No 3, PP 340 - 348, 2015, DOI: 10.1007/s11003-015-9847-3.
- [38] Jevtić.D, Zakić.D et Savić.A, «Modeling of properties of fiber reinforced cement composites», *Architecture and civil engineering*, Vol 6, No 2, PP 165 - 172, 2008, DOI:10.2298/FUACE0802165J.
- [39] Zheng.Z et Feldman.D, «Synthetic fiber-reinforced concrete», *Progress in polymer science*, Vol 20, N° 2, PP 185 - 210, 1995, [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(94\)00030-6](https://doi.org/10.1016/0079-6700(94)00030-6).
- [40] Zeng-Qiang.S et Chung.D.D.L, «Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion», *Cement and concrete research*, Vol 29, PP 435 - 439, 1999, DOI:10.1016/S0008-8846(98)00204-X
- [41] Kakooei.S, Akil.H.M, Jamshidi.M et Rouhi.J, «The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures», *Construction and building materials*, Vol 27, PP 73 - 77, 2012, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.015.
- [42] Kurt.H, «Le béton de fibres synthétiques», *Bulletin du ciment*, Aout 1992.
- [43] Kordkheili.H.Y, Shehni.S.E et Niyatzade.G, «Effect of carbon nanotube on physical and mechanical properties of natural fiber/glass fiber/cement composites», *Journal of forestry research*, 2013, DOI 10.1007/s11676-014-0516-4.
- [44] Setti.B, Taazount.M, Hammoudi.S, Setti.F et Achit-Henni.M, «Compressive, flexural and abrasive performances of steel fiber reinforced concrete elements», *International journal*

of mechanical engineering and applications, Vol 1, N° 3, PP 69 - 77, 2013, DOI: 10.11648/j.ijmea.20130103.12.

[45] «History of fiberglass», document technique, Latham pool products, behind every pool since, North America, 1956.

[46] Bagherpour.S, «Chapter 6: Fiber reinforced polyester composites», Polyester, PP 135 - 166, 2012.

[47] Kanag.S.Y, Anandan.Y.K, Vaidyanath.P et Baskar.P, «Strength properties of coated E-glass fibers in concrete», Građevinar, Vol 68, N° 9, PP 697 - 703, 2016, <https://doi.org/10.14256/JCE.1335.2015>.

[48] Naaman.A.E, «High performance fiber reinforced cement composites: classification and applications», CBM-CI international workshop, Karachi, Pakistan, PP 389 - 401, 2007.

[49] Enfedaque.A, Paradela.L.S et Sánchez-Gálve.V, «An alternative methodology to predict aging effects on the mechanical properties of glass fiber reinforced cements (GRC)», Construction and building materials, Vol 27, N° 1, PP 425 - 431, 2012, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.025.

[50] Lipatov.Y.V, Gutnikov.S.I, Manylov.M.S, et Lazoryak.B.I, «Effect of ZrO₂ on the alkali resistance and mechanical properties of basalt fibers», Inorganic materials, Vol 48, N° 7, PP 751 - 756, 2012.

[51] Kolesov.Y.I, Kudryavtsev.M.Y et Mikhailenko.N.Y, «Types and compositions of glass for production of continuous glass fiber», Glass and ceramics, Vol 58, N° 5 - 6, PP 197 - 202, 2001.

[52] Benmoktane.B, Chaallalt.O et Masmoudi.R, «Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures», Construction and building materials, Vol 9, N° 6, PP 353-364, 1995.

[53] Hempel.S, Butler.M, Kratz.M, Scheffler.C et Plonka.R, «Improvement of bond behaviour and durability of AR glassfibre reinforced concrete by polymer-fibre coatings», Prague, 2008.

[54] Arabi.N, Redjel.B et Jauberthie.R, «Influence des milieux de conservation sur la tenue des fibres de verre alcali-résistant dans une matrice cimentaire (CEM II/B 32,5R)», Annales du bâtiment et des travaux publics, PP 19 - 24, 2005.

[55] Shakor.P.N et Pimplikar.S.S, «Glass fibre reinforced concrete use in construction», International journal of technology and engineering system, Vol 2, N° 2, 2011.

[56] İskender.M et Karasu.B, «Glass fibre reinforced concrete (GFRC)», El-cezerî journal of science and engineering, Vol 5, N° 1, PP 136 - 162, 2018, DOI:10.31202/ecjse.371950.

- [57] Neal.W, «Glass fiber reinforced concrete (GFRC)», The construction specifier, PP 20 - 32, 1977.
- [58] Bartos.P.J.M, «Glass fiber reinforced concrete», Materials science and engineering, Vol 246, N° 1, 2017, DOI:10.1088/1757-899X/246/1/012002.
- [59] Arabi.N, «Contribution à l'étude du comportement mécanique du composite ciment-verre et durabilité des fibres de verre», thèse doctorat d'état, département de génie civil, faculté des sciences de l'ingénieur, université d'Annaba, 2006.
- [60] Barhum.R et Mechtcherine.V, «Influence of short dispersed and short integral glass fibres on the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete», Materials and structures, Vol 46, PP 557 - 572, 2013, DOI 10.1617/s11527-012-9913-3.
- [61] Majumdar.A.J, «Glass fibre reinforced cement and gypsum products», Proceedings of the royal society of London, Vol 319, N° 1536, PP 69-78, 1970.
- [62] Gornale.A, Quadri.S.I, Quadri.S.M, Akram Ali.S.M.A et Hussaini.S.S, «Strength aspects of glass fibre reinforced concrete», International journal of scientific and engineering research, Vol 3, N° 7, 2012.
- [63] Belaribi.H, «L'évaluation de la qualité du béton de fibres in situ par les essais non destructifs (méthode combinée ultrason et scléromètre)», mémoire magistère, département de génie civil, faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur, université Mohamed Khider - Biskra, 2007.
- [64] Nibin.M et Kumar.A, «Strengthening of reinforced concrete beam using glass fiber reinforced polymer composites», International journal of engineering science and computing, Vol 7, N° 1, 2017.
- [65] Abbas.Y.M et Khan.M.I, «Fiber-matrix interactions in fiber-reinforced concrete», Arabian journal for science and engineering, Vol 41, PP 1183 - 1198, 2016, DOI 10.1007/s13369-016-2099-1.
- [66] Arabi.N, Jauberthie.R, Oucief.H et Redjel.B, «Comportements statique et cyclique des matrices cimentaires renforcées de fibres de verre», Annales du bâtiment et des travaux publics, matériaux de construction, PP 16 - 22, 2012.
- [67] Kiran.T.S, «Comparision of split tensile strength and flexural of glass fiber reinforced concrete with conventional concrete», International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD), Vol 06, N° 02, PP 35 - 42, 2016.

- [68] Carnevale.P, Rasool.S et Bersee.H.E.N, «Fibre–matrix interfaces in carbon fibre reinforced PPS composites: damage initiation and propagation in tensile tests», *Composite interfaces*, Vol 21, N° 4, PP 337 - 352, 2014, <https://doi.org/10.1080/15685543.2014.877288>.
- [69] Douglas.N.M.A, «Modélisation du comportement mécanique des composites ciment-fibres en tenant compte de la microstructure», Thèse doctorat, Institut national de sciences appliquées de Lyon, France, 1997.
- [70] Purnell.P, Short.N.R et Page.C.L,«A static fatigue model for the durability of glassfibre reinforced cement», *Journal of materials science*, Vol 36, PP 5385 - 5390, 2001.
- [71] Huang.J, ASCE.S.M, Aboutaha.R et ASCE.M, «Environmental reduction factors for GFRP bars used as concrete reinforcement: new scientific approach», *Journal of composites for construction*, Vol 14, No 5, PP 479 - 486, 2010, DOI: 10.1061/ASCECC.1943-5614.0000122.
- [72] Butler.M, Mechtcherine.V et Hempel.S, «Durability of textile reinforced concrete made with AR glassfibre: effect of the matrix composition», *Materials and structures*, Vol 43, N° 10, PP 1351 - 1368, 2010, DOI:10.1617/s11527-010-9586-8.
- [73] Qian.X, Shen.B, Mu.B et Li.Z, «Enhancement of aging resistance of glass fiber reinforced cement», *Materials and structures*, Vol 36, N° 5, PP 323 - 329, 2003, DOI:10.1007/BF02480872.
- [74] Naik.N.N, Jupe.A.C, Stock.S.R, Wilkinson.A.P, Lee.P.L et Kurtis.K.E, «Multi-mode x-ray study of sodium and magnesium sulfate attack on portland cement paste», *The international center for diffraction data (ICDD)*, ISSN 1097-0002, PP 63 - 72, 2006.
- [75] Amin.M.M, Jamaludin.S.B, Pa.F.C et Chuen.K.K, «Effects of magnesium sulfate attack on ordinary Portland cement (OPC) mortars», *Portugaliae electrochimica acta*, Vol 26, N° 2, PP 235 - 242, 2008, DOI:10.4152/pea.200802235.
- [76] Bassuoni.M.T et Nehdi.M.L, «Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading», *Cement and concrete research*, Vol 39, N° 03, PP 206- 226, 2009, DOI:10.1016/j.cemconres.2008.12.003.
- [77] Suleiman.A.R, Soliman.A.M et Nehdi.M.L, «Effect of surface treatment on durability of concrete exposed to physical sulfate attack», *Construction and building materials*, Vol 73, PP 674 - 681, 2014, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.006.
- [78] Jalal-uddin.M et Quayyum.M, «Influence of calcium sulphate on cement motor and characteristics behaviour at different proportions», *International journal of computational engineering research*, Vol 2, N° 6, PP 192 - 200, 2012.

- [79] Bonakdar.A et Mobasher.B, «Multi-parameter study of external sulfate attack in blended cement materials», *Construction and building materials*, Vol 24, N° 01, PP 61 - 70, 2009, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.009.
- [80] Maes.M, Gruyaert.E et Belie.N.D, «Resistance of concrete against combined attack of chlorides and sulphates», *International congress on durability of concrete*, Belgium, PP 1 - 14, 2012.
- [81] Prasad.J, Jain.D.K et Ahuja.A.K, «Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar», *Asian journal of civil engineering (Building and housing)*, Vol 7, N° 03, PP 259 - 268, 2006.
- [82] Hime.W.G et Mather.B, «“Sulfate attack,” or is it?», *Cement and concrete research*, Vol 29, PP 789 - 791, 1999.
- [83] Cefis.N et Comi.C, «Damage modelling in concrete subject to sulfate attack», *Frattura ed integrità strutturale (fracture and structural integrity)*, Vol 29, PP 222 - 229, 2014, DOI: 10.3221/IGF-ESIS.29.19.
- [84] Baoguo.Ma, Wang.Y et Fu.H, «Effect of rice husk ash on the thaumasite form of sulfate attack of cement-based materials», *Arabian journal for science and engineering*, Vol 39, N° 12, PP 8517 – 8524, 2014, DOI: 10.1007/s13369-014-1414-y.
- [85] Guang-cheng.L, Xie.Y.J, De-hua.D et Xiao-kun.L, «Deterioration of concrete in railway tunnel suffering from sulfate attack», *Journal of central south university of technology*, Vol 18, N° 03, PP 881 - 888, 2011, DOI: 10.1007/s11771-011-0777-4.
- [86] Brown.P.W et Badger.S, «The distributions of bound sulfates and chlorides in concrete subjected to mixed NaCl, MgSO₄, Na₂SO₄ attack», *Cement and concrete research*, Vol 30, N° 10, PP 1535 - 1542, 2000.
- [87] Bakharev.T, «Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions», *Cement and concrete research*, Vol 35, N° 06, PP 1233 - 1246, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.002>.
- [88] Pelletier-Chaignat.L, Winnefeld.F, Lothenbach.B, Saout.G.L, Müller.C.J et Famy.C, «Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement–calcium sulphotoaluminate clinker–calcium sulphate binders», *Cement and concrete composites*, Vol 33, N° 05, PP 551- 561, 2011, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.03.005.
- [89] Hasan.A.T et Taha.S, «The effect of sulfate on the electrical properties of cement pastes», *World applied sciences journal*, Vol 19, N°7, PP 957 - 961, 2012, DOI:10.5829/idosi.wasj.2012.19.07.2779.

- [90] Bouraoui.S, «Effet des sulfates alcalins sur les propriétés des ciments avec et sans superplastifiant», mémoire de maîtrise en génie civil, université de Sherbrooke, Canada, 1997.
- [91] Benmounah.A, Kheribet.R, Samar.M et Saidi.M, «Comportement rhéologique des pâtes cimentaires destinées aux bétons autoplaçants», Revue nature et technologie, N° 01, PP 74 - 88, 2009.
- [92] Horkoss.S, «Influence du SO₃ dans le clinker sur la durabilité du béton: attaque sulfatique», Thèse doctorat, département de chimie, faculté des sciences, université saint Joseph de Beyrouth, 2011.
- [93] Hadlocon.L.J et Lingying.Z, «Production of ammonium sulfate fertilizer using acid spray wet scrubbers», Agricultural engineering international, PP 41 - 51, 2015.
- [94] Mbessa.M et Pera.J, «Durability of high-strength concrete in ammonium sulfate solution», Cement and concrete research, Vol 31, N° 08, PP 1227 - 1231, 2001, DOI:10.1016/S0008-8846(01)00553-1.
- [95] Messaoudene.I, Jauberthie.R, LMolez.L, Rangeard.D et Naceri.A, «Effect of Industrial By products Fillers on the Properties of Blended Cements in Sulphate Environments», 10th International congress on advances in civil engineering, middle east technical University, Ankara, Turkey, 17 - 19 October 2012.
- [96] Dera.N.S, Fatra.F, Ivanto.G, Muryanto.S et Bayuseno.A.P, «Phase analysis and crystal morphology of barium sulphate precipitated from the laminar flowing water», Materials science and engineering, Vol 202, 2017, DOI: 10.1088/1757-899X/202/1/012029.
- [97] Lanzon.M et Garcia-Ruiz.P.A, «Deterioration and damage evaluation of rendering mortars exposed to sulphuric acid», Materials and structures, Vol 43, N° 03, PP 417 - 427, 2010, DOI:10.1617/s11527-009-9500-4.
- [98] Chalupecky.V, Tasnim.F et Muntean.A, «Multiscale sulfate attack on sewer pipes: numerical study of a fast micro-macro mass transfer limit», Journal of math-for-industry, Vol 2, PP 171 - 181, 2010.
- [99] Lee.S.T, «Performance of mortars exposed to different sulfate concentrations», KSCE Journal of civil engineering, Vol 16, N° 4, PP 601-609, 2012, DOI: 10.1007/s12205-012-1054-2.
- [100] Tosun-Felekoglu.K, «The effect of C3A content on sulfate durability of Portland limestone cement mortars», Construction and building materials, Vol 36, PP 437 - 447, 2012, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.091.

- [101] Monteiro.P.J.M et Kurtis.K.E, «Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack», *Cement and concrete research*, Vol 33, N° 07, PP 987 - 993, 2003, DOI:10.1016/S0008-8846(02)01097-9.
- [102] Berndt.M.L, «Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate», *Construction and building materials*, Vol 23, N° 07, PP 2606 - 2613, 2009, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011.
- [103] Wawrzenczyk.J, Molendowska.A et Klak.A, «Effect of ground granulated blast furnace slag and polymer microspheres on impermeability and freeze-thaw resistance of concrete», *Procedia engineering*, Vol 161, PP 79 - 84, 2016, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.501.
- [104] Schuldyakov.K.V, Kramar.L.Y et Trofimov.B.Y, «The properties of slag cement and its influence on the structure of the hardened cement paste», *Procedia engineering*, Vol 150, PP 1433 - 1439, 2016, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.202.
- [105] Özbay.E, Erdemir.M et Durmus.H.I, «Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties», *Construction and building materials*, Vol 105, PP 423 - 434, 2016, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153.
- [106] Pan.C, Ling.M, Wei.D, Geng.J, Mao.J et Jin.W, «Effect of modified supplementary cementitious material on performance of mortar and concrete in marine environment», *Journal of shanghai jiaotong university (Science)*, Vol 22, N° 5, PP 541- 548, 2017.
- [107] Gupta.S, «Effect of content and fineness of slag as high volume cement replacement on strength and durability of ultra-high performance mortar», *Journal of building materials and structures*, Vol 03, N° 02, PP 43 - 54, 2016, DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.242626>.
- [108] Sadati.S, Moradllo.M.K et Shekarchi.M, «Long-term performance of silica fume concrete in soil exposure of marine environments», *Journal of materials in civil engineering*, Vol 29, N° 9, 2017, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001962](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001962).
- [109] Chi.J.M, Huang.R et Yang.C.C, «Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method», *Journal of marine science and technology*, Vol 10, N° 01, PP 14 - 20, 2002.
- [110] Houst.Y.F, «The role of moisture in the carbonation of cementitious materials», *Internationale zeitschrift für bauinstandsetzen* 2, Jahrgang, Heft 1, PP 49 - 66, 1996.
- [111] Boualleg.S, Bencheikh.M, Belagraa.L, Daoudi.A et Chikouche.M.A, «The combined effect of the initial cure and the type of cement on the natural carbonation, the portlandite content, and non-evaporable water in blended cement», *Advances in materials science and engineering*, 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/5634713>.

- [112] Muntean.A et Böhm.M, «A moving-boundary problem for concrete carbonation: global existence and uniqueness of weak solutions», *Journal of mathematical analysis and applications*, Vol 350, N° 1, PP 234 - 251, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2008.09.044>.
- [113] Mmusi.M.O, Alexander.M.G et Beushausen.H.D, «Determination of critical moisture content for carbonation of concrete», *Concrete repair, rehabilitation and retrofitting II*, PP 359 - 364, Taylor and Francis group, London, 2009.
- [114] El-Hassan.H et Shao.Y, «Carbon storage through concrete block carbonation curing», *Journal of clean energy technologies*, Vol 2, N° 3, PP 287 - 291, 2014, DOI:10.7763/JOCET.2014.V2.141.
- [115] Tian.L, Chen.J et Zhao.T, «Durability of lining concrete of subsea tunnel under combined action of freeze-thaw cycle and carbonation», *Journal of Wuhan university of technology-materials science edition*, Vol 27, N° 4, PP 779 - 782, 2012, DOI: 10.1007/s11595-012-0547-7.
- [116] Czarnecki.L et Woyciechowski.P, «Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space?», *Bulletin of the polish academy of sciences, technical sciences*, Vol 63, No 01, PP 43 - 54, 2015, DOI: 10.1515/bpasts-2015-0006.
- [117] Jansson.H, Snibb.R, Bohlin.K et Löfgren.I, «Carbonation of concrete with mineral additions», *Proceedings of XXIII Nordic concrete research symposium, Denmark*, 2017.
- [118] Ruixia.H, «A study on carbonation for low calcium fly ash concrete under different temperature and relative humidity», *Electronic journal of geotechnical engineering*, Vol 15, PP 1871 - 1877, 2010.
- [119] Sadati.S, Ghassemzadeh.F et Shekarchi.M, «Effect of silica fume on carbonation of reinforced concrete structures in Persian gulf region», *6th International conference on concrete under severe conditions- environment and loading (CONSEC)*, 2010.
- [120] Mohammed.T.U, Hidenori.H, Hasnat.A et Al-Mamun.M.A, «Corrosion of steel bars in concrete with the variation of microstructure of steel-concrete interface», *Journal of advanced concrete technology*, Vol 13, PP 230 - 240, 2015, DOI:10.3151/jact.13.230.
- [121] Loreto.G, Benedetti.M.D, Iovino.R, Nanni.A et Gonzalez-Nunez.M.A, «Evaluation of corrosion effect in reinforced concrete by chloride exposure», *Proceedings of SPIE, The international society for optical engineering*, 2011.
- [122] Fabbri.A, Fen-Chong.T, Coussy.O et Azouni.A, «Comportement au gel-dégel d'une structure en ciment», *18^{ème} congrès français de mécanique*, Grenoble, 27 - 31 Août 2007.

- [123] Farny.J.A et Kosmatka.S.H, «Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete», American concrete pavement association, 5420 old orchard road, suite A100, Skokie, Illinois, 1997.
- [124] Smaoui.N, Bérubé.M.A, Fournier.B, Bissonnette.B et Durand.B, «Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction», Canadian journal of civil engineering, Vol 31, N° 5, PP 826 - 845, 2004, DOI: 10.1139/104-051.
- [125] Brykov.A.S, Danilov.V.V et Mokeev.M.V, «Effect of alkali cations on silicon ability to bind in cement stone by data of solid-state ²⁹Si NMR spectroscopy», Russian journal of applied chemistry, Vol 85, N° 5, PP 716 - 721, 2012, DOI: 10.1134/S1070427212050059.
- [126] Wigum.B.J, Pedersen.L.T, Grelk.B et Lindgard.J, «State-of-the art report: key parameters influencing the alkali aggregate reaction», rapport technique, SINTEF building and infrastructure, 2006.
- [127] Zivica.V et Bajza.A, «Acidic attack of cement-based materials—a review part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures», Construction and building materials, Vol 16, N° 4, PP 215 - 222, 2002, DOI: 10.1016/S0950-0618(02)00011-9.
- [128] Andalib.R, Mzaimi.A.M, Keyvanfar.A, Talaiekhazan.A, Hussin.M.W, Shafaghat.A, Rosli.M.Z, LEE.C.T, Fulazzaky.M.A et Hasrul.H.I, «Durability improvement assessment in different high strength bacterial structural concrete grades against different types of acids», Indian academy of sciences, Vol 39, N° 6, PP 1509 - 1522, 2014.
- [129] Rashad.A.M, «A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali - activated slag - a guide for civil engineer», Construction and building materials, Vol 47, PP 29 - 55, 2013, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.011.
- [130] Berube.M.A, Dorion.J.F, Duchesne.J, Fournier.B et Vezina.D, «Laboratory and field investigations of the influence of sodium chloride on alkali - silica reactivity», Cement and concrete research, Vol 33, N° 01, PP 77 - 84, 2003.
- [131] Peled.A, Jones.J et Shah.S.P, «Effect of matrix modification on durability of glass fiber reinforced cement composites», Materials and structures, Vol 38, PP 163 - 171, 2005, DOI: 10.1617/14091.
- [132] Cosenza.E, Manfredi.G et Realfonzo.R, «Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete», Journal of composites for construction, Vol 01, N° 02, PP 40 - 51, 1997, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1997\)1:2\(40\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1997)1:2(40)).

- [133] Benzaid.R, «Contribution à l'étude des matériaux composite dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton», thèse doctorat en sciences, département de génie civil, faculté des sciences de l'ingénieur, université Mentouri de Constantine, 2010.
- [134] Carra.G et Carvelli.V, «Ageing of pultruded glass fibre reinforced polymer composites exposed to combined environmental agents», *Composite structures*, Vol 108, PP 1019 - 1026, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.042>.
- [135] Adrian.P.P et Gheorghe.B.M, «Manufacturing process and applications of composite materials», *Annals of the oradea university, Fascicle of management and technological engineering*, Vol IX, N° XIX, 2010.
- [136] Document technique, «Glossaire des matériaux composites», Centre d'animation régional en matériaux avances (CARMA), 2004.
- [137] Liu.Q, Xue.Z, Liu.Z, Gao.H, Zhang.R, Li.W, Du.Z et Yang.D, «Chapter 2: industrial polymer matrix composites and fiber-glass-reinforced plastics», *Composite materials engineering*, Volume 2, PP 165 - 305, 2018.
- [138] Chalmers.D.W, «The potential for the use of composite materials in marine structures», *Marine structures*, Vol 7, PP 441 - 456, 1994, [https://doi.org/10.1016/0951-8339\(94\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0951-8339(94)90034-5).
- [139] Frederick.T.W, Watson.J.C et Hong.L, «Glass fibers», *Composites*, Vol 21, PP 28 - 35, 2001.
- [140] Kavadi.B.V, Pandey.A.B, Tadavi.M.V et Jakharia.H.C, « A review paper on effects of drilling on glass fiber reinforced plastic», *Procedia Technology*, Vol 14, PP 457-464, 2014, DOI: 10.1016/j.protcy.2014.08.058.
- [141] Micelli.F et Nanni.A, «Durability of FRP rods for concrete structures», *Construction and building materials*, Vol 18, PP 491 - 503, 2004, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.012.
- [142] Chen.Y, Davalos.J.F, Ray.I et Kim.H.Y, «Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures», *Composite structures*, Vol 78, N° 01, PP 101-111, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.08.015>.
- [143] Silva.M.A.G, da Fonseca.B.S et Biscaia.H, «On estimates of durability of FRP based on accelerated tests», *Composite structures*, Vol 116, PP 377 - 387, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.022>.
- [144] Kim.H.Y, Park.Y.H, You.Y.J et Moon.C.K, «Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions», *Composite structures*, Vol 83, PP 37 - 47, 2008, DOI: 10.1016/j.compstruct.2007.03.005.

- [145] Ray.B.C et Rathore.D, «Durability and integrity studies of environmentally conditioned interfaces in fibrous polymeric composites: critical concepts and comments», *Advances in colloid and interface science*, Vol 209, PP 68-83, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.12.014>.
- [146] Mouzakis.D.E, Zoga.H et Galiotis.C, «Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs)», *composites: part B Engineering*, Vol 39, PP 467 - 475, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.10.004>.
- [147] Garcia-Espinel.J.D, Castro-Fresno.D, Gayo.P.P et Ballester-Muñoz.F, «Effects of sea water environment on glass fiber reinforced plastic materials used for marine civil engineering constructions», *Materials and design*, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.032>.
- [148] Wang.Z, Zhao.X.L, Xian.G, Wu.G, Raman.R.K.S, Al-Saadi.S et Haque.A, «Long-term durability of basalt- and glass-fibre reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment», *Construction and building materials*, Vol 139, PP 467 - 489, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.038>.
- [149] Aldajah.S, Alawsi.G et Abdul Rahmaan.S, «Impact of sea and tap water exposure on the durability of GFRP laminates», *Materials and design*, Vol 30, PP 1835 - 1840, 2009, DOI: 10.1016/j.matdes.2008.07.044.
- [150] Poodts.E, Minak.G et Zucchelli.A, «Impact of sea-water on the quasi static and fatigue flexural properties of GFRP», *Composite structures*, Vol 97, PP 222 - 230, 2013, DOI10.1016/j.compstruct.2012.10.021.
- [151] Céline.Z.M, «Synthèse de matériaux composites par Co-broyage en voie sèche, caractérisations des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux», thèse de doctorat, génie des procédés et environnement, institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [152] Shah.S.P, Ludirdja.D, Daniel.J.I et Mobasher.B, «Toughness-Durability of glass fiber reinforced concrete systems», *ACI materials journal*, Vol 85, PP 352 - 360, 1988.
- [153] Shah.S.P, Daniel.J.I et Ludirdja.D, «Toughness of glass fiber reinforced concrete panels subjected to accelerated aging», *Precast concrete institute journal*, Vol 32, PP 82 - 99, 1987, <https://doi.org/10.15554/pcij.09011987.82.99>.
- [154] Marikunte.S, Aldea.C et Shah.S.P, «Durability of glass fiber reinforced cement composites: Effect of silica fume and metakaolin», *Advanced cement-based materials*, Vol 5, PP 100 - 108, 1997, [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00003-5).
- [155] Arabi.N, «Influence of curing conditions on durability of alkali-resistant glass fibres in cement matrix», *Bulletin of materials science*, Vol 34, N° 4, PP 775 - 783, 2011.

- [156] Arabi.N, Molez.L et Rangeard.D, «Durability of alkali-resistant glass fibers reinforced cement composite: microstructural observations of degradation», *Periodica polytechnic civil engineering*, 2018, <https://doi.org/10.3311/PPci.10631>.
- [157] Fiche technique, «Ciment pour béton en milieux agressifs, CEM I 52.5 N-ES-NA443», Usine de Lafarge, M'sila-Algérie.
- [158] Norme NF P 18-506, «Additions pour béton hydraulique - Laitier vitrifié moulu de haut-fourneau», Editée par Afnor, Paris, Mars 1992.
- [159] Norme NF P 18-502, «Additions pour béton hydraulique - Fumées de silice», Editée par Afnor, Paris, Mai 1992.
- [160] Fiche technique, «Fumée de silice densifiée mécaniquement pour bétons hautes performances et haute durabilité», Usine de Sika, Alger.
- [161] Norme NF EN 934-2, «Adjuvants pour bétons, mortier et coulis, Partie 2: adjuvants pour béton (définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage)», Editée par Afnor, Paris, Avril 1998.
- [162] Fiche technique, «Adjuvants superplastifiant TEKSUPERFLOW 2000 R», Société TEKNACHEM ALGERIE SARL, Zone Industrielle de Sidi-Bel-Abbès, Algérie, 2016.
- [163] Fiche technique, «Fibres de verre alkali résistant (ARHP)», Société Comercial Coll Vila. Rue Aiguafreda, 14, nau 2, Parc l'Ametlla, 08480 l'Ametlla del Vallès, Barcelone, Espagne; 2018.
- [164] Norme française NF P 18-553, «Granulats, préparation d'un échantillon pour essai», Editée par Afnor, Paris, Septembre 1990.
- [165] Maubert.F, «Les granulats», BRGM, Centre scientifique et technique, B.P.6009-45060, Orléans cedex 2, France, 1989.
- [166] Norme française XP P 18-303, «Eau de gâchage pour béton», Editée par Afnor, Paris, Août 1999.
- [167] Dreux.G et Festa.J, «Nouveau guide du béton et de ses constituants», Editions EYROLLES, huitième édition, Paris, 1998.
- [168] Bentalha.M et Houari.H, «Étude du comportement des matrices cimentaires renforcées de fibres métalliques sous chargement monotone croissant», *Sciences and technologie B*, N°25, PP 51 - 58, Juin 2007.
- [169] Bouzidi.A, Ghrici.M et Brahma.A, «Elaboration d'un béton à haute performances à partir de matériaux locaux», *Algérie équipement, matériaux*, N°16, 1994.

- [170] André.L et Zennir.A, «Modèle de suspension solide et formulation de béton calcaires en Lorraine», Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, PP 41-52, 1997.
- [171] Hadj Sadok.A, Foudhil.C.I et Si-Tayeb.S, «Méthode simplifiée de formulation d'un béton à haute performance avec et sans fibre métallique», MATEC Web of Conférences 11, 2014.
- [172] Norme NF P 18-427, «Béton, détermination des variations dimensionnelles entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci», Editée par Afnor, Paris, Décembre 1996.
- [173] Norme NF EN 12390-1, «Essai pour béton durci, Partie 1: Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules», Editée par Afnor, Paris, Octobre 2001.
- [174] Norme NF P18-404, «Béton, essai d'étude, de convenance et de contrôle, confection et conservation des éprouvettes», Editée Afnor, Paris, Décembre 1981.
- [175] Norme NF EN 15422, «Produits préfabriqués en béton, Spécification des fibres de verre destinées au renforcement des mortiers et des bétons», Editée par Afnor, Paris, Juin 2008.
- [176] Islam.M.M, Islam.M.S, Mondal.B.C et Islam.M.R, «Strength behavior of concrete using slag with cement in sea water environment», Journal of civil engineering, Vol 38, N° 2, PP 129 - 140, 2010.
- [177] Liu.P.C, «Damage to concrete structures in a marine environment», Materials and structures, Vol 24, PP 302 - 307, 1991, DOI: 10.1007/BF02472086.
- [178] Norme NF P 18-011, «Bétons, Classification des environnements agressifs», Editée par Afnor, Paris, Juin 1992.
- [179] Norme NF EN 12390-2, «Essai pour béton durci, Partie 2: confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance», Editée par Afnor, Paris, Octobre 2001.
- [180] Norme NF P 18-452, «Béton, Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres», Editée par Afnor, Paris, Mai 1988.
- [181] Norme NF P 18-451, «Béton, essai d'affaissement», Editée par Afnor, Paris, Décembre 1981.
- [182] Norme NF EN 12390-3, «Essai pour béton durci, Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes», Editée par Afnor, Paris, Février 2003.
- [183] Norme NF P 18-407, «Béton, essai de flexion», Editée par Afnor, Paris, Décembre 1981.
- [184] Norme NF EN 1925, «Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité», Editée par Afnor, Paris, Juillet 1999.
- [185] Gorisse.F, «Essais et contrôles des bétons», PP 102 - 103, Editions Eyrolles, Paris, 1978.

- [186] Strait.L.H, Karasek.M.L et Amateau.M.F, «Effects of seawater immersion on the impact resistance of glass fiber reinforced epoxy composites», Journal of composite materials, Vol 26, N° 14, 1992, <https://doi.org/10.1177/002199839202601407>.
- [187] Rapport technique, «Test sur les fibres de verre E et C», Laboratoire de l'usine de MAGHREB PIPE, M'sila, 2017.
- [188] Fiche technique, «Résine polyester insaturée», POLRES, Usine de GEPOS Bolgesi, 12, Cadde 34, Sok Gebze, Kocaeli, Turkey.
- [189] Norme ISO 1268-2, «Fibre-reinforced plastics, methods of producing test plates, part 2: contact and spray-up moulding», Editée par l'ISO (International Organization for Standardization), Mars 2001.
- [190] Norme ISO 2555, «Plastics, resins in the liquid state or as emulsions or dispersions, determination of apparent viscosity by the brookfield test method», Editée par l'ISO, septembre 1999.
- [191] Norme ASTM D 2584 - 11, «Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins», Editée par l'ASTM (American Society for Testing and Materials), United States American (USA), Novembre 2011.
- [192] Norme ISO 584, «Plastics, unsaturated-polyester resins, determination of reactivity at 80 degrees C», Editée par l'ISO, Décembre 1982.
- [193] Norme ISO 2535, «Plastics, unsaturated-polyester resins, measurement of gel time at ambient temperature», Editée par l'ISO, Juillet 2001.
- [194] Norme ASTM D 638-03, «Standard test methods for tensile properties of plastics», Editée par l'ASTM, United States American (USA), Décembre 2003.
- [195] Norme ASTM D 790-03, «Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials», Editée par l'ASTM, United States American (USA), Mars 2003.
- [196] Norme ASTM D2583-13a, «Standard test method for indentation hardness of rigid plastics by means of a barcol impressor», Editée par l'ASTM, United States American (USA), Septembre 2013.
- [197] Norme ASTM C 413-01, «Standard test method for absorption of chemical-resistant mortars, grouts, monolithic surfacings, and polymer concretes», Editée par l'ASTM, United States American (USA), May 2001.

- [198] Mekki.M, «L'utilisation du microscope électronique à balayage et les diffractions par rayons X dans l'étude des ciments et bétons», thèse doctorat d'état, département de génie civil, université Mohamed Khider, Biskra, 2003.
- [199] Mortier.E, Jager.S, Gerdolle.D et Dahoun.A, «La microscopie électronique à balayage environnementale: application à l'observation des tissus dentaires minéralisés», Actualités Odonto-Stomatologiques, N° 255, PP 221-229, 2011.
- [200] Serna.F, Lagneau.J et Carpentier.J.M, «La diffraction des rayons X: une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques», Chimie nouvelle, N° 116, 2014.
- [201] Gratien.A, «Spectroscopie ultraviolet-visible et infrarouge de molécules clés atmosphériques», thèse doctorat en science, sciences de l'univers et de l'environnement, université Paris12, France, 2008.
- [202] Teissier.T et Madet.N, «Infrarouge», Document technique, Université de Créteil-Paris 12, France, 2004.

Annexes

Tableau 01: Normes des essais sur le ciment et des ajouts minéraux.

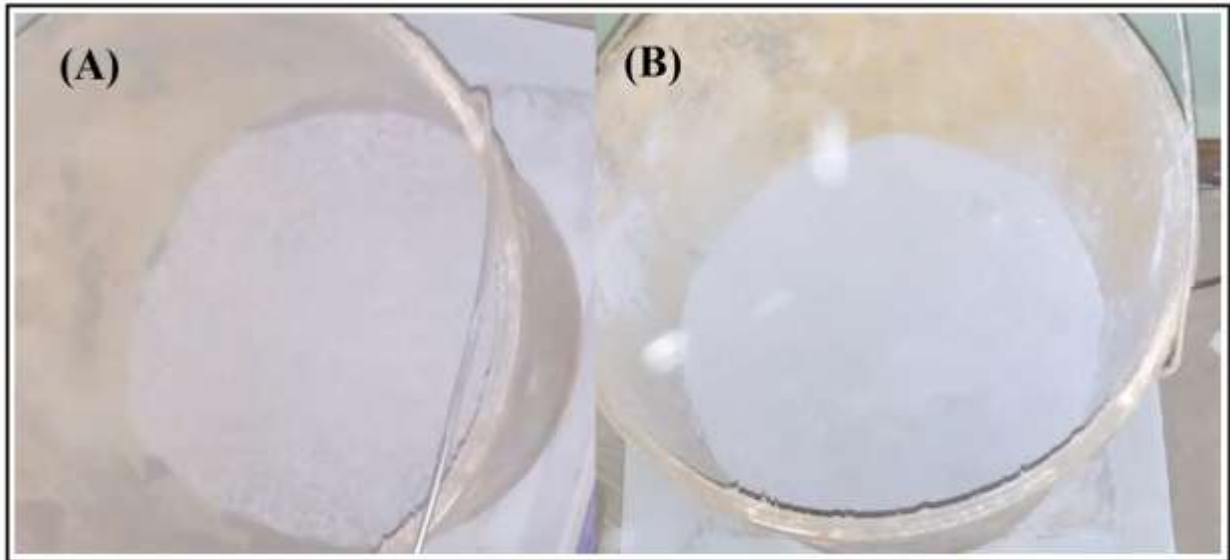
NF EN 196-2	Analyse chimique des ciments
NF EN 196-6	Surface spécifique de Blaine
NF EN 196-3	Détermination du temps de prise et de la stabilité
NF EN 196-1	Détermination des résistances mécaniques
NF P 15-476 (NF EN 196-6)	Détermination de la finesse
NF P18-502 (NF EN 13263-1)	Fumées de silice
NF P18-506 (NF EN 15167-1)	Laitier vitrifié moulu de haut-fourneau

Tableau 02: Normes des essais d'identification des granulats.

NF P 18-553 (NF EN 932-2)	Préparation d'un échantillon pour essais
NF P 18-555 (NF EN 1097-6)	La masse volumique apparente et absolue du sable
NF P 18-554 (NF EN 1097-3)	La masse volumique apparente et absolue des granulats
NF P 18-598 (NF EN 933-8)	Essaie d'équivalent de sable
NF P 18-591 (NF EN 13242)	Propreté superficielle des granulats
NF P 18-573 (NF EN 1097-2)	Essaie de los Angeles
NF P 18-572 (NF EN 1097-1)	Essaie d'usure micro-Deval
NF P 18-560 (NF EN 933-1)	Analyse granulométrique par tamisage
XP P 18-540	Détermination du module de finesse
NF P 15-461	Détermination du taux des carbonates et des insolubles
BS 1377/V1975	Détermination de la teneur des sulfates
BS BOWLY/V 1979	Détermination de la teneur en chlorures

Tableau 03: Normes pour la fabrication et les tests sur les échantillons en béton.

NF EN 934-2	Adjuvants pour béton (définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage)
XP P 18-303	Eau de gâchage pour béton
NF P18-427	Détermination des variations dimensionnelles entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci
NF EN 12390-1	Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules
NF EN 15422	Spécification des fibres de verre destinées au renforcement des mortiers et des bétons
NF P18-404 (NF EN 12390-2)	Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance
NF P18-452	Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres
NF P18-451 (NF EN 12350-2)	Essai d'affaissement
NF EN 12390-3	Résistance à la compression des éprouvettes
NF P18-407 (NF EN 12390-5)	Essai de traction par flexion
NF EN 1925	Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité



Figures (01): Ajouts minéraux: (A) Laitier de haut fourneau
(B) Fumée de silice.



(a) Préparation de l'échantillon 8/15 pour essais.



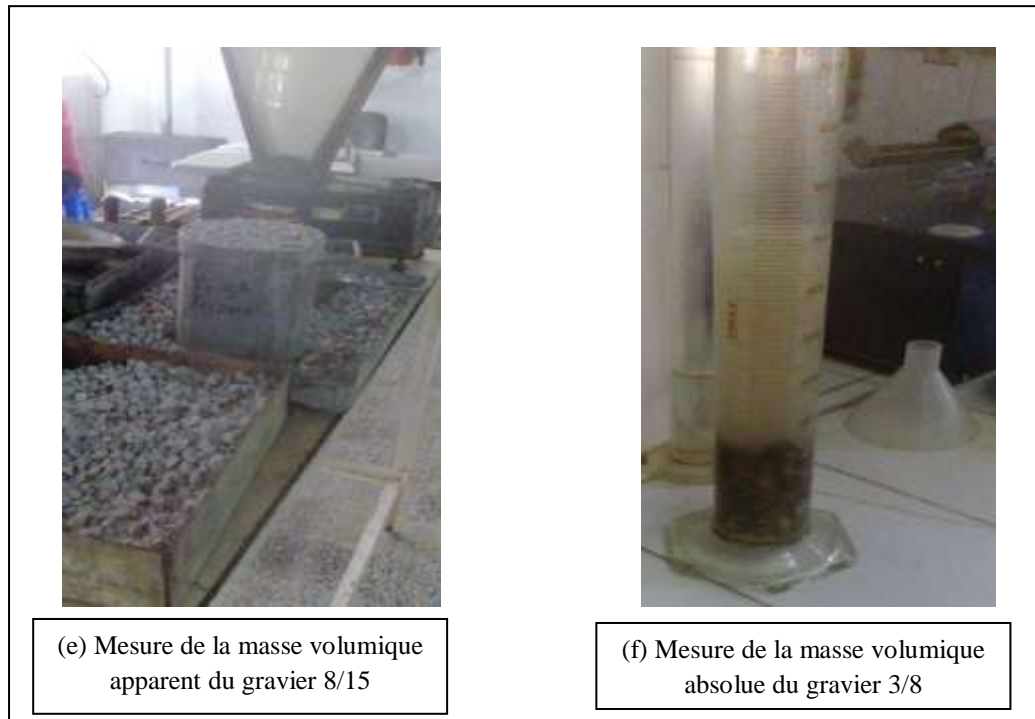
(b) Essai de propreté des granulats.



(c) Essai d'équivalent de sable.



(d) Analyses granulométrique du sable.



Figures (02): Essais d'identification des granulats.

Formulation du béton par la méthode de Dreux Gourrisse

1. Principe de la méthode

Cette méthode est la plus utilisée pour la confection du béton, elle est basée sur ces étapes:

- Tracer les courbes granulométriques du sable (S), du gravier 3/8 (G3/8) et du gravier 8/15 (G8/15), dans un plan d'axes orthonormé (d, T%) d'une échelle arithmétique.
- Tracer la courbe de référence de Dreux Gourrisse constituée d'une ligne brisée (OAB) ayant les abscisses suivantes: O (0,0) A (D/2, Y) B (D, 100%).

Avec; **D**: étant le grand diamètre des granulats, il est égal à **20mm**.

Y: est calculée suivant la relation suivante: $Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s$

K: facteur correctif qui dépend du dosage de ciment, l'énergie de serrage, et la nature et forme des granulats voir tableau (01).

D'après le tableau, pour un dosage de 400Kg/m^3 de ciment + fluidifiants, un granulats concassé et une vibration faible; on peut adopter un coefficient de correction égal à 0 ($K = 0$).

Ks: coefficient de correction supplémentaire, il est calculé en fonction du module de finesse du sable par la relation suivante: $K_s = 6M_f - 15 = 0$ Donc : $Y = 45,56\%$

Tableau (04): Coefficient correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de l'angularité des granulats.

Vibration du béton		Faible		Normale		Puissant	
		roulé	concassé	roulé	concassé	roulé	concassé
Dosage de ciment en Kg/m³	400 + fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	2	-2	0	-4	-2
	350	2	4	0	2	-2	0
	300	4	6	2	4	0	2
	250	6	8	4	6	2	4
	200	8	10	6	8	4	6

Tracer les lignes de partage joignant les points de 5% sur G3/8 et 95% sur S, de 5% sur G8/15 et 95% sur G3/8. Puis, les points d'intersection de cette ligne avec la courbe de référence, et la verticale de Joisel permettent les lectures des pourcentages de S, G3/8 et G8/15.

$$S = 29\% \quad G3/8 = 14\% \quad G8/15 = 57\%$$

2. Détermination de la quantité d'eau

D'après la figure (03) pour un dosage de 400Kg/m³ de ciment utilisé, et du rapport C/E est calculé comme suit: $f_c = GF_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \Rightarrow C/E = 3,11 \Rightarrow E = 128l$

Mais après correction de la formulation d'après les essais de convenance et ajustement de la maniabilité désirée par la mesure de l'affaissement à l'essai du cône d'Abrams, la quantité d'eau est modifiée pour devenir : $E = 168l$

3. Détermination le volume absolu des agrégats secs

Le volume granulats sec est calculé par la relation: $V_{sec} = 1000 - V_{eau} \Rightarrow V_{sec} = 832l$

4. Détermination du pourcentage de ciment

Pour un dosage de ciment de 400 Kg/m³, et de masse volumique de ciment de 3100 g/cm.

$$C = V_C / V_{sec} \Rightarrow C = 17,34\%$$

5. Détermination des pourcentages massiques des constituants

Le tableau (05) présente les pourcentages massiques finals des constituants de béton, après les calculs et l'utilisation de la méthode graphique de Dreux Gourisse.

Tableau (05): Masses des constituants du béton.

Ciment en (Kg)	308
Laitier en (Kg)	80
Fumée de silice en (Kg)	12
Sable en (Kg)	536,07
Gravier 3/8 en (Kg)	270,72
Gravier 8/15 en (Kg)	1134,70
Eau en (l)	168
Superplastifiant en (%)	1,50
E/L	0,42

Tableau (06): Résultats des essais de maniabilité du béton fibré.

S/G	0,4				0,5			
Ciment (Kg)	308	308	308	308	308	308	308	308
Laitier (Kg)	80	80	80	80	80	80	80	80
Fumée de silice (Kg)	12	12	12	12	12	12	12	12
Sable (Kg)	536,07	534,97	532,76	530,55	647,16	645,83	643,16	640,5
Gravier 3/8 (Kg)	270,72	270,16	269,05	267,93	249,32	248,81	247,78	246,75
Gravier 8/15 (Kg)	1134,7	1132,36	1127,69	1123,01	1045,01	1042,85	1038,55	1034,24
Superplastifiant (%)	1,5				1,5			
Fibres (Kg)	0	4	12	20	0	4	12	20
E/L	0,42				0,42			
Temps d'écoulement t (S)	-	14,89	12,94	13,46	-	11,12	10,96	15,90
S/G	0,6				0,7			
Ciment (Kg)	308	308	308	308	308	308	308	308
Laitier (Kg)	80	80	80	80	80	80	80	80
Fumée de silice (Kg)	12	12	12	12	12	12	12	12
Sable (Kg)	728,06	726,56	723,559	720,56	799,44	797,79	794,5	791,2
Gravier 3/8 (Kg)	233,74	233,26	232,293	231,33	219,99	219,54	218,63	217,72
Gravier 8/15 (Kg)	979,69	977,68	973,638	969,6	922,06	920,16	916,36	912,57
Superplastifiant (%)	1,5				1,5			
Fibres (Kg)	0	4	12	20	0	4	12	20
E/L	0,42				0,42			
Temps d'écoulement t (S)	-	8,92	9,43	11,97	-	10,51	12,39	17,05
S/G	0,8							
Ciment (Kg)	308	308	308	308				
Laitier (Kg)	80	80	80	80				
Fumée de silice (Kg)	12	12	12	12				
Sable (Kg)	862,88	861,11	857,55	854				
Gravier 3/8 (Kg)	207,77	207,34	206,48	205,63				
Gravier 8/15 (Kg)	870,84	869,04	865,46	861,87				
Superplastifiant (%)	1,5							
Fibres (Kg)	0	4	12					
E/L	0,42							
Temps d'écoulement t (S)	-	13,42	16,78	-				



(a) Huiler les moules avant le coulage



(b) Béton après malaxage.



(c) Mesure l'affaissement du béton.



(d) Remplir des éprouvettes en béton fibré



(e) Epreuves du béton durci.

Figure (03): Confection des éprouvettes en béton au laboratoire LEC.

Tableau (07): Normes des essais sur les fibres de verre.

ISO 3374	Détermination de la masse surfacique ou grammage
ISO 3344	Détermination du taux d'humidité
ISO 1887	Détermination de la teneur en matières combustibles

Tableau (08): Normes des essais sur la résine polyester insaturée.

ISO 2555	Détermination de la viscosité apparente selon le Procédé Brookfield
ISO 584	Détermination conventionnelle de la réactivité
ISO 2535	Mesurer du temps de gel à température ambiante

Tableau (09): Normes de caractérisation des échantillons en PRV.

ISO 1268-2	Méthode de fabrication de plaques d'essai (moulage au contact et par projection)
ASTM D 2584-11	Méthode d'essai standard pour la perte d'inflammation des résines renforcées durcies
ASTM D 638-03	Méthodes d'essai standard pour déterminer les propriétés de traction des plastiques
ASTM D 790-03	Méthodes d'essai normalisées pour déterminer les propriétés de flexion des plastiques non renforcés et renforcés
ASTM D2583-13a	Méthode d'essai standard pour la dureté de pénétration des plastiques rigides au moyen d'un imprimeur Barcol
ASTM C 413-01	Méthode d'essai standard pour l'absorption des mortiers, coulis, revêtements monolithiques et bétons polymères résistants aux produits chimiques

Tableau (10): Analyses chimiques du laitier de haut fourneau et de la fumée de silice.

Constituants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Paf
Laitier (%)	38,75	7,55	2,05	40,15	2,35	10,72
Fumée de silice (%)	93,21	1,26	1,98	1,87	0,48	3,07

Tableau (11): Résultats des tests sur les fibres de verre types E et C au laboratoire MAGHREB PIPE.

Echantillons	Masse surfacique (g/m ²)	
	Combo mat verre E	Mat Verre C
01	928,30	25,68
02	946,20	25,85
03	940,40	25,78
Moyenne	938,30	25,77
Ecart type	4,25%	1,07%
Spécifique	±10%	±10%
Remarque	C.V	C.V
Echantillons	Taux d'humidité (%)	
	Combo mat verre E	Mat Verre C
01	0,1077	2,30
02	0,1163	1,20
03	0,1063	1,40
Moyenne	0,110%	1,70%
Spécifique	< 1,20%	1,4 - 6%
Remarque	C.V	C.V
Echantillons	Teneur en matières combustibles (ensimage) (%)	
	Combo mat verre E	Mat Verre C
01	2,081	6,60
02	2,095	7,50
03	2,118	6,80
Moyenne	2,098	6,90
Spécifique	1,40 - 6%	5,5 – 8,50%
Remarque	C.V	C.V

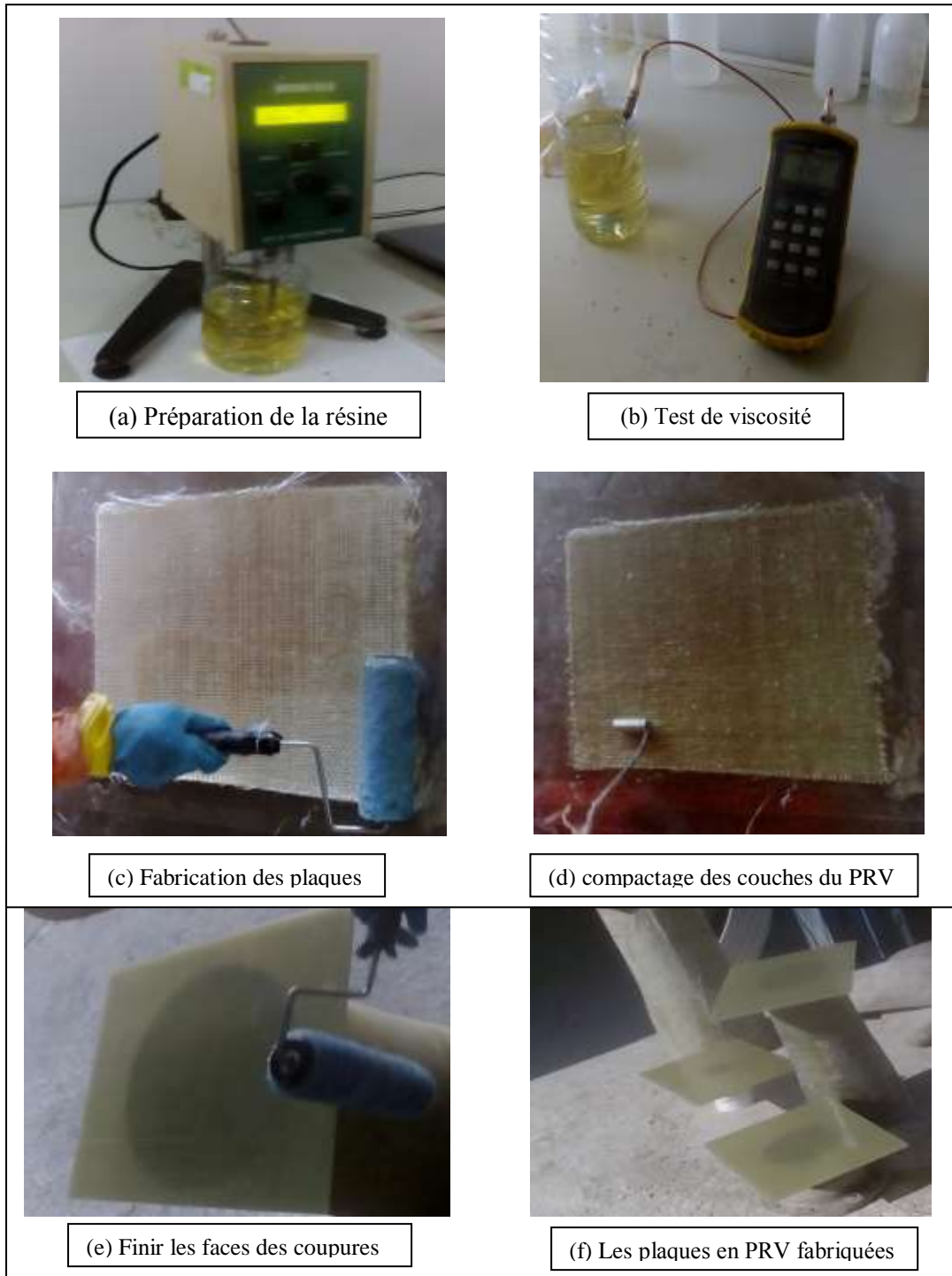


Figure (04): Etapes de confection des plaques en PRV dans différents milieux.

Tableau (12): Résultats des essais mécaniques et physico-chimiques sur les échantillons en béton.

<u>Résistance à la compression</u>								
	T0	T1	T3	T5	EM0	EM1	EM3	EM5
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	37,15±4,50	45,15±2,67	47,36±3,80	40,32±0,84	38,44±4,21	45,88±2,47	41,97±3,32	40,1±0,75
90	46,15±1,92	47,25±2,32	47,4±1,25	45,51±1,59	42,26±3,53	50,42±2,84	41,20±1,42	43,15±2,12
180	49,47±3,73	50,46±3,94	57,88±4,64	47,29±4,32	50,89±2,25	54,82±1,94	54,97±0,24	54,23±0,52
365	58,9±1,31	67,66±1,66	67,95±2,57	59,09±0,62	52,53±3,89	46,06±2,86	49,67±1,34	53,66±1,07
<u>Résistance de flexion</u>								
	T0	T1	T3	T5	EM0	EM1	EM3	EM5
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	6±0,01	6,06±0,37	6,33±0,15	5,88±0,55	5,94±0,78	6,35±0,34	6,92±0,65	6,31±0,31
90	6,37±0,12	6,61±0,18	6,67±0,27	6,14±0,97	6,96±0,75	7,45±0,64	8,31±0,71	7,37±0,50
180	6,86±0,29	7,14±0,38	7,53±0,53	6,18±0,81	9,47±0,76	10,49±0,75	9,67±0,53	8,45±0,20
365	7,19±0,35	7,78±0,20	7,90±0,22	8,2±0,08	10,92±0,38	11,88±0,76	11,86±0,40	10,39±0,16
<u>Absorption capillaire</u>								
	T0	T1	T3	T5	EM0	EM1	EM3	EM5
30	0,64±0,05	0,72±0,06	1,01±0,03	1,01±0,05	0,97±0,09	1,11±0,05	1,17±0,08	1,51±0,06
90	0,55±0,02	0,55±0,00	0,64±0,08	0,60±0,09	0,75±0,06	0,77±0,04	0,87±0,07	1,23±0,08
180	0,19±0,01	0,25±0,01	0,38±0,05	0,39±0,04	0,38±0,04	0,43±0,02	0,49±0,11	0,68±0,10
365	0,13±0,06	0,16±0,03	0,19±0,05	0,20±0,03	0,36±0,09	0,43±0,00	0,42±0,07	0,54±0,10
<u>Masses des éprouvettes</u>								
	T0	T1	T3	T5	EM0	EM1	EM3	EM5
180	2,54±0,01	2,5±0,07	2,48±0,03	2,44±0,11	2,47±0,04	2,43±0,02	2,51±0,07	2,4±0,06
365	2,62±0,10	2,51±0,05	2,5±0,06	2,47±0,04	2,49±0,11	2,45±0,05	2,49±0,03	2,43±0,09

<u>Profondeur de carbonatation</u>								
	T0	T1	T3	T5	EM0	EM1	EM3	EM5
30	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	0	0	0	0	0	0	0
365	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau (13): Résultats des essais mécaniques et physico-chimiques sur les échantillons en PRV.

<u>Traction axiale</u>									
	Contraintes			Modules d'élasticités			Déformations		
	T	EP	EM	T	EP	EM	T	EP	EM
0	142,49±14,43	142,49±14,43	142,49±14,43	2218,6±219,80	2218,6±219,80	2218,6±219,80	6,89±0,64	6,89±0,64	6,89±0,64
30	142,49±14,43	157,43±16,48	160,43±8,36	2218,6±219,80	2630±135	2485±83,33	6,89±0,64	7,28±0,88	8,25±0,33
90	142,49±14,43	172,78±15,22	147,35±1,48	2218,6±219,80	2100±70	2262,5±190	6,89±0,64	7,85±0,36	6,41±0,15
180	142,49±14,43	157,42±8,94	176,13±6,02	2218,6±219,80	2000±133,33	2425±180	6,89±0,64	7,38±0,23	7,22±0,42
365	142,49±14,43	156,03±9,63	162,05±15,03	2218,6±219,80	2050±100	2340±124	6,89±0,64	7,03±0,36	6,74±0,34

<u>Flexion trois points</u>									
	Contraintes			Modules d'élasticités			Déformations		
	T	EP	EM	T	EP	EM	T	EP	EM
0	204,91±13,62	204,91±13,62	204,91±13,62	7181,25±200,62	7181,25±200,62	7181,25±200,62	3,68±0,28	3,68±0,28	3,68±0,28
30	204,91±13,62	233,94±11,05	207,85±10,25	7181,25±200,62	7170±224	6850±225	3,68±0,28	3,94±0,17	3,78±0,22
90	204,91±13,62	265,56±9,55	208,48±16,73	7181,25±200,62	8270±218	7100±320	3,68±0,28	3,62±0,10	3,12±0,18
180	204,91±13,62	203,86±8,56	227,84±15,11	7181,25±200,62	7187,5±175	7480±77,50	3,68±0,28	3,07±0,04	3,4±0,21
365	204,91±13,62	222,55±7,15	225,37±13,04	7181,25±200,62	7800±280	7750±200	3,68±0,28	3,74±0,28	3,54±0,25

Annexes

<u><i>Absorption d'eau</i></u>				<u><i>Dureté de Barcol</i></u>			
	<i>T</i>	<i>EP</i>	<i>EM</i>		<i>T</i>	<i>EP</i>	<i>EM</i>
0	0,29±0,05	0,29±0,05	0,29±0,05	0	44,4±2,64	44,4±2,64	44,4±2,64
90	0,29±0,05	0,42±0,05	0,57±0,26	30	44,4±2,64	42,33±1,78	42,33±1,80
180	0,29±0,05	0,33±0,07	0,45±0,11	90	44,4±2,64	45,67±0,42	42,33±0,44
365	0,29±0,05	0,15±0,05	0,19±0,12	180	44,4±2,64	43,25±1,75	44,33±0,89
				365	44,4±2,64	44,33±0,89	44,00±1,67